

# Energía eólica, marina y flotante



Iberdrola  
[www.iberdrola.com](http://www.iberdrola.com)

La fuerza del viento es más potente en el océano que en tierra, de ahí el desarrollo de la eólica marina en los últimos años. Hasta hace poco tiempo, al basarse en estructuras fijas, no podían instalarse en lugares muy profundos o con fondos marinos complejos, algo que ha cambiado con la aparición de las estructuras flotantes. Ahora, los aerogeneradores se pueden instalar sobre estas plataformas que se anclan al fondo marino mediante fondeos flexibles, cadenas o cables de acero.

El principal reto de la humanidad en la actualidad es alcanzar un planeta verde y sostenible. Para lograrlo, las energías renovables jugarán un papel fundamental y el esfuerzo por innovar en el sector es especialmente intenso. Los avances invitan al optimismo y, en este artículo, pondremos el foco en uno de ellos: la energía eólica marina flotante, una de las derivadas con mayor proyección.

## Qué es la energía eólica marina flotante

En primer lugar, definamos qué es la energía eólica marina: es aquella fuente de energía limpia y renovable que se obtiene al aprovechar la fuerza del viento que se produce en alta mar, donde esta alcanza una velocidad mayor y más constante debido a la inexistencia de barreras. Su elevado potencial y valor añadido estratégico, tanto a nivel socioeconómico como medioambiental, la sitúan como una de las fuentes renovables llamada a jugar un papel crucial en el proceso de descarbonización.

---

*La eólica marina flotante, basada en estructuras flotantes en vez de fijas, ofrece nuevas oportunidades y alternativas.*

---

La eólica marina flotante, basada en estructuras flotantes en vez de fijas, ofrece nuevas oportuni-



dades y alternativas. Básicamente, abre la puerta a emplazamientos más alejados de la costa porque permite el despliegue de aerogeneradores en áreas marinas más extensas y profundas con un potencial mayor de viento. Así, esta modalidad salva un escollo de cara a ofrecer energía limpia, inagotable y no contaminante para un planeta más sostenible.

---

*Entre las ventajas de la eólica marina flotante están el potencialmente bajo impacto medioambiental y las facilidades de fabricación e instalación.*

---

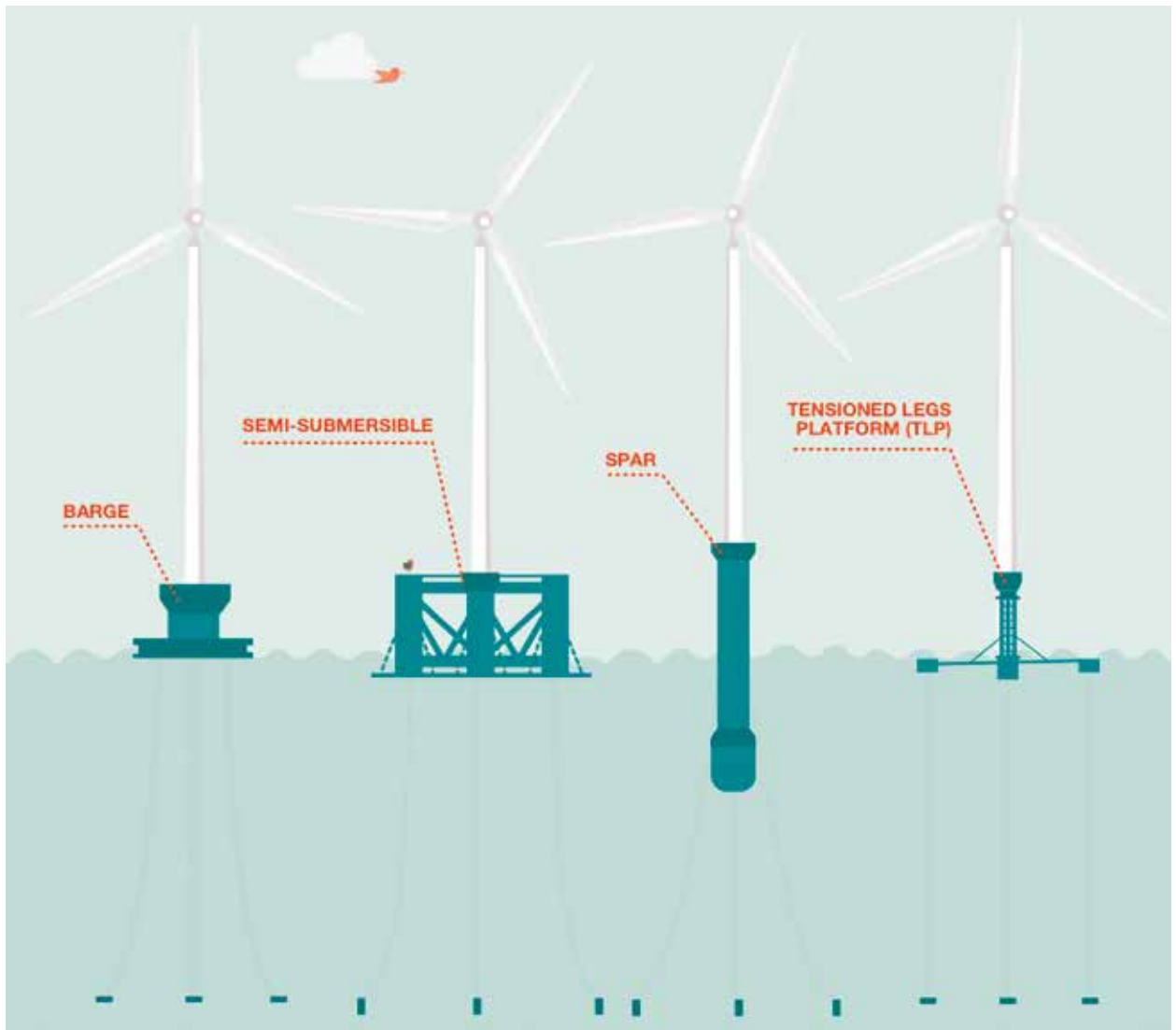
Entre las ventajas de la eólica marina flotante están el potencialmente bajo impacto medioambiental y las facilidades de fabricación e instalación, ya que las turbinas y plataformas flotantes se pueden construir y ensamblar en tierra para luego ser remolcadas hasta el lugar de instalación en alta mar. Además, como ya se ha apuntado, permiten aprovechar los fuertes vientos que soplan en las zonas más profundas, lo que mejora el rendimiento energético.

### Cómo funciona la energía eólica marina flotante

Para saber cómo funciona la energía eólica marina flotante, debemos responder antes a la siguiente pregunta: ¿por qué flotan los aerogeneradores en el mar siendo estructuras de 120 metros de alto y miles de toneladas de peso? La solución la dio Arquímedes hace 2.300 años: "Un cuerpo total o parcialmente sumergido en el agua experimenta un empuje vertical hacia arriba igual al peso del agua desalojada".

Una plataforma flotante (FOWP, por sus siglas en inglés) es la subestructura de hormigón, de acero o híbrida sobre la que se instala el aerogenerador y le proporciona flotabilidad y estabilidad. Hay quien la denomina "cimentación flotante", término que no es correcto porque las plataformas flotantes no se cimientan en el fondo marino, sino que se fondean y anclan.

Los parques flotantes están formados por aerogeneradores que se colocan sobre estructuras flotantes y se estabilizan gracias a los fondeos y anclas, y a la manera en que el diseño de la estructura reparte las masas y los pesos. A partir de ahí, el proceso es el habitual: la fuerza del viento hace girar las palas y el aerogenerador convierte



Diferentes tipos de plataformas flotantes para aerogeneradores: Barcaza, Semisumergible, Spar, TLP.  
Fuente: Iberdrola

la energía cinética en electricidad, la cual se transporta por cables submarinos hasta una sub-estación marina, y de ahí a una terrestre situada en la costa para, finalmente, llegar a las casas a través del tendido eléctrico.

---

*Los parques flotantes están formados por aerogeneradores que se colocan sobre estructuras flotantes y se estabilizan gracias a los fondeos y anclas, y a la manera en que el diseño de la estructura reparte las masas y los pesos.*

---

Además de flotar, los aerogeneradores deben producir la mayor cantidad de energía posible y para ello es fundamental que se mantengan estables, minimizando cualquier tipo de movimiento y asegurando un funcionamiento en condiciones óptimas. Aquí entran en juego los diferentes tipos de plataformas flotantes para aerogeneradores, que repasaremos a continuación.

## Tipos de plataformas flotantes para aerogeneradores

La energía eólica marina flotante se basa en las plataformas flotantes para aerogeneradores. La elección de un tipo u otro dependerá de las condiciones del mar y los fondos marinos, los vientos de la zona, el tamaño del aerogenerador, la profundidad de los puertos, las instalaciones de fabricación o la disponibilidad y precio de los materiales y equipos. A continuación, describimos algunos de ellos.

- » *Barge* ('barcaza' en español). El concepto es parecido al de un barco en lo que se refiere a dimensiones. Es decir, el tamaño de manga y eslora (largo y ancho) es sensiblemente mayor al del calado (altura). La plataforma flotante presenta mucha superficie de contacto con el agua, que es precisamente lo que le da estabilidad. Al igual que los barcos, están hechos para moverse y evitar sobreesfuerzos y tensiones en la estructura. Para minimizar esos movimientos, la plataforma suele dotarse de placas de arfado (*heave plates*), que son unas superficies que se sitúan debajo de la línea de flotación.
- » *Semi-submersible* ('semisumergible' en español). Este diseño busca minimizar la superficie expuesta al agua, pero siempre maximizando el volumen, que es el que realmente desplaza la masa de agua y aporta flotabilidad. Geométricamente, lo ideal sería una esfera (máximo volumen con la menor superficie), pero una esfera no es práctica de fabricar, por lo que se dividen los volúmenes que otorgan flotabilidad en varios cilindros (o paralelepípedos) verticales que se unen mediante vigas y tirantes para crear una superficie donde instalar la turbina. Su estabilidad viene dada por su tamaño y la distancia entre ellos.
- » *Spar*. En este modelo se coloca la mayor parte del peso en el punto más bajo posible para dar estabilidad. Por ejemplo, si tiramos al agua un cilindro hueco y estanco, flotará en caso de que la ratio de la altura entre la superficie de la base sea suficiente para que el volumen de agua desalojada compense su peso. Si el cilindro es homogéneo, no será estable flotando verticalmente y se volteará hasta flotar horizontalmente. Para evitar esto, se dota al cilindro de mucha masa en el extremo opuesto de donde se instala la turbina para mantener la verticalidad. En resumen, la flotabilidad se la da la geometría del cilindro, mientras que la estabilidad se la da el peso en el punto más bajo. Como las turbinas son cada vez más grandes, obliga a cilindros muy largos para compensar los pesos, lo que hace esta solución muy difícil de fabricar, transportar e instalar.
- » Plataforma de piernas tensionadas (TLP, por sus siglas en inglés). El concepto más novedoso y, actualmente, de mayor riesgo técnico: la plataforma realmente no flota como tal una vez que la turbina se ha instalado sobre ella. El objetivo es reducir al máximo las dimensiones para bajar el costo de fabricación. La geometría en estrella de tres, cuatro o cinco brazos reduce al mínimo los volúmenes de cada brazo para que la plataforma flote sin carga, es decir, sin el aerogenerador instalado. Antes de instalarlo, para evitar que el conjunto se dé la vuelta cuando sube el centro de gravedad del conjunto, sobre la plataforma TLP se acoplan flotadores temporales y reutilizables, lo que a su vez permite su remolque hasta el sitio de fondeo en alta mar. Una vez que llega allí, se conectan cables de acero tensionados o tendones y se

desconectan los flotadores temporales para que sean reutilizados en la siguiente plataforma TLP que se vaya a instalar.

### ¿Por qué se hacen parques eólicos flotantes?

La velocidad del viento y su frecuencia es más alta y estable en el mar que en tierra, pues no hay obstáculos que limiten su recorrido (concepto conocido como *fetch*). Además, al situarse lejos de la costa se minimiza el impacto visual. Otra razón es que la mayor parte del trabajo de fabricación y montaje se puede hacer en puerto, remolcando después la unidad al emplazamiento mar adentro. Así se evita el uso de los barcos de instalación necesarios para las cimentaciones fijas, como los de Jack-up o los de posicionamiento dinámico (embarcaciones muy caras y escasas que condicionan los tiempos y costos de instalación de estas cimentaciones). La instalación de las plataformas flotantes, por el contrario, requiere principalmente de barcos remolcadores y cableros relativamente frecuentes y más baratos que los anteriores.

---

*La velocidad del viento y su frecuencia es más alta y estable en el mar que en tierra, pues no hay obstáculos que limiten su recorrido.*

---

### ¿A qué profundidad se pueden instalar los aerogeneradores flotantes?

Generalmente, se asume que los parques flotantes se instalarán a aquellas profundidades a las que las cimentaciones fijas no lleguen por motivos técnicos o económicos. No obstante, la profundidad frontera entre parques fijos y flotantes se está difuminando. Se están estudiando nuevas configuraciones que permitan instalar plataformas flotantes en aguas relativamente someras, concretamente, en aquellos emplazamientos

donde las condiciones del fondo marino supongan un riesgo para la instalación de las fijas. Actualmente, es técnicamente factible instalar plataformas flotantes entre 60 y 300 metros, existiendo estudios en desarrollo para aumentar ese rango a aguas más someras, hasta 30 metros, o más profundas, hasta 800 metros, aunque no es económicamente viable en la actualidad.

---

*Actualmente, es técnicamente factible instalar plataformas flotantes entre 60 y 300 metros, existiendo estudios en desarrollo para aumentar ese rango a aguas más someras,*

---

### ¿Qué diferencias hay entre una plataforma flotante eólica y una plataforma flotante petrolífera?

Antes de los diseños de plataformas flotantes para aerogeneradores, el sector del petróleo ya había usado plataformas flotantes para sus instalaciones de extracción, y muchos de los conceptos se han traspasado de un sector a otro. No obstante, los diseños no son directamente extrapolables. Las principales diferencias son:

- » que las cargas en una plataforma flotante eólica son principalmente dinámicas debidas al aerogenerador, mientras que en una plataforma flotante petrolífera los equipos instalados transmiten cargas principalmente estáticas;
- » que un pozo petrolero en el mar concentra la producción en una única unidad, por lo que el diseño puede ser conservador y redundante, mientras que en una eólica marina la generación de energía está distribuida en decenas de unidades, por lo que el diseño debe ser más eficiente para que los costos sean asumibles.



## ¿Cómo se exporta la energía de un parque eólico marino?

Los parques eólicos evacúan la energía producida desde su centro de transformación mediante una línea eléctrica hasta una subestación de distribución, que es la que la lleva hasta el usuario final. Si el parque eólico marino se sitúa cerca de la costa, puede evacuar la electricidad mediante un cable de exportación directamente a una subestación en tierra. En cambio, si se sitúan a gran distancia de la costa, se necesita una subestación marina (flotante o cimentada) que eleve el voltaje de la potencia generada por las turbinas (generalmente, de 66 a 220 kV) y permita enviarlo a una subestación terrestre desde la que se distribuye.

## ¿Cuáles son los movimientos de una plataforma flotante?

Los nombres de los movimientos están heredados de la nomenclatura de la ingeniería naval:

- » Movimientos lineales en la horizontal: avance (*surge*) y deriva (*sway*). El aerogenerador no siempre está en la misma posición, sino que dependiendo de la flexibilidad de los fondeos y de la profundidad del mar, puede moverse entre 20 o 50 metros alrededor de un punto central.
- » Movimiento en la vertical: arfada (*heave*). Es importante minimizar este movimiento mediante el diseño de la plataforma flotante, pues afecta la posición del buje (punto central del rotor de la turbina eólica) y la velocidad del viento está directamente relacionada con la altura.
- » Movimientos angulares: balanceo (*roll*), guiñada (*yaw*) y cabeceo (*pitch*). Estos movimientos hay que minimizarlos para evitar las aceleraciones al nivel de la turbina, que está a más de 120 metros de altura. Un desplazamiento angular pequeño al nivel de la plataforma flotante, por ejemplo, se traduce en un movimiento lineal grande en el punto más alto de la estructura que, si no se controla, puede dañar y reducir la vida útil de los elementos mecánicos situados en la góndola (*nacelle*), que es el habitáculo del tamaño de un edificio de tres plantas donde se colocan los equipos electromecánicos responsables de transformar la velocidad del viento en energía eléctrica.

## ¿Qué es el fondeo (*mooring*)?

El fondeo es el elemento que fija y conecta de manera flexible la plataforma flotante con el punto de anclaje en el fondo marino. Suele estar constituido por cadenas, cables de acero o cables de materiales sintéticos. La elección de un tipo de fondeo u otro depende de la profundidad, del tipo de plataforma flotante y de las condiciones meteoceánicas (oleajes, corrientes, vientos):

- » En catenaria. Es la forma que adopta el fondeo o cable cuando no está tensionado y el principal factor que le da forma es su propio peso, y es la más frecuente. En este caso, los fondeos no se tensionan más allá de la carga que supone su propio peso. Dependiendo de la profundidad del agua, de las restricciones de los movimientos de la plataforma y de los materiales, se pueden añadir flotadores y pesos a los fondeos para modificar la forma de la catenaria y que adopten configuraciones en "S" o similares (*lazy-wave*).
- » Fondeos tensionados (*taut mooring*). Cuando un fondeo en catenaria se tensiona mecánicamente, se busca reducir la huella del fondeo (superficie del fondo marino afectada) y la longitud de cable o cadena usada, y aumentar las restricciones de movimiento de la plataforma flotante.
- » TLP. Los fondeos de las TLP son tendones que funcionan de manera distinta a las catenarias tensionadas. Son indicados para grandes profundidades por el ahorro de material que suponen.

## ¿Qué son los sistemas de anclaje y qué tipos hay?

Las anclas son los elementos que conectan los fondeos con el lecho marino. Los empleados en eólica marina flotante pueden ser los siguientes y dependen de las características del fondo marino y de las cargas:

- » Anclas de arrastre (*dragging anchors*). Similares a las usadas por los barcos. Este sistema soporta la tensión en una dirección (con un cierto ángulo de tolerancia).
- » Anclas de succión (*suction buckets*). Estructuras de acero (suelen ser cilíndricas) abiertas en su extremo inferior que se apoyan en el lecho marino sobre las que ejerce succión para crear diferencia de presión (vacío) y provocar su anclaje. Necesitan fondos marinos de texturas equilibradas (arenosos o francoarenosos) para funcionar correctamente y no son adecuados para fondos rocosos o de granulometría gruesa. En las que predomina la dimensión vertical suelen llamarse "pilotes de succión" (*suction piles*) y las de geometría cuadrada se denominan "cajones de succión" (*suction caissons*).
- » Pilotes hincados o perforados (*driven or drilled piles*). Son las mismas estructuras usadas en las cimentaciones fijas para asentar la subestructura al fondo marino. Generalmente, son cilindros huecos de metal de grandes dimensiones que se hincan (martillean) al fondo marino (en el caso de suelos rocosos o duros es necesario taladrar para instalarlos). Estos pilotes necesitan de barcos especiales para su instalación, durante la que se produce ruido y sedimentos en suspensión. Por este motivo, en los proyectos de eólica flotante su uso se reducirá a aquellas localizaciones con condiciones que hagan imposible el uso de otras alternativas.
- » Muertos o anclas de gravedad. Son estructuras masivas de hormigón superpuestas en el lecho marino. Suelen tener una huella muy grande en el fondo marino, por lo que se prefiere limitar su uso a situaciones muy concretas y así minimizar el impacto. ■■

Fuente. El artículo aquí reproducido fue originalmente publicado en: [https://www.iberdrola.com/innovacion/eolica-marina-flotante?utm\\_campaign=nwl020222&utm\\_medium=email&utm\\_source=acoustic](https://www.iberdrola.com/innovacion/eolica-marina-flotante?utm_campaign=nwl020222&utm_medium=email&utm_source=acoustic)