

IBERDROLA INNOVA I+D+i 2021/2022

GUÍA INTRODUCTORIA AL TEMA "LA ENERGÍA EÓLICA MARINA FLOTANTE"

Texto de D. Ignacio Cruz

INTRODUCCIÓN

El desarrollo de la energía eólica marina en el mundo continúa imparable camino de situarse como una de las tecnologías de generación de energía limpia, fiable y segura, decisiva en las próximas décadas, en las que pretendemos alcanzar progresivamente la total descarbonización de la economía mundial, para evitar que el cambio climático siga progresando.

El continente europeo es en la actualidad el líder tecnológico mundial en energía eólica marina con 24 GW de capacidad instalada de los 35,3 GW instalados en todo el mundo. China con casi 10 GW está en segunda posición en capacidad eólica marina instalada.

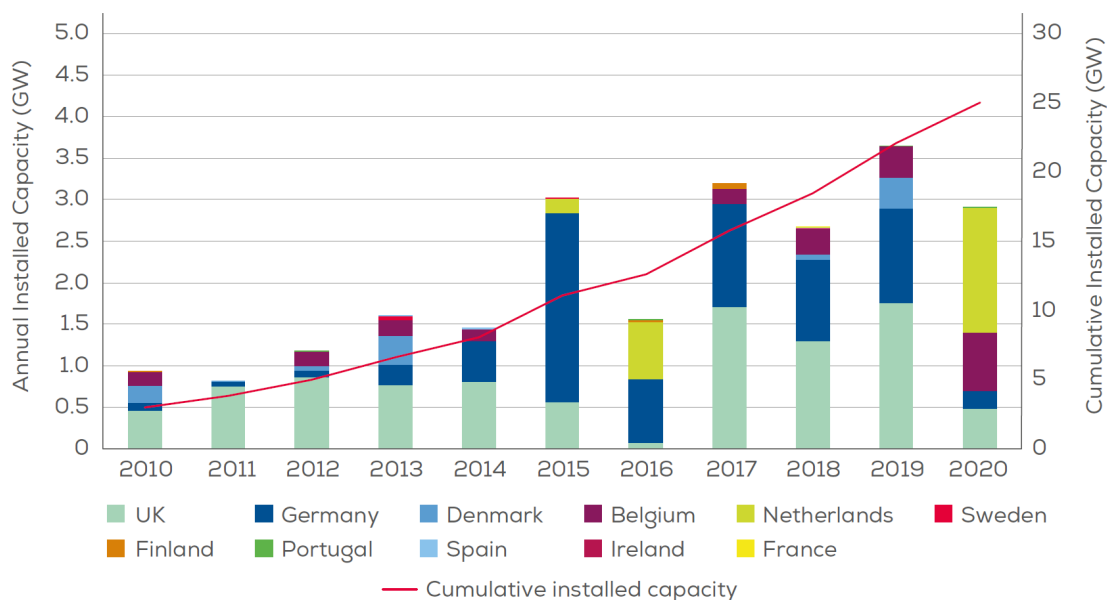


Figura 1. Progresión en los últimos 10 años de la capacidad eólica instalada en el mar en Europa (Fuente: WindEurope).

En el mes de Julio de este año, la Comisión Europea presentó el paquete denominado "Fit-for-55" [1], el cual incluye una serie de propuestas legislativas para cumplir el objetivo climático de **reducción de emisiones en la Unión Europea del 55% para 2030**. La propuesta de la Comisión eleva el objetivo de energía renovable de la UE del 32%

al 40% para 2030. Esto significa que la UE necesitará 451 GW de capacidad de energía eólica total (en tierra y en el mar) en el año 2030, frente a los 180 GW actuales. Para lograrlo se necesitará instalar en los países que componen la Unión Europea unos 30 GW de nuevos parques eólicos cada año desde ahora hasta 2030, una importante aceleración en la expansión de la energía eólica.

Pero cuánta capacidad deberá ser eólica marina? En Noviembre de 2020, con el objeto de cumplir el objetivo de la UE de neutralidad climática para 2050, la Comisión Europea presentó la Estrategia de la UE sobre energías renovables marinas [2]. Esta estrategia proponía incrementar la capacidad eólica marina desde su nivel a finales de 2020 de 12 GW hasta al menos 60 GW para 2030 y hasta 300 GW para 2050. Además la Comisión tenía como objetivo complementar la energía eólica marina con 40 GW de energía oceánica (undimotriz, corrientes, mareas) y otras tecnologías emergentes como la eólica flotante para 2050.

Pero hay algún objetivo para la eólica marina flotante? En la actualidad solo hay 62 MW eólicos flotantes instalados en las aguas europeas, pero el potencial si se logra continuar con la senda de reducción de costes es inmenso. Según the EU Blue Economy Report se estima en unos 4.000 gigavatios [3]. Según este informe, la energía eólica marina flotante podría tomar una participación del 14% del mercado eólico marino total en Europa, contribuyendo alrededor del 3% del suministro eléctrico total de Europa para 2050 con una capacidad instalada de alrededor de 40 gigavatios. También se comenta que se podrían instalar hasta 3.000 gigavatios de capacidad en áreas marinas con una profundidad de más de 100 metros, lo que brinda el potencial de abrir nuevos mercados para la energía eólica en el Océano Atlántico, el Mar Mediterráneo e incluso el Mar Negro.

Por lo tanto, los ambiciosos objetivos de la Unión Europea para la expansión de la energía eólica marina (la UE requiere 300 GW de generación eólica marina instalada en aguas europeas para 2050) sólo se pueden lograr si se explota adecuadamente el enorme potencial de la energía eólica marina flotante.

En relación al empleo, el informe muestra, utilizando datos de 2018, que el empleo en el sector eólico marino se ha disparado con un número de puestos de trabajo en esta industria que creció en un 15% entre 2017 y 2018. Además, ha quedado también claro que la crisis de Covid-19 ha tenido un impacto mucho menor sobre las energías renovables marinas, que sobre otros sectores de la economía azul.

Condiciones para desarrollar la tecnología eólica marina

Para desarrollar la tecnología eólica marina lo primero que hace falta es recurso eólico abundante y en el mar está claro que lo hay al no haber obstáculos ni rugosidad en el terreno. Si revisáis la Guía del Programa en Energía sobre 'La energía eólica marina' que se utilizó en la edición

2019-2020, podéis ver un mapa eólico marino de Europa y de Estados Unidos.

Pero además de recurso eólico, en este caso, igual que cuando hacemos un proyecto en tierra, es necesario conocer con la mayor precisión posible las características de la plataforma marina, su profundidad y su batimetría o levantamiento topográfico del relieve de superficies del terreno cubierto por el agua, por ejemplo en el fondo del mar. (Figura 2)

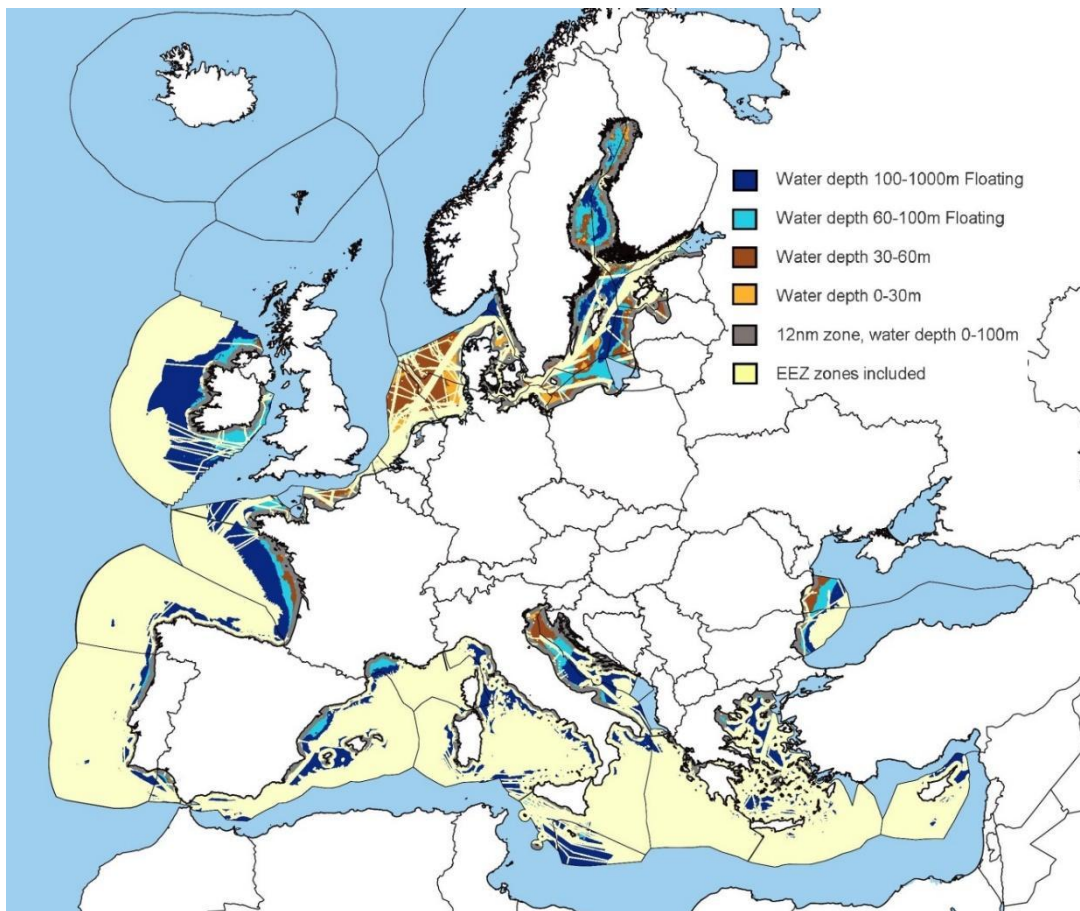


Figura 2. Mapa de profundidades realizado en el marco del proyecto europeo ENSPRESSO [4].

A continuación en la figura 3 obtenida del mapa eólico marino "Global Wind Atlas" [7] elaborado por el Banco Mundial, y en el que podéis encontrar de forma gratuita información sobre el recurso eólico en cualquier punto del mundo incluyendo el recurso eólico disponible cerca de las costas de todo el mundo en una franja de unos 200 Km. Como podéis ver en el mapa, el recurso eólico se encuentra por encima de 9 m/s de media anual a 100 metros de altura en toda la costa atlántica y mar del norte en Europa. Más del 60% del recurso eólicos en Europa se

encuentra en emplazamientos marinos de más de 60 metros de profundidad, de ahí la gran importancia de esta tecnología.

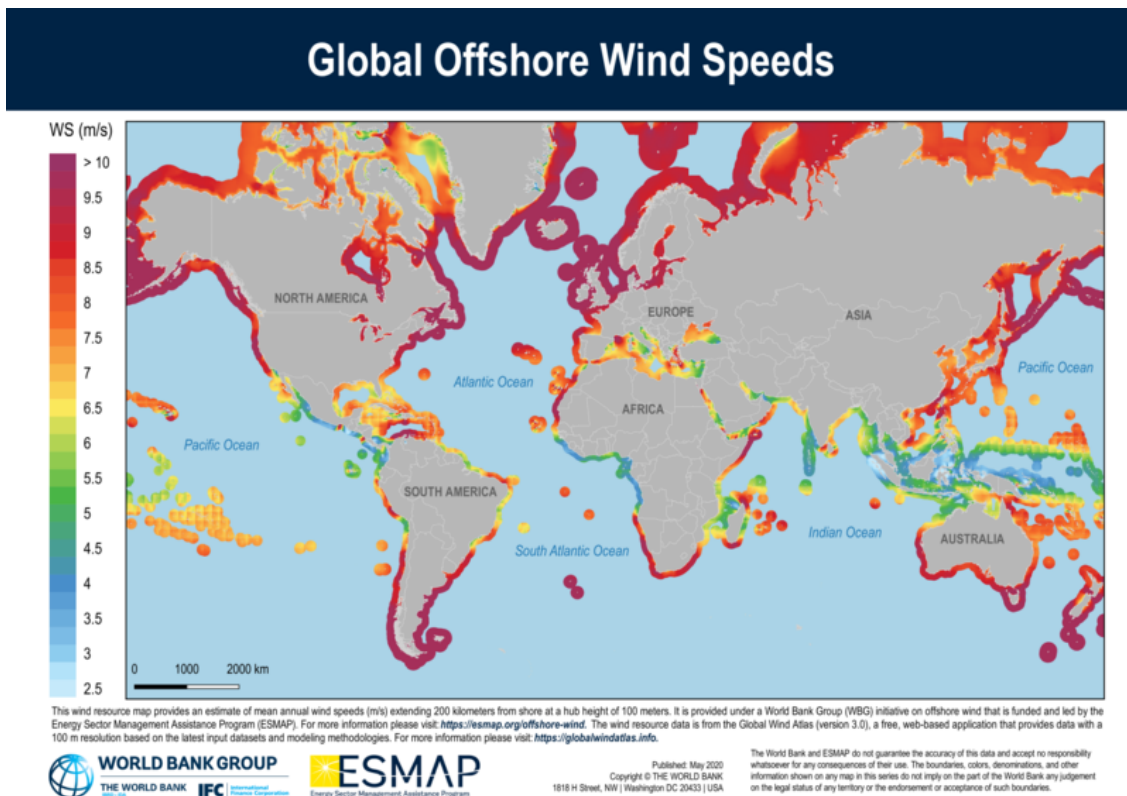


Figura 3. Mapa eólico marino “Global Wind Atlas” [7] elaborado por el Banco Mundial.

Bueno, ya tenemos el recurso eólico y la batimetría de la plataforma marina y los resultados parecen prometedores. Nos falta la tecnología.

Existe hoy en día tecnología eólica flotante para producir energía eléctrica a partir del viento en emplazamientos marinos de más de 50 metros de profundidad?

La respuesta es que sí. Hay multitud de ideas desarrolladas con distinto grado de madurez, algunas de las cuales ya se están utilizando ahora mismo para generar energía eléctrica con gran éxito como veréis a continuación.

TECNOLOGÍA EÓLICA FLOTANTE.

El profesor William E. Heronemus de la Universidad de Massachusetts Amherst introdujo el concepto de turbinas eólicas flotantes en alta mar en 1972. No fue sino hasta mediados de la década de 1990, después de que la industria eólica comercial estuviera bien establecida, que se abordó el tema nuevamente por la comunidad de investigación convencional. A partir de ese momento surgieron múltiples soluciones,

prácticamente todas inspiradas en las experiencias obtenidas en el sector del petróleo y del gas, pero con algunas diferencias cruciales.

En las plataformas eólicas marinas flotantes, el centro de gravedad del sistema se encuentra habitualmente muy alto, al utilizar aerogeneradores de eje horizontal que concentran su masa en la parte alta (Rotor y góndola), además el rotor gira por lo que se produce cabeceo debido al efecto giroscópico. Esto no ocurre en explotaciones flotantes de petróleo y gas que normalmente son menos dinámicas y con el centro de gravedad más cerca de la superficie del mar. Por otro lado, el beneficio de una explotación de petróleo es normalmente mayor que en una explotación eólica, lo que permite una mayor generosidad en el diseño de la misma con soluciones más costosas.

En la tecnología eólica, la única forma de desarrollar soluciones viables más costosas es aumentando la escala de los aerogeneradores como ya se está observando en los últimos años, en los que se ha evolucionado de una potencia nominal por turbina de 5-6 MW en aplicaciones marinas, a turbinas de 12-15 MW [8][9][10][11] hoy en día y se prevé que en 2030 la potencia nominal de las turbinas eólicas marinas se encuentre por encima de 20 MW.

Otra opción es desarrollar aerogeneradores flotantes de eje vertical, con menos eficiencia en la conversión pero más fácil flotabilidad y estabilidad al tener el centro de gravedad más cerca de la superficie del agua. El problema es la resistencia de los grandes fabricantes a desarrollar tecnología de gran potencia prácticamente nueva con el riesgo que ello conlleva aunque ha habido algunos conceptos como el británico NOVA Project desarrollado por el ETI (Energy Technologies Institute) (Ver Figura 4), y proyectos experimentales como el proyecto Deepwind [12] liderado por la Universidad Técnica de Dinamarca DTU, el francés Vertiwind desarrollado por la ingeniería Technip [13], o el sueco SeaTwirl [14]



Figura 4. Diseños del ETI para el proyecto NOVA-V-VAWT.

Podemos clasificar todas las diferentes plataformas o cimentaciones flotantes en cuatro grandes tipos:

- **Plataforma flotante monopilar tubular** o en inglés “spar buoy”, Es como una gran boya flotante cilíndrica con lastre en su interior para mantenerse en posición vertical en el agua, amarrada por cables o cadenas al fondo marino. La estabilidad en ésta plataforma frente a la acción combinada aero-hidrodinámica del viento y del mar, se logra mediante el control del lastre que suele ser agua.
- **Plataforma flotante semi-sumergible**, en inglés “Semi-submersible o semi-sub” que es una estructura con varios flotadores que están parcialmente sumergidos en el agua, la estructura está amarrada por cables o cadenas al fondo marino. Este tipo de plataformas son muy utilizadas por la industria del gas y del petróleo para su explotación en el mar. En esta plataforma la estabilidad se logra mediante el control dinámico de la flotación.
- **Plataforma flotante actuando en contraflotación** mediante unos cables en tensión anclados al fondo del mar. En inglés se denominan TLP ‘Tension-Leg Platform’ siendo obviamente las

patas los cables tensionados. En esta plataforma la estabilidad se logra mediante la tensión de las líneas de fondeo o amarras.

- **Plataforma flotante tipo barcaza**, en inglés "barge", en la que prácticamente toda la estructura se encuentra flotando por encima de la superficie del agua, amarrada por varios cables o cadenas que anclan normalmente un único punto de la estructura al fondo marino. La estabilidad se logra mediante la disposición de una gran superficie de flotadores.

En la foto podéis ver los cuatro tipos de plataforma flotantes, con el aerogenerador instalado encima de ellas. Podéis ver cómo el sistema de amarrado o de fondeo no está tensado, dando cierta libertad de movimiento a las plataformas de tipo boya, barcaza y semisumergible mientras que en la de tipo TLP estas líneas están tensionadas por lo que no puede moverse prácticamente.

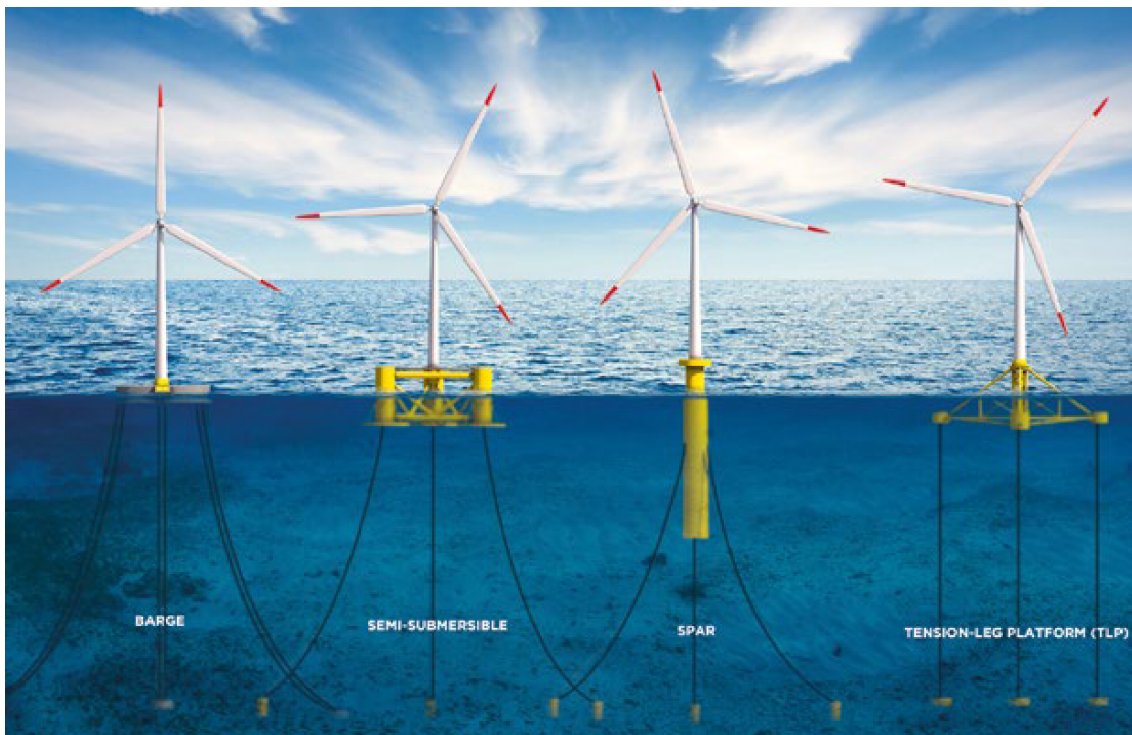


Figura 5. Diferentes tecnologías de plataformas o cimentaciones flotantes para instalación de aerogeneradores.

A continuación, se comentan los tipos de plataformas flotantes mas desarrolladas:

PLATAFORMAS FLOTANTES MONOPILAR TUBULAR (SPAR-BUOY)

Como ya se ha comentado, este tipo de plataforma se basa en una boya flotante cilíndrica (spar-buoy) amarrada por cables o cadenas al fondo

marino. Su subestructura está estabilizada mediante lastre para que todo el sistema aerogenerador-plataforma flote en posición vertical.

El ejemplo más representativo de este tipo de plataforma flotante es el proyecto HYWIND, diseño desarrollado y patentado por división de nuevas energías de la empresa noruega NORSK HYDRO, que posteriormente pasó a ser propiedad de la empresa petrolera noruega STATOIL (Hoy en día EQUINOR).

También ha habido otros desarrolladores hasta la fecha menos exitosos como el prototipo sueco SWAY desarrollado por la empresa INNOCEAN A/S con una turbina con rotor a sotavento de la torre [15].

La plataforma flotante HYWIND fue desarrollada para profundidades entre 120 m y 700 m. Hay que tener en cuenta que al disponer de una única estructura flotante tipo boya tubular cilíndrica, la longitud vertical de esta supone una profundidad mínima que es de 120.

El primer prototipo fue instalado en 2009 a doce kilómetros al suroeste de Karmøy en la costa de Noruega. Este fue el primer aerogenerador flotante del mundo en la escala de megavatio.

La plataforma flotante fue diseñada e instalada por la empresa francesa Technip y construida por la empresa finlandesa Technip Port en Finlandia desde tuvo que ser remolcada hasta un fiordo cerca del emplazamiento, donde fue lastrado y una vez en flotando en posición vertical se instaló el aerogenerador mediante un barco grúa semisumergible especial.



Figura 6. Arrastre e izaje de la plataforma flotante tipo boya e instalación de aerogenerador.

Posteriormente todo el conjunto fue llevado a la posición de anclaje en el emplazamiento de 220 m de profundidad. Para completar la instalación fueron necesarias seis operaciones.

La plataforma fabricada en acero pesaba unas 5.300 toneladas de las cuales 3.500 toneladas eran lastre para mantener la plataforma estable en posición vertical frente a cualquier solicitación inducida por el viento y las olas.

El lastre era principalmente un mineral de tipo silicato muy común en Noruega que se denomina olivino y tiene una gran dureza, entre 6,5 y 7 y sobre todo una densidad de entre 3,27 y 4,37 g/cm³.

Figura 7. Instalación de aerogenerador en plataforma tipo boya



tubular lastrada Hywind en Noruega y procedimiento de arrastre

del conjunto plataforma más aerogenerador hasta el emplazamiento.

La turbina utilizada fue una Siemens de potencia nominal 2,3 MW, con un diámetro de rotor de 82 metros y una altura de buje (eje del rotor) de 65 metros, en la que se implantó un sistema de control específico patentado por Statoil. La evacuación de la energía producida hasta tierra se hizo mediante un cable de 13 Km desarrollado por Nexans. El proyecto costó unos 40 Millones de Euros.

La experiencia obtenida en este proyecto ha servido para promover dos parques eólicos con esta tecnología, el Hywind Scotland ya en operación en Escocia y el Hywind Tampen para suministro de energía aislada de la red a campos de petróleo y gas en Noruega.

Hywind Scotland (Reino Unido)

En el mar del Norte, a 29 km de Peterhead en Escocia, se puso en operación en 2017, con tecnología Hywind, el primer parque eólico flotante comercial del mundo. El Hywind Scotland de 30 MW de potencia nominal con 5 aerogeneradores SWT 6-154 de 6 MW de potencia, 164 metros de diámetro de rotor y 101 m de altura de buje, fabricados por la empresa germano española Siemens Gamesa Energías Renovables.

El proyecto costó unos 200 Millones de Euros, unas tres veces más que los parques eólicos marinos de cimentación fija sobre el fondo del mar la propiedad es de la empresa noruega Equinor (75%) y del fondo Masdar de Emiratos Árabes Unidos (25%). El factor de capacidad del parque ha superado el 50% en todos los años de operación.(4.380 horas equivalentes)



Figura 8. Vista panorámica del parque eólico flotante Hywind Scotland.

El parque eólico ocupa una extensión marina de unos 15 Km² y la profundidad del emplazamiento varía entre 95 y 120 m

Las turbinas fueron puestas en las plataformas flotantes en Stord Noruega. Para la instalación de los cinco aerogeneradores se utilizó el tercer barco grúa semisumergible más grande del mundo, el SAIPEN 7.000. Una vez instalados los aerogeneradores en las plataformas fueron arrastrados por el mar del norte mediante remolcadores desde la costa Noruega al emplazamiento en Escocia.

Para fondearlos al suelo se utilizaron para cada aerogenerador tres cimentaciones ancladas al fondo del mar por succión

Hywind Tampen (Noruega)

La zona de Taipen es parte de la plataforma continental noruega en la que hay yacimientos de petróleo y gas natural explotados por la empresa Statoil con productividad moderada.

Del total de la energía necesaria para el bombeo y procesado, el parque eólico flotante aislado de la red eléctrica continental prevé suministrar el 30%, el resto de la energía será suministrada por turbinas de gas como se venía haciendo hasta ahora.

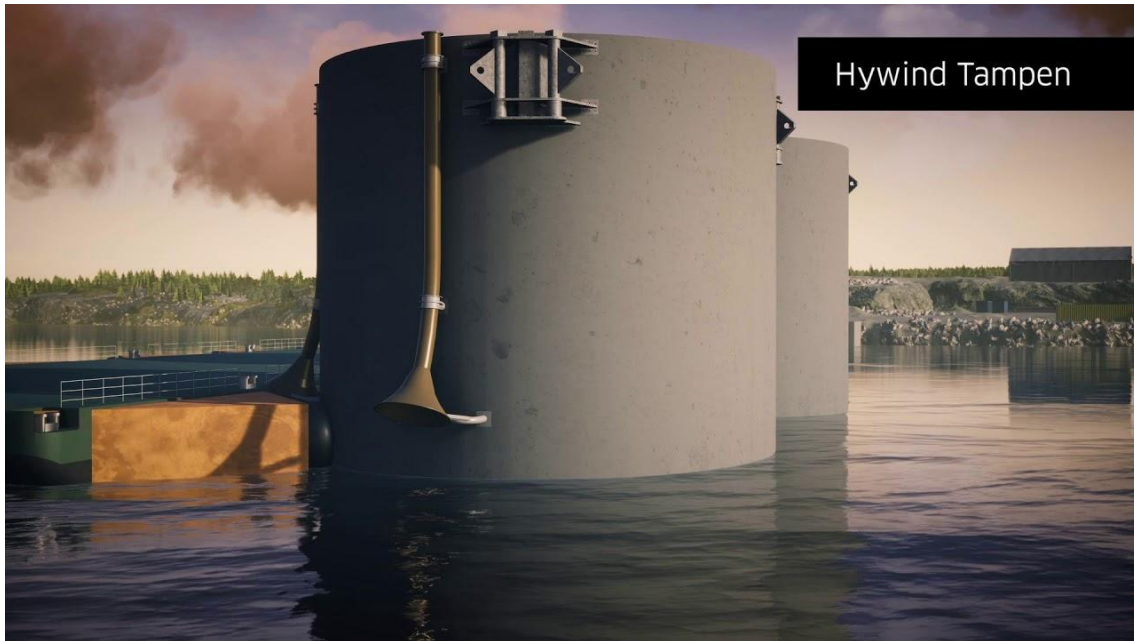


Figura 9. Plataforma flotante tipo spar-buoy fabricada en hormigón. Proyecto Hywind Tampen.

En este proyecto las plataformas flotantes se van a construir en hormigón en vez de acero. El parque eólico de 88 MW de potencia nominal dispondrá de 11 aerogeneradores flotantes de 8 MW de potencia nominal cada uno, fabricados por la empresa germano española Siemens Gamesa Energías Renovables y el cable de interconexión será fabricado por la empresa británica JDR Cable Systems.

Se espera que esté en operación en 2022 y la producción esperada de energía eléctrica es de 384 GWh/año.

Telwind (España).

En España la empresa de ingeniería ESTEYCO ha desarrollado el proyecto TELWIND en el que combina una plataforma flotante tipo boya con un sistema de instalación mediante torre telescópico que evita la necesidad de un barco-grúa especial y costoso como hemos visto en el Hywind.

La innovadora plataforma flotante SPAR dispone de geometría multicuerpo ya que está compuesta por dos cuerpos conectados por tendones de acero, donde uno de los cuerpos se sumerge lastrando la estructura, mejorando la respuesta dinámica y la estabilidad del conjunto.

El uso de hormigón garantiza la reducción de los costes de construcción y, al mismo tiempo, significa una reducción significativa de los costes de instalación, ya que ya no se necesitan buques de carga pesada.

La primera prueba de ensayo a tamaño completo en el tanque de IHCantabria se ha completado con éxito. Su buen comportamiento hidrodinámico, junto con la definición del resto de componentes de la plataforma así como el análisis detallado por CAPEX y OPEX, confirma las expectativas de ESTEYCO y posiciona la plataforma TELWIND como una solución prometedora en el campo de la energía eólica marina flotante.

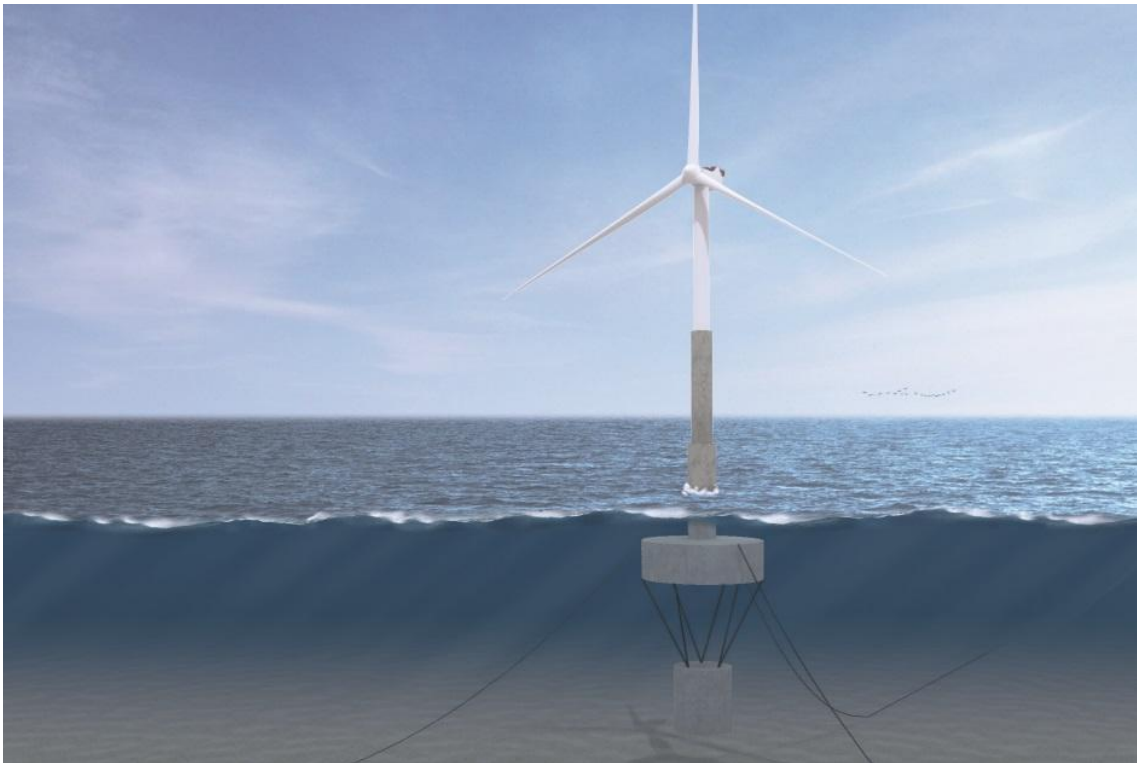


Figura 10. Simulación de la Plataforma flotante tipo spar-buoy bicuerpo TELWIND fabricada en hormigón por ESTEYCO.

PLATAFORMAS SOPORTE FLOTANTES SEMISUMERGIBLES (SEMISUB).

Se trata de un tipo de plataforma flotante basada en las experiencias previas de la industria del petróleo y el gas, para soportar turbinas eólicas de varios MW en aplicaciones en alta mar sin necesidad de

grandes barcos grúa. La base flotante es semisumergible y está anclada al fondo marino mediante cables no tensados.

Su estabilidad se debe al uso de "placas que bloquean el paso del agua" en la parte inferior de los tres pilares o flotadores, asociadas con un sistema control de lastre estático y dinámico.

Este tipo de plataformas se pueden adaptar a cualquier tipo de turbina eólica marina. Están construidas completamente en tierra, incluida la instalación de la turbina, evitando así el uso de los escasos y costosos recursos marinos.

El ejemplo más conocido de este tipo de plataforma flotante es la desarrollada por la empresa norteamericana Principle Power Inc demostrada en el primer proyecto experimental WindFloat con un aerogenerador Vestas V80 de 2 MW a 5 Km de la costa en frente de Póvoa do Varzim (Portugal). La profundidad del emplazamiento era de 45 metros. Esta estructura tiene forma triangular situando en cada vértice del triángulo equilátero un flotador y en uno de estos vértices está situada la turbina de forma que los otros dos flotadores compensan el par de vuelco debido a la acción del viento y de las olas.



Figura 11. Plataforma flotante WindFloat dentro y fuera del agua.

Este primer proyecto experimental fue desarrollado por el consorcio Windplus formado por EDP Renovables, junto con Repsol, Portugal Ventures, A. Silva Matos (ASM), y la propia Principle Power Inc.

El proyecto ha estado en operación durante casi 4 años en los que ha producido 17 GWh con trenes de olas de 12 m de altura habiendo sobrevivido a olas puntuales de hasta 17 metros

Después del exitoso ensayo, el consorcio Windplus (EDPR 54,4%, Repsol 19,4%, Engie 25% y Principle Power 1,2%) se propuso desarrollar un parque eólico flotante de 25 MW de potencia nominal, el WindFloat Atlantic WFA situado en el Océano Atlántico a 20 Km de la localidad

portuguesa de Viana do Castelo y que entró en operación a mediados de 2020.

El parque eólico está compuesto por tres plataformas flotantes del tipo Principle Power con columnas flotantes de 30 metros situadas en los tres vértices de un triángulo equilátero de 50 metros de lado, construidas una por el consorcio español Windar-Navantia en Avilés (Asturias) y el Astillero de Fene-Ferrol (Galicia) y las otras dos por la empresa portuguesa ASM Industries en sus instalaciones del Astillero de Setubal.

Estas tres plataformas soportan tres aerogeneradores MHI-Vestas V164-8,4 MW. El cable eléctrico de interconexión con la red eléctrica continental portuguesa REN fue desarrollado e instalado por la empresa británica JDR Cable Systems.

Las plataformas de Windfloat Atlantic están ancladas al lecho marino por medio de cadenas a más de 100 metros de profundidad. Además, están diseñadas para que puedan ser trasladadas por remolcadores convencionales, a diferencia de las instalaciones fijas que, al tener un mayor calado, requieren de buques más costosos para su transporte. A esto se añade su ensamblado en tierra, lo cual permite ahorrar costes logísticos, económicos y medioambientales vinculados con la construcción marítima. Todas estas ventajas tecnológicas redundan en su viabilidad para ser replicado en cualquier otra punta del planeta y a mayor escala. En el primer año de operación, este parque eólico flotante ha producido 75 GWh, energía suficiente para abastecer a 60.000 habitantes y evitar la emisión de 33.000 toneladas de CO₂.

Parque eólico de Kinkardine (Escocia)

Con cuatro plataformas flotantes basadas en una innovadora tecnología hibridada entre semisumergible y spar construida con hormigón en vez de acero y una plataforma tipo Principle Power, la empresa española Cobra Wind del Grupo ACS ha diseñado y construido y puesto en marcha en agosto de 2021 el parque eólico flotante de Kinkardine (Figura 12) para el consorcio KOWL (Kinkardine Offshore Windfarm Limited).

El parque eólico de 50 MW de potencia nominal, por lo que es actualmente el mayor parque eólico flotante en operación del mundo, está ubicado a 15 km mar adentro de la costa de Aberdeen en Escocia con profundidades de agua entre los 60 y los 80 metros y consta de una

turbina Vestas V80 de 2MW y 5 turbinas MHI Vestas V-164 de 9,525 MW.



Figura 12. Plataforma flotante KIN-05 del proyecto Kinkardine con aerogenerador de 9,5 MW.

Las cinco cimentaciones eólicas flotantes fueron fabricadas por el consorcio Navantia-Windar en España y luego transportadas a Rotterdam (Países Bajos), donde se instalaron las turbinas eólicas sobre las cimentaciones. Luego, las unidades fueron remolcadas al sitio de instalación y enganchadas a sus respectivos amarres.

El objetivo de este proyecto es suministrar hasta 218 GWh al año de electricidad limpia, producción suficiente para abastecer a 55.000 hogares.

Nautilus Floating Solutions (España).

En España se está desarrollando una innovadora plataforma semisumergible de cuatro columnas, como es la plataforma NAUTILUS (Figura 13 Izquierda) desarrollada por el consorcio industrial de empresas vascas (ASTILLEROS DE MURUETA, TAMOIN, VELATIA, VICINAY MARINE INNOVACIÓN y GRUPO JAUREGUI INDUSTRIAL y el centro tecnológico TECNALIA) llamado NAUTILUS Floating Solutions, para obtener un producto competitivo en coste y de fabricación simple que permita fabricarse en astilleros convencionales.

NAUTILUS es una plataforma flotante semisumergible compuesta por cuatro columnas conectadas en el plano de la quilla por un pontón circular de forma cuadrada y por una cubierta principal en forma de X en

la parte superior de las columnas. La pieza de transición que conecta la torre del aerogenerador está incrustada en la posición central de la X que conforma la cubierta principal.

La turbina eólica está ubicada centrada con respecto a las columnas. Las cuatro columnas proporcionarán flotabilidad y resistencia suficiente para soportar la turbina y suficiente área del plano de agua restaurando fuerzas para la estabilidad estática y dinámica. El concepto de línea de base NAUTILUS está amarrado mediante un sistema de amarre de catenaria convencional de cuatro líneas de fondeo o patas.

El diseño básico ha sido validado a escala mediante varios ensayos en tanques hidráulicos en distintos laboratorios europeos como la Universidad de Cork (Irlanda), el Instituto de Hidráulica Ambiental de la Universidad de Cantabria (España), en SINTEF (Noruega) y en Ifremer (Francia). Este concepto ha sido certificado por la empresa certificadora DNV-GL que concedió a la tecnología NAUTILUS su «Statement of Feasibility» de acuerdo a la norma DNVGL-SE-0190:2015-12 para certificación de proyectos de plantas de energía eólica marina. La tecnología NAUTILUS está internacionalmente protegida a través de la patente europea y se ha iniciado la fase de patentado en países con un gran mercado potencial como son Estados Unidos, Japón, China, Corea del Sur y Taiwan.

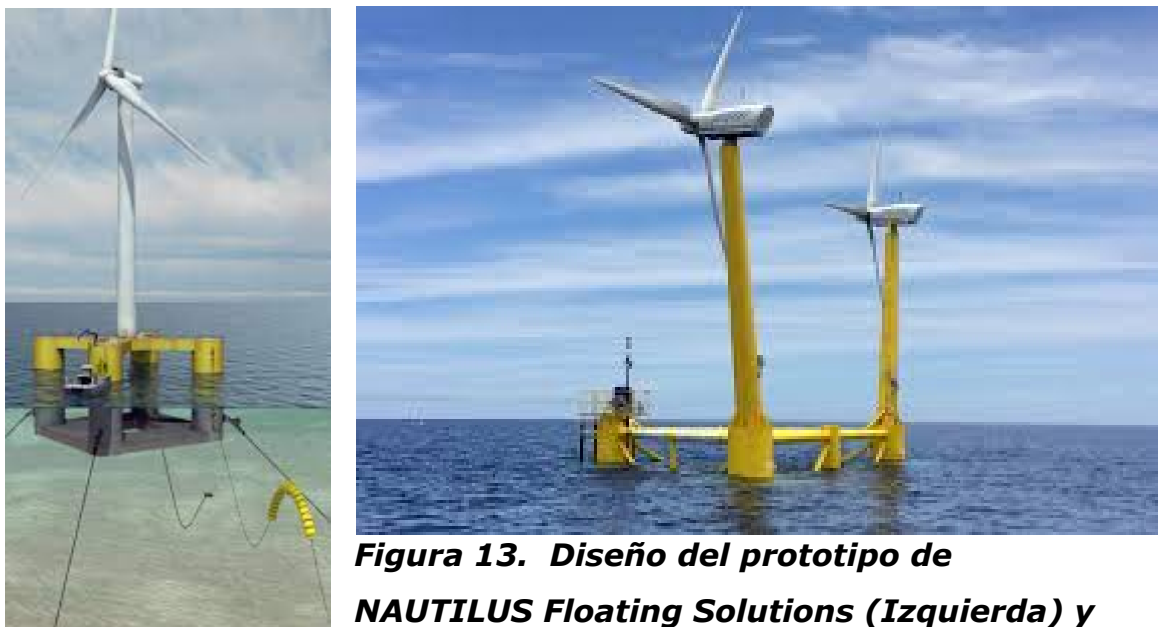


Figura 13. Diseño del prototipo de NAUTILUS Floating Solutions (Izquierda) y demostración de la plataforma W2Power de EnerOcean en PLOCAN (Derecha).

EnerOcean (España)

Por último, la empresa malagueña EnerOcean ha liderado el proyecto W2Power (Figura 13 Derecha) junto con las empresas españolas Ghenova, Ingeteam, Asticia y la británica tensión energy en el que se han demostrado durante cinco meses en aguas de Gran Canaria la correcta operación de la primera plataforma flotante semisumergible bi-tubina a escala 1:6 con dos aerogeneradores de 100 kW. La Plataforma flotante W2Power tiene un coste muy inferior no solo en su desarrollo sino también en su instalación. Además está diseñada para establecerse en aguas de entre 35 y 300 metros de profundidad,

La plataforma W2Power es una estructura semisumergible triangular ligera y muy estable. Esta plataforma se amarra al sistema de anclaje mediante una pieza de giro de diseño propio. Esta pieza de giro permite la orientación de toda la plataforma con la dirección del viento de forma pasiva gracias al par de alineación creado por el empuje en ambos aerogeneradores. Este par de alineación es mucho mayor que cualquier efecto de oleaje cruzado o corrientes marinas y asegura que no se producen efectos perniciosos de la estela de un aerogenerador sobre el otro, según se ha demostrado en los ensayos realizados.

Esta plataforma a pesar de sus dimensiones (90 metros entre columnas), se ha diseñado con una manga limitada, que permite su fabricación en multitud de diques secos alrededor del mundo. Su bajo calado, tanto en operación como en remolque, permite usar casi cualquier puerto como base de operación y servicio o base auxiliar de instalación. La estructura incluye dos torres inclinadas, que permiten desacoplar la distancia entre aerogeneradores de las dimensiones de la plataforma. Se obtienen de esta forma dos beneficios principales, una plataforma con un peso por MW muy inferior a otras soluciones flotantes, en el entorno de 200 a 240 Tm por MW y la eliminación del mecanismo de orientación de las turbinas, junto a otras ventajas en operación y mantenimiento.

Olav Olsen OO-STAR (Noruega)

La empresa noruega Olav Olsen ha desarrollado una plataforma flotante semisumergible denominada OO-Star Wind Floater. Esta plataforma consta de un eje central que soporta el aerogenerador y un pontón en forma de estrella con tres brazos que soportan tres flotadores cilíndricos en el extremo de cada brazo, lo cual facilita una estabilidad óptima con lastrado pasivo. Esta plataforma que se puede fabricar en acero, hormigón o hibridando ambos materiales dependiendo de las capacidades de fabricación locales tiene su origen en la idea del proyecto europeo HIPRWind desarrollado en 2010 que descubrió las limitaciones

de la escalabilidad y la fatiga en estas grandes plataformas. Todo esto hace que esta plataforma presenta una gran viabilidad económica ya que dispone de todas las cualidades requeridas por el futuro mercado eólico marino flotante que se prevé con aerogeneradores de potencias en torno a 20 MW.

En el proyecto "Flagship" aprobado recientemente por la Comisión Europea y liderado por la empresa Iberdrola se pretende utilizar una plataforma OO-Star Wind Floater de hormigón ya que es menos sensible a la fatiga y su vida útil puede ser mayor de 100 años. En este proyecto se pretende instalar un aerogenerador comercial de más de 10 MW de potencia nominal con lo que sería la instalación eólica flotante más grande.



Figura 14. Plataforma flotante semisumergible Olav Olsen OO-Star Wind Floater.

PLATAFORMAS FLOTANTES ACTUANDO EN CONTRAFLOTACIÓN (TLP)

Se trata de una estructura flotante amarrada verticalmente a contra-flotación, que se usa normalmente para la producción en alta mar de petróleo o gas, y es particularmente adecuada para profundidades de agua de entre 300 metros y 1500 metros. Esta tecnología se ha

propuesto para el uso de plataformas mediante cables tensionados (TLP Tension Leg Platform) para instalar aerogeneradores en entornos marinos de gran profundidad.

La plataforma está amarrada permanentemente por medio de cables de acero o tendones agrupados en cada una de las esquinas de la estructura. Una característica del diseño de los cables es que tienen una rigidez axial relativamente baja (baja elasticidad), de modo que se elimina prácticamente todo el movimiento vertical de la plataforma. Esto permite que la plataforma tenga al rotor del aerogenerador prácticamente fijo como en tierra.

El Instituto de Tecnología de Massachusetts MIT y el Laboratorio Nacional de Energías Renovables NREL de Estados Unidos exploraron el concepto de TLP para instalar aerogeneradores en alta mar en 2006.

Se llegó a la conclusión de que las plataformas TLP flotan y se estima que pueden operar en profundidades entre 40 y 200 m sin problemas soportando aerogeneradores de más de 5 MW. Las simulaciones indican además que esta solución es idónea para instalaciones en emplazamientos sometidos a huracanes. Se han realizado algunos experimentos con plataformas de este tipo como el experimento realizado en 2007 en Italia en un emplazamiento a 22 Km de la costa y 113 metros de profundidad, por la empresa holandesa Blue-H Group con un aerogenerador WES de 80 KW. Esta fue la primera experiencia mundial de un aerogenerador con cimentación flotante.



Figura 15. Ensayo del prototipo de plataforma TLP holandesa Blue-H con aerogenerador WES bipala de 80 KW en el mar Adriático (Italia).

En 2016 un prototipo a escala de una plataforma TLP denominado TLPWind fue desarrollado y validado por la empresa Iberdrola conjuntamente con el centro tecnológico del Reino Unido ORE-CATAPULT

y la Universidad de Strathclyde. En la Universidad de Strathclyde se llevaron a cabo las pruebas con modelos a escala para demostrar la naturaleza dinámica y las capacidades de comportamiento en el mar de la plataforma TLPWind, utilizando instalaciones de última generación para simular las condiciones que probablemente se experimentarán en la costa de Escocia. Replicando condiciones de olas de hasta 16 metros y ráfagas de viento de hasta 49 m/s en un modelo a escala 1:36, se pudo demostrar que el concepto funcionaría en condiciones extremas del mundo real.



Figura 16. Ensayo del prototipo a escala de la plataforma TLPWind en el Kelvin Hydrodynamics Laboratory at the University of Strathclyde

También en el año 2011 se desarrolló un prototipo a escala 1:50 denominado Pelastar por parte de una empresa norteamericana. También la empresa alemana GICON ensayó un prototipo 1:50 de una innovadora plataforma TLP en el SSPA Maritime Dynamics Laboratory en Gotemburgo (Suecia).



Figura 17. Simulación del prototipo de X1 Wind (Irda). A la derecha simulación de la solución TLP Pelastar.

Por último una start-up catalana ha desarrollado un innovador concepto denominado X1 Wind que persigue reducir drásticamente su peso y su

coste. Mediante un innovador sistema de amarre de un solo punto PivotBuoy® se logra que permite que toda la estructura pase pasivamente por la veleta siguiendo la dirección predominante del viento. El empuje de la turbina se transmite directamente al sistema de amarre tipo mini-TLP, con cargas compartidas por igual por todas las correas en todo momento.

PLATAFORMAS FLOTANTES TIPO BARCAZA (BARGE).

Las plataformas tipo barcaza ofrecen distintas soluciones de amortiguamiento para lograr la estabilidad frente a las cargas aero e hidrodinámicas. Hay varias patentes de las que al menos dos destacan por sus avances como son la Plataforma FLOATGEN de la empresa IDEOL ya validada en 2018 con un aerogenerador de 2 MW en Francia y con un aerogenerador de 3 MW en Japón y en breve se prevé validar con un parque comercial de 30 MW en la costa de Marsella y la plataforma SATH de la Empresa Española SAITEC ya validada en pequeña escala BlueSATH 1:6 y en 2022 se prevé ensayar la DemoSATH de 2 MW.

Figura 18. Aerogenerador flotante con plataforma FLOATGEN



desarrollada por IDEOL con aerogenerador Gamesa 2 MW. (Izda) y la plataforma HIBIKI desarrollada en Japón para aerogenerador de 3 MW (Derecha)

La plataforma flotante con forma de aro rectangular de hormigón diseñada por la empresa francesa IDEOL se puede utilizar con cualquier aerogenerador comercial en alta mar, sin modificaciones. El sistema Damping Pool® permite la reducción del movimiento del flotador aprovechando las propiedades hidrodinámicas de la masa de agua atrapada en el hueco central del aro. Las oscilaciones son, por diseño, opuestas a la fuerza de excitación generada por las olas por lo que garantiza la estabilidad. En el proyecto FLOATGEN ya se ha demostrado su correcta operación con aerogenerador de 2 MW pero en el proyecto Hibiki en Japón conjuntamente con Hitachi se pretende demostrar su correcta operación con un aerogenerador de 3 MW en condiciones más extremas todavía.

En España hay un desarrollo de plataforma flotante de este tipo que se denomina SATH (Swing Around Twin Hull). Esta plataforma está diseñada en hormigón y está formada por dos cascos unidos a un único punto de amarre con un rodamiento que permite a la plataforma girar alrededor de ese punto dependiendo de la dirección del viento y las olas. Esta innovadora plataforma se ha desarrollado por la empresa vasca SAITEC Offshore Technologies.

El primer prototipo BlueSATH a escala 1:6 fue ensayado en Septiembre de 2020 en condiciones reales en la bahía de Santander con un aerogenerador de 30 kW de potencia nominal. Los principales objetivos del ensayo consistían en la validación del comportamiento dinámico de la plataforma SATH y el análisis de su impacto ambiental. Se estudiaron los diferentes ámbitos afectados durante la construcción, instalación y operación: la huella de carbono, medio acuático, residuos etc. Además se han comparado y validado los modelos numéricos de la fase previa de ingeniería de detalle ya que el objetivo es obtener modelos que permitan una optimización final de la estructura final de 10 MW, reduciendo costes y verificando la integridad estructural del aerogenerador.



Figura 19. Plataforma Blue SATH con aerogenerador de 30 kW remolcada hasta su posición de ensayo en la bahía de Santander (España).

Saitec Offshore Technologies y RWE Renewables han adjudicado a la empresa española Ferrovial el contrato de fabricación y montaje del proyecto flotante DemoSATH de 2 MW que se prevé ensayar en BIMEP. El paquete de construcción cubre el prefabricado de hormigón y el montaje del flotador que se prevé para 2022. La base de la estructura tendrá aproximadamente 30 metros de ancho y aproximadamente 64

metros de largo. La plataforma, incluida la turbina, será remolcada desde el puerto de Bilbao hasta su punto de anclaje en un campo de prueba a 2 millas de la costa a una profundidad de 85 metros. Las líneas de amarre serán híbridas, compuestas por cadenas y fibra, ancladas al fondo del mar de manera que mantengan en posición el cuerpo flotante.

INTERCONEXIÓN INTRA-PARQUE EÓLICO Y LÍNEA DE EVACUACIÓN A TIERRA

Uno de los mayores costes de un parque eólico marino es el cableado de conexión interior de los distintos aerogeneradores que componen el parque eólico y la línea de evacuación de la energía hasta tierra donde se llevará a los consumidores.

La interconexión de los aerogeneradores flotantes es más compleja que los fijos ya que al tener la plataforma cierta libertad de movimiento el cable tiene que ser dinámico para evitar tensiones mecánicas que puedan romperlo. Teniendo en cuenta las crecientes potencias, lo cual obliga a operar en alta tensión y las mayores profundidades, esta tecnología también se considera un gran reto.



Figura 20. Cable eléctrico dinámico de alta tensión. (Fuente: NKT)

La interconexión interior del parque eólico normalmente se realiza mediante cableado en baja tensión alterna de 50/60 Hz. La interconexión con tierra dependerá de la distancia a la misma. Si la distancia es menor de 200 Km se puede conectar en alta tensión en alterna pero si es mayor se puede pensar en conectar en alta tensión en continua (HVDC) para reducir las pérdidas.

El cableado dependiendo del tipo de fondo del mar irá sobre el fondo o enterrado. La instalación enterrada es más costosa pero más fiable y su vida útil es mayor al no sufrir rozamiento con el fondo que puede erosionar el cable.

Para la interconexión de los cables submarinos ya existe todo tipo de aparallaje que permite conectar/desconectar cables en el agua.

La instalación del cable es compleja y existen vehículos capaces de operar dentro del agua para realizar dicha instalación guiados remotamente. También comienza a haber robots.

Futuro

El tamaño de los aerogeneradores para aplicaciones marinas va a seguir creciendo. Por lo tanto las estructuras soporte tendrán que también ir adaptándose al tamaño de los aerogeneradores.

Existen ya estudios conceptuales de aerogeneradores de 50 MW con rotor a sotavento y palas muy flexibles que permiten al aerogenerador copiar el comportamiento de las palmeras en casos de viento extremo.

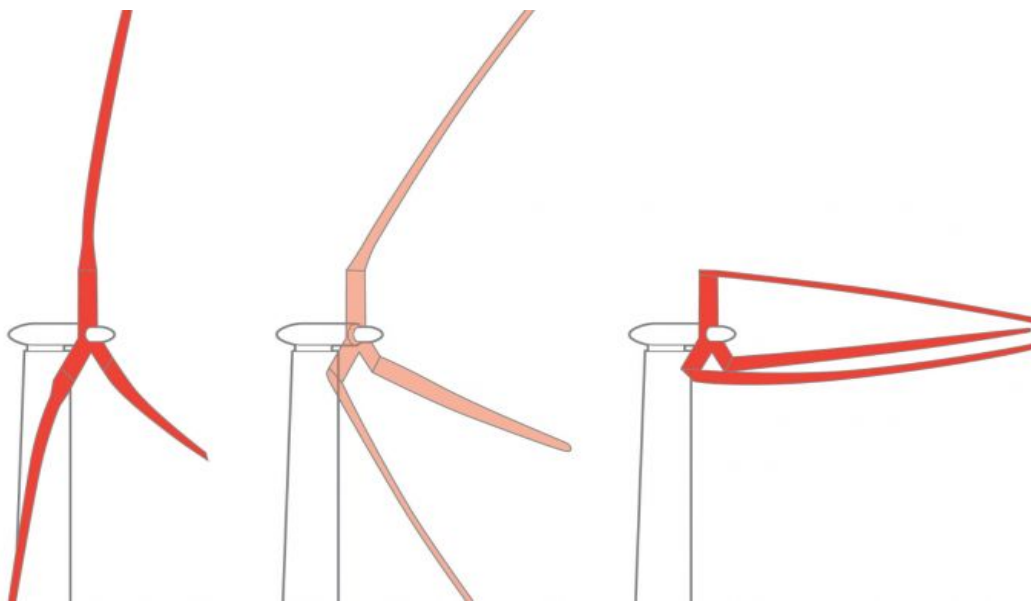


Figura 21 Concepto de rotor de aerogenerador SUMR 50MW

Por ejemplo el proyecto SUMR "Segmented Ultralight Morphing Rotor" (Rotor Mórfoico ultraligero Segmentado) (Figura 21) desarrollado desde 2015 en Estados Unidos por la Universidad de Illinois, Universidad de Colorado, la Escuela de Minas de Colorado, el Laboratorio Nacional de Energías Renovables (NREL), y el Laboratorio Nacional Sandia (SNL) pretende desarrollar los rotores eólicos del futuro.

Otra de las problemáticas que se pretenden solucionar es la forma de gestionar la inmensa cantidad de energía variable que se genera con los parques eólicos marinos antes de enviarla a tierra. Se han desarrollado varios experimentos para almacenar la energía en el mar mediante bolsas o esferas que se llenan o se vacían de aire comprimido. En Holanda la empresa Lagerwey ha desarrollado un aerogenerador que produce hidrógeno en vez de electricidad ya que este es más fácil de almacenar y gestionar.

Un proyecto más ambicioso es desarrollar las islas energéticas en las cuales se interconectan los distintos parques eólicos marinos y en las que se dispone de sistemas de almacenamiento de energía mediante baterías, hidrógeno o amoníaco.



Figura 22. Distintos conceptos de islas energéticas diseñados para el mar del Norte

Preguntas y cuestiones de debate.

En éste apartado os propongo una serie de preguntas y cuestiones para que iniciéis una exploración en busca de algún descubrimiento que os permita decidir de forma objetiva vuestra respuesta.

- 1) La energía eólica marina flotante se está desarrollando principalmente en la costa Noroeste de Reino Unido, costa norte de Portugal, costa enfrente de Marsella en Francia, costa Noreste y Noroeste de EEUU, el estrecho de Taiwan, la costa este de Japón. Qué barreras identificas para que se desarrolle la tecnología eólica flotante también en la costa española en el Océano Atlántico y en el mar Mediterráneo.
- 2) Para hacer viables estas plataformas hay que desarrollar cada vez sistemas de mayor escala, para ello los aerogeneradores deberán ser cada vez de mayor tamaño o disponer de plataformas con dos o tres o más turbinas. Qué límites consideras que pueden aparecer para limitar su desarrollo: materiales, pesos, logística, líneas de evacuación, barreras medioambientales, etc. Crees que habrá algún límite definitivo?
- 3) Uno de los problemas de todos los parques eólicos marinos es la baja rugosidad del mar por lo que cualquier estela que se produzca un aerogenerador perdura en el flujo de aire durante muchos kilómetros y esto obliga a separar los aerogeneradores grandes distancias (sobre 10 diámetros de rotor), lo cual para un aerogenerador de 200 metros de diámetro de rotor supone 2 Km. El problema es que al final todos los aerogeneradores tienen que estar interconectados por un cable submarino que es muy costoso por lo que en el diseño se tiene que buscar la mejor solución. ¿Cómo crees que se puede encontrar esa solución óptima?
- 4) El coste de la energía en las islas es muy alto. En las islas Canarias por ejemplo al ser de origen volcánico la plataforma continental es muy profunda a poca distancia de la costa por lo que las plataformas flotantes son la única opción para aprovechar

la energía eólica. Crees que habría que explotar los excelentes vientos alisios en Canarias para producir energía?

- 5) La energía producida con parques eólicos marinos de gran potencia puede ser inmensa pero es variable. Qué ideas o estrategias se te ocurren para poder hacer que esa energía sea gestionable? Incluir baterías, producir hidrógeno, hibridar con fotovoltaica flotante?
- 6) Uno de los problemas de los parques eólicos marinos flotantes es que cada vez se construyen más alejados de la costa. Esto complica y encarece las líneas eléctricas de evacuación de la energía a tierra. ¿Qué ideas se te ocurren para llevar esa energía de forma eficaz a las subestaciones de tierra? Crees que una solución puede ser producir hidrógeno a partir del agua mediante hidrólisis y transportarlo igual que el gas natural en un barco o en un gasoducto.
- 7) Hemos visto que hay muchos tipos de cimentaciones flotantes para grandes profundidades. Crees que si en el futuro las cimentaciones flotantes logran ser totalmente competitivas, todos los aerogeneradores marinos se instalarán en plataformas flotantes, que permitan llevar al puerto al aerogenerador cuando haya algún fallo. ¿Creerías que se instalarán también en pantanos o embalses?
- 8) La instalación de los aerogeneradores marinos flotantes en el mar es muy compleja y suele ser necesario el alquiler de grandes barcos grúa muy costosos, para instalar todos los componentes, que además si la situación meteorológica empeora se producen importantes retrasos. ¿Cómo crees que se puede mejorar esa actividad?
- 9) Las operaciones de mantenimiento de los parques eólicos marinos son complejas debido a las condiciones extremas en las que se encuentran operando. Qué ideas se te ocurren para facilitar dichas tareas. ¿Utilizar drones por ejemplo?

- 10) En España hay muchas zonas despobladas en tierra con un recurso eólico razonable. Crees que habría que desarrollar la mayor capacidad eólica en tierra antes de utilizar los mas de 4.000 km de costa que disponemos?
- 11) Qué impactos medioambientales consideras que habría que analizar en detalle en una instalación eólica marina y que medios de mitigarlos se te ocurren?
- 12) Qué problemas se te ocurren que pueden aparecer si se desarrolla la energía eólica marina de forma masiva en todo el mundo y cómo los evitarías.

Bibliografía.

Recursos disponibles relacionados con el tema en la base de datos en INVESTIGA I+D+i correspondiente a anteriores ediciones (<http://www.programainvestiga.org>):

- Guía introductoria al tema 'La Energía Eólica marina' (Edición 2019-2020).

Otros recursos:

Información sobre técnicas, métodos y recursos materiales de base en Internet

[0] Asociación Empresarial Eólica Elementos clave y propuestas para el desarrollo de la eólica marina en España. Una oportunidad energética industrial y de innovación. (2019)
<https://www.aeeolica.org/images/Posicionamientos/Elementos-clave-para-elica-marinaDIC2019.pdf>

[00] Ministerio de Transición Ecológica. Borrador de la hoja de ruta para el desarrollo de la energía eólica marina y de las energías marinas en España. Junio 2021
<file:///C:/Users/u4481/Downloads/Texto%20de%20la%20Consulta%20P%C3%BAblica.pdf>

[000] Ministerio de Transición Ecológica Planes de Ordenación del Espacio Marino POEM
https://www.miteco.gob.es/es/costas/temas/proteccion-medio-marino/def_esae_poem_tcm30-529068.pdf

[1] Fit for 55. The EU's plan for a green transition.
<https://www.consilium.europa.eu/en/policies/eu-plan-for-a-green-transition/>

[2] Estrategia Europea sobre las energías marinas
<file:///C:/Users/admin/Downloads/MJ0320788ESN.es.pdf>

[3] The EU Blue Economy Report 2021.

https://ec.europa.eu/oceans-and-fisheries/system/files/2021-05/the-eu-blue-economy-report-2021_en.pdf

[4] An EU Strategy to harness the potential of offshore renewable energy for a climate neutral future. (2020).

https://ec.europa.eu/energy/sites/ener/files/offshore_renewable_energy_strategy.pdf

[5] JRC. ENSPRESO - WIND - ONSHORE and OFFSHORE

<https://data.jrc.ec.europa.eu/dataset/6d0774ec-4fe5-4ca3-8564-626f4927744e#dataaccess>

[6] ESMAP. Mapa eólico marino

https://esmap.org/esmap_offshorewind_techpotential_analysis_maps

[7] Global Wind Atlas. Acceso libre a información sobre el recurso eólico en cualquier punto del mundo <https://globalwindatlas.info/>

[7] Floating Offshore Wind Vision Statement. Wind Europe 2017.

<https://windeurope.org/wp-content/uploads/files/about-wind/reports/Floating-offshore-statement.pdf>

[8] Aerogenerador General Electric Halliade X. Potencia nominal: 12, 13 o 14 MW Diámetro de rotores. 220 metros. Altura: 248 metros

<https://www.ge.com/renewableenergy/wind-energy/offshore-wind/haliade-x-offshore-turbine>

[9] Aerogenerador Siemens Gamesa SG 14-222 Potencia nominal 14 MW

<https://www.siemensgamesa.com/es-es/products-and-services/offshore/wind-turbine-sg-14-222-dd>

[10] Aerogenerador Vestas V236-15 Potencia nominal: 15 MW

https://www.vestas.com/en/products/offshore%20platforms/v236_15_mw#

[11] Aerogenerador MingYang Smart Energy. MySE 16.0-242. Potencia nominal: 16 MW

<http://www.myse.com.cn/en/jtxw/info.aspx?itemid=825>

[12] Proyecto DEEPWIND (DTU). <https://www.deepwind.eu/>

[13] Proyecto VERTIWIND (Technip)

https://www.ademe.fr/sites/default/files/assets/documents/en_vertiwind.pdf

[14] Proyecto de aerogenerador de eje vertical con plataforma flotante SEATWIRL

<https://seatwirl.com/>

[15] Proyecto SWAY desarrollado por INOCEAN A/S

<https://www.inocean.no/projects/sway-offshore-wind-turbine/>

[16] Plataforma flotante con dos aerogeneradores ENEROCEAN <https://enerocean.com/inicio/>

[17] Plataforma flotante WINDFLOAT <https://www.principlepower.com/projects/windfloat1>