

---

**LA ENERGÍA DE ORIGEN MARINO Y SU USO POTENCIAL EN  
VENEZUELA**

---

Antonio Herrera y Amalia Quintero

*RESUMEN*

*El presente trabajo persigue analizar los tipos de energía de origen marino que puedan ser empleados en Venezuela, a través del desarrollo de los siguientes tópicos: tecnologías disponibles para el aprovechamiento del movimiento de las masas de agua marina como fuente generadora de energía, revisión en cuanto a costos de inversión y producción en las energías*

*renovables de origen marino, y un análisis comparativo de los tipos de energía de origen marino que puede ser utilizada en la costa venezolana. Finalmente se identifican localidades en la costa venezolana con potencial aprovechamiento energético del oleaje, mediante el uso de variables descriptoras de la ola y parámetros morfodinámicos en las playas arenosas.*

---

**Introducción**

El uso de la energía ha sido prioritario para el desarrollo de la civilización y ha impactado favorablemente la calidad de vida de la población en general. Más del 80% del consumo energético mundial para la generación de electricidad, la industria y el transporte proviene de la utilización de combustibles fósiles. El consumo creciente de distintas formas de

productos energéticos para la producción ha generado efectos adversos en los planos ambiental, socioeconómico y geopolítico. En consecuencia, durante el último tercio del siglo XX y principios actual, diversos factores han presionado para la utilización a mayor escala de fuentes alternas de energía (Muradov y Veziroglu, 2008; Ball y Wietschel, 2009; Moriarty y Honnery, 2009; Sanhueza, 2013). En este orden de

ideas, desde el punto de vista ambiental, el problema más preocupante es el efecto invernadero, el cual debido a gases producto de la quema de combustibles fósiles, aumenta la temperatura promedio mundial, trayendo como consecuencia el cambio climático global (CNUCYD, 2008).

Según estadísticas reportadas por la *United States Energy Information Administration* (EIA, 2015), el 35% de

la energía eléctrica consumida en Venezuela provino de combustibles fósiles. Las emisiones de CO<sub>2</sub> en relación al consumo de energía fue de 183×10<sup>6</sup>Tm, y un consumo per capita de 6,35Tm (AIE, 2012). Esto la ubica en el puesto 27 a nivel mundial en cuanto a las emisiones de este gas de efecto invernadero, contribuyendo con un 0,6% de las emisiones mundiales (ONU, 2013; Posso, 2004).

---

**PALABRAS CLAVE / Energía Marina / Maremotérmica / Mareomotriz / Morfodinamismo / Playas arenosas / Undimotriz /**

Recibido: 26/08/2015. Modificado: 15/06/2017. Aceptado: 16/06/2017.

**Antonio Herrera.** Doctor en Ciencias Biológicas, Universidad Simón Bolívar, Venezuela. Investigador, Proyecto Prometeo, Ecuador. Docente, Escuela Superior Politécnica del Litoral (ESPOL), Ecuador. Dirección:

Facultad Ciencias de la Vida, ESPOL. Campus Gustavo Galindo, Km 30.5 Vía Perimetral, P.O. Box 09-01-5863, Guayaquil, Ecuador. e-mail: anheni@espol.edu.ec

**Amalia Quintero.** Ingeniera Industrial. Especialista en Innovación Tecnológica, Universidad de Oviedo, España. Especialista en Gerencia de Proyectos y Magíster en Gerencia de Proyectos y

Doctorante en Educación, Universidad Católica Andrés Bello, Venezuela. Docente, Universidad de Guayaquil, Ecuador. e-mail: amalia.quintero@gmail.com.

## THE ENERGY OF MARINE ORIGIN AND ITS POTENTIAL USE IN VENEZUELA

Antonio Herrera and Amalia Quintero

### SUMMARY

*This study aims to analyze the types of marine energy that can be used in Venezuela, through the development of the following topics: available technologies for the use of water mass movement as source of energy, review of investment and production cost of marine renewable energy, and comparative*

*analysis of the types of energy of marine origin that can be used in the Venezuelan coast. Finally, locations were identified in the Venezuelan coast with potential for the use of wave energy, through the use of descriptive variables of the wave and morphodynamic parameters of sandy beaches.*

## A ENERGIA DE ORIGEM MARINHO E SEU USO POTENCIAL NA VENEZUELA

Antonio Herrera e Amalia Quintero

### RESUMO

*O presente trabalho persegue analisar os tipos de energia de origem marinho que possam ser empregados na Venezuela, através do desenvolvimento dos seguintes tópicos: tecnologias disponíveis para o aproveitamento do movimento das massas de água marinha como fonte geradora de energia, revisão no que se refere a custos de investimento e produção em energias*

*renováveis de origem marinho, e uma análise comparativa dos tipos de energia de origem marinho que pode ser utilizada na costa venezuelana. Finalmente se identificam localidades na costa venezuelana com potencial aproveitamento energético do fluxo das ondas, mediante a utilização de variáveis que descrevem a onda e parâmetros morfodinâmicos nas praias arenosas.*

En el mar Caribe, Venezuela ejerce soberanía en ~500.000 km<sup>2</sup> de aguas marinas y submarinas. La costa venezolana sobre el océano Atlántico, desde Punta La Peña (estado Sucre) hasta Punta Playa (estado Delta Amacuro), tiene una extensión de 1008km. Esta gran extensión de zona marítima da derecho al aprovechamiento de recursos naturales, tanto pesqueros como, paisajísticos, minerales y energéticos. Desde el punto de vista de los recursos petroleros y gasíferos, Venezuela posee grandes reservas en el Golfo de Venezuela, la Plataforma Deltana, Paria Norte, y la Blanquilla (PDVSA, 2012). Además de los recursos petroleros y gasíferos, los mares y océanos ofrecen otras fuentes de energía producto del movimiento de sus aguas. Entre las energías alternativas de desarrollo contemporáneo se encuentran las de origen marino, las cuales pueden ser utilizadas para la generación de electricidad. En Venezuela fue presentada una iniciativa de aprovechamiento de la energía del oleaje por parte de la empresa Nova Oceanic Energy Systems, la cual desarrolló un prototipo de convertidor de olas con una capacidad insta-

lada de 10kW. En el año 2009 se realizaron pruebas en playa La Punta, El Playón, Ocumare de la Costa, sobre un área marina de 225m<sup>2</sup>. Este dispositivo presenta la ventaja de que al liberar la ola parte de su energía en el dispositivo, disminuye los procesos erosivos sobre el litoral, cumpliendo una función de rompeolas (NOVA, 2009).

Sin embargo, para la utilización de fuentes energéticas alternativas en Venezuela, es menester realizar un análisis comparativo del potencial energético alternativo en cuanto a la tecnología existente para su aprovechamiento, las distintas fuentes de energía marina disponibles, y los estudios y mediciones de los procesos litorales y oceánicos a lo largo de la costa. Por ello, se tiene como propósito analizar los tipos de energías de origen marino que puedan ser empleadas en Venezuela, a través del desarrollo de los siguientes tópicos: 1) tecnologías disponibles para el aprovechamiento del movimiento de las masas de agua marina como fuente generadora de energía, 2) revisión de los costos de inversión y producción en las energías renovables de origen marino, 3) aplicación del análisis Fortaleza-

Oportunidades-Debilidades-Amenazas (FODA) para la identificación de estrategias de desarrollo y aprovechamiento en la energía de origen marino con mayor potencial de aplicación en la costa venezolana, y 4) determinación de potencial energético del oleaje mediante la evaluación de playas en distintas localidades de la costa de Venezuela, con el uso de variables descriptoras del oleaje y parámetros morfodinámicos indicadores de la energía de la ola a la cual están sometidos dichos litorales.

### Tecnologías para el Aprovechamiento de la Energía Marina

Las masas de aguas marinas contienen una gran cantidad de energía, producto de sus movimientos como consecuencia de la atracción gravitatoria de la Luna y el Sol (mareas), la fuerza de los vientos (oleaje, corrientes), el movimiento de rotación de la Tierra (corrientes geostróficas), y la diferencia de temperatura entre las masas de aguas marinas (corrientes y gradientes térmicos). A nivel mundial se han presentado diferentes desarrollos tecnológicos para el aprovechamiento de la

energía proveniente de los cuerpos de aguas marinos y oceánicos, con diferentes potenciales de aprovechamiento y aspectos que influyen a diferentes escalas sobre el ambiente. A continuación se describen las tecnologías asociadas a cada una de esas fuentes energéticas.

### Aprovechamiento de desnivel mediante represas en estuarios macromareales

La energía generada a partir de las mareas es ventajosa ya que es renovable y muy predecible en diferentes escalas temporales (diaria, mensual, anual), lo cual permite una buena planificación para su aprovechamiento, además que la energía disipada por las mareas está en el orden de 22.000TWh (Hermosilla Villalba, 1997). La energía potencial contenida en el desnivel de las aguas se aprovecha mediante la construcción de represas semejantes a las hidroeléctricas. El agua represada se transforma posteriormente en energía cinética mediante la apertura de compuertas que permiten su desplazamiento hacia turbinas que transforman dicha energía cinética en mecánica, y posteriormente en electricidad mediante el

acoplamiento de la turbina a un generador eléctrico. En países como Francia, Canadá, Rusia y China se han aprovechado algunas ensenadas o bahías con estrechas comunicaciones con el mar, para aplicar esta tecnología. Se aprovechan los movimientos de las aguas, tanto de ascenso como de descenso. Por lo general las paletas de estas turbinas hidráulicas, tienen una inclinación regulable y son aptas para trabajar con diferentes niveles de agua, tanto durante el flujo (creciente) como en el reflujó (bajante), al ser turbinas especiales de paso variable y reversibles (Chingotto, 2006).

Un ejemplo es la central de *La Rance* en Francia, la cual presenta una potencia de 240 MW, y una producción media de 550GWh; el nivel de variación de marea es de 13,5 m (Hermosilla Villalba, 1997). Al subir la marea se llena un embalse conteniendo el agua con un dique. Una vez que se llega a la pleamar se cierran unas compuertas y se deja el agua almacenada, hasta que la marea baje. Cuando la marea empieza a bajar se espera hasta que la diferencia de niveles entre ambos lados del dique alcance un nivel idóneo y, entonces, se permite el paso del agua, la cual mueve turbinas que generan electricidad. El proceso también se realiza en sentido inverso. Sin embargo, cuando el nivel en el mar y el estuario es el mismo, las turbinas no funcionan, por lo que en ese momento el aprovechamiento de la energía se aumenta utilizando el bombeo del mar al estuario. Así se puede conseguir que el volumen de agua almacenado aumente de forma importante y que el nivel del estuario sea mayor que el de la marea alta. En esta situación, cuando la marea baja en sentido de estuario a mar, se obtendrá más energía que si no se hubiese bombeado agua del mar al estuario (Montero y Calvo, 2013).

#### *Generación eléctrica mediante hidroturbinas*

Las hidroturbinas son turbinas sumergidas, montadas en pilotes, que utilizan la energía

de las corrientes marinas denominadas *tidal stream* (Fraenkel, 2007). En lugar de diferencias de nivel, estas turbinas aprovechan la corriente de las mareas y las corrientes marinas asociadas, en estuarios y bahías. Estos equipos proporcionan una característica de potencia cúbica con la velocidad del fluido, similar a las turbinas eólicas. El dispositivo consiste en un rotor de eje horizontal con diámetro de paleta de 10 a 12m, montado sobre un pilote de acero en una base taladrada en el fondo del mar. Inicialmente se realizaron pruebas a mar abierto con una unidad de 15 kW con un rotor de 3,5 m de diámetro. Luego, en 2003, un prototipo fue instalado satisfactoriamente y ubicado en Foreland Point, cerca de Devon, Reino Unido, a una profundidad de 30m. El dispositivo cuenta con un rotor de 15m de diámetro y puede generar un máximo de 300kW con una corriente de  $2,7\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$ . Sobre los pilotes de estos dispositivos se puede acoplar un generador eólico y paneles solares, construyéndose así un sistema integrado, lo cual permitiría una mayor generación y eficiencia energética. El mayor desarrollo tecnológico se ha realizado en el Reino Unido y Canadá (Sorensen y Naef, 2008).

#### *Generación de electricidad de las energías maremotérmicas*

Denominada como conversión de la energía térmica del océano (CETO), esta consiste en una máquina que utiliza el ciclo de Rankine, diseñada para operar entre la temperatura de la superficie del océano ( $>25^{\circ}\text{C}$ ) y temperaturas que se encuentran a profundidades por debajo de los 1000m ( $\sim 4^{\circ}\text{C}$ ). La diferencia de temperatura es de unos  $20^{\circ}\text{C}$ , por lo que se debe escoger un fluido de trabajo cuya presión de vapor sea suficiente para que se evapore a bajas temperaturas. Por ejemplo, el propano ( $\text{C}_3\text{H}_8$ ) tiene una presión de vapor que oscila entre 5,5atm a  $5^{\circ}\text{C}$  y 9,5atm a  $25^{\circ}\text{C}$ ; el amoníaco tiene presiones de vapor de 5,2atm a  $5^{\circ}\text{C}$  y 10,3atm a  $25^{\circ}\text{C}$  (Fer-

nández Díez, 2005). Las zonas costeras ubicadas en la franja tropical presentan la mayor oportunidad de aprovechamiento de dicho tipo de energía, ya que la temperatura superficial del agua oceánica por lo general está por encima de los  $25^{\circ}\text{C}$  (Dubois *et al.*, 2008).

#### *Utilización de la energía undimotriz*

En cuanto al oleaje, éste posee dos componentes energéticos, uno cinético y otro potencial, el cual puede ser aprovechado por diferentes tipos de dispositivos, acoplados a un generador eléctrico: captación de movimiento variable a través de estructura flexible semisumergida con sistema hidráulico, estructuras flotantes en las cuales las olas la sobrepasan y mueven pequeñas turbinas, boyas semisumergibles o completamente sumergidas que mueven una turbina, o estructuras construidas en la costa en las que el oleaje mueve una columna de aire la cual hace girar una turbina (Sorensen y Naef, 2008). Además, estos pueden ser clasificados bien sea según la posición relativa respecto a la costa: en la costa, cercano a la costa (10-40m de profundidad) y costa afuera ( $>50\text{m}$  de profundidad), o según la orientación respecto al oleaje y su forma. Los absorbentes puntuales son estructuras de tamaño reducido en comparación al oleaje incidente y generalmente se colocan varios dispositivos siguiendo una línea. Los atenuadores, de forma alargada, se colocan paralelos a la dirección de avance de la ola y captan la energía de manera progresiva. Los totalizadores o terminadores, de forma alargada, se colocan perpendiculares a la dirección de avance de las olas y requieren un sistema de amarre más resistente que los atenuadores (Sorensen y Naef, 2008).

#### **Costos de Inversión y Producción de Energías Renovables de Origen Marino**

A continuación se presentan estimaciones de costos de

inversión y producción de energías renovables de origen marino, realizados en el Reino Unido y Europa. Prototipos de generadores de energía eléctrica mediante corrientes de marea podrían costar hasta 4880  $\$/\text{kW}$ . En cuanto a los costos de construcción de granjas de generadores eléctricos por corriente de marea, estos podrían estar entre 2604  $\$/\text{kW}$  y 5580  $\$/\text{kW}$ . Los gastos de operación se estiman entre 0,1674  $\$/\text{kWh}$  y 0,3348  $\$/\text{kWh}$  (Callaghan y Boud, 2006).

Los costos de la energía derivada de la corriente de marea por medio de hidroturbinas están altamente correlacionados con la profundidad, distancia a la costa y la amplitud en elevación de la marea. Los costos deberían estar por debajo de 0,35  $\$/\text{kWh}$ , para ser rentables en un período de 20 años. Se encuentran principalmente en profundidades entre 0 a 25m (aguas someras), y en áreas donde las velocidades medias por corrientes de marea de primavera son  $>1,5\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$ . La distancia a la costa es un parámetro importante en instalaciones costa afuera, ya que a menor distancia se reduce el costo por cable (Vásquez e Iglesias, 2016a, b).

En cuanto a prototipos de convertidores de energía de oleaje, los costos de capital podrían ser hasta de 9000  $\$/\text{kW}$ , pero se han sido construidos prototipos con costos por debajo de 4,300  $\$/\text{kW}$ . Los costos de inversión para la construcción de granjas de convertidores de la energía de oleaje podrían oscilar entre 3162  $\$/\text{kW}$  y 7998  $\$/\text{kW}$ , mientras que los costos de operación han sido estimados entre 0,22  $\$/\text{kWh}$  y 0,82  $\$/\text{kWh}$  (Callaghan y Boud, 2006).

En referencia a la generación de electricidad mediante convertidores térmicos (CETO), se ha estimado que el costo unitario de electricidad con eficiencia térmica del 0,66% es de  $\sim 0,363$   $\$/\text{kWh}$ . Esta es una fuente de energía renovable económicamente viable en las regiones donde la temperatura superficial del agua de mar permanece por encima de los  $25^{\circ}\text{C}$  (Jung *et al.*, 2016).

## Potencial de Uso de las Energías de Origen Marino en Venezuela

La matriz FODA (Tablas I y II) muestra las potencialidades y limitaciones del aprovechamiento de las energías de origen marino en Venezuela. A pesar de que la energía eólica no se origina del movimiento de las aguas, las turbinas eólicas pueden estar acopladas a plataformas de hidrogeneradores, por lo cual se incorpora esa modalidad de generación al análisis FODA. A continuación

se detallan las estrategias de desarrollo en el aprovechamiento de energías marinas, producto del análisis pormenorizado entre cada uno de los componentes de la matriz FODA.

### Fortalezas-Oportunidades

Venezuela cuenta con una potencia de energía oceánica (Martínez, 2001; Herrera, 2015) de 0,53 Mbep/día, con lo cual potencialmente se dejarían de emitir al año 203.329Tm de CO<sub>2</sub> (AIE, 2007, 2009; EIA,

2015). La energía renovable generada a partir de las mareas es muy predecible en diferentes escalas temporales (diaria, mensual, anual), lo cual permite una buena planificación para su aprovechamiento. En tal sentido, representa una opción válida para el establecimiento de nuevas tecnologías, considerando el desnivel de las aguas, la corriente de las mareas y las corrientes marinas asociadas. Asimismo, todos estos aspectos, dan pie para desarrollar estudios prospectivos sobre las energías provenientes del mar.

Adicionalmente, si se aprovecha la diferencia térmica entre masas de aguas superficiales y profundas, en las zonas costeras centro-orientales de Venezuela puede instalarse la tecnología CETO, cuya implementación se ve favorecida por la presencia de la fosa de Cariaco, contenida en el interior de la plataforma continental de Venezuela y de amplia extensión (160km de largo, 70km de ancho) y profundidad (1400 m) (Febres-Ortega y Herrera, 1975; Muller-Karger *et al.*, 2001).

TABLA I  
MATRIZ FODA DE LOS TIPOS DE ENERGÍA DE ORIGEN MARINO QUE PUEDEN SER UTILIZADAS EN LA COSTA VENEZOLANA (FORTALEZAS Y OPORTUNIDADES)

Fortalezas	Oportunidades
<p><u>Mareomotriz</u> La energía generada a partir de las mareas es renovable y muy predecible en diferentes escalas temporales (diaria, mensual, anual), lo cual permite una buena planificación para su aprovechamiento. La energía disipada por las mareas está en el orden de 22.000 TWh.</p> <p><u>Maremotérmica</u> Aprovechamiento de la diferencia térmica entre masas de agua superficiales y profundas. Las zonas costeras centro-oriental de la franja tropical, presentan la mayor oportunidad de aprovechamiento de este tipo de energía, pues la temperatura superficial del agua oceánica oscila sobre los 25°C y llega a profundidades por debajo de los 1000m cercano a la costa.</p> <p><u>Undimotriz</u> Existen tecnologías, basadas en el aprovechamiento del oleaje de playas, a saber: La Punta, El Playón, Ocumare de la Costa, sobre un área marina de 225 m<sup>2</sup> de ocupación. Los dispositivos empleados para el aprovechamiento de este tipo de energía, disminuyen los procesos erosivos sobre el litoral, ya que cumple la función de rompeolas. Factores como la pendiente de la playa y el tamaño del grano de arena son indicadores para el aprovechamiento energético undimotriz. El oleaje de las costas venezolanas, posee dos componentes energéticos, uno cinético y otro potencial.</p> <p><u>Eólica</u> Incidencia directa de los vientos alisios. Latitud tropical del norte costero (Paraguaná, La Guajira y Margarita). Existencia de un marco legal: Ley Orgánica del Sistema y Servicio Eléctrico, Ley del Plan de la Patria. Creación de la Unidad de Energía Renovable de Venezuela (UNERVEN) como una filial de PDVSA Industrial. Creación del programa gubernamental: Sembrando Luz. La instalación de 63 MW para electrificación rural, estima una reducción en las emisiones de CO<sub>2</sub> de alrededor de 29.184 toneladas.</p>	<p><u>Mareomotriz</u> Existencia de nuevas tecnologías basadas en el aprovechamiento del desnivel de las aguas, la corriente de las mareas y las corrientes marinas asociadas. El aprovechamiento natural de los movimientos de las masas de agua marina, representa una alternativa energética factible a lo largo de la zona costera venezolana. Oportunidad de realizar estudios prospectivos sobre el alcance futuro y la sostenibilidad de este tipo de energías provenientes del mar.</p> <p><u>Maremotérmica</u> Nueva tecnología de conversión de la energía térmica del océano (CETO) que puede ser instalada en la fosa de Cariaco contenida en el interior de la plataforma continental de Venezuela. Oportunidad de realizar análisis de costos, que permitan diferenciar las distintas tecnologías existentes, asociadas con la generación de energías oceánicas. Oportunidad de realizar futuros proyectos para un seguimiento temporal de las características del oleaje y en base a ello, realizar ajuste en la tecnología existente para el aprovechamiento de la energía proveniente del oleaje en las costas venezolanas. Oportunidad de realizar estudios de caracterización a lo largo de la costa del estado Vargas en cuanto a las variables morfodinámicas (tamaño de grano, pendiente) y de oleaje de sus playas.</p> <p><u>Undimotriz</u> Las playas de la zona Este del estado Vargas (Los Caracas, Anare, Pantaleta, Los Ángeles) presentan mayor potencial de energía en el oleaje. Oportunidad de atender energéticamente, aquellas zonas costeras con acceso limitado y en las que no llega la energía convencional. Oportunidad de realizar estudios comparativos para evaluar la adaptabilidad y eficiencia de las diferentes tecnologías asociadas a la generación de energías oceánicas de acuerdo a las condiciones de corriente, oleaje, mareas y gradientes térmicos que caracterizan al mar territorial venezolano.</p> <p><u>Eólica</u> Establecimiento de paneles solares, aerogeneradores y banco de baterías. Política energética alternativa, como impulso a las energías Renovables en Venezuela. Inicio de proyectos de electrificación rural, basados en energías renovables. Tendencia mundial de uso de fuentes alternas de energía. Oportunidad de establecer un portafolio de proyectos innovadores para la generación de energías alternativas provenientes del mar.</p>



TABLA II  
MATRIZ FODA DE LOS TIPOS DE ENERGÍA DE ORIGEN MARINO QUE PUEDEN  
SER UTILIZADAS EN LA COSTA VENEZOLANA (DEBILIDADES Y AMENAZAS)

Debilidades	Amenazas
<p><u>Mareomotriz</u> Poco aprovechamiento energético en costas de amplitud de baja marea (características micromareales) de la costa venezolana. Altos costos de inversión en la tecnología asociada.</p> <p><u>Maremotérmica</u> Elevados costos de instalación y operacionales de las tecnologías que aprovechan esta energía.</p> <p><u>Undimotriz</u> Las tecnologías asociadas a la obtención de energías alternativas son mayormente de diseño extranjero, por lo que es limitado el conocimiento sobre su instalación, reparación y servicio técnico.</p> <p><u>Eólica</u> Débil conocimiento sobre sustentabilidad medio ambiental. Déficit presupuestario para la implementación de programas energéticos alternativos.</p>	<p><u>Mareomotriz</u> Es de limitado aprovechamiento en Venezuela, ya que la mayor parte de la costa es micromareal, con variaciones entre los 10 y 20 cm en el mar Caribe. Las zonas con cambios mareales apreciables, están asociadas a sitios con una gran riqueza ambiental y biológica, como por ejemplo el Delta del Orinoco.</p> <p><u>Maremotérmica</u> El acelerado proceso del calentamiento global, genera la emisión de gases con efecto invernadero, tales como el CO<sub>2</sub>. Debido a la diversidad de tecnologías asociadas a la generación de energías alternativas, se corre el riesgo de equivocación en el uso de las mismas.</p> <p><u>Undimotriz</u> La devaluación del bolívar, podría limitar la adquisición, instalación y supervisión de tecnologías para la obtención de energías de origen marino.</p> <p><u>Eólica</u> Implementación de tecnologías de electrificación y actividades agresivas con el medioambiente. Crisis política y económica del país. Posibilidad de implementar políticas agresivas orientadas al uso de energías convencionales (eléctrica).</p>

Considerando la existencia de tecnologías que aprovechan el oleaje de las playas, resulta pertinente su instalación en otras zonas costeras del país que carecen de la energía tradicional. De este modo puede beneficiarse el entorno pues sirven al mismo tiempo como rompeolas, reduciendo así eventuales problemas de erosión. Si se toma ventaja de factores tales como la pendiente de la playa y el tamaño del grano de arena, como característica resaltante de las costas venezolanas, cabe organizar equipos de investigación para realizar estudios comparativos que permitan evaluar la adaptabilidad y eficiencia de las diferentes tecnologías asociadas a la generación de energías oceánicas de acuerdo a las condiciones de corriente, oleaje, mareas y gradientes térmicos que caracterizan al mar territorial venezolano.

Debido a la incidencia directa de los vientos alisios, sería factible establecer parques eólicos marinos en las costas de los estados del norte costero, como Falcón, Zulia y Nueva Esparta, lo que daría la oportunidad de establecer un portafolio de

proyectos innovadores para la generación de energías alternativas provenientes del mar. La creación del programa gubernamental Sembrando Luz, la Ley Orgánica del Sistema y Servicio Eléctrico, el Plan de la Patria y la creación de la Unidad de Energía Renovable de Venezuela (UNERVEN) como una filial de PDVSA Industrial, constituyen la base para la definición de políticas energéticas alternativas como impulso a las energías renovables en Venezuela (Herrera, 2015).

#### *Debilidades-Oportunidades*

Si se realizan mejoras en cuanto a la adaptación tecnológica de los convertidores de energía marina a las características oceanográficas y geológicas de la costa venezolana (micromareas, altura y período de oleaje, profundidades >1000m en la plataforma continental), y se logra un mejor aprovechamiento energético de la misma, se justificaría la instalación de nuevas tecnologías que aprovechen la corriente de mareas y las corrientes marinas asociadas, el oleaje y las diferencias térmicas entre masas de agua

superficiales y profundas en zonas costeras con acceso limitado a la energía convencional. Por otra parte, si se lograsen disminuir los costos de inversión en las referidas tecnologías, podrían aprovecharse de manera natural los movimientos de las masas de agua marina. Así mismo se podrían realizar estudios prospectivos sobre el alcance futuro y la sostenibilidad de este tipo de energías provenientes del mar. Además, si presupuestariamente se llegase a disponer de recursos suficientes para la implementación de programas energéticos amigables con el ambiente, entonces podría establecerse una política energética alternativa, como impulso a las energías renovables en Venezuela y se podría al mismo tiempo establecer un portafolio de proyectos innovadores para el aprovechamiento de energías alternativas provenientes del mar.

#### *Debilidades-Amenazas*

Las características micromareales en el mar Caribe limitan el aprovechamiento de este tipo de energía marina en la costa venezolana. Además, las zonas

costeras donde se presentan cambios mareales apreciables, comprenden ecosistemas con un gran valor de conservación debido a su biodiversidad. La energía maremotérmica se ve limitada por los costos de instalación y operacionales, además de que presenta rendimientos termodinámicos bajos (2-7%). La tecnología para el aprovechamiento de la energía proveniente del oleaje ha sido diseñada en países europeos, adaptadas a las características oceánicas del Atlántico Norte, con solo una iniciativa en Venezuela en cuanto al diseño de dispositivos convertidores de energía oceánica para el aprovechamiento del oleaje. Realizar parques eólicos marinos es costoso a nivel de instalación y costos operacionales en relación a esa misma iniciativa en tierra firme. Dichas instalaciones se verían amenazadas por el tráfico marítimo y la piratería.

#### *Fortalezas-Amenazas*

Si se aprovecha eficientemente la energía generada a partir de las mareas, pudiera reducirse el impacto del limi-

tado aprovechamiento en Venezuela, pues la mayor parte de la costa es micromareal, con variaciones entre los 10 y 20cm en el mar Caribe (Herrera *et al.*, 1981; Kjerfve, 1981), considerando además que las zonas con cambios mareales apreciables están asociadas a sitios con gran riqueza ambiental y biológica, como por ejemplo el Delta del Orinoco. El aprovechamiento de la diferencia térmica entre masas de agua superficiales y profundas permite minimizar el impacto del acelerado proceso del calentamiento global por emisión de gases con efecto invernadero tales como el CO<sub>2</sub>, ya que en la costa centro-oriental de Venezuela se encuentran centros urbanos (Barcelona, Puerto La Cruz) e industriales (Complejo Criogénico de Oriente José Antonio Anzoátegui; Refinería de Puerto La Cruz) de importancia. Además, si se realizan las inversiones necesarias para el desarrollo e instalación de tecnologías basadas en el aprovechamiento del oleaje de playas, de acuerdo a las características de altura y período de las olas, y los componentes energéticos (cinético y potencial) del oleaje costero venezolano, se fortalece el uso de dispositivos que aprovechen este tipo de energías y que al mismo tiempo disminuyan los procesos erosivos en las playas. De esa forma se reducirían las consecuencias debidas a que la tecnología para el aprovechamiento de la energía proveniente del oleaje es diseñada principalmente en países europeos con zonas costeras en el Atlántico y el Mar del Norte, lo que hace que la importación de dicha tecnología sea costosa debido a la debilidad cambiaria asociada a la moneda local. El aprovechamiento de corrientes marinas, puede evitar el impacto de la implementación de generación termoeléctrica y actividades agresivas con el medioambiente.

#### Localidades Potenciales para el Aprovechamiento de la Energía del Oleaje

Las playas arenosas se caracterizan por parámetros tales como tamaño del grano, pendiente, características del oleaje

y de las mareas. Factores como la pendiente de la playa y el tamaño del grano de arena son modulados por la energía que transfiere el oleaje. Playas con un grano de arena de tamaño grueso a medio, pendientes abruptas y mayor altura de ola en rompiente, reciben mayor energía en el oleaje en comparación a playas con grano de tamaño fino, pendiente suave y menor altura de ola. (Dexter, 1984, 1992; Lewis, 1984; McLachlan, 1990; Defeo *et al.*, 1992; Defeo y McLachlan, 2005; McLachlan y Dorvlo, 2005). Por consiguiente las variables ambientales señaladas pueden ser utilizadas como indicadores de zonas costeras con potencial aprovechamiento del oleaje como fuente energética. En base a estas consideraciones se reseñan estudios que han evaluado estos indicadores en distintas zonas de la costa venezolana.

Herrera (2013) caracterizó un grupo de playas ubicadas a lo largo de la costa en el estado Vargas, ubicadas en dos zonas: este (Los Caracas, Anare, Pantalera, los Ángeles) y Oeste (Chiriviche de la Costa, Tarma, Sapito, Puerto Viejo, Playa Verde). En cada playa se midieron porcentaje de pendiente, tamaño medio del grano de arena (mm), y altura del oleaje (cm). Se encontró que las localidades ubicadas en las playas de la zona este presentan un tamaño medio del grano (0,231-0,620mm), pendiente (11,28-20,23%) y altura de oleaje (90-180cm) mayores (Prueba T,  $p < 0,05$ ) que las playas de la zona oeste (0,185-0,332mm; 8,95-16,64% y 34,5-64cm, respectivamente). Concluyó que las playas ubicadas en la zona este de la costa evaluada, presentan mayor potencial de energía en el oleaje que las ubicadas en la zona oeste.

Solana y Castellano (2006) midieron intervalos de altura de olas costa afuera en la costa de Golfo Triste (centro-occidente de Venezuela) entre diciembre 2003 y mayo 2004, los que variaron entre 50 y 200cm, con períodos que fluctuaban entre 6 y 14s, lo cual es

indicativo de zonas potenciales de aprovechamiento energético del oleaje. Herrera (2007) midió la variación temporal de las pendientes de playa Tucacas (Golfo Triste), y Agua Sal (Higuerote, centro-oriente de Venezuela), presentando ambas playas pendientes similares, que fluctuaron entre 1,6 y 5,3%, menores a las de las playas evaluadas en el estado Vargas. Basado en la pendiente de la playa, aquellas ubicadas en el estado Vargas están sometidas a un mayor régimen de energía del oleaje.

#### Conclusión y Recomendaciones

1- La utilización del movimiento de las masas de agua marina como fuente generadora de energía es una alternativa de utilización factible a lo largo de la zona costera venezolana, sobre todo en aquellas zonas o regiones donde el sistema de suministro energético convencional no existe o es insuficiente.

2- Cabe establecer cuál es el nivel de desarrollo tecnológico asociado al aprovechamiento energético de los procesos costeros litorales, su evaluación analítica en cuanto aplicabilidad en la zona costera venezolana, y las consideraciones tecnológicas y económicas para su adaptación.

3- Se han hecho estimaciones de costo de inversión y mantenimiento en referencia a las energías derivadas de las corrientes de marea, la diferencia térmica y el oleaje en el Reino Unido y Asia, pero deben realizarse las mismas estimaciones en la costa venezolana, en base a la evaluación espacial y temporal de los procesos oceánicos que la caracterizan. Como primer paso, se deben identificar las zonas potenciales de aprovechamiento de tales procesos litorales.

4- Entre las distintas tecnologías analizadas en este trabajo destaca, para su utilización en la zona costera venezolana, la energía proveniente del oleaje y mediante la tecnología CETO. De las fuentes de ener-

gía marina evaluadas, se puede establecer que la energía mareomotriz presenta menor potencial de desarrollo debido a las características micromareales de la costa venezolana.

5- Cabe resaltar la necesidad de conocer al detalle los procesos físicos marino-costeros en la costa del país para un aprovechamiento más eficiente en cuanto a obtención de energía oceánica y para la adaptación y diseño de las tecnologías existentes a las condiciones de corriente, oleaje, mareas y gradientes térmicos que caracterizan al mar territorial circundante.

6- A partir de la identificación de zonas costeras venezolanas con potencial de aprovechamiento de la energía proveniente del oleaje según fuentes de información disponibles, se pueden realizar futuros proyectos para un seguimiento temporal de las características del oleaje y realizar ajustes en la tecnología existente para el aprovechamiento de la energía proveniente del mismo.

7- El desarrollo de futuros dispositivos de convertidores de energía oceánica beneficiaría a las poblaciones ubicadas en la zona costera que tienen problemas de suministro eléctrico y así mitigaría la escasez energética existente (Herrera, 2015). La utilización de energías renovables y limpias contribuiría a un mejoramiento de la calidad de vida de sus habitantes de esas zonas.

#### REFERENCIAS

- AIE (2007) *Manual de Estadísticas Energéticas*. Agencia Internacional de Energía. París, Francia. 208 pp.
- AIE (2009) *CO<sub>2</sub> Emissions from Fuel Combustion: Highlights*. 35ª ed. Agencia Internacional de Energía. París, Francia. 122 pp.
- AIE (2012) *CO<sub>2</sub> Emissions from Fuel Combustion: Highlights*. Agencia Internacional de Energía. Luxemburgo. 138 pp.
- Ball M, Wietshel M (2009) The Future of hydrogen- opportunities and challenges. *Int. J. Hydrog. Energy* 34: 615-627.

- Callaghan J., Boud R. (2006). Future Marine Energy Results of the Marine Energy Challenge: Cost competitiveness and growth of wave and tidal stream energy. The Carbon Trust. <http://ec.europa.eu/ourcoast/download.cfm?fileID=967> (Cons. 30/03/2017).
- Chingotto M. (2006). Energía Mareomotriz. ¿Sí? ¿Dónde? ¿No? ¿Por Qué? Conclusiones. *Bol. Ctro. Naval* 813: 101-107.
- CNUCYD (2008) *El Transporte Marítimo y el Reto del Cambio Climático*. Conferencia de las Naciones Unidas sobre Comercio y Desarrollo. 25 pp. [http://unctad.org/es/Docs/cimem1d2\\_sp.pdf](http://unctad.org/es/Docs/cimem1d2_sp.pdf)
- Defeo O, Jaramillo E y Lyonnet A (1992) Community structure and intertidal zonation of the macroinfauna on the Atlantic Coast of Uruguay. *J. Coast. Res.* 8: 830-839.
- Defeo O, McLachlan A (2005) Patterns, processes and regulatory mechanisms in sandy beach macrofauna: a multi-scale analysis. *Mar. Ecol. Prog. Ser.* 295: 1-20.
- Dexter D (1984) Temporal and spatial variability in the community structure of the fauna of four sandy beaches in South-eastern New South Wales. *Aust. J. Mar. Freshw. Res.* 35: 663-672.
- Dexter D (1992) Sandy beach community structure: the role of exposure and latitude. *J. Biogeogr.* 19: 59-66.
- Dubois S, Klein K, Villemure M (2008) Viability of renewable technologies from marine derived energy as global sources of electricity. *MSURJ* 3: 28-31.
- EIA (2015) *Country Analysis Briefs: Venezuela*. United States Energy Information Administration. [www.eia.doe.gov/V:\PRJ\NewCABs\V6\Venezuela\Full.html](http://www.eia.doe.gov/V:\PRJ\NewCABs\V6\Venezuela\Full.html) (Cons. 07/10/2013).
- Febres-Ortega G, Herrera L (1975) Interpretación dinámica de algunas de las características oceanográficas de la Fosa de Cariaco, Mar Caribe. *Bol. Inst. Oceanogr.* 14: 3-29.
- Fernández Diez P (2005) *Energía Mareomotriz*. Departamento de Ingeniería Eléctrica y Energética. Universidad de Cantabria. <http://comunidad.eduambiental.org/file.php/1/cursos/contenidos/docpdf/capitulo24.pdf>. 13 pp. (Cons. 17/05/2017).
- Fraenkel P (2007) Marine current turbines: pioneering the development of marine kinetic energy converters. *Proc. IMechE* 221A: 159-169.
- Hermosilla Villalba F (1997) Centrales mareomotrices, treinta años de historia. *ROP* 3370: 51-68.
- Herrera A (2007) *Influencia de los Ríos sobre Ecosistemas Marino Costeros: Ejemplos Sobre Comunidades de Playas Arenosas*. Tesis Doctoral. Universidad Simón Bolívar. Venezuela. 222 pp.
- Herrera A (2013) Evaluación preliminar del potencial de energía del oleaje en playas del estado Vargas. Segundo Congreso Venezolano de Ciencia Tecnología e Innovación en el marco de la LOCTI y el PEII. Ministerio del Poder Popular para Ciencia, Tecnología e Innovación. 7 al 10 de noviembre 2013. Caracas, Venezuela.
- Herrera A (2015). Uso histórico de la energía y perspectivas de investigación de la energía alternativa en la Universidad Marítima del Caribe. *Doctum* 15: 167-182.
- Herrera L, Febres G, Ávila, R (1981) Las mareas en aguas venezolanas y su amplificación en la región del Delta del Orinoco. *Acta Cient. Venez.* 32: 299-306.
- Jung J, Lee H, Kim H, Yoo Y, Choi W, Kwak H (2016) Thermieconomic analysis of an ocean thermal energy conversion plant. *Renew. Energy* 86: 1086-1094.
- Kjerfve B (1981) Tides of the Caribbean Sea. *J. Geophys. Res.* 86: 4245-4247.
- Lewis D (1984) *Practical Sedimentology*. 1ª ed. Van Nostrand Reinhold. Nueva York, EEUU. 229 pp.
- Martínez A (2001) Energías Renovables: potencial energético de recursos aprovechables. División de Alternativas Energéticas, Ministerio de Energía y Minas, Venezuela.
- McLachlan A (1990) Dissipative beaches and macrofauna communities on exposed intertidal sands. *J. Coast. Res.* 6: 57-71.
- McLachlan A, Dorvlo A (2005) Global patterns in sandy beach macrobenthic communities. *J. Coast. Res.* 21: 674-687.
- Montero Sousa J A, Calvo Rolle J (2013) Energía mareomotriz: perspectiva histórica y estado actual. *Téc. Indust.* 301: 54-60.
- Moriarty N, Honnery D (2009) Hydrogen's role in an uncertain energy future. *Int. J. Hydrog. Energy* 34: 31-39.
- Muller-Karger F, Varela R; Thunell R, Scranton M, Bohrer R, Taylor G; Capelo J, Astor Y, Tappa E, Ho T, Walsh J (2001) Annual cycle of primary production in the Cariaco Basin: Response to upwelling and implications for vertical export. *J. Geophys. Res.* 106 (C3): 4527-4542.
- Muradov N, Veziroglu T (2008) "Green" path from fossil-based to Hydrogen economy: an overview of carbon -neutral technologies. *Int. J. Hydrog. Energy* 33: 6804-6839.
- NOVA (2009) Instalación y prueba de un prototipo a escala reducida de convertidor de energía oceánica con una capacidad instalada de 10 kw en playa La Punta, El Playón, Municipio Ocumare de la Costa de Oro, Estado Aragua. Documento de Intención. Resumen Ejecutivo. NOVA Energías Renovables 2009, C.A., Venezuela, 24 pp.
- ONU (2013) *Emisiones de Dióxido de Carbono (CO<sub>2</sub>) en Miles de Toneladas Métricas de CO<sub>2</sub> (CDIAC)*. División Estadística. Naciones Unidas <http://mdgs.un.org/unsd/mdg/SeriesDetail.aspx?srid=749&crid=>. (Cons. 01/03/2014).
- PDVSA (2012) *Informe de Gestión Anual 2012*. [www.pdvsa.com](http://www.pdvsa.com) (Cons. 06/05/2014).
- Posso F (2004) Estudio del desarrollo de las energías alternativas en Venezuela. *Anales de la Universidad Metropolitana* 4: 147-164.
- Sanhueza E (2013) Panorama energético del siglo 21: ¿más de lo mismo? *Inter ciencia* 38: 242.
- Solana P, Castellano B (2006) Mediciones oceanográficas costa afuera del sistema costero de Morrocoy, Venezuela. XXII Congreso Latinoamericano de Hidráulica, Ciudad Guayana, Venezuela.
- Sorensen H, Naef S (2008) Report on technical specification of reference technologies (wave and tidal power plant). New Energy Externalities Developments for Sustainability (NEEDS). Dirección General para Investigación de la Comunidad Europea en el contexto del 6o Programa Marco. 59 pp.
- Vázquez A, Iglesias G (2016) Capital costs in tidal stream energy projects - A spatial approach. *Energy* 107: 215-226.
- Vázquez A, Iglesias G (2016) A holistic method for selecting tidal stream energy hotspots under technical, economic and functional constraints. *Energy Conv. Manag.* 117: 420-430.