# LA ENERGÍA EÓLICA MARINA

Jesús GODÍN BOADO Ingeniero naval



L mundo global de hoy en día se puede decir que descansa sobre dos pilares fundamentales: las tecnologías de la información y la energía, y entre las dos, la energía es predominante, pues se trata del elemento posibilitador, precursor de todo lo demás. Sin esta no habría ordenadores, ni teléfonos móviles, ni fábricas, ni transportes a velocidad eficaz... Y de entre todas las energías, el mundo está básicamente sustentado por las derivadas del petróleo.

Pero nadie puede dudar de que el petróleo es un elemento finito. Su cenit ha sido anunciado desde voces más o menos apocalípticas, pero estudios realistas (1) nos hablan no ya del problema de su agotamiento, sino del que aparecerá cuando su capacidad máxima de extrac-

ción/día se iguale al consumo/día. Estos estudios hablan de mediados del siglo XXI, cuando todavía quedará mucho petróleo en el subsuelo, sí, pero comenzará a escasear y los precios se dispararán; de poco sirve tener aún bajo tierra grandes reservas de petróleo si estas no son capaces de abastecer la demanda.

Otro asunto de primerísima actualidad es el calentamiento global. Los continuos vertidos de CO<sub>2</sub> a la atmósfera son ya insostenibles para la mayor parte de la opinión pública, la boina de contaminación que se asienta sobre las grandes ciudades es más que preocupante y genera problemas respiratorios en sus habitantes; el deshielo del Polo Norte, la subida del nivel de los mares y océanos y las catástrofes climáticas hacen más conscientes a los políticos de la necesidad de cambiar el modelo energético.

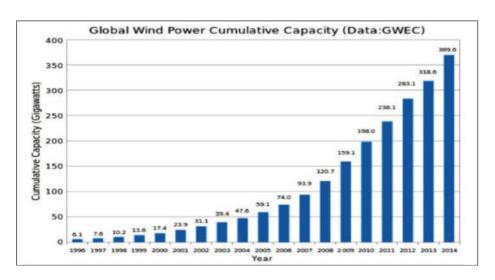
<sup>(1)</sup> SÁNCHEZ ARRESEIGOR, Juanjo: Realidad y leyendas sobre el petróleo y su posible agotamiento Instituto Español de Estudios Estratégicos (DIEEEM26-2015). Disponible en: http://www.ieee.es/Galerias/fichero/docs\_marco/2015/DIEEEM26-015\_RealidadesPetroleo\_J.Arreisegor.pdf.

En otro lado tenemos la nuclear. Sin embargo, accidentes como el de Fukushima han dejado claro que los habitantes del primer mundo no están dispuestos a correr riesgos a cambio de pagar menos en su factura eléctrica. La energía de fusión nuclear podrá ser en el futuro la nueva fuente casi inagotable de energía, pero su investigación se encuentra en niveles embrionarios y a un coste solo asumible por las grandes potencias.

## Las energías renovables

Se denominan así aquellas que proceden de fuentes naturales que son prácticamente inagotables. Destacan la solar, la eólica, la geotérmica, la hidroeléctrica, la mareomotriz, la undimotriz (olas), la biomasa y los biocarburantes. De entre ellas, todas menos las dos últimas tienen, además, la consideración de «verdes» por su escaso impacto medioambiental.

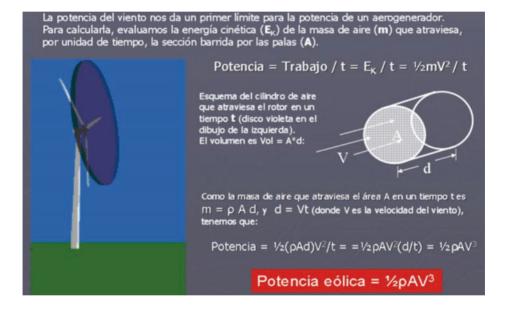
Dentro de estas energías, la eólica se puede considerar como una forma no directa de la energía solar, pues en las diferencias en el calentamiento de las superficies terrestres y los gradientes de presión que se generan podemos encontrar el origen del viento. No solo es una energía limpia, también es barata de obtener y una de las que se encuentra actualmente en mayor expansión. No faltan voces críticas que hablan del peligro que representan las palas para las aves, así como de la contaminación acústica y visual que representan los parques eólicos, pero su aumento queda claro en el siguiente gráfico (2).



<sup>(2)</sup> Fuente: Global Wind Energy Council. Disponible en GWEC.net.

## La energía eólica

El aprovechamiento de la energía del viento se logra mediante aerogeneradores. Constan de una hélice y un rotor solidario al eje, que forma, a su vez, parte de un generador eléctrico. Se trata de una energía complementaria dada su dependencia de las condiciones meteorológicas. La potencia eólica que se puede obtener teóricamente es función de la densidad del aire, del área barrida por las palas y de la velocidad del viento, si bien según el Límite de Betz, el coeficiente de potencia máximo que se podría obtener sería solo un 59 por 100 del teórico (3) que se nos muestra en la siguiente imagen:



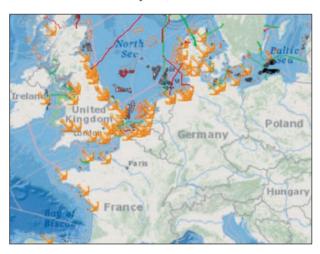
Su rentabilidad es aún discutible si no fuera por el marco de subvenciones a las renovables existentes, si bien la evolución hacia generadores cada vez más potentes y las economías de escala podrían mejorar el balance económico a su favor. En particular, en los últimos años la energía eólica *offshore* ha ido cobrando importancia, ya que presenta ventajas específicas:

 Disponibilidad de grandes superficies que permiten proyectos de gran escala.

<sup>(3)</sup> http://www.uclm.es/profesorado/ajbarbero/FAA/EEOLICA\_Febrero2012\_G9.pdf.

- La mayor parte de la humanidad vive cerca de la costa y se puede acercar la producción al consumidor.
- Mayor velocidad de viento que en el interior.
- Menor turbulencia, lo cual implica mayor efectividad de las turbinas y un ciclo de vida más largo.
- Menor impacto ambiental, paisajístico y sonoro. Si bien existe sobre aves y especies acuáticas.

Sin embargo, los parques eólicos *offshore* son aún muy costosos y la normativa internacional muy cambiante (4). En la mayoría de los países el proceso de tramitación del expediente es muy largo y está sujeto a posibles vetos por parte de muchas de las administraciones implicadas en la decisión (unos siete años en España).



La protección de los aerogeneradores contra la corrosión marina y los costes de instalación v mantenimiento son particularmente importantes a la hora de estudiar el precio del ciclo de vida de estos sistemas: además, son necesarias grandes extensiones de aguas poco profundas para plantearse parques rentables. Por eso, los países ribereños de los mares del Norte, de Irlanda, Bálti-

co y del canal de la Mancha llevan la delantera y acumulan prácticamente el 91 por 100 de la potencia *offshore* instalada, como puede verse en el mapa (5) de situación de parques en la mar.

En 2014 Europa tenía instalada una capacidad de generación *offshore* de 8,045 MW. El coste de producción se espera que esté en los 100 euros por MWh en 2020, y en 90 en 2030. En 2014 se instaló en el mundo una capacidad nueva total de 1,743 MW *offshore*, totalizando una capacidad mundial acumulada de 8,759 MW (6). En el caso particular de España los fondos no

<sup>(4)</sup> En el caso de España, está regulado en el R. D. 1028/2007.

<sup>(5)</sup> http://www.4coffshore.com/offshorewind/.

<sup>(6)</sup> http://www.gwec.net/global-figures/global-offshore/.

son muy adecuados (7), si bien las zonas potenciales están estudiadas y divididas en aptas, con condicionantes y de exclusión.

# Aerogeneradores. Conceptos básicos

La práctica totalidad de los aerogeneradores industriales son de eje paralelo al suelo, con palas de materiales



compuestos (GRP, plástico reforzado con fibra de vidrio generalmente) y hasta 80 metros de radio, que mueven el rotor de un generador de corriente. La torre, generalmente de acero tubular o celosía, sitúa las palas a la altura más adecuada para recibir viento con las menores interferencias posibles de la orografía.

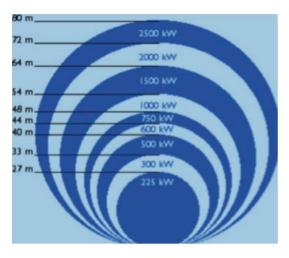
Disponen de un sistema de control que vigila la calidad de potencia de la corriente generada (la estabilidad en tensión y en frecuencia y la ausencia de diversas formas de ruido eléctrico), la orientación de la góndola en función de la dirección del viento, la inclinación de las palas y la potencia entregada a la red eléctrica. Para asegurar que la calidad de potencia sea la adecuada, el controlador debe conectar y desconectar un gran número de condensadores eléctricos que ajustarán la potencia reactiva (es decir, el ángulo de fase entre la tensión y la corriente).

Los aerogeneradores modernos se construyen todos con un número impar de palas, generalmente tres. Esta combinación puede ser considerada como un disco a la hora de calcular sus propiedades dinámicas; en cambio, un rotor con un número par de palas puede dar problemas de estabilidad en una hélice de estructura rígida, ya que cuando la más alta se flexiona hacia atrás, debido a que obtiene la máxima potencia del viento, la más baja pasa por la sombra del viento de enfrente de la torre y más baja en elevación. La mayoría de aerogeneradores modernos tienen diseños de tres palas, con el rotor a barlovento.

Como vimos anteriormente, la potencia generada es directamente proporcional al área barrida por las palas. En el gráfico de la página siguiente vemos la relación entre la potencia nominal y el diámetro de rotor de una turbina eólica (8):

<sup>(7)</sup> Fuente: IDAE. Instituto para la Diversificación y Ahorro de la Energía.

<sup>(8)</sup> http://www.uclm.es/profesorado/ajbarbero/FAA/EEOLICA\_Febrero2012\_G9.pdf.



Los generadores eólicos son muy específicos, dada la variabilidad de la fuente de energía cinética acoplada al rotor. Las turbinas pueden emplear tanto generadores síncronos como asíncronos, y conectarse directamente a la red, o indirectamente, a través de dispositivos electrónicos. El generador más común a nivel industrial es el asíncrono trifásico, fiable, económico y con buenas características mecánicas. Los hay también que pueden llevar dos genera-

dores para utilizar con distintas velocidades de viento, mientras que otros intentan aumentar su rendimiento en estas circunstancias mediante un número de polos variable. En general trabajan con velocidades de viento comprendidas entre los tres metros/segundo (velocidad de conexión) y los 25/30 m/sg (velocidad de corte).

### Otros sistemas

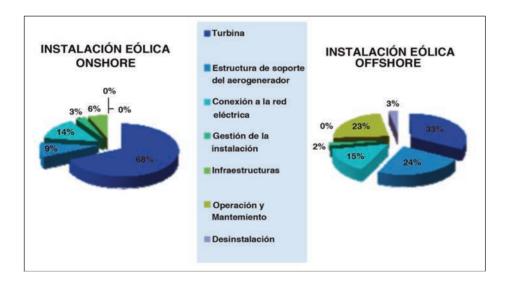
No cabe descartar que el avance de las tecnologías nos lleve a generadores sin partes móviles, lo cual sería un impulso sin precedentes a la energía eólica,



como el VORTEX de la compañía madrileña Deutecno, empresa ganadora del fondo de emprendedores de la Fundación REPSOL. Los investigadores del Vortex Bladeless trabajan en una forma alternativa a la inducción electromagnética para generar electricidad a partir de las oscilaciones de Vortex; esta alternativa está basada en la piezoelectricidad.

## Aerogeneradores. Instalación offshore (9)

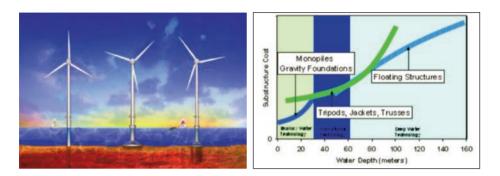
Una de las características fundamentales a la hora de abordar la instalación de un parque eólico marino es la profundidad de las aguas, que nos dará a su vez el sistema de fijación al fondo de los aerogeneradores. Este es uno de los aspectos más críticos, puesto que a mayor profundidad mayor será el coste de los sistemas de fondeo o fijación (si bien también es cierto que a más distancia de la costa, mayor intensidad y calidad del viento). En la imagen inferior se puede ver cómo el coste de la estructura de soporte del generador pasa del 9 por 100 del precio total en una instalación en tierra a un 24 por 100 en una offshore (10).



<sup>(9)</sup> Gráficos extraídos de *Energy from offshore wind*. Musial, W., y Butterfield, S. Disponible en <a href="http://www.nrel.gov/wind/pdfs/39450.pdf">http://www.nrel.gov/wind/pdfs/39450.pdf</a>.

<sup>(10)</sup> FERREÑO GONZÁLEZ, Sara; CASTRO SANTOS, Laura; DÍAZ CASÁS, Vicente, y FRAGUELA MOSCOSO, José Ángel: Estudio, caracterización y comparación de tipologías de plataformas para soporte de aerogeneradores en alta mar. Disponible en http://www.gii.udc.es/img/gii/files/Tipologias\_Soportes\_Aerogeneradores-Ferreno\_Castro\_Diaz\_Fraguela.pdf.

Las siguientes imágenes dan una visión de cómo se espera que evolucionen las tecnologías de sustentación de los aerogeneradores en función de las profundidades.



Están aceptados tres niveles de batimetría, que presentan distintas aproximaciones a la hora de emplazar los aerogeneradores: aguas poco profundas hasta los 30 metros, zona de transición de 30 a 60 metros y aguas profundas mayores de 60 metros.

## Aguas poco profundas

En estas profundidades la tendencia ha sido fondear aerogeneradores probados en instalaciones en tierra que se han preparado para operar bajo las condiciones de corrosión habituales en el ambiente marino. Hasta hace pocos años todas las plantas se instalaban mediante torres similares a las empleadas en tierra, de tipo gravedad de hormigón o acero, con *suction bucket* o, fundamentalmente, *monopods* (monopilotes), un diseño sin complicaciones y de bajo coste, ampliamente empleado en los parques eólicos de Dinamarca. Los monopilotes alcanzan su límite de profundidad cuando la flexibilidad de la estructura comienza a ser incompatible con las vibraciones producidas por la acción combinada de la frecuencia del rotor y el régimen de las olas en la zona.

Por su parte, los cimientos de gravedad no experimentan los problemas de vibraciones y flexibilidad de los monopilotes, pero son significativamente más caros conforme aumenta la profundidad; el empleo de cemento puede abaratar el diseño, pero aún así se requiere un análisis muy detallado de las características y una extensiva preparación del lecho marino. También han sido probados ampliamente en parques de Dinamarca.

Los cubos de vacío (suction buckets) no constituyen todavía una tecnología muy extendida, si bien en el año 2014 las empresas Dong Energy y Carbon Trust Offshore Wind Accelerator diseñaron un sistema que ha sido

instalado en el proyecto alemán Borkum Riffgrund 1, que también podría definirse como un híbrido entre cubo de vacío, trípode y *jacket* (11), que se puede ver en la foto superior.

## Aguas (zona) de transición

Podríamos definirlas como el rango de profundidades donde no valen las soluciones simples derivadas de la tecnología *onshore*, pero que tampoco requieren investigar en soluciones flotantes. Son frecuentes en el mar del Norte aerogeneradores de cinco megavatios fondeados a profundidades superiores a los 40 metros. En la zona de transi-





ción se utilizan sistemas que son comunes a las instalaciones actuales de extracción de gas y petróleo (imagen inferior).

- Trípode.
- Monopilote atirantado.
- *Jacket* tubular (hasta el buje).
- Jacket y torre.
- Mezcla de plataforma de succión y de gravedad.

Aquí los trípodes y los *jackets* van a ser cada vez más la solución preferida, incluso en aguas poco profundas. El *jacket* fue instalado por primera vez por Talisman Energy en 2006, en el proyecto Beatrice Wind Farm, en el que se utilizaron dos aerogeneradores a una profundidad de 45 metros. Posteriormente se empleó junto con bases de trípode en el proyecto Alpha Ventus (Borkum, Alemania). Finalizado en 2009, probó seis fondeos con *jackets* y seis con trípode.

<sup>(11)</sup> http://www.futurenergyweb.es/pdf/articulos/2015-06/FuturEnergy-Junio15\_17-22.pdf.

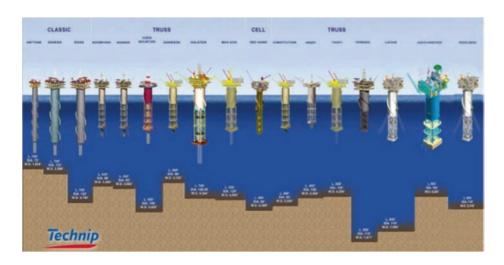
# Instalación en aguas profundas



Para este caso, el futuro inmediato nos augura soluciones basadas en aerogeneradores flotantes que proporcionarán libertad a la hora de situarlos, permitirán su producción a escala y servirán de base a cualquier nuevo desarrollo de generador que se pueda producir. En todo caso, la tecnología de fondeo y sujeción de aerogeneradores se beneficiará de la ya desarrollada en las industrias del gas y

el petróleo, como se puede ver en la imagen superior (12).

Las plataformas estabilizadas por lastre (SPAR) llevan un lastre en la parte baja de la boya que proporciona un momento adrizante y una alta resistencia inicial al balance y la cabezada. Es la forma más simple de todas las plataformas flotantes; pero, dado que el centro de gravedad de la parte del aerogenerador estará muy alto, será necesario que la estructura sea de grandes dimensiones para mantener bajo el del conjunto. Pueden estar fijas al fondo

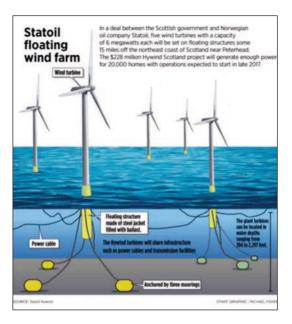


 $<sup>(12)\</sup> http://www.gii.udc.es/img/gii/files/Tipologias\_Soportes\_Aerogeneradores-Ferreno\_Castro\_Diaz\_Fraguela.pdf.$ 

mediante catenaria, anclas de arrastre o por líneas tensionadas. Han tenido gran desarrollo gracias a la industria del petróleo y el gas (13). En la figura de la página anterior se pueden ver diversos diseños SPAR de la compañía Technip.

Por su parte, las plataformas estabilizadas mediante líneas de amarre (TLP) logran la estabilidad mediante la tensión producida por los amarres. En el apartado siguiente se describe el TLP desde el punto de vista de sistema de amarre y fondeo.

En el caso de las plataformas estabilizadas por flotabilidad, estas aprovechan la inercia de la flotación para corregir el momento escorante.



corregir el momento escorante. La técnica se puede desarrollar de tres formas:

- Barcaza o boya flotante.
- Estructura semisumergible triflotador: este tipo de flotador apoya la turbina eólica en tres columnas cilíndricas, que a su vez están conectadas a una estructura de trípode mediante vigas de acero.
- Estructura semisumergible de cuádruple flotador: la única diferencia con la anterior es el uso de cuatro columnas cilíndricas flotantes en lugar de tres; el peso relativo flotante será probablemente mayor que en el caso anterior.

En 2016 se comenzó la instalación del mayor parque flotante del mundo (14), el de Hywind, en Escocia, con cinco turbinas flotantes de seis megavatios cada una, que completarán un sistema SPAR con amarre por líneas de catenaria, como vemos en la imagen superior y que explicaremos en el apartado en el que se describen los sistemas de amarre y fondeo.

<sup>(13)</sup> http://www.technip.com/sites/default/files/technip/illustrations/page/spar\_comparison\_graphic\_11-15-12\_0.jpg.

<sup>(14)</sup> http://www.theguardian.com/environment/2015/nov/02/worlds-largest-floating-wind-farm-gets-green-light-in-scotland.

## Sistemas de amarre y fondeo

Se clasifican inicialmente en tres grupos, y cada uno de ellos se puede a su vez subdividir en varias técnicas (15):

- Amarres dispersos (*spread moorings*):
  - Amarre por catenaria: las líneas de amarre forman una catenaria que en el punto de contacto con el fondo toma posición horizontal, de modo que los anclajes únicamente estarán sometidos a esfuerzos horizontales. En el amarre por multicatenaria, las líneas de catenaria incorporan boyas y pesos intermedios, formando configuraciones en forma de *S* o de ola, que reducen la tensión de la línea.
  - Amarre tensionado (*taut spread mooring o tension leg platform*, *TLP*): las líneas de un amarre pueden forman un ángulo respecto al fondo del mar. Tiene la ventaja de la menor huella sobre el fondo marino respecto al de catenaria.

La diferencia fundamental entre un amarre en catenaria y otro tensionado es que en el primer caso la línea llega al punto de anclaje en horizontal, mientras que en el segundo caso lo hace formando un determinado ángulo con el plano del fondo marino. Esto implica que el punto de anclaje en un sistema a base de líneas tensionadas debe ser capaz de resistir tanto esfuerzos horizontales como verticales, mientras que en una catenaria sólo estará sometido a fuerzas horizontales.

# — Amarres a un punto:

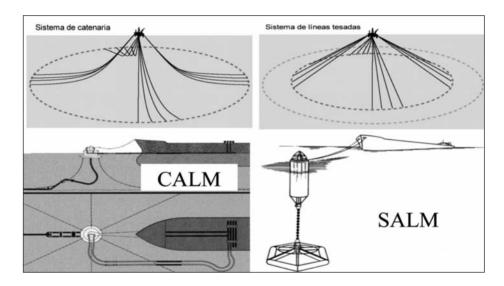
- Amarre por medio de una torre: puede tratarse de una torre externa o interna a la estructura, sujeta al fondo mediante líneas de catenaria. También puede ser un amarre a una torre fija (fixed tower mooring) anclada al fondo.
- Amarre tipo CALM (*catenary anchor leg mooring*): la estructura se amarra a una boya que a su vez se ancla al fondo empleando líneas de catenaria.
- Amarre tipo SALM (single anchor leg mooring): la plataforma se sujeta a una boya, fija a su vez al fondo mediante una línea tensionada

<sup>(15)</sup> FERREÑO GONZÁLEZ, SARA; CASTRO SANTOS, Laura; DÍAZ CASÁS, Vicente, y FRAGUELA MOSCOSO, José Ángel: *op. cit*.

- Amarre tipo ALC (articulated leg column): mediante una columna articulada.
- Amarre a estructura SPAR (*single point mooring and reservoir*): la plataforma se sujeta a una boya SPAR, que a su vez está amarrada al fondo marino mediante líneas de catenaria.

### Posicionamiento dinámico:

- Amarre activo (*active mooring*): por medio de un ordenador y un sistema servo se podrán tensionar o aflojar las líneas de amarre, según sea necesario, para mantener la posición.
- Propulsión: consiste en posicionar la estructura en el mar empleando propulsores controlados por ordenador (16).



# Anclaje al fondo (17)

Un aerogenerador necesita fijación al fondo, sea el tipo de amarre y fondeo que fuere; al final, habrá un punto fijo al fondo marino, que puede ser de distintos tipos:

<sup>(16)</sup> Almazán, J. L.; Palomino, M.ª del Carmen; Paramio, Juan M.; Espinosa, Jesús: *Ingeniería Marítima: Sistemas de Fondeo y Anclaje*. Universidad Politécnica de Madrid. (17) Ídem.

- Peso muerto: es el anclaje más primitivo que existe.
- Ancla convencional: es apto para resistir grandes esfuerzos horizontales, pero no tanto para los verticales.
- Pilote: es un tubo hueco de acero u otro material que se hunde en el lecho marino mediante un martillo perforador o un vibrador. La capacidad de agarre se genera por el rozamiento del terreno a lo largo del pilote y por la resistencia lateral del suelo. Normalmente, para conseguir la resistencia necesaria es preciso clavar el pilote a una gran profundidad.
- Ancla de succión: se trata un tubo hueco, normalmente de acero, similar a un pilote pero de mucho mayor diámetro. El ancla de succión se introduce en el lecho marino mediante una bomba ubicada en la parte superior del tubo que crea un diferencial de presión. Cuando la presión dentro del tubo es menor que la exterior, este es succionado y penetra en el terreno. Al igual que en el caso del pilote, la capacidad de agarre de una ancla de succión se genera por el rozamiento del terreno a lo

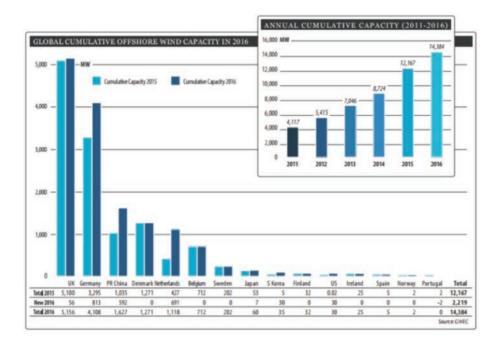
largo del pilote y por la resistencia lateral del suelo.

Ancla de carga vertical: es un método de anclaje análogo en su instalación al ancla convencional, pero que penetra mucho más profundamente en el lecho marino. Tiene dos posiciones, la de instalación y la de carga vertical. Una vez instalado, se cambia al modo de carga vertical y es capaz de soportar tanto las verticales como horizontales.



## Eólica offshore. Situación actual

De acuerdo al Global Wind Report Chapter del Global Wind Energy Council (GWEC) de 2016, cada año se instalan 2.219 MW de energía eólica *offshore*. A pesar de que dicha cifra represente un descenso del 30 por 100 con respecto al año pasado, el futuro parece prometedor.



El mercado de la energía eólica *offshore*, a diferencia de otros sectores de la construcción naval, es mayoritariamente europeo. A finales de 2016 aproximadamente el 88 por 100 de toda la potencia instalada se encontraba en costas europeas y el 12 por 100 restante se repartía entre China, seguido de Japón, Corea del Sur y Estados Unidos.

El Reino Unido es el líder mundial en cuanto a potencia instalada, con un total de 27 parques eólicos y una capacidad de cinco gigavatios. Sus parques más grandes son los de London Array (630 MW), Gwynt-y-Mor en Gales (576) y Greater Gabbard (504).

En 2016 Alemania instaló 156 nuevas turbinas, con una capacidad de 820 MW, situando su capacidad total entorno a los 4.100 MW. Este gran aumento (alrededor del 57 por 100 con respecto a 2015) la consolidó como la segunda potencia mundial de eólica marina.

Por otra parte, Dinamarca planea doblar su capacidad eólica entre 2017 y 2021, con la ambición de abastecer al 50 por 100 del país con dicha energía; y 2016 supuso un año récord para Holanda, que instaló 177 turbinas (691 MW), lo que le convirtió en el segundo mayor mercado en ese año.

En los últimos años, en España, hemos podido ver cómo el tema de la energía eólica marina ha ido sonando con más fuerza, impulsado principalmente por los proyectos desarrollados por Iberdrola y Navantia (Wikinger y

East Anglia One). Sin embargo, pese a que seamos una potencia en eólica terrestre (23.100 MW instalados aproximadamente), parece que no somos capaces de subirnos a la ola, debido principalmente a dos de los conceptos más importantes en cuanto al diseño de una instalación de eólica *offshore*: el recurso eólico y la profundidad de las aguas.

Según el Instituto para la Diversificación y Ahorro de la Energía (IDAE), las zonas con mayor potencial serían: Galicia (40-75 kW/m) y el Cantábrico (30-50 kW/m); valores inferiores a los 75 kW/m presentes en el mar del Norte y el Báltico de media anual.

Pero por encima de esto último, la profundidad de nuestras costas no es la más adecuada, ya que a partir de los 50 metros habría que instalar estructuras flotantes, tecnología aún en desarrollo que supone un alto coste a día de hoy.

En las costas de Portugal, la eléctrica EDP, junto con otras compañías, creó en 2008 la empresa Principle Power, cuyo fin es el desarrollo de proyectos de eólica *offshore*.

Por tanto España, de la mano de empresas como Iberdrola, Windar, Acciona o Navantia, tendría que invertir en el desarrollo de nuevas tecnologías flotantes (como estructuras trípode o SPAR) que le permitieran incrementar la capacidad total de energía *offshore* y al mismo tiempo situarse como un referente en la construcción de eólica *offshore*.

