

---

LA ENERGÍA DEL MAR, UNA ALTERNATIVA AL CALENTAMIENTO DEL PLANETA  
ENERGY FROM THE SEA, AN ALTERNATIVE TO GLOBAL WARMING

MSc. Vega Desdín F. M.

GEOCUBA Estudios Marinos. fermin@emarinis.geocuba.cu

**RESUMEN:**

El consumo mundial de las fuentes renovables de energía apenas rebasa 2.5%, debido a la necesidad de tecnologías eficientes para su aprovechamiento, que no existen o están en diversos estadios de desarrollo; la competencia desleal de los combustibles fósiles, cuyos precios no incluyen el valor de los daños ambientales ocasionados cuando se consumen; los hábitos establecidos durante más de dos siglos, en que los portadores fósiles y en particular los combustibles líquidos se han utilizado de manera creciente; los estilos de vida derrochadores y el tratamiento discriminatorio que tradicionalmente se da a las fuentes renovables como “alternativa”, “otras”, unido a su carácter disperso o distribuido, su mayor densidad energética y la poca comprensión del significado de su renovabilidad.

El país está trabajando en un estudio de factibilidad tecnológica y de potencialidades naturales que presenta Cuba para el aprovechamiento de esta alternativa energética que es la energía oceánica. Esta propuesta está encaminada en varios frentes de aprovechamiento de este tipo de energía para la generación de electricidad, desarrollándose tecnologías que permiten obtener electricidad a partir del aprovechamiento del gradiente de temperatura que hay en las aguas oceánicas cercanas de nuestras costas, la variación del nivel del mar producido por las mareas y el oleaje, la energía del impacto de las olas en nuestras costas, las corrientes oceánicas y estables que circulan alrededor de nuestro país y las corrientes intensas de mareas que se generan en los canales y pasas de diferentes Bahías en nuestra Plataforma.

**Palabras claves:** Corrientes oceánicas y de mareas; fuentes renovables de energía, gradiente de temperatura; oleaje; variación del nivel del mar.

**ABSTRACT:**

The global consumption of renewable energy sources barely exceeds 2.5%, due to the need for efficient technologies for their use, which do not exist or are in various stages of development; the

unfair competition of fossil fuels, whose prices do not include the value of the environmental damage caused when they are consumed; the habits established for more than two centuries, in which fossil carriers and in particular liquid fuels have been used increasingly; wasteful lifestyles and the discriminatory treatment traditionally given to renewable sources as “alternative”, “other”, together with their dispersed or distributed nature, their greater energy density and the poor understanding of the meaning of their renewability.

The country is working on a technological feasibility study and the natural potential that Cuba presents for the use of this energy alternative that is ocean energy. This proposal is aimed at several fronts for the use of this type of energy for the generation of electricity, developing technologies that allow electricity to be obtained from the use of the temperature gradient that exists in the oceanic waters near our coasts, the variation in the level of sea produced by tides and waves, the energy of the impact of waves on our coasts, the stable ocean currents that circulate around our country and the intense tidal currents that are generated in the channels and passages of different Bays in our Platform.

**Keywords:** Ocean and tidal currents; renewable energy sources, temperature gradient; surf; sea level variation.

Recibido: 10/01/2024

Aprobado:22/02/2024

## **INTRODUCCIÓN.**

El agotamiento previsible de los hidrocarburos, hace pensar en una probable transformación energética hacia las fuentes renovables de energía. Todos los portadores energéticos que se utilizan actualmente proceden solo de dos orígenes naturales: Los combustibles fósiles y los minerales radioactivos; que no es renovable, aunque pudiera durar mucho aún si se empleara juiciosamente y el flujo solar – del que se derivan la hidroelectricidad, la energía eólica, la biomasa, el gradiente térmico oceánico, las mareas y las corrientes marinas, la energía fotovoltaica, etc. - solo ocurrirá eventualmente, dentro de millones o miles de millones de años.

Sin embargo, dos circunstancias relacionadas con la hegemonía petrolera evidencian la necesidad objetiva de modificar esa situación mediante una transición hacia las fuentes renovables de energías, derivadas del flujo solar; esas circunstancias son: El consumo de petróleo (así como el de todos los combustibles fósiles) contamina el entorno, amenazando la supervivencia misma de la especie humana y el carácter no renovable del petróleo (y de los fósiles en general) anuncia su desaparición física en una perspectiva más o menos lejana.

En cuanto a los precios del petróleo, estos confirman el carácter insostenible del Sistema Energético Global, no sólo porque depende casi 90% de portadores de energía de origen fósil y no renovable, sino porque los combustibles fósiles constituyen la fuente principal de los gases de efecto invernadero.

El consumo mundial de las fuentes renovables de energía apenas rebasa 2.5% del total, debido al bajo nivel de partida y su lento ritmo de penetración en el mercado, consecuencia combinada de varios factores, entre los que se destacan: La necesidad de tecnologías eficientes para su aprovechamiento, que no existen o están en diversos estadios de desarrollo; la competencia desleal de los combustibles fósiles, cuyos precios no incluyen el valor de los daños ambientales ocasionados cuando se consumen, ni tienen en cuenta su carácter no renovable; los hábitos establecidos durante más de dos siglos, en que los portadores fósiles y en particular los combustibles líquidos derivados del petróleo se han utilizado de manera creciente; los estilos de vida derrochadores, basados en vehículos automotores para pocos pasajeros y el tratamiento discriminatorio y peyorativo que tradicionalmente se da a las fuentes renovables como “alternativa”, “auxiliares”, “complementarias”, “otras”, unido a su carácter disperso o distribuido, su mayor densidad energética y la poca comprensión del significado de su renovabilidad.

## **DESARROLLO**

En el antiguo Instituto Cubano de Hidrografía (ICH) fue creado un grupo de energía que su dirección de investigación estaba dirigida precisamente en este tema. Este grupo del ICH comenzó a dar los primeros pasos en vía de obtener resultado en la generación de energía eléctrica a partir de la energía del mar, teniendo resultados muy discretos en cuanto a este tema, se conoce, que se pudo alumbrar bombillos de Boyas a partir de un dispositivo que actuaba como especie de dínamo en el momento de producirse una ruptura de un determinado oleaje. Todo esto quedó en fase de prototipo de investigación, por desgracia este grupo se desintegró en el decursar del tiempo, pero crearon las bases en nuestro país para desarrollar este tema.

No fue hasta el año 2000 que nuestra empresa GEOCUBA Estudios Marinos a solicitud de ALMEST comenzó una investigación muy exhaustiva en cuanto a este tema a partir de aprovechar de algún modo las fuertes corrientes de mareas que se generan en los puentes de los pedraplenes que se construyeron en el Archipiélago Sabana – Camaguey. Estos estudios realizados en conjunto con el ISPJAE arrojaron resultados interesantes, ya que teniendo en cuenta el desarrollo tecnológico existente en este tipo de frente de investigación hasta esa fecha no era posible desde el punto de vista económico amortizar una inversión de este tipo ya que lo que podía esta tecnología generar de electricidad a duras penas era posible abastecer el alumbrado del Pedraplén a lo sumo.

En el presente año 2006, que el país se encuentra enfrascado en buscar alternativas energéticas a partir de fuentes renovable de energía (Eólica, Biomasa), este tema de la energía oceánica ha vuelto a despertar interés como fuente alternativa para la obtención de energía eléctrica. Recientemente en conjunto con el Centro de Gerencia de Programas y Proyectos Priorizados se está trabajando en un estudio de factibilidad tecnológica y de potencialidades naturales que presenta nuestro país para el aprovechamiento de esta alternativa energética que es la energía oceánica.

Esta propuesta está encaminada en varios frentes de aprovechamiento de este tipo de energía para la generación de electricidad, teniendo en cuenta que a nivel mundial desde el año 2000 hasta la fecha el desarrollo tecnológico en esta dirección ha despertado gran interés. Desarrollándose tecnologías que permiten obtener electricidad a partir del aprovechamiento del gradiente de temperatura que hay

en las aguas oceánicas cercanas de nuestras costas, la variación del nivel del mar producido por las mareas y el oleaje, la energía del impacto de las olas en nuestras costas, las corrientes oceánicas y estables que circulan alrededor de nuestro país (Corriente del Golfo) y las corrientes intensas de mareas que se generan en los canales y pasas de diferentes Bahías en nuestra Plataforma.

Dentro de los estudios oceanográficos nuestra institución cuenta con una data de corrientes alrededor de nuestras costas con más de 10 años de investigaciones mediante una red de 182 estaciones hidrológicas que fueron distribuidas en 37 transeptos perpendiculares a las costas.

### **Características de físico - geográficas de la región.**

El tramo del Cabo de San Antonio a Punta Gobernadora se caracteriza por un bajo que en algunos lugares alcanza las 17 millas de largo sobre el cual se asientan numerosos cayos y en su veril, los arrecifes coralinos de los Colorados.

De Punta Gobernadora a Punta Hicacos la costa presenta extensos tramos rocosos y acantilados, playas y segmentos de costas bajas cubiertas de mangles, con un veril acantilado a menos de 10 m de profundidad y una amplitud máxima de 1-2 millas. En este sector penetran grandes bahías de bolsa como las de Bahía Honda, Cabañas, Mariel, La Habana y la bahía abierta de Matanzas.

Entre Punta Hicacos y Bahía de Nuevititas existe un bajo a menos de 20 m de profundidad, con una amplitud entre 6 y 23 millas, sobre el cual se extiende la cayería del archipiélago de Sabana – Camagüey, compuesto por islotes, cayos, cabezos, quebrados, pasas y canales. La costa firme es baja en muchas partes, cubierta mayormente de mangles. Fuera del borde de la plataforma, las profundidades aumentan de forma brusca.

De Bahía de Nuevititas a Punta de Maisi la costa norte de la isla de Cuba en su mayor parte es acantilada, seguida de una estrecha franja de mangles con playas en su parte W y de terrazas marinas y abruptas elevaciones con segmentos de playas en la parte E. La plataforma insular en este tramo es muy estrecha, la isobata de 200m pasa a una distancia de 1-3 millas a lo largo de la línea costera.

En la costa suroriental de la isla, se puede observar que la plataforma se hace tan estrecha que la isobata de los 200 m se encuentra a 1 milla de la costa y las profundidades rápidamente alcanzan valores de más de 2000 m.

La costa S de Cuba presenta algunos golfos como el de Guacanayabo, el de Ana María y el de Batabanó. En ellos emergen numerosos cayos, pertenecientes al archipiélago de Jardines de la Reina y de los Canarreos.

Para lograr, establecer patrones de comportamiento en las aguas oceánicas alrededor de Cuba, es necesario analizar la data histórica de las principales estaciones oceanográficas llevadas a cabo por distintas expediciones nacionales e internacionales.

Dichas investigaciones han posibilitado obtener el régimen hidrológico y el patrón dinámico de nuestras aguas. Nuestra institución cuenta con una data de corrientes alrededor de nuestras costas con más de 10 años de investigaciones (+ de **40 proyectos**) mediante una red de 182 estaciones hidrológicas que fueron distribuidas en 37 transeptos perpendiculares a la costa.

### **Panorámica general de la Energía Marina en la generación de electricidad.**

La "Energía Marina" es un término que describe todas las formas de energía renovable derivadas del mar.

La energía de las mareas ocurre en virtud del gran movimiento de masas de agua en el mar. Como las mareas van y vienen (flujo y reflujo), el nivel de las aguas cerca de las costas se eleva y desciende y la energía potencial de este intervalo de marea puede ser explotada. También es posible aprovechar la energía cinética del movimiento de las aguas producido por la corriente de marea en si misma.

La energía de las olas ocurre en virtud de los movimientos del agua cerca de la superficie del mar. Las olas son formadas por la acción del viento que sopla sobre la superficie marina, los cuales hacen adoptar un movimiento circular a las partículas de agua. Este movimiento contiene una energía cinética, que se puede determinar por la velocidad, la persistencia del viento, el fetch, la profundidad del lugar, las condiciones del fondo y también la interacción con las mareas.

Dos cosas importantes a aclarar acerca de la energía de las mareas y el oleaje son:

El oleaje ocurre solo en el volumen de agua más cercano a la superficie del mar, mientras que en las mareas se mueve el cuerpo entero de agua desde la superficie del mar hasta el fondo.

En las mareas, la energía producida es en virtud del movimiento neto del agua, mientras que en el oleaje el agua actúa como portador de energía, moviéndose en alguna dirección, pero no realizando un movimiento neto en si mismo.

¿Como puede ser aprovechada la energía marina? Una amplia variedad de ideas han sido propuestas para la extracción y la conversión de la energía marina en electricidad. Algunas de ellas se dan a continuación.

Varios tipos de equipamiento han sido diseñados para capturar la energía de las corrientes de marea:

**Turbinas de marea** – Estas trabajan con un principio similar a los molinos de viento e incluso pueden parecer algo igual. La turbina pudiera ser acoplada directamente a un generador Standard a través de engranajes o usando otros mecanismos actualmente en diseño.

**Mecanismo recíproco de corriente de marea** – Estos presentan unas láminas que se mueven atrás y adelante, en lugar de rotar, en un plano perpendicular a la corriente de marea. Un diseño utiliza un pistón hidráulico para alimentar un circuito que echa a andar un motor hidráulico y un generador de potencia.

**Dispositivo de corriente de marea por efecto Venturi.** – El flujo de marea es dirigido a través de un conducto que lo concentra y produce una diferencia de presión. Esto causa un fluido secundario que pasa a través de una turbina.

Junto a estas opciones, existe un debate acerca de si es mejor un sistema fijo al fondo para una mayor estabilidad o un sistema flotante desmontable que permita su leva para el mantenimiento.

La energía de las mareas puede ser extraída también a través de una barrera de marea o un sistema de lagunas de marea. La barrera de marea es un concepto ya establecido y técnicamente probado el cual esencialmente consiste en una estructura con compuertas e hidroturbinas de baja que dividen en dos a un estuario. El principio de operación es permitir que el agua fluya dentro del área de la barrera con la llenante y fuera de ella con la vaciante. Con el paso del agua se encienden las turbinas que generan la electricidad. Una barrera de marea ha estado en operación en La Rance en la costa norte francesa por más de 40 años. La energía contenida en la corriente de marea depende de su velocidad.

### **Características de las corrientes de marea.**

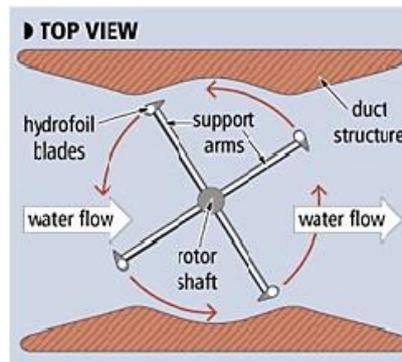
Los patrones de variación de la velocidad de las corrientes de marea son conocidos, es suficiente con aclarar que dos períodos cíclicos predominan: las variaciones semidiurnas (dos veces por día) y el ciclo de mareas sicigia/cuadratura.

Frecuentemente se refieren dos límites de velocidad: El pico medio de velocidad de la marea en sicigia (marea viva) y el de la marea en cuadratura (marea muerta). El primero es el más grande que pudiera ocurrir, mientras que el otro es un máximo restringido cuando el ciclo sicigia/cuadratura está en una depresión. De hecho, en las corrientes de marea reales puede haber algunas diferencias con las clásicas formas senosoidales las cuales son por si mismas variables en el tiempo.

El movimiento de las corrientes de marea ocurre en cierta forma similar a los flujos de viento en el espacio abierto, pero hay algunas diferencias importantes debido a que el fluido está restringido por el fondo del canal (lecho marino) y las paredes (masas terrestres). También el flujo de marea tiene una superficie libre, la cual le da propiedades diferentes a las del fluido dentro de conductos. Cerca de los bordes y el fondo la fricción entre el agua y los lados del canal retarda el fluido y en los límites del canal la velocidad es cero. En efecto el perímetro húmedo ejerce una fuerza de retardo en el cuerpo móvil de agua, y en las situaciones de mareas reales estas son influenciados por la orografía de la línea costera, la batimetría y la rugosidad de estas superficies. Habiendo establecido como el fluido varía a lo ancho del canal, podemos considerar como varía en la columna de agua. En un perfil

de la velocidad desde el lecho marino hasta la superficie marina siempre es mayor cerca de la superficie y cae rápidamente cerca del fondo.

La turbina oceánica Blue Energy actúa como un molino de viento subacuático de eje vertical altamente eficiente. El agua de mar es 832 veces más densa que el aire y es un medio no compresible, una corriente de marea de 8 nudos es equivalente a un viento de 390 km/h. Ideada por el veterano ingeniero aeroespacial Barry Davis, la turbina de eje vertical representa dos décadas de desarrollo e investigación en Canadá. Las cuatro paletas fijas de la turbina están conectadas al rotor que guía a un engranaje integrado y a un generador eléctrico ensamblado. La turbina está montada en una base de concreto marino duradero la cual ancla la unidad al fondo marino, dirige el fluido a través de la turbina concentrándolo y soporta el engranaje y el generador encima. Este asienta sobre la superficie del agua y está completamente accesible para el mantenimiento y reparación. Las paletas hydrofoil emplean la elevación hidrodinámica que causa que las turbinas se muevan proporcionalmente más rápido que la velocidad del agua circundante. El diseño de flujo cruzado optimizado en computadoras asegura que la rotación de la turbina es unidireccional tanto en vaciante como en llenante.

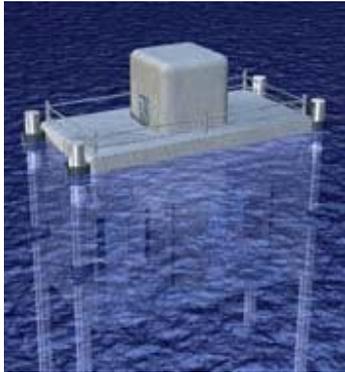


El diseño de la turbina no requiere nuevas metodologías de construcción, es estructuralmente y mecánicamente directo. Los sistemas eléctricos y de transmisión son similares a miles de instalaciones hidroeléctricas existentes. La transmisión de Energía es mediante cable sumergido. Los diseños estandarizados de alta productividad hacen al sistema económico en su construcción, instalación y mantenimiento.



Las turbinas oceánicas Blue Energy pueden ser colocadas en cuatro plataformas flexibles distintas:

**Sistema de Micro Potencia-** Un montaje de entre 5 y 25 kW para servir a un consumidor doméstico remoto.



**Sistema de Potencia de Rango Medio** - Blue Energy se prepara para instalar un sistema de energía oceánico de 500kW Usando dos turbinas de 250kW Blue Energy, esta unidad será competitiva fuera de la red

inicialmente y en tres o cuatro años será competitiva en la red. Útil para el uso en comunidades remotas en sitios industriales, y en regiones protegidas de la contaminación.



**Sistema de potencia Blue Energy** – Para la producción de Energía a gran escala, múltiples turbinas conectadas en serie para crear un cerco de marea cruzando un paraje oceánico o entrada. Son instalaciones energéticas de gran escala, diseñadas de acuerdo a las necesidades de sitios específicos que variarán en sus dimensiones y salida de acuerdo a la locación. Esta estructura tiene el beneficio adicional de que se pueden usar como soluciones de transporte.



**Sistema de Megapotencia**- Una versión a mayor escala del sistema anterior, Es un cerco de marea capaz de producir miles de megawatts de

potencia. Puede ser de muchos km de largo y puede operar en profundidades mayores de 70 metros.

### **Potencialidades naturales en nuestro país de corrientes de mareas.**

Dentro los recursos naturales que cuenta nuestro país existen varios lugares de nuestra plataforma que presentan corrientes de mareas de gran intensidad ya sea por las configuraciones de las costas (Canales de entrada a distintas Bahías de Bolsas, pasas entre cayos de nuestro archipiélago, así como, los canales de los pedraplenes que se han construido para llevar el Turismo a nuestras Cayerías). Algunos ejemplos concretos de la existencia de estas corrientes son:

- Canal de entrada de la Bahía de Nuevitás.
- Canal de entrada de la Bahía de Nipe.
- Canal de entrada de la Bahía de Banes.
- Pasas de los Puentes de los Pedraplenes.

## **CORRIENTES MARINAS EN AGUAS PROFUNDAS.**

La región noroccidental de Cuba localizada desde el cabo de San Antonio hasta el cayo Bahía de Cádiz se caracteriza por una dinámica compleja de sus aguas. Las velocidades máximas de las corrientes han mostrado valores de 140 cm/s durante el mes de septiembre y velocidades que alcanzan los 100 cm/s en los meses de diciembre febrero y junio.

Al N de las bahías del Mariel y de la Habana la corriente se dirige hacia el E formando parte de la Corriente de La Florida con intensidades que pueden alcanzar los 2 nudos (100 cm/s) en su eje.

En el estrecho de Yucatán, cerca de la costa cubana, se han observados corrientes de dirección N y S bastante inestables en espacio y tiempo por lo que no permiten determinar un patrón definido en su comportamiento. En este mismo estrecho fueron observados dos flujos de dirección S. Uno, que bordea la costa con velocidades menores de 50 cm/s y que a veces se mueve entre 3 y 29 millas, con velocidades que oscilan entre 20 y 120 cm/s.

El otro flujo se localiza entre las 18 y 40 millas de la costa con velocidades entre 10 y 100 cm/s llegando a alcanzar 180 cm/s.

El flujo de dirección N también se ha caracterizado por ser inestable observándose en unas ocasiones, a partir de las 2 millas, con velocidades que no superan los 100 cm/s y en otras alrededor de las 35 millas con velocidades superiores a los 100 cm/s. El valor máximo de velocidad que se ha reportado ha sido de 200 cm/s y fue muestreado en el mes de junio de 1997.

El comportamiento de la velocidad y dirección de las corrientes en el estrecho de San Nicolás ha sido poco estudiado. En esta zona se generan contracorrientes costeras con velocidades de 50 cm/s.

En el Canal de las Bahamas, son observados flujos de dirección NW cerca de las costas de Las Bahamas durante el invierno y cercanos a la plataforma cubana hasta 40 millas al W de Cayo Coco en el otoño.

En la capa superficial las corrientes más intensas se registraron entre la Bahía de Nuevitás y Puerto Padre, alcanzando velocidades entre 55 y 95 cm/s en la época de invierno y en el otoño. Al N de Moa, en el verano y la primavera las velocidades no son superiores a un nudo (50 cm/s). En el Paso de los Vientos según Gómez (1971) las corrientes pueden tener dirección N o S. Las velocidades máximas de las corrientes de dirección N fueron de 50 cm/s y las de dirección S de 45 cm/s.

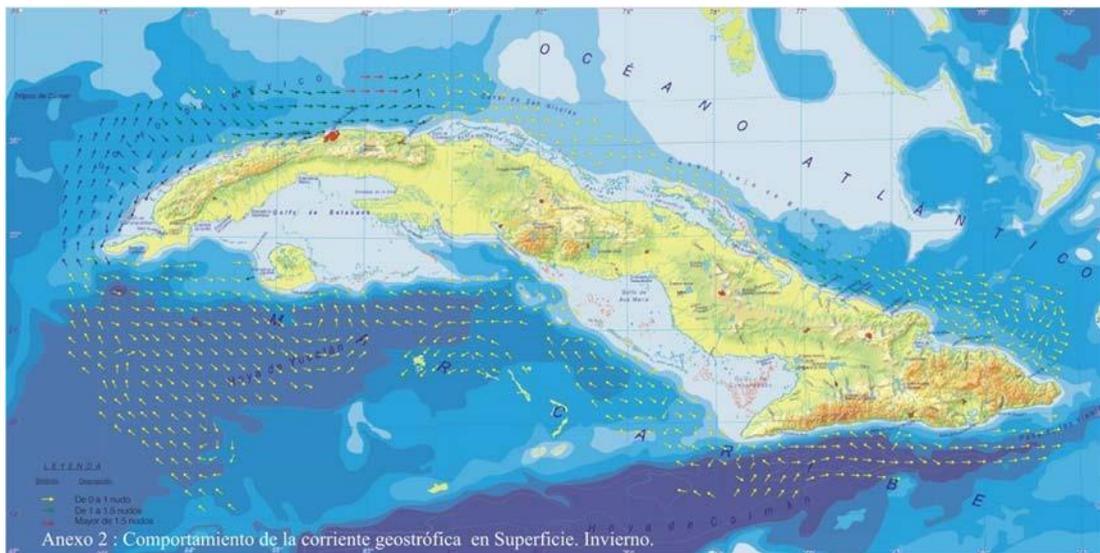
La región suroriental durante el verano se forma un sistema de circulación hacia el E -SE con velocidades aproximadas a 1 nudo (50 cm/s), que es únicamente interrumpido al W de la Bahía de Guantánamo por un giro ciclónico con velocidades máximas de hasta 110 cm/s. Al SW de Cabo

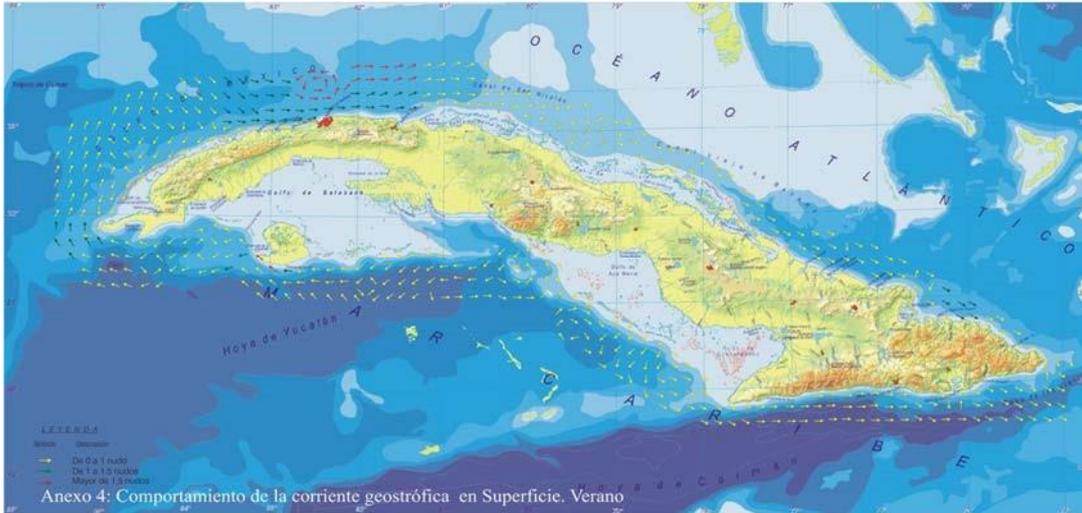
Cruz. Este movimiento en giro, es enriquecido por las aguas que fluyen desde el SW del Mar Caribe, con velocidades próximas a 1 nudo (50 cm/s).

Durante la primavera al S del Golfo de Ana María las velocidades no superan los 50 cm/s. En el otoño, se destacan velocidades de corrientes máximas de 100 cm/s, aún son escasos los datos para establecer patrones de permanencia en la zona. Entre el S de Cayo Guano del Este y el S de Trinidad, hay velocidades inferiores a 1 nudo (50 cm/s).

En todas las épocas del año las corrientes en la región suroccidental muestran dirección hacia el W, aunque son interrumpidas por la presencia de giros ciclónicos y anticiclónicos en el área y por flujos de dirección contraria (contracorriente cubana).

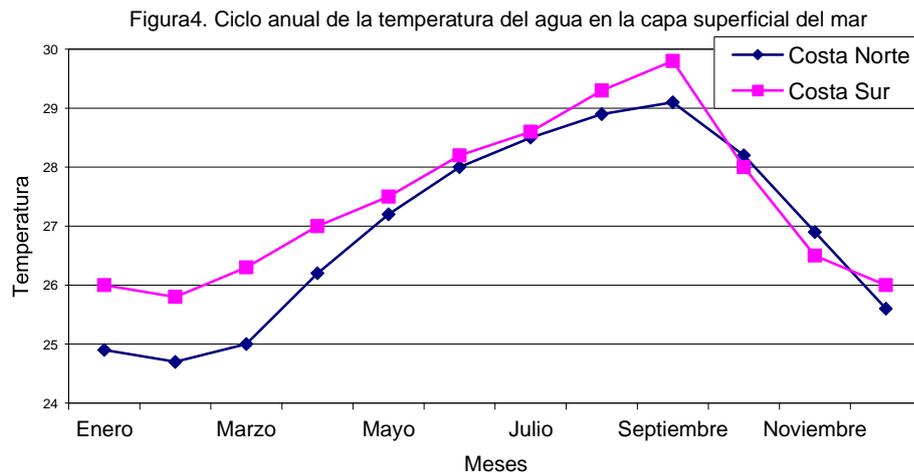
La contracorriente cubana circula durante todo el año en las proximidades del cabo de San Antonio, con aguas que se mueven hacia el S, introduciéndose en el Mar Caribe. Cuando estas aguas penetran en la región, salvo en invierno, toman dirección E, moviéndose paralelamente y bastante cerca de la línea de costa y de la plataforma suroccidental de Cuba (Golfo de Batabanó). En cuanto a la velocidad de las corrientes en la costa S generalmente no exceden de 1 nudo, aunque se observan valores superiores en algunas zonas próximas a las costas.



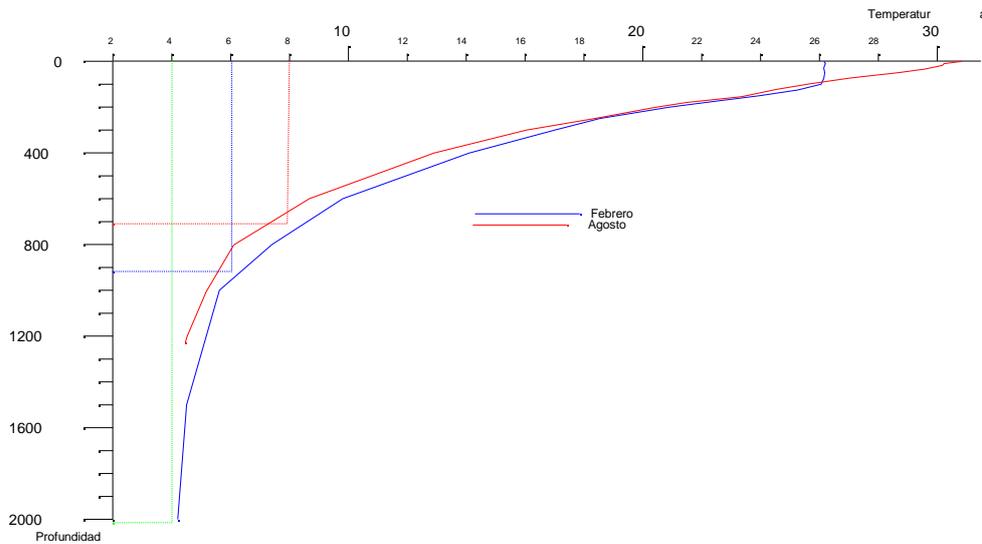


## GRADIENTES DE TEMPERATURA

La posición geográfica del archipiélago cubano le confiere características muy particulares al patrón térmico de las aguas que lo rodean. Dos zonas profundas se encuentran en la costa sur, La Fosa de Oriente, la mayor profundidad del Mar Caribe, al sur de las provincias Orientales y la Fosa de Jagua, al sur de la Bahía de Cienfuegos. De forma general la costa sur posee mayores profundidades que la costa norte. El ciclo anual de la temperatura promedio mensual del agua en la capa superficial muestra mínimas en el mes de febrero con valores que oscilan entre 24.7 y 25.8 °C y máximas superiores a los 29 °C en el mes de septiembre. Muestra además que la costa norte posee valores térmicos menores que la costa sur.



Con la profundidad la temperatura del agua disminuye gradualmente registrándose las mínimas cercanas a 4 °C a partir de los 1200 m de profundidad. (invierno y verano)



## Potencial del Oleaje.

El potencial eléctrico de las olas es usado fundamentalmente en la generación de mediana y pequeña escala, lo mismo en instalaciones costeras como mar afuera. La topografía costera, así como, su accesibilidad limita el tamaño de las plantas de generación en la costa.

Nueva Zelanda tiene potencial para un número de plantas con potencia de salida superior a los 3 MW. Uno de los sistemas más fuertes técnicamente es el uso de las formaciones naturales como cuevas para un sistema costero mediante diques con múltiples canales.

La capacidad de los sistemas tanto mar afuera como costeros pudiera extenderse hasta los 20 MW utilizando plantas montadas en patanas ancladas. La transmisión mediante cables submarinos tiene un significativo costo para los sistemas montados mar afuera.

Existen diferentes tecnologías de generación por oleaje. Ellas son: Canales cerrados/reservorios: utiliza sistemas tradicionales de marea o plantas generadoras de hidroturbinas; Sistema oscilatorio en columna: utiliza la presión del aire generada por el movimiento de las olas para mover la turbina. (Una estación de 0.5 MW que usa esta tecnología está ahora en producción comercial en Escocia); Sistema mecanizado recíproco: utiliza flotadores para mover pistones, bombas, etc.; Sistemas piezoeléctricos.

Limitaciones: A medida que disminuye la profundidad las olas pierden energía, es decir hay más energía potencial a obtener de estaciones mar afuera que en las costeras. Las más exitosas han sido los canales cerrados y otras instalaciones costeras.

Las grandes instalaciones mar afuera están limitadas por una mayor inversión en infraestructura, como una inversión sustancial en cables submarinos y líneas de transmisión terrestres. Los sistemas de canales cerrados están también limitados en capacidad por la altura del oleaje disponible.

El problema de la extracción de la energía del oleaje es complejo y muchos diseños de dispositivos han sido propuestos. Es útil introducir algunas condiciones de orden físico y de los mecanismos de conversión de energía.

### ***Orden Físico.***

**Emplazamiento** – Los dispositivos pueden estar en la línea costera, cerca de la costa o mar afuera. La diferencia entre estos es debida a los requerimientos de diseño para la profundidad del agua (estos generalmente se incrementan con la distancia a la costa), la energía que contienen las olas (siendo mayor mar afuera) y los accesos para la instalación, retiro, operación y mantenimiento

**Fijación** – Los dispositivos costeros o de mar afuera pudieran ser o fijos al fondo o flotantes, el costero puede ser fijado al fondo y el de mar afuera anclado.

**Reacción** – Estos necesitan un sistema de fuerzas reactivas para extraer la energía y este es uno de los más grandes retos del diseño. Para crear este sistema dos o más cuerpos necesitan moverse con relación a otro mientras al menos un cuerpo interactúa con el oleaje.

**Parada** – Dentro de los sistemas de reacción un requerimiento común es evitar las situaciones donde el movimiento relativo es tan grande que altas fuerzas destructivas ocurren entre los cuerpos (ej. Un pistón hidráulico que es forzado más allá de su alcance).

**Desplazador** – Es el cuerpo que se mueve con las olas. Este podría ser una boya o como en el caso de la Columna Oscilatoria de Agua (OWC) una masa de agua. En el caso de la boya puede estar en la superficie del oleaje o estar sumergida.

**Reactor** – Como se dijo anteriormente pudiera ser un cuerpo fijo al fondo o el fondo mismo. El pudiera ser también otra estructura o masa no fija pero que se mueva en una forma que las fuerzas de reacción se creen (ej. Moviéndose en diferente magnitud de movimiento o en diferentes tiempos). Un grado de control sobre las fuerzas actuando sobre cada cuerpo y/o entre los cuerpos es con frecuencia necesaria para optimizar la cantidad de energía capturada.

En algunos diseños el reactor se encuentra dentro del desplazador, mientras en otros es un cuerpo exterior. Los reactores internos no están sujetos a la fuerza del oleaje, pero los externos pudieran experimentar cargas que causen su movimiento en forma similar al desplazador.

Algunos de los más conocidos se mencionan a continuación.

**Columna Oscilatoria de Agua (OWC)** – Comprende una estructura (colector) en parte sumergida, la cual está abierta al mar por debajo de la superficie del agua de forma que contenga una columna de agua. El aire está atrapado sobre la superficie de la columna de agua, cuando el agua entra y sale del colector, la columna de agua se mueve hacia arriba y abajo y actúa como un pistón en el aire,

empujándolo atrás y adelante. El aire está canalizado hacia una turbina la cual está acoplada a un generador para producir electricidad.

**Desbordamiento** – Consiste en una estructura sobre la cual las olas rompen, un reservorio que colecta el agua e hidro turbinas instaladas en el fondo del reservorio. El agua colectada hace funcionar la turbina cuando esta sale hacia el mar y a su vez las turbinas están acopladas a un generador que produce electricidad.

**Punto absorbente** –Es una estructura flotante que absorbe la energía en todas las direcciones por sus movimientos en o cerca de la superficie. Pudiera ser diseñado como un resonador, es decir moverse con amplitudes mas grandes que la de las mismas olas. Esta característica es muy útil para maximizar la cantidad de potencia disponible para su captura. El sistema de despegue de potencia puede tomar variadas formas en dependencia de la configuración de los desplazadores y reactores.

**Terminador** – Es también una estructura flotante que se mueve en o cerca de la superficie, pero absorbe la energía en una sola dirección. El dispositivo se extiende perpendicular a la dirección predominante de las olas de forma tal que cuando las olas arriben, el mismo las contenga. Otra vez la resonancia pudiera ser empleada y el sistema de despegue de potencia pudiera tomar variadas formas.

**Atenuador** – Es una larga estructura flotante parecida al terminador pero orientada paralela a las olas, remonta las olas como un buque y sus movimientos a lo largo y a lo ancho puede ser contenidos para extraer la energía. Una ventaja teórica del atenuador sobre el terminador es que en este último el área expuesta al oleaje es pequeña y en consecuencia las fuerzas que experimenta son mucho menores. Existen además muchos otros conceptos de diseño.

Otro dispositivo que está siendo considerado por MEC es el **Rotor de Olas**, el cual es una forma de turbina accionada directamente por las olas y acoplada a un generador para producir electricidad. Otros mecanismos utilizan el volumen contenido de agua, o explotan las diferencias de presión en la misma. Han sido sugeridas también estructuras flexibles, ya que una estructura que cambia en forma y volumen es parte del sistema de despegue de potencia.

La energía contenida en las olas está en función de su altura y su período. El oleaje depende fundamentalmente de las características del viento que lo genera (velocidad, dirección, persistencia y alcance o “Fitch”), de la configuración y orientación de la línea de costa y de la topografía del fondo sobre el cual se desplaza.

**Es de destacar que la costa nororiental de Cuba es el tramo costero donde se presentan como promedio los mayores valores de la altura del oleaje en nuestro país. Esto se debe al hecho de que esta es una zona totalmente abierta al Océano Atlántico, lo que implica, por un lado, que los “fretches” del viento sean grandes y sin obstáculos físicos que impidan el desarrollo del oleaje y por otro, que a esta zona puedan arribar con relativa frecuencia olas que se formen en regiones bien**

lejanas de la zona de estudio (mar de leva). Además, la ausencia de una plataforma insular ancha en la zona que actúe como disipador natural del oleaje refuerza este hecho.

El tiempo en Cuba está dominado de modo alterno por el centro anticiclónico oceánico del Atlántico durante la temporada húmeda y por los anticiclones migratorios del invierno. La dorsal de las altas presiones oceánicas es responsable de que, durante gran parte del período de verano, en la zona de estudio imperen vientos predominantemente del NE al E con velocidades entre 10 y 20 km/h, que pueden alcanzar hasta 30 km/h en la tarde, siendo flojos y variables durante la noche y la madrugada.

En la época de seca o época invernal la dorsal del Atlántico se retira y da paso a anticiclones migratorios que proceden del continente. La salida al Atlántico de estos anticiclones migratorios, trae la intensificación del flujo de vientos del I Cuadrante en la costa N de Cuba desde el final de la mañana o comienzos de la tarde, con velocidades que pueden llegar en el litoral a valores sostenidos entre 25 y 35 km/h con rachas entre 50 y 60 km/h. Estos son los llamados “frentes fríos”, los cuales en cuanto al giro de sus vientos pueden ser clásicos (vientos del S antes del paso del frente y giro paulatino hacia el SW, W y NW) o revésinos (vientos que retroceden del E al NE y N)

La combinación de bajas presiones en el Caribe y altas presiones en el Atlántico o en el E de los EE.UU. trae consigo el desarrollo de “brisotes” del NE al ENE en los meses de abril y mayo. Otros fenómenos que pueden afectar significativamente el campo de vientos en la zona de estudio son los organismos ciclónicos tropicales (que incluyen las tormentas tropicales y los huracanes. Las trayectorias más peligrosas de ciclones tropicales que afectan al territorio provienen del Océano Atlántico con rumbo E-W, desplazándose al S del mismo, o del Mar Caribe occidental con rumbo S-N, pasando al W. El cruce de un organismo ciclónico tropical produce un deterioro muy significativo del tiempo, ya sea por las intensas precipitaciones o los fuertes vientos y marejadas que los acompañan.

La línea de costa de los tramos de la zona objeto de estudio tiene diferentes orientaciones. Este hecho hace que en cada tramo la dirección del oleaje incidente varíe de acuerdo a su dirección en aguas profundas, o sea que, por ejemplo, el oleaje de dirección N que incide casi perpendicularmente en algunos tramos, puede mostrar una inclinación con respecto a la línea de costa en otros tramos; por lo que en el análisis del oleaje debe ser tenido en cuenta este hecho.

El régimen habitual de cualquier magnitud relaciona los diversos niveles de la misma con la probabilidad de que dichos niveles no sean superados en un período de tiempo igual a un año climático medio. En el caso del oleaje se denomina régimen escalar de la altura del oleaje o simplemente régimen medio o régimen habitual, a la distribución estadística que define el porcentaje de tiempo en que, para el año climático medio, la altura del oleaje no excede determinado valor.

Las direcciones del oleaje incidente en la zona de estudio, considerando todos los tramos y, por tanto, las que se deben tener en cuenta son: NW, N, NE, E y SE. Se ha considerado que el resto de las direcciones no influyen en la zona de estudio, por lo que su tiempo de acción puede ser considerado como tiempo de calmas. Para las direcciones mencionadas se han determinado los días de excedencia

y los días de ocurrencia, utilizando el método de las excedencias y la función de distribución exponencial. Las frecuencias de ocurrencia de las direcciones del oleaje consideradas aumentan de NW a E; esto es 4.93, 9.82, 18.19 y 29.28 % para las direcciones NW, N, NE y E respectivamente y luego disminuyen para el SE con 19.41 %. Dicho de otro modo, predomina el oleaje del Primer Cuadrante, lo que está determinado, como ya se planteó anteriormente, por la influencia del Anticiclón de las Azores-Bermudas que ejerce permanentemente su influencia sobre nuestra zona geográfica provocando los vientos alisios de esas direcciones que, a su vez generan el oleaje predominante.

Las mayores alturas medias corresponden a las direcciones NW y N: 1.73 y 1.72 m, respectivamente lo que está relacionado con la ocurrencia de los frentes fríos invernales, que generalmente están acompañados de vientos fuertes de esas direcciones. O sea, predomina el oleaje del Primer Cuadrante, pero es más peligroso el proveniente del Cuarto durante la época invernal. La altura significativa media general para el año es de 1.44 m.

En lo que respecta a los rangos de la altura del oleaje, las más frecuentes son las olas menores de 2 m para las direcciones consideradas (242.08 días al año). Esta altura será superada 55.87 días al año. En las direcciones NW, N, NE, E y SE habrá oleaje durante 297.94 días, el resto 67.06 días corresponde a tiempo de calmas incluyendo las olas de dirección S, SW y W que a los efectos del presente estudio y teniendo en cuenta la orientación de la costa, pueden considerarse como tales.

Es bueno aclarar que cuando estamos hablando del régimen habitual y decimos, por ejemplo, que la altura del oleaje no superará los 2 m, 242 días al año, no queremos decir que esto ocurrirá 242 veces durante 24 horas. Estamos queriendo decir que la altura del oleaje no superará los 2 m, 242 días en total durante el transcurso del año, o sea 5808 horas (242 x 24 hrs.), tiempo que puede estar distribuido irregularmente durante todo el año. Todo lo hasta aquí expuesto se refiere al año climático medio. Habrá años en que los valores aquí expuestos serán superados y otros en que quedarán por debajo.

El régimen extremo de una variable permite asociar su valor máximo esperado con el período de retorno probable en que éste puede suceder estadísticamente. Para el presente trabajo el régimen extremo no se tendrá en cuenta, pues la energía que es necesaria aprovechar se encuentra en su régimen habitual teniendo en cuenta la tecnología que se ha desarrollado hasta la fecha.

## **CONCLUSIONES**

### **Gradiente termogénico**

- Alrededor de las costas de Cuba se pudieran alcanzar elevadas producciones de energía eléctrica porque el recurso está disponible y de elevada potencialidad de trabajo.
- La solución del abastecimiento de agua y la refrigeración tiene una vía de solución por medio de la tecnología OTEC.
- Fuente de generación de empleo.

### **Energía mareomotriz**

- La instalación de Rance ha demostrado su fiabilidad.
- Se estima que el costo de inversión es 2,5 veces el de las centrales hidroeléctricas.
- Se pueden reducir los costos de este tipo de instalación entre 25 y 30 % al utilizar estructuras flotantes, remolcadas hasta el lugar de destino y utilizar un solo embalse.
- En Cuba el recurso aprovechable de las mareas son las corrientes y no la amplitud

### **Energía de las olas**

- No existe todavía un consenso de la mejor manera de convertir la energía de las olas en electricidad.
- Se esperan instalaciones comerciales para el periodo 2002-2010 o posterior en dependencia a la ubicación de la costa.
- La producción de energía por esta vía es tres veces más costosa que empleando plantas termoeléctricas.

### **BIBLIOGRAFÍA**

1. COASTAL ENGINEERING RESEARCH CENTER. Shore Protection Manual. Department of the Army USA. Washington. 1984.
2. FRIAS, A.; MORENO, G. Ingeniería de Costas. Editorial Limusa. México. 1994.
3. MARTIN, M. J.; MARTINEZ, J. Análisis medio y extremal del oleaje. Centro de Estudios de Puertos y Costas. MOPU. Madrid. 1990.
4. NOBLE DENTON CONSULTANCY SERVICE, Ltd. Rapid evaluation of extreme environmental conditions for a location offshore. Cárdenas, Cuba. Londres. 1992.
5. PC Global Wave Statistics. BMT, Ltd. 1988.
6. RONDON, H. R. Estudios del oleaje dirigidos a proyectos costeros. Instituto Cubano de Hidrografía. MINFAR. La Habana. 1994.
7. RONDON, H. R.; RODRIGUEZ, R. Sistema para el Cálculo de los Parámetros del Oleaje, SICAPOL Versión 2.0. GEOCUBA Estudios Marinos. MINFAR. La Habana. 1997.
8. Overseas Coastal Area Development Institute. Technical Standars for Port and Harbour Facilities in Japan. New Edition. Japan. 1991