



19(4)

Propuesta de clasificación del potencial de las corrientes, mareas y oleaje para su posible aprovechamiento energético



González, M., Liria, P., Amate, J., Domínguez, J., Uyarra, M. C., 2012. Propuesta de clasificación del potencial de las corrientes, mareas y oleaje para su posible aprovechamiento energético. *Revista de Investigación Marina*, AZTI-Tecnalia, 19(4): 83 - 91

La serie '*Revista de Investigación Marina*', editada por la Unidad de Investigación Marina de Tecnalia, cuenta con el siguiente Comité Editorial:

Editor: Dr. Ángel Borja

Adjunta al Editor: Dña. Mercedes Fernández Monge e Irantzu Zubiaur (coordinación de las publicaciones)

Comité Editorial: Dr. Lorenzo Motos
Dr. Adolfo Uriarte
Dr. Michael Collins
Dr. Javier Franco
D. Julien Mader
Dña. Marina Santurtun
D. Victoriano Valencia
Dr. Xabier Irigoien
Dra. Arantza Murillas
Dr. Josu Santiago

La '*Revista de Investigación Marina*' de Tecnalia edita y publica investigaciones y datos originales resultado de la Unidad de Investigación Marina de Tecnalia. Las propuestas de publicación deben ser enviadas al siguiente correo electrónico aborja@azti.es. Un comité de selección revisará las propuestas y sugerirá los cambios pertinentes antes de su aceptación definitiva.



Edición: 1.^a Junio 2012

© AZTI-Tecnalia

ISSN: 1988-818X

Unidad de Investigación Marina

Internet: www.azti.es

Edita: Unidad de Investigación Marina de Tecnalia

Herrera Kaia, Portualdea

20010 Pasaia

Foto portada: Iñigo Onandia (vista aérea del barco *Leporre Anaiak*, de Bermeo) © AZTI-Tecnalia.

Propuesta de clasificación del potencial de las corrientes, mareas y oleaje para su posible aprovechamiento energético

Manuel González^{a,*}, Pedro Liria^a, Juan Amate^b, Jaime Domínguez^b y María C. Uyarra^a

Abstract

Based on a detailed analysis of the regional and global variability ranges in the existing estimates of the theoretical potential of marine energy, a simple classification for the energy potential of currents, tides and waves is proposed. In the classification of the energy potential of currents, only “high potential” sites (i.e. peak currents $> 2.5 \text{ m.s}^{-1}$) and “very high potential” sites (i.e. peak current $> 4 \text{ m.s}^{-1}$) are considered, taking into account the existing technology, as suitable sites for the installation of turbines and capture of energy. Regarding the energy potential of tides, only potential energy (*versus* kinetic) is considered; the classification of tides follows the classical oceanographic classification (i.e. microtidal, low mesotidal, high mesotidal, low macrotidal and high macrotidal), with the macrotidal range (i.e. tidal range $> 5.5 \text{ m}$) being suitable for energy production. The classification of the energy potential of waves is based on an energy criteria; the annual average wave power flux. Based on this criteria most of the Spanish Mediterranean coast would be classified as having “low potential” (i.e. $< 5 \text{ kW.m}^{-1}$), the Canary Islands and the Gulf of Cadiz as having “medium potential” (i.e. between 5 and 15 kW.m^{-1}) and the Cantabrian and Galician coast as being “high potential” sites (i.e. between 15 and 45 kW.m^{-1}). Other sites with annual average wave power flux higher than 45 kW.m^{-1} , (e.g., Australia, South Africa, Ireland, etc.), would be classified as “very high potential” sites.

Resumen

Partiendo del análisis detallado de los rangos de variabilidad regional y mundial en las estimaciones existentes del potencial energético marino teórico, se propone una sencilla clasificación del potencial energético de las corrientes, mareas y oleaje. En la clasificación del potencial energético de las corrientes, sólo lugares con “potencial alto” (corrientes máximas superiores a $2,5 \text{ m.s}^{-1}$) y “potencial muy alto” (corrientes máximas superiores a 4 m.s^{-1}) serían considerados, teniendo en cuenta la tecnología actual, como adecuados para el emplazamiento de captadores y obtención de energía. En el caso del potencial energético de las mareas, se considera solamente el aprovechamiento de la energía potencial (*versus* la cinética). El criterio de clasificación de las mareas se hace a partir de la clasificación oceanográfica clásica (esto es, micromareal, mesomareal baja, mesomareal alta, macromareal baja, y macromareal alta), y los aprovechamientos factibles energéticamente se situarían en el rango macromareal (carrera de marea $> 5,5 \text{ m}$). La clasificación del potencial energético del oleaje se basa en un criterio energético: el flujo de energía medio anual incidente. Según este criterio, la mayor parte de la costa mediterránea española quedaría enmarcada dentro de un “potencial bajo” ($< 5 \text{ kW.m}^{-1}$), Canarias y el golfo de Cádiz tendrían un “potencial medio” (entre 5 y 15 kW.m^{-1}) y la costa cantábrica y gallega se situarían en un rango de “potencial alto” (entre 15 y 45 kW.m^{-1}). Otros lugares con potenciales de oleaje superiores a 45 kW.m^{-1} , (Australia, Sudáfrica, Irlanda, etc.), serían considerados como áreas de “potencial muy alto”.

Descriptor: energía marina, potencial, clasificación, olas, mareas, corrientes

^a AZTI-Tecnalia; Marine Research Division; Herrera Kaia s/n 20110;
Fax: +34 946572555; Tel: +34 943004800

* Corresponding author: mgonzalez@pas.azti.es

^b Iberdrola. Ingeniería y Construcción. Av. Manoteras 20 - Edificio D - 6ª planta, 28050-Madrid. Tel: +34 917 132 555

Introduction

La disponibilidad de una oferta abundante y segura de diferentes tipos de energía constituye una de las prioridades estratégicas de las sociedades desarrolladas. La infraestructura energética actual, responsable de importantes emisiones de CO₂, dificulta y encarece el cumplimiento de los objetivos de lucha contra el cambio climático y, al tener aún una larga vida útil, los compromete gravemente. Se estima que cuatro quintas partes de las emisiones totales procedentes de la producción energética para 2035 corresponden a las infraestructuras existentes (IEA, 2011).

Al mismo tiempo, en los países en desarrollo, 1.500 millones de personas no disponen de electricidad y más de 3.000 millones de personas dependen de la biomasa tradicional para cocinar y como calefacción. El año 2012 ha sido declarado por Naciones Unidas “Año Internacional de la Energía Sostenible para Todos” con el objetivo de asegurar el acceso a la energía para todos y proteger el medio ambiente mediante el uso sostenible de los recursos energéticos tradicionales, tecnologías menos contaminantes y nuevas fuentes de energía (Declaración de la Asamblea General de las Naciones Unidas de 16 de febrero de 2011).

Las energías marinas son una fuente energética libre de CO₂ que pueden contribuir a globalizar el acceso a la electricidad. Frente a un consumo mundial anual de 16.000 TWh se estima que, anualmente en el mundo, la energía del oleaje incidente sobre las costas se sitúa entre 8.000 y 80.000 TWh y la energía de las corrientes mareales alcanza 800 TWh (Soerensen y Weinstein, 2008).

Además de la irregular distribución geográfica en el mundo del recurso energético marino, el nivel de desarrollo de los sistemas de captación, salvo el aprovechamiento del salto hidráulico de la marea, se encuentra en un nivel casi conceptual o de prototipo (Centre for Renewable Energy Sources, 2006, Khan et al., 2009, Thersher, 2010).

Actualmente, desde el punto de vista de la producción comercial, la contribución de las energías marinas es meramente anecdótica, salvo la producción de la central mareomotriz de La Rance, Bretaña, Francia (Figura 1) con 240 MW de potencia instalada, aproximadamente la mitad que Santa María de Garoña, la central nuclear española de menor producción hoy en día en funcionamiento. La potencia instalada de energía de las olas se estima en 10 MW; 0,2 MW la de origen termal; 1 MW la de las corrientes marinas y 265 MW de aprovechamiento de la energía potencial de la marea (Soerensen y Weinstein, 2008).

Con el objetivo de fomentar el sector energético marino se han llevado a cabo diferentes esfuerzos de planificación y elaboración de estrategias políticas de desarrollo con un horizonte de 20 a 30 años. Por ejemplo, para EEUU, en cuanto a corrientes, olas y energía termal, se establece un escenario de investigación y desarrollo basado en la generación de nuevos conceptos y testado de prototipos, con resultado de pequeñas instalaciones de funcionamiento comercial (de 5 a 50 MW) entre 2015 y 2020 e instalaciones de producción superior a 100 MW no antes de 2020 (Thersher, 2010).

El desarrollo de esta industria energética es previsible que constituya un foco de atención para otras líneas de investigación

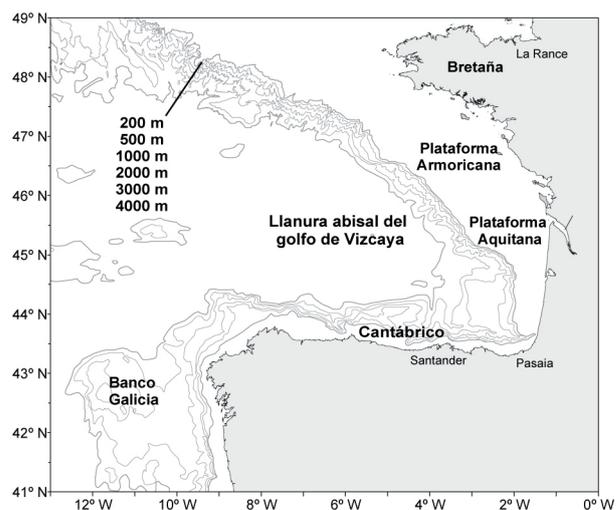


Figura 1. Batimetría del golfo de Vizcaya.

(UKERC, 2008, UKERC, 2010), entre otros: gestión medioambiental (elección de emplazamientos, evaluación de impactos medioambientales, planificación espacial marina y litoral, etc.; Galparsoro et al., 2012), oceanografía (monitorización, caracterización de recurso, previsión de producción, condiciones de operatividad, etc.), ingeniería naval (obras y cables submarinos, fondeos, anclajes, sistemas flotantes, etc.), e industria eléctrica (conexiones, red terrestre, operación y mantenimiento, etc.).

En España, la energía inyectada en la red en 1990 se situaba en 140 TWh, aumentando sostenidamente hasta duplicarse en 2007, mostrando una estabilización en 2008 y una disminución en 2009 asociada a la actividad económica (Red Eléctrica de España, 2010). No obstante, según la IEA en su informe del año 2011, a pesar de las incertidumbres económicas mundiales a corto plazo, el panorama energético a largo plazo apenas se ve alterado. Globalmente, se prevé un fuerte incremento hasta 2035 cubierto en buena parte por el incremento de las energías renovables no hidráulicas, esperándose que su contribución a la generación eléctrica pase del 3% en 2009 a un 15% en 2035 (IEA, 2011).

Durante 2011 la mayor aportación a los 255 TWh demandados en España fue la de las centrales nucleares con un 21%, un 18,8% de centrales de ciclo combinado, un 15,8% de la eólica y un 15,5% de centrales de carbón. Las energías renovables (eólica, hidráulica, térmica renovable y solar) cubrieron en 2010 el 36% de las necesidades energéticas españolas y el 33% en 2011, explicándose este descenso por la disminución de la aportación hidroeléctrica, fuertemente relacionada con las condiciones hidrometeorológicas (http://sociedad.elpais.com/sociedad/2012/01/06/actualidad/1325862639_036203.html) y que para paliarlo, se hizo necesario recurrir a otras fuentes de energía que aumentan las emisiones de CO₂.

Una alternativa para suavizar las oscilaciones de producción de las fuentes renovables es diversificar los aprovechamientos, aumentando la potencia bruta instalada, sobre todo acudiendo a aquellos recursos que puedan aportar mayor producción de forma

previsible con menor variabilidad estacional e interanual. Por ejemplo, la potencia bruta instalada en España de energía hidráulica en octubre de 2011 representaba el 19% del total, mientras que en ese mes su contribución a la generación fue del 6% (Red Eléctrica de España, 2011). En este sentido, las corrientes de la marea astronómica constituirían una posibilidad muy atractiva, si bien dicho recurso en España es escaso.

Este estudio tiene como objetivo establecer unos criterios de clasificación del potencial energético de las corrientes, mareas y oleaje, de acuerdo a los rangos de variabilidad obtenidos a escala regional y mundial, para identificar zonas adecuadas, mostrándose su aplicación al litoral español.

Potencial energético de las mareas

El desnivel producido por la marea astronómica ha sido desde la Edad Media empleado en diversos emplazamientos de la costa atlántica europea como fuerza motriz de molinos de cereal y sal. La distribución de estos molinos estaba limitada por la existencia de, al menos, 2 m de marea y casi todos ellos se encontraban en áreas protegidas del oleaje y, especialmente, en estuarios (Bald et al., 2010).

Desde el punto de vista oceanográfico, la marea astronómica se clasifica en función de la importancia relativa de los constituyentes diurnos respecto a los semidiurnos mediante factor de forma de la marea, F (Pugh, 1987):

$$F = \frac{H_{K1} + H_{O1}}{H_{M2} + H_{S2}} \quad (1)$$

donde M2 es la onda semidiurna lunar principal, S2 la semidiurna solar principal, K1 la lunisolar declinación diurna, O1 la lunar declinación diurna y siendo H la amplitud asociada a cada constituyente.

Valores de F entre 0 y 0,25 corresponden a mareas semidiurnas, entre 0,25 y 1,5 a marea mixta principalmente semidiurna, entre 1,5 y 3 a marea mixta principalmente diurna y valores superiores a 3 a marea diurna.

Desde el punto de vista de la amplitud de la oscilación de la superficie libre del mar (clasificación oceanográfica clásica), se distingue entre marea micromareal, con una carrera de marea media inferior a 1 m, mesomareal entre 1 y 3,5 m y macromareal por encima de 3,5 m (Hayes, 1979)

Por otro lado, la energía potencial bruta contenida en una bahía de área S , llenada en situación de pleamar y que se descarga en bajar puede estimarse como (Pugh, 1987):

$$S \int_0^{2H} \rho g z dz \quad (2)$$

siendo H la amplitud total de la marea, z la profundidad, ρ la densidad del agua y g la aceleración de la gravedad, entonces se obtiene:

$$S \int_0^{2H} \rho g z dz = 2S\rho g H^2 \quad (3)$$

Siendo T_{marea} el período de la marea, la potencia (P) en vatios es:

$$P = 4S\rho g H^2 / T_{marea} \quad (4)$$

Para un valor típico de la densidad (1027 kg.m^{-3}); $g = 9,81 \text{ m.s}^{-2}$, un período de la marea semidiurna (aproximadamente 44.700 s, 12,42 h de la semidiurna lunar principal M2), la superficie S en km^2 y la amplitud de la marea en metros, se obtiene una potencia en MW:

$$P \approx 0,90 \cdot S \cdot H^2 \quad (5)$$

En el caso de una marea diurna, de período cercano a 24 h, se obtiene:

$$P \approx 0,47 \cdot S \cdot H^2 \quad (6)$$

Por lo tanto, la potencia máxima que se puede obtener del aprovechamiento de la marea en un estuario depende de forma lineal de su área, del cuadrado de la amplitud de la marea e inversamente de su período.

En un estuario de pequeñas dimensiones como el de Pasaia de, aproximadamente, 1 km^2 (Figura 1 y Figura 2), en el que el intermareal es prácticamente inexistente (Rivas y Cendrero, 1992), de marea semidiurna con una carrera media ($2H$) del orden de 3 m (Iribar e Ibáñez, 1979) se obtendría una potencia de 2 MW. En el caso de la bahía de Santander (Figura 1), con una marea muy similar a la de Pasaia pero, con un área de unos 22 km^2 , la estima de potencia es de 40 MW.

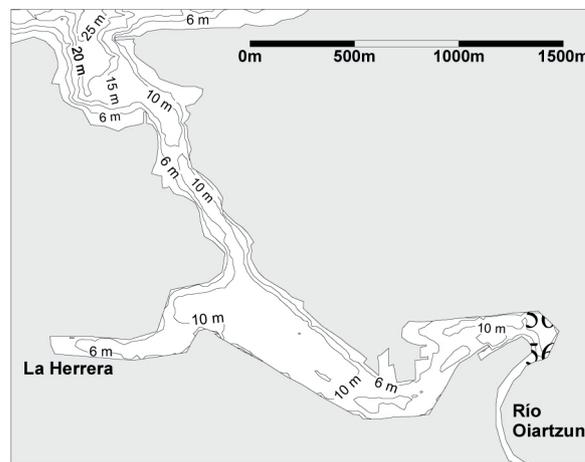


Figura 2. Morfología y batimetría del puerto de Pasaia.

Estos valores son muy inferiores a los de los emplazamientos del mundo con mayor potencial de generación de energía

mediante diques de marea. Destacan, por sus grandes dimensiones, el estuario del Severn en Gran Bretaña con un potencial de 1.680 MW, San José en Argentina con 5.870 MW, y conceptos más atrevidos como el aprovechamiento de la marea en el mar Blanco (noroeste de Rusia) que, para producir 14.400 MW, requeriría el cierre de una cuenca de 2.000 km² (Rourke et al., 2010a).

Potencial energético de las corrientes

Se puede establecer una completa analogía en el cálculo del potencial energético de las corrientes con el potencial eólico (Güney y Kaygusuz, 2010). Para calcular la potencia de las corrientes se debe considerar el flujo másico (M) que viene dado por la siguiente expresión:

$$M = \rho AV \quad (7)$$

siendo ρ la densidad del agua, V la velocidad de la corriente y A el área por donde pasa el agua.

Entonces, la potencia (en vatios) está dada por la siguiente expresión:

$$P = \frac{1}{2} \rho AV^3 \quad (8)$$

Por tanto, la potencia bruta depende del cubo de la velocidad de la corriente. La variabilidad de la densidad del agua del mar es mucho menor que la de las corrientes, por tanto se puede considerar que el único factor relevante para la estima del potencial de las corrientes es su velocidad.

Las corrientes más intensas son, en general, debidas al efecto del viento y de la marea. El viento es un factor fundamental en la generación de corrientes, sobre todo de las superficiales. Se estima que, en latitudes medias, la corriente superficial es entre un 2% y un 5% de la velocidad del viento (Pond y Pickard, 1983) tomándose como valor típico el 3%. De este modo, a una velocidad del viento notablemente elevada, de unos 100 km.h⁻¹, que en general se produce muy pocas horas al año, le corresponde un valor de la corriente de 0,6 a 1,4 m.s⁻¹, de hecho corrientes superiores a 1 m.s⁻¹ se pueden considerar como muy infrecuentes (Bald et al., 2010).

Las corrientes de marea en la costa cantábrica española son, en general, débiles, inferiores a 0,15 m.s⁻¹ (Le Cann, 1990). Sobre la amplia plataforma Armorica (Figura 1) las corrientes de marea son más intensas (0,30 m.s⁻¹), con corrientes máximas que pueden superar 0,50 m.s⁻¹ en las inmediaciones de algunas islas (Puillat et al., 2004). En la costa de Bretaña, se han observado corrientes de marea, ligadas a la geometría del litoral, con velocidades máximas de 1,5 a 4 m.s⁻¹ (Le Cann, 1982, Le Duff y Hily, 1999).

En el ámbito de la península Ibérica, cabe mencionar como zona de corrientes notables el estrecho de Gibraltar. Si bien a ambos lados del Estrecho las amplitudes de marea se encuentran dentro del rango mesomareal bajo (del lado atlántico) o micromareal (del

lado mediterráneo), se han registrado corrientes de marea fuertes, especialmente en la entrada occidental del Estrecho (Bryden y Kinder, 1986). En la zona de Barbate (Cádiz) se ha medido semiejes mayores de la elipse de marea de la componente M2 de 1,20 m.s⁻¹; 0,45 m.s⁻¹ para la S2 y 0,27 m.s⁻¹ para la K1 (Rico Palma y Ruiz Cañavate, 1988).

El estrecho de Messina (entre la península Itálica y Sicilia) es una zona de fuertes corrientes, de dimensiones muy reducidas (unos 20 km de longitud, una anchura mínima de 3 km y profundidad en torno a 70 m), ampliamente estudiada y en la que se han observado corrientes mareales del orden de 3 m.s⁻¹ (e.g. Androsov, et al., 2002).

Otras áreas con elevado potencial de las corrientes de marea son el océano Ártico, el canal de la Mancha, mar de Irlanda, Skagerrak-Kattegat, Bósforo, islas Hébridias, golfos de México y St. Lawrence, bahía de Fundy, río de La Plata, entre otros (Charlier, R.H, 2003). Corrientes de origen mareal importantes (de 1 a 2,5 m.s⁻¹) han sido descritas en estuarios de Indonesia (Mandang y Yanagi, 2008) y canales entre islas en la zona de Borneo a partir de datos de satélite. Entre islas del archipiélago de Filipinas se han reportado corrientes cercanas a 5 m.s⁻¹ (Peña, N., y Mariño, A., 2009). Estos recursos energéticos marinos podrían ser una alternativa para el suministro local, especialmente en lugares en los que la red eléctrica es inexistente.

Los sistemas de captación de la energía cinética de las corrientes se encuentran en este momento en una fase de generación de conceptos y experimentación mediante turbinas horizontales y verticales (Khan et al., 2009), con aprovechamientos óptimos entre 2 y 4 m.s⁻¹ (Güney y Kaygusuz, 2010).

En Noruega (Grabbe et al., 2009) se ha efectuado una estima del potencial energético de las corrientes de marea mediante modelado numérico, distinguiendo emplazamientos con corrientes máximas de marea superiores a 3 m.s⁻¹, entre 2 y 3 m.s⁻¹ y con corrientes entre 1 y 2 m.s⁻¹, localizándose 104 emplazamientos potencialmente adecuados con un recurso total estimado de 17 TWh. La viabilidad económica de la tecnología actual de captación de energía de las corrientes se sitúa en el umbral de 2 m.s⁻¹ (Rourke et al., 2010b), valor en el cual su densidad energética es comparable a la de la solar o la eólica (Fraenkel, 2002).

Con los datos diezminutales de 2010 de corrientes en la columna de agua y de viento, medidos en una estación situada en la bocana del puerto de Pasaia (extremo sudeste del golfo de Vizcaya), sobre una profundidad de unos 22 m (Fontán et al., 2011) se ha efectuado una comparación de la potencia eólica y de las corrientes.

Con (8) se ha calculado la densidad de potencia instantánea (por unidad de área, en kW.m⁻²) de los registros de corrientes de Pasaia desde superficie hasta el fondo y con ello la potencia media sobre la columna de agua. Además, con los datos de viento, se ha calculado la densidad de potencia eólica empleando la misma formulación (8) pero, con la densidad y velocidad del viento (Figura 3). Puede observarse que la densidad energética de las corrientes en la zona es un orden de magnitud inferior a la del viento.

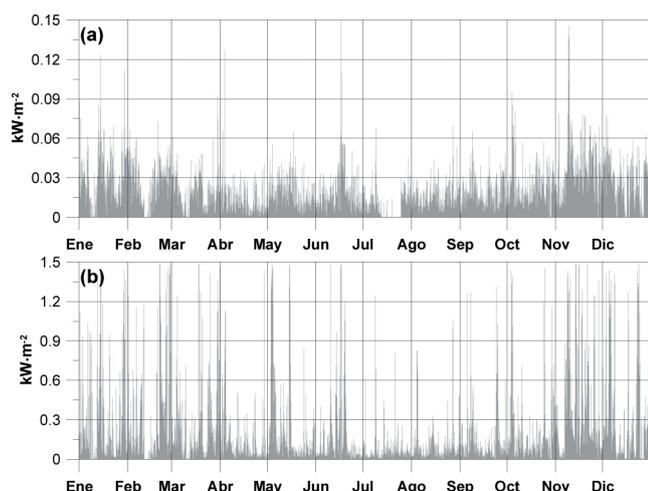


Figura 3. Densidad de potencia en la estación de Pasaia durante el año 2010. (a) En las corrientes marinas; (b) en el viento.

Potencial energético del oleaje

El oleaje es una alteración de la superficie del mar causada por el viento. El oleaje que observamos es una superposición de perturbaciones de la superficie marina de diferente amplitud, dirección y período. Desde este punto de vista, es un proceso cuya medida requiere una alta frecuencia de registro de la superficie libre y que, matemáticamente, puede ser descrito mediante el análisis de Fourier o espectral.

Los estudios de oleaje, tal como los entendemos hoy en día, nacieron durante la Segunda Guerra Mundial con la finalidad de hacer previsión para el desembarco aliado en Normandía. Una breve reseña sobre el desarrollo de las descripciones espectrales del oleaje desde los años 50 hasta los 70 (espectros de Pierson-Moskowitz, Jonswap, Brestchneider, Mitsuyasu, etc.) y su relación con los avances en la medida instrumental y la generación de nuevos métodos de previsión puede consultarse en Losada et al., 1977.

El tipo de espectro más adecuado se elige en función de las características del oleaje de la zona. Para zonas con oleajes muy desarrollados el más idóneo es el Pierson-Moskowitz o Scott, mientras que para oleajes no desarrollados se suele emplear el Jonswap.

Desde la perspectiva que nos ocupa, la forma espectral del oleaje permite estimar el flujo de energía (por metro de frente de ola) que contiene, mediante un descriptor de la altura del oleaje (por ejemplo la altura significativa, H_s y otro de su período, por ejemplo el período significativo T_s).

$$\bar{F} = K \cdot H_{est} \cdot T_{est} \quad (9)$$

El coeficiente K depende del tipo de espectro y de las variables que se empleen para describir la altura y el período. Normalmente se emplea altura significativa, pero se puede emplear período significativo, período de pico o diferentes momentos de la distribución estadística del período.

Para el espectro Jonswap, con la altura y el período significantes K es 0,458; para un espectro Brestshneider-Mitsayasu K es 0,441; etc. En una primera exploración del potencial energético, se puede emplear un valor de 0,5 y recurrir a las tablas de encuentro H_s-T_s (probabilidad de ocurrencia de cada pareja de altura significativa-período del oleaje) que facilitan las redes de medida de oleaje para el litoral español (www.puertos.es).

En la Figura 4 puede verse la estima del flujo medio anual de energía del oleaje en las boyas de la red de medidas del litoral español. Se observan claras diferencias por fachadas marítimas del litoral. Mayor flujo en las zonas atlánticas peninsulares (superior a 20 kW.m⁻¹) que en las mediterráneas (inferior a 5 kW.m⁻¹, en general). En el Mediterráneo destacan las diferencias entre el flujo de energía en la península y las Baleares. Las dos boyas de Baleares, especialmente la de Mahón, y la boya de Begur, muestran la influencia del golfo de León. En Canarias se observa el abrigo de la costa frente a los oleajes de componente norte.

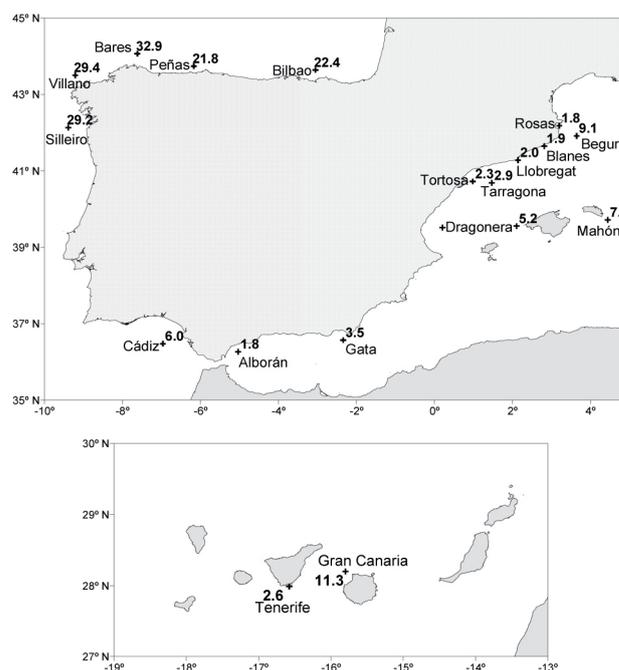


Figura 4. Estimación del flujo de energía en kW.m⁻¹ en las boyas del litoral español.

Para poder comparar las estimas de flujo de energía en el litoral español con otros emplazamientos del mundo se han empleado los datos del atlas de oleaje global KNMI/ERA-40 (Caires et al., 2004) que permite obtener tablas de encuentros (altura significativa-período medio) con una resolución de 9° en latitud y longitud, basadas en el reanálisis atmosférico realizado por el ECTMF (European Centre for Medium Range Weather Forecasts). La serie de KNMI/ERA-40 cubre 45 años (septiembre 1957 - agosto 2002) de estados de mar de 6 h. A partir de las tablas de encuentros en diversas celdas costeras (dada la resolución los datos se pueden suponer de forma general que son datos correspondientes a profundidades indefinidas) se ha calculado el flujo de energía medio. Las estimaciones obtenidas se presentan en la Tabla 1.

Tabla 1. Estimaciones de flujo de energía obtenidas a partir del atlas de oleaje global KNMI/ERA-40 (Caires et al., 2004) en diferentes áreas del mundo.

Zona	Celda	Flujo (kW.m ⁻¹)
Escocia y norte de Irlanda	63°N-54°N 342°-351°	70
Oeste y sudoeste de Irlanda	54°N-45°N 342°-351°	63
Oeste de Galicia y Portugal	45°N-36°N 342°-351°	40
Cantábrico	45°N-36°N 351°-000°	26
Canarias y Marruecos	36°N-27°N 342°-351°	24
Canadá (costa oeste)	54°N-45°N 225°-234°	42
Norte de California	45°N-36°N 225°-234°	40
Sur de California	36°N-27°N 234°-243°	25
Sudáfrica (costa sudoeste)	36°S-45°S 018°-027°	59
Australia (costa sudoeste)	36°S-45°S 162°-171°	72
Nueva Zelanda (sudoeste)	45°S-54°S 162°-171°	72
Tierra de Fuego	45°S-54°S 279°-288°	71
Chile (zona central)	27°S-36°S 279°-288°	33
Perú	09°S-18°S 279°-288°	18
Centroamérica (Pacífico)	18°N-09°N 261°-270°	13
EEUU (costa este)	45°N-36°N 279°-288°	10
Argentina (nordeste)	36°S-45°S 297°-306°	14

Los resultados obtenidos a partir de los datos instrumentales y con los datos del atlas de oleaje global KNMI/ERA-40 en la costa cantábrica muestran una elevada concordancia entre las estimaciones a partir de las medidas y las realizadas mediante modelado numérico, valores entre 22 y 33 kW.m⁻¹ y 26 kW.m⁻¹, respectivamente.

En las islas Canarias las diferencias son más notables, 11 kW.m⁻¹ con medidas y 24 kW.m⁻¹ según KNMI/ERA-40. No obstante, esta discrepancia se debe fundamentalmente a que el atlas global tiene una resolución mucho más amplia (celdas de 9° de lado) y es representativo del clima marítimo de mar abierto, mientras que los datos instrumentales son de una localización geográfica en la que los efectos de abrigo de las islas son muy importantes.

Propuesta de clasificación de los potenciales energéticos

Si bien, el factor más determinante desde el punto de vista del potencial energético bruto de la marea mediante diques en una bahía costera es el área de la misma, desde el punto de vista de recurso por unidad de área se propone una clasificación del potencial de la marea basado en las categorías oceanográficas de las carreras de marea más comúnmente empleadas (Hayes, 1979).

Para ello se calcula el índice I , expresado en W.m⁻², representativo de la energía potencial de la marea semidiurna a partir de la fórmula (5) dividiendo por el área S del estuario, resultando:

$$I = \frac{P}{S} = 0,90 \cdot H^2 \approx H^2 \quad (10)$$

En la Tabla 2 se puede ver la propuesta de clasificación del potencial de marea en cinco niveles en función del índice I .

Tabla 2. Propuesta de clasificación del potencial energético de la marea astronómica para aprovechamientos en costa mediante diques.

Clasificación de potencial	I (W.m ⁻²)	Rango de marea	Carrera de marea 2H (m)
Nulo	< 0,25	Micromareal	< 1
Muy bajo	[0,25 – 1]	Mesomareal baja	[1 - 2]
Bajo	[1 – 3]	Mesomareal alta	[2 - 3,5]
Medio	[3 – 8]	Macromareal baja	[3,5 – 5,5]
Factible	> 8	Macromareal alta	> 5,5

En cuanto a potencial de la marea en el litoral español no hay ninguna zona dentro de la categoría de factible.

En el caso de las corrientes (que incluyen las producidas por la marea) y con el fin de mostrar unas unidades coherentes con la propuesta de índice del potencial de la marea (expresado en densidad energética) se define un índice I a partir de la fórmula (8). Considerando como estimador de la corriente el valor máximo registrado o calculado mediante modelo numérico, empleando un valor de densidad del agua del mar de 1.000 kg.m⁻³ y dividiendo por el área de paso del flujo de agua A , se obtiene:

$$I = \frac{P}{A} \approx 0,5 \cdot \hat{V}^3 \quad (11)$$

En función de las limitaciones tecnológicas, que sitúan la viabilidad técnica de los prototipos entorno a los 2 m.s⁻¹, se realiza la propuesta de clasificación de los potenciales energéticos de las corrientes recogida en la Tabla 3.

Tabla 3. Propuesta de clasificación del potencial energético de las corrientes y correspondencia con el valor máximo de la corriente.

Clasificación de potencial	I (kW.m ⁻²)	\hat{V} (m.s ⁻¹)
Muy bajo	< 0,5	< 1
Bajo	[0,5 – 2]	[1 – 1,6]
Medio	[2 – 8]	[1,6 - 2,5]
Alto	[8 – 32]	[2,5 – 4]
Muy alto	> 32	> 4

Con este criterio, en el litoral español, el área del estrecho de Gibraltar tendría un potencial bajo para el aprovechamiento de las corrientes, situándose en el límite de los emplazamientos viables actualmente.

En cuanto al potencial del oleaje, estimado mediante una aproximación como la mostrada en (9), en la costa española se

pueden diferenciar tres zonas con diferentes valores del flujo medio anual de energía (Figura 4):

- Zonas de potencial alto. Costa oeste de Galicia y del Cantábrico (entre 33 y 22 kW.m⁻¹, con una media de 27 kW.m⁻¹ y una desviación estándar de 6 kW.m⁻¹).
- Zonas de potencial medio. Costa atlántica andaluza, golfo de León y litoral canario orientado al norte (entre 11 y 6 kW.m⁻¹, con una media de 8 kW.m⁻¹ y una desviación estándar de 3 kW.m⁻¹).
- Zonas de potencial bajo. Resto de la costa mediterránea. Valores inferiores a 5 kW.m⁻¹.

Considerando el flujo medio anual de energía del oleaje de la costa oeste de Galicia y del Cantábrico, como representativo de la franja intermedia de zonas del mundo de potencial alto y la costa atlántica de Andalucía, el área bajo la influencia del golfo de León y la costa canaria, como representativas de zonas de potencial medio, se realiza la propuesta de clasificación energética del oleaje contenida en la Tabla 4.

Tabla 4. Propuesta de clasificación del potencial energético del oleaje a partir del flujo medio anual de energía.

Clasificación de potencial	F (kW.m ⁻¹)
Bajo	< 5
Medio	[5– 15]
Alto	[15 – 45]
Muy alto	> 45

En el hemisferio norte las zonas con potencial más alto son Escocia y el norte de Irlanda. En el hemisferio sur el potencial del oleaje es, en general, más importante, destacando Australia, Nueva Zelanda y la costa del sur de América con valores superiores a 70 kW.m⁻¹.

Conclusiones

En este trabajo se realiza una propuesta de clasificación del potencial energético de la marea astronómica, de las olas y de las corrientes marinas de aplicación general que, considerando el nivel actual de desarrollo de los captadores, contribuya a identificar los emplazamientos más adecuados en el mundo.

Teniendo en cuenta las restricciones actuales de las tecnologías de captación de la energía de las corrientes marinas, únicamente lugares con “potencial alto” (corrientes máximas superiores a 2,5 m.s⁻¹) y “potencial muy alto” (corrientes máximas superiores a 4 m.s⁻¹) serían adecuados para posibles aprovechamientos energéticos.

En el caso de la energía potencial de la marea, las categorías se establecen en función de la carrera de marea siguiendo la clasificación oceanográfica clásica, y los aprovechamientos factibles energéticamente del mundo se situarían en el rango macromareal (carrera de marea > 5,5 m).

En cuanto al oleaje se emplea un criterio basado en el flujo

de energía medio anual incidente. Así, la mayor parte de la costa mediterránea española se encuentra dentro de un “potencial bajo” (< 5 kW.m⁻¹), Canarias y el golfo de Cádiz en un rango de “potencial medio” (entre 5 y 15 kW.m⁻¹) y la costa cantábrica y gallega tendrían un “potencial alto” (entre 15 y 45 kW.m⁻¹). Australia, Sudáfrica, Irlanda, etc., con flujos de energía del oleaje medios anuales superiores a 45 kW.m⁻¹, son áreas de “potencial muy alto”.

Agradecimientos

El contenido de una parte de este trabajo fue desarrollado para Iberdrola Ingeniería y Construcción en el marco de la investigación para el desarrollo de un Sistema Experto de evaluación de emplazamientos con recurso energético renovable marino dentro del proyecto CENIT-E OCEAN LÍDER, LÍDERes en Energías Renovables Oceánicas (www.oceanlider.com), financiado por el Centro para el Desarrollo Tecnológico Industrial (CDTI) del Ministerio de Economía y Competitividad (Gobierno de España).

Los autores desean agradecer a los revisores, Dr. Bald y Dr. Galparsoro, su contribución a la mejora notable del contenido del trabajo.

Esta es la comunicación número 578 de la Unidad de Investigación Marina de AZTI-Tecnalia.

Bibliografía

- Androsov, A.A., Kagan, B.A., Romanenkov, D.A y Voltzinger, N.E. (2002). Numerical modelling of barotropic tidal dynamics in the strait of Messina. *Advances in Water Resources* 25: 401-415.
- Bald, J., Del Campo, A., Franco, J., Galparsoro, I., González, M., Liria, P., Muxika, I., Rubio, A., Solaun, O., Uriarte, A., Zubiate, L., Comesaña, M., Cacabelos, A., Fernández, R., Prada, D., Méndez, G. (2010). Protocol to develop an environmental impact study of wave energy converters. *Revista de Investigación Marina* 17: 62-138.
- Bryden, H.L. y Kinder, T.H. (1986). “Gibraltar Experiment. A Plan for Dynamics and Kinematic Investigations of Strait Mixing, Exchange and Turbulence”, Woods Hole Oceanographic Institutions, Technical Report.
- Centre for Renewable Energy Sources (2006). Ocean Energy Conversion in Europe – Recent Advancements and Prospect. 36 pp.
- Caires S., Sterl A., Komen G., y Swail V. (2004) The web-based KNMI/ERA-40 global wave climatology atlas. *Bulletin of the World Meteorological Organization* 2004 53: 142-6.
- Charlier, R.H. (2003). A “sleeper” awakes: tidal current power. *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 7: 515-529.
- Fontán, A., Sáenz, J., González, M., Rubio, A., Esnaola, G., Mader, J., Hernández, C., Ganzedo, U. y Collins, M. (2011). Coastal water circulation response to radiational and gravitational tides within the southeastern Bay of Biscay. *Journal of Marine Systems* (en prensa).
- Galparsoro, I., P. Liria, I. Legorburu, J. Bald, G. Chust, P. Ruiz-Minguela, G. Pérez, J. Marqués, Y. Torre-Enciso, M. González, A. Borja. (2012). A Marine Spatial Planning approach to select suitable areas for installing wave energy converters on the Basque continental shelf (Bay of Biscay). *Coastal Management Journal*, 40: 1-19.
- González, M., Uriarte, A., Fontán, A., Mader, J. y Gyssels, P. (2004). Oceanography and Marine Environment of the Basque Country. In: Borja, A., Collins, M. (eds.), *Oceanography and Marine Environment of the Basque Country*. Elsevier Oceanography Series, 70. Elsevier, Amsterdam, pp 133–157
- Grabb, M., Lalander, E., Lundin, S. y Leijo, M. (2009). A review of tidal current energy resource in Norway. *Renewable and Sustainable*

- Energy Reviews* 13. 1898–1909
- Güney, M.S. y Kaygusuz, K. (2010). Hydrokinetic energy conversion systems: A technology status review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 14: 2996–3004.
- Hayes, M.O. (1979). Barrier island morphology as a function of tidal and wave regime. In, Leatherman S.P. (editor), *Barrier Islands: from the Gulf of St. Lawrence to the Gulf of Mexico*, Academic Press, New York, 1-27.
- IEA, International Energy Agency (2011). World Energy Outlook..http://www.iea.org/weo/docs/weo2010/weo2010_es_spanish.pdf.
- Iribar, X. y Ibáñez, M. (1979). Subdivisión de la zona intermareal de San Sebastián en función de los datos obtenidos con mareógrafo. En Acta 1º Simposio Ibérico de Estudio del Bentos Marino, San Sebastián, 2: 521-524.
- Khan, M.J., Bhuyan, G., Iqbal, M.T. y Quaicoe, J.E. (2009). Hydrokinetic energy conversion systems and assessment of horizontal and vertical axis turbines for river and tidal applications: A technology status review. *Applied Energy* 86: 1823–1835.
- Le Cann, B. (1990). Barotropic tidal dynamics of the Bay of Biscay shelf: observations, numerical modelling and physical interpretation. *Continental Shelf Research* 10: 723–758.
- Losada, M.A., Corniero, M. y Gimenez-Curto, L.A. (1977). Métodos Espectrales de Previsión de Oleaje. Estudio Comparativo. *Revista de Obras Públicas*. mayo, 1977.
- Mandang, I., y Yanagi, T. (1999). Tide and tidal current in then Mahakam estuary, east Kalimantan, Indonesia. *Coastal Marine Science* 32: 1-8.
- Peña, N.A. y Mariño, A.G. Marine Current Energy Initiatives in the Philippines. East Asian Seas Congress 2009 Partnerships in Environmental Management for the Seas of East Asia (PEMSEA) 24 November 2009. Philippine International Convention Center (PICC).
- Pond, S. y Pickard, G., L. (1983). *Introductory dynamical oceanography*. 2nd edition. Pergamon press, 329 pp.
- Pugh, D.T. (1987). *Tides, surges and mean sea-level*. Chichester, UK, John Wiley & Sons Ltd, 472 pp.
- Puillat, I., Lazure, P., Jégou, A.M., Lampert, L. y Miller, P.I., (2004). Hydrographical variability on the French continental shelf in the Bay of Biscay, during the 1990s. *Continental Shelf Research* 24: 1143–1163.
- Red Eléctrica de España (2010). 2010 El sistema eléctrico español. Síntesis. 15 pp.
- Red Eléctrica de España (2011). Boletín Mensual de octubre 2011. Nº 58.24 pp.
- Rico, J. y Ruiz A. (1998). Fluctuaciones del flujo en el Estrecho de Gibraltar. Seminario sobre la Oceanografía Física del Estrecho de Gibraltar. Ed. J.L. Almazán, H. Bryden, T. Kinder y G. Parrilla.
- Rivas, V. y Cendrero, A. (1992). Análisis histórico de la evolución superficial de los estuarios del País Vasco. *Lurralde* 15: 199-227.
- Rourke, F.O., Boyle, F. y Reynolds, A. (2010a). Tidal energy update 2009. *Applied Energy* 87: 398–409.
- Rourke, F.O., Boyle, F. y Reynolds, A. (2010b). Marine current energy devices: Current status and possible future applications in Ireland. *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 14: 1026–1036.
- Soerensen, H.C. y Weinstein, A. (2008). Ocean Energy: Position pape for IPCC. IPCC Socping Conference on Renewable Energy, Lüberck, Germany.8 pp.
- Thersher, R. (2010). The United States Marine Hydrokinetic Renewable Energy Technology Roadmap 14 pp.
- UK Energy Research Centre, UKERC, University of Edinburgh (2008). Marine (Wave and Tidal Current) Renewable Energy Technology Roadmap. Summary Report, 34 pp. <http://ukerc.rl.ac.uk/ERR0303.html>
- UK Energy Research Centre, UKERC, University of Edinburgh (2010). Marine Energy Technology Roadmap 12, pp.http://ukerc.rl.ac.uk/Roadmaps/Marine/Tech_roadmap_summary%20HJMWMM.pdf.



www.azti.es

azti
tecnalia

Txatxaramendi ugartea z/g
48395 Sukarrieta (Bizkaia)
Tel.: +34 94 602 94 00
Fax: +34 94 657 25 55

Herrera Kaia, Portualdea z/g
20110 Pasaia (Gipuzkoa)
Tel.: +34 943 00 48 00
Fax: +34 94 657 25 55

Parque Tecnológico de Bizkaia
Astondo bidea. Edificio 609.
48160 Derio (Bizkaia)
Tel.: +34 94 657 40 00
Fax: +34 94 657 25 55