

# EL APROVECHAMIENTO DE LAS ENERGÍAS RENOVABLES MARINAS COMO OPCIÓN TECNOLÓGICA DE FUTURO

**LUIS RAMÓN NUÑEZ RIVAS**

Fundación INNOVAMAR  
Universidad Politécnica de Madrid

El objeto de este artículo es mostrar la situación actual de explotación de las distintas fuentes energéticas que los mares y océanos ofrecen, así como su próxima evolución. Y para ello es necesario definir cuáles son esas fuentes, qué estimación de potencial existe en el presente para cada una de ellas, cuál es el actual grado de desarrollo tecnológico que permite

su explotación y, por último, plantear en un horizonte de 20 años, décadas 2010-2020 y 2020-2030, la evolución de estas tecnologías y lo que representa, en cuanto a demanda de artefactos, sistemas y equipos, el aprovechamiento de las mismas. Ésta obligatoriamente deberá ser satisfecha por los actores intervinientes en esta nueva área de negocio de ingente desarrollo económico en un futuro inmediato: Industria, Centros de Investigación y Centros Tecnológicos.

El artículo está estructurado en dos bloques. El primero, dedicado a la descripción de estas fuentes energéticas marinas y la situación tecnológica presente que permite su aprovechamiento. Y el segundo se centra en el análisis de la estructura de la cadena de valor propia de la Industria de las energías marinas y sus expectativas de evolución futura a corto y medio plazo.

Por último, el artículo tiene, como apartado final, uno dedicado a establecer las oportunas conclusiones que de su contenido se dimanen.

## LAS FUENTES ENERGETICAS RENOVABLES MARINAS †

El origen de estas fuentes está constituido por el carácter de inmenso colector de energía solar constituido por

el conjunto de mares y océanos. Éstos, ocupando alrededor del 70% de la superficie del planeta y almacenando sobre  $1.550 \cdot 10^9$  millones de  $m^3$ , son la mayor reserva energética existente en la tierra y además de carácter renovable y suponen un potencial mundial de producción de energía eléctrica anual, estimado en 120.000 TWh (Agencia Internacional de la Energía), aunque al día de hoy la explotación de este ingente potencial se encuentra muy poco desarrollada.

Estas fuentes energéticas que mares y océanos ofrecen a consecuencia de la transformación en su seno de la energía solar que captan sus aguas, se identifican del modo siguiente:

- ✓ Energía de los vientos, denominada eólica, tanto en la versión *Offshore* como en la *Inshore*.
- ✓ Energía de las corrientes marinas, tanto inerciales como mareales.
- ✓ Energía de las olas, denominada unidimotriz.
- ✓ Energía mareomotriz.
- ✓ Energía del gradiente térmico oceánico, denominada OTEC
- ✓ Energía del gradiente salino.

A continuación, y en sucesivos apartados independientes para cada una de las fuentes anteriores se exponen sus características y el grado de desarrollo tecnológico que permite su aprovechamiento. Puede decirse que, en general, ese aprovechamiento consiste en obtener energía eléctrica que posteriormente será introducida, para su transporte y distribución, en los Sistemas Eléctricos de Potencia de las distintas naciones que optan por explotar el recurso que esas fuentes renovables marinas constituyen.

### Energía eólica *offshore*

Sabido es que las grandes corrientes de aire que recorren la Tierra tienen su origen en la conversión de energía solar en eólica, que se produce en el gigantesco convertidor energético que constituyen mares y océanos.

Esta inmensa fuente energética de carácter renovable es, al día de hoy y en tierra, la que posee una mayor capacidad de aprovechamiento después de la hidráulica, existiendo a nivel mundial un parque de instalaciones para su aprovechamiento que, a 31 de diciembre de 2010, alcanzó los 197.105 MW de potencia.

Europa tenía, a 31 de diciembre de 2011, instalaciones eólicas por un total de 93.957 MW y este potencial cubrió el 6,3% del consumo eléctrico de la Unión Europea en ese año. A lo largo del mismo, el 21,4% de la potencia instalada en el conjunto de naciones que integran la UE fue eólica, destacando el gran impulso que, en cuanto a instalaciones marinas (eólica *offshore*), fue realizado por el Reino Unido.

España, a 31 de diciembre de 2011, disponía de 21.673 MW de potencia instalada ocupando el cuarto lugar mundial, después de China, EEUU y Alemania y a pesar de que las condiciones eólicas fueron, en 2011, peores que en 2010, la energía eólica cubrió el 15,75% del total de la demanda eléctrica española correspondiente a dicho año.

El potencial que la Energía Eólica tiene a nivel mundial no está cuantificado, aunque hay estimaciones que valoran este en  $300 \cdot 10^{12}$  MW, de los cuales  $225 \cdot 10^{12}$  MW se encuentran en mares y océanos, lo que para poder aprovechar una gran parte de ese potencial obliga a desarrollar ampliamente los parques eólicos *offshore*, que hasta el presente se ha hecho mínimamente, ya que en la actualidad solo existen en el mundo un total de 2.396 MW instalados en parques *offshore*, todos en Europa, siendo el Reino Unido, que ya tenía a 31 de diciembre del pasado año, 1.341 MW, el primero del mundo y Dinamarca, con 853,7 MW a esa misma fecha, el segundo. Las previsiones de crecimiento de estos parques en un futuro próximo son muy optimistas, pues a finales de 2011, además de los 2,4 GW instalados, ya existían parques en construcción con una potencia total de 6 GW y estaba autorizada la construcción de nuevos parques con una potencia total de otros 6 GW, previniéndose desarrollos futuros por

un total de 114 GW mas; sólo el Reino Unido tendrá 40 MW instalados a final del 2015.

Una clara muestra de esta voluntad, mayoritariamente británica, que en Europa existe por el aprovechamiento eólico *offshore* queda reflejada en el hecho de que a lo largo del año 2011, se han instalado en aguas europeas un total de 868 MW y 753,4 MW (87%) en aguas británicas; el resto, 108 MW se han instalado en aguas alemanas y 3,6 MW en aguas danesas. El total de turbogeneradores *offshore* instalados alcanza la cifra de 235 y el total de capital invertido en estas instalaciones fue de 2.400 millones de euros.

En España aun no existe ningún parque *offshore* instalado, aunque con la promulgación del R.D. 1028/2007 de 20 de Julio quedo establecido el marco regulatorio para poder llevar a cabo este tipo de instalaciones en el litoral español y, dado que el tiempo estimado para que desde el inicio del proceso mediante los estudios preliminares hasta que el parque entre en operación es de seis años, es previsible que el primer parque español vea la luz en el año 2017 y puedan finalmente estar instalados en el 2020 los 750 MW previstos en el Plan de Acción Nacional de Energías Renovables (PANER).

El primer parque eólico marino se instalo en 1991 en la costa báltica danesa, como una prolongación de los parques terrestres y está localizado en una zona abrigada y de profundidad inferior a los cinco metros. Está formado por 11 aerogeneradores Bonus (hoy SIEMENS) de 450 Kw de potencia unitaria y con un coste por Kw instalado de unos 2.200 Euros.

Y en 2002, también en aguas danesas, se instalo el que aun es el mayor parque *offshore* del mundo, el de Horns Rev, que posee una potencia instalada de 160 Mw repartida entre 80 aerogeneradores Vestas de 2 Mw de potencia unitaria y cuyo coste ascendió a 1.700 euros por Kw instalado.

Los vientos aumentan en potencia y regularidad cuanto mayor es la distancia de la costa. Por ello, las nuevas instalaciones que se construyen y proyectan requieren aerogeneradores mayores y de entre 3 y 5 Mw de potencia unitaria que tienen rotores por encima de 100 m de diámetro y torres que alcanzan los 120 m de altura sobre el nivel del mar. Es necesario diseñar nuevos sistemas de fondeo, pues con los que hoy existen no es posible llevar a cabo instalaciones en aguas de más de 50 m de profundidad, aun utilizando cimentaciones de tipo celosía de tres o de cuatro patas, llamadas jacket tripod o cuatripod.

Hasta el día de hoy, el único proyecto de estas características es el Beatrice Wind Farm Project, que está ya en fase de explotación y consta de 2 aerogeneradores con una potencia unitaria de 5 MW que se sitúan a 25 Km de la costa y en aguas del Mar del Norte sobre 45 metros de profundidad. La energía que se genera es utilizada en una plataforma de obtención de crudo y el coste alcanza los 9.000 dólares USA por Kw instalado.

Los otros sistemas de cimentación existentes son: el monopilote, forma más utilizada en aguas de hasta los 25 metros de profundidad, y la base de gravedad útil hasta profundidades de 5 metros, aunque hoy en día poco usada.

Por tanto será necesario, para poder aprovechar grandes cantidades de energía eólica con parques marinos, realizar instalaciones en aguas profundas y alejadas de la costa, lo que obliga a diseñar nuevos sistemas de cimentación, de modo que esta sea flotante y actúe semisumergida.

Estos nuevos sistemas, que ahora están en fase de estudio y diseño, utilizarán estructuras flotantes que combinen el lastrado con el fondeo mediante amarres. Uno de estos proyectos, basado en el concepto SPAR, ya está en la fase de pruebas de un prototipo a escala real. Instalado en el mar a lo largo del año 2010, está siendo desarrollado por un consorcio europeo liderado por la empresa noruega Statoil Hydro con un presupuesto total de 400 millones de coronas noruegas.

El otro proyecto con grado de desarrollo más avanzado está liderado por EDP y dispone de un prototipo constituido por una estructura semisumergible basada en tres grandes pontonas unidas mediante tubos conformando una estructura que se fondea mediante seis líneas catenarias y que sustenta un aerogenerador con turbina Vestas V80 de 2 MW. Está situado en aguas portuguesas, en la zona de Aquadoura, para un periodo de prueba en el mar durante 12 meses. Toda esta estructura ha sido construida en el dique seco de la empresa LISNAVE, en su Astillero de Setúbal, dique de características muy semejantes al del astillero de Navantia de Puerto Real.

Otro de los problemas que plantean estos parques marinos es la carestía de la instalación de las líneas de interconexión entre generadores y la de evacuación de la energía a tierra. Para disminuir las pérdidas energéticas que el transporte submarino supone, se estima la posibilidad de realizar dicho transporte en corriente continua a muy alto voltaje (HVDC).

La Asociación Europea de Energía Eólica estima que, para el año 2020, existirán en Europa 40 GW *offshore* instalados que producirán 148 TWh al año, sobre el 4% del total de la demanda de electricidad en la UE, se evitarán la emisión de 87 millones de toneladas de CO<sub>2</sub> al año. Entre 2020 y 2030 es de esperar que la potencia *offshore* instalada se incremente en 110 GW mas, alcanzando una cifra total de 150 GW, los cuales podrán producir 562 TWh al año, lo que representará el 14% de la demanda de electricidad en la UE correspondiente al año 2030, lo que contribuiría en esa fecha a evitar la emisión de 315 millones de toneladas de CO<sub>2</sub>.

Todo este previsible desarrollo supondrá para Europa un mercado lleno de oportunidades de negocio, que permitirá desarrollar y potenciar distintos sectores industriales, en particular el de la construcción naval, y que demandará nuevos empleos que se estiman en

169.000 hasta el 2020 y que pueden alcanzar la cifra de 300.000 en el 2030, siendo además muchos de estos nuevos empleos de alta cualificación.

Ante esta oportunidad de relanzamiento industrial que la eólica *offshore* supone es de esperar el que los gobiernos europeos definan nuevas y eficaces políticas de apoyo a la inversión en nuevos desarrollos tecnológicos y a la instalación de nuevos parques de generación, debiendo asimismo definirse con claridad los objetivos que, con carácter vinculante, la eólica *offshore* debe alcanzar en la UE en las próximas décadas.

### Energía de las corrientes marinas

El potencial mundial de la energía de las corrientes marinas no ha sido cuantificado, aunque hay estimaciones que a día de hoy, y sobre la base de la tecnología existente se supone que la potencia útil de las corrientes marinas, tanto mareales como inerciales, alcanza los 3.000 Twh al año. Si bien es cierto que, a día de hoy, no se plantea el aprovechamiento de las grandes corrientes oceánicas, por su alejamiento de las costas y su situación mayoritariamente fuera de las zonas de aprovechamiento económico exclusivo de los distintos países ribereños y también por la alta complejidad técnica que su explotación conllevaría, el Séptimo Programa Marco de la UE contempla *topics* que conducen al diseño de grandes plataformas *offshore* flotantes para extraer esta energía y transformarla en H<sub>2</sub>, para utilizar posteriormente este combustible como vector energético en tierra mediante su transporte en grandes buques semejantes a los actuales LNG.

Esta fuente tiene una alta predictibilidad ya que tanto las corrientes provocadas por causas inerciales como mareales mantienen sus caudales conocidos y cuasi constantes según la época del año. Además poseen una alta capacidad energética, pues la densidad del agua del mar tiene de promedio el valor de 1.015 Kg/m<sup>3</sup>, lo que se traduce en que una corriente de agua marina que discurre a una velocidad de 2 m/s posee por cada m<sup>2</sup> de área perpendicular a su flujo, la misma energía que una corriente eólica de 18 m/s.

En el momento actual existe una amplia variedad de generadores para el aprovechamiento de esta fuente energética. Todos basan su funcionamiento en ser posicionados en medio del flujo y corresponden a distintos diseños que pueden agruparse en las tres tipologías siguientes:

**Rotores de flujo axial**, cuyo eje es horizontal y en la misma dirección del flujo y que pueden tener una similitud en la forma con los generadores eólicos o con las hélices que propulsan los buques, pudiendo incluso estar situados en el interior de toberas que direccionan y aceleran el flujo de la corriente.

**Rotores de eje vertical**, que reciben el flujo de la corriente en sentido transversal al eje y lo forman con-

juntos de palas verticales que giran sobre ese eje, impulsadas transversalmente por el flujo.

**Alerones que basculan alternativamente**, al ser impulsadas por el flujo, estando la aleta en posición horizontal o en un plano ligeramente inclinado con la dirección de la corriente. Debido a la fuerza de sustentación que la corriente provoca, el alerón oscila en un movimiento vertical que, por medio de una palanca, acciona un servomotor hidráulico que produce energía eléctrica.

En cuanto al sistema que permite su posicionamiento en la corriente, puede ser una estructura apoyada por gravedad en el fondo marino o bien pilotada en el lecho marino, al modo de los grandes generadores de aprovechamiento eólico *offshore* y también estructuras flotantes, que actúan bien a flote o en inmersión y, en todos estos últimos casos debe disponerse el correspondiente sistema de fondeo.

A día de hoy existe un alto número de diseños, si bien la mayoría está en fase conceptual. Sólo son unos 60 los que se encuentran en fase de desarrollo del proyecto y para construir prototipos experimentales de no más de 100 Kw que son sometidos a ensayos en condiciones reales de operación. Son, en cambio, muy pocos los proyectos que han alcanzado un nivel de desarrollo precomercial o integrados en sistemas comerciales de generación.

La mayor parte de estos diseños se ha producido en el Reino Unido, cuyo litoral posee unas condiciones idóneas para albergar estas instalaciones y que presupuesta sustanciales cantidades para la investigación y el desarrollo en tecnologías de aprovechamiento de fuentes renovables marinas. Estas inversiones provienen de los ingresos procedentes del campo petrolífero del Mar del Norte.

A día de hoy, los tres generadores con mayor grado de desarrollo ya que se centran en un prototipo a escala industrial son los siguientes:

**1** El más antiguo de los tres es el denominado Sea Gen, de la empresa Marine Current Turbines. Consiste en dos turbinas axiales y de eje horizontal, abiertas y montadas sobre un soporte que, discurriendo a lo largo de un pilote anclado al fondo, puede emerger fuera del agua para su mantenimiento.

Este proyecto se inició en 1999 y fue instalando en el año 2003 a través de un prototipo experimental denominado SeaFlow de 300 Kw, con un solo rotor de 11 m de diámetro y que descargaba la energía a una carga pasiva. Tuvo un coste de 3,4 millones de libras esterlinas y el rendimiento del sistema alcanzó el 40%.

A partir del año 2004 está en desarrollo la fase de demostración industrial, habiendo sido montado en los Strangford Narrows (Irlanda del Norte) el primer generador comercial en mayo del 2008, ya con dos rotores de 16 m de diámetro. Con un presupuesto de 8,5 mi-

llones de libras esterlinas, está prevista su conexión a la red de tierra en breve. Tiene una potencia de 1,2 MW.

Dado que actualmente la empresa Marine Current Turbines ha sido adquirida por la multinacional alemana Siemens, es de esperar que la nueva propietaria relance la empresa y pueda así continuar avanzando en sus desarrollos.

**2** El segundo generador está siendo desarrollado por la empresa Hammerfest Strom, propiedad de Iberdrola a través de su filial Scottish Power. Tomando como base un prototipo de 300 kW, está desarrollando un generador de 1MW, denominado HS1000, y en marzo de 2011 obtiene los permisos oficiales para la instalación de un parque en Sound of Islay (Escocia), que tendrá 10 generadores fondeados a una profundidad mayor de 48 metros con una potencia total instalada de 10 MW.

Este generador consta de una turbina de tres palas, soportada mediante una estructura compleja fondeada con cajones de gravedad, con unas dimensiones totales de 15 metros de ancho y 22 de largo, y una turbina posicionada a una altura de 22 metros sobre el fondo marino. La turbina dispone de un rotor de 23 metros de diámetro, cuyo funcionamiento permite una altura máxima sobre el fondo del extremo de pala de 33,5 metros, dejando libres 15 metros hasta la superficie. Esta distancia permitirá la navegación por encima del parque, sin que se altere el flujo de las corrientes a la profundidad de operación de la turbina.

**3** Y el tercer proyecto, que está siendo ejecutado por un consorcio liderado por la empresa francesa EDF, consiste en situar un parque de generación en Paimpol-Brehat, localidad de la Bretaña francesa, con una potencia total de 4,5 MW. Utiliza como generador el desarrollado por la empresa irlandesa Open Hydro, que posee una potencia unitaria de 500 kW y está apoyado sobre el fondo mediante una estructura de acero de grandes dimensiones, con un peso de 430 toneladas de acero que sumadas las 70 que pesa la turbina supone un peso total por generador de 500 toneladas. A día de hoy se ha finalizado el periodo de pruebas del prototipo a escala real en el European Marine Energy Centre en Orkney (Escocia).

Merece mención el proyecto español GESMEY que, bajo el patrocinio de SOERMAR y con financiación del programa Nacional de Proyectos de Investigación Aplicada del plan Nacional de I+D+i 2008/2011, tiene por objeto el diseño funcional de un nuevo tipo de generador eléctrico que aprovecha la energía de las corrientes marinas mediante una hélice de tres palas, sumergida y acoplada al generador. Todo ello, soportado por una estructura en Y de tres flotadores en forma de torpedos y con un sistema de fondeo, de modo que pueda trabajar en inmersión a distintas profundidades. El generador emerge y se sumerge hasta la profundidad de operación, que puede

ser superior a los 50 metros, utilizando fuerzas hidrodinámicas producidas mediante la variación del nivel de agua de lastre en los tres flotadores.

La idea de partida es propia del catedrático de la Universidad Politécnica de Madrid, adscrito a su E.T.S. de Ingenieros Navales, Amable López Piñero, y fue patentada por dicha Universidad en el año 2007. SOERMAR ha alcanzado los correspondientes acuerdos para desarrollar este sistema, siendo este proyecto GESMEY una consecuencia práctica de ello.

Actualmente, contando con financiación del Ministerio de Industria, Energía y Turismo, ese ha llevado a cabo la segunda fase del proyecto, consistente en el diseño y construcción de un prototipo de 10 Kw, en la empresa Astilleros Balenciaga S. A., situada en el País Vasco, y que, con excelentes resultados, se ha sometido a distintas pruebas en el mar durante los meses de junio y julio pasados.

### Energía de las olas (UNIDIMOTRIZ) ▾

Las olas de los mares y océanos son un derivado terciario de la energía solar, pues la radiación solar incide sobre la superficie de la Tierra y provoca un calentamiento desigual de la misma, produciendo en la atmósfera zonas con distinta presión, lo que produce desplazamientos de aire de uno a otro lugar; es decir, generando vientos.

Y son estos vientos los que, al desplazarse sobre la superficie del mar, llevan a cabo el rozamiento de las moléculas de aire con el agua, transfiriendo a ésta parte de su energía y generando las olas, que actúan como un acumulador de energía, pues la almacenan y la transportan de un lugar a otro sin apenas pérdidas, lo que da lugar a que la energía de las olas que se produce en cualquier parte del océano acabe en las costas.

La capacidad energética de un frente de ola se mide en densidad de energía por metro de frente y su valor varía de unas localizaciones a otras. Ese potencial depende de la altura de ola y se atenúa con la profundidad del agua como consecuencia del rozamiento de ésta con el fondo.

Esta fuente energética no está cuantificada con exactitud, oscilando la estimación según la fuente entre los 2.000 GW y los 4.000 GW, por lo que, repartiendo estos valores entre los 336.000 Km de costa existentes en el mundo, se obtiene un valor medio de densidad energética de las olas por metro de costa de 8,0 Kw. Esta distribución dista mucho de ser igualitaria ya que hay zonas de costa, como es el caso de Australia o Nueva Zelanda, donde se puede alcanzar los 100 Kw/m frente a otros lugares donde sólo hay 5 Kw/m.

En Europa, este recurso se encuentra mayoritariamente en la Costa Atlántica y oscila entre los 30 Kw/m y los 75 Kw/m según cuál sea la localización. Los litorales es-

pañoles, tanto atlántico como cantábrico y también canario son ricos en este recurso por lo que debe potenciarse la investigación para obtener tecnologías maduras para su aprovechamiento y permitir que esa explotación futura se haga con sistemas y equipos de fabricación mayoritariamente nacional.

Debe ponerse además de manifiesto que, si bien el potencial disponible de la fuente es inmenso, la capacidad tecnológica existente en el presente no permitiría aprovechar más de un 2% del mismo y sin rendimientos razonables.

Si bien la primera patente para aprovechar este tipo de fuente energética fue presentada en 1799, no fue hasta 1970 cuando el número de las mismas aumentó considerablemente, sobrepasando hoy día la cifra de 1.000. A pesar de esta cifra, la realidad es que aún no está instalada explotación industrial alguna para aprovechamiento de este tipo de energía ni puede garantizarse cuál de estas ideas conceptuales logrará alcanzar un grado de madurez suficiente para su utilización en explotaciones industriales del recurso.

Los primeros desarrollos tecnológicos para aprovechar esta fuente de energía y una amplia parte de los que posteriormente han visto la luz se basan en el principio de la columna de agua oscilante (OWC), en la cual es la propia agua, al oscilar arriba y abajo dentro de la columna y por efecto del oleaje, la que impulsa el aire que fluye a través de una turbina reversible que arrastra el generador de energía eléctrica. En España, y localizada en la costa guipuzcoana, está ya en fase de operación una central de este tipo, montada en el nuevo dique exterior del puerto de Motriko, con una potencia de 250 Kw. El proyecto ha sido financiado por el Ente Vasco de la Energía y el Gobierno Vasco con 3,5 millones de Euros. Hay otras dos instalaciones conceptualmente semejantes a nivel de prototipo experimental, una en Escocia y otra en las Azores, si bien esta última sufrió serios desperfectos a causa de un fuerte temporal en 2011.

Un segundo grupo de tecnologías se basa en diseñar embalses fijos en la costa, como es el caso del sistema TAPCHMAN o del generador Seawave Slot-Cone (SSG). En ambos casos, un embalse en el primero o los tres embalses construidos uno encima del otro, en el segundo, se llenan a partir de las olas que rompen sobre ellos y el agua embalsada es devuelta al mar a través de una turbina que arrastra el alternador. En resumen, puede afirmarse que todo el conjunto no es más que una mini central hidroeléctrica.

Otro sistema basado en el mismo principio, se denomina Wave-Dragon consiste en un embalse flotante que embalsa agua mediante el oleaje que rompe frente a su rampa. Esta agua es devuelta al mar atravesando una turbina Kaplan, la cual arrastra al generador de energía eléctrica. Existe un solo prototipo construido, que tiene un peso de 237 toneladas y se encuentra fondeado frente a la costa danesa, produciendo electricidad a nivel experimental.

Un tercer grupo de tecnologías de aprovechamiento de esta fuente energética está constituido por dispositivos flotantes que, mediante el movimiento horizontal del oleaje, actúan como servomotores accionando los generadores eléctricos. Dentro de esta tecnología sobresale el convertidor PELAMIS, conformado por una unión de cilindros flotantes que constituyen una estructura serpenteante y en la que sus nodos de unión actúan como cilindros hidráulicos que impulsan el aceite que acciona los generadores.

En los años anteriores se decidió la instalación, en la costa norte portuguesa, de una central pelamis de 2,25 Mw de potencia, la cual dispone de tres conjuntos de cuatro cilindros; cada conjunto, con 750 Kw de potencia, 700 toneladas de desplazamiento y una eslora total de 150 metros. Estaba previsto que esta central portuguesa aportase energía eléctrica a la red en septiembre de 2008 y su coste se estimó en 4 millones de libras esterlinas. El 23 de septiembre de 2008 se inauguró la primera fase, conectándose a la red eléctrica, pero en marzo de 2009 fue clausurado el proyecto y cerrada la central, por la gran dificultad técnica que suponía su mantenimiento y operación. Bien es cierto que la reciente adquisición de esta empresa por Scottish Power (Iberdrola) puede producir un nuevo relanzamiento de esta tecnología.

Un sistema de cierta similitud ha sido diseñado y está en fase de desarrollo, bajo el nombre de Proyecto OCE-ANTEC. Por un consorcio liderado por Tecnalia y con la participación de Iberdrola, dispone de un presupuesto es de 4,5 millones de euros. El dispositivo consiste en un captador flotante que por el cabeceo que le provocan las olas induce un movimiento a un sistema giróscopo situado en su interior, que a su vez acciona un generador eléctrico. Está montado un prototipo experimental en la costa guipuzcoana.

El cuarto y último grupo tecnológico para el aprovechamiento de la energía de las olas consiste en sistemas flotantes o sumergidos que aprovechan el movimiento vertical de las olas para producir electricidad, bien mediante generadores lineales o impulsando aire en dispositivos neumáticos. Como ejemplo de esta tecnología puede citarse a la boya OPT, desarrollada por la empresa Ocean Power Technologies y que, mediante un consorcio liderado por Iberdrola, se está ejecutando en la costa de Santoña (Cantabria). Un proyecto de parque de generación que estará formado por 10 boyas de 40 Kw de potencia unitaria y de 9 más de 150 Kw cada una. En el momento actual solo está instalada una boya de 40 Kw .

### Energía mareomotriz

La atracción gravitacional que se ejerce sobre las aguas marinas por la luna y, en menor medida por el sol, causa un movimiento de ascenso y descenso de las mismas que se denomina marea. Definiéndose como pleamar el máximo nivel que las aguas alcanzan y como bajamar, el mínimo; siendo esta diferencia de nivel entre pleamar y bajamar el potencial energético de la marea.

Esta diferencia de nivel varía de un lugar a otro del planeta; siendo de pocos centímetros en el mar Mediterráneo y alcanzando alturas de varios metros en determinados lugares de la costa atlántica.

Este potencial que la marea posee puede aprovecharse mediante la construcción de una presa dotada de compuertas que permitan embalsar agua marina hasta la pleamar y establecer una central hidroeléctrica, que turbine el agua retenida a lo largo del periodo de bajamar, produciendo energía eléctrica.

Este tipo de aprovechamiento, que tiene su origen en los primitivos molinos de marea, requiere, para ser rentable, disponer de una diferencia de nivel entre la pleamar y la bajamar de al menos 6 metros.

No hay en el mundo muchas localizaciones costeras con esta característica, y si además se añade la posibilidad de cerrar la ensenada con la construcción de un dique, el número se reduce a no más de 15, entre las que se encuentra la Bahía de Fundy en Canadá, que posee un salto de unos 12 metros, y si se dispone una presa de 8 Km de longitud, nacería una central capaz de producir 11.700 GWh al año.

Esta fuente energética es absolutamente predecible y gestionable, pero tiene un alto coste de instalación y también de mantenimiento, así como un elevado impacto medioambiental, causado tanto por el proceso de su construcción como por la alteración que la bahía cerrada por la presa sufrirá en su hábitat. Razones estas que hacen muy poco probable que se construyan más centrales mareomotrices en el futuro.

En el presente hay solo tres instalaciones de este tipo funcionando y con producciones significativas, siendo la más importante y conocida la situada en el estuario de La Rance, en La Bretaña francesa. Fue inaugurada en 1967, con una potencia instalada de 240 Mw ,constituida por 24 grupos, formado cada uno de ellos por un alternador arrastrado por una turbina bulbo, tipo Kaplan, con una potencia unitaria de 10 Mw y con un alto coste de mantenimiento, pues cada grupo debe ser totalmente renovado cada 10 años. Hay un nuevo intento de construir una central de esta tipología, aunque por ahora sólo a nivel de estudio en la desembocadura del Río Gallegos en la Argentina, donde existe una altura de marea por encima de los 12 metros, habiéndose realizado la licitación del estudio de viabilidad por el Gobierno en 2011.

En España no existen localizaciones que permitan instalar una central de este tipo aunque hay zonas como es la costa onubense y la gallega donde, con una altura de marea de 5 metros podría, plantearse su aprovechamiento a muy pequeña escala y con un mínimo impacto ambiental.

### CONVERSIÓN ENERGÉTICA DEL GRADIENTE TÉRMICO OCEÁNICO. PLANTAS OTEC

Se define con esta denominación a la técnica que permite convertir en energía útil, el gradiente de tempe-

ratura existente en una determinada zona geográfica, que se produce por la diferencia de temperatura entre la del agua de la superficie marina y la que se encuentra en ese mismo lugar a una profundidad del orden de 1.000 metros.

Para conseguir un rendimiento aceptable, se considera necesario que el valor mínimo de ese gradiente alcance los 20° C, lo que limita las posibilidades de localizar emplazamientos idóneos para estos sistemas OTEC, pues se necesita una temperatura mínima del agua en la superficie de 24° C y suficiente profundidad para alcanzar los 1.000 metros, donde es posible encontrar agua marina fría a menos de 5° C.

Esta condición se cumple en zonas geográficas próximas al Ecuador y tanto en el Océano Atlántico como en el Pacífico, lo que incluye a muchas islas y archipiélagos así como a países que se encuentran en vías de desarrollo. El carácter experimental de estas instalaciones no permite establecer el coste medio, éste no es cuantificable a día de hoy, aunque puede estimarse como muy alto; muy por encima del coste de instalación de una central tradicional de combustible fósil, pues fácilmente podría alcanzar los 20.000 dólares USA por Kw de potencia instalada. Aunque esta diferencia puede ser absorbida por el coste del combustible fósil que no se consumiría durante la vida de la instalación OTEC, ya que éste en muchas de estas islas alcanza un 60% más de precio que en los países continentales.

Hay solo dos tecnologías para el aprovechamiento de esta fuente energética, constituidas por una planta de vapor de agua de ciclo abierto o por una planta de vapor de ciclo cerrado, que utiliza un fluido refrigerante como agente para ser vaporizado y mover la turbina que arrastre el generador eléctrico. Tanto en uno como en el otro caso, puede obtenerse agua dulce como un aprovechamiento complementario de la instalación OTEC.

Han sido muchos los proyectos de plantas OTEC que han intentado ver la luz pero con muy poco éxito y logrando rendimientos muy bajos, sobre el 5%. Por ello, en el presente solo existen dos plantas en funcionamiento, ambas con carácter experimental y de 1 MW de potencia unitaria, localizadas una en Hawái y la otra en Japón.

Aun así, si hay diversos proyectos para poner en funcionamiento plantas OTEC de ciclo cerrado, montadas en plataformas flotantes y con una capacidad de generación del orden de 10 Mw y es previsible que, en la década del 2010 al 2019, algunos de estos proyectos vean la luz en islas del trópico asiático o atlántico. Este tipo de artefacto naval puede ser un producto de interés para astilleros de gran tamaño, como los que existen en España de capital público (Navantia), por lo que es un desarrollo tecnológico de interés aunque en el litoral español, islas incluidas, no se den las condiciones de gradiente mínimo necesario para poder instalarlas.

## GRADIENTE SALINO ↓

Se define así a la energía que puede obtenerse a partir de la diferencia de concentración de sal, existente en la zona de desembocadura de un río, entre la del agua marina y la del agua dulce.

Se estima que el potencial existente en el mundo a partir de esta fuente es del orden 1.600 TWh/año; aproximadamente el 50% del consumo de energía eléctrica en la Unión Europea.

El único procedimiento tecnológico existente al día de hoy es el denominado Ósmosis de Presión Retardada (PRO) del cual existe un prototipo desarrollado por la empresa noruega Statkraft, con una potencia de 4 kW instalado en un fiord noruego.

Consiste en mantener agua dulce, separada de la salada por una membrana semipermeable, y de este modo el agua fluye a través de la membrana desde la zona de agua dulce hacia la zona de agua salada, levantándose la presión en esta zona hasta los 24 o 26 Bar, lo que permite transferir esta agua de alta presión a una turbina hidráulica que arrastra un generador de energía eléctrica.

Esta tecnología tiene al día de hoy un mínimo grado de madurez, estando todavía en fase experimental y siendo un elemento crucial la membrana semipermeable lo que puede suponer en el futuro un importante nicho de mercado el desarrollo y la fabricación de este tipo de membranas para empresas dedicadas a equipos de obtención de agua dulce mediante ósmosis inversa, ya que el disponer de membranas eficaces y a precio competitivo es absolutamente crucial para que esta fuente energética pueda ser aprovechada en plantas comerciales.

## EVOLUCIÓN DE LA ESTRUCTURA TECNOLÓGICA A CORTO Y MEDIO PLAZO ↓

Debe decirse en primer lugar que la cadena de valor que se conforma en esta Industria de Aprovechamiento de las Energías Marinas pone de manifiesto que son muchos y muy multidisciplinares los sectores implicados, y como consecuencia, el desarrollo de esta industria tendrá un muy alto efecto dinamizador en la economía sectoriales y en la economía nacional.

Bien es cierto que al día de hoy la única energía marina que tiene presencia a nivel industrial y con unas muy grandes expectativas de crecimiento en los próximos años es la eólica *offshore* y es a ella y a sus necesidades, a la que la industria en general tendrá prioritariamente que atender. Aunque ello no es óbice para que se tenga también puesta la mirada en lo que respecta a las otras fuentes, sobre todo a las corrientes marinas que, sin duda, será la segunda en alcanzar el desarrollo industrial.

En lo referente a la eólica marina, puede decirse que va a transformarse muy rápidamente de lo que es hoy,

una tecnología emergente y todavía muy inmadura, a convertirse en una componente importante del mix energético en la UE. Ello producirá un aumento de la competencia entre los múltiples actores que intervienen en la cadena de valor, propiciándose la aparición de nuevas y significativas empresas, lo que supondrá un incremento de las mismas en todos y cada uno de los nichos de mercado que los eslabones de la ya citada cadena de valor configura.

En esta tecnología, los grandes nichos de mercado, que en el futuro inmediato tendrán un alto desarrollo, son:

■ Desarrollo de turbinas específicas para *offshore* Wind

■ Diseño y fabricación de estructuras para el soporte de esas turbinas, tanto para fijar rígidamente al fondo marino como para estructuras flotantes. En concreto, este eslabón que comprende fabricaciones en acero de alto tonelaje, no requiere altos requerimientos técnicos, lo que supone una excelente oportunidad para diversificar los productos que pueden producir las distintas empresas que en España fabrican calderería pesada y, muy en particular, favorecer a los astilleros, permitiendo dinamizar sus actividades, ya que sus capacidades industriales les hace idóneos para competir ventajosamente en este nuevo mercado.

■ Cables submarinos de transmisión de la energía eléctrica. Este nicho de mercado está, a día de hoy y a nivel mundial, cubierto por muy pocas empresas que son capaces de producir cables de transmisión de alta tensión y además es muy difícil que ese número se incremente, pues la entrada de nuevos actores es muy complicada por la alta barrera que suponen los altos costes de inversión y el largo tiempo que se necesita para poder fabricar estos equipos. Aun así se han hecho significativos avances en cuanto al diseño y fabricación de nuevos cables de evacuación mediante corriente continua de alta tensión (HVDC).

■ Diseño y construcción de nuevos buques específicos para la instalación de estos nuevos parques *offshore* y también para su mantenimiento en explotación, e incluso dentro de unos años para su remoción. Aquí, también los astilleros nacionales pueden tener una importante oportunidad de negocio, sobre todo aquellos con una exitosa experiencia en la construcción de buques de apoyo *offshore* para el sector del petróleo y gas.

Y si nos referimos a los puertos, será necesario definir nuevas características de éstos para que sean eficaces centros logísticos en este negocio, lo que conducirá a adaptar los existentes que reúnan condiciones suficientes de espacio y calado o bien a diseñar nuevos muy específicos. Será, en todo caso, necesario disponer de puertos denominados de movilización, que deben permitir la exportación completa de

las construcciones de *offshore wind* directamente de la fábrica a los parques de generación, lo que supone un muy importante ahorro en el coste de la instalación del parque.

Acto seguido se describirán en síntesis los tipos de estructuras que son y serán necesarias en eólica *offshore* y posteriormente los tipos de buques que esta nueva industria demanda, en ambos casos serán productos que pueden ser fabricados por los astilleros nacionales que deseen participar en este nuevo mercado.

## Tipos de estructuras ▾

Los tipos de estructuras más comúnmente utilizadas son:

**El monopilote**, construido en acero y para ser utilizado hasta en profundidades de 25 metros, es una construcción muy simple y, en consecuencia, relativamente barata, lo que la convierte en la solución preferente, siempre que la profundidad y las condiciones del suelo marino permitan su utilización.

**La estructura de fondeo por gravedad (GBS)** se construyó en hormigón armado en origen y hoy en día son de acero, se construye en factorías terrestres y se transporta hasta la localización, bien a flote o en embarcaciones especiales. Una vez en la posición de destino se lastran hasta logra su apoyo directo sobre el suelo marino. Son cada vez menos utilizadas, aunque tienen un resurgimiento como elemento de fondeo para algunos generadores de corrientes marinas, como es el caso del HS1000 de Hammerfest Strom.

**Las estructuras de celosía** son utilizadas en aquellos casos en los que la profundidad o las características del suelo marino lo requieren, impidiendo el uso del monopilote. Hay dos conceptos básicos, el multipod bien en configuración tripod o en la tripile o en la configuración *jacket* con tres o con cuatro patas. En ambas configuraciones se fijan al suelo marino mediante pilotes de pequeño diámetro y longitud de unos 15 metros, que se incrustan en el suelo marino. Estas estructuras permiten fondear hasta en 50 m de profundidad.

Para profundidades por encima de 50 metros es necesario el diseño y construcción de nuevos conceptos de plataformas oceánicas flotantes, existiendo tres tipos básicos: la SPAR, la TLP y la Jacket semisumergibles, todos susceptibles de ser construidos en astilleros.

## Tipos de buques ▾

Como consecuencia del creciente desarrollo de parques marinos surge la necesidad de disponer de buques idóneos, no solo para el transporte de los equipos que los constituyen sino también con capacidad de realizar diversas operaciones y actividades nece-

sarias e imprescindibles durante el desarrollo, la construcción, la operación y incluso la remoción al fin de su vida útil, de un parque de generación.

En función de las características de la operación requerida será necesario utilizar buques relativamente simples usados habitualmente en otras actividades marinas, en cambio si la complejidad y dificultad de la operación son muy altas, el buque o artefacto que se precisa será uno muy específico y por supuesto caro, tanto en su construcción como en su alquiler, y con un diseño y unas capacidades que le permitan llevar a cabo misiones relativamente sofisticadas durante la instalación y desarrollo del parque de generación.

A continuación se definen los requerimientos más habituales del buque, en función de las operaciones que este debe realizar:

**1] Para el análisis de las características físicas y oceanográficas del lugar elegido,** las funciones que se deben realizar son las propias de llevar a cabo los estudios geofísicos, geológicos y de impacto ambiental. Incluso se debe tener capacidad para llevar a cabo la instalación de torres meteorológicas que permitan evaluar correctamente el recurso.

**2] Para la construcción y la instalación del parque,** es cuando se exigirán las más exigentes y sofisticadas capacidades a los buques, especialmente durante la instalación de la estructura soporte y también de la turbina, lo que requerirá que los buques tengan disposiciones generales particulares que les permitan transportar equipos de alto volumen y peso y su manejo, alta capacidad de izado, alta precisión en el posicionamiento de lo izado, capacidad para poder operar en condiciones de mar relativamente adversas, riesgo técnico controlado en operación y disponibilidad comercial.

**3] Para la operación y el mantenimiento del parque,** se necesita menor capacidad de izado y transporte que en la fase anterior, aunque es necesaria una capacidad de alojamiento para los técnicos y trabajadores que deben realizar el mantenimiento. Se estima que dicha capacidad debe permitir alojar a 12 personas, además de la tripulación.

**4] Para la remoción del parque,** será necesario utilizar buques y artefactos de potencialidad y características muy similares a las que se requieren en la fase de instalación del parque.

Como conclusión de lo antes expuesto se puede afirmar que los buques y artefactos necesarios pertenecerán a los bloques siguientes:

- ✓ Buques o barcas Jack up
- ✓ Buques grúas con patas estabilizadoras
- ✓ Buques con altas capacidades de izado
- ✓ Artefactos semisumergibles con alta capacidad de izado

- ✓ Barcas no propulsadas y dotadas de posicionamiento dinámico (Ejemplo RAMBIZ)

## Puertos

Los puertos son un componente esencial de la cadena de valor de estas nuevas tecnologías que permiten aprovechar las energías renovables marinas. Y será en ellos donde se llevará a cabo la distribución, bien de componentes parciales del generador y generales del parque o incluso de los generadores ya completamente pre montados o con el montaje efectuado en gran parte.

Lo anterior permite clasificar a los puertos, bajo el punto de vista de su idoneidad para actuar en este negocio, en dos grandes grupos: los definidos como Puertos de Fabricación y los denominados de Distribución.

Se entiende por Puerto de Fabricación aquel que dispone de zonas muy próximas hábiles para instalaciones fabriles que le permitan exportar los componentes directamente a los lugares de instalación de los mismos. Pueden ser desde componentes individuales a componentes ya integrados y incluso con un alto grado de premontaje.

Se entiende por Puerto de Distribución aquel que es base logística para la distribución de los componentes del generador (turbinas, estructuras y otros) o los propios del parque de generación, recibéndolos en su *interland* y desde él trasladados las zonas de montaje en el mar, bien premontados y mediante transporte de buques especiales o mediante buques Feeder a los distintos lugares donde serán integrados en el conjunto que configura el generador.

Una vez establecida esta clasificación, procede definir cuáles deben ser las características básicas que un puerto debe tener para ser actor preferente dentro de este nuevo mercado que las energías renovables marinas crean.

El puerto debe disponer de unas dimensiones idóneas en cuanto a calado mínimo, anchura de los canales de acceso, superficie mínima de explanada, longitud mínima de muelles de atraque y capacidad mínima de izado. Todo con el fin de poder admitir tanto grandes estructuras de soporte de los generadores como los buques especiales que se necesitan para su transporte.

Además, la zona de muelles debe tener un firme capaz de resistir la compresión que sobre el mismo ejercerán los distintos componentes estructurales que, tanto los generadores eólicos *offshore* como los que aprovechan las corrientes marinas y también las olas, necesitan por su alto peso y volumen.

En general, para los parámetros antes citados se piensa en disponer de muelles de atraque con longitudes mínimas de 300 m, llegando incluso al kilómetro, para así permitir el atraque simultáneo de más de un buque.

Estos muelles deben poder resistir cargas por compresión hasta los 20 t/m<sup>2</sup> y un calado mínimo de 12 m.

En cuanto a superficie de explanada disponible se estiman necesidades mínimas de 25 hectáreas para así poder realizar no sólo el depósito de componentes sino también premontajea complejos con alto peso y volumen. También se requiere disponer en estas zonas y en muelles de medios de izado con alta capacidad, pudiendo llegar a 1.000 toneladas por grúa o en combinación de dos.

En cuanto a los canales de acceso, éstos han de permitir el transporte de generadores ya montados de 6 MW de potencia, lo que supone rotores de hasta los 200 metros de diámetro.

Es preciso también que el puerto sea operativo las 24 horas y que pueda disponer también de helipuerto para combinar el transporte de operarios y técnicos hasta el parque en construcción.

## CONCLUSIONES †

En España no existen localizaciones que permitan instalar una central mareomotriz.

■ Hay diversos proyectos para poner en funcionamiento plantas OTEC de ciclo cerrado, montadas en plataformas flotantes y con una capacidad de generación del orden de 10 MW y es previsible que en la década de 2010 a 2019, algunos de estos proyectos vean la luz en islas del trópico asiático o atlántico. Este tipo de artefacto naval puede ser un producto de interés para astilleros de gran tamaño como los que existen en España de capital público (Navantia), por lo que es un desarrollo tecnológico de interés, aunque en el litoral

español, islas incluidas, no se den las condiciones de gradiente mínimo necesario para poder instalarlas.

■ La tecnología para obtención de energía por gradiente salino tiene, a día de hoy, un mínimo grado de madurez, estando todavía en fase experimental. Su elemento crucial es la membrana semipermeable, cuyo desarrollo puede suponer en el futuro un importante nicho de mercado para empresas dedicadas a equipos de obtención de agua dulce mediante ósmosis inversa, ya que disponer de membranas eficaces y a precio competitivo es absolutamente crucial para que esta fuente energética pueda ser aprovechada en plantas comerciales.

■ Ante la oportunidad de relanzamiento industrial que la eólica *offshore* supone, es de esperar que los gobiernos europeos definan nuevas y eficaces políticas de apoyo a la inversión en nuevos desarrollos tecnológicos y a la instalación de nuevos parques de generación. También han de definirse con claridad los objetivos que, con carácter vinculante la eólica *offshore*, debe alcanzar en la UE en las próximas décadas.

En el presente no existe ninguna tecnología que pueda considerarse suficientemente eficaz para permitir una instalación industrial de energía unidimotriz y dados los resultados obtenidos a nivel experimental con los distintos sistemas hasta el día de hoy en desarrollo, no es de esperar que se obtenga suficiente madurez en estas tecnologías para ver instalaciones de aprovechamiento de esta energía a nivel industrial en las dos próximas décadas.

■ Aunque en España el recurso de las corrientes marinas no es muy abundante, si lo es en otras partes del mundo y la industria española y en particular la de construcción naval puede tener en la construcción de estos artefactos una buena oportunidad de negocio.