

Wave energy resource assessment at southern coast of the Gulf of Mexico

Alejandro González-Carrillo ^a, Raziél Ruiz-Cabrera ^a, Quetzalcoatl Hernández-Escobedo ^a,
Aránzazu Fernández-García ^b & Francisco Manzano-Agugliaro ^c

^a Facultad de Ingeniería Universidad Veracruzana Campus Coatzacoalcos, Minatitlán, México, alexcarrillo.gc@gmail.com,
razielruizc@gmail.com, qhernandez@uv.mx

^b CIEMAT- Plataforma Solar de Almería, Almería, Spain. arantxa.fernandez@gmail.com

^c University of Almería, Department of Engineering, Almería, Spain. fmanzano@ual.es

Received: September 18th, de 2014. Received in revised form: November 27th, 2014. Accepted: December 16th, 2014

Abstract

Find alternative energy sources is one of the challenges that came with XXI century and this paper makes an analysis about wave energy, which presents several advantages over fossil based energy and even other renewable energy sources. Among them are its low environmental impact and its high energy density. Wave energy is beginning to be considered as an important and promising renewable resource in many countries. The objective of this paper is to evaluate the wave energy potential at the southern coast of the Gulf of Mexico; the sea states were observed and was obtained that the available mean wave power is 55.91 W/m. In addition, this paper shows that, in the study site, the most energetic season is fall and the less energetic season is spring. This differs from the global trend, were the most energetic season is winter, and the less energetic season is spring.

Keywords: renewable energy, wave energy, Gulf of Mexico

Evaluación del potencial energético del oleaje en la costa sur del Golfo de México

Resumen

Hallar nuevas fuentes de energía es uno de los retos que trajo consigo el siglo XXI. En este trabajo se hace un análisis sobre la energía de las olas, la cual presenta varias ventajas significativas con respecto a otras fuentes de energías basadas en combustibles fósiles e, inclusive, otras fuentes renovables de energía. De entre estas ventajas destacan el bajo impacto ambiental y su alta densidad energética, respectivamente. La energía de las olas del mar se considera cada vez en más países como un recurso renovable importante y sobre todo prometedor. El objetivo de este trabajo es la evaluación del potencial energético de las olas en la costa sur del Golfo de México; en él se observó el comportamiento del oleaje y se obtuvo que la potencia media anual disponible es de 55.91 W/m. Adicionalmente, se destaca el comportamiento estacional de las olas en la región; pues, en este punto, la estación más energética es otoño y la menos energética es primavera, lo cual difiere de la tendencia mundial, en la que invierno y verano son la más y la menos energética, respectivamente.

Palabras clave: Energía renovable, energía de las olas, Golfo de México.

1. Introducción

La creciente demanda energética global, que actualmente se estima en aproximadamente 2 TW [1], y los métodos tradicionales de generación de energía eléctrica han ocasionado problemas ambientales serios. Las fuentes de energía renovable juegan un papel muy importante en la búsqueda de alternativas para la

producción de electricidad, con el fin de disminuir el impacto negativo que produce el uso de combustibles fósiles [2,3].

Actualmente en México la mayor parte de la energía es generada a través del carbón, petróleo y gas [4], no obstante en el año 2008 se promulgó la Ley para el Aprovechamiento de Energías Renovables y el Financiamiento de la Transición Energética, donde se establece que se fijará como meta una

participación máxima del 65% de combustibles fósiles en la generación de energía eléctrica para el año 2024, del 60% en el 2035 y del 50% en el 2050 [5]. Este objetivo sólo puede ser alcanzado mediante el desarrollo de la investigación de las fuentes de energía renovable disponibles en cada región. En las zonas costeras, como el sur del Golfo de México; el potencial energético de las olas se perfila como uno de los pilares para el aprovechamiento de estas energías.

Casi toda la energía que existe en el planeta proviene del Sol [6] y las olas en los océanos no son la excepción. Al calentar éste la superficie de la Tierra de manera no uniforme, se da lugar a la formación del viento y éste a su vez, al viajar a través de la superficie de los vastos océanos, da origen a las olas [7]. A diferencia de la energía solar y eólica, la energía undimotriz es más predecible, persistente y espacialmente concentrada [8]; y se estima que hay entre 1 y 10 TW disponibles en los océanos del mundo [9] y de esta cantidad, entre el 10% y 25% puede ser transformada en electricidad [10]. Sin embargo a pesar de todas las ventajas que representa, la energía oceánica no está tan desarrollada como el resto de fuentes de energía alternativa [11] y es por ello que su comercialización a gran escala es prácticamente inexistente. Pese a ello la investigación acerca de ella se ha intensificado en los últimos años dando como resultado algunos proyectos en los que se operan en condiciones de mar abierto dispositivos extractores experimentales de energía de las olas a escala real (WEC, por sus siglas en inglés) [12, 13], como el realizado por [14] quien propone un convertidor de columna de agua oscilante.

Alrededor del mundo se han realizado estudios sobre el potencial energético de las olas, en países como España [15,16,17,18], Portugal [19,20], Italia [21,22], Corea [23], China [24], Irán [25], Australia [26] y Estados Unidos [27,28] por mencionar algunos; y también estudios donde se realiza esta misma evaluación a escala mundial [29,30,31], en estos últimos estudios el Golfo de México es una región considerada con un potencial energético oceánico de alrededor de 80 TWh/año [32]. El objetivo de este trabajo es evaluar el potencial energético en el sur del Golfo de México para la posible explotación del recurso energético oceánico.

2. Área de estudio y datos

2.1. Área de estudio



Figura 1. Coatzacoalcos, Veracruz. México
Fuente: Elaboración propia con datos de INEGI, 2014.



Figura 2. Posición geográfica de la base de datos
Fuente: Elaboración propia con datos de INEGI, 2014.

El Golfo de México es una cuenca oceánica, contenida entre los litorales de México, Estados Unidos de América y Cuba, como se muestra en la Fig. 1, la cual ha sido elaborada con datos de [33]. En la parte mexicana del Golfo de México se encuentran las costas de los siguientes estados: Tamaulipas, Veracruz, Tabasco, Campeche y Yucatán abarcando 3294 km, aproximadamente [34]. Ya que el aprovechamiento de los recursos depende de su disponibilidad, se piensa en Coatzacoalcos como un lugar donde se puede llevar a cabo esta investigación. Localizado en la costa sur del estado de Veracruz, México; está situado en las coordenadas geográficas 18°08'56"N, 94°24'41"W. Por su ubicación geoestratégica, tiene una trascendental participación en el Sistema Portuario Nacional, al representar la ruta más corta para interconectar el Océano Atlántico con el Océano Pacífico.

El estudio realizado por [35] determinó el régimen medio de oleaje en la desembocadura del río León donde se encontró que el oleaje de fondo tiene poca influencia en el oleaje al interior, es por ello que se seleccionó la desembocadura del río Coatzacoalcos, con una longitud de 2.3 km, como se observa en la Fig. 2 (elaborada con datos de [33]), la cual es un punto accesible a la conexión a la red eléctrica. La profundidad local es de alrededor de 15 m a 1.6 km de la costa en condiciones promedio de alta mar y baja mar [36].

2.2. Fuente de datos de oleaje

Existen dos fuentes de datos disponibles para la costa de Coatzacoalcos. La primera de ellas proviene de un sistema de predicción desarrollado en la Universidad de Carolina del Sur (UCS) con registros en un periodo de 41 años (1970-2011). El modelo que utiliza proviene del XtideProgram [37]. Los datos se presentan de forma horaria, por lo que cuenta con 359400 registros de oleaje en un solo punto.

La segunda fuente de datos es provista por el predictor de oleaje del Grupo Interacción Océano Atmósfera, de la Facultad de Ciencias de la Atmósfera de la Universidad Nacional Autónoma de México (UNAM) [38], éste contiene

registros de altura y periodo para todo el Golfo de México. El predictor utiliza el modelo WAVEWATCH III, un modelo de tercera generación creado por la Administración Nacional Oceánica y Atmosférica (NOAA, por sus siglas en inglés), el Servicio Meteorológico Nacional (NWS, por sus siglas en inglés) y el Centro Nacional de Predicción Ambiental (NCEP, por sus siglas en inglés), todas agencias gubernamentales de Estados Unidos de América. Esta base de datos tiene zonas en las que coincide con el área de estudio de la primera fuente de este trabajo. Ambas fuentes presentan los datos de forma horaria registrando la altura y el periodo.

Los datos se agruparon para describir las condiciones anuales, mensuales y estacionales, en donde invierno fue definido entre los meses diciembre-febrero; primavera marzo-mayo; verano junio-agosto y otoño septiembre-noviembre.

3. Metodología

Un conjunto estadístico fue obtenido para cada rango temporal. Este conjunto incluye máximos, mínimos, promedio, desviación estándar y mínimos cuadrados.

La energía contenida en las olas de mar está definida por la energía de cada partícula (E_w) en ella [39], como se muestra en la ec. 1, conformada por la energía cinética (E_C) y la energía potencial (E_P)

$$E_w = E_C + E_P = \frac{\rho g}{8} H^2 \quad (1)$$

donde ρ es la densidad del agua de mar, g es la aceleración gravitacional y H es la altura ola. Dicha relación varía dependiendo las características del oleaje, la ubicación geográfica y la batimetría del área estudiada.

Cuando en un análisis del recurso energético del oleaje se prioriza la densidad de probabilidad de la distribución de energía o espectro energético de las olas [27], se añaden nuevas variantes como la dirección y la velocidad de estas, cuya expresión de la energía de la ola (J_{ij}) se ve reflejada en la ec. 2.

$$J_{ij} = \rho g C_{g,i} S_{ij} \quad (2)$$

donde $C_{g,i}$ es la velocidad del grupo de olas y S_{ij} es el espectro energético de la ola.

Otra aproximación que puede usarse la establecen [16,39] y se representa en la ec. 3.

$$P = \delta H_s^2 T_e \quad (3)$$

donde P es la potencia de la ola, δ es la variable representativa del espectro energético de la ola, H_s es la altura significativa de la ola y T_e es el periodo energético.

Además de estas aproximaciones, existen ecuaciones que describen el comportamiento de la energía de las olas si se encuentran en aguas profundas o someras. En [31] se plantea que para una zona donde se cumpla la condición $h > L/2$ se considerará como aguas profundas; donde h es la profundidad local y L es la longitud promedio de las olas (longitud de onda)

No obstante, la longitud de onda no puede ser obtenida directamente en las mediciones de oleaje, [31] propone la ec. 4 para determinarla, utilizando la relación directa que existe entre la longitud de onda y el periodo:

$$L = \frac{gT^2}{2\pi} \quad (4)$$

donde L es la longitud de onda del oleaje, g es la aceleración gravitacional, y T el periodo. El periodo promedio anual para el punto seleccionado es de 4.3 segundos, utilizando la Ec. 4, el resultado para L es de 28.83 metros. La profundidad local considerada para el sitio donde se realiza el muestreo es de 15 metros, con lo cual la condición de profundidad se cumple y por lo tanto, en este estudio se utilizará la aproximación del cálculo de potencia en aguas profundas.

El cálculo de potencia para olas regulares en aguas profundas en kW/m [41,42], se obtiene por la ec. 5.

$$P = \frac{\rho g^2}{64\pi} H_s^2 T_e \quad (5)$$

El periodo energético T_e es definido como una función del momento espectral caracterizada por la ec. 6.

$$T_e = \frac{m_{-1}}{m_0} \quad (6)$$

donde m_{-1} y m_0 son coeficientes derivados del espectro energético de la ola que muestran la variación de la misma, cuya aproximación se realiza también a través del periodo promedio [42] mediante la ec. 7

$$T_e = \gamma T_p \quad (7)$$

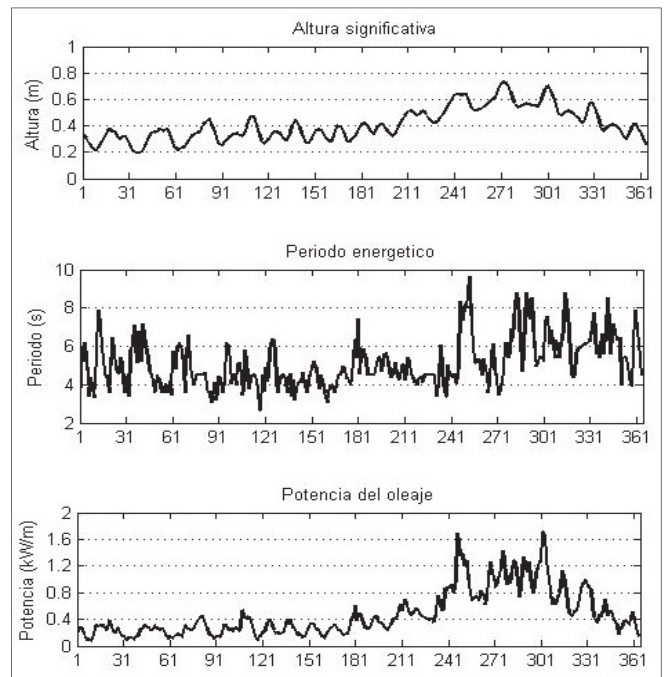


Figura 3. Comportamiento del oleaje a lo largo del año. Fuente: Elaboración propia con datos de UCS y UNAM, 2013.

donde T_p es el periodo promedio y γ es un coeficiente que depende de la forma del espectro energético de la ola, cuyo valor oscila entre 0.8 y 1, la aproximación utilizada en este trabajo, como lo hecho en [16,31,42], será de $\gamma = 0.9$, que es equivalente al que se obtiene mediante el programa JONSWAP.

4. Análisis y cuantificación de la energía disponible

Utilizando la ec. 5 se obtuvieron los datos de potencia cada hora. Con la finalidad de observar las tendencias en la distribución de la potencia, el periodo energético y la altura significativa de las olas, se graficaron los resultados obtenidos. Para optimizar el análisis de los datos, se consideraron varias escalas temporales, anual, semestral, mensual, diaria y horaria, estas escalas se proponen para obtener un solo valor, una medida conveniente de variabilidad bajo el dominio del tiempo con el fin de identificar la energía de las olas. En la Fig. 3 se presentan los resultados del análisis anual, en el que se muestran los resultados de las potencias cada día en kW/m. También se incluyeron las gráficas de la altura significativa y periodo energético para observar la relación que existe entre ambas.

Se puede apreciar que existe un incremento notable en la potencia durante la segunda mitad del año, cuyo comportamiento es muy similar al que muestra el periodo energético en ese periodo. Por otra parte, a pesar de que existen incrementos significativos del periodo energético en el comienzo del año, la potencia parece ser más influenciado por la altura del oleaje. El valor máximo anual ocurre el 29 de Octubre con una potencia de 1.713 kW/m, mientras que el valor mínimo anual se presenta el 10 de Enero con una potencia de 0.078 kW/m. En la Figura 3 se muestra una marcada tendencia de incremento del flujo energético durante la segunda mitad del año.

De este análisis se obtuvo también que la potencia media anual estimada es de 0.56 kW/m.

4.1. Variabilidad Temporal

Es necesario mencionar también que para evaluar el potencial energético del oleaje no sólo deben tomarse en cuenta la magnitud de los picos registrados. La variabilidad del flujo energético es un aspecto fundamental para determinar si es viable o no, la posibilidad de aprovechar la energía que albergan las olas. Sitios con un flujo energético moderado y estable han demostrado ser más atractivos que sitios donde este flujo es mayor, pues en estos últimos existe mayor inestabilidad y por lo tanto, es menos confiable. La cantidad de energía disponible en los mares que se ubican en latitudes altas en ambos hemisferios tiende a caracterizarse por tener una gran variabilidad estacional, en contraste con las zonas cercanas al ecuador, donde el flujo energético permanece estable durante el año [30] de esto se puede enunciar una hipótesis donde la distribución estacional energética del oleaje difiere según su posición geográfica. Las mayores variaciones estacionales que ocurren fuera de los polos se encuentran en el Mar Árabe y en la costa sur del mar de China [31].

Para determinar esta estabilidad es fundamental mostrar el potencial energético disponible en diferentes escalas

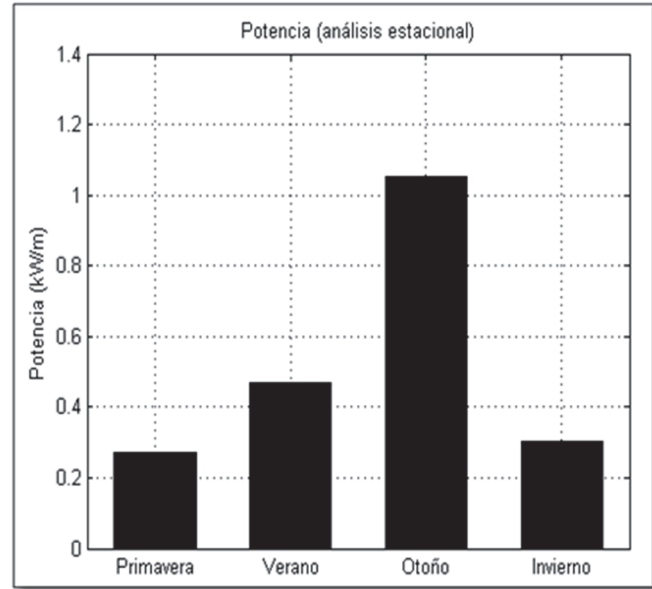


Figura 4. Estimación de la energía por estaciones
Fuente: Elaboración propia con datos de UCS y UNAM, 2013.

temporales [43]. Con el objetivo de evaluar estas escalas temporales, Cornnett propone dos coeficientes para describir la variabilidad temporal del potencial energético de las olas en un punto: el índice de variabilidad estacional (SV) y el índice de variabilidad mensual (MV) [31].

Tras haber obtenido el potencial energético utilizando la ec. 5, los resultados se agruparon con sus respectivas escalas temporales. Para apreciar mejor el comportamiento del flujo energético se graficaron los resultados.

4.1.1. Análisis Estacional

El análisis estacional SV muestra de manera puntual el flujo energético en cada estación durante el año. La gráfica es mostrada en la Fig. 4, y como se puede apreciar, es menos descriptiva que la gráfica del análisis anual, sin embargo es necesaria; ya que, como se mostrará más adelante, proporciona los datos que se requieren para calcular el SV .

En la Fig. 4 se presenta la potencia estimada para cada una de las estaciones del año en el área de estudio. La potencia media en otoño es de 1.05 kW/m y es la estación con un mayor flujo energético; seguida de verano con 0.466 kW/m. Después está invierno con 0.301 kW/m y por último, la estación menos energética es primavera con 0.26 kW/m.

El índice de variabilidad estacional SV está definido en la ec. 9.

$$SV = \frac{P_{S1} - P_{S4}}{P_{year}} \quad (8)$$

donde P_{S1} es la potencia media de la estación más energética del año, P_{S4} es la potencia media de la estación menos energética del año y P_{year} es la potencia media anual.

Utilizando la ec 8, se obtiene $SV = 1.41$. Este valor indica una variabilidad estacional moderada, siendo $SV = 0$ una variabilidad ideal; y $SV = 3$ la mayor variabilidad registrada [31].

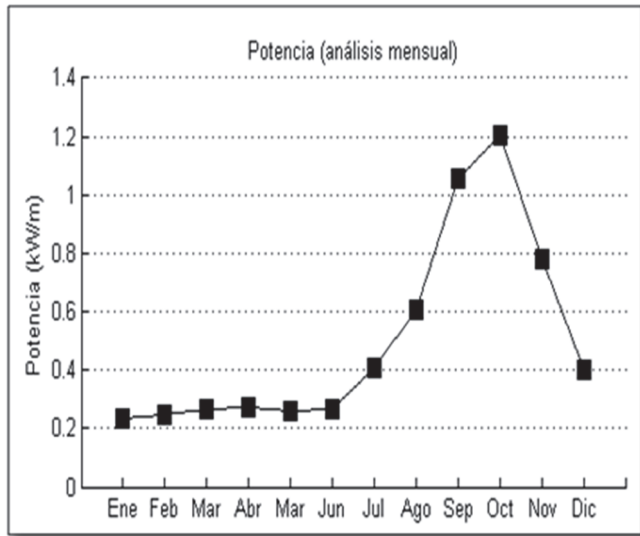


Figura 5. Estimación de la energía media mensual.
Fuente: Elaboración propia con datos de UCS y UNAM, 2013.

4.1.2. Análisis Mensual

El análisis mensual ofrece una perspectiva más detallada sobre cómo evoluciona el comportamiento del flujo energético a lo largo del año. A diferencia del análisis estacional, en el que solamente se observan de manera puntual las estaciones del año en las que hay más o menos energía disponible, en el análisis mensual se puede observar dónde comienza a presentarse un incremento considerable en la energía undimotriz e igualmente identificar dónde decrece. En la Fig. 5 se presentan los resultados obtenidos del cálculo de la potencia estimada para cada mes del año. En ella se observa que durante el mes de junio (verano) comienza a aumentar la energía disponible, hasta llegar a su punto máximo en octubre (otoño) con una potencia media de 1.206 kW/m, después de alcanzar este máximo, decrece hasta llegar a su punto mínimo en enero (invierno) cuya potencia media es de 0.233 kW/m.

El índice de variación mensual MV está definido por la ec. 9.

$$MV = \frac{P_{M1} - P_{M12}}{P_{year}} \quad (9)$$

donde P_{M1} es la potencia media del mes más energético del año, P_{M12} es la potencia del mes menos energético del año y P_{year} es la potencia media anual.

Utilizando la ec. 9 se obtiene $MV = 1.74$, que también indica una variabilidad moderada con $MV = 0$ considerada una variabilidad ideal y $MV = 3.6$ la mayor variabilidad registrada [31].

5. Resultados y Discusión

Este estudio se realizó con la finalidad de dar a conocer y cuantificar el potencial energético del oleaje en la costa sur del Golfo de México. Los resultados muestran que en la zona estudiada el recurso energético es algo menor que otros sitios

investigados [15-28]. Este estudio ha permitido definir variables importantes en el comportamiento del oleaje para el Golfo de México, como el coeficiente de Variación Estacional, $SV = 1.41$, que es equiparable a los índices que se pueden obtener de los estudios del potencial energético de las olas realizados en España [16-18], Corea [23] y en Estados Unidos de América [27], lo cual, realiza un aporte a la investigación de la energía undimotriz en el mundo. Igualmente el coeficiente de Variación Mensual, $MV = 1.74$, es también muy cercano a los índices que se pueden obtener de los estudios del potencial energético de las olas realizados en Italia [22], Corea [23] y en Estados Unidos de América [32], corroborando la elección de la metodología presentada.

Adicionalmente, se observó algo interesante en el comportamiento de la energía a lo largo del año. En la Figura 4, se presenta la distribución estacional energética del oleaje; ahí se observa que la estación más energética es otoño y la de menor potencial energético es primavera, lo cual difiere de la tendencia mundial, porque usualmente la estación con mayor potencial energético es invierno y la menos energética es verano [15-17,20,30-31]. Este hecho es, sin duda relevante, pues demuestra que este tipo de energía puede complementar estacionalmente otras fuentes de energía renovable como la solar donde el mayor recurso disponible está en verano y por tanto esto abre nuevas perspectivas para el aprovechamiento del potencial energético del oleaje en el país.

Agradecimientos

Los autores agradecen por la disponibilidad de los datos a la Universidad de Carolina del Sur, al Grupo Interacción Océano Atmósfera de la Facultad de Ciencias de la Atmósfera de la Universidad Nacional Autónoma de México y a la Administración Nacional Oceánica y Atmosférica de Estados Unidos de América (NOAA, por sus siglas en inglés). Así como, un agradecimiento especial al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología de México (CONACyT) por el apoyo económico otorgado a través de la beca del Sistema Nacional de Investigadores (SNI).

Referencias

- [1] IEA, International Energy Outlook, [on line]. [Consulta 4 de abril de 2013]. Disponible en: www.iea.org.
- [2] Hernández-Escobedo, Q., Manzano-Agugliaro, F. and Zapata-Sierra, A., The wind power of Mexico. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 14 (9), pp. 2830-2840, 2010. DOI:10.1016/j.rser.2010.07.019
- [3] Hernández-Escobedo, Q., Saldaña-Flores, R., Rodríguez-García, E.R. and Manzano-Agugliaro, F., Wind energy resource in Northern Mexico. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 32, pp. 890-914, 2014. DOI: 10.1016/j.rser.2014.01.043
- [4] Verdick, J., México: Renewable Energy. U.S. Commercial Service. 2008.
- [5] LAER, Ley de Aprovechamiento de Energías Renovables. México. 2008.
- [6] Cruz-Peragon, F., Palomar, J.M., Casanova, P.J., Dorado, M.P. and Manzano-Agugliaro, F., Characterization of solar flat plate collectors. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 16 (3), pp. 1709-1720, 2012. DOI:10.1016/j.rser.2011.11.025
- [7] Brooke, J., Wave Energy Conversion. 1^{ra} Ed. Oxford: Elsevier, 187P. 2003.

- [8] Falnes, J., A review of wave-energy extraction. *Marine Structures*, 20 (4), pp. 185-201, 2007. DOI:10.1016/j.marstruc.2007.09.001.
- [9] Panicker, N.N., Power resource estimate of ocean surface waves. *Ocean Eng.* 3 (6), pp. 429-434, 1976. DOI:10.1016/0029-8018(76)90016-0.
- [10] Cruz, J., *Ocean wave energy: Current status and future perspectives*. 1^{ra} Ed., Bristol, Springer-Verlag: Berlin Heidelberg, 2008.
- [11] Manzano-Agugliaro, F., Alcayde, A., Montoya, F.G., Zapata-Sierra, A. and Gil, C., Scientific production of renewable energies worldwide: An overview. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 18, pp. 134-143, 2013. DOI:10.1016/j.rser.2012.10.020
- [12] Pahla, A., Mendes, L., Fortes, C.J., Brito-Melo, A. and Sarmento A., The impact of wave energy farms in the shoreline wave climate: Portuguese pilot zone case study using Pelamis energy wave devices. *Renewable Energy*, 35 (1), pp. 62-77, 2010. DOI:10.1016/j.renene.2009.05.025
- [13] Dalton, G.J., Alcorn, R. and Lewis, T., A 10 year installation program for wave energy in Ireland: A case study sensitivity analysis on financial returns. *Renewable Energy*, 40 (1), pp. 80-89, 2012. DOI:10.1016/j.renene.2011.09.025
- [14] Borrás-Formoso R., Ferreiro-García, R., Miguélez-Pose, F. and Fernández-Ameal, C., Making use of coastal wave energy: A proposal to improve oscillating water column converterst. *DYNA*, 81 (185), pp. 211-218, 2014. DOI:10.15446/dyna.v81n185.38572
- [15] Iglesias, G., López, M., Carballo, R., Castro, A., Fraguera, J. and Frigaard, P., Wave energy potential in Galicia (NW Spain). *Renewable Energy*, 34 (11), pp. 2323-2333, 2009. DOI:10.1016/j.renene.2009.03.030
- [16] Sierra, J.P., González-Marco, D., Sospedra, J., Gironella, X., Mösso, C. and Sánchez-Arcilla, A., Wave Energy resource assessment in Lanzarote (Spain). *Renewable Energy*, 56, pp. 480-489, 2013. DOI:10.1016/j.renene.2013.01.004
- [17] Iglesias, G. and Carballo, R., Offshore and inshore wave energy assessment: Asturias (N Spain). *Energy*, 35 (5), pp. 1964-1972, 2010. DOI:10.1016/j.energy.2010.01.011
- [18] Montoya, F.G., Aguilera, M.J. and Manzano-Agugliaro, F., Renewable energy production in Spain: A review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 33, pp. 509-531, 2014. DOI:10.1016/j.rser.2014.01.091
- [19] Mendes, R.P.G., Calado, M.R.A. and Mariano S.J.P.S., Wave energy potential in Portugal: Assessment based on probabilistic description of ocean waves parameters. *Renewable Energy*, 47, pp. 1-8, 2012. DOI:10.1016/j.renene.2012.04.009
- [20] Rusu, L. and Guedes-Soares, C., Wave energy assessments in the Azores islands. *Renewable Energy*, 45, pp. 183-196, 2012. DOI: 10.1016/j.renene.2012.02.027
- [21] Vicinanza, D., Contestabile, P. and Ferrante, V., Wave energy potential in the north-west of Sardinia (Italy). *Renewable Energy*, 50, pp. 506-521, 2013. DOI: 10.1016/j.renene.2012.07.015.
- [22] Liberti, L., Carillo, A. and Sannino, G., Wave energy resource assessment in the Mediterranean, the Italian perspective. *Renewable Energy*, 50, pp. 938-949, 2013. DOI:10.1016/j.renene.2012.08.023
- [23] Kim, G., Jeong, W.M., Lee, K.S., Jun, K. and Lee, M.E., Offshore and nearshore wave energy assessment around the Korean Peninsula. *Energy*, 36 (3), pp. 1460-1469, 2011. DOI: 10.1016/j.energy.2011.01.023
- [24] Zhang, D., Li, W. and Lin, Y., Wave energy in China: Current status and perspectives. *Renewable Energy*, 34 (10), pp. 2089-2092, 2009. DOI: 10.1016/j.renene.2009.03.014
- [25] Saket, A. and Etemad-Shahidi, A., Wave energy potential along the northern coasts of the Gulf of Oman, Iran. *Renewable Energy*, 40 (1), pp. 90-97, 2012. DOI:10.1016/j.renene.2011.09.024
- [26] Hughes, M.G. and Heap, A.D., National-scale wave energy resource assessment for Australia. *Renewable Energy*, 35 (8), pp. 1783-1791, 2010. DOI:10.1016/j.renene.2009.11.001
- [27] Lenee-Bluhm, P., Paasch, R. and Özkan-Haller, H.T., Characterizing the wave energy resource of the US Pacific Northwest. *Renewable Energy*. *Renewable Energy*, 36 (8), pp. 2106-2119, 2011. DOI:10.1016/j.renene.2011.01.016
- [28] García-Medina, G., Özkan-Haller, H.T. and Ruggiero, P., Wave resource assessment in Oregon and southwest Washington, USA, *Renewable Energy*, 64, pp. 203-214, 2014. DOI:10.1016/j.renene.2013.11.014
- [29] Gunn, K. and Stock-Williams, K., Quantifying the global wave power resource. *Renewable Energy*, 44, pp. 296-304, 2012. DOI:10.1016/j.renene.2012.01.101
- [30] Arinaga, R.A. and Cheung, K.F., Atlas of global wave energy from 10 years of reanalysis and hindcast data. *Renewable Energy*, 39 (1), pp. 49-64, 2012. DOI:10.1016/j.renene.2011.06.039
- [31] International Offshore and Polar Engineering Conference, A global wave energy assessment, Canada, International Society of Offshore and Polar Engineers, LXXX, Vancouver, Canada, pp. 1-9, 2008.
- [32] Jacobson, P., Mapping and assessment of the United States ocean wave energy resource. EPRI, Palo Alto, CA: 2011. 1024637.
- [33] INEGI, Instituto Nacional de Geografía y Estadística. [online]. [consultado octubre 2013]. Disponible en: <http://www.inegi.org.mx/geo/contenidos/datosrelieve/continental/default.aspx>
- [34] Environmental Protection Agency. General facts about the Gulf of Mexico. [online]. [consultado marzo 2014]. Aviable at: <http://www.epa.gov/gmpo/about/facts.html>
- [35] Alvarez-Silva, O., Osorio, A. and Gómez-Giraldo, A., Determination of the wave mean regime in the mouth of Leon river. *DYNA*, 79 (173), pp. 95-102, 2012.
- [36] SEMAR, Datos Generales del Puerto, [online]. [consultado octubre 2013]. Disponible en: www.semar.gob.mx
- [37] University of South Carolina. WWW Tide and Current Predictor. [online]. [consultado junio 2013]. Disponible en: <http://tbone.biol.sc.edu/tide/index.html>.
- [38] Grupo Interacción Océano Atmósfera. Pronósticos operativos para la República Mexicana. [online]. [consultado enero 2014]. Disponible en: http://grupo-ia.atmosfera.unam.mx/pronostico_wrf/.
- [39] Rodríguez, R., Ricci, P., Marón, A., Prieto, M.E., Fernández, D. and Taboada, M., Diseño y ensayos del sistema de fondeo de un convertidor de energía de las olas. *Canal de experiencias hidrodinámicas*, 209, pp. 1-31, 2008.
- [40] Instituto Tecnológico de Canarias, Identificación y caracterización del potencial de la energía de las olas en Canarias., España, s.a.
- [41] Chiu, F., Huang, W. and Tiao, W., The spatial and temporal characteristics of the wave energy resources around Taiwan. *Renewable Energy*, 52, pp. 218-221, 2013. DOI: 10.1016/j.renene.2012.10.029
- [42] Mirzaei, A., Tangang, F. and Juneng, L., Wave energy potential along the east coast of Peninsular Malaysia. *Energy*, 68, pp. 722-734, 2014. DOI: 10.1016/j.energy.2014.02.005
- [43] Hagerman, G., Southern New England wave energy resource potential building energy 2001, Tufts University, Boston, 2001.

A.I. González-Carrillo, received the BSc. Eng in Mechanical Electric Engineering in 2014. Currently, he is a research collaborator in the Faculty of Engineering, Universidad Veracruzana, Minatitlán, México.

R. Ruíz-Cabrera, received the BSc. Eng in Mechanical Electric Engineering in 2014. Currently, he is a research collaborator in the Faculty of Engineering, Universidad Veracruzana, Minatitlán, México.

Q. Hernández-Escobedo, is PhD., professor at Universidad Veracruzana, Minatitlán, México, joined the faculty of engineering in 2011. His research group uses both thermodynamic and physic simulated systems. Much of his work focuses on wind, solar and oceanic energy applications, particularly forecasting, modeling and assessing climate change impacts on renewable resources. Previously, Dr. Hernández-Escobedo was a scientist at Instituto de Investigaciones Eléctricas in México. He designed and led wind energy projects, as well as solar and oceanic projects.
ORCID <http://orcid.org/0000-0002-2981-7036>

A. Fernández-García, received the BSc. Eng in Industrial Engineering in 2004, from the University of Málaga, Spain, the MSc. degree in Solar Energy in 2007, from the University of Almería, Spain and the PhD degree in Environmental Engineering in 2013, she has developed her research activity in CIEMAT-PSA since 2002, with emphasis on small-sized parabolic-trough

collectors for industrial applications and optical measurement and durability of solar reflectors for Concentrating Solar Power plants. Currently, she is the Coordinator of the laboratories for optical characterization and durability testing of solar reflectors at the PSA.

ORCID <http://orcid.org/0000-0001-6044-4306>

F. Manzano-Agugliaro, received the BSc. Eng in Engineering in 1995, from the University of Cordoba, Spain, and the PhD degree in Geomatics Engineering in 1999. He has developed his research and teach activity in University of Almeria, Spain since 1996, in geomatics and engineering multidisplinary. He was Senior Lecturer from 2000 to 2011, and Professor from 2011 at Engineering Dpt. of University of Almeria, Spain. Currently, he is the Coordinator of the Engineering PhD. program of University of Almeria, Spain.

ORCID <http://orcid.org/0000-0002-0085-030X>



UNIVERSIDAD NACIONAL DE COLOMBIA

SEDE MEDELLÍN
FACULTAD DE MINAS

Área Curricular de Medio Ambiente

Oferta de Posgrados

Especialización en Aprovechamiento de
Recursos Hidráulicos

Especialización en Gestión Ambiental

Maestría en Ingeniería Recursos Hidráulicos

Maestría en Medio Ambiente y Desarrollo

Doctorado en Ingeniería - Recursos Hidráulicos

Doctorado Interinstitucional en Ciencias del Mar

Mayor información:

E-mail: acia_med@unal.edu.co
Teléfono: (57-4) 425 5105