



Observatorio de
Transición Justa
de Asturias



Observatorio de Transición Justa de Asturias



Principado de
Asturias



FAEN

Fundación Asturiana
de la Energía

EÓLICA MARINA. RETOS.

TABLA DE CONTENIDO

1.	INTRODUCCIÓN.....	3
2.	TENDENCIAS CLAVE.....	4
3.	INNOVACIÓN.....	6
3.1	TECNOLOGÍA.....	6
3.2	MATERIALES.....	17
3.3	INDUSTRIA.....	25
3.4	PROFESIONALES Y FORMACIÓN.....	31
3.5	LOGÍSTICA.....	32
4.	SOCIEDAD, ECONOMÍA Y MEDIO AMBIENTE.....	35
4.1	GOBERNANZA MULTINIVEL.....	35
4.2	PLANIFICACIÓN ESPACIAL MARINA INTEGRADA.....	37
4.3	SOSTENIBILIDAD AMBIENTAL.....	37
4.4	ACEPTACIÓN SOCIAL Y LA PARTICIPACIÓN.....	39
4.5	DESARROLLO TERRITORIAL Y LA CREACIÓN DE VALOR LOCAL.....	41
5.	CONCLUSIONES.....	42
6.	BIBLIOGRAFIA.....	45

1. INTRODUCCIÓN.

La energía eólica marina se ha consolidado como uno de los vectores más relevantes de la transición energética europea. Para Asturias ofrecer una solución estratégica a largo plazo. Desde la perspectiva energética, su desarrollo abre la posibilidad de complementar la generación renovable terrestre con una fuente de alta capacidad y mayor número de horas de producción (más producción, más capacidad de gestión de la red y más diversificación del mix energético), reduciendo la dependencia de combustibles fósiles y aportando firmeza al sistema eléctrico. Esta reflexión exige un análisis de planificación a largo plazo (décadas), considerando escenarios de demanda, redes de evacuación y acoplamiento con otros vectores como el hidrógeno verde que pueda producirse, especialmente en la región.

Desde el punto de vista industrial, Asturias parte de una posición de ventaja relativa para la eólica marina, gracias a su tradición siderúrgica, metalmecánica y naval, así como a la capacidad logística e industrial de sus puertos (El Musel y Avilés), para acoger el ensamblaje, transporte, acopio o la operación de grandes componentes. El desarrollo de parques eólicos marinos y de plataformas flotantes podría dinamizar cadenas de valor existentes (acero, estructuras, calderería pesada, fabricación de componentes) y atraer inversiones en nuevas actividades (fabricación de cimentaciones flotantes, torres, sistemas eléctricos y de control). A largo plazo, la cuestión estratégica no es solo “si” habrá eólica marina, sino “qué rol” puede y aspira a ocupar Asturias en esa cadena de valor, que pueden ir desde ser: ninguno, ser un mero punto de paso logístico, o ser nodo industrial especializado capaz de exportar tecnología, servicios y componentes.

La dimensión innovadora es igualmente central. La costa asturiana, por sus profundidades y condiciones de viento y oleaje, obliga a desarrollar tecnologías flotantes. Esto convierte a Asturias en un “laboratorio natural” para la demostración de soluciones avanzadas: nuevos diseños de plataformas flotantes, sistemas de anclaje y fondeo, integración con producción de hidrógeno offshore, digitalización de la operación y mantenimiento o monitorización ambiental de alta resolución. Universidades, centros tecnológicos y empresas pueden posicionarse en nichos de I+D donde la experiencia acumulada se convierta en una ventaja competitiva exportable.

En cuanto a los recursos humanos, la eólica marina se sitúa en la intersección de varias competencias profesionales ya presentes en Asturias: soldadura y calderería avanzada, operación portuaria, mantenimiento industrial, ingeniería naval, eléctrica y civil, además de capacidades TIC para monitorización y control. Sin embargo, la escala y especificidad de este sector exigirán un esfuerzo sostenido de capacitación y formación especializada: técnicos en montaje offshore, especialistas en seguridad marítima, operadores de drones y robots para inspección, ingenieros con conocimiento de diseño de estructuras flotantes y dinámica marina, entre otros perfiles. Desde una óptica de largo plazo, la cuestión estratégica no es solo cubrir la

demanda puntual de mano de obra de un proyecto concreto, sino construir un “ecosistema de talento” capaz de abastecer un flujo continuo de proyectos propios y externos.

La posible afección a la pesca y al medio ambiente introduce un componente crítico en la reflexión estratégica, especialmente en un litoral con fuerte identidad marinera y pesquera. La implantación de parques eólicos marinos puede generar conflictos de uso del espacio marino, debiendo analizar las alteraciones en caladeros, los cambios en dinámicas de navegación y las preocupaciones sobre impacto paisajístico y sobre fauna marina (aves, mamíferos, comunidades bentónicas). A la vez, existen experiencias internacionales donde, con una planificación cuidadosa, diálogo temprano con el sector pesquero y medidas de gestión adaptativa, se han conseguido modelos de coexistencia, incluso con efectos positivos en forma de áreas de refugio para ciertas especies alrededor de las estructuras. El reto, en el caso asturiano, es abordar esta cuestión no como un trámite al final del proceso, sino como un eje central de diseño de los proyectos, incorporando la mejor ciencia disponible, sistemas de monitorización continua e instrumentos de compensación y cogestión con el sector pesquero y las comunidades costeras.

En el plano estrictamente ambiental, más allá de la pesca, la eólica marina debe evaluarse integrando el análisis de su ciclo de vida completo, comparado con las alternativas fósiles que contribuye a desplazar. La huella de carbono de la fabricación de estructuras, el impacto en fondos marinos, el posible efecto sobre rutas migratorias de aves y sobre cetáceos, así como los riesgos asociados a la fase de construcción y desmantelamiento, deben estudiarse con horizontes temporales amplios y bajo escenarios de múltiples parques operando simultáneamente. Deben compararse las actividades renovables con el ciclo de las fósiles, que incluyen la explotación de yacimientos de petróleo, gas o carbón, su almacenamiento, transporte y procesamiento en refinerías, y finalmente su uso en transporte, edificación o industria. A largo plazo, la pregunta estratégica no es únicamente si la eólica marina es “buena” o “mala” para el medio ambiente, sino qué modelo de implantación permite maximizar sus beneficios climáticos y socioeconómicos minimizando impactos locales irreversibles.

2. TENDENCIAS CLAVE.

La energía eólica marina está entrando en una nueva fase de desarrollo. Si la primera etapa estuvo marcada por la implantación de parques en aguas poco profundas con cimentaciones fijas, una próxima evolución estará definida por la expansión de los parques hacia aguas profundas, con un aumento del tamaño de los aerogeneradores y la más que posible integración con otros vectores energéticos como el hidrógeno renovable.

Esta evolución implica nuevos desafíos tecnológicos, industriales y logísticos que obligan a replantear el diseño de los aerogeneradores, las plataformas flotantes, las redes eléctricas marinas y las cadenas de suministro. La eólica marina se convierte así en un campo intensivo en innovación, donde confluyen la ingeniería naval, la ciencia de materiales, la digitalización y la planificación energética.

La próxima generación de parques eólicos marinos estará marcada por desarrollos tecnológicos que buscan instalar turbinas más grandes, operar en aguas más profundas y reducir costes operativos. En resumen, buscan reducir el coste nivelado de la energía (LCOE¹) y permitir la explotación de recursos eólicos en zonas hasta ahora inaccesibles.

Un factor clave será la innovación, que marcará cómo evolucionarán los costes y la rentabilidad de las inversiones, especialmente en un campo que cambia constantemente. Vamos a hacer un repaso a los principales factores de innovación, productivos y humanos que van a condicionar la evolución del sector, así como una aproximación a la actividad industrial que arrastra esta tecnología, clasificada en cinco grandes categorías que se centran en:

- Tecnologías eólicas marinas avanzadas.
- Materiales.
- Procesos de fabricación.
- Logística.
- Perfiles profesionales.



Ilustración 1. Esquema del ecosistema tecnológico de la eólica marina. Imagen generada con IA.

Otro factor clave es ordenación del territorio, aceptación social y sostenibilidad ambiental. En este contexto, la gobernanza se convierte en un elemento clave para garantizar un desarrollo

¹ El Coste Nivelado de Energía (LCOE, por sus siglas en inglés) es el valor presente neto del coste unitario de la electricidad generada por una planta durante su vida útil. Representa el precio promedio al que debe venderse la energía para cubrir los costes de construcción, operación, mantenimiento y combustible, siendo fundamental para comparar la competitividad de diferentes tecnologías energéticas

equilibrado, eficiente y alineado con los intereses del conjunto de la sociedad. Los aspectos clave en el desarrollo de la eólica marina en el futuro serán:

- Gobernanza multinivel.
- Planificación espacial marina integrada.
- Sostenibilidad ambiental.
- Aceptación social y la participación.
- Desarrollo territorial y la creación de valor local.

3. INNOVACIÓN.

Estas innovaciones buscan reducir el coste nivelado de la energía (LCOE²) y permitir una mejor y mayor explotación de recursos eólicos. En cada elemento del propio ecosistema se pueden presentar líneas de innovación específicas, que a continuación se analizan.

3.1 TECNOLOGÍA.

3.1.1 EÓLICA FLOTANTE. ESTRUCTURAS.

La eólica marina flotante se encuentra en una fase de transición, que podría definirse entre demostración tecnológica y despliegue precomercial. A diferencia de la eólica fija, desarrollada comercialmente hasta profundidades máximas de 60–70 metros, las plataformas flotantes permiten explotar recurso eólico en aguas profundas, donde el potencial energético es significativamente mayor. Actualmente, las tres tipologías principales —semisumergibles, tipo spar y tension-leg platforms (TLP)— presentan distintos grados de madurez tecnológica:

- Las plataformas semisumergibles son las más extendidas en proyectos piloto y precomerciales debido a su estabilidad y facilidad de instalación.
- Las plataformas tipo spar, basadas en un diseño de cilindro vertical lastrado, han demostrado alta estabilidad en condiciones oceánicas severas, como en el proyecto Hywind (Equinor).
- Las TLP, aún en menor grado de madurez, ofrecen ventajas en reducción de movimiento estructural mediante sistemas de amarre tensionados, aunque requieren soluciones de instalación más complejas (DNV, 2021).

² El Coste Nivelado de Energía (LCOE, por sus siglas en inglés) es el valor presente neto del coste unitario de la electricidad generada por una planta durante su vida útil. Representa el precio promedio al que debe venderse la energía para cubrir los costes de construcción, operación, mantenimiento y combustible, siendo fundamental para comparar la competitividad de diferentes tecnologías energéticas



Figura 16. Tecnologías de eólica flotante: (a) plataforma de apoyo en tensión (TLP), (b) plataforma semi-sumergible y (c) monopilar flotante o "spar". Fuente: MITECO-IDAE



Ilustración 2. Imagen de aerogenerador marino generada por IA y de tecnologías flotantes³.

El desarrollo de plataformas flotantes presenta retos tecnológicos significativos en múltiples ámbitos:

- Dinámica estructural resultante del acoplamiento de cargas. El comportamiento combinado de viento, oleaje y corrientes genera cargas complejas que afectan a la integridad estructural y la producción energética, lo que unido a la respuesta estructural y deformaciones del aerogenerador, compuesto de diferentes materiales y de los distintos movimientos a los que está sometido, complican la operación de la máquina. La modelización avanzada sigue siendo un desafío clave en el desarrollo de cada tecnología, que está muy influenciada por las características del emplazamiento en el que se ubica cada máquina. Estos modelos integrados se validan mediante datos experimentales en proyectos internacionales, asegurando la precisión en el diseño de nuevas turbinas.
- Sistemas de fondeo y amarre. Son elementos especialmente relevantes en TLP, donde las tensiones en líneas de amarre son críticas. Se requieren materiales avanzados y configuraciones optimizadas para garantizar estabilidad y durabilidad. En todos ellos se pueden encontrar aspectos clave de innovación ligados a adaptación al terreno (es crucial realizar un estudio geotécnico del lecho marino para elegir el tipo de anclaje adecuado); estabilidad de las plataformas (los sistemas de amarre deben controlar los movimientos de las plataformas para garantizar la operación del aerogenerador); o el diseño dinámico (los sistemas de fondeo deben diseñarse para la vida útil del parque). Se pueden encontrar trabajos en desarrollo sobre elementos como:
 - Anclas de Arrastre (Drag Embedment): Las más comunes, diseñadas para penetrar en el fondo marino y resistir cargas horizontales.
 - Pilotes Hincados o Perforados: Utilizados en terrenos rocosos o muy duros donde se requiere alta capacidad de retención.
 - Amarre por Catenaria: Las líneas forman una curva bajo el agua, donde el peso de la propia línea ayuda a amortiguar los movimientos de la plataforma.

³ Fuente: https://www.miteco.gob.es/es/ministerio/planes-estrategias/desarrollo-eolica-marina-energias/eshreolicamarina-pdfaccesiblev5_tcm30-534163.pdf



- Tendones Pretensados (TLP): Utilizados en plataformas de patas tendidas, donde los tendones verticales mantienen la plataforma en tensión para reducir la oscilación.
- Escalabilidad industrial. El aumento del tamaño de los aerogeneradores (15–20 MW) exige rediseñar plataformas para soportar mayores cargas y momentos flectores. Además, estos grandes aerogeneradores están transformando la economía del sector al obligar a aumentos de factores de capacidad y reducir el costo nivelado de la energía (LCOE). Por otro lado, ante la limitación de profundidad en ciertas costas, la eólica flotante es la gran apuesta tecnológica en zonas como España. Aunque la capacidad industrial pueda estar preparada en nuestro país para multiplicar la producción (se estiman posibilidades de multiplicar por 25 las actuales capacidades), el cuello de botella de la industria puede presentarse en aspectos técnicos y logísticos en alta mar. Otro factor relevante en la escalabilidad será la competencia internacional, donde China se ha posicionado fuertemente como segundo mercado mundial, mientras Europa mantiene su liderazgo en experiencia, concentrada en Reino Unido, Alemania, Holanda y Dinamarca. La evolución del mercado alemán evidencia que el objetivo es hacer la tecnología competitiva frente a las fuentes convencionales y que los márgenes son cada vez más ajustados en la fabricación, lo que condiciona el desarrollo y la operativa de plantas industriales de fabricación.
- Costes (CAPEX y OPEX) y LCOE. Aunque la eólica flotante tiene un enorme potencial, sus costes siguen siendo elevados frente a tecnologías fijas, especialmente cuando se analizan los costes fijos de cimentación, infraestructura de evacuación de electricidad y costes de operación y mantenimiento. La industrialización y estandarización son claves para reducir todos estos costes, pero la demanda de materias primas y factores como la inflación o la presión de demanda de materias críticas o estratégicas impulsan al alza el LCOE, reduciendo su competitividad. Más específicamente, los costes de operaciones realizadas en alta mar impulsan el desarrollo de actividades portuarias relacionadas con ensamblaje y de sistemas autónomos de inspección.

En el desarrollo de estas tecnologías participa un amplio número de empresas de muy diversa índole, como Equinor (plataformas spar, proyecto Hywind), Iberdrola (proyectos flotantes en desarrollo), Ørsted (expansión hacia eólica flotante), Principle Power (tecnología WindFloat, semisumergible), SBM Offshore (soluciones flotantes derivadas del sector *oil & gas*), Aker Solutions (estructuras offshore avanzadas), Navantia (fabricación de estructuras flotantes), Sif Group (componentes estructurales), EEW Group (cimentaciones y estructuras).

Empresas con centros de producción ubicados en Asturias como Arcelor-Mittal, Windar, Dacero, Dea Astúrica, Idesa, Asturfeito, Gondán o Armón entre otras, los Puertos de Avilés y Gijón, o la propia FAEN deben mantener una vigilancia permanente de la evolución tecnológica y de sus propias capacidades industriales y de conocimiento para garantizar la competitividad de sus centros de producción, ya que son numerosas las iniciativas de empresas que están impulsando la transición desde prototipos hacia soluciones industrializadas.

Otros agentes clave en el desarrollo son los centros tecnológicos y de investigación y las universidades, que impulsan el avance tecnológico en plataformas flotantes. Entre los más destacados se encuentran el National Renewable Energy Laboratory (NREL, EE. UU.), el Norwegian University of Science and Technology (NTNU), el SINTEF Ocean (Noruega), el Fraunhofer IWES (Alemania), el Offshore Renewable Energy Catapult (Reino Unido) o el DTU Wind Energy (Dinamarca). Estos centros trabajan en modelización avanzada, ensayos en tanque, validación estructural y digitalización (gemelos digitales, simulación, etc.).

De la actividad industrial asturiana con base en metalurgia pesada y fabricación de grandes estructuras, con conocimiento del sector *offshore*, los astilleros con fabricación orientada a la eólica marina, y la fuerte experiencia en bienes de equipo y soldadura avanzada pueden surgir líneas de colaboración en áreas como:

- Desarrollo de subestructuras flotantes.
- Participación en proyectos piloto de eólica flotante.
- Integración en la cadena de suministro de plataformas semisumergibles.
- Desarrollo de nuevos materiales anticorrosión adaptados al ámbito de cada proyecto.
- Participación en proyectos de innovación, investigación y desarrollo en eólica flotante.
- Colaboración con centros tecnológicos en simulación y digitalización.
- Adaptación de puertos como hubs logísticos para ensamblaje y remolque de plataformas.
- Evaluación de recursos e impacto tecnológico a través de vigilancia tecnológica y análisis de competitividad.

3.1.2 AEROGENERADORES DE GRAN POTENCIA.

Las máquinas eólicas están experimentando un rápido proceso de escalado tecnológico, con aerogeneradores que ya superan los 15 MW y prototipos en desarrollo que alcanzan o superarán los 20 MW en los próximos años. Este crecimiento responde a la necesidad de reducir el coste nivelado de la energía (LCOE) mediante el aumento de la producción unitaria y la reducción del número de turbinas por parque.

Fabricantes europeos como Siemens Gamesa Renewable Energy (SGRE), Vestas y GE Vernova han desarrollado plataformas de gran potencia como la SG 14-236 DD, la V236-15.0 MW o la Haliade-X (12–14 MW), que incorporan rotores de más de 220 metros de diámetro y palas superiores a los 100 metros (WindEurope, 2023). Este salto tecnológico implica avances significativos en diseño estructural, materiales compuestos, electrónica de potencia y sistemas de control. Por otro lado, fabricantes chinos han desarrollado máquinas de hasta 26 MW con palas de 153 m de longitud, lo que genera una carrera de escalado de máquina compleja para los suministradores de la cadena industrial.



Ilustración 3. Comparativa de tamaños sobre el horizonte⁴.

El desarrollo de aerogeneradores de gran potencia plantea desafíos críticos en múltiples dimensiones:

- Escalado estructural y cargas extremas. El incremento del tamaño del rotor genera mayores cargas aerodinámicas y estructurales, especialmente en condiciones offshore. La fatiga de materiales y la integridad estructural son aspectos clave.
- Diseño de palas de gran longitud. Las palas de más de 100 metros requieren materiales avanzados (fibra de carbono, resinas híbridas) para aligerar el peso, mantener la resistencia estructural y evitar deformaciones excesivas.
- Transmisión y electrónica de potencia. La tendencia hacia generadores *direct drive*⁵ elimina multiplicadoras, pero exige sistemas eléctricos más complejos, convertidores de alta capacidad y soluciones avanzadas de refrigeración.
- Integración de estructuras mixtas acero-hormigón. El aumento de altura de buje y tamaño de los aerogeneradores está impulsando el desarrollo de torres híbridas acero-hormigón, combinando tramos inferiores de hormigón con secciones superiores de acero. Estas soluciones permiten optimizar costes, mejorar el comportamiento dinámico y facilitar el transporte mediante segmentación. Sin embargo, presentan retos técnicos relevantes, como el diseño de uniones acero-hormigón (bridas híbridas, conectores de corte), la durabilidad en ambiente marino —especialmente en la interfase— y la necesidad de procesos industrializados de fabricación y montaje. Asimismo, el comportamiento dinámico de estas estructuras requiere de análisis previos con herramientas avanzadas de simulación y una posterior validación experimental.

⁴ Simulación generada por IA comparando de la visión a tamaño real de una máquina eólica de 250 m de altura a 20 km de la costa y la Luna sobre un horizonte despejado.

⁵ Los generadores *direct drive* o de accionamiento directo en eólica marina no usan engranajes para elevar la velocidad de rotación de la pala a la requerida en el generador eléctrico. La generación eléctrica se hace a bajas revoluciones usando máquinas síncronas de gran tamaño con imanes permanentes acopladas directamente al eje de la máquina

- Instalación y logística. El transporte e instalación de componentes de gran tamaño (palas, góndolas y secciones de torre) representa uno de los principales cuellos de botella, requiriendo buques especializados y puertos adaptados.
- Operación y mantenimiento. El acceso a turbinas offshore de gran tamaño en alta mar incrementa los costes de mantenimiento, impulsando el uso de digitalización, mantenimiento predictivo y robótica para reducir las operaciones in situ.

En el desarrollo de aerogeneradores de gran potencia, en Europa, participan grandes fabricantes y una extensa cadena de suministro, como Siemens Gamesa Renewable Energy (SGRE), Vestas Wind Systems, GE Vernova, LM Wind Power (fabricación de palas), TPI Composites (componentes de palas), ABB y Hitachi Energy (electrónica de potencia y sistemas eléctricos), SKF (rodamientos de gran tamaño), Enercon (tecnología direct drive y torres híbridas), Ramboll (diseño estructural offshore), Arup (ingeniería avanzada de estructuras híbridas) entre otras.

En el ámbito de los centros tecnológicos y de investigación, el desarrollo tecnológico de aerogeneradores de gran potencia se apoya en una red internacional de centros de referencia como *National Renewable Energy Laboratory* (NREL, EE. UU.), *Fraunhofer Institute for Wind Energy Systems* (IWES, Alemania), *Technical University of Denmark* (DTU Wind Energy), TNO (Países Bajos). Las líneas de investigación más relevantes son la modelización de la elasticidad de la máquina (OpenFAST, HAWC2), el ensayo de palas de gran longitud, la optimización de estructuras híbridas acero-hormigón o la digitalización y gemelos digitales para operación offshore.

Asturias presenta capacidades relevantes para integrarse en futuras cadenas de valor relacionadas con aerogeneradores de gran potencia en ámbito marino, especialmente las relacionadas con grandes componentes estructurales, prefabricados de hormigón con potencial adaptación a torres híbridas, o algunas áreas de fabricación avanzada y mecanizado. De especial importancia pueden llegar a ser soluciones de unión acero-hormigón adaptadas a ambiente marino, aplicación de tecnologías digitales para monitorización de estructuras o la simulación avanzada en comportamiento dinámico y eléctrico de máquinas. La infraestructura portuaria puede optar a participar en estas cadenas para ensamblaje o logística de grandes componentes segmentados (incluido hormigón y acero).

3.1.3 PARQUES HÍBRIDOS OFFSHORE.

Los parques híbridos offshore pueden representar una evolución natural de la eólica marina hacia sistemas energéticos más integrados, donde la generación eléctrica se combina con otros vectores como el hidrógeno renovable, el almacenamiento energético o la energía solar flotante. Conceptualmente, esta solución responde a la necesidad de optimizar el uso de las inversiones realizadas en infraestructura asociada a la eólica offshore, mejorar la capacidad de gestión de la energía eléctrica generada con renovables y reducir las limitaciones asociadas a la evacuación eléctrica.



Ilustración 4. Concepto de la hibridación de actividades en torno a la eólica marina (generada por IA).

Actualmente, existen varios proyectos piloto y en fase de desarrollo que integran producción de hidrógeno mediante electrólisis directamente en plataformas marinas o en tierra conectadas a parques eólicos offshore. Asimismo, se están explorando configuraciones que combinan eólica marina con sistemas de almacenamiento (baterías o hidrógeno) y, en menor medida, con solar flotante offshore. Estas soluciones buscan avanzar hacia hubs energéticos marinos, donde la generación, transformación y transporte de energía se realicen de forma integrada.

El desarrollo de parques híbridos offshore implica abordar:

- Desafíos tecnológicos complejos derivados de la integración de múltiples sistemas energéticos. La combinación de generación eólica, electrólisis, almacenamiento y evacuación energética requiere arquitecturas complejas y altamente optimizadas. La gestión de flujos energéticos en tiempo real es un reto clave.
- La producción de hidrógeno en el mar plantea desafíos en términos de robustez de los electrolizadores, suministro de agua desalada, seguridad y mantenimiento en condiciones marinas.
- Los parques híbridos requieren redes eléctricas más complejas, incluyendo sistemas HVDC, subestaciones offshore avanzadas y posibles configuraciones malladas entre parques y países (ENTSO-E, 2022).
- En lo que se refiere al almacenamiento energético, la integración de baterías o sistemas basados en hidrógeno implica desafíos en peso, volumen, seguridad y eficiencia en entornos offshore.
- También la operación y mantenimiento integrados requiere de la coexistencia de múltiples tecnologías en un mismo entorno, que incrementa la complejidad operativa, requiriendo soluciones avanzadas de digitalización, automatización y mantenimiento predictivo.

Hay un importante grupo de empresas industriales participando en el desarrollo de parques híbridos offshore. Su desarrollo está siendo impulsado a través de alianzas entre empresas energéticas, tecnológicas y de ingeniería como Ørsted (liderando proyectos híbridos en el Mar del Norte), Equinor (integración de eólica flotante e hidrógeno), Iberdrola (estrategia en hidrógeno verde vinculado a renovables); otras como Nel Hydrogen, ITM Power o Siemens Energy (tecnologías de hidrógeno y electrólisis); Technip Energies, Aker Solutions, Subsea7 (ingeniería y sistemas offshore); o Hitachi Energy, ABB (infraestructura eléctrica). Estas empresas están configurando un nuevo ecosistema industrial donde convergen electricidad, gases renovables y soluciones offshore avanzadas.

Asociados a estos proyectos trabajan intensamente centros tecnológicos y de investigación en líneas relacionadas con la integración de sistemas energéticos, optimización de hubs energéticos offshore, integración de electrólisis en plataformas marinas, modelización de sistemas energéticos híbridos y seguridad y operación de infraestructuras de plataformas multi-energía. Algunos de los centros más relevantes son el National Renewable Energy Laboratory (NREL, EE. UU.), el SINTEF (Noruega), el TNO (Países Bajos), el Fraunhofer IWES (Alemania), el Offshore Renewable Energy Catapult (Reino Unido).

Asturias tiene una posición estratégica para participar en el desarrollo de parques híbridos offshore, especialmente en la intersección entre industria, energía y logística. Entre las capacidades industriales relevantes que puede aportar a la cadena de valor están la experiencia en sectores energéticos, gasistas e industriales, la industria metalúrgica y de bienes de equipo adaptable a plataformas offshore que opera en la región o las capacidades en fabricación de equipos a presión y sistemas industriales complejos. Por tanto, la participación en la cadena de valor del hidrógeno offshore (electrólisis, almacenamiento), el desarrollo de componentes para plataformas energéticas híbridas o la integración en proyectos piloto europeos es perfectamente viable. Aportar soluciones de innovación tecnológica en integración de sistemas multienergía, almacenamiento energético offshore, aplicación de digitalización para operación de hubs energéticos o adaptación de puertos asturianos como bases logísticas para ensamblaje y operación representa una oportunidad de crecimiento y desarrollo futuro, especialmente para posicionarse en ámbitos como la exportación de hidrógeno renovable.

3.1.4 DIGITALIZACIÓN Y OPERACIÓN AUTÓNOMA.

La digitalización se ha convertido en un pilar fundamental para la mejora de la competitividad de las actividades industriales. La eólica marina no es ajena a este proceso, especialmente en un contexto de aerogeneradores de gran potencia, con diseños cada vez mayores y parques cada vez más alejados de la costa, operando en condiciones de dificultad de acceso. Actualmente, los operadores utilizan sistemas avanzados de supervisión (SCADA), análisis de datos y mantenimiento predictivo para optimizar la producción y reducir costes operativos, pero el avance en tecnologías de digitalización y aplicación de soluciones de inteligencia artificial pueden permitir ahorros de costes significativos.

Se está avanzando en la incorporación de gemelos digitales, que permiten replicar virtualmente el comportamiento de turbinas, subestructuras y parques completos en tiempo real, integrando datos operativos y modelos físicos.

Asimismo, el uso de drones aéreos y vehículos submarinos autónomos (AUV/ROV) para inspección de palas, cimentaciones y cables submarinos está reduciendo significativamente los costes y riesgos asociados a las operaciones offshore.

Este conjunto de tecnologías está sentando las bases para una futura operación con mucha mayor autonomía de parques eólicos, donde la intervención humana “in situ” se reduzca al mínimo. Esto permite optimizar las operaciones y ganar en eficacia y rentabilidad económica.



Ilustración 5. Imagen conceptual de la digitalización de un parque eólico marino.

Estos avances, orientados a la digitalización y la operación autónoma presentan retos tecnológicos relevantes:

- Gestión y calidad del dato. Los parques eólicos generan grandes volúmenes de datos heterogéneos. Garantizar su calidad, interoperabilidad y ciberseguridad es un desafío clave.
- Modelización y gemelos digitales. La creación de modelos precisos que integren el comportamiento elástico, estructural y eléctrico sigue siendo compleja, especialmente en entornos offshore dinámicos, teniendo en cuenta además la singularidad de cada proyecto.
- Inteligencia artificial y toma de decisiones. El uso de algoritmos de IA para mantenimiento predictivo y optimización operativa requiere grandes conjuntos de datos históricos y validación robusta en condiciones reales, que debe incorporar la complejidad derivada de la singularidad de cada proyecto antes indicada.

- Robótica y operación autónoma. El desarrollo de drones y robots capaces de operar de forma autónoma en condiciones marinas adversas (viento, oleaje, corrosión) es aún limitado.
- Ciberseguridad. La creciente digitalización expone a los parques a riesgos de ciberataques, lo que exige soluciones avanzadas de protección.

El ecosistema industrial en digitalización eólica combina fabricantes, empresas tecnológicas y proveedores de servicios digitales. Entre los fabricantes del mercado europeo de aerogeneradores destacan

Siemens Gamesa Renewable Energy (plataformas digitales y mantenimiento predictivo), Vestas (sistemas de análisis de datos y optimización), GE Vernova (plataformas digitales integradas). Entre las empresas tecnológicas se posicionan fuertemente Siemens Energy (digitalización de activos energéticos), IBM (analítica avanzada e inteligencia artificial) y Microsoft (plataformas cloud para energía). En robótica e inspección encontramos a empresas como BladeBUG (robots para inspección de palas), Rovco (inspección submarina con IA) o Saab Seaeye (vehículos submarinos). En software y datos están DNV (plataformas de análisis y certificación digital) o ABB (automatización y control).

Los centros tecnológicos y de investigación de referencia son el National Renewable Energy Laboratory (NREL, EE. UU.), el Fraunhofer IWES (Alemania), el TNO (Países Bajos) y el DTU Wind Energy (Dinamarca). Por especialización se pueden encontrar en este campo colaboradores en centros especializados en offshore como el Offshore Renewable Energy Catapult (Reino Unido) o el SINTEF Digital (Noruega).

Las capacidades existentes en Asturias derivan de la existencia de un ecosistema industrial con creciente digitalización, la existencia de centros tecnológicos y equipos de la Universidad con experiencia en simulación y análisis de datos, y la presencia de escuelas universitarias, con ramas formativas en diferentes áreas de la ingeniería, TIC e inteligencia artificial. El ámbito de la colaboración puede abrirse en líneas como el desarrollo de soluciones de monitorización estructural para aerogeneradores y plataformas, el desarrollo de gemelos digitales adaptados, la aplicación de IA para mantenimiento predictivo en entornos offshore, el desarrollo de soluciones de robótica para inspección en condiciones adversas o la creación de centros de control remoto de parques eólicos offshore.

3.1.5 REDES ELÉCTRICAS OFFSHORE.

Las redes eléctricas offshore están evolucionando desde configuraciones radiales simples — donde cada parque eólico se conecta individualmente a tierra— hacia sistemas más complejos, interconectados y con mayor capacidad de gestión energética. Este cambio responde al rápido crecimiento de la eólica marina y a la necesidad de integrar grandes volúmenes de generación renovable en los sistemas eléctricos europeos.

En la actualidad, predominan las conexiones en corriente alterna (HVAC) para distancias cortas y medias, mientras que la tecnología en corriente continua de alta tensión (HVDC) se está

consolidando como la solución preferente para largas distancias y grandes potencias, gracias a su menor pérdida energética (ENTSO-E, 2022). Además, se están desarrollando conceptos de redes malladas offshore y “hubs energéticos marinos” que permitirán interconectar múltiples parques eólicos e incluso diferentes países, especialmente en regiones como el Mar del Norte.

Aunque ninguna de estas circunstancias es específica de lo que ocurra en Asturias, sin duda van a marcar también las capacidades de desarrollo de la industria regional y de los propios parques que se puedan llegar a poner en marcha.

El despliegue de redes eléctricas offshore avanzadas implica desafíos técnicos significativos:

- Desarrollo de redes HVDC malladas. Aunque la tecnología HVDC punto a punto está madura, la implementación de redes malladas requiere nuevos sistemas de control, protección y estandarización aún en desarrollo.
- Subestaciones offshore avanzadas. El diseño de subestaciones compactas, flotantes o híbridas plantea retos en términos de peso, fiabilidad y mantenimiento en condiciones marinas extremas.
- Cables submarinos de alta capacidad. El aumento de potencia transportada exige cables con mayor capacidad térmica y resistencia mecánica, incluyendo soluciones dinámicas para eólica flotante.
- Protección y control de redes complejas. La integración de múltiples nodos offshore requiere sistemas avanzados de protección frente a fallos, así como algoritmos de control en tiempo real.
- Interoperabilidad y regulación. La interconexión entre países implica desafíos regulatorios y de estandarización técnica, especialmente en mercados eléctricos transnacionales.

Empresas que están abordando desarrollos en tecnología HVDC y sistemas eléctricos son Hitachi Energy, Siemens Energy o ABB. En fabricación de cables submarinos se encuentran referencias de Prysmian Group, Nexans o NKT. En ingeniería y construcción offshore pueden destacarse participaciones de Aker Solutions, Technip Energies o Subsea7. En operadores de redes están TenneT (Países Bajos y Alemania), National Grid (Reino Unido) o Red Eléctrica de España (REE).

Algunos de los centros tecnológicos que están participando activamente en los desarrollos ligados a este campo son: SINTEF Energy (Noruega), Fraunhofer IWES (Alemania), Technical University o Denmark (DTU, Dinamarca) o TNO (Países Bajos).

Las capacidades potenciales de desarrollo en Asturias para incorporarse a la cadena de valor son, entre otras: Contar con una industria metalúrgica y de bienes de equipo cuya actividad es replicable en subestaciones offshore; disponer de empresas de fabricación de estructuras metálicas y envolventes para sistemas eléctricos; y tener profesionales con experiencia en sectores eléctricos y energéticos. La colaboración es posible en campos como la fabricación de componentes de subestaciones offshore o el suministro de cables y sistemas eléctricos, tanto en proyectos industriales como a escala de pilotos. En el ámbito de innovación, la colaboración en el desarrollo de soluciones de monitorización de cables submarinos, la investigación en

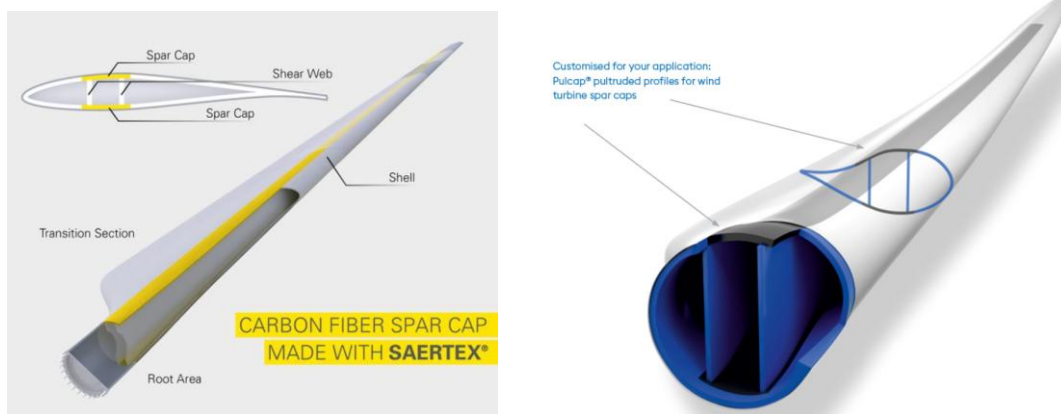
sistemas de protección y control digitalizados o la aplicación de gemelos digitales a redes offshore pueden ser ámbitos en los que Asturias desempeñe un rol importante. A ello han de añadirse otras capacidades como los puertos asturianos, con potencial para convertirse en nodos logísticos para instalación de infraestructuras eléctricas offshore.

3.2 MATERIALES.

El entorno marino impone condiciones extremas de corrosión, fatiga mecánica y cargas dinámicas. La innovación en materiales es clave para aumentar la vida útil de los parques eólicos. Estos desarrollos buscan reducir peso estructural, aumentar la durabilidad y facilitar el reciclaje de componentes al final de su vida útil.

3.2.1 MATERIALES AVANZADOS PARA PALAS.

El aumento del tamaño de las palas está favoreciendo la introducción de materiales como la fibra de carbono en zonas críticas (largueros o spar caps⁶), que permite reducir peso y aumentar rigidez. Asimismo, se están desarrollando nuevas resinas termoplásticas reciclables, que responden a la creciente necesidad de sostenibilidad y economía circular en el sector. Estas innovaciones buscan mejorar el rendimiento estructural, reducir cargas y facilitar la reciclabilidad al final de la vida útil.



⁶ Los largueros o spar caps son elementos estructurales de la pala que soportan casi toda la flexión.

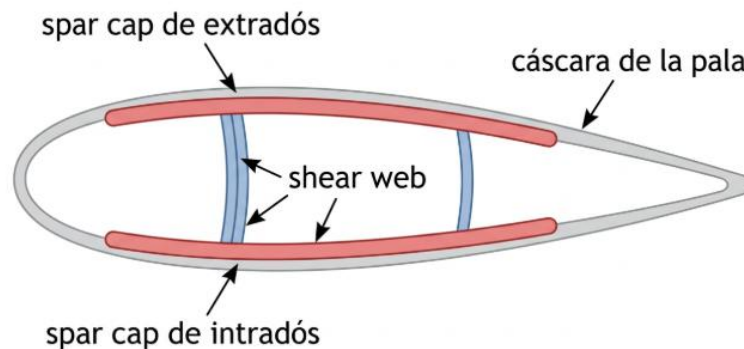


Ilustración 6. Secciones de pala para mostrar ubicación y forma del larguero o spar cap.

El desarrollo de materiales avanzados para palas de gran tamaño presenta desafíos relevantes:

- Escalado estructural y peso. El incremento de longitud de las palas aumenta las cargas, lo que exige materiales con mayor rigidez específica sin penalizar el peso ni la capacidad de transporte.
 - Fibra de Carbono de Ultra-Alta Resistencia (T1200): Desarrollo y producción en masa de fibras de grado T1200, con mayor resistencia a la tracción que las generaciones anteriores, clave para robótica y sector aeroespacial, que podría tener aplicaciones en eólica con una evolución favorable de costes de producción.
 - Pultrusión de Carbono (Carbon Planks): Fabricación de perfiles de carbono pre-consolidado (pultruidos) de muy alto rendimiento, que luego se integran como largueros estructurales (spar caps) en la pala.
 - Heavy Tow Carbon Fiber: Se están desarrollando fibras de carbono más gruesas y económicas, derivadas de la industria textil, que reducen el coste de material hasta un 40% respecto al carbono aeroespacial, haciendo viable su uso en palas de mayor tamaño.
 - Diseño Híbrido Fibra de Vidrio-Carbono: No se sustituye el vidrio por completo; se combina. La fibra de carbono se sitúa en las zonas de carga crítica (extremo de la pala) y la de vidrio en el resto para optimizar costes.
 - Simulación de Altas Cargas: Uso de modelos matemáticos y gemelos digitales para asegurar que las palas soporten más de 10^8 ciclos de carga en 20-25 años de vida útil
- Fatiga y durabilidad. Las palas están sometidas a millones de ciclos de carga durante su vida útil. La resistencia a fatiga y la propagación de grietas en materiales compuestos son aspectos críticos.
 - Nanolaminados y nanotecnología: Incorporación de nanomateriales para mejorar la adherencia entre fibra y matriz, mejorando la resistencia interlaminar.



- Optimización de la Resistencia a la Compresión: Las fibras de carbono son sensibles a desalineaciones bajo cargas de compresión. Se investigan nuevas matrices epoxi y procesos de pultrusión para alinear perfectamente las fibras y evitar fallos prematuros por fatiga.
 - Resinas Epoxi de Baja Viscosidad: Desarrollos enfocados en mejorar la infusión de resina (VARTM) y reducir defectos internos (vacíos) que son los puntos de inicio de las grietas por fatiga.
 - Recubrimientos Avanzados de Borde de Ataque: Para mejorar la durabilidad, se investigan nuevos materiales (a menudo basados en poliuretano u otros polímeros avanzados) que resistan la erosión por lluvia y granizo, un problema que aumenta con la velocidad de punta de las palas más grandes.
- Procesos de fabricación avanzados. La fabricación de palas de gran tamaño requiere procesos altamente controlados (infusión de resina, curado), donde la calidad del material y la ausencia de defectos son determinantes.
 - Fabricación de Alta Velocidad (High-rate): Optimización de procesos para el sector aeroespacial y automoción para producir grandes volúmenes.
 - Automatización de colocación de fibra (AFP): Uso de robótica y tecnologías como AFP (Automated Fiber Placement) para mejorar la eficiencia y reducir residuos.
 - Impresión 3D con Fibra Continua: Fabricación aditiva de alto rendimiento que permite la orientación precisa de la fibra de carbono continua, mejorando la resistencia en componentes complejos.
 - Moldeo de alta precisión: Nuevas técnicas como el conformado PCM (Prepreg Compression Molding) y RTM (Resin Transfer Molding) híbrido para componentes complejos.
- Reciclabilidad y sostenibilidad. Los materiales termoestables tradicionales presentan dificultades de reciclaje. El desarrollo de resinas reciclables y procesos de reutilización es un reto clave.
 - Reciclaje de Alta Calidad: Desarrollo de tecnologías para recuperar fibra de carbono sin perder propiedades mecánicas (pirólisis y procesos termo-catalíticos que permiten reutilizar la fibra en aplicaciones de altas prestaciones.
 - Resinas reparables, reciclables y reprocesables (3R): Uso de nuevas técnicas que permiten que el composite sea reparable y totalmente reciclable al final de su vida útil.
 - Composites Bio-basados: Investigación el uso de polímeros bio-basados y de fibras naturales híbridas para mejorar la sostenibilidad.
- Costes de materiales avanzados. El uso de fibra de carbono mejora el rendimiento, pero incrementa significativamente los costes, lo que limita su aplicación a zonas estructurales críticas.

El desarrollo de materiales avanzados para palas está liderado por fabricantes de aerogeneradores y proveedores especializados en composites, entre los que se encuentran específicamente fabricantes de palas como LM Wind Power (GE Vernova), Siemens Gamesa

Renewable Energy o Vestas; proveedores de materiales como Hexcel (fibra de carbono y composites avanzados), Mitsubishi Chemical Group (nuevas aplicaciones), Toray Industries (materiales compuestos) u Owens Corning (fibra de vidrio avanzada); y especialistas en fabricación especializada como TPI Composites o Gurit (materiales y soluciones para composites).

El desarrollo de nuevos materiales para palas está respaldado por una amplia red de centros de investigación, como el National Renewable Energy Laboratory (NREL, EE. UU.), el DTU Wind Energy (Dinamarca), el Fraunhofer IWES (Alemania) o el TNO (Países Bajos).

Asturias puede aprovechar oportunidades relevantes para integrarse en la cadena de valor de materiales avanzados para palas basándose en la experiencia en materiales y procesos industriales avanzados, la existencia de empresas con potencial en fabricación de composites y estructuras ligeras o un sector químico que puede desarrollar actividades ligadas a las aplicaciones en resinas y materiales avanzados. Nuevos ámbitos de actividad que se abren, como el desarrollo de soluciones de reciclaje de palas también ofrecen posibilidades, mientras resulta relevante asociarse para el desarrollo de nuevos materiales híbridos adaptados a condiciones offshore, la investigación en procesos de fabricación automatizados o la aplicación de digitalización para control de calidad en fabricación. La colaboración con fabricantes internacionales en nuevos desarrollos será clave.

3.2.2 ACERO DE ALTA RESISTENCIA.

El acero es el material estructural predominante en la eólica marina, empleado en torres, cimentaciones (monopiles, jackets) y subestructuras flotantes. El crecimiento en tamaño de los aerogeneradores y la expansión hacia aguas más profundas han impulsado la adopción de aceros de alta resistencia o ultra alta resistencia, que permiten reducir espesores, peso y costes de transporte e instalación. Además, el desarrollo de aceros específicos para ambientes marinos ha mejorado su comportamiento frente a corrosión y fatiga.

El uso de acero de alta resistencia en eólica marina plantea desafíos técnicos relevantes:

- Fatiga en condiciones offshore. Las estructuras están sometidas a cargas cíclicas complejas (viento, oleaje), lo que exige un comportamiento a fatiga excelente. Los aceros de mayor resistencia pueden presentar sensibilidad a la iniciación de grietas si no se diseñan adecuadamente.
- Soldabilidad y fabricación. El aumento de la resistencia del acero puede dificultar los procesos de soldadura, requiriendo técnicas avanzadas y control riguroso para evitar defectos y tensiones residuales.
- Fragilización y comportamiento a baja temperatura. En entornos marinos, especialmente en zonas frías, es fundamental garantizar la tenacidad del material y evitar fenómenos de fractura frágil.
- Corrosión en ambiente marino. La exposición a agua salina y condiciones de salpicadura exige soluciones avanzadas de protección (recubrimientos, protección catódica, ...), especialmente en zonas críticas de la estructura.

- Optimización estructural. El uso de aceros de alta resistencia requiere rediseñar estructuras para aprovechar sus propiedades sin comprometer la seguridad ni incrementar la complejidad constructiva.

El desarrollo y suministro de acero de alta resistencia para eólica marina está liderado por grandes grupos siderúrgicos y fabricantes de estructuras como ArcelorMittal (producción de acero) , SSAB (aceros de alta resistencia y acero “verde”), Tata Steel (producción de acero) o Dillinger (especialista en chapa gruesa offshore); EEW Group (monopiles), SIF Group (cimentaciones offshore), Navantia (estructuras y subestructuras marinas), o ingenierías como Ramboll, Aker Solutions o Technip Energies.

Los centros tecnológicos y organismos técnicos y normativos de referencia son: Fraunhofer Institute for Wind Energy Systems (IWES, Alemania); TNO (Países Bajos); SINTEF (Noruega); National Renewable Energy Laboratory (NREL, EE. UU.); DNV (normativas offshore); CIGRÉ; ISO.

El papel de Asturias, que cuenta con una posición especialmente favorable para participar en el desarrollo y aplicación de acero de alta resistencia en eólica marina puede cimentarse en sus capacidades industriales: fuerte tradición siderúrgica y metalúrgica, empresas especializadas en fabricación de grandes estructuras metálicas y experiencia en soldadura avanzada y procesos industriales pesados. Las líneas de colaboración comercial pasan por el desarrollo de nuevos aceros de alta resistencia adaptados a eólica marina, participación en la fabricación de monopiles, jackets y torres offshore o integración en la cadena de suministro europea. Mientras, la innovación deberá orientarse a la investigación en comportamiento a fatiga y corrosión, el desarrollo de soluciones de soldadura avanzada, la aplicación de digitalización para control de calidad estructural, el desarrollo de acero de bajo carbono vinculado a energías renovables, la integración con estrategias de descarbonización industrial o el desarrollo de aceros de baja aleación con alta resistencia a fatiga.

3.2.3 PROTECCIÓN CONTRA CORROSIÓN.

La corrosión es uno de los principales factores de degradación en la eólica marina, debido a la exposición continua a agua salina, oxígeno, humedad y condiciones dinámicas como oleaje o salpicadura. Actualmente, la protección de estructuras offshore (torres, cimentaciones, subestaciones y componentes auxiliares) se basa en una combinación de recubrimientos protectores multicapa, sistemas de protección catódica (ánodos de sacrificio o corriente impresa) y selección adecuada de materiales.

Los sistemas de pintura offshore suelen incluir varias capas (imprimación, intermedia y acabado) diseñadas para resistir condiciones severas durante periodos de 20–30 años. Además, en zonas críticas como la “zona de salpicadura” (splash zone), se emplean soluciones reforzadas debido a la elevada agresividad del entorno. En paralelo, están emergiendo recubrimientos avanzados (nanomateriales, sistemas autorreparables) y soluciones de monitorización en tiempo real que permiten mejorar la durabilidad y reducir costes de mantenimiento.

La protección contra la corrosión en eólica marina presenta desafíos técnicos del tipo:

- Durabilidad. Garantizar una vida útil superior a 25 años en condiciones marinas extremas sigue siendo un reto, especialmente en zonas con elevada variabilidad ambiental.
 - Nuevos recubrimientos avanzados (pinturas, films, multifuncionales). Recubrimientos orgánicos multifuncionales: pinturas con cargas de grafeno y pigmentos inorgánicos anticorrosivos, que mejoran resistencia a corrosión, tribocorrosión, adherencia y curado rápido para facilitar mantenimiento in situ; películas y láminas poliméricas de protección aplicadas sobre acero, que sustituyen sistemas multicapa, reducen tiempos de parada y ofrecen protecciones certificadas ≥ 10 años con menos impacto ambiental (0% VOC, sin goteos de pintura); recubrimientos combinados anticorrosión + anti-incrustante (biofouling), con formulaciones que a la vez protegen del ataque químico y evitan colonización biológica en zonas sumergidas.
 - Sistemas dúplex innovadores: combinación de recubrimientos metálicos (zinc) con acabados orgánicos sostenibles (por ejemplo, capas a base de corcho) para aumentar la vida útil de estructuras offshore y reducir el uso de pinturas convencionales. Enfoque en recubrimientos con bajas o nulas emisiones de compuestos orgánicos volátiles, alineados con normativa europea y objetivos de sostenibilidad para instalaciones marinas.
 - Materiales y hormigones de alta durabilidad. Hormigones y morteros mejorados con nanotecnología: adición de nanopartículas para reducir porosidad y permeabilidad del hormigón hasta en torno a un 100%, aumentando la resistencia frente a agentes agresivos del agua de mar en cimentaciones y estructuras portuarias para eólica marina. Desarrollo de nuevas aleaciones metálicas resistentes a la corrosión (por ejemplo, aleaciones de aluminio-magnesio-silicio y aceros avanzados) específicamente pensadas para entornos marinos hostiles.
 - Protección combinada corrosión + biofouling + cavitación. Recubrimientos que integran protección contra corrosión, bioincrustaciones y, en algunos casos, cavitación, con vidas útiles objetivo de $>10-20$ años en estructuras de acero marítimas. Capas de aluminio de alta pureza aplicadas por proyección térmica, diseñadas como barrera anticorrosiva de larga duración en generadores marinos y elementos sometidos a cavitación.
- Comportamiento de la zona de salpicadura (splash zone). Es la región más crítica desde el punto de vista de corrosión, combinando exposición a oxígeno, agua y esfuerzos mecánicos. Requiere soluciones específicas y de alto rendimiento.
 - Recubrimientos por proyección térmica y claddings metálicos: se aplican capas gruesas de aleaciones resistentes a corrosión/erosión (por ejemplo, aleaciones con alto contenido en Ni, Al u otros) mediante proyección térmica o técnicas de recargue, creando una solución metalúrgica más robusta que el acero base en la zona de salpicadura. Estos claddings ofrecen alta resistencia al desgaste, cavitación e impacto, muy relevantes donde rompen las olas y golpean



residuos flotantes, y se combinan normalmente con sellado o recubrimientos orgánicos.

- Optimización de detalles constructivos y soldaduras para minimizar zonas de concentración de tensiones y grietas, reduciendo el riesgo de corrosión bajo tensión (SCC) en esa banda altamente agresiva.
- Integración con nuevos materiales. La combinación de acero de alta resistencia, estructuras híbridas y nuevos materiales compuestos exige adaptar los sistemas de protección.
 - Recubrimientos “inteligentes” con nanotecnología y microcápsulas. Se investiga en recubrimientos epoxi/poliuretano de alto desempeño que incorporan nanopartículas y nanocontenedores con inhibidores de corrosión y biocidas, capaces de liberarse de forma controlada cuando se daña el recubrimiento. El objetivo es que el propio sistema tenga capacidad de auto-curado y protección localizada en defectos o impactos, algo especialmente atractivo en la zona de salpicadura donde los daños mecánicos son frecuentes.
 - Recubrimientos con escamas de vidrio (glass flake polyesters/epoxies). Los recubrimientos de poliéster con escamas de vidrio (GFP) generan una barrera muy baja en permeabilidad (5–20 veces más impermeable que la resina sola), especialmente indicada para la zona de salpicadura y oleaje.
- Monitorización y mantenimiento. La inspección de sistemas anticorrosión offshore es compleja y costosa, lo que impulsa el desarrollo de sensores, digitalización y mantenimiento predictivo.
 - Desarrollo de estrategias de inspección basadas en riesgo que priorizan la zona de salpicadura, combinando inspecciones visuales, ensayos no destructivos y seguimiento del estado del recubrimiento para ajustar los planes de mantenimiento.
 - Uso de sensores y sistemas de monitorización para medir condiciones ambientales (tiempo de humectación, salinidad superficial, temperatura, radiación UV), lo que permite ajustar los modelos de vida útil de recubrimientos y planificar repintados antes de que se produzcan fallos críticos.
- Sostenibilidad ambiental. Algunos recubrimientos tradicionales presentan impactos ambientales. Existe una creciente presión para desarrollar soluciones más sostenibles y menos contaminantes.
 - Hormigones avanzados (por ejemplo, activados alcalinamente o de ultraaltas prestaciones) que son más duraderos en mar, permiten secciones más ligeras y reducen la huella de CO₂ asociada al material y a las operaciones de mantenimiento.
 - Limitar metales y aditivos persistentes en pinturas y ánodos, mejorar el control y monitorización de la calidad del agua alrededor de los parques y desarrollar directrices para el uso conjunto de acuicultura y eólica marina.

- La innovación en materiales se acompaña de estrategias de “design for deconstruction”: uniones, recubrimientos y sistemas estructurales pensados para facilitar el desmontaje y la separación de materiales al final de vida.

Numerosas empresas están desarrollando soluciones de protección anticorrosión. Entre las más destacadas están, en el ámbito de recubrimientos, AkzoNobel (International Paint), Hempel, Jotun o Sherwin-Williams; en la protección catódica Cathodic Protection Co. Ltd, BAC Corrosion Control o Deepwater Corrosion Services; en ingeniería y servicios offshore están empresas como Aker Solutions, Technip Energies o Subsea7; y en el desarrollo de materiales y soluciones avanzadas para protección superficial, empresas como 3M.

Para Asturias se presenta oportunidades por sus capacidades industriales en la industria metalúrgica con experiencia en tratamientos superficiales, la existencia de empresas de recubrimientos y mantenimiento industrial y la experiencia en sectores con alta exigencia anticorrosión (naval, energético). Las líneas de colaboración pueden pasar por el desarrollo de soluciones anticorrosión adaptados a las necesidades de cada parque. Mientras, en innovación se pueden abrir vías en recubrimientos avanzados y sostenibles, aplicación de sensores para monitorización de corrosión o el uso de gemelos digitales para predecir degradación estructural. Las infraestructura y servicios también pueden ver incrementada su actividad por el mantenimiento y reparación offshore o la necesidad de servicios especializados en inspección y protección anticorrosión.

3.2.4 CABLES SUBMARINOS DE NUEVA GENERACIÓN.

Los cables submarinos constituyen un elemento esencial en la infraestructura de la eólica marina, permitiendo la evacuación de la energía generada desde los aerogeneradores hasta las subestaciones offshore y su posterior transporte a tierra. En la actualidad, las soluciones más extendidas combinan sistemas en corriente alterna (HVAC) para distancias cortas y medias, y sistemas en corriente continua de alta tensión (HVDC) para grandes distancias y potencias, debido a su mayor eficiencia en la transmisión. El crecimiento de los parques offshore, junto con la expansión hacia aguas profundas mediante eólica flotante, está impulsando el desarrollo de cables submarinos de nueva generación. Entre ellos destacan los cables dinámicos, diseñados para soportar movimientos continuos en plataformas flotantes, y los cables con aislamiento avanzado tipo XLPE, capaces de operar a mayores temperaturas y tensiones. Asimismo, se están desarrollando soluciones para redes malladas offshore, donde los cables juegan un papel clave en la interconexión de sistemas energéticos complejos, facilitando la interconexión de parques o la hibridación de instalaciones de generación o transformación.

El desarrollo de cables submarinos avanzados presenta desafíos técnicos significativos, entre los que se puede citar:

- Incremento de capacidad y eficiencia. El aumento de potencia instalada exige cables capaces de transportar mayores corrientes, lo que implica mejorar conductores y materiales aislantes para reducir pérdidas y aumentar la capacidad térmica.

- Cables dinámicos para eólica flotante. Estos cables deben soportar cargas cíclicas, flexión continua y condiciones ambientales severas, lo que plantea retos en términos de fatiga mecánica y diseño estructural.
- Fiabilidad y reducción de fallos. Los fallos en cables submarinos tienen un alto impacto económico. Se requieren soluciones avanzadas de monitorización, diagnóstico y mantenimiento predictivo.
- Instalación y protección. El tendido de cables en el lecho marino requiere técnicas avanzadas de enterramiento y protección frente a riesgos externos como pesca, anclas o movimientos geológicos.
- Impacto ambiental y sostenibilidad. Existe una creciente necesidad de minimizar el impacto ambiental durante la instalación y operación, así como de desarrollar materiales más sostenibles.

El sector de cables submarinos está dominado por empresas con alta especialización tecnológica, entre las que se pueden encontrar fabricantes de cables como Prysmian Group, Nexans o NKT; también proveedores de soluciones de tecnologías eléctricas y sistemas como Hitachi Energy, Siemens Energy o ABB; o empresas de instalación y servicios offshore del tipo de Subsea7 o DEME. Lideran la actividad de desarrollo de soluciones avanzadas tanto para cables HVAC como HVDC, incluyendo aplicaciones específicas para eólica flotante.

Para el desarrollo de cables submarinos de nueva generación, una amplia red internacional de investigación colabora en trabajos de muy diferente tipología: SINTEF Energy (Noruega), TNO (Países Bajos), Fraunhofer IWES (Alemania), National Renewable Energy Laboratory (NREL, EE. UU.), CIGRÉ, IEC o DNV entre otros muchos.

Aunque Asturias no tiene una amplia especialización en este ámbito, sí pueden aparecer oportunidades de colaboración relevantes para integrarse en la cadena de valor de esta actividad. Algunos de los nichos específicos de actividad pueden ser los componentes estructurales y sistemas de protección (protecciones, estructuras auxiliares) o la colaboración en proyectos offshore como proveedores industriales. Por el lado de la innovación, algunas actividades como la monitorización y diagnóstico de cables, la aplicación de digitalización y gemelos digitales o la investigación en comportamiento de cables en ámbito marino pueden representar oportunidades de crecimiento. También los puertos son infraestructuras que pueden abrir opciones de desarrollo de actividad especializada.

3.3 INDUSTRIA.

La expansión de la eólica marina exige una base industrial muy amplia, que combina sectores tradicionales con nuevos nichos tecnológicos. La eólica marina actúa como motor de reindustrialización, generando cadenas de valor que integran metalurgia, electrónica, ingeniería y servicios especializados.

3.3.1 FABRICACIÓN DE GRANDES COMPONENTES.

El crecimiento de la eólica marina, especialmente con la llegada de aerogeneradores de gran potencia, ha impulsado una transformación profunda en los procesos de fabricación de grandes componentes, como palas, torres, cimentaciones o subestructuras flotantes. Esta evolución está llevando a la industria hacia modelos de fabricación a gran escala, altamente automatizados y con fuerte integración logística.

Actualmente, la producción se concentra en grandes hubs industriales cercanos a puertos, donde se combinan procesos de fabricación, ensamblaje y expedición. La tendencia en fabricación es hacia la industrialización modular, permitiendo el desarrollo de componentes en secciones para ensamblarlos posteriormente, lo que facilita el transporte y reduce costes.

La fabricación de grandes componentes para eólica marina presenta desafíos significativos, entre los que se puede citar:

- Escalado industrial continuado. El constate aumento del tamaño de los componentes requiere adaptar instalaciones industriales, maquinaria y procesos productivos, con inversiones elevadas.
- Control de calidad y tolerancias. La fabricación de estructuras de gran tamaño exige mantener tolerancias estrictas para garantizar el correcto ensamblaje y funcionamiento.
- Procesos de fabricación avanzados. La automatización de procesos como la fabricación de palas o soldadura de grandes estructuras metálicas sigue siendo un reto técnico.
- Logística integrada. El transporte de componentes de gran tamaño requiere soluciones logísticas complejas y coordinación entre fabricación, almacenamiento y expedición.
- Sostenibilidad y eficiencia. La reducción de emisiones en procesos industriales y el uso eficiente de materiales son aspectos cada vez más relevantes.

La fabricación de grandes componentes está liderada por empresas industriales con alta capacidad tecnológica, dadas las altas necesidades, tanto de capital como de recursos humanos. Siemens Gamesa, Vestas o GE Vernova son actores relevantes por lo que se refiere a fabricación de máquinas eólicas de gran tamaño; LM Wind Power (palas), TPI Composites (palas), EEW Group (monopiles), o Sif Group (cimentaciones) tienen una presencia relevante en fabricación de componentes; por el lado de la industria naval y estructuras están presentes empresas como Navantia, Bladt Industries o Smulders.

Como centros de referencia están los mejor posicionados en eólica marina, es decir, Fraunhofer IWES (Alemania), TNO (Países Bajos), National Renewable Energy Laboratory (NREL, EE. UU.), o Offshore Renewable Energy Catapult (Reino Unido).

Asturias debe reforzar su papel en determinadas capacidades industriales, como la metalurgia, la fabricación pesada, los bienes de equipo y la soldadura, adaptándose a requerimientos de fabricación de la eólica marina para suministrar total o parcialmente componentes relacionados con torres, secciones estructurales y cimentaciones offshore. La innovación tecnológica debe

ayudar a mejorar procesos de fabricación avanzada, a través de la automatización, la digitalización, la aplicación de gemelos digitales en procesos productivos o la mejora de técnicas de soldadura y ensamblaje.

3.3.2 INDUSTRIA NAVAL Y METALÚRGICA.

Tradicionalmente vinculados a sectores como el Oil&gas o la construcción naval, estos sectores están reconvirtiendo capacidades. En particular, los astilleros y fabricantes metalúrgicos están evolucionando hacia la producción de estructuras complejas para eólica flotante y fija, incorporando procesos de fabricación avanzada, automatización y control digital. Asimismo, la creciente demanda de estructuras de gran tamaño está favoreciendo el desarrollo de nuevas capacidades industriales en Europa, con una fuerte conexión entre industria pesada y logística portuaria.

La adaptación de la industria naval y metalúrgica a la eólica marina presenta importantes desafíos:

- Diseño, ingeniería avanzada y materiales. Incorporar capacidades de diseño 3D integradas (CAD/CAE) específicas para estructuras offshore: análisis hidrodinámico, cargas de viento y oleaje, fatiga y corrosión a largo plazo, etc. Desarrollar competencias en nuevos materiales y soluciones de protección: aceros de alta resistencia, recubrimientos avanzados, sistemas anticorrosión inteligentes y composites para componentes sometidos a ambientes marinos severos.
- Transformación digital: Astillero 4.0. Digitalizar el flujo completo diseño–planificación–producción–mantenimiento con un entorno de datos único, que reduzca errores y retrabajos y permita simular el proceso antes de entrar en taller. Implantar gemelos digitales de buques y plataformas, de forma que la simulación avanzada y la inteligencia artificial permitan planificar cargas de trabajo, anticipar cuellos de botella y optimizar el uso de grúas, diques y bancadas. Desplegar tecnologías IoT en equipos y procesos (sensores en soldadura, control dimensional, trazabilidad de piezas) para tener monitorización en tiempo real de calidad, tiempos y consumos energéticos.
- Automatización, robotización y nuevas técnicas de fabricación. Introducir automatización avanzada en soldadura, corte y manipulación de grandes secciones, clave en estructuras tubulares, jackets o plataformas flotantes, para ganar precisión, productividad y seguridad. Explorar la fabricación aditiva e impresión 3D para utillajes, piezas de repuesto y componentes complejos, reduciendo plazos y facilitando la personalización de soluciones offshore. Integrar sistemas robóticos para inspección y mantenimiento (drones, robots subacuáticos), tanto en fase de construcción como en servicios de operación y mantenimiento que el propio astillero pueda ofrecer.
- Modelo industrial y cadena de valor offshore. Adaptar lay-outs, grúas, explanadas y accesos para manejar estructuras de gran tamaño, con logística coordinada con el puerto (carga pesada, montaje parcial en muelle, remolque de plataformas flotantes). Definir qué eslabones de la cadena de valor offshore se quiere cubrir: sólo fabricación pesada, o también ingeniería de detalle, integración eléctrica, comisionado y servicios



de operación y mantenimiento. Establecer alianzas estratégicas con fabricantes de aerogeneradores, desarrolladores de parques y otros astilleros, siguiendo ejemplos de asociaciones que permiten ofrecer paquetes de “servicio integral” en eólica marina.

- Sostenibilidad energética y ambiental. Mejorar la eficiencia energética del propio astillero e incorporar energías renovables en sus instalaciones. Diseñar procesos y productos pensando en economía circular: selección de materiales reciclables, gestión avanzada de residuos de chorreado y pintura, planes de desmantelamiento y reciclaje de estructuras offshore. Medir y comunicar la huella de carbono de sus productos y procesos, para responder a los requisitos de los grandes promotores offshore, cada vez más exigentes en criterios ESG.
- Innovación en organización y recursos humanos. Desarrollar planes de capacitación específicos en tecnologías offshore y digitalización: diseño 3D, simulación, control numérico, robótica, seguridad en trabajos marítimos, etc. Implantar métodos de trabajo “conectados” (colaboración en tiempo real sobre modelos digitales, planificación compartida, uso de datos para mejorar decisiones diarias), que son la base del astillero 4.0.

El desarrollo de la industria naval y metalúrgica en eólica marina cuenta con empresas con experiencia en offshore como Navantia, Fincantieri, Daewoo Shipbuilding & Marine Engineering (DSME), Bladt Industries, Smulders, EEW Group, Aker Solutions, Technip Energies, Saipem, ArcelorMittal, SSAB o Tata Steel.

El desarrollo tecnológico en este ámbito está respaldado por centros especializados en ingeniería offshore y materiales como SINTEF Ocean (Noruega), Fraunhofer IWES (Alemania), TNO (Países Bajos) o National Renewable Energy Laboratory (NREL, EE. UU.).

Asturias presenta una posición favorable para integrarse en esta transformación industrial, dadas sus capacidades industriales en siderurgia y metalurgia, fabricación de grandes estructuras, fabricación de barcos especializados o proximidad a puertos industriales con potencial logístico. Se pueden abrir oportunidades industriales relevantes en fabricación de cimentaciones offshore y plataformas flotantes, colaboración con astilleros y empresas internacionales o integración en la cadena de suministro europea. La innovación tecnológica también abre oportunidades para el desarrollo de soluciones de soldadura avanzada, la aplicación de digitalización en procesos industriales o la investigación en nuevos materiales y estructuras offshore, además de las necesidades en mejora de la sostenibilidad a través del desarrollo de acero de bajo carbono o la descarbonización industrial de procesos.

3.3.3 INDUSTRIA ELÉCTRICA.

La evolución del tamaño de las máquinas eólicas y de los parques han impulsado avances significativos en electrónica de potencia, transformadores, subestaciones offshore y sistemas HVDC.

Las soluciones más avanzadas combinan sistemas de corriente alterna (HVAC) en parques cercanos a costa y sistemas HVDC para grandes distancias y potencias, permitiendo una

integración más eficiente en la red eléctrica. Además, la creciente complejidad de los sistemas offshore está favoreciendo el desarrollo de subestaciones marinas más compactas, digitalizadas e incluso flotantes, así como la integración con sistemas híbridos que incluyen almacenamiento energético o producción de hidrógeno.

Lo retos más relevantes de la industria pasan por resolver una serie de elementos que son clave:

- Escalado de sistemas eléctricos. El aumento de la potencia de los aerogeneradores requiere equipos eléctricos (transformadores, convertidores) de mayor capacidad y eficiencia.
- Electrónica de potencia avanzada. Los sistemas HVDC y los convertidores asociados requieren mejoras en eficiencia, fiabilidad y reducción de pérdidas.
- Subestaciones offshore. El diseño de subestaciones compactas, resistentes y de bajo mantenimiento en entornos marinos sigue siendo un reto técnico relevante.
- Digitalización y control. La gestión de redes offshore complejas requiere sistemas avanzados de control, automatización y monitorización en tiempo real.
- Integración de sistemas energéticos. La combinación con almacenamiento, hidrógeno y redes malladas implica necesidades de evaluar y rediseñar soluciones para alcanzar la estabilidad y mejorar la operación del sistema eléctrico.

El desarrollo de la industria eléctrica offshore está liderado por grandes empresas tecnológicas. En el ámbito de los sistemas eléctricos y HVDC están Hitachi Energy, Siemens Energy o ABB. En el desarrollo de equipos eléctricos están Schneider Electric o GE Vernova. En ingeniería y construcción están presentes empresas como Aker Solutions o Technip Energies. Mientras, en operación de red pueden encontrarse referencias de empresas como REDEIA, TenneT o National Grid.

En el ámbito de la innovación, los centros tecnológicos que trabajan habitualmente apoyando proyectos de estas áreas son SINTEF Energy (Noruega), Fraunhofer IWES (Alemania), TNO (Países Bajos) o National Renewable Energy Laboratory (NREL, EE. UU.). Otros organismos que participan de estos desarrollos son CIGRÉ o ENTSO-E.

Para una región como Asturias, las oportunidades más relevantes pasan por integrarse en cadenas de valor existentes de la industria eléctrica offshore. Para ello, será necesario que empresas con capacidades industriales del sector eléctrico y energético, fabricación de equipos industriales o ingeniería y servicios energéticos alcancen compromisos estables con grandes empresas desarrolladoras del sector. Posibles ámbitos de colaboración pueden ser la participación en la fabricación de componentes eléctricos (estructuras, envoltentes, sistemas auxiliares) a través de la integración en proyectos offshore o la colaboración con operadores de red y empresas tecnológicas. El ámbito de la innovación tecnológica podría girar en torno al desarrollo de soluciones de digitalización y control de redes offshore, la aplicación de gemelos digitales en sistemas eléctricos o la investigación en integración de energías renovables y almacenamiento. En cuanto a infraestructura, el posicionamiento puede pasar por el desarrollo de centros de control de sistemas eléctricos offshore.

3.3.4 INDUSTRIA DIGITAL.

El sector utiliza sistemas avanzados de supervisión y control (SCADA), plataformas de análisis de datos y herramientas de mantenimiento predictivo para mejorar la disponibilidad y reducir costes operativos. En los últimos años, se ha producido un avance significativo en el desarrollo de gemelos digitales, que integran modelos físicos y datos en tiempo real para simular el comportamiento de aerogeneradores, estructuras y sistemas eléctricos. Asimismo, la adopción de tecnologías como inteligencia artificial, computación en la nube e Internet de las Cosas (IoT) está permitiendo una gestión más eficiente y automatizada de los parques eólicos, sentando las bases para la operación más autónoma.

El desarrollo de la industria digital en eólica marina avanza en los siguientes campos, gracias a su propio impulso y al de otros sectores en los que se desarrollan herramientas aplicables al sector:

- Gestión de big data. Los parques offshore generan enormes cantidades de datos que deben ser procesados, almacenados y analizados de forma eficiente.
- Interoperabilidad. La integración de equipos de distintos fabricantes requiere estándares comunes y sistemas interoperables.
- Modelización. El desarrollo de gemelos digitales precisos que integren fenómenos dinámicos, elásticos, estructurales y eléctricos sigue siendo complejo.
- Ciberseguridad. La digitalización y el funcionamiento autónomo incrementa la exposición a riesgos de ciberataques, lo que exige soluciones robustas de protección.
- Automatización. El avance hacia sistemas autónomos requiere algoritmos de inteligencia artificial fiables y validados en condiciones reales.

Las empresas están impulsando la digitalización del sector mediante plataformas de datos, soluciones de IA y sistemas de control avanzados. Algunas de ellas son Siemens Gamesa Renewable Energy, Vestas o GE Vernova (fabricantes y operadores); Siemens Energy, Microsoft, IBM o Schneider Electric (empresas tecnológicas); ABB o Honeywell (automatización y control); DNV o SAP (datos y análisis).

Los centros tecnológicos apoyan la investigación e innovación en múltiples campos y están desarrollando herramientas clave para la transición hacia parques eólicos inteligentes y autónomos. Algunos de los centros más relevantes en estas áreas son el National Renewable Energy Laboratory (NREL, EE. UU.), el Fraunhofer IWES (Alemania), el TNO (Países Bajos), el DTU Wind Energy (Dinamarca), el SINTEF Digital (Noruega) o el Offshore Renewable Energy Catapult (Reino Unido).

¿Qué podría suponer esto para Asturias?. Una oportunidad para aprovechar el creciente potencial en la industria digital aplicada a la eólica marina: software, análisis de datos, ingenierías, informática e inteligencia artificial, simulación y digitalización industrial.

3.4 PROFESIONALES Y FORMACIÓN.

El desarrollo de esta industria requiere perfiles profesionales altamente especializados, muchos de ellos híbridos entre distintas disciplinas. La formación deberá combinar conocimiento energético, ingeniería marina y digitalización avanzada.

3.4.1 INGENIERÍA

Se está generando una demanda creciente de perfiles de ingeniería altamente especializados, capaces de abordar desafíos multidisciplinares que abarcan desde la ingeniería estructural y naval hasta la electrónica de potencia y la digitalización. Actualmente, el sector requiere ingenieros con formación en áreas como ingeniería offshore, ingeniería mecánica, ingeniería eléctrica, ciencia de materiales y tecnologías digitales, entre otras. En respuesta a esta demanda, universidades y centros de formación han comenzado a desarrollar programas específicos en energías marinas, incluyendo másteres especializados y certificaciones técnicas en operación offshore. Sin embargo, existe todavía una brecha entre la velocidad de crecimiento del sector y la disponibilidad de profesionales cualificados, especialmente en ámbitos emergentes como la eólica flotante, los sistemas híbridos y la digitalización avanzada.

La formación en ingeniería para eólica marina debe evolucionar rápidamente, abordando una serie de retos:

- Multidisciplinariedad. Los proyectos offshore requieren integrar conocimientos de distintas disciplinas (estructuras, fluidos, electricidad, digitalización), lo que exige perfiles híbridos difíciles de formar.
- Adaptación a nuevas tecnologías. La rápida evolución tecnológica (aerogeneradores de gran potencia, plataformas flotantes, hidrógeno offshore) requiere actualización continua de conocimientos.
- Formación práctica offshore. La experiencia en condiciones reales es limitada y costosa, lo que dificulta la capacitación en operación y mantenimiento.
- Digitalización y nuevas competencias. La incorporación de inteligencia artificial, análisis de datos y gemelos digitales exige nuevas habilidades en ingeniería.
- Escasez de talento especializado. El crecimiento del sector está generando competencia por perfiles cualificados a nivel global.

Asturias presenta un contexto favorable para desarrollar capacidades en formación de ingeniería aplicada a eólica marina, por la existencia de titulaciones en ingeniería industrial, naval y energética, centros tecnológicos con experiencia en innovación industrial y una base industrial que facilita la formación práctica. La colaboración que puede ofrecer la región alcanza a programas formativos especializados en eólica marina y formación dual. En este contexto, Asturias podría posicionarse bien en el ámbito de la formación de ingeniería para eólica marina, apoyándose en la colaboración entre universidades, industria y administraciones públicas.

3.4.2 OPERACIÓN Y MANTENIMIENTO.

La operación y mantenimiento representa una parte crítica del LCOE de la eólica marina. La creciente escala de los proyectos offshore, junto con su localización en entornos cada vez más remotos y profundos, está impulsando la necesidad de profesionales altamente cualificados en mantenimiento especializado, logística offshore y gestión de activos. Actualmente, las actividades de O&M combinan mantenimiento correctivo, preventivo y, cada vez más, predictivo, apoyado en sistemas de monitorización continua (SCADA) y análisis de datos. Asimismo, la formación en seguridad es un elemento esencial, con estándares específicos como los definidos por la Global Wind Organisation (GWO), que establecen requisitos para trabajos en altura, supervivencia en el mar y primeros auxilios. La digitalización también está transformando el sector, con el uso creciente de drones, robots y herramientas de inspección remota.

El ámbito de O&M en eólica marina presenta desafíos relevantes para el personal, que debe formarse en ámbitos específicos como:

- Accesibilidad y condiciones offshore. Las condiciones meteorológicas y la distancia a costa dificultan el acceso a los aerogeneradores, lo que exige soluciones logísticas avanzadas y formación específica.
- Seguridad operativa. El entorno offshore presenta riesgos elevados, por lo que la formación en seguridad es crítica y debe actualizarse continuamente.
- Automatización e inspección remota. El uso de drones, vehículos autónomos y robots plantea la necesidad de nuevos perfiles profesionales.

Todos estos elementos requieren de soluciones formativas muy enfocadas hacia la eólica marina que deben aprovechar la experiencia existente en mantenimiento industrial, operaciones portuarias, certificación GWO, desarrollo de simuladores o manejos de drones.

3.5 LOGÍSTICA.

La logística será uno de los factores más determinantes para el desarrollo de la eólica marina. El tamaño creciente de los aerogeneradores exige infraestructuras portuarias capaces de fabricar, ensamblar y transportar componentes gigantescos. La logística se convierte en una pieza clave para reducir costes y acelerar la instalación de parques eólicos.

3.5.1 PUERTOS ESPECIALIZADOS.

En la actualidad, los puertos más avanzados en Europa —especialmente en el Mar del Norte— están adaptando sus infraestructuras con grandes superficies de almacenamiento, muelles reforzados, calados profundos y grúas de gran capacidad. Además, el crecimiento de la eólica flotante está impulsando nuevas configuraciones logísticas, donde los puertos deben permitir el ensamblaje completo de plataformas antes de su remolque al emplazamiento final.

El desarrollo de puertos especializados para eólica marina implica la necesidad de dar soluciones a cuestiones como:

- Capacidad estructural y espacio. Los grandes componentes requieren superficies amplias y muelles con alta capacidad portante para soportar cargas extremadamente elevadas.
- Manipulación de grandes componentes. La logística de palas de más de 100 metros o monopiles de gran diámetro exige grúas y equipos de manipulación especializados.
- Integración logística. La coordinación entre fabricación, almacenamiento, transporte e instalación offshore requiere sistemas logísticos avanzados y digitalizados.
- Adaptación a eólica flotante. El ensamblaje de plataformas flotantes en puerto implica nuevas necesidades en infraestructura, calado y operaciones marítimas.
- Sostenibilidad portuaria. La descarbonización de las operaciones portuarias (electrificación, combustibles alternativos) es un reto creciente.

El desarrollo de logística portuaria especializada involucra a operadores portuarios. Algunos de los operadores que han acometido acciones (logísticas e industriales) son, como operadores portuarios, Associated British Ports (ABP), Port of Rotterdam Authority o Niedersachsen Ports (Alemania); mientras en el ámbito de las empresas logísticas y de transporte algunas referencias señalan a DEME, Jan De Nul o Boskalis.

Para Asturias, la oportunidad nace de las capacidades existentes (infraestructura portuaria, proximidad a zonas con recurso eólico y base industrial vinculada a fabricación de grandes componentes). La participación en la cadena logística de proyectos eólicos marinos debe figurar como objetivo general, pudiendo desarrollarse acciones como la creación de hubs logísticos para eólica marina o el desarrollo de bases para operación y mantenimiento offshore.

3.5.2 INFRAESTRUCTURA LOGÍSTICA.

Aunque actualmente una parte de la logística de palas se basa en transporte especializado (carretera, ferrocarril o barco), con soluciones adaptadas, en el ámbito portuario las operaciones deben tener en cuenta otros factores adicionales. El almacenamiento de grandes componentes (palas, torres, monopiles) requiere amplias superficies, planificación avanzada y sistemas de gestión logística optimizados. Además, la tendencia hacia la fabricación cercana a puerto está reduciendo la complejidad del transporte terrestre, especialmente para componentes de mayor tamaño.

En esta línea, la logística de palas de gran tamaño y almacenamiento de componentes presenta condicionamientos que pueden ser críticos:

- Limitaciones de transporte terrestre. El transporte de palas de gran longitud está condicionado por infraestructuras viarias, radios de giro y restricciones operativas, lo que limita la ubicación de fábricas y centros logísticos.

- Manipulación segura de componentes. Las palas son estructuras ligeras pero sensibles a cargas puntuales, lo que requiere sistemas avanzados de manipulación para evitar daños.
- Optimización del almacenamiento. El almacenamiento de grandes volúmenes de componentes requiere planificación espacial eficiente y sistemas de gestión logística digitalizados.
- Integración logística en cadena de suministro. Debe existir coordinación entre fabricación, transporte, almacenamiento y expedición offshore.
- Impacto ambiental y eficiencia. La reducción de emisiones asociadas al transporte y almacenamiento es un reto creciente en la cadena logística.

Asturias presenta un potencial significativo para posicionarse en la logística de grandes componentes, apoyándose en la infraestructura portuaria existente (con capacidad de ampliación) y una buena experiencia en logística industrial y transporte pesado. Se hace preciso fortalecer la colaboración con operadores logísticos internacionales y afrontar mejora de procesos a través de innovación tecnológica en áreas como la manipulación avanzada para palas de gran tamaño o la optimización de rutas y transporte.

3.5.3 BASES INDUSTRIALES OFFSHORE.

La evolución de la eólica marina hacia sistemas más complejos —incluyendo parques híbridos, eólica flotante y producción de hidrógeno offshore— está impulsando el desarrollo de bases industriales especializadas tanto en tierra como en el mar. Estas infraestructuras actúan como nodos logísticos y operativos para el ensamblaje, operación, mantenimiento y gestión de activos energéticos offshore. En la actualidad, se están desarrollando conceptos como hubs energéticos offshore y plataformas multipropósito que integran generación eólica, producción de hidrógeno, almacenamiento energético y conexión a redes eléctricas malladas. Estos sistemas requieren bases logísticas avanzadas, tanto en puertos como en barcos, que permitan dar soporte a operaciones continuas y a gran escala.

Los retos a los que se enfrenta el sector son:

- Ubicación y optimización logística. La selección de emplazamientos óptimos debe equilibrar proximidad a recursos energéticos, accesibilidad y costes operativos.
- Operación en mar abierto. Las condiciones offshore (oleaje, viento, corrosión) exigen diseños robustos y soluciones avanzadas de mantenimiento.

Para Asturias, este tipo de desarrollos para necesariamente por una colaboración y participación en proyectos conjuntos, en los que la presencia de grandes empresas multinacionales del sector juega un papel clave.

4. SOCIEDAD, ECONOMÍA Y MEDIO AMBIENTE.

4.1 GOBERNANZA MULTINIVEL.

Es necesario definir un modelo de gobernanza que integre de forma coordinada a las distintas administraciones (europea, estatal, autonómica y local), garantizando coherencia regulatoria y agilidad en la toma de decisiones. Este marco debe facilitar la planificación a largo plazo, reducir incertidumbres para los inversores y asegurar la alineación con las políticas energéticas y climáticas.

Un repaso a casos de éxito a lo largo de los últimos años puede ofrecer soluciones cuya aplicación en Asturias pasaría por una adaptación a las circunstancias particulares de la región.

4.1.1 COOPERACIÓN: UN MODELO MACRO-REGIONAL.

En el mar del Norte se ha desarrollado un marco de cooperación entre varios países europeos y en el que la Comisión Europea ha tenido un papel, convirtiendo la zona en un polo de generación eléctrica limpia mediante la eólica marina. Este enfoque macro-regional se ha ido concretando en declaraciones políticas, pactos de inversión y planes coordinados de licitación y desarrollo de infraestructura eléctrica marítima (se articulan proyectos transfronterizos de generación e infraestructuras de red, coordinados con compromisos de inversión).

La gobernanza multinivel en este caso se apoya en varios pilares: a nivel europeo, la Comisión fija el marco regulatorio y facilita la financiación para proyectos de interés común; a nivel estatal, los ministerios de energía coordinan sus planes de red, subastas y marcos retributivos; y a nivel regional y sectorial se integran los intereses de operadores de red, industria, puertos, pesca y organizaciones ambientales. La creación de foros específicos de coordinación para la planificación espacial marina y el desarrollo de redes marinas compartidas permite reducir solapamientos de proyectos, optimizar el uso del espacio y maximizar las sinergias entre países.

Aplicado a Asturias, este modelo define que no puede abordarse este tipo de proyectos solo desde la escala autonómica, sino que requiere una coordinación sistemática con el Estado y con el resto de regiones atlánticas, idealmente enmarcada en una plataforma regional que actúe de forma similar a la cooperación del mar del Norte. La creación de un “espacio Cantábrico-Atlántico” de cooperación en energías marinas permitiría, por ejemplo, coordinar calendarios de subastas, necesidades de red y uso portuario.

4.1.2 EXPERIENCIAS EURORREGIONALES Y DE COOPERACIÓN TRANSFRONTERIZA.

Otro ejemplo ilustrativo de gobernanza multinivel aplicable por analogía a la eólica marina es el de la Eurorregión Aquitania-Euskadi, cuyo plan estratégico incorpora explícitamente una “gobernanza de la cooperación multinivel y orientada a proyectos concretos”. Esta gobernanza se basa en la cooperación entre regiones de dos estados (España y Francia), apoyada por instrumentos de la Unión Europea y alineada con sus estrategias de especialización inteligente. El objetivo general es combinar la coordinación institucional de alto nivel con la ejecución de

proyectos concretos que generen resultados visibles en ámbitos como la innovación, el transporte o las energías marinas. En la práctica, esta gobernanza se traduce en estructuras compartidas de decisión, grupos de trabajo temáticos, mecanismos de financiación conjunta y una agenda de proyectos eurorregionales.

Para Asturias, esta experiencia sugiere la conveniencia de fortalecer la cooperación con otras regiones atlánticas (Galicia, País Vasco, regiones francesas del golfo de Vizcaya) mediante estructuras estables centradas en las energías marinas. Esto podría materializarse en consorcios transfronterizos, enfocando la actividad hacia proyectos en logística portuaria para eólica flotante, nuevas plataformas y materiales avanzados, o integración de renovables marinas con hidrógeno. De este modo, la gobernanza multinivel pasaría también por una dimensión transnacional que refuerce el peso territorial en las decisiones europeas sobre eólica marina.

4.1.3 PROYECTOS EUROPEOS COMO “LABORATORIOS” DE GOBERNANZA: C-TRACK 50 Y CLIPPER.

Varios proyectos europeos en los que ha participado la Fundación Asturiana de la Energía muestran alternativas de estructura la gobernanza multinivel en la transición energética y en las industrias marítimas. El proyecto C-TRACK 50, por ejemplo, tuvo como objetivo movilizar y guiar a las autoridades públicas en la definición de prioridades de política energética a largo plazo, promoviendo una gobernanza multinivel sólida entre niveles regionales y locales y apoyándolos en la elaboración de planes de energía y clima hacia 2050. Por su parte, el proyecto CLIPPER se orientó a mejorar las políticas públicas de apoyo a PYMEs marítimas y a fomentar su diversificación hacia mercados como las renovables marinas, a través de planes de acción regional y cooperación entre regiones europeas. La metodología de CLIPPER se basó en crear grupos regionales de agentes que reúnen a administraciones, clústeres, universidades y empresas, así como en desarrollar convocatorias conjuntas de retos tecnológicos resueltos por PYMEs de distintas regiones.

Estas experiencias pueden trasladarse directamente al ámbito de la eólica marina, consolidando en Asturias grupos de trabajo permanentes que reúnan a la administración regional, FAEN, autoridades portuarias, clústeres metalmecánicos y navales, universidades y empresas tractoras. Este tipo de estructuras permitiría co-diseñar políticas públicas (formación, innovación, infraestructuras, financiación) y proyectos tractores de eólica marina.

4.1.4 INICIATIVAS INTERREGIONALES: SUPERCLUSTER ATLANTIC WIND.

El Superclúster Atlantic Wind (SAW), que reúne a Cantabria, Asturias y Galicia, constituye un ejemplo de gobernanza interregional aplicada específicamente a la eólica marina y, en particular, a la eólica flotante. Esta iniciativa agrupa a más de un centenar de empresas y entidades de la cadena de valor y actúa como plataforma de cooperación entre clústeres regionales, gobiernos autonómicos, centros tecnológicos y empresas tractoras. Su objetivo es posicionar el Arco Atlántico español como polo industrial de referencia en la fabricación de componentes, servicios y soluciones para eólica marina. Desde el punto de vista de la gobernanza multinivel, SAW funciona como un “clúster de clústeres” que conecta la escala

empresarial y sectorial con la escala política autonómica y, a través de proyectos europeos, con la escala comunitaria. A través de proyectos como North Value se busca impulsar la cadena de valor de la eólica flotante en el norte de España, trabajando en grupos de trabajo especializados y en coordinación con administraciones y agentes regionales.

Para Asturias, que ya forma parte de SAW, resulta clave aprovechar esta estructura para reforzar su propia gobernanza interna en eólica marina. Una vía concreta sería configurar subgrupos de trabajo específicos para cuestiones como logística portuaria, formación especializada o innovación en materiales, donde FAEN y la administración regional actúen como enlace entre el nivel autonómico y la dinámica interregional del superclúster. Esto permitiría que las prioridades asturianas se reflejen mejor en la agenda conjunta europea y en la captación de proyectos y financiación europea.

4.2 PLANIFICACIÓN ESPACIAL MARINA INTEGRADA.

La ordenación del espacio marítimo debe basarse en criterios técnicos, ambientales y socioeconómicos, permitiendo compatibilizar la eólica marina con otros usos del mar (pesca, transporte marítimo, biodiversidad, defensa). La planificación debe apoyarse en herramientas avanzadas de análisis y en procesos participativos que incorporen a los actores locales.

En el contexto español, los Planes de Ordenación del Espacio Marítimo (POEM) constituyen el instrumento central de gobernanza multinivel en el medio marino, al definir la zonificación de usos en las cinco demarcaciones marítimas del país. Su aprobación mediante el Real Decreto 150/2023 identifica Zonas de Uso Prioritario y Zonas de Alto Potencial para actividades como la eólica marina, dentro de aproximadamente 5.000 km² declarados aptos para distintos usos energéticos en un millón de km² de mar.

El proceso de elaboración de los POEM ha requerido un amplio procedimiento de coordinación interadministrativa, con la intervención de todos los ministerios con competencias en el medio marino y la participación de comunidades autónomas costeras y sectores económicos afectados. Organismos como la Comisión Interministerial de Estrategias Marinas y comités específicos de coordinación han permitido integrar objetivos de conservación, pesca, defensa, navegación y energía en un marco único de planificación espacial. Esta coordinación se complementa con procesos de participación pública en los que han intervenido organizaciones ambientales, sectores pesqueros, empresas energéticas y otros agentes sociales.

Para Asturias, los POEM ofrecen una plataforma administrativa sobre la que construir una gobernanza multinivel más operativa y cercana al territorio.

4.3 SOSTENIBILIDAD AMBIENTAL.

El desarrollo de parques eólicos marinos debe minimizar su impacto sobre los ecosistemas marinos y costeros. Esto implica:

- Evaluaciones ambientales rigurosas y basadas en evidencia científica.
- Seguimiento continuo de impactos (fauna marina, aves, fondos marinos).
- Aplicación de soluciones tecnológicas para reducir afecciones (ruido submarino, colisiones, etc.).

Asimismo, debe promoverse un enfoque de ciclo de vida que incluya fabricación, operación y desmantelamiento.

4.3.1 MAR DEL NORTE: PLANIFICACIÓN Y COOPERACIÓN.

El Mar del Norte constituye un territorio en el que se han desarrollado iniciativas singulares en el ámbito de la eólica marina, con países como Dinamarca, Alemania y Países Bajos coordinando sus políticas energéticas y ambientales. Entre los ejemplos de actividades que se desarrollan pueden citarse el desarrollo de planes espaciales marinos integrados, las evaluaciones ambientales estratégicas a gran escala o la monitorización conjunta de impactos acumulativos. Con ello se ha conseguido la reducción de conflictos con la normativa de protección de la biodiversidad mediante zonificación acorde a las obligaciones existentes, la mejora en la protección de hábitats sensibles o la generación de bases de datos compartidas sobre impactos. Para ello ha sido clave un proceso de gobernanza que incorporó la coordinación entre gobiernos nacionales y organismos como ENTSO-E y la integración de áreas como ciencia-política-industria en el proceso de planificación.

Para Asturias, la aplicación de un modelo de trabajo de este tipo requiere el desarrollo de planificación marina coordinada con el Estado, la evaluación de impactos acumulativos y la cooperación interregional (Galicia, Cantabria, País Vasco)

4.3.2 BORSSELE WIND FARM ZONE (PAÍSES BAJOS): EVALUACIÓN AMBIENTAL PREVIA.

El gobierno de Países Bajos realizó una evaluación ambiental estratégica previa al desarrollo, asumiendo el análisis ambiental antes de licitar los proyectos. El análisis incluyó estudios de impacto sobre aves o mamíferos marinos, además de otros muchos elementos ambientales. Los datos se pusieron a disposición de los promotores en formato abierto, lo que en gran medida disminuyó la incertidumbre regulatoria, disminuyendo los riesgos ambientales en fase de proyecto y acelerando el desarrollo. Además, se incluyeron de forma anticipada y mejorada medidas de mitigación desde la fase de diseño. Este liderazgo estatal, fuertemente apoyado por el TNO con medidas técnico-científicas muy estructuradas, permitió una colaboración con industria desde fases tempranas del desarrollo de proyectos.

Una potencial aplicación a Asturias pasaría por impulsar evaluaciones ambientales estratégicas previas, generar datos abiertos para desarrolladores y tratar con ello de reducir conflictos en fases iniciales del desarrollo de proyectos ligadas a la tramitación administrativa.

4.3.3 HORNSEA PROJECT (REINO UNIDO): SEGUIMIENTO AMBIENTAL.

Uno de los mayores complejos eólicos offshore, desarrollado por Ørsted, ha implementado programas avanzados de seguimiento ambiental basados en actividades como la monitorización

de aves mediante radar y GPS, el seguimiento de mamíferos marinos o la evaluación de ruido submarino. Los resultados ambientales son muy significativos y se han traducido en la mejora del conocimiento sobre interacción fauna-aerogeneradores, un incremento de la capacidad de ajuste de operaciones de máquinas eólicas para reducir impactos de aves y el desarrollo de mejores prácticas consideradas así internacionalmente. En términos de gobernanza, la continua colaboración entre el regulador, las empresas y los centros científicos ha facilitado la implantación de medidas de supervisión continua y adaptación.

Para Asturias, copiar aspectos relacionados con este modelo representaría implementar sistemas de monitorización continua, desarrollar protocolos adaptativos de operación o incrementar la colaboración con centros de investigación locales, pudiendo centralizar la coordinación de este tipo de programas a través de FAEN como ya se hizo con el Convenio Eólico en el diseño de infraestructuras como el eje ASGA.

4.3.4 HYWIND SCOTLAND: MITIGACIÓN.

Las acciones de mitigación en esta instalación son interesantes, puesto que se trata de un primer parque eólico flotante comercial. Los estudios específicos de impacto en ecosistemas profundos, la monitorización de estructuras flotantes y fondeos y la evaluación de efectos en pesca han sido elementos constantes, lo que ha permitido desarrollar programas de mitigación continuos y permanentemente adaptados a la realidad. Como principales resultados técnicos, tras aplicar criterios ambientales de diseño, se ha conseguido un bajo impacto en fondos marinos frente a soluciones fijas, la validación de eólica flotante como alternativa sostenible o la mejora en diseño de sistemas de anclaje. En cuanto a la gobernanza, se ha establecido una colaboración con centros como SINTEF Ocean y se han adaptado medias regulatorias.

En Asturias, el desarrollo de soluciones de bajo impacto en fondos marinos o la integración con sectores pesqueros para una mejor convivencia de estas actividades económicas, podrían tomar parte de este modelo como punto de partida para su implantación.

4.4 ACEPTACIÓN SOCIAL Y LA PARTICIPACIÓN.

La aceptación social es un factor crítico para el desarrollo de la eólica marina. Es necesario:

- Establecer mecanismos de participación temprana y transparente.
- Integrar a comunidades locales, sectores económicos afectados y agentes sociales.
- Desarrollar modelos de retorno económico y social en el territorio.

La gobernanza debe evolucionar hacia modelos más inclusivos y colaborativos.

4.4.1 BLOCK ISLAND WIND FARM: INTEGRACIÓN CON COMUNIDADES LOCALES.

El primer parque offshore en U.S.A. fue desarrollado con mucha participación local. Entre las acciones que se desarrollaron estuvieron la evaluación de impacto socioambiental integrada, la participación de comunidades y sector pesquero en el desarrollo del proyecto y la puesta en marcha de programas de compensación a personas afectadas. Como resultados ambientales y

sociales directos, se produjo una alta aceptación social del proyecto y se minimizaron conflictos, convirtiendo algunas de las soluciones desarrolladas en modelos replicables en otros proyectos. Para ello fue clave el enfoque participativo en todas las fases de desarrollo y la transparencia en la toma de decisiones.

Para Asturias, la incorporación desde fases iniciales de desarrollo de proyectos de todos los colectivos afectados resulta clave para evitar la conflictividad. Con ello se podrán diseñar mecanismos de retorno territorial diseñados especialmente para la región y el propio tejido productivo del entorno. Entre los colectivos a implicar están claramente la pesca y el turismo.

4.4.2 MIDDELGRUNDEN OFFSHORE WIND FARM (DINAMARCA).

Es un ejemplo emblemático de participación ciudadana directa, ya que aproximadamente el 50% del parque es propiedad de una cooperativa local. La participación directa de ciudadanos en la inversión, el proceso abierto de consulta pública desde fases iniciales de desarrollo del proyecto y la transparencia en el análisis y comunicación de impactos visuales y territoriales ha facilitado la evolución del proyecto. El resultado es singular: alta aceptación social, con más un 80% de posicionamiento favorable en encuestas locales, la generación de ingresos directos para ciudadanos y la creación con ello de un fuerte vínculo entre proyecto y comunidad. Las claves de gobernanza se situaron en la colaboración entre ayuntamiento de Copenhague, promotores y ciudadanía y el modelo de propiedad compartida.

Traer a Asturias un modelo de este tipo requiere del desarrollo de esquemas de participación financiera local y el impulso de cooperativas energéticas vinculadas a offshore.

4.4.3 SAINT-NAZAIRE OFFSHORE WIND FARM (FRANCIA).

El proyecto se llevó a cabo con un proceso formal de debate público nacional coordinado por la Commission Nationale du Débat Public. Las consultas públicas estructuradas y vinculantes acercaron el proyecto a los sectores pesquero, turístico y ambiental, integrando las propuestas realizadas en el diseño del proyecto (en la medida de lo posible). Se redujeron significativamente litigios, se mejoró el diseño del parque (ubicación, configuración) y se alcanzó una mayor legitimidad institucional. La intervención estatal y de los actores locales fue clave.

En Asturias, esto requeriría establecer procesos de consulta temprana a actores clave (pesca, turismo, comunidades costeras), incorporando propuestas en el diseño de proyectos.

4.4.4 HORNSEA PROJECT (REINO UNIDO).

El proyecto impulsado por Ørsted con mecanismos de retorno territorial incluyó fondos de inversión comunitaria, programas de empleo local y contratación de proveedores regionales. Todas estas medidas llevaron a la creación de empleo local, la mejora de la percepción social del proyecto y el desarrollo de capacidades industriales en la región. Fue esencial la alianza empresa–administración–comunidad y los programas de beneficios compartidos.

La aplicación en Asturias de este tipo de medidas llevaría a la creación de fondos económicos de impacto local, desarrollo de estrategias de empleo y formación vinculadas a offshore y la integración de industrias en la cadena de valor regional.

4.5 DESARROLLO TERRITORIAL Y LA CREACIÓN DE VALOR LOCAL.

La eólica marina debe actuar como motor de desarrollo económico en las regiones costeras, fomentando:

- La creación de empleo cualificado.
- El desarrollo de cadenas de suministro locales.
- La atracción de inversión industrial y tecnológica.

Es clave asegurar que los beneficios del desarrollo offshore se distribuyan de manera equilibrada en el territorio.

4.5.1 ESBJERG (DINAMARCA).

La ciudad de Esbjerg se ha transformado en un hub de eólica marina mediante una estrategia coordinada entre gobierno, puerto e industria. La especialización portuaria en offshore ha permitido la atracción de fabricantes y operadores. Una parte importante de la capacidad eólica marina instalada en la Unión Europea ha pasado por este puerto, lo que ha permitido la generación de miles de empleos directos e indirectos vinculados a offshore, así como el desarrollo de un completo ecosistema industrial. La alianza entre autoridades locales, gobierno danés y empresas como Ørsted a través de una planificación a largo plazo ha sido esencial en este éxito local.

Todas estas medidas son aplicables directamente a Asturias.

4.5.2 HULL (REINO UNIDO).

Hull ha experimentado una transformación industrial gracias a la implantación de fábricas de palas y actividad offshore. La inversión industrial liderada por Siemens Gamesa Renewable Energy y el apoyo institucional y regional han desembocado en la creación de programas de formación específicos. Todo ello se traduce en la creación de gran cantidad de empleo cualificado y la revitalización económica de una región industrial en declive a través del desarrollo de cadena de suministro local. La evolución, para poder seguir compitiendo en el futuro pasa por la colaboración gobierno central, de autoridades locales y de la industria.

Asturias puede ver en este ejemplo, bajo el prisma local y no regional, como facilitar la atracción de fabricantes de componentes, programas de formación adaptados a necesidades industriales y la reconversión de sectores industriales existentes,

4.5.3 BREMERHAVEN (ALEMANIA).

Bremerhaven se ha consolidado como un clúster de referencia en eólica marina, integrando industria, investigación y logística. La presencia de centros tecnológicos como Fraunhofer IWES ha sido determinante, junto con el apoyo institucional. Esto ha favorecido el desarrollo de infraestructuras portuarias especializadas, creando empleo altamente cualificado y atrayendo inversión en I+D. La integración de ciencia, industria y administración a través de una acción regional coordinada funciona para crear colaboraciones de desarrollo de estrategias a largo plazo.

En Asturias, la colaboración y participación de clústeres regionales, la integración universidad-centros tecnológicos-industria y el impulso de I+D aplicado serán esenciales para emular este caso de éxito.

4.5.4 EEMSHAVEN (PAÍSES BAJOS).

Eemshaven ha evolucionado su modelo de actividad hacia puerto energético especializado en offshore. Lo ha conseguido con el desarrollo de infraestructuras específicas, la atracción de empresas de instalación y mantenimiento y una buena integración logística-industrial. Los resultados son claros: generación de empleo en logística avanzada, posicionamiento como nodo clave en el Mar del Norte y crecimiento de empresas auxiliares. Ha sido determinante la planificación estratégica del uso del puerto.

Asturias deberá integrar de logística y actividad industrial (incluso buscando la colaboración con este puerto u otros similares de referencia), desarrollar servicios offshore y atraer operadores internacionales.

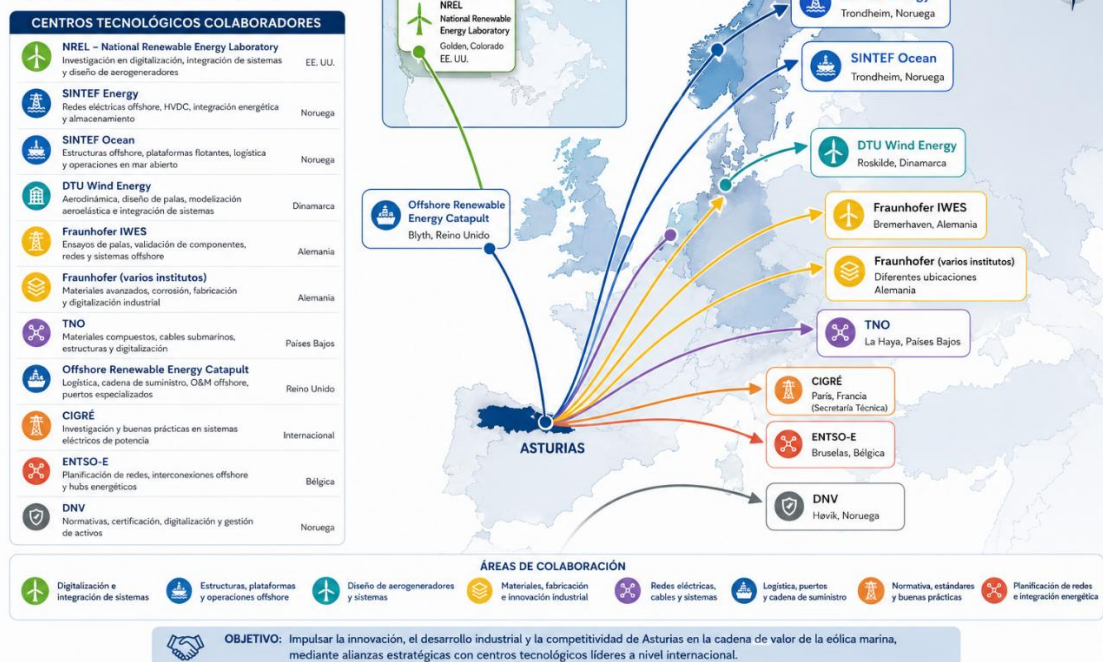
5. CONCLUSIONES.

A modo de reflexiones, se realizan algunas preguntas para avanzar en el desarrollo de la eólica marina en Asturias, recopilando posibles aplicaciones recogidas a lo largo del texto.

- ¿Puede Asturias posicionarse en la eólica marina fortaleciendo su tejido industrial e innovador desarrollado colaboraciones con otras regiones y centros como puede verse en el mapa?

MAPA DE ALIANZAS ESTRATÉGICAS DESDE ASTURIAS

COLABORACIÓN EN EÓLICA MARINA



- Al haber situado la eólica marina como elemento explícito en la gobernanza de la Estrategia de Transición Energética Justa de Asturias, reconociendo su potencial para la diversificación industrial y la descarbonización del sistema energético regional, ¿puede Asturias articular un modelo de gobernanza con la colaboración con el Estado para desarrollar acciones que se enmarcan en la Hoja de Ruta de la eólica marina y energías del mar del Estado, y los objetivos europeos para 2030 y 2050?
- ¿Es viable la creación de estructuras de gobernanza estado-regiones-empresas, que agrupen a las comunidades autónomas del norte, al Ministerio, a los operadores de red y a los puertos, inspirándose en la lógica de cooperación macro-regional del mar del Norte?. ¿Sería esto compatible con el posicionamiento respecto a los POEM, el calendario de subastas de eólica marina, las necesidades de refuerzo de la red eléctrica marina y la participación conjunta en proyectos europeos?. ¿Facilitaría esto a Asturias su participación activa y su capacidad de influir en decisiones clave que se toman a nivel estatal y comunitario?
- A escala regional, ¿qué facilitaría institucionalizar un grupo de trabajo permanente sobre eólica marina en el que participen el Principado, Ayuntamientos, FAEN, las Autoridades Portuarias, clústeres industriales, universidades y representantes de sectores afectados como la pesca o el turismo?. ¿Podría asumir este grupo de trabajo funciones de coordinación de proyectos, identificación de necesidades de formación, apoyo a la innovación empresarial y canalización de la participación regional, tal como se planteaba en proyecto e iniciativas como SAW, C-TRACK 50 o CLIPPER?. ¿Puede facilitar esta estructura la conexión entre las prioridades locales y los instrumentos de



financiación y apoyo disponibles a nivel europeo con figuras referentes en la región como FAEN?.

- ¿Cómo reforzar los mecanismos de participación y diálogo con la sociedad asturiana en torno a la eólica marina?. Apoyándose en las lecciones de otros territorios ¿cómo organizar una estructura de diálogo permanente, colaborativa y transparente, incluyendo a organizaciones ambientales, cofradías de pescadores, autoridades locales y sector turístico entre otros?. ¿Facilitaría esta estructura la identificación de preocupaciones y oportunidades desde fases tempranas de los proyectos?. ¿Permitiría esto integrar de forma transparente la información sobre impactos, medidas de mitigación y beneficios socioeconómicos?. ¿Podría incorporar esta estructura la posibilidad de organizar mecanismos de colaboración financiera para la participación local en el desarrollo de proyectos?. ¿Ayudaría a construir la legitimidad social necesaria para avanzar en una transición energética que sea percibida como justa y equilibrada para el territorio?.

6. BIBLIOGRAFIA

Centro tecnológico	Líneas / proyectos de investigación relevantes	Referencias técnicas y científicas
National Renewable Energy Laboratory (NREL)	Gemelos digitales para aerogeneradores; análisis estructural de palas; O&M predictivo; integración offshore	NREL (2022). <i>Digital Twin for Wind Energy Systems</i> ; NREL (2021). <i>Offshore Wind Systems Integration Study</i>
Fraunhofer IWES	Ensayos estructurales de palas; redes offshore; validación de sistemas eléctricos; digitalización	Fraunhofer IWES (2023). <i>Wind Energy Report</i> ; Popko et al. (2020). <i>Offshore Grid Studies</i>
DTU Wind Energy	Aerodinámica avanzada; diseño de palas; modelización aeroelástica; integración de sistemas offshore	DTU (2022). <i>Wind Energy Science Reports</i> ; Bak et al. (2013). <i>Light Rotor Project</i>
TNO	Materiales compuestos; cables submarinos; digitalización industrial; estructuras offshore	TNO (2021). <i>Offshore Wind Innovation Report</i> ; TNO (2020). <i>Structural Health Monitoring</i>
SINTEF Energy	Redes HVDC; cables submarinos; integración energética offshore; almacenamiento	SINTEF (2022). <i>Offshore Energy Systems</i> ; SINTEF (2021). <i>HVDC Grid Development</i>
SINTEF Ocean	Logística offshore; estructuras flotantes; operaciones en mar abierto; transporte marítimo	SINTEF Ocean (2022). <i>Marine Operations for Offshore Wind</i>
Offshore Renewable Energy Catapult	Cadena de suministro; logística portuaria; O&M offshore; hubs energéticos	ORE Catapult (2022). <i>Supply Chain Development</i> ; ORE Catapult (2021). <i>Future Offshore Wind</i>
CIGRÉ	Redes HVDC; cables submarinos; integración de sistemas eléctricos offshore	CIGRÉ (2021). <i>HVDC Grids Technical Brochure</i> ; CIGRÉ WG B1 reports
ENTSO-E	Planificación de redes offshore; interconexión europea; hubs energéticos	ENTSO-E (2022). <i>Offshore Network Development Plans</i>
DNV	Normativas offshore; digitalización energética; O&M; estructuras y corrosión	DNV (2023). <i>Energy Transition Outlook</i> ; DNV-ST-0126; DNV-ST-0145
IEC	Estándares de comunicación (SCADA); cables; sistemas eléctricos	IEC 61400-25; IEC TC20 (cables eléctricos)
Fraunhofer	Materiales avanzados; corrosión; digitalización industrial	Fraunhofer (2022). <i>Advanced Materials for Energy Systems</i>
Global Wind Organisation	Formación en seguridad offshore; certificación profesional	GWO (2022). <i>Training Standards</i>
ISO	Protección anticorrosión; estándares estructurales	ISO 12944: <i>Corrosion Protection of Steel Structures</i>
AMPP	Corrosión en offshore; materiales y recubrimientos	AMPP (antes NACE). <i>Corrosion Standards</i>