



INVESTIGA I+D+i 2019/2020

GUÍA ESPECÍFICA DE TRABAJO SOBRE “LA ENERGÍA EÓLICA MARINA”

Texto de D. Ignacio Cruz

Octubre de 2019

Introducción.

La espectacular reducción de los costes de generación de la energía eléctrica a partir de las energías renovables lograda en las últimas décadas, ha llevado a planificar el futuro sistema energético en muchos países con objetivos muy ambiciosos en términos de reducción de emisiones de efecto invernadero.

La energía eólica es hoy en día una tecnología de producción de energía eólica totalmente madura y comercialmente viable en emplazamientos en tierra con recurso eólico medio. El factor de capacidad medio hoy en día de los parques eólicos se encuentra entre el 20 y el 35%. La capacidad eólica total instalada en el mundo a finales de 2018 asciende a 593 GW lo que supone en torno a un 5% de la energía eléctrica consumida.

Pero los planes de descarbonización de la energía que se están aprobando prácticamente en todos los países del mundo nos permiten prever que en el futuro la producción de energía de origen renovables se va a acelerar mucho.

Por ejemplo, en la Unión Europea, el Parlamento Europeo aprobó a finales de 2018 elevar la cuota de uso de energías renovables en la UE hasta el 32% del consumo energético total en 2030.

Este objetivo supone incrementar la capacidad de producción de energía de origen renovable en un 12% frente al objetivo anterior que era el 20% en el año 2020.

En Europa, la capacidad eólica instalada a finales del 2018 asciende a casi 190 GW, de los cuales el 90% (171 GW) es eólica instalada en tierra y el 10% (18,5 GW) restante es eólica instalada en el mar. Europa ahora

tiene una capacidad eólica marina instalada total. Esto corresponde a 4.543 conectados a la red aerogeneradores en 11 países. (Reino Unido (44%, 8183 MW), Alemania (34%, 6380 MW), Dinamarca (7%, 1329 MW), Bélgica (6,4%, 1186 MW), Holanda (6%, 1118 MW), Suecia (1%, 192 MW), Finlandia (71 MW), Irlanda (25 MW), España (10 MW), Francia (2 MW) y Noruega (2 MW).

Las instalaciones eólicas en el mar son obviamente mas costosas que en tierra, pero el recurso eólico es muy superior al de tierra debido a la baja rugosidad alcanzándose factores de capacidad de hasta el 60%. Además las menores limitaciones logísticas facilitan el instalar aerogeneradores de tamaños cada vez mayores con lo que se aprovecha la economía de escala.

En 2018 las inversiones en nueva energía eólica marina ascendieron a 10.300 millones de euros, un aumento del 37% con respecto a 2017. En definitiva la eólica marina se prevé que crezca de forma significativa en los próximos años principalmente en entornos marinos de profundidad moderada (Mar del Norte, Mar Báltico) con tecnologías de cimentación sobre el fondo del mar ya totalmente demostradas (monopilote o plataforma jacket celosía de cuatro o tres patas).

En el medio plazo, la tecnología mediante plataformas flotantes para instalar aerogeneradores en emplazamientos marinos con alta profundidad (mas de 50 m), quedara totalmente demostrada y podrá llegar a ser viable con lo que la lista potenciales emplazamientos se incrementara a nivel mundial con lo que la capacidad eólica podrá aumentar mas permitiendo llegar a niveles de cobertura de la demanda de energía eléctrica con energía limpia realmente significativos.



Figura 1. Foto de parque eólico marino con plataformas soporte del tipo jacket (celosía tripata).

El recurso eólico marino

El recurso eólico en el mar es excepcional, aproximadamente un 50% mas que en tierra. El contenido energético es mayor, la turbulencia es mucho menor al no haber prácticamente rugosidad. La posibilidad de desarrollar grandes parques eólico con grandes aerogeneradores es totalmente viable al no haber limitaciones logísticas de acceso como ocurre en tierra. No hay límites físicos. Se puede aplicar un mayor volumen de generación.

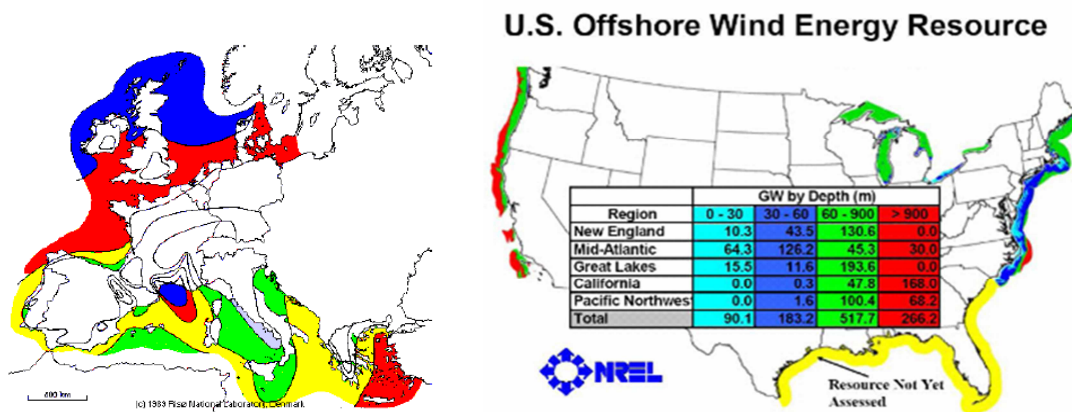


Figura 2: Recurso eólico existente en las costas de Europa y EEUU

Pero también hay inconvenientes como son la instalación y mantenimiento que en estas aplicaciones son más complejos y costosos debido a las condiciones muchas veces extremas. Lo cual encarece las cimentaciones, la conexión a red, la instalación). Además suele haber más restricciones climatológicas.

La evaluación del recurso eólico en el mar es compleja. Los desarrolladores en el creciente mercado eólico marino, pero aún no maduro, necesitaban una manera fácil de recopilar datos de velocidad del viento sin el gran gasto que implica el uso de mástiles en el complejo entorno marino.

Desde hace más de 12 años, se han desarrollado novedosos sistemas flotantes de medida mediante LIDAR (Laser Imaging Detection and Ranging) que son sistema que miden la velocidad de los aerosoles contenidos en el viento mediante efecto Doppler enviando un haz de luz láser. Estos sistemas suelen ir embarcados en plataformas flotantes.

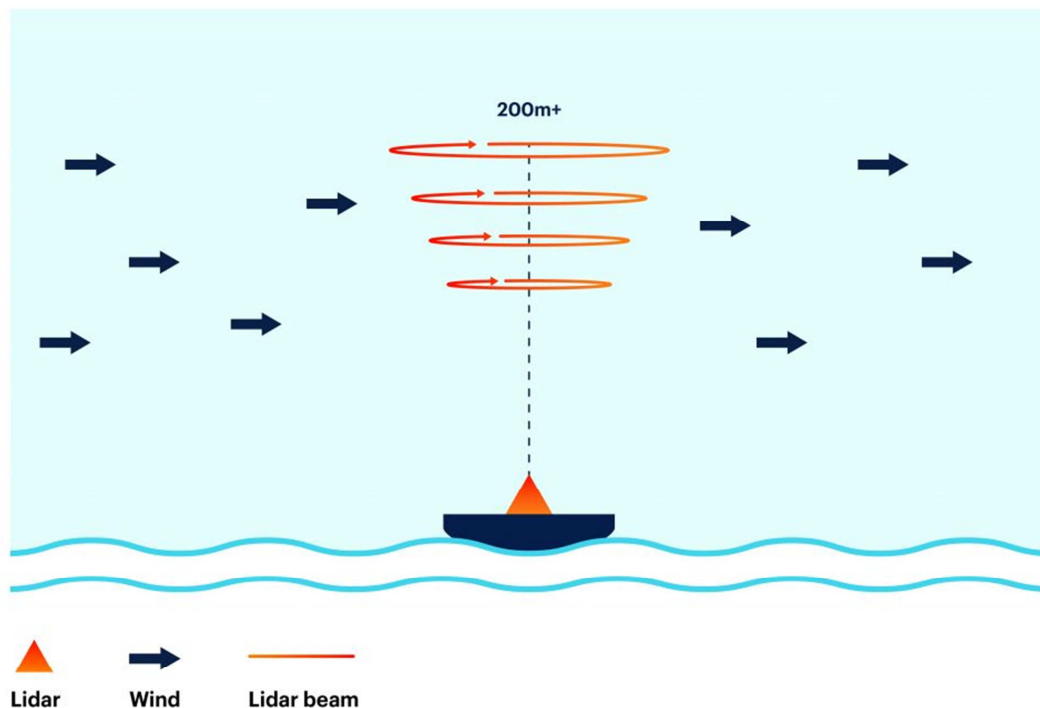


Figura 3. Funcionamiento de un LIDAR flotante para medir el recurso eólico hasta 250 metros de altura en el mar

Los LIDAR flotantes toman medidas de viento en alta mar desde un lidar de perfilado vertical, integrado en una estructura flotante independiente, como una boya. La unidad LIDAR recopila una gama de mediciones, incluidos los datos críticos de energía eólica marina necesarios para realizar el análisis de la viabilidad que permita financiar parques eólicos marinos.

Se ha probado mediante ensayos que es posible ahorrar en las campañas de medición de viento en alta mar de hasta un 90% cuando se utiliza el LIDAR flotante, en comparación con una inversión típica de 10 millones de euros por un mástil, eso sin tener en cuenta los costes de desmantelamiento del mástil de alta mar.

Las boyas típicamente exhiben movimientos de traslación (aumento, balanceo y elevación) y rotacionales (cabeceo, balanceo y guiñada). Todos estos movimientos tienen el potencial de afectar negativamente la medición de un vector de viento de LIDAR.

Los LIDAR de viento de onda continua (CW) enfocan un láser infrarrojo a una altura o rango de medición especificados. La luz dispersada por los aerosoles regresa al LIDAR y se analiza para determinar su desplazamiento Doppler de "línea de visión".

Una serie de mediciones en diferentes posiciones se utilizan para reconstruir el campo de viento. Dado que el láser en un CID LIDAR

produce una intensidad constante, son posibles potencias medias muy altas ($> 1 \text{ W}$), lo que resulta en una sensibilidad excepcional y, por lo tanto, una medición muy rápida, generalmente 20 ms por punto de datos y un segundo por exploración.

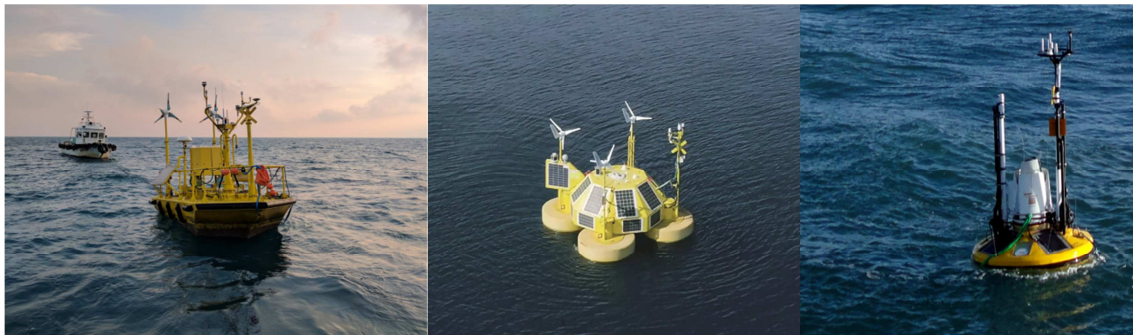


Figura 4. LIDARs Flotantes comerciales de la empresa americana Axys WindSentinel, de la española EOLOS FL200 Floating Lidar y de la alemana Fugro SeaWatch.

En una boya, el guiñada afectará la medición de la dirección del viento, mientras que el cabeceo y balanceo alteran la línea de visión del láser y podrían causar un sesgo negativo en la medición de la velocidad del viento.

Los movimientos típicos de la boya tienen un período de varios segundos, por lo que la alta tasa de medición de los LIDAR CW 'congela' efectivamente el movimiento para cada punto de medición (50 Hz) y muestrea adecuadamente el movimiento para cada exploración (1 Hz), lo que hace que las mediciones LIDAR CW sean particularmente robustas en esta aplicación

El desarrollo de la eólica marina.

En 1987, la compañía eléctrica danesa Elkraft comenzó a hacer estudios de viabilidad de aprovechamiento de la energía eólica en las costas de Lolland (Dinamarca) pero fue en Nordersund (Suecia) donde se instaló el primer aerogenerador marino en 1990. Este aerogenerador de 250 kW estaba situado a 250 metros de la costa y la profundidad del agua en el emplazamiento era de 7 metros. Se construyó como una planta de prueba "para examinar la influencia de las aves, los peces y la pesca, el transporte marítimo, la opinión pública, el mantenimiento y los efectos sobre los cimientos del viento y el hielo.

En el año 1991, la compañía energética danesa Dong Energy (Ahora Ørsted A/S) encargó el primer parque eólico marino denominado Vindeby, construido en aguas del mar del Norte de entre dos y cinco metros de profundidad y entre 1,5 y 3 Km de la costa. Este primer parque eólico marino disponía de once aerogeneradores del fabricante danés Bonus Energy A/S de 35 metros de diámetro de rotor y 450 kW de potencia nominal, por lo que la potencia total del parque era 4.95

MW. Los aerogeneradores cuya altura de buje era de 35 metros tenían algunas adaptaciones al entorno marino como fueron el sellado de la torre y un sistema de control de la humedad interna mediante aire acondicionado. El factor de capacidad medio del parque eólico fue de 22.1%. La inversión ascendió a 10 Millones de Euros y se produjo la energía consumida por casi 2200 hogares. Este parque eólico estuvo en operación 25 años, superando la vida útil de diseño de 20 años. Fue desmantelado en 2017. Este proyecto ha sido el que mas información ha facilitado como experimento, facilitando el aprendizaje y la mejora necesaria para lograr que hoy en día se promuevan parques eólicos marinos sin ningún tipo de subsidio.

A partir de la experiencia de Windeby, la empresa Dong Energy decidió desarrollar el parque eólico marino de Tuno Knob, instalado en la bahía de la ciudad de Aarhus en Dinamarca en 1995. En este emplazamiento las aguas tienen una profundidad de entre 3 y 6 metros. Este parque dispone de 10 aerogeneradores V39 de 500 kW de potencia nominal del fabricante danés Vestas A/S, instalados con cimentaciones monopilar de hormigón. Este parque se encuentra actualmente en operación.



Figura 5 Parque eólico de Anholt.400 MW (Dinamarca)

Después de este parque eólico marino hubo una transición en la que el sector eólico se centró en el desarrollo de la eólica en tierra prácticamente hasta los años 2000. En el año 2000 se promovió a partes iguales entre Dong Energy y una cooperativa de 10.000 pequeños inversores, el parque eólico de Middelgrunden construido en Øresund a 3,5 km a las afueras de Copenhague, Dinamarca en aguas con una

profundidad de 3 a 6 metros. Cuando se construyó en 2000, fue el parque eólico marino más grande del mundo, con 20 aerogeneradores Bonus Energy de 2 MW cada uno y una capacidad total de 40 MW. Este parque eólico costó alrededor de 47 Millones de Euros y proporciona alrededor del 4% de la energía eléctrica que consume Copenhague. El factor de capacidad es de 25.7%.

Los buenos resultados obtenidos en las primeras experiencias hicieron que en 2001 la compañía danesa Elsam decidiera desarrollar un parque eólico de gran escala buscando la reducción de costes obtenida mediante la economía de escala. Este nuevo parque se diseñó en varias etapas siendo la primera etapa de 160 MW de capacidad. Este parque eólico fue el primer parque eólico de gran potencia. Se denominó Hørs Rev 1 por estar situado en unos bancos de arena sumergidos en el mar del Norte a unos 15 Km de la costa más Occidental de Dinamarca. Este parque dispone de 80 aerogeneradores Vestas V80 de 2 MW de potencia nominal cada uno. Este parque eólico disponía de un precio garantizado de 6 céntimos de Euro/kWh durante las primeras 42,000 horas. Desde 2005 este parque eólico ha sido operado por la compañía eléctrica sueca Vattenfall. Este parque fue la primera experiencia de diseño, instalación y operación de grandes parques eólicos marinos. Se establecieron las estrategias de posicionado (los aerogeneradores están dispuestos en un rectángulo oblicuo de 5 km x 3.8 km (8 filas horizontales y 10 verticales) quedando separados 480 metros entre ellos en todas las direcciones), se comenzaron los análisis del efecto de las estelas, del diseño del interconexión y de la evacuación a tierra.

La instalación de los aerogeneradores se realizó mayoritariamente con helicópteros adaptados. Este parque eólico mostró las dificultades de operar un parque eólico en el mar del Norte con velocidades de viento medias de 9.5 m/s. Después de varios retrasos en la puesta en marcha debidos a problemas con los cables submarinos, se detectaron problemas con los generadores y los transformadores achacados posibles fallos de configuración en fábrica y del sellado frente al ambiente salino. Los viajes desde tierra al parque eólico se multiplicaron. La compañía Elsam decidió que al aparecer un fallo sistémico, lo mejor era sustituir todos y desmontar los 80 aerogeneradores para revisarlos y repararlos en tierra lo que provocó un sobrecoste importante. Esto hizo que se pusiera en duda la potencial viabilidad de los grandes parques eólicos marinos en ese momento. Hoy en día, este parque eólico tiene una disponibilidad del 96-97% y el propietario es capaz de sustituir una caja multiplicadora en un día.

Posteriormente en 2009 se instaló el parque eólico de Hørs Rev II de 209 MW con 91 aerogeneradores Siemens SWP 2.3-93 en este caso a 32 Km de la costa y en profundidades de 9 a 17 metros. Este parque tiene un factor de capacidad de 48.4% y ha costado 470 Millones de Euros.

Por último, este año promovido por la empresa sueca Vattenfall se ha puesto en marcha el parque eólico Hørs Rev III de 406,7 MW con 49

aerogeneradores MHI/Vestas V164-8,3 MW a 30 Km de la costa y en profundidades entre 10 y 20 metros.

El recurso eólico en las islas Británicas es excelente, pero el desarrollo de la energía eólica en tierra especialmente en el Reino Unido nunca acabo de despegar, probablemente debido a la falta de aceptación social a algunos de los potenciales impactos medioambientales asociados a los que la población local es especialmente sensible. Por ello, el exitoso desarrollo de la eólica en entorno marino en el mar del Norte logro que desde el Gobierno lo vieran como una oportunidad de descarbonizar el suministro de energía reduciendo su afectación.

La primera experiencia de eólica marina en el Reino Unido fue el desarrollo de un proyecto piloto en el año 2000 con dos aerogeneradores Vestas V66 de 2 MW en un emplazamiento con profundidades de 6 a 11 metros y a 1 Km de la costa de Blyth en Inglaterra. Este proyecto experimental desarrollado por la compañía eléctrica EON, la petrolera Shell RES, La eléctrica holandesa NUON y la compañía Border Wind costo 4,6 Millones de Euros. Este proyecto se pretende dismantelar este año.

La segunda experiencia en Reino Unido fue en 2007 y fue considerado un hito debido a la gran profundidad del agua en el emplazamiento y al tamaño de los aerogeneradores utilizados. El parque eólico Beatrice está situado cerca del campo petrolífero Beatrice en Moray Firth, en el Mar del Norte a 13 km de la costa noreste de Escocia. LA profundidad del agua en el emplazamiento es de 45 m. Por ello hubo que diseñar dos estructuras tipo jacket celosías de cuatro patas para soportar los dos aerogeneradores de 154 m de diámetro de rotor, 1101 metros de altura de buje y 5 MW de potencia nominal fabricados por la empresa alemana Repower (Hoy Senvion). Este parque fue desarrollado por la eléctrica Scottish and Southern Energy y la petrolera Talisman Energy y su coste ascendió a 3000 mIll Euros. Este parque eólico fue diseñado para examinar la viabilidad de construir parques eólicos comerciales en aguas profundas a una distancia razonable de la costa. El diseño de la plataforma soporte fue desarrollado por la empresa noruega OWEC Tower AS, y fabricado en Escocia por Burntisland Fabrications. La energía producida la consumía toda la plataforma petrolífera Beatrice.



Figura 6. Parque eólico marino de Walney. (Reino Unido) 659 W

Una vez demostrada la solución técnica, este año los mismo promotores pusieron en marcha la extensión del proyecto Beatrice de 588 MW de potencia con 84 aerogeneradores SG7-154 de 7 MW del fabricante hispano alemán Siemens Gamesa Renewable Energy con un coste de 3.019 Millones de Euros.

En Reino Unido se han desarrollado grandes parques eólicos marinos como el de Greater Gabbard en el año 2012 de 504 MW de capacidad y 1.742 Millones de Euros de coste, situado en Inglaterra a 23 Km de la costa de Suffolk con 140 aerogeneradores SWT 3,6-107 de 3,6 MW del fabricante alemán Siemens o el de Gwynt y Môr en 2015, de 576 MW de capacidad, que costo mas de 2.223 Millones de Euros y está situado en la costa Norte de Gales con 140 aerogeneradores SWT 3,6-107 de 3,6 MW del fabricante alemán Siemens. El promotor danés Oersted ha promovido los parques eólicos marinos de mayor potencia del Reino Unido como el London Array (630 MW) en 2013 con un factor de capacidad del 51,1%, el Race Bank (580 MW) y el parque de Walney (367 MW) y la extensión del Walney (659 MW) en total 1026 MW de capacidad con factores de capacidad por encima del 40%.

La empresa subsidiaria de Iberdrola, Scottish Power junto con la danesa Oersted desarrollaron en el 2014 el parque eólico de West of Duddon Sands de 389 MW, situado a 14 kilómetros al suroeste de la isla Walney, frente a la costa de Barrow-in-Furness en Cumbria, en el Mar de Irlanda, Inglaterra con 108 aerogeneradores 108 SWP 3.6-120 del fabricante Siemens.

Indicar que el único parque eólico marino flotante del mundo está situado en Reino Unido, en la costa de Escocia a 29 Km de la ciudad de Peterhead en un emplazamiento con entre 95 y 130 metros de

profundidad. Su nombre es Hywind Scotland y está compuesto por cinco aerogeneradores SWT 6-154 de Siemens de 6 MW de potencia cada uno. Este parque eólico dispone de plataformas flotantes tipo boya tubular fabricadas en España por Navantia por encargo de Statoil (Ahora Equinor). El parque se puso en marcha en 2015.

En Reino Unido hay además también parques experimentales como el desarrollado en 2018 en el denominado European Offshore Wind Deployment Center EOWDC, situado a 3 kilómetros de la costa este de Aberdeenshire en el Mar del Norte, con profundidades de 31 metros. Este parque experimental de 93 MW se ha desarrollado con 11 innovadores aerogeneradores V164-8 MW de 8 MW de potencia fabricados por el fabricante danés Vestas.

También en la costa de Methil, Fife, en Escocia hay un emplazamiento para prueba y demostración de nuevos aerogeneradores marinos experimentales. En este emplazamiento se están ensayando un nuevo modelo bipala de 140 metros de diámetro de rotor y 6 MW de potencia nominal de origen holandés de la marca 2B Energy y un aerogenerador Samsung de 7 MW.

En el mar de Irlanda hay varios parques eólicos marinos, la mayoría en aguas del Reino Unido como el de West of Duddon Sands de 389 MW situado a 15 Km de la costa y con profundidades de 17 a 24 metros compuesto por 108 aerogeneradores Siemens SWP 3.6-120 de 3,6 MW fue puesto en marcha en 2014. El coste de este parque alcanzó 1850 Millones de Euros y fue promovido por la danesa DONG y la escocesa SSE Plc (Scottish and Southern Energy).

También en el mar de Irlanda se encuentra el parque eólico marino más grande con 1039 MW de capacidad instalada. Se trata del parque eólico de Walney situado a 14 Km de la costa inglesa y con profundidades de 19 a 30 metros. Dispone de 102 aerogeneradores SWP3.6-107 de 3,6 MW y 47 SWT 7.0-154 y 7 MW de potencia nominal fabricados ambos modelos por Siemens y finalmente 40 aerogeneradores MHI-Vestas V164-8.25 de 8,25 MW de potencia nominal. Este parque fue puesto en marcha en 2010 y la inversión alcanzó los 1390 Millones de Euros. En la actualidad hay varios parques eólicos en desarrollo como el denominado Dublin Array de 600 MW frente a Dublin.

En Irlanda, el parque eólico marino de Arklow Bank tiene una capacidad de 25 MW compuesto por 7 aerogeneradores GEWind de 3,6 MW. Es el primer parque eólico marino en Irlanda, se puso en marcha en 2010 y fue la primera construcción del mundo con aerogeneradores de más de 3 MW. Se encuentra en el Banco Arklow, un banco de arena de aguas poco profundas en el Mar de Irlanda, a unos 10 kilómetros de la costa de Arklow con un área de 27 por 2,5 kilómetros y una profundidad del agua de 2 a 5 metros.

En Alemania también hay parques eólicos marinos experimentales como el Alpha Ventus (ahora Borkum West) ya que está situado en el Mar del Norte a 45 kilómetros al norte de la isla de Borkum con profundidad de 28 metros. Este parque fue el primer parque eólico marino construido en Alemania. Se construyó en 2010 y dispone de 6 aerogeneradores M5000 del 6 MW del fabricante alemán ya desaparecido Multibrid (Después Adwen) y otros 6 aerogeneradores 5M de 5 MW del fabricante también alemán Repower (hoy Senvion). Este parque eólico tiene un factor de capacidad el 50,2%.



Figura 7. Parque eólico de BARD Offshore 1. 400 MW (Alemania)

En Alemania también hay grandes parques eólicos marinos como por ejemplo el Parque eólico marino Amrumbank West de 302 MW que se encuentra a unos 35 km al noroeste de la isla de Heligoland y a unos 18 km al suroeste del banco de arena de Amrum Bank. Dispone de 80 aerogeneradores de 4,6 MW de Siemens, situados en aguas de 19 a 24 m de profundidad. También el Arkona Wind Park con 385 MW, el Bard Offshore 1 con 400 MW compuesto por 80 aerogeneradores de 5 MW de la extinta marca alemana BARD. Este parque tiene como peculiaridad su distancia a la costa que es de 100 Km y la profundidad del agua que era de 40 m, por lo que se utilizaron estructuras jacket celosías de cuatro patas para soportar a los aerogeneradores. En aguas de Alemania solo otro parque eólico, el Global Tech 1 con 400 MW está situado a mas distancia de la costa, unos 110 Km.

Alemania también dispone de parques eólicos en el mar Báltico como el parque Wikinger de 350 MW situado a 75 Km de la costa en con 70 aerogeneradores Adwen AD5-135 de 5 MW cada uno. Este parque eólico fue desarrollado íntegramente por la compañía Iberdrola y puesto en marcha en 2018. Su coste ascendió a 1.400 Millones de Euros. Reseñar que la subestación eléctrica de este parque está también instalada en

una plataforma soporte cuatripata. Esta subestación denominada Andalucía y cuyo peso asciende a 8500 toneladas, se construyó en las instalaciones de Navantia en Puerto Real (Cádiz). También parte de las estructuras soporte de los aerogeneradores fueron fabricadas en las instalaciones de Navantia en la ría de Ferrol (A Coruña)

Este parque eólico marco la entrada de Iberdrola en el mercado eléctrico alemán, donde acaba de adjudicarse la construcción de otros dos parques eólicos marinos: Baltic Eagle (476 MW) y Wikinger Süd (10 MW). Junto con Wikinger, estos tres parques eólicos, ubicados frente a la isla de Rügen, darán lugar al mayor complejo eólico marino en el Mar Báltico, con una capacidad instalada total de 836 MW y una inversión combinada de 2.500 millones de euros.



Figura 8. Instalación de aerogenerador en parque eólico marino de Greater Gabbard. 504 MW (Reino Unido)

En Holanda hay parques eólicos marinos desde el año 1994 en el que se desarrolló el parque eólico de Lely con cuatro aerogeneradores Nedwind de 500 kW y 41 metros de diámetro de rotor. Este parque estaba a menos de 1 Km de la costa y a una profundidad de 3-4 metros. En 2016 con 22 años de vida útil fue desmantelado. En 1996 se desarrolló el parque eólico Irene Vormik de 17 MW de potencia total con 28 aerogeneradores Nordtank NTK600/43 también a un kilómetro de la costa y a una profundidad de 2 a 3 metros. En relación a capacidad, el parque eólico más relevante es el parque eólico Gemini de 600 MW puesto en marcha en 2017 con 150 aerogeneradores SWT4-130 de la empresa alemana Siemens.

Suecia fue también un pionero en el desarrollo de la tecnología eólica marina. En 1990 se instaló el primer aerogenerador en emplazamiento marino en Suecia. Era un solo aerogenerador danés W25 de 220 kW a 250 metros de la costa en un emplazamiento de 6 metros de profundidad. Este aerogenerador se desmanteló en 2004. Posteriormente, en 1996 se desarrolló el proyecto de Bockstigen con cinco aerogeneradores Windworld de 550 kW, en total 2,75 MW. El emplazamiento estaba a unos 6 Km de la costa y la profundidad del agua era entre 5 y 6 m. El promotor fue la eléctrica Vattenfall y su coste fue 4 Millones de Euros.

En el año 2000 se desarrolló el segundo proyecto denominado Utgrunden de 10,5 MW de capacidad instalada. Este parque eólico se desarrolló con 7 aerogeneradores GE 1,5s de 1,5 MW de potencia nominal. El emplazamiento estaba a unos 5 Km de tierra. Este parque eólico continúa en operación. Sin embargo en 2001 Vattenfall desarrolló el parque eólico de Yttre Stengrund con 5 aerogeneradores NEG Micon de 2 MW cada uno, totalizado 10 MW de capacidad en un emplazamiento entre 2 y 4 Km de la costa y con una profundidad de 6 a 8 metros. Este proyecto costó unos 13 Millones de Euros y fue desmantelado en 2015 con apenas 14 años de vida útil.

En 2008 se construyó el parque eólico marino de Lillgrund. El parque eólico Lillgrund se encuentra a unos 10 km de la costa del sur de Suecia, justo al sur del puente de Öresund, donde la velocidad promedio del viento es de 8 a 10 metros por segundo. Con 48 aerogeneradores Siemens SWT-2.3-93 y una capacidad de 110 MW, Lillgrund es el mayor parque eólico marino de Suecia, es capaz de suministrar la demanda de electricidad doméstica de más de 60,000 hogares (5000 kWh por hogar). Los aerogeneradores del parque tienen un diámetro de rotor de 93 metros y una altura total de 115 metros. Este parque debido a varios retrasos se construyó sobre un proyecto diseñado para aerogeneradores de menor diámetro por lo que las pérdidas por las estelas de los mismos aerogeneradores aumentaron considerablemente.



Figura 9. Dos parques eólicos con plataformas soporte tipo Jack celosía de tres y de cuatro patas.

En 2010 se desarrolló el parque eólico de Vanern en el lago de mismo nombre a 10 Km de la costa y una profundidad entre 1 y 20 metros. Se instalaron 10 aerogeneradores de del fabricante finlandés ya

desaparecido WindWind de 3 MW. El parque eólico tiene una capacidad de 30 MW.

Bélgica también dispone de múltiples parques eólicos marinos de gran potencia. El primer parque eólico operativo del Mar del Norte belga fue el parque eólico C-Power de 325 MW construido en tres fases. Su primera fase de construcción se completó en mayo de 2009. Esta fase fue una fase de demostración, con la instalación de 6 aerogeneradores de 5 MW (30 MW). La construcción de la segunda y tercera fase finalizó en septiembre de 2013. Se instalaron un total de 48 aerogeneradores de 6,15 MW durante estas dos fases (295,2 MW). Las turbinas generan alrededor de 1050 GWh por año, lo que puede proporcionar electricidad a 300.000 hogares. También el parque eólico Otary RS Rentel de 309 MW con 42 aerogeneradores de 7.35 MW. Este parque fue puesto en servicio en septiembre de 2018 y puede proporcionar electricidad a 300,000 hogares. La plataforma del transformador está conectada a tres puntos en la costa: Seastar, Mermaid y Northweste. Ahora mismo hay tres parques eólicos en construcción en Bélgica con una potencia total de 1076 MW.

En Francia la energía eólica marina se está desarrollando algo más tarde que en los demás países con costa en el mar del Norte. Hasta la fecha solo un aerogenerador experimental Vestas V80 de 2 MW de potencia cimentado mediante una plataforma flotante desarrollada por la empresa francesa IDEOL ha sido conectado a red. Es el proyecto FLOATGEN que se ha realizado en el área de ensayo SEM-REV en Le Croisic cerca de Nantes (Francia) con una profundidad de 33 metros.

Pero los grandes proyectos eólicos marinos comerciales franceses están muy planificados. El primer parque eólico en Francia ha sido promovido por EDF y se denomina parque eólico Calvados. Es de 450 MW de capacidad y está situado a 11 Km de la costa en el Canal de la Mancha y con profundidades de 21 a 30 metros. Este parque estará compuesto por 75 aerogeneradores Haliade 150-6MW fabricados por Alstom Wind (Ahora GE Energy).

En la actualidad hay otros tres grandes proyectos en construcción. El proyecto eólico marino del Mar de la Baie de Saint-Brieuc en el Norte de Francia a 16 Km del cabo Erqui y entre 28 y 36 metros de profundidad, con una capacidad prevista de 496 MW compuesto por 62 aerogeneradores AD8-180 de 8 MW fabricados por la empresa Adven (ahora Siemens Gamesa ER) en Le Havre. Este parque que está construyendo Iberdrola se prevé que se ponga en marcha en 2022. Además hay otros dos parques eólicos marinos planificados como son el de Banc de Guerande de 480 MW con 80 aerogeneradores GE Haliade 150-6MW y el Parque eólico de Hautes Falaises de 498 MW con 83 aerogeneradores GE Haliade 150-6MW.

En Francia como ya se ha comentado hay un gran desarrollo tecnológico en eólica marina flotante. La ingeniería IDEOL es uno de los líderes mundiales en desarrollo de plataformas eólicas marinas flotantes tanto para soportar aerogeneradores de gran potencia como subestaciones eléctricas. Además del proyecto FLOATGEN está el EOLINK 1/10, en el que se pretende conectar un prototipo de aerogenerador de unos 200 kW en la Bretaña y el proyecto NENUPHAR con un aerogenerador de eje vertical.

En Portugal la única experiencia eólica marina fue el proyecto experimental WindFloat que consistía en un aerogenerador Vestas instalado sobre una plataforma flotante semisumergible desarrollada por la empresa norteamericana Principle Power Inc.. Este prototipo fue instalado cerca de Wave Farm Aguçadoura en Póvoa de Varzim en un emplazamiento con más de 40 metros de profundidad. En la actualidad está en marcha un nuevo parque eólico flotante en la costa de Viana do Castelo denominado WindFloat Atlantic (WFA) de 25 MW de capacidad total. Este parque eólico marino flotante dispondrá de tres aerogeneradores MHI-Vestas V164-8,4 de 8,4 MW de potencia nominal. Las plataformas flotantes se están fabricando en la factoría de NAVANTIA en Fene (A Coruña). Este proyecto está promovido por el consorcio WindPlus en el que están EDP Renovables (54,4%), ENGIE (25%), REPSOL (19,4%) y Principle Power inc (1,2%).

En España la capacidad eólica marina se reduce a un aerogenerador Gamesa de 6 MW el G128 situado en la costa de Aguinaga en la isla de Gran Canaria para su ensayo y certificación y un proyecto experimental también en la costa de la isla de Gran Canaria cercano a la plataforma experimental PLOCAN. Se trata del proyecto ELISA/ELICAN desarrollado por la empresa ESTEYCO. Es una estructura soporte de hormigón que permite instalar en entornos marinos aerogeneradores de hasta 5 MW sin requerir de barco grúa.

Fuera de Europa hay experiencias de eólica marina en China, Japón, Corea del Sur y en Estados Unidos.

La primera experiencia eólica marina en China fue en 2010, el proyecto Donhai Bridge situados a 16 Km de la costa y en aguas de 7 metros de profundidad, con 34 aerogeneradores Sinovel SL 3000/90 de 3 MW de potencia nominal. La capacidad total del parque es de 102 MW. Su coste ascendió a 92 Millones de Euros. En China la mayoría de los parques eólicos son de gran potencia, por encima de 100 MW, como el de Huaneng Rudong de 300 MW con 70 aerogeneradores de 4, 4.2 y 5 MW situados aproximadamente a 14 km de la ciudad de Nantong en la provincia de Jiangsu. La construcción del parque comenzó en julio de 2015 y ya está en operación. También en 2014 el parque eólico marino de demostración de Xiangshui de 202 MW situado a 8,4 Km de la costa y en profundidades de 8 a 12 metros con 18 aerogeneradores Goldwind de 3 MW y 37 aerogeneradores Siemens SWT-4.0 de 4 MW. El parque eólico de Rudong con 200 MW compuesto por 25 aerogeneradores

Siemens SWT-4.0 y 25 aerogeneradores Envision 4-136 de fabricación china. En el año 2016 se desarrolló el parque eólico marino de demostración de Shanghai Lingang de 101 MW con 28 aerogeneradores W3600-122-90 de 3,6 MW de potencia nominal fabricados por el fabricante Chino Shanghai Electric SEWIND. Este parque está situado a 10 km de la costa y en profundidades de 5 y 7 metros.

En Japón, todavía hay muy pocos parques eólicos marinos ya que la plataforma marina hace que la solución flotante sea la idónea. La mayoría son instalaciones de una o dos turbinas como la instalación de Setana en Hokkaido con dos aerogeneradores Vestas V47 de 660 kW situados muy cerca de la costa o el aerogenerador flotante de 2 MW de potencia instalado en la costa de Fukushima en 2013. Pero también hay algunos parques eólicos marinos de pequeña potencia como el parque de Kamisu en Ibaraki con siete aerogeneradores Subaru 80 de 2 MW de potencia nominal cada uno que soportó perfectamente el terremoto y el posterior Tsunami en 2011 o el parque eólico tierra/marino Sakata de 16 MW de potencia compuesto por 8 Aerogeneradores V80 de 2 MW, 5 en el mar y 3 en tierra. En la actualidad están en desarrollo varios parques eólicos de gran potencia como el de Kitakyushu en la prefectura de Fukuoka con 44 aerogeneradores donde ya hay instalado un aerogenerador experimental JSW (Japan Steel Works) J82 de 2 MW y el de Yurihonjo en Akita con 600 o 700 MW con aerogeneradores de 8 MW previsto para 2024.

En Estados Unidos la energía eólica marina se encuentra en las primeras etapas de desarrollo. El primer aerogenerador flotante de América del Norte fue el Voltorn US de 20 kW, que se bajó al río Penobscot en Maine en 2013. El primer parque eólico marino comercial en Estados Unidos ha sido el parque eólico Block Island de 30 MW compuesto por 5 aerogeneradores Alston (Ahora GE Energy) Halliade 150 de 6 MW de potencia, frente a la costa de Rhode Island, comenzó a funcionar en 2016. Comentar que el desarrollador de este proyecto es la empresa española Acciona Energía.

Existen muchos más proyectos que están en distintos estados de desarrollo a lo largo de la costa este principalmente pero también en la oeste. A partir de 2017 se planificaron alrededor de 30 proyectos con un total de 24 GW de potencia total. El Departamento de Energía de los Estados Unidos estima que el país tiene un potencial de recursos brutos de 10.800 GW de capacidad eólica marina, con un potencial de recursos "técnicos" explotables de 2.058 GW.

Iberdrola, a través de Avangrid Renewables, está participando en el desarrollo de un parque eólico marino a gran escala en la costa del estado de Massachusetts, Estados Unidos. Vineyard Wind 1 tendrá una capacidad de 800 MW, y será capaz de satisfacer las necesidades energéticas de un millón de hogares.

Como podéis observar el crecimiento del tamaño de los parques y de los aerogeneradores ha sido incesante durante los últimos años

Aerogeneradores

La tecnología de aerogeneradores para aplicaciones marinas no ha parado de crecer. Aunque los primeros experimentos de eólica marina se desarrollaron con aerogeneradores de pequeña potencia del orden de 220 KW, la realidad es que el alto coste del sistema requería de escalas cada vez mayores para poder aprovechar el gran recurso eólico existente en el mar por lo que el tamaño creció por encima del megavatio y hoy en día se puede decir que como mínimo los aerogeneradores para parques eólicos son de potencia superiores a 5 MW y 140 metros de diámetro de rotor.

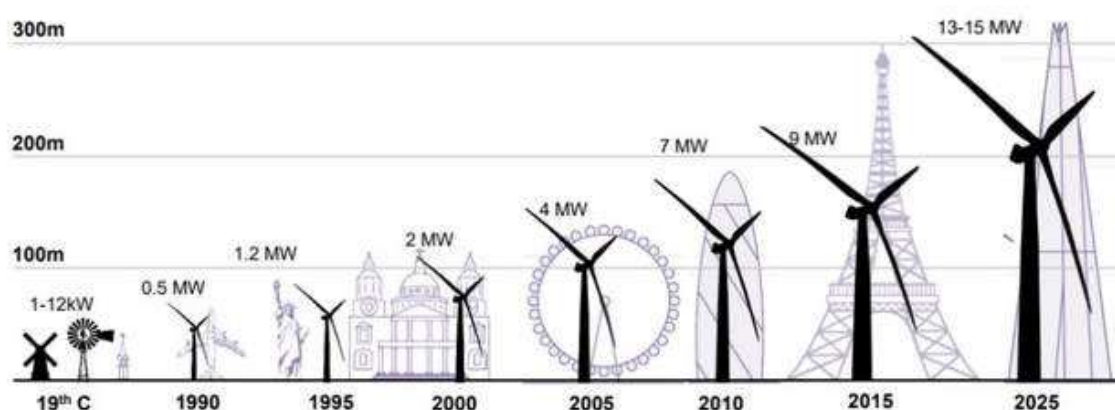


Figura 10. Crecimiento del tamaño y potencia de los aerogeneradores en las últimas tres décadas

Este crecimiento continuo ha provocado que los fabricantes con capacidad de desarrollar grandes aerogeneradores haya quedado limitados a como mucho cinco fabricantes a nivel mundial.

El tamaño promedio en términos de potencia de los aerogeneradores en Europa en 2018 fue de 6.8 MW, con un aumento del 15% en 2017. El Reino Unido conectó la turbina más grande del mundo. (El V164-8.8 MW de MHI Vestas Offshore Wind).

El tamaño promedio de los parques eólicos en construcción en 2018 fue de 561 MW. En el Reino Unido se comenzó en el parque eólico más grande del mundo: el Proyecto Hornsea One de 1.200 MW.

El primer fabricante de aerogeneradores marinos en el mercado europeo es el fabricante hispano-alemán Siemens Gamesa Energías Renovables (69%, 3155 aerogeneradores, 12,8 GW), el segundo es Danés-Japones MHI-Vestas Offshore Wind (24%, 1068 aerogeneradores, 3,8 GW), el tercero el alemán Senvion (5%, 206 aerogeneradores, 1,2 GW), el

cuarto es BArds Engineering (1%, 80 aerogeneradores, 0,4 GW) y el quinto es el norteamericano GE Energy (1%, 28 aerogeneradores, 0,15 GW).

A nivel mundial aparecen los fabricantes chinos como Dongfang, Goldwind, Envision, Sinovel y Shanghai Electric SEWIND.

Marca	Modelo	Potencia (MW)	Diámetro (m)	Pala (m)	País	Situación
GE RE	Halliade X	12	220	107	EEUU	Prototipo
SGER	SG 10.0-193	10	193	94	ESPAÑA	Prototipo
MHI-VESTAS	V164	8-9.5-10	164	80	DINAMARCA	Comercial
AMSC	SeaTitan	10	190	73,5	EEUU	Diseño
SWAY	ST-10	10	164	67	NORUEGA	Diseño
DONFANG E	DEC10	10	185	90	CHINA	Comercial
GOLDWIND	GW175-8	8	175	84	CHINA	Comercial
ADWEN	AD8-180	8	180	88.4	ESPAÑA	Comercial
SGER	SG 8.0-154	8	154	75	ESPAÑA	Comercial
ENERCON	E-126	7.5	127	58	ALEMANIA	Prototipo
SAMSUNG	S7.0	7	171	83.5	COREA DEL S	Prototipo
SENVION	6.3M152	6.3	152	61.5	ALEMANIA	Comercial
GE (Alston)	Halliade	6	150	73.5	FRANCIA	Comercial

Tabla 1. Lista de los aerogeneradores de mayor potencia existentes en la actualidad (2019)

El aerogenerador mas grande construido en la actualidad es el GE Halliade X de 12 MW de potencia nominal. Dispone de un diámetro de rotor de 220 metros con palas de 107 metros fabricadas por la empresa holandesa LM Windpower.



Figura 11. Pala LM 107.0 P de 107 metros en la planta de fabricación de Cherbourg (Francia)

La altura total del aerogenerador hasta la punta de la pala es 260 metros, 11 metros mas alto que el edificio mas alto de España que es la la torre de cristal del Paseo de la Castellana en Madrid.

El área barrida por las palas del rotor es de 38.000 m² equivalente a 7 campos de futbol.



Figura 12. Aerogenerador GE Haliade X 12 MW

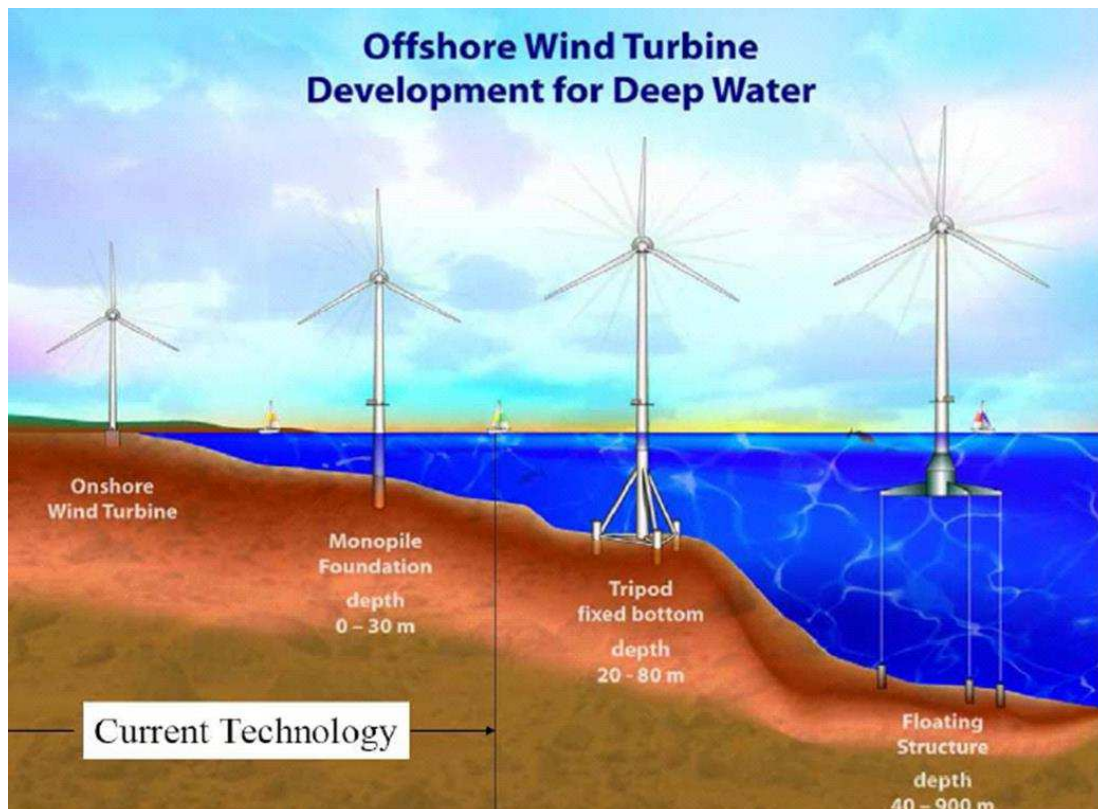
En cuanto a aerogeneradores comerciales tanto Siemens Gamesa Energías Renovables como MHI-Vestas disponen de modelos de 10 MW, el SG 10.0-193 y el V164-10 respectivamente.



Figura 13. Transporte de la pala LM 107.0 P desde Francia a la planta de ensayo de ORE-Catapult en Reino Unido

Plataformas soporte

Es evidente que los mayores costes de las instalaciones marinas son debidos principalmente a la plataforma soporte o cimentación para soportar al aerogenerador en el mar.



Aquí tenemos tres tipos de soluciones dependiendo de la profundidad de las aguas donde se va a hacer la instalación:

- Cimentaciones para baja profundidad (menos de 20 metros):

- o **Base por gravedad**

Una estructura basada en la gravedad es una estructura de soporte sostenida por la gravedad. Estas estructuras a menudo se construyen en fiordos o en arenales ya que su área protegida y profundidad suficiente son muy deseables para la construcción. Las bases por gravedad normalmente están construidas de hormigón armado de acero, a menudo con tanques o celdas que se pueden utilizar para controlar la flotabilidad de la plataforma. Cuando se completa, la base de gravedad es remolcada a su ubicación prevista y se hunde. Antes del despliegue, se debe realizar un estudio del fondo marino para garantizar que pueda soportar la carga vertical ejercida sobre él por esa estructura.



Figura 14. Ejemplos de estructuras soporte por gravedad

- o **Monopilote enclavado**

Esta es la solución mas aplicada para bajas profundidades. Se pueden fabricar monopilotes de hasta 11 m de diámetro y 2.000 toneladas, pero los más grandes hasta ahora son 1.300 toneladas, que está por debajo del límite de 1.500 toneladas de algunos buques grúa. Los otros componentes del aerogenerador son mucho más pequeños.

- Cimentaciones para aguas de profundidad media (entre 20 y 80 metros)

- o **Tripode**

El sistema de subestructura de trípode es un concepto desarrollado para alcanzar aguas más profundas que con los sistemas de aguas poco profundas, hasta 60 m. Esta tecnología consta de tres monopilotes unidos entre sí a través de una pieza conjunta en la parte superior. La principal ventaja de esta solución es la simplicidad de la instalación, que se realiza instalando tres monopilotes y luego agregando la unión superior.

El trípode consiste en una tubería central que se encuentra en una configuración de marco tubular de trípode en su parte inferior. Utiliza tres pilares pequeños impulsados por el fondo marino en cada pata del trípode para unirlos al fondo marino. La principal ventaja del sistema de trípode es que tiene una base más grande, lo que disminuye su riesgo de volcarse. Debido a las grandes dimensiones, el proceso de instalación es más difícil y aumenta el coste.

La estructura jacket celosía de tres o cuatro patas fabricada con acero proviene de una adaptación a la industria eólica marina de conceptos que han estado en uso en la industria del petróleo y el gas durante décadas. Su principal ventaja radica en la posibilidad de alcanzar mayores profundidades (hasta 80m). Sus principales limitaciones se deben a los altos costos de construcción e instalación.



Figura 15. Distintos tipos de estructuras trípode

o Trípode alternativo

Este es una variación del trípode convencional. El trípode alternativo consiste también en una tubería central que se encuentra en una configuración de doble marco tubular de trípodes en su parte inferior. Para ello utiliza tres pilares algo mas largos impulsados por el fondo marino en cada pata del trípode para unirlo al fondo marino. Esta solución es mas robusta y permite instalar aerogeneradores de mayor potencia.

o Jacket

Esta es la plataforma mas utilizada para profundidades entre 30 y 60 metros. Se trata de una estructura celosía con tres o cuatro patas que se apoya en el fondo y se acopla en la parte superior mediante una pieza de transición a la torre del aerogenerador.



Figura 16: Plataformas Jack celosía de cuatro patas

- Cimentaciones para aguas profundas (mas de 50 metros)

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

- **Plataforma soporte flotante lastrada**

Esta plataforma se basa en una boya flotante cilíndrica (spar-buoy) amarrada por cables o cadenas al fondo marino. Su subestructura está estabilizada para que toda la construcción flote en posición vertical. El ejemplo mas conocido de este tipo de plataforma flotante es el proyecto Hywind desarrollado por la empresa petrolera Noruega STATOIL (Ahora EQUINOR) y ensayado en la costa de Noruega. En Escocia se desarrolló con la misma tecnología el primer parque eólico flotante del mundo. El Hywind Scotland de 30 MW con 5 aerogeneradores de 6 MW. 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 telescópico que evita la necesidad de un barco-grúa especial y costoso.



Figura 17. Instalación de aerogenerador en plataforma tipo boya lastrada y procedimiento de arrastre del aerogenerador hasta el emplazamiento.

- **Plataforma soporte flotante semisumergible.**

Se trata de una plataforma flotante, basada en las experiencias de la industria del petróleo y el gas, para soportar turbinas eólicas de varios MW en aplicaciones en alta mar. La base flotante es semisumergible, anclada al fondo marino. Su

estabilidad se debe al uso de "placas que bloquean el agua" en la parte inferior de los tres pilares, asociadas con un sistema 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 mas conocido de este tipo de plataforma flotante es la desarrollada por la empresa norteamericana Principle Power Inc demostrada en el para WindFloat con un aerogenerador de 2 MW en las costas de Portugal. Despues del exitoso ensayo se pretende desarrollar un parque eólico flotante de 25 MW, el WindFloat Atlantic con tres aerogeneradores de 8,4 MW.



Figura 18. Plataforma flotante WindFloat dentro y fuera del agua.

En España se está desarrollando una innovadora plataforma semisumergible como es la plataforma Nautilus desarrollada por un consorcio de empresas vascas para obtener un producto competitivo en coste y de fabricación simple.

También la empresa Dragados Offshore está desarrollando una plataforma semisumergible de bajo coste fabricada con hormigón que pretende utilizar en el parque eólico marino flotante de Kinkardine en Escocia.

Por último, la empresa malagueña ha liderado el proyecto EnerOcean en el que se ha desarrollado una plataforma flotante a escala con dos aerogeneradores denominada W2Power y que se está ensayando en la actualidad en aguas de las islas canarias.



Figura 19. A la derecha primer aerogenerador del proyecto Kinkardine y a la izquierda prototipo de EnerOcean.

- **Plataforma soporte flotante amarrada**

Se trata de una estructura flotante amarrada verticalmente 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 alta 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 mas 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 Italia por la empresa holandesa Blue-H con un aerogenerador WES de 80 KW.

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



Figura 20. Simulación del prototipo de X1 Wind (Irda). A la derecha ensayos en canal del prototipo a escala de la TLP desarrollada por Iberdrola.

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 se 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.

- **Plataforma soporte flotante estabilizada.**

De este tipo de plataformas tipo barcaza con distintas soluciones de amortiguamiento para estabilizarla frente a las cargas aero e hidrodinámicas hay varias patentes de las que al menos una ya se ha validado con aerogenerador de 2 MW y en breve se validara con uno de 5 MW

La plataforma flotante 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 flotador movimientos usando las

propiedades hidrodinámicas de la masa de agua atrapada en el hueco central. Las oscilaciones son, por diseño, opuesto 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 2 MW en condiciones mas extremas.



Figura 21. Aerogenerador flotante con plataforma FLOATGEN desarrollada por IDEOL. (Izda) y plataforma estabilizada tipo SATH desarrollada por SAITEC (Derch)

En España hay un desarrollo de plataforma flotante de este tipo que se denomina SAITH. Esta plataforma está diseñada en hormigón y está formada por dos cascos unidos a un único punto con un rodamiento que permite a la plataforma girar alrededor de ese punto y se ha desarrollado por la empresa vasca SAITEC Offshore Technologies.

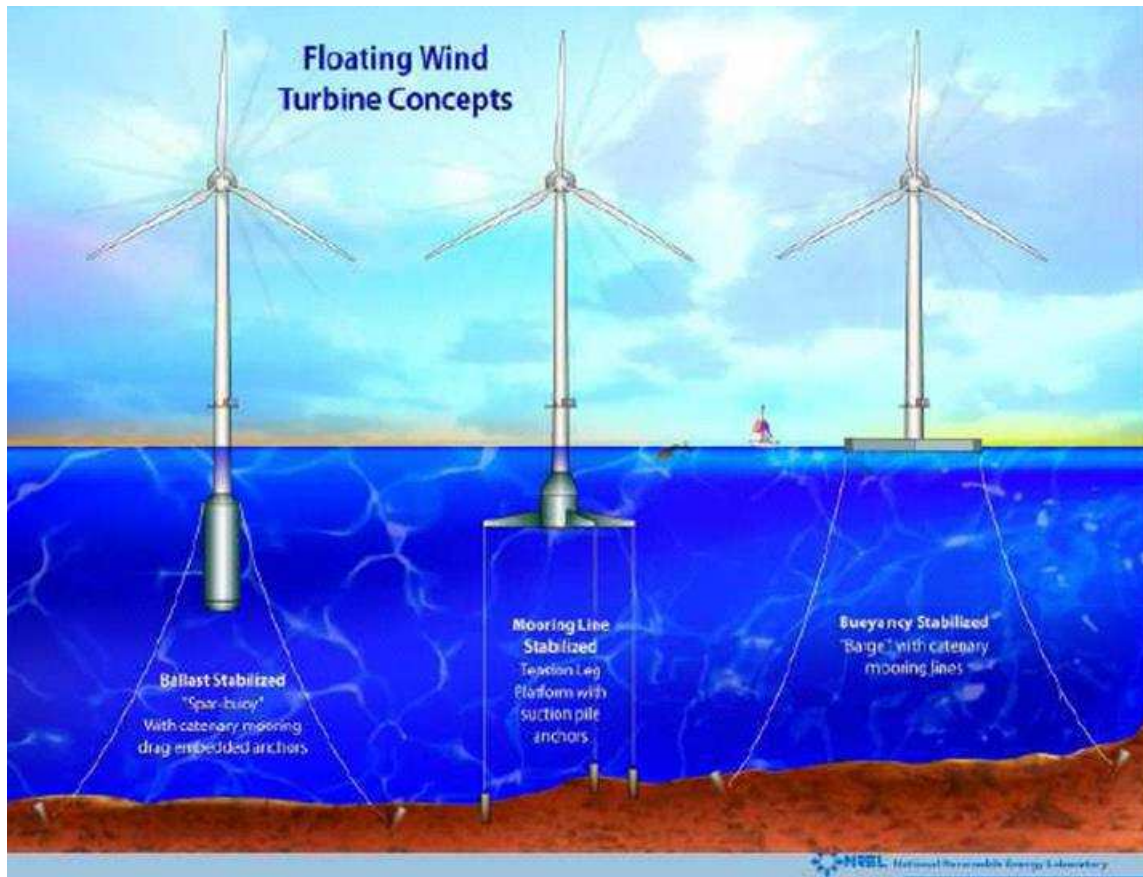


Figura 22. Distintos conceptos de plataformas flotantes

Interconexión y evacuación de la energía

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 llevara a los consumidores.

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

Figura 23 Subestación Andalucía. Parque eólico Vikinger

pero si es mayor se puede pensar en conectar en alta tensión en continua (HVDC) para reducir las pérdidas.

El cableado dependiendo de tipo de fondo del mar ira sobre el fondo o enterrado. La instalación enterrada es mas costosa pero es mas fiables 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 permitan al aerogenerador copiar a las palmeras en casos de viento extremo.

El proyecto SUMR "Segmented Ultralight Morphing Rotor" (Rotor Mórfoico ultraligero Segmentado) 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.

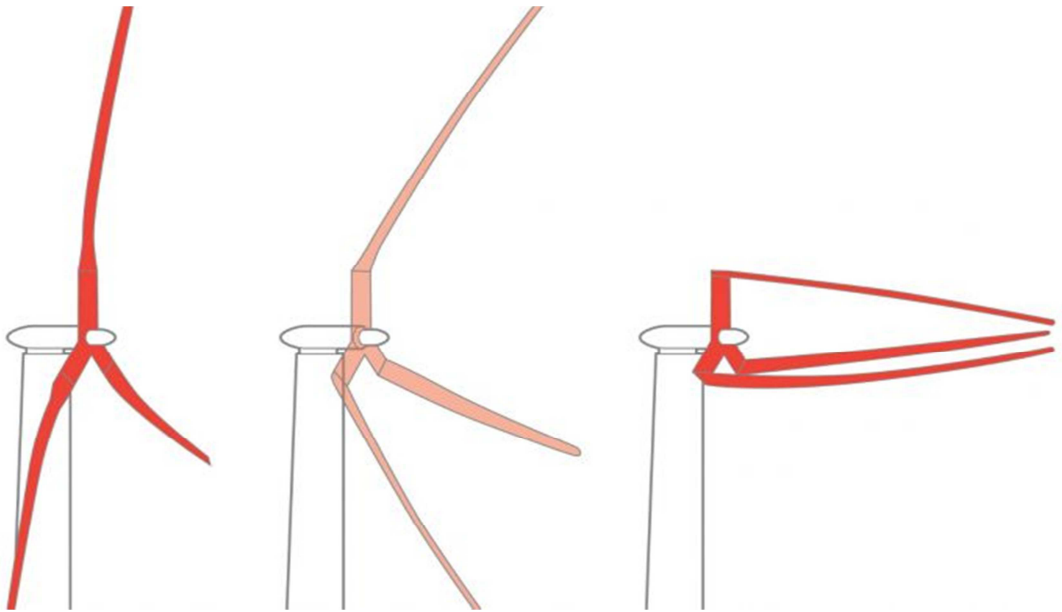


Figura 24 Concepto de rotor de aerogenerador SUMR 50MW

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 vario 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 mas fácil de almacenar y gestionar.

Un proyecto mas 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 amoniaco.



Figura 25. 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 se está desarrollando principalmente en el mar de Norte y el mar Báltico. Que barreras identificas para que se desarrolle también en el Océano Atlántico y en el mar Mediterráneo.
- 2) Los aerogeneradores cada vez son de mayor tamaño. Que 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 los parques eólicos marinos es la baja rugosidad del mar por lo que cualquier estela que se produzca en el flujo de aire perdura 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 tiene que estar interconectados por un cable submarino que es muy costoso por lo que en el diseño se tiene de a buscar la mejor solución. Como crees que se puede encontrar esa solución óptima?
- 4) El coste de la energía en las islas es muy alto. Crees que se debería comenzar a desarrollar la energía eólica marina para suministrar de energía limpia a las islas?
- 5) La energía producida con parques eólicos de gran potencia puede ser inmensa pero variable. Que ideas o estrategias se te ocurren para poder hacer que esa energía sea gestionable?
- 6) Uno de los problemas de los parques eólicos es que cada vez se construyen mas alejados de la costa. Esto complica y encarece las líneas eléctricas de evacuación de la energía a tierra. Que ideas se te ocurren para llevar esa energía de forma eficaz a las subestaciones de tierra?

- 7) Hemos visto que hay cimentaciones fijas integradas en el fondo del mar y cimentaciones flotantes para grandes profundidades. Crees que si en el futuro las cimentaciones flotantes logran ser totalmente competitivas, todos los aerogeneradores marinos se instalaran en plataformas flotantes, que permitan llevar al puerto al aerogenerador cuando haya algún fallo.
- 8) La instalación de los aerogeneradores marinos 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. Como crees que se puede mejorarse 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. Que ideas se te ocurren para facilitar dichas tareas.
- 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) Que impactos medioambientales consideras que habría que analizar en detalle en una instalación eólica marina y que medios de mitigarlos se te ocurren?
- 12) Que problemas se te ocurren que pueden aparecer si se desarrolla la energía eólica marina de forma masiva en todo el mundo y como 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 'CO2 y Cambio Climático (Edición 2016-2017).

- Guía introductoria al tema 'El uso y la generación de hidrógeno' (Edición 2009-2010).
- Guía introductoria al tema 'Generación Distribuida' (Edición 2017-2018).
- Combustibles para el futuro. Presentación y Guía (Edición 2011-2012).
- El almacenamiento de Energía. Presentación (Edición 2010-2011).

Otros recursos:

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

IDAE- Instituto para la diversificación y ahorro energético.

<https://www.idae.es/tecnologias/energias-renovables/uso-electrico/eolica/eolica-marina>

REOLTEC Plataforma española científico-tecnológica de la energía eólica

<https://reoltec.net/>

AEE Asociación Empresarial Eólica

<https://www.aeeolica.org/>

Iberdrola

<https://www.iberdrola.com/medio-ambiente/como-funciona-la-energia-eolica-marina>

Repsol

<https://www.repsol.com/es/conocenos/que-hacemos/desarrollo-energias-renovables/windfloat/index.cshtml>

EERA JP WIND Alianza Europea para la Investigación en Energía. Programa conjunto en eólica.

<https://www.eerajpwind.eu/>

WINDEUROPE/EWEA. Asociación Europea de la Energía Eólica

<https://windeurope.org/wp-content/uploads/files/about-wind/statistics/WindEurope-Annual-Offshore-Statistics-2018.pdf>

http://www.ewea.org/fileadmin/files/library/publications/reports/Deep_Water.pdf

ETPWIND Plataforma Europea de la Energía eólica

<https://etipwind.eu>

SET Plan Union Europea SETIS. Buscar offshore wind implementation pla

<https://setis.ec.europa.eu/implementing-integrated-set-plan/no-1-renewables-ongoing-work>

GWEC Global Wind Energy Council

<https://gwec.net/global-figures/global-offshore/>

IEA WIND TCP Agencia Internacional de la Energía. Programa de colaboración tecnológica en energía eólica

<https://community.ieawind.org/home>

4C Offshore base de datos sobre parques eólicos marinos con parte de información libre inscribiéndose

<https://www.4coffshore.com/windfarms/>

Offshore wind industry

<https://www.offshorewindindustry.com/you-finde-some-current-studies-concerning-offshore>

The Crown State reports

<https://www.thecrownstate.co.uk/media/2950/offshore-wind-operational-report-2018.pdf>

Seaplace

<http://www.seaplace.es/proyecto-eolia/>

Videos Youtube recomendados:

Titulo: Así funciona la energía eólica marina

<https://www.youtube.com/watch?v=oHKzL0IHH2E>

Titulo: Parque Eólico Marino Más Grande del Mundo | Ingeniería de lo Imposible

<https://www.youtube.com/watch?v=A9JF4bjYHRw>

Titulo: Proyecto de Wikinger

<https://www.youtube.com/watch?v=buPFMSk1ha0>

Titulo: Desarrollo de un parque eólico marino

<https://www.youtube.com/watch?v=sSFSvLu6Pao>

Titulo: Wikinger: ¿cómo funciona un parque eólico marino?

<https://www.youtube.com/watch?v=IRwPjBpO5Ys>

Titulo: Montaje de un parque eólico offshore

https://www.youtube.com/watch?v=1iA_z4tTAMs

Titulo: Veja Mate offshore wind farm installation

<https://www.youtube.com/watch?v=A-FJI-U2chA>

Titulo: Time-lapse installation of turbine at Vattenfall's EOWDC wind farm

<https://www.youtube.com/watch?v=KjIVUzyhiXU>

Titulo: Wind Turbine Installation Vessel BLUE AMBER

https://www.youtube.com/watch?v=x_pr27mGZ1g

Titulo: El parque eólico marino más potente del mundo, 659 MW| Walney Extension| Tendencias Tecnológicas

<https://www.youtube.com/watch?v=nGLZ331Seq4>

Titulo: Prototipo Eólico Offshore ELICAN

<https://www.youtube.com/watch?v=z1qO0Z8-HVc>

Titulo: NAUTILUS FLOATING SOLUTIONS S:L.: Plataformas flotantes para la eólica off-shore

<https://www.youtube.com/watch?v=0ix48tJEOEU>

Titulo: GE Renewable Energy's Haliade-X 12 MW nacelle unveiled

<https://www.youtube.com/watch?v=qu0RqylJdQo>

Titulo: World's longest wind turbine blade sees first daylight!

<https://www.youtube.com/watch?v=RT1oaovO6NE>

Titulo: WindFloat Construction Timelapse

https://www.youtube.com/watch?v=Yh9tC5Y_iCo

Titulo: Windfloat Atlantic Project

<https://www.youtube.com/watch?v=GvDZCEoOV9U>

Titulo: Historia completa de Hywind Scotland - Primera granja flotante de turbinas eólicas

<https://www.youtube.com/watch?v=PULfvXaISvc>

Titulo: NAVANTIA Fene: Time-lapse del embarque primeros SPARS. Parque Eólico Marino Hywind (Statoil)

<https://www.youtube.com/watch?v=hYL7vsQOtNA>

Titulo: A complete look at the V174-9.5 MW™

https://www.youtube.com/watch?v=gd_GHhDJaFw

Titulo: More power at low risk: Our 10 MW offshore turbine

<https://www.youtube.com/watch?v=aUsRzIB8wTc>

Titulo: EOLOS FLS200 (LIDAR Flotante diseñado y fabricado en España)

https://www.youtube.com/watch?v=YIAAk_MHUXA

Titulo: Ideol's floating foundation : construction methods

<https://www.youtube.com/watch?v=-FVf7ZGr2nE>

Titulo: FLOATGEN timelapse BD

<https://www.youtube.com/watch?v=tkRUD-U8UZM>

Titulo: A record of the construction of Hibiki, a Next-Generation Floating Offshore Wind Turbine System

<https://www.youtube.com/watch?v=XHL4w73kxIk>

Titulo: KINCARDINE - Installing North Sea's first semi-submersible floating wind turbine

<https://www.youtube.com/watch?v=O6ROkGgPfIo>

Titulo: DNV GL Offshore Wind

<https://www.youtube.com/watch?v=sy1z0Tz1Knw>