

# SISTEMAS DE PRODUCCIÓN Y POTENCIAL ENERGÉTICO DE LA ENERGÍA MAREOMOTRIZ

## (Production systems and energy potential of tidal energy)

Julián Rodrigo Quintero González<sup>1</sup>, Laura Estefanía Quintero González<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Escuela de Ingeniería de Transporte y Vías, Universidad Pedagógica y Tecnológica de Colombia, Sede Tunja, Grupo Inv. GIDPOT, julian.quintero@uptc.edu.co

<sup>2</sup>Escuela de Ingeniería Ambiental, Universidad Pedagógica y Tecnológica de Colombia, Sede Tunja, lauraestefania.quintero@uptc.edu.co

*(Recibido julio 15 de 2015 y aceptado octubre 2 de 2015)*

### Resumen:

El presente artículo aborda el concepto de energía mareomotriz, haciendo una distinción de los tipos de sistemas de aprovechamiento de la energía de las mareas; también muestra el papel que esta tecnología desempeña como fuente de abastecimiento energético en algunos países alrededor del mundo, rol que está asociado al potencial energético disponible de cada región. Este aspecto de igual forma se expone en el documento soportado en cifras de GWh/año por superficie embalsada en km<sup>2</sup>. Por último, pero no menos importante, está la influencia que ha tenido esta tecnología en el medio ambiente, sus contribuciones y aspectos por mejorar y evaluar desde el punto de vista medioambiental.

**Palabras clave:** energía mareomotriz, sistemas de producción, potencial energético.

### Abstract:

This article discusses the concept of tidal power and distinguishes the types of systems to exploitation the tidal energy; the same way; it also shows how this technology serves as a source of energy in some countries around the world, which is a role associated with the energy potential available in each region. This point equally shows through numbers in GWh/year per km<sup>2</sup> reservoir surface. Last but not least, it is the influence that this technology has had on the environment, its contributions for improving and evaluating from an environmental point of view.

**Keywords:** tidal energy, production systems, energy potential.

## 1. INTRODUCCIÓN

En todo el mundo, el desarrollo de las actividades comerciales e industriales, consideradas básicas para el crecimiento económico y desarrollo de los países, se ha basado en la producción y consumo masivo de energía, que en la mayoría de los casos es generada a través del procesamiento de recursos naturales no renovables, los cuales, al ser sometidos a diversos procesos físicos y químicos, generan residuos y subproductos contaminantes que afectan y degradan el suelo, el agua y el aire. Esta situación ha impulsado el adelanto de investigaciones orientadas hacia el desarrollo de nuevas

fuentes de energía que proporcionen la eficiencia de las fuentes convencionales y que además no generen impactos nocivos en los elementos del medio ambiente.

En la actualidad, y mediante el desarrollo de la ingeniería como una disciplina fundamentada en las ciencias aplicadas y la tecnología, se ha logrado incorporar tecnologías limpias en los procesos de producción de energía, lo cual, a su vez, se ha traducido en el nacimiento de nuevos conceptos de fuentes de energía como la energía solar, la energía eólica, la geotérmica, la hidráulica y la mareomotriz. Esta última entendida como aquella energía producida a través de la explotación del

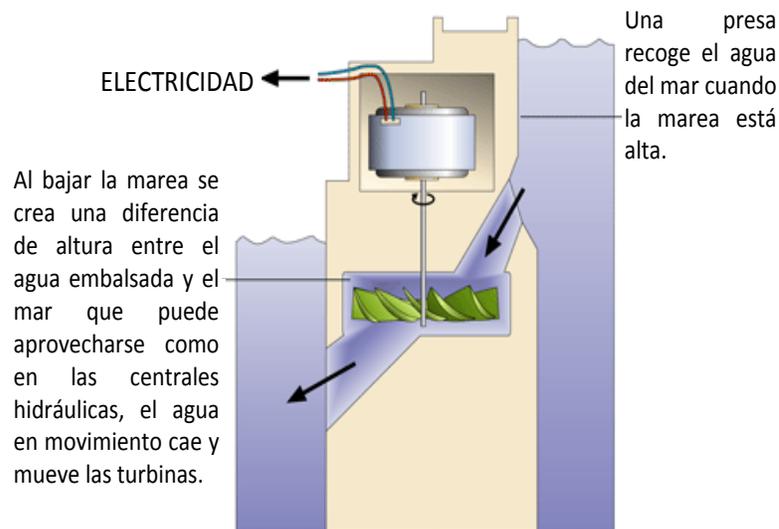
recurso hídrico marino, específicamente mediante el beneficio de la energía potencial presente en las masas de agua embalsada, energía que se aprovecha por medio de su transformación cinética expresada en el movimiento de turbinas debido al paso de agua a través de ellas, el cual es ocasionado por la dirección del flujo propio de las mareas en las zonas costeras.

El uso de la denominada energía mareomotriz ha tomado fuerza en países como Francia, Canadá, Suiza, el Reino Unido, Estados Unidos y China, en los cuales estos sistemas de producción de energía ya se encuentran en operación. Sin embargo, el desconocimiento del modo de operación, los procesos de producción, el diseño y construcción de estos sistemas, pero sobretodo, de sus beneficios medioambientales, han retrasado el desarrollo de este tipo de fuentes de energía en países en vías de desarrollo como los latinoamericanos. Esta situación evidencia la necesidad de impulsar la investigación en lo relacionado con la producción de energías limpias y las nuevas tecnologías que actualmente se están

desarrollando en todo el mundo, razón por la cual, a continuación se presenta una descripción acerca de la naturaleza de la energía mareomotriz, sus sistemas de producción y su potencial energético.

## 2. LA ENERGÍA MAREOMOTRIZ

La energía mareomotriz es aquella energía producida a través del aprovechamiento del recurso hídrico y los grandes cuerpos de agua, y específicamente mediante el beneficio de la energía potencial obtenida por medio de turbinas que se ponen en movimiento debido al paso de agua a través de ellas, el cual es ocasionado por el movimiento propio de las mareas en las zonas costeras. Consiste básicamente en idear un punto estratégico marítimo en donde las mareas presenten un alto grado de diferencia de alturas (Figura 1). Esto ocurre gracias a la atracción gravitacional presente entre la Luna y la Tierra, aquella que también cumple la función de hacer que el satélite siga girando alrededor de esta.



**Figura 1.** Funcionamiento planta de energía mareomotriz.

Fuente: <http://goo.gl/KoXWeu>

Cuando la Luna se encuentra a distancias más cercanas de la Tierra, crea el efecto de atracción, que se evidencia en mayor medida en los mares, por la estructura física del agua, pues en los continentes aunque el efecto de atracción está presente, no es físicamente posible verlo sin ayuda de instrumentos de estudio geológico. Este efecto ocasiona en los océanos el fenómeno denominado comúnmente mareas, el cual, a su vez, ocasiona el ambiente propicio para la extracción mareomotriz.

De acuerdo con Cabello (2006), dentro de las ventajas de las estaciones mareomotrices se encuentra su eficiencia, la poca o nula generación de contaminantes y el recurso para la producción energética que es gratuito e inagotable: mareas y olas. En términos generales, una estación mareomotriz genera energía limpia, renovable y sustentable en el tiempo. Sin embargo, es necesario hacer un análisis de las desventajas de las energías alternativas; para el caso de la energía mareomotriz se cuentan el tonelaje de red de turbinas, el ensamblaje de turbinas, la inestabilidad del oleaje en el mar, la conexión al sistema general, la mano de obra altamente calificada, la inversión inicial elevada, la modelización a escala local y, por supuesto, los posibles impactos ambientales generados en las zonas costeras y sus ecosistemas.

### 3. SISTEMAS DE ENERGÍA MAREOMOTRIZ

#### 3.1 Centrales de turbinas mareomotrices

De acuerdo con Jo *et al.* (2012), uno de los componentes esenciales de un dispositivo de corriente eléctrica por mareas (Tidal Current Power TCP) es el rotor de la conversión de la corriente en la energía de rotación de entrada. La optimización del diseño del rotor es muy importante para maximizar la producción de energía. El rendimiento del rotor puede ser determinado por varios parámetros, incluyendo el número de cuchillas, la forma, el tamaño en sección, el cubo, diámetros, etc. (Figura 2). La cuchilla del rotor es uno de los componentes esenciales que pueden convertir la energía corriente de marea en energía de rotación para generar electricidad. Las propiedades de la hoja variable determinan el rendimiento, la eficiencia y la estabilidad del sistema de turbina (Figura 3).



**Figura 2.** Sistema de generación de energía mareomotriz compuesto por turbina con eje horizontal, Francia (diámetro turbina: 16 metros, peso: 850 toneladas, potencia de turbina: 2,0 MW).

**Fuente:** <http://goo.gl/w6yjhG>



**Figura 3.** Sistema de generación de energía mareomotriz compuesto por dos turbinas con dos cuchillas con eje horizontal. Proyecto SeaGen en Strangford Lough, Irlanda (potencia de turbina: 1,2 MW).

**Fuente:** <http://goo.gl/LEP5G6>

#### 3.2 Centrales de barreras mareomotrices

Recientemente, Wiese *et al.* (2011) señalaron que en WATTS 2010, un evento de marina en el Reino Unido, se elogió el Centro Europeo de Energía Marina (EMEC

por sus siglas en inglés) en Orkney, al norte de Escocia, donde una serie de tecnologías puede funcionar a modo de prueba en el medio marino difícil. Una de ellas se denominó Oyster Aquamarine Power, un dispositivo emplazado en el lecho marino cerca de la costa, que básicamente es un gigante marino montado con bisagras que extrae energía de la marea, específicamente de la componente horizontal del movimiento elíptico de una ola (Figura 4).



**Figura 4.** Barrera para extracción de energía de las mareas.

**Fuente:** Ocean and tidal power transition continues, Wiese *et al.* (2011).

Para el año 2010, múltiples empresas a nivel mundial ya estaban preparando pruebas exhaustivas de los proyectos de plantas piloto comerciales, mientras otras empresas especializadas entraron en operación regular. También se hicieron esfuerzos para lograr el mejoramiento técnico de los dispositivos y la reducción de los costos de instalación. Sin embargo, los proyectos, aun para ese entonces, se enfrentaban a la incertidumbre de la evaluación de los recursos y la falta de información sobre el impacto que los dispositivos de producción de energía mareomotriz tienen sobre la vida marina.

Wiese *et al.* (2011) indican que un gran número de países están actualmente investigando las tecnologías de energías renovables marinas. Entre estos los más notables son Australia, Canadá, Irlanda, Italia, Japón, Corea, Nueva Zelanda, Noruega, Portugal, España, Suecia, el Reino Unido y los Estados Unidos de América, que están desplegando dispositivos, mientras que Bélgica, Alemania, México y Sudáfrica están financiando

programas de investigación o el apoyo a los fabricantes de dispositivos.

#### 4. POTENCIAL ENERGÉTICO

Las investigaciones relacionadas con el uso de fuentes de energías alternativas tomaron fuerza en la segunda mitad del siglo XX. En la década de los 80, el desarrollo e implementación de modelos matemáticos y de simulación del comportamiento de cuerpos y cursos de agua con el objetivo de evaluar el potencial energético de la energía producida mediante el aprovechamiento de la fuerza de las mareas, ya era un tema avanzado en países de la actual Unión Europea.

En 1985, Ryrie y Bickley estudiaron la hidrodinámica de energía de las mareas controladas en el estuario del río Severn, el río más largo (354 km.) del Reino Unido. Para esto integraron un conjunto de ecuaciones diferenciales ordinarias aplicadas al estuario del Severn dentro de un modelo hidrodinámico, considerando el control de una presa, con el fin de maximizar la producción de energía durante un ciclo de marea. Diez años más tarde, Ryrie (1995) menciona que en aquellos sistemas de barrera donde la tasa máxima de flujo y la eficiencia de la maquinaria son independientes de la eficiencia de la cabeza de la represa y de la dirección del flujo, y que por ende el sistema depende de la velocidad del flujo, es necesario tener un modelo de control del flujo a través de la barrera para maximizar la energía. Ryrie, luego de estudiar modelos de control anteriores, finalmente se apoya en el modelo de programación dinámica de Bellman.

Los actuales estudios en relación con la obtención de energía eléctrica mediante mecanismos de explotación de fuentes de energía renovables toman cada vez más fuerza, sobresaliendo principalmente las investigaciones hechas por algunos países de la Unión Europea, en donde se han generado diferentes estrategias orientadas a incentivar el desarrollo de investigaciones científicas soportadas en leyes y políticas que fomentan el desarrollo sostenible, la preservación del medio ambiente y la generación de recursos derivados del presupuesto nacional. Además, han dado a conocer los beneficios económicos, industriales, comerciales y ambientales, que sistemas como el de la explotación de la energía mareomotriz traería al desarrollo de los países (Kaya & Çanka Kiliç, 2012). En 2014, Fernández Suárez *et al.* hicieron la evaluación del potencial energético de las corrientes de marea en la desembocadura del

río Nalón en Asturias, España. Para este estudio los autores utilizaron instalaciones de microgeneración y el programa gratuito de simulación de flujo unidireccional HEC-RAS. Los resultados de la evaluación mostraron que en algunos puntos de la desembocadura, ubicados de 3,5 km a 4,5 km del mar, el flujo superaba los 2 m/s; entonces, en esta zona la potencia podría alcanzar los 4kW/m<sup>2</sup> con una turbina de microgeneración Gorlov.

La implementación de sistemas de producción de energía a través del aprovechamiento de las mareas y corrientes en cursos de agua y zonas costeras, ha ido en aumento en los últimos años. Esto, según López *et al.* (2010), se puede evidenciar al hacer la comparación

entre las centrales de energía mareomotriz existentes en el año 2000 y las que se encuentran en operación actualmente, además de los emplazamientos para nuevas plantas proyectadas (Tabla 1).

Para el año 2000 se encontraban en operación las plantas de energía mareomotriz de La Rance en Francia (puesta en servicio: 1966, potencia instalada: 240 MW), Kislaya Bay en Rusia (puesta en servicio: 1968, potencia instalada: 0,4 MW), Jiangxia en China (puesta en servicio: 1980, potencia instalada: 3,2 MW), Anápolis Royal en Canadá (puesta en servicio: 1984, potencia instalada: 16,0 MW) y Severn en el Reino Unido (puesta en servicio: 2000, potencia instalada en estudio).

**Tabla 1.** Emplazamientos más destacados para el aprovechamiento de centrales mareomotrices en el mundo

País	Emplazamiento	Altura media de marea m	Superficie embalsada km <sup>2</sup>	Potencia estimada MW	Producción aproximada GWh/año
Rusia	Bahía de Mezen	6,76	2640	15000	45000
	Penzhinsk, Mar de Okhost	11,4	530	87400	190000
	Bahía de Tugur	6,8	1080	7800	16200
India	Golfo de Khambat	6,8	1970	7000	15000
	Golfo de Kutch	5,0	170	900	
Corea	Garolim	4,7	100	400	
	Cheonsu	4,5			
Reino Unido	Severn	7,0	520	8640	17000
	Mersey	6,5	61	700	
	Duddon	5,6	20	100	
	Wyre	6,0	5,8	64	
	Conwy	5,2	5,5	33	
Australia	Bahía de Secure	7,0	140	1480	
	Ensenada de Walcott	7,0	260	2800	
Canadá	Cobequid	13,4	240	5338	14000
	Cumberland	10,9	90	1400	
	Shepody	10,0	115	1800	
Estados Unidos	Turnagain Arm	7,5		6500	16600
	Knit Arm	7,5		2900	
	Pasamaquoddy	5,5			
México	Río Colorado	6,7			
	San José	5,9	778	5040	9400
Argentina	Santa Cruz	7,5	222	2420	
	Río Gallegos	7,5	177	1900	

Fuente: López González *et al.* (2010).

En Colombia, y mediante el uso de imágenes satelitales y los sistemas de información geográfica (SIG), Polo *et al.* (2008) determinaron que el aprovechamiento del potencial energético era posible en la costa del Pacífico colombiano, debido a que las mareas son superiores a los 3 m. El estudio empleó imágenes tipo Landsat empalmadas con la herramienta de sistemas de información geográfica ARCGIS. En la investigación consideraron 45 posibles bahías en el litoral Pacífico, cuyo potencial energético se estimó en 120 MW, de los cuales se resaltó a Bahía Málaga con 3,5 MW y la ensenada de Tribugá con 0,5 MW, como las zonas con mayor potencial energético y posibilidades de satisfacer las necesidades de las comunidades cercanas. Punta Catripe (8 MW), Bocana Bazán (6 MW) y Boca Naya (13 MW) fueron algunos otros sitios que presentaron un importante y prometedor potencial energético. En un estudio posterior, hecho por Osorio *et al.* (2016), se muestra que las actuales velocidades medias de bahía Buenaventura y Bahía Málaga son alrededor de 0,8 m/s; los lugares con valores máximos de potencia entre 100W/m<sup>2</sup> (marea baja) y 250W/m<sup>2</sup> (marea alta) están situados en la zona más alejada de la bahía; y la potencia más alta podría producir una fuente de alimentación máxima cerca de 8,1 MW para la bahía de Buenaventura.

## 5. MEDIO AMBIENTE

En el 2012, Ahmadian y Falconer evaluaron la forma en que un conjunto de turbinas tiene efectos hidroambientales, tomando como caso de estudio el estuario del río Severn y el canal Bristol en el Reino Unido. Mediante un modelado de velocidades a diferentes profundidades y transporte de solutos (Depth Integrated Velocities and Solute Transport DIVAST) simularon tres tipos de organización diferentes para una serie de turbinas, cada diseño o formación con la misma cantidad de estas. Diseños que fueron comparados con el efecto que sistemas mareomotrices de este tipo causan sobre un entorno costero. El estudio reveló que la alteración de los niveles de agua que representan riesgos de inundación, es mínima. Sin embargo, los niveles de sedimentos en suspensión y presencia de bacterias fecales aumentaron cerca de las matrices de turbinas y disminuyeron aguas arriba y aguas abajo.

Recientemente, Yang *et al.* (2013) presentaron un estudio sobre el modelado numérico para la simulación en la corriente de extracción de energía de las mareas

y la evaluación de sus efectos en la hidrodinámica y los procesos de transporte en un canal de marea y el sistema de conexión a la bahía del océano costero. Los resultados del modelo demostraron que la extracción de energía de las mareas tiene un mayor efecto sobre el tiempo de la reducción del volumen de flujo, lo que podría afectar negativamente los procesos biogeoquímicos en aguas estuarinas y costeras que apoyan la productividad primaria y formas superiores de la vida marina.

## 6. CONCLUSIONES

La energía mareomotriz o aprovechamiento de la energía de las mareas, entre muchas otras fuentes de energía alternativa, ha tomado fuerza desde la segunda mitad del siglo XX, especialmente en países de la Unión Europea, donde en la década de los 80 se dieron gran cantidad de estudios hidrodinámicos, como en el caso del estuario del río Severn, el río más largo (354 km.) del Reino Unido. De esta manera, en los últimos años ha crecido la investigación e implementación de la energía de las mareas con el desarrollo de sistemas de tipo turbina y tipo barrera, tecnologías que han tenido avances para la optimización de la energía mareomotriz. Es así como Rusia se posicionó en 2011 como el país con mayor potencia instalada (87 400 MW) con una producción promedio anual de 190 000 GWh. Por otra parte, países como Colombia, hasta ahora están en la etapa de estudio del potencial marino disponible en su territorio, que para el caso, mediante el uso de SIG, se encontró un potencial total del litoral Pacífico de 120 MW.

En relación con los impactos derivados de la implementación de las tecnologías e infraestructura para el desarrollo y operación de sistemas de la energía mareomotriz, se puede indicar que aunque este tipo de sistema de producción de energía contribuye con la disminución de la huella de carbono, sus posibles efectos sobre la vida marina apenas se están estudiando y, hasta ahora, se está encontrando un aumento en la presencia de bacterias fecales cerca de las matrices de los sistemas de producción, alteración de los niveles de agua aguas arriba y aguas abajo de la corriente del cuerpo de agua, evidencias de sólidos suspendidos que alteran el bioma y generan la proliferación de patologías en algunas especies y alteraciones de los ecosistemas en aguas estuarinas y costeras.

## 7. REFERENCIAS

- Ahmadian, R. & Falconer, R.A. (2012). Assessment of array shape of tidal stream turbines on hydro-environmental impacts and power output. *Renewable Energy An International Journal*, 44, 318-327. DOI:<http://dx.doi.org/10.1016/j.renene.2012.01.106>
- Cabello, A.M. (2006). *Energías alternativas "Solución para el desarrollo sustentable"*. Chile y Argentina: Adnuma y Refinor. 46 p.
- Fernández-Suárez, D., Álvarez-Álvarez, E., Gutiérrez-Trashorras, A.J. & Fernández-Francos, J. (2014). Evaluación del potencial energético de las corrientes de marea en la desembocadura del río Nalón (Asturias, España) mediante simulación de flujo unidimensional. *Ingeniería del Agua*, 19(1), 31-42, 12. DOI: <http://dx.doi.org/10.4995/ia.2015.3260>
- Jo, C.H., Yim, J.Y., Lee, K.H. & Rho, Y.H. (2012). Performance of horizontal axis tidal current turbine by blade configuration. *Renewable Energy An International Journal*, (42), 195-206. DOI:<http://dx.doi.org/10.1016/j.renene.2011.08.017>
- Kaya, D. & Çanka Kiliç, F. (2012). Renewable energies and their subsidies in Turkey and some EU countries. Germany as a special example. *Journal of International Environmental Application & Science*, 7 (1), 114-127.
- López, J., Hiriart Le Bert, G. & Silva, R. (2010). Cuantificación de energía de una planta mareomotriz. *Revista Ingeniería Investigación y Tecnología*, 11(2), 233-245.
- Osorio, A.F., Ortega, S. & Arango-Aramburo, S. (2016). Assessment of the marine power potential in Colombia. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 53, 966-977. DOI:<http://dx.doi.org/10.1016/j.rser.2015.09.057>
- Polo, J.M., Rodríguez, J. & Sarmiento, A. (2008, nov.). Potencial de generación de energía a lo largo de la costa colombiana mediante el uso de corrientes inducidas por mareas. *Revista de Ingeniería*, 28, 99-105.
- Ryrie, S.C. (1995, feb.). An optimal control model of tidal power generation. *Applied Mathematical Modelling, Journal*, 19, 123-126.
- Ryrie, S.C. & Bickley, D.T. (1985, feb.). Optimally controlled hydrodynamics for tidal power in the Severn Estuary. *Applied Mathematical Modelling, Journal*, 9, 2-10.
- Wiese, A., Kleineidam, P., Schallenberg, K., Aydin, E., Tschöp, G. & Kaltschmitt, M. (2011, july-august). Ocean and tidal power transition continues. *Renewable Energy Focus, Journal*, 12 (4), 56-57.
- Yang, Z., Wang, T. & Copping, A.E. (2013). Modeling tidal stream energy extraction and its effects on transport processes in a tidal channel and bay system using a three-dimensional coastal ocean model. *Renewable Energy An International Journal*, 50, 605-613. DOI:<http://dx.doi.org/10.1016/j.renene.2012.07.024>