

El océano como fuente de energía renovable, sus aplicaciones en Cuba

Aliet Achkienasi-Amezcu e Ida Mitrani-Arenal

Instituto de Meteorología (INSMET, apdo. 17032; Casablanca, Regla, C.P.11700, La Habana -17, Cuba.

Teléfono: 8670714

Email aliet.achkienasi@insmet.cu, ida.mitrani@insmet.cu

Recibido: noviembre 16, 2015	Aceptado: julio 30, 2016
------------------------------	--------------------------

Resumen

En el presente texto se muestra un análisis en las aguas aledañas a Cuba, de las 5 formas de energía (limpias o alternativas) que pueden ser obtenidas de los mares y que según su origen se clasifican como: de las mareas (mareomotriz), de las olas (oleomotriz), del gradiente térmico (mareomotérmica), del gradiente salino (energía azul), y de las corrientes oceánicas. Se realizaron estudios generales de factibilidad e idoneidad para su uso en Cuba, así como de localización de territorios adecuados para la construcción de instalaciones y la explotación de esta energía, garantizando el cuidado del ecosistema local. La información utilizada para los análisis proviene de: a) Bases de datos oceanográficas de las aguas cubanas (1996-2000), conservadas en el Instituto de Meteorología, b) Datos de batimetría, del Atlas GEBCO-2003, c) Atlas Climático de Cuba, d) otros datos del Atlas Oceanográfico, 1ra versión, del 2008. Los resultados muestran como mejores opciones de explotación, a la energía azul, la mareomotérmica y de las corrientes oceánicas en algunos canales. Se recomienda continuar esta investigación para el Archipiélago Cubano.

Palabras clave: Energías renovables oceánicas, energías alternativas

The ocean like a source of renewable energy, its application in Cuba

Abstract

At the current text, an analysis of the five forms of energy (clean or alternatives) that can be obtained from the sea is presented. Depending of their origin, the ocean energy sources are identify as: the tidal power (mareomotriz), the wind wave energy (oleomotriz), the ocean thermal energy conversion (OTEC), the salinity gradient (blue energy), and the ocean streams. Feasibility and suitability studies were conducted for the Cuban territory, as well as locating suitable areas with construction and energy extraction facilities, ensuring the care of the local ecosystems. The used information comes from: a) Oceanographic data of Cuban waters from 1996 to 2000, preserved at the Institute of Meteorology, b) Bathymetry data, from the GEBCO Atlas-2003, c) Climate Atlas of Cuba, d) Other details from the Oceanographic Atlas (1st version, 2008). The results show as better exploitation choices the OTEC, the blue energy and the ocean streams one on some channels. It is recommended to continue these researches for the Cuban Archipelago.

Key words: renewable ocean energy, alternative energy

1. Introducción

El nivel de contaminación que actualmente existe en el planeta Tierra, el posible agotamiento de las fuentes tradicionales de energía y el cambio climático esperado, que afectaría a la humanidad en todas sus esferas de desarrollo, condiciona la necesidad aprovechar nuevas fuentes de energía renovable que permitan disminuir las emisiones de gases de efecto invernadero.

Del océano se puede obtener energía de 5 formas diferentes: mareomotriz (de las mareas), oleomotriz (de las olas), maremotérmica (del gradiente de temperaturas), energía azul (del gradiente salino) y de las corrientes oceánicas.

Cuba, por su insularidad y ubicación geográfica se encuentra en una posición privilegiada para la obtención de energía a partir los mares aledaños, por lo que resulta de gran importancia la realización de un análisis del potencial energético característico de estos mares.

Para ello, en el presente texto se planteó como objetivo general el análisis de los recursos energéticos disponibles en mares adyacentes a Cuba, con énfasis en las zonas cercanas a la costa y las posibilidades de ser aprovechables.

Como objetivos específicos, se establecieron los siguientes:

- Realizar una valoración integrada de las propiedades físicas de los mares aledaños al territorio nacional.
- Analizar el comportamiento de eventos severos en las cercanías y sobre el archipiélago cubano.
- Caracterizar las zonas donde se pudieran ubicar las instalaciones ingenieriles para el aprovechamiento de la energía.
- Determinar cuál o cuáles de las energías extraíbles del océano son las de mayor factibilidad para Cuba.

2. Materiales y métodos

2.1 Información meteorológica

El área de estudio se localiza entre los 18 y 26°N y entre los 73 y 87°W. Abarca las costas del archipiélago cubano y las aguas aledañas (Figura 1).

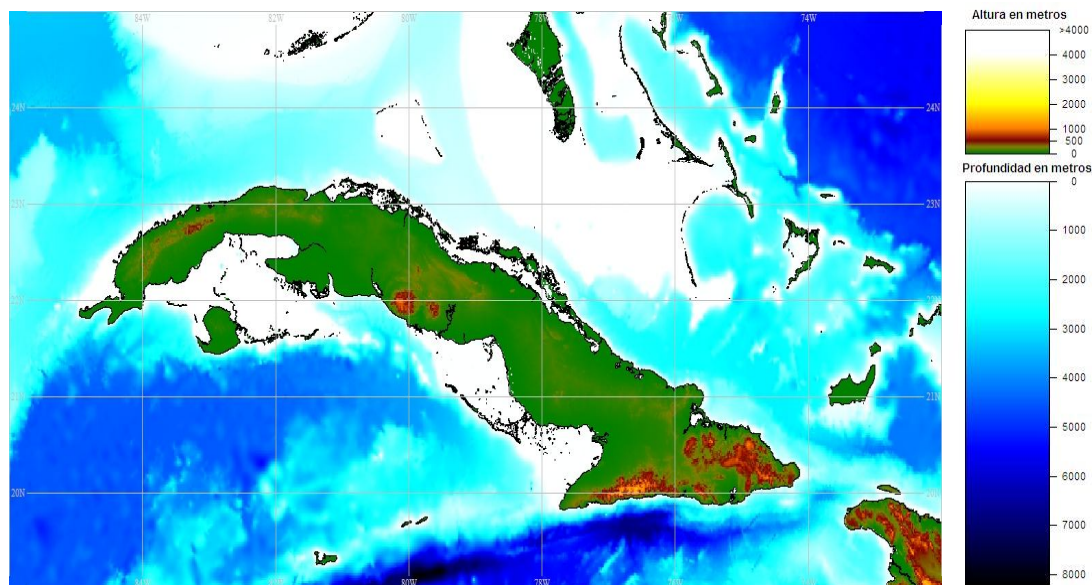


Fig. 1. Área de estudio (Atlas Gebco 2003)

Conjunto de variables analizadas:

- Temperatura del agua en los niveles de: superficie, 500 y 1000 metros de profundidad.
- Salinidad en superficie, en el nivel de su valor máximo y profundidad de localización.
- Densidad convencional, en los niveles de superficie, 200, 500 y 1000 metros de profundidad.
- Características batimétricas.
- Características de la línea de costa.
- Comportamiento de las corrientes oceánicas.
- Comportamiento de eventos severos.

- Caracterización de las mareas.
- Comportamiento de viento.
- Comportamiento del oleaje.

La información acerca del comportamiento de los ciclones y huracanes que pudieran afectar las instalaciones, procede de Mitrani et al., (2009), para el cual se contabilizaron los huracanes registrados en el área de interés en el período 1966-2000, utilizando los archivos de mapas del INSMET y los archivos del National Hurricane Center, disponibles en INTERNET (NHC, 2009).

Para la determinación de estados de intensificación o debilitamiento, se tomó en cuenta el criterio de cambio de estadio, es decir, de depresión a tormenta tropical, de ahí a huracán, y viceversa. Este criterio presenta la limitación de que sólo se pueden distinguir los casos de gran intensificación o gran debilitamiento, pero es suficiente para establecer las áreas más favorables al desarrollo de los ciclones tropicales. Como complemento, se examinaron los mapas de casos de eventos severos que aparecen en (Mitrani et al., 2016).

Los datos de temperatura, salinidad, densidad del agua de mar y corrientes termohalinas, con sus valores promedio anual y de los períodos poco lluviosos y lluvioso, proceden de la información primaria elaborada para el Atlas Oceanográfico de las Aguas Cubanas, 1ra versión, que incluye datos de 53 expediciones oceanográficas realizadas en aguas cubanas en el período 1966-2000 (Mitrani et al., 2008). Los datos se conservan en las bases HIDROMET (1966-1993), y GEOCUBA (1977-2000). Las expediciones fueron realizadas por especialistas del Centro de Investigaciones Pesqueras (CIP), del Instituto de Oceanología (IDO), del INSMET y de la Empresa GEOCUBA, a distancias de hasta 200 Km de la línea costera, en ocasiones con la colaboración de especialistas de la ex URSS, con inclusión además de los resultados de la expedición Yuca II a bordo del buque mexicano "Justo Sierra". Se realizaron 7614 estaciones. La validez de los datos, descrita por Mitrani et al. (2012), se resume en la Tabla.1. El mapa con la distribución de los datos, se muestra en la Figura 2.

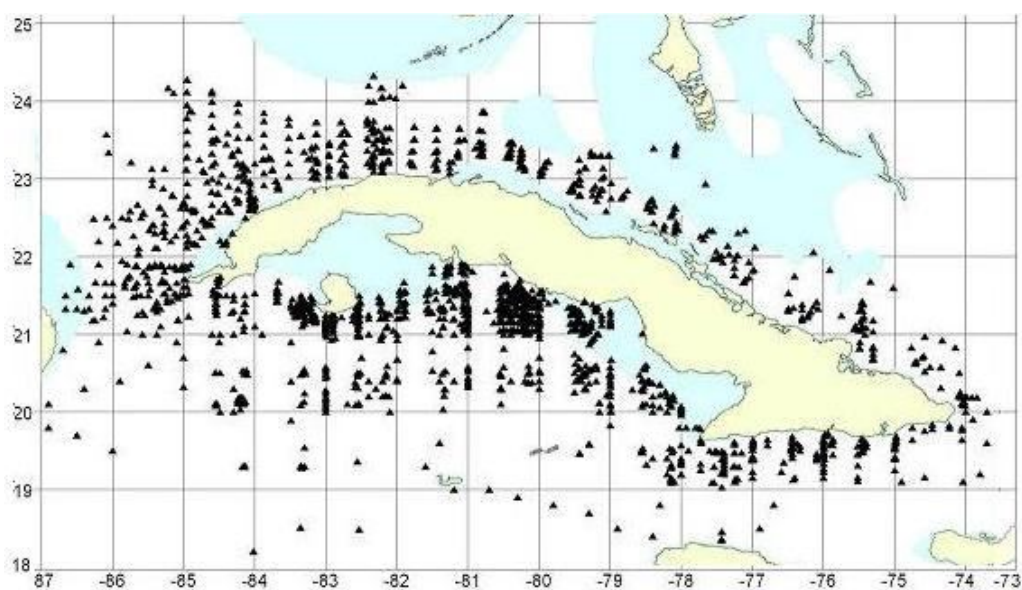


Fig. 2. Estaciones oceanográficas realizadas entre los años 1966 y 2000, en mares adyacentes a Cuba (Mitrani Arenal, 2009)

Tabla I. Métodos de medición de la temperatura del agua y la salinidad, utilizada en 53 cruceros realizados en aguas aledañas a Cuba en 1966- 2000

Buques y período de trabajo	Mediciones de temperatura	Precisión en °C	Mediciones de salinidad	Precisión en psu
Expediciones Cuba-URSS antes de 1970	Termómetros reversibles en Botellas Nansen	± 0.02	En laboratorio, con muestras de las botellas Nansen	$\pm 10^{-3}$
Expediciones Cuba-URSS desde 1970	Sonda-batómetros automatizados	± 0.01	Sonda-batómetros automatizados	$\pm 10^{-3}$
Buque “Ulises” hasta 1993	Termómetros reversibles en Botellas Nansen	± 0.02	Salinómetro con muestras de las botellas Nansen	$\pm 10^{-3}$
Buque “Ulises” desde 1996 Buque mexicano “Justo Sierra”	CTD	± 0.01	CTD	$\pm 10^{-3}$

2.2 Metodología para el análisis del potencial energético

Los valores de las mareas y la distribución de las corrientes permanentes, también fueron tomados de Mitrani et al. (2008), donde se refiere que fueron elaborados con información de archivo de la Empresa GEOCUBA y por especialistas de esta entidad, tomando en cuenta como referencia al Derrotero de las Costas de Cuba (ICH, 2009). El potencial se calculó por la formulación que se describirá a continuación:

Partiendo de que las variaciones de las marea puede pueden ser modeladas en la mayoría de los lugares por la superposición de componentes armónicos, de frecuencias conocidas, pero cuyas amplitudes y fases son característicos de cada lugar, conocidos como constituyentes o componentes armónicos (ecuación 1)

$$h = h_o + \sum_{n=1}^N h_n \cdot \cos(\omega_n t - \alpha_n) \quad (1)$$

Dónde:

- h = altura de la marea resultante (m)
- h_o = altura media (m)
- h_n =amplitud de las diferentes componentes de marea (m).
- ω_n =velocidad angular (rad/s)
- α_n = fase (rad)
- t = tiempo (s)
- N = número de frecuencias de marea consideradas.

Para fines prácticos el efecto más importante, para la producción de energía eléctrica, es la resonancia de las mareas en un estuario. Una presa podría amplificar el rango natural de las mareas, por lo tanto, es muy importante hacer una investigación para simular la física el régimen natural de las mareas y luego determinar el efecto de este régimen por la colocación de diques en varios lugares dentro de la ría (Charlier R. H. & Finkl, C. W. 2009). La energía potencial (ecuación 2) y la potencia bruta (ecuación 3) de los sitios de las mareas para un ciclo de marea de 6.2 horas ha sido calculada por Bernshtein (1961), Mosonyi (1963), Gibrat (1966), Bregman, R. et al (1995) con la cual se genera la gráfica z que muestra para diferentes rangos de marea y diferentes áreas de cuenca la energía potencial de la marea. La ecuación 4 proporciona la potencia eléctrica de salida e involucra al sistema turbina generador y acople mecánico. La ecuación 6 explica la velocidad máxima en términos de la altura de la marea.

$$E = 225AH^2 \quad (2)$$

$$P = K \cdot 10^6 \cdot A \cdot R^2 \quad (3)$$

$$P_{e(Q,H)} = \rho \cdot g \cdot \eta_T \cdot \eta_G \cdot \eta_M \cdot Q \cdot H \quad (4)$$

$$Q = v \cdot A_T \quad (5)$$

$$v_{(H)} = \sqrt{2 \cdot g \cdot H}$$

(6)

- E= flujo de energía potencial bruta (kWh)
- A= área superficial de la cuenca (km²)
- H= rango de marea (m)
- P = energía potencial (GWh-año).
- K= factor que varía de (1,92 y 1,97)
- R= el rango promedio de la marea equinoccial (m)
- P_{e(Q,H)}= potencia eléctrica en función del caudal y el rango de marea (W)
- η_T= eficiencia de conversión de la turbina
- η_M= eficiencia de conversión del acople mecánico turbina generador.
- η_G= eficiencia de conversión del generador
- Q= flujo volumétrico o gasto (m³/s)
- v= velocidad del flujo de agua a través de la turbina (m/s)
- A_T= área efectiva del paso de turbina (m²)
- C_p=coeficiente de potencia= 16/27 para una turbina ideal.

La sinuosidad de la línea costera y la batimetría de los mares aledaños a Cuba, se empleó la edición centenaria del Atlas Digital GEBCO, versión 2.12 de mayo del 2009, que contiene la más completa base de datos de la batimetría del océano mundial que ha sido adquirido legalmente por el INSMET.

El comportamiento de los vientos se extrajo de la investigación: “Análisis estadístico-climatológico del régimen de la velocidad máxima del viento en Cuba”, realizado por especialistas del INSMET en 1999 (Vega, et al., 1999). Se determinó la zona de Cuba donde los vientos se mantienen con mayor velocidad del viento, así como con los máximos de fetch y permanencia en dirección y velocidad. Posteriormente, se consultó el Atlas Climático de Cuba (INSMET/ACC, 1987) y el estudio climático de Lecha et al. (1994), para analizar el comportamiento de los vientos en las estaciones costeras cercanas a dicha zona: Cabo Lucrecia en la provincia de Holguín y Punta de Maisí, en Guantánamo.

El comportamiento del oleaje en las zonas de máximos vientos constantes en Cuba ha sido extraído del análisis realizado en el libro “Meteorología Marina” (Mitrani Arenal, 2013), pág. 111-113. Para el análisis de la altura de ola según los vientos que la generan se empleó la versión digital del Wind Driven Waves de L. F. Titov (Titov, 1971).

Para el cálculo de la energía de las olas superficiales en las costas de Cuba se emplearon las fórmulas para la energía de la onda trocoidal. Para una unidad de masa (m) se cumple que E_c (energía cinética) y E_p (energía potencial) se comportan como (Mitrani Arenal, 2008):

$$E_c = mV^2 / 2 \quad (7)$$

$$E_p = mg\pi r^2 / \lambda \quad (8)$$

$$E = E_c + E_p = mg2\pi r^2 \quad (9)$$

Dónde:

- E_c – energía cinética
- E_p – energía potencial
- E – energía total
- m – unidad de masa
- V – velocidad de la ola
- g – constante de gravedad
- r – radio de la ola (disminuye exponencialmente)
- λ – longitud de onda

Para el cálculo del potencial energético se empleó la formulación recomendada por Fernández Chozas, 2008:

$$E = \int \frac{m}{s} * 2g\pi \left(\frac{h}{2}\right)^2 \frac{1}{L} (e^{-2kz}) dz = \frac{1}{8} \rho gh^2 \quad (10)$$

$$F(kW / m) = \frac{\rho * g * H^2}{8} * \frac{\lambda}{2T} = \frac{\rho g^2 H^2 T}{32\pi} \quad (11)$$

Dónde:

- H – altura de la ola
- T – periodo de la ola

Para calcular el contenido energético que es posible obtener de esta fuente de energía se empleó la ecuación de contenido de energía en la columna (con área unitaria) de agua a la forma de (Mitrani Arenal, y otros, 1985):

$$C_e = \rho * C_p * \Delta Z * \Delta T \quad (12)$$

Donde ρ es la densidad del agua (1026 kg/m^3), C_p es el calor específico a presión constante de agua de mar ($4200 \text{ J/kg } ^\circ\text{C}$), ΔZ espesor de la columna de agua y ΔT es el gradiente de temperatura.

El rendimiento termodinámico de una central maremotérmica es bastante bajo, si se compara con el de una central térmica convencional (Fernández Díez, 2002). El rendimiento teórico máximo se obtiene de la expresión.

$$\mu = (T_2 - T_1) / (T_2 + 273) \quad (13)$$

El resultado del producto de este contenido energético (12) con el rendimiento teórico máximo (13) obtenible del ciclo, brinda una aproximación de la magnitud del potencial energético extraíble de esta fuente de energía.

La localización de los ríos apropiados para la generación de energía azul en sus desembocaduras y de las bahías que presentan canales de entrada estrechos y sinuosos, aptos para el aprovechamiento de la corriente de marea, se realizó con la ayuda del “Nuevo Atlas Nacional de Cuba”, editado por el Instituto de Geografía de la Academia de Ciencias de Cuba y por el Instituto cubano de Geodesia y Cartografía; editado en 1988, elaboración de los originales de edición: RHEA, Consultores S.A. (España) e Instituto Geográfico Nacional (España) (Colectivo de Autores, 1988).

Para determinar el potencial energético provenientes de la energía azul se partió de la Ley de Van't Hoff

$$\Pi_{osmotica} = i \cdot c_{NaCl} \cdot R \cdot T \quad (14)$$

Donde i es el coeficiente de Van't Hoff (para una atmosfera estándar de 25°C y salinidad 25 psu), este coeficiente para las aguas circundantes a Cuba es mayor, pero para los cálculos aproximados emplearemos este que es de 1,82; R es constante ($0,082$); T es la temperatura en $^\circ\text{K}$ y M es la concentración molar (moles/litros), donde el peso específico (gramos/mol) del cloro es $1/58.44$, y se calcula:

$$M = \text{Spsu} * \text{Densidad del agua de mar} * \text{Peso específico del cloro} \quad (15)$$

Para calcular el potencial energético aproximado de esta fuente de energía se emplea:

$$E_p = P_{osm} * \text{caudal de agua dulce} \quad (16)$$

Los datos de las características del largo, ancho y profundidad de las distintas bahías, para las cuales se realizaron los cálculos de potencial de energía mareomotriz, fueron extraídos del sitio <http://www.ecured.cu> disponibles en Internet (Datos de la oficina del CITMA, 2008).

Para la determinación del potencial energético de las corrientes de marea en los estrechos canales de entrada de las bahías de bolsa, así como también en los pasos entre los cayos y bajo los puentes que unen los terraplenes se emplea (Vega Desdín, y otros, 2008):

$$P = \frac{1}{2} \rho * A * V^3 \quad (17)$$

Donde ρ es la densidad del agua de mar a la profundidad a la que se desea instalar la turbina; A es el área de la sección transversal que resulta del producto de la profundidad con el largo del canal o paso o puente; y V es la velocidad de la corriente.

3. Resultados y discusión

3.1 Análisis del comportamiento de eventos severos

Para poder definir las áreas más seguras para la ubicación de las instalaciones energéticas, fue necesario realizar un análisis del comportamiento de eventos severos. Se ha establecido que los eventos meteorológicos severos que generan fuerte oleaje e inundaciones por sobre elevación del nivel del mar son cuatro: los ciclones tropicales, que afectan a todo el territorio cubano pero en mayor medida a las provincias occidentales; los sistemas frontales, que afectan principalmente a la región noroccidental; los sures, que afectan a la región suroccidental y la combinación de sistemas de altas y bajas, que afectan a la región nororiental (Mitrani et al. 2012).

En estudios anteriores se dividieron las costas de Cuba, para su estudio, acorde con la circulación de las aguas, la batimetría y la configuración costera, en 9 zonas:

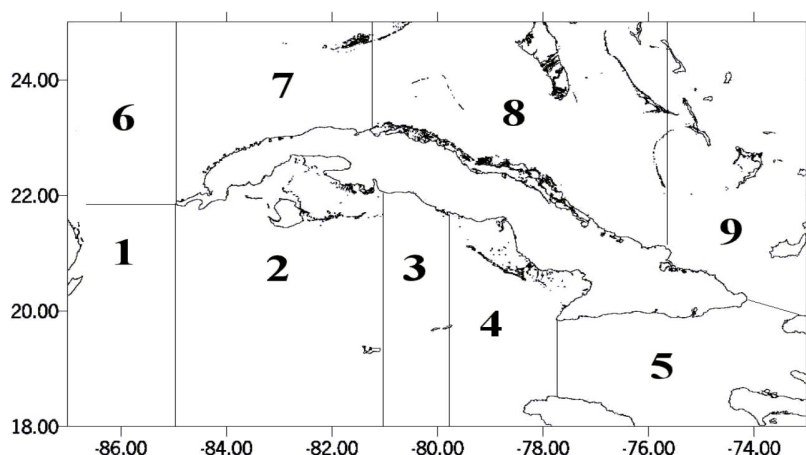


Fig. 3. División por zonas, acorde con la batimetría, las corrientes marinas y la configuración costera (Mitrani y Díaz, 2002)

1. Canal de Yucatán (por el sur), hasta los 87°W.
2. Península de Guanahacabibes - Cayo Ramona.
3. Cayo Ramona - Punta María Aguilar.
4. Punta María Aguilar - Cabo Cruz.
5. Cabo Cruz, Punta Maisí y hasta los 73°W.
6. Golfo de México al norte del canal de Yucatán, hasta los 87°W.
7. Península de Guanahacabibes - Punta Hicacos.
8. Punta Hicacos - Cabo Lucrecia.
9. Cabo Lucrecia, Punta Maisí y hasta los 73°W.

De lo antes expuesto, es posible identificar que las menores afectaciones se han reportado en las zonas 3 (Cayo Ramona - Punta María Aguilar), 5 (Cabo Cruz, Punta Maisí y hasta los 73°W) y 8 (Punta Hicacos - Cabo Lucrecia), siguiéndoles en orden la zona 9 (Cabo Lucrecia, Punta Maisí y hasta los 73°W). La zona 4, aunque con poca frecuencia de afectación, está expuesta a mayor peligro que las antes mencionadas, debido a su plataforma ancha y de poca profundidad, que favorece a las inundaciones costeras al paso de ciclones tropicales (Mitrani et al. 2001)

3.2 Energía mareomotriz

Es la forma de aprovechar la energía liberada durante los cambios de mareas, referida a las diferencias de altura sobre el nivel medio del mar según la posición relativa de la Tierra y la Luna, debido a la atracción gravitatoria de esta última y del Sol sobre las masas de agua de los mares.

Para probar que con las variaciones de marea existentes en Cuba no es posible la obtención de energía a partir de las centrales mareomotrices, se realizaron los cálculos del potencial energético en algunas de las bahías del archipiélago (que podían ser utilizadas como ensenadas naturales para la obtención de esta energía). Teniendo en cuenta que en el territorio nacional existen diferentes tipos de mareas según el tramo costero que se considere (Fig. 3), se utilizaron bahías ubicadas en distintos tramos, tales como: la Bahía del Mariel, la Bahía de Cienfuegos, la Bahía de Nuevitás, la Bahía de Puerto Padre y la Bahía de Sagua de Tánamo; los resultados obtenidos se muestran en la Tabla I.

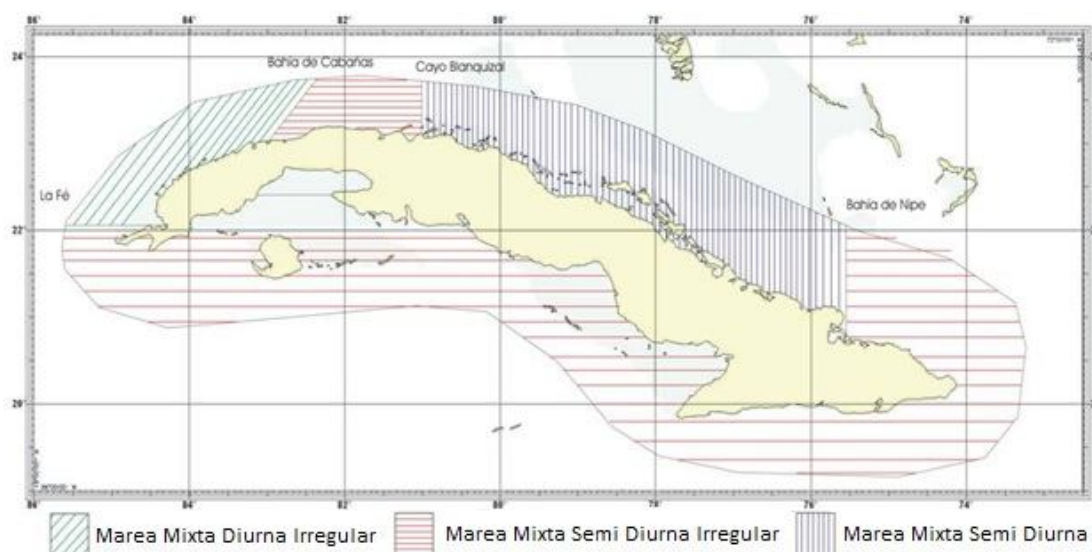


Fig. 4. Distribución de las mareas en las costas de Cuba (ICH, 1989)

En la Tabla II, se aprecia que el potencial energético de las mareas en las costas de Cuba es muy bajo, en lugares como la parte alta del Golfo de California, se determinó el potencial mínimo para el aprovechamiento de esta energía, para un área de embalse de 130 km² y altura de marea cercana a los 5 metros, se puede obtener un potencial instalado de 1,090 GWh/año (Hiriart Le Bert, 2009). Por lo cual no es recomendable utilizar esta fuente de energía renovable en el territorio nacional.

Tabla II. Cálculo del potencial energético la energía Mareomotriz en aguas cubanas

Ensenadas Naturales	Superficie del embalse (km ²)	Amplitud de la marea (m)	Potencial (Gw*h)
Bahía del Mariel	7,8	0,55	0,00541
Bahía de Cienfuegos	88,46	0,15	0,00450
Bahía de Nuevitas	215,8	0,20	0,01953
Bahía de Puerto Padre	47,7	0,75	0,06070
Bahía de Nipe	220	1,00	0,49771

3.3 Energía undimotriz

Este tipo de fuente de energía es la resultante de aprovechar el oleaje para la obtención de electricidad.

Sobre el territorio cubano, el régimen de vientos en la capa superficial está conformado básicamente por la influencia del anticiclón subtropical oceánico Azores-Bermudas, que genera los vientos de región este, conocidos como "Alisios", además de los fenómenos de escala local, como la circulación de brisas y los vientos de valle y montaña en correspondencia con las condiciones de insularidad y de la orografía. Prevalecen los vientos del primer cuadrante (NNE, NE, ENE, E), con velocidad media general de 2.8 m/s, mientras que en la dirección predominante es de 3.8 m/s, de manera que sobre Cuba hay habitualmente condiciones de buen tiempo (Vega, et al., 1999).

El predominio de los vientos débiles la existencia de limitaciones geográficas en el fetch, en general no favorecen el desarrollo del oleaje en las costas de Cuba, salvo en la costa de la región nororiental (Zona 9- Cabo Lucrecia-Punta Maisí y hasta los 73°W), abierta a la entrada de las aguas del océano abierto. Por tales razones, en el presente trabajo se decidió analizar las posibilidades de explotación del área, para la obtención de energía de las olas. El hecho de que esta zona sea una de las que presenta menos reportes de ciclones y huracanes, viene a fortalecer la propuesta.

Los datos de las estaciones meteorológicas Cabo Lucrecia, en Holguín y Punta de Maisí, en Guantánamo, mostraron que en condiciones habituales el viento oscila en el intervalo 3-5 m/s, según se demuestra en las rosa de los vientos del

Atlas Climático (INSMET/ACC, 1987). Para estas velocidades del viento, el oleaje ya es plenamente desarrollado con permanencia de más de 6 horas y fetch de más 50 km, pero incluso en estas condiciones extremas, su altura solo puede ser del orden de los 0,37 a 0,61 metros, según se demuestra en las tablas de Titov (1971). La aplicación de la formulación para el cálculo del potencial energético de las olas, muestran los resultados asentados en la Tabla III.

Tabla III Análisis resultante de la aplicación de las fórmulas para el cálculo del potencial de las olas en el área seleccionada

h (m)	h ²	Energía (J/m ²)	Flujo de energía (kW/m)		
			T=2,5	T=3,2	T=3,8
0,4	0,2	200,51	0,39	0,5	0,59
0,5	0,3	313,29	0,61	0,78	0,93
0,61	0,4	466,31	0,91	1,16	1,38
0,4	0,2	200,51	0,39	0,5	0,59
0,5	0,3	313,29	0,61	0,78	0,93
0,61	0,4	466,31	0,91	1,16	1,38
0,4	0,2	200,51	0,39	0,5	0,59
0,5	0,3	313,29	0,61	0,78	0,93
0,61	0,4	466,31	0,91	1,16	1,38

En la Tabla II se muestra el análisis resultante de la aplicación de las fórmulas para el cálculo del potencial energético y el flujo de energía, correspondiente a las olas, en el área. Donde: la densidad (ρ) se encuentra entre los 1026 y los 1025,75 Kg/m³, la altura de la ola varía de 0,4 a 0,61 metros (en el año), la aceleración de la gravedad (g) es de 9,8 m/s² y el período T (con fetch máximo) tiene los valores 2.5, 3.2 y 3.8.

Energía Maremotérmica

La conversión de energía térmica oceánica es el método de convertir en energía útil la diferencia de temperatura entre el agua de la superficie y la que se encuentra a los 1000 m de profundidad. En las zonas tropicales esta diferencia de temperatura puede alcanzar de 22 – 24°C.

Existen básicamente tres tipos de sistemas para el aprovechamiento de esta fuente de energía (Fernández Díez, 2002):

- Sistemas de ciclo abierto.
- Sistemas de ciclo cerrado.
- Sistemas de ciclo híbrido.

Luego del análisis del comportamiento de las temperaturas en los distintos niveles (Tabla IV) de los mares circundantes a Cuba, se concluye que, *en un principio, esta energía puede ser explotada en todas las aguas adyacentes al territorio nacional*, ya que los gradientes de temperatura entre la superficie y los 1000 metros de profundidad son mayores a los 20°C, mínimos para la producción de esta energía.

En la tabla V se analizó el cálculo del contenido de energía en una columna unitaria de agua, de la forma empleada por Mitrani en 1985 (Mitrani Arenal, et al., 1985), utilizando los valores medios de la temperatura del agua a diferentes profundidades. Con estos datos se calculó el potencial energético aproximado, multiplicándolo por el rendimiento del ciclo, de donde se deduce que mientras mayor sea el gradiente térmico, mayor será el rendimiento del ciclo y por tanto mayor será la energía eléctrica obtenida.

Tabla IV. Comportamiento de las medias de temperaturas en las aguas de Cuba

Períodos de Temperaturas	Temperaturas en Diferentes Niveles (°C)			Gradiente de temp. (Δt)	
	Superficie	500 metros	1000 metros	0 - 500 metros	0 - 1000 metros
Media anual	27 - 28	13 - 14	5 - 5,5	14	22,5
Máxima de la Media Anual	30,36	17	7	13,36	23,36
Mínima de la Media Anual	26	10	4,5	16	21,5
Media Período Poco Lluvioso	27 - 27,5	13 - 14	5 - 5,25	13,5	22,25
Máxima de la Media del Período Poco Lluvioso	28	14,5	6	13,5	22
Mínima de la Media del Período Poco Lluvioso	26,5	10	4,5	16,5	22

Media Período Lluvioso	29 - 29,5	13 - 13,5	5 - 5,25	16	24,25
Máxima de la Media del Período Lluvioso	30,25	16	5,75	14,25	24,5
Mínima de la Media del Período Lluvioso	27	12	4,5	15	22,5

Tabla V. Comportamiento del contenido de energía en una columna de agua unitaria en diferentes niveles (Mitrani Arenal, y otros, 1985) y el potencial energético aproximado

Períodos de Temperaturas	Contenido de energía de una columna (MWh/m ²)		Potencial energético (MWh/m ²)	
	En los 1ros. 500 metros	En los 1ros. 1000 metros	En los 1ros. 500 metros	En los 1ros. 1000 metros
Media anual	343,5390	353,1150	16,0318	25,8951
Máxima de la Media Anual	342,7729	354,7429	15,0957	27,3167
Mínima de la Media Anual	345,9330	352,5165	18,5115	25,3482
Media Período Poco Lluvioso	343,5390	353,1150	16,0318	25,8951
Máxima de la Media del Período Poco Lluvioso	342,9405	353,1150	15,3811	25,8091
Mínima de la Media del Período Poco Lluvioso	346,5315	353,1150	19,0911	25,9383
Media Período Lluvioso	345,9330	355,5090	18,3276	28,2524
Máxima de la Media del Período Lluvioso	343,8383	356,1075	16,1573	28,7704
Mínima de la Media del Período Lluvioso	344,7360	353,7135	17,2368	26,5285

Se determinó que las áreas menos afectadas por ciclones y huracanes son las zonas 3, 5, 8 y 9. De las cuales sólo la zona 8 presenta un peligro alto de inundaciones por surgencias ciclónicas. Como resultado de este análisis se puede concluir que las zonas 3, 5 y 9 son las más apropiadas para la obtención de esta energía.

Energía Azul

La diferencia de salinidad entre el agua de los mares y el agua de los ríos se mantiene esencialmente por la evaporación del agua de los océanos y por la lluvia recibida por los ríos. En las desembocaduras de los ríos en el mar puede obtenerse energía debido a las diferencias de presión osmótica lo que se denomina *energía del gradiente salino o energía azul*.

Una planta osmótica utiliza agua procedente de un río y agua salada del mar. Separadas por una membrana artificial de material plástico, las moléculas de sal del agua de mar hacen que el agua dulce pase a través de la membrana. Esto incrementa la presión del agua de mar que se utiliza para mover una turbina generadora de electricidad.

Luego de analizar el comportamiento de la salinidad en las aguas circundantes a Cuba (Tabla VI), se puede resumir que: en superficie se encuentra entre los 36,00 y 36,50 psu durante todo el año (valores superiores a los encontrados cerca de las primeras plantas pilotos de Noruega (Celma, 2008)), los mayores valores de salinidad están cercanos a los 36,75 psu con lugares en los que se alcanzan los 37 psu, hallándose el nivel de máximo de salinidad en profundidades de 100 a 150 metros.

Tabla VI. Comportamiento de las medias de salinidad en las aguas de Cuba

Nivel de salinidad	Salinidad en Niveles (psu)		Concentración molar (mol/litro)		Presión osmótica (bar)	
	Máximo	Superficie	Máximo	Superficie	Máximo	Superficie
Media Anual	36,75	36,25	645,20	636,42	28886,90	28493,88
Máximo	38,50	37,00	675,92	649,59	30262,47	29083,41
Mínimo	36,50	36,00	640,81	632,03	28690,39	28297,37
Período Poco Lluvioso	37,00	36,25	649,59	636,42	29083,41	28493,88
Máximo	38,66	37,50	678,73	658,37	30388,24	29476,43

Mínimo	36,75	36,00	645,20	632,03	28886,90	28297,37
Período Lluvioso	36,75	36,00	645,20	632,03	28886,90	28297,37
Máximo	37,00	36,75	649,59	645,20	29083,41	28886,90
Mínimo	36,40	35,50	639,06	623,25	28611,79	27904,36

El otro factor que influye en las localizaciones de esta energía es que deben de estar ubicadas cercanas a ríos permanentes de un caudal apreciable, Cuba cuenta con ríos aptos para este objetivo, entre los que se citan:

- Cuyaguatete y San Diego, ambos se ubican en la costa sur de Pinar del Río.
- Mayabeque, en la costa sur de Mayabeque.
- La Palma y Canal del Rique, en la costa norte de Matanzas.
- Sagua la Grande y Sagua la Chica, en la costa norte de Villa Clara.
- Arimao, en la costa sur de Cienfuegos.
- Manatí, Zaza y Jatibonico del Sur, en la costa sur de Sancti Spíritus.
- Caonao y Máximo, en la costa norte, San Pedro y Najasa, en la costa sur, de Camagüey.
- Sevilla, en la costa sur de Las Tunas.
- Mayarí y Sagua de Tánamo, en la costa norte de Holguín.
- Cauto y Jibacoa, en el Golfo de Guacanayabo, Granma.
- Toa, en la costa norte y Guantánamo en la costa sur de Guantánamo.

La conjugación de estas informaciones brinda una aproximación de las posibles ubicaciones (Fig. 4), solo resta analizar el factor de peligrosidad correspondiente a los eventos severos que pudieran afectar las instalaciones.

El hecho de que las plantas puedan ser construidas bajo tierra le brinda protección a las instalaciones, de modo que no sufriría grandes afectaciones por eventos severos, lo que favorece su aplicación en todas las costas del archipiélago de Cuba. La única influencia negativa apreciable sería la elevación de la presión en los canales o tubos de entrada del agua dulce o salada durante inundaciones de gran magnitud, y pueden ser eliminados si se instalan mecanismos de cierre para casos de emergencias.

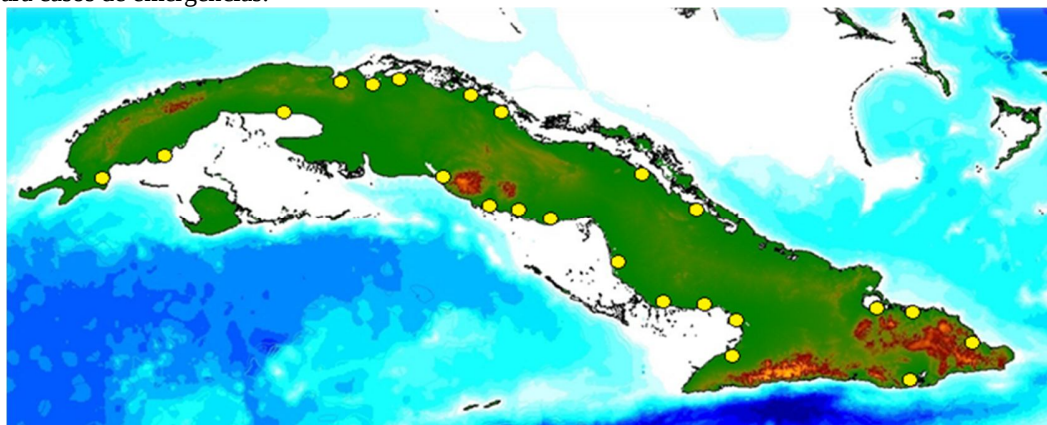


Fig. 5. Posibles zonas de ubicación de centrales de energía azul en Cuba (señalados con puntos amarillos)

Para tener una idea de las dimensiones del potencial energético de esta fuente de energía, se calculó como ejemplo el existente (de forma natural) en la desembocadura del río Toa, en la provincia de Guantánamo (el más caudaloso de Cuba), tiene un caudal de 10, 5 m³/s. El resultado es mucho mayor al obtenible en una planta ya que variaría el caudal del río por el de entrada por unidad de tiempo, a la planta y habría que determinar el rendimiento de la instalación (Tabla VII).

Tabla VII. Ejemplo de potencial energético existente, en la desembocadura del río Toa, Guantánamo

Períodos	Salinidad en superficie (psu)	Concentración molar (mol/litro)	Presión osmótica (bar)	Energía Potencial (w/s)
Media Anual	36	632,0328542	28297,3749	297,1224
Período Poco Lluvioso	36,3	637,2997947	28533,1864	299,5985
Período Lluvioso	36,2	635,5441478	28454,5826	298,7731

Entre las ventajas de esta energía se puede destacar que es predecible y estable, las plantas de energía azul pueden ser construidas bajo tierra sin afectar el entorno local, se puede gestionar el agua para el funcionamiento de la planta de forma que el impacto ecológico sea mínimo, no requiere de la construcción de represas y los productos secundarios (tales como sales y agua desalinizada) pueden ser utilizados en otras industrias.

Energía de las corrientes marinas

Es un recurso energético importante de los océanos, del cual se puede aprovechar la energía cinética para convertirla en electricidad.

El proceso de captación se basa en convertidores de energía cinética similares a los aerogeneradores.

La potencia extraíble por unidad de área barrida es proporcional a ρc^3 , siendo ρ la densidad del fluido y c la velocidad. Teniendo en cuenta que la densidad del agua es 850 veces superior a la del aire, y que la velocidad del fluido es más pequeña que en el caso del aire, resulta que la potencia por unidad de área barrida es mucho mayor respecto a la que se obtendría con una aeroturbina, de forma que:

- Con vientos de 15 m/s se obtienen 2 kW/m².
- Con corrientes marinas de 2 m/s se obtienen 4 kW/m².
- Con corrientes marinas de 3 m/s se obtienen 14 kW/m².

Luego del análisis de la distribución de las corrientes termohalina en el período seco y lluvioso, se puede afirmar que sólo en la zona que se extiende desde el noroeste al noreste de la provincia de La Habana es posible localizar velocidades constantes durante todo el año, apropiadas para la obtención de energía a partir de estas corrientes.

En Cuba, además de las corrientes de densidad que se pueden obtener a distintas profundidades en zonas no muy alejadas de la costa, también se puede obtener energía aprovechando la corriente de mareas en los canales de entrada de las bahías de bolsa, que al ser estrechos y sinuosos, fomentan el aumento de la velocidad de entrada, durante el llenante, y al desembocar en estas bahías diferentes ríos, la velocidad del agua durante el vaciante también es considerable.

Teniendo en cuenta que las mareas en Cuba son en su mayoría semidiurnas y semidiurnas irregulares (el período predominante es de 12 horas), y con el conocimiento de cómo se desplaza la onda de marea, se pueden adaptar las instalaciones para aprovechar la corriente de marea, tanto en el llenante como en el vaciante, para la obtención de energía.

Entre las bahías que presentan mayores potencialidades se encuentran:

- Bahía Honda, Bahía de Cabañas y Bahía del Mariel, en la costa norte de Artemisa.
- Bahía de Cienfuegos, en Cienfuegos.
- Bahía de la Gloria y Bahía de Nuevitas, en la costa norte de Camagüey.
- Bahía de Nuevas Grandes, Bahía de Malagueta y Bahía de Puerto Padre, en la costa norte de Las Tunas.
- Bahía de Banes, Bahía de Nipe, Boca de Carenito y Bahía de Sagua de Tánamo, en Holguín.

Otras localizaciones donde las corrientes de marea pueden ser aprovechables son los canales entre los cayos y en los existentes bajo los puentes que unen los pedraplenes entre dichos cayos, ya que en ellos las corrientes tienen velocidades aptas para la obtención de esta energía. En la Tabla VIII se muestran los resultados obtenidos, a partir de las mediciones realizadas por la Empresa GEOCUBA Estudios Marinos, de la aplicación de la fórmula para el cálculo del potencial energético correspondiente a las corrientes, bajo algunos puentes y canales. Dónde: la densidad (ρ) se mantiene en 1026 Kg/m³. Nótese que la profundidad mínima es de 4 metros, por lo que las turbinas estarán casi expuestas a los eventos meteorológicos que por esta zona transiten.

Tabla VIII. Potencial energético en los puentes de los Pedraplenes

Canales Principales	V. máx. de la corriente (m/s)	Profundidad (m)	Largo de la sección transversal (m)	Área de la sección transversal (m ²)	Potencial (W/s)
Canal de los barcos	1,22	6,00	160,00	960,00	894268,82
Puente La Guasa	0,78	6,00	160,00	960,00	233707,37
Puente #42	1,00	4,50	40,00	180,00	92340,00
Sub total en 3 de 44 puentes del Pedraplen Caibarien - Cayo Sante María (en kW/s)					1220,32
Puente Vasculante	0,99	5,00	20,00	100,00	49776,34

Pasa Grande	Paredón	0,43	4,00	40,00	160,00	6525,93
Potencial Total en kW-s						1276,62
Potencial Total en GW-h						4595,83

Con respecto a la influencia de eventos severos en las ubicaciones: no existirán afectaciones apreciables en instalaciones que se encuentren a profundidades mayores de 100 metros, los daños se reportarían en las zonas más bajas (menos de 100 metros de profundidad), fundamentalmente por el paso de ciclones y huracanes.

Por esta razón se descartan los cayos que se encuentran en las zonas 2 y 4, mientras que la ubicación en los cayos de la zona 8 resulta apropiada para el aprovechamiento de la corriente de marea entre cayos y bajo los puentes que unen los pedraplenes, las locaciones bajo estos últimos cuentan con la protección extra de los propios puentes.

En la zona 8, de Punta Hicacos a Cabo Lucrecia, se han construido hasta la fecha, 4 pedraplenes, para garantizar el desarrollo turístico de algunos de sus cayos:

- Pedraplén Caibarién – Cayo Santa María (en el límite las bahías San Juan de Los Remedios y Buenavista, con un largo de 48 km, un ancho de 7.5 metros, 44 puentes y un total de 2.235 km de puentes).
- Pedraplén Turiguanó – Cayo Coco (en la bahía de Los Perros, que presenta un largo de 26.1 km, un ancho de 5 metros, 14 puentes y un total de 0.456 km de puentes).
- Pedraplén Jigüey – Cayo Romano (en la Bahía de Jigüey).
- Pedraplén a Cayo Sabinal (en el extremo este de la Bahía La Gloria).

Conclusiones

- Aunque las aguas aledañas a Cuba representan un potencial para la obtención de energía renovable, su materialización no escapa a dificultades de índole financiero, riesgos económicos y limitaciones tecnológicas e informativas. Con la tecnología existente hoy día no es posible obtener las cinco variantes (mareomotriz, oleomotriz, maremotérmica, energía azul y energía de las corrientes oceánicas), solo las tres últimas pueden ser aprovechadas actualmente en Cuba.
- Desde el punto de vista económico, las ubicaciones cercanas a las costas disminuirían los costos, sobre todo para las conexiones desde las turbinas donde se produce la energía hasta la red eléctrica nacional. Las ubicaciones de las centrales maremotérmicas y de energía azul, deben realizarse en tierra firme; las de la energía de las corrientes oceánicas, cercanas a las costas y en zona bajas. Las instalaciones de energía azul, pueden ser ubicadas en la desembocadura de ríos permanentes, con caudales apreciables.
- Los eventos meteorológicos severos pueden provocar daños en las instalaciones para generación de energía oceánica, fundamentalmente por los intensos vientos, el oleaje y la sobre-elevación del nivel del mar, por lo que deben elegirse áreas de mínima afectación. Las zonas más favorables para la ubicación de las instalaciones productoras de energía maremotérmicas, son:
 - Sur de las costas de Cienfuegos.
 - Sur de Punta de Maisí a Cabo Cruz.
 - Norte del tramo Cabo Lucrecia-Punta de Maisí.
- Las instalaciones eléctricas a partir de las corrientes oceánicas, pueden ser ubicadas en:
 - Norte de la Habana, aprovechando el predominio de las corrientes termohalinas.
 - Entrada de bahías de bolsa, aprovechando la velocidad de las corrientes de marea.
 - Entre los canales y bajo los puentes de la cayería Sabana – Camagüey, también aprovechando las corrientes de marea.

Recomendaciones

- Seguir atentamente el desarrollo tecnológico en cuanto al aprovechamiento de energía mediante centrales mareomotrices y oleomotrices, hasta que las instalaciones puedan trabajar con las diferencias de mareas y el oleaje que se aprecian en las costas de Cuba.
- Actualizar los estudios del comportamiento de los vientos y el oleaje en las zonas costeras.
- Construir las instalaciones maremotérmicas cercanas a plantas que utilicen el agua de mar en el proceso de enfriamiento de las calderas para el aprovechamiento de ésta (con mayor temperatura) como el agua superficial.
- Para la obtención de energía azul, construir plantas subterráneas, de modo que estén mejor protegidas contra eventos severos.

- Para el aprovechamiento de las corrientes de marea es recomendable utilizar maquinarias que estén fijadas al lecho marino mediante monopilotes o mediante anclas y cadenas, de forma que fuertes marejadas (en zona bajas), producto de ciclones y huracanes, no las desplacen de sus ubicaciones.
- Realizar un estudio de factibilidad económica para determinar la viabilidad de los proyectos constructivos y probar la garantía de rentabilidad del uso de cada una de estas energías para el desarrollo del país. En el que se incluya además un estudio de impacto ambiental, para comprobar cómo pueden afectar estas instalaciones al ecosistema en que se fueran a ubicar.
- Organizar de un proyecto de investigación que se ocupe de este tema, entre las instituciones con posibilidades de aportar información.

Referencias Bibliográficas

- Bernstein LB. 1961: Central tidal-power stations in contemporary energy production. Moscow: *State Publishing House*
- Bregman, R. Knapp, R.H. Takahasi P.K. 1995: Design considerations for ocean energy resource systems. University of Hawaii. OCEANS '95. MTS/IEEE. Challenges of Our Changing Global Environment. *Conference Proceedings*. 1084-1091 Vol. 2. en: <http://ieeexplore.ieee.org>
- Celma, E., 2008. www.eco.microsiervos.com. [En línea], Available at: <http://eco.microsiervos.com/energia/energia-azul-osmosis.html> [Último acceso: 21 septiembre 2011].
- Charlier R. H. & Finkl C. W. 2009: Ocean Energy: Tide and Tide Power. Springer- Verlag Berlin Heidelberg. Berlin. Versión en línea: <http://es.scribd.com/doc/40243499/Ocean-Energy-Tide-and-Tidal-Power>
- CRES (2006) China Renewable Energy Escalation Program (CRES). 2006. En: <http://www.cresp.org.cn/english/index.asp>
- Colectivo de Autores, 1988. *Nuevo Atlas Nacional de Cuba*. RHEA, Consultores S.A. (España) e Instituto Geográfico Nacional (España) ed. La Habana: Instituto de Geografía de la Academia de Ciencias de Cuba y el Instituto Cubano de Geodesia y Cartografía.
- Datos de la oficina del CITMA, 2008. <http://www.ecured.cu>. [En línea] Available at: http://www.ecured.cu/index.php/Bah%C3%ADa_de_Mariel:Cienfuegos:Nuevititas:Puerto_Padre:Nipe [Último acceso: 31 mayo 2012].
- Fernández Chozas, Julia. 2008. *Aprovechamiento de la energía de las olas para la generación de electricidad. departamento de ingeniería eléctrica. cátedra de electrotecnia, universidad politécnica de Madrid*. Madrid, España: s.n., 2008. Proyecto Fin de Carrera, No. 07202129.
- Fernández Díez, P., 2002. *Energía del mar*, Libros de Energía del mar. Universidad de Cantabria, Santander. España. <http://es.libros.redsauce.net/> [En línea] Available at: <http://es.libros.redsauce.net/index.php?pageID=15> [Último acceso: 31 mayo 2012].
- Gibrat R. 1963: L'énergie des mers. Paris: Presses Universitaires de France. *Rev. Franc. de l'Energie* 1966;183:660–84.
- González, C. y otros, 1987. *Atlas Climático de Cuba*. La Habana: Instituto Cubano de Geodesia y cartografía.
- HIRIART Le Bert, Gerardo "Potencial energético de las mareas para generar electricidad". *Revista Digital Universitaria* [en línea]. 10 de agosto de 2009, Vol. 10, No. 8 [Consultada: 11 de agosto 2012]. Disponible en Internet: <http://www.revista.unam.mx/vol.10/num8/art49/int49.htm> ISSN: 1607-6079.
- ICH (1989): *Derrotero de las costas de CUBA Región Marítima del Norte y Sur*. Tomo 1 y 2. Instituto Cubano de Hidrografía, La Habana, Cuba.
- Mitrani Arenal, I., 2016. "Meteorología Marina", Agencia de Medio Ambiente (Ed.), (en soporte digital), La Habana, Cuba, 270 pp, ISBN: 978-959-300-060-4
- Mitrani Arenal, I. y otros, 2008. *Atlas Oceanográficos de las Aguas Cubanas*, La Habana: Instituto de Meteorología del Ministerio de Ciencia, Tecnología y Medio Ambiente.
- Mitrani Arenal, I., Moreno, A. & Padilla, O., 1985. Estudio de la capa activa oceánica en la región noroccidental del mar caribe durante los meses de septiembre a octubre (en ruso). *Tropicheskaya Meteorologiya*.
- Mitrani Arenal, I. & Onoe Díaz, O., 2008. Particularidades de la estructura termohalina y sus tendencias en aguas cubanas, *Revista Cubana de Meteorología*, Vol. 14, No. 1, 54-73. La Habana: Instituto de Meteorología del Ministerio de Ciencia, Tecnología y Medio Ambiente.
- Mitrani I., O. O. Díaz, A. Pérez, R. Cangas, O. E. Pérez 2009. "La estructura termohalina de las aguas adyacentes a Cuba y la evolución de los ciclones tropicales en el periodo 1966-2000" *Memorias del VII Congreso Ibero-Americano de Ciencias del Mar*, ColacMARCUBA 2009. (en soporte digital), ISBN 978-959-300-005-5
- Mosonyi E. 1963: *Utilizable power in seas and oceans*. In *Water power development I*, chapter 4, Moscow, State Publishing House.

National Hurricane Center (NHC) www.nhc.noaa.gov [En línea] [Último acceso: 31 mayo 2012].

Titov, L. F., 1971. *Wind Driven Waves*. Leningrado: s.n.

Vega Desdín, Fermín, y otros. 2008. *Estudio de factibilidad para la evaluación de los recursos marinos en el Archipiélago Cubano y mares adyacentes en función de su aprovechamiento para la generación de energía eléctrica*. GEOCUBA Estudios Marinos. La Habana: s.n., informe inédito.

Vega, R., Sardiñas, M. E., Nieves, M. E. & Centella, A., 1999. *Análisis estadístico-climatológico del régimen de la velocidad máxima del viento en Cuba*, [inédito] Informe Final de Resultado Científico, Biblioteca del INSMET, La Habana: INSMET.

Acerca de las autoras:

Aliet Achkienasi-Amezcuca: Licenciada en Meteorología, graduada en el Instituto Superior de Ciencias Aplicadas InSTEC, La Habana, Cuba, en el año 2012. Trabaja en el Instituto de Meteorología, dirige el proyecto de investigación “Caracterización de las potencialidades energéticas de los mares circundantes a Cuba”, que se ejecuta desde el 2015 hasta el 2018. Ha cursado diversos cursos de posgrado y diplomado, se encuentra pendiente de defender para este año el Título Académico de Máster en Ciencias de la Gestión Ambiental.

Ida Mitrani-Arenal: Ingeniera Oceanóloga y Master en Ciencias Iconológicas en 1980, en el Instituto Hidrometeorológico de Leningrado. Doctora en Ciencias Físicas desde 1993, título defendido en el Instituto de Meteorología (INSMET) y aprobado por el MES. 36 años de experiencia profesional en el INSMET. Investigadora Titular, con más de 100 publicaciones en revistas especializadas y memorias de eventos. Profesora Titular del Departamento de Meteorología, del Instituto de Ciencias y Tecnologías Aplicadas (INSTEC). Académica Titular de la Academia de Ciencias de Cuba desde 2007