

# Potencial de generación de energía a lo largo de la costa colombiana mediante el uso de corrientes inducidas por mareas

## Tidal Current Potential for Energy Generation along the Colombian Coastline

Recibido 29 de septiembre de 2008, aprobado 13 de enero de 2008, modificado 22 de enero de 2009.

### John M. Polo

Ingeniero Civil, candidato a Magíster en Hidrosistemas. Grupo Hidrociencias. Pontificia Universidad Javeriana. EMDEPA Consultoría S.A. Bogotá D.C., Colombia  
johnmichaelpolo@gmail.com ✉

### Jorge Rodríguez

Ph.D. Profesor Asociado. Director del Departamento de Ingeniería Civil. Grupo de Hidrociencias. Pontificia Universidad Javeriana. Bogotá D.C., Colombia  
rodriguezja@javeriana.edu.co ✉

### Armando Sarmiento

M.Sc. Profesor Asistente. Grupo de Hidrociencias. Pontificia Universidad Javeriana. Bogotá D.C., Colombia  
asarmien@javeriana.edu.co ✉

#### PALABRAS CLAVES

Corrientes marinas, energía renovable, extracción de energía, hidrodinámica.

#### KEY WORDS

Energy extraction, hydrodynamics, renewable energy, tidal current.

#### RESUMEN

Este artículo reporta el potencial de energía obtenido de corrientes de marea a lo largo de la costa colombiana en una extensión aproximada de 3 100 km. Se utilizan imágenes Landsat y sistemas de información geográfica para digitalizar la línea de costa. Estas imágenes fueron correlacionadas con la topografía y batimetría existente, las cuales Director del Departamento de Ingeniería Civil presentaron características para ser aprovechadas desde el punto de vista de generación de energía. Los niveles de marea se obtuvieron de registros en estaciones de medición y modelos de predicción, y fueron usados para estimar el nivel de marea en los puntos de interés. La corriente inducida por la marea y los niveles dentro y fuera de la bahía se obtuvieron a partir del modelo de Keulegan.

#### ABSTRACT

This article reports the energy potential obtained from tidal currents along the Colombian coastline (approximately 3100 km). Landsat images and GIS software were used to digitalize the coastline. These images were correlated with bathymetric charts and geographical locations that presented characteristics suitable for tidal energy generation projects were identified. Tidal levels were obtained from several measurement stations and model predictions and used to estimate tidal levels at specific locations of interest. Tidal current velocity and tide level inside the bay or strait was obtained with the Keulegan model and validated with previous studies and measurements.

## INTRODUCCIÓN Y MARCO CONCEPTUAL

Colombia, como país en vías de desarrollo, busca encaminar su futuro energético en tecnologías renovables que no dependan de la volatilidad de los precios del petróleo, ya que sus reservas actuales tan solo suplirán la demanda interna en el corto plazo [1, 2]; en el caso del carbón y gas natural, se cuenta con reservas suficientes para el próximo decenio pero tienen la problemática de la producción de gases de efecto invernadero.

Tradicionalmente, Colombia ha estado a la vanguardia en el uso de energía hidroeléctrica. No obstante, aunque es una energía renovable, conlleva dificultades ambientales por las grandes zonas de inundación generadas en estos proyectos que, debido a la alta biodiversidad existente, puede destruir por completo el hábitat de algunas especies únicas en el mundo [3].

Por lo anterior, sectores públicos y privados hacen esfuerzos por adoptar diversos tipos de energías renovables (e.g., eólica) [4]. Existe, por tanto, un interés en el desarrollo de proyectos piloto pequeños con el fin de probar las tecnologías en el país.

En los océanos podemos distinguir dos tipos de corrientes: las oceánicas y las corrientes inducidas por mareas. Las corrientes oceánicas se presentan por diversas causas, entre ellas el viento, las diferencias en temperatura y salinidad, y la rotación de la tierra. Colombia está afectada principalmente en el Atlántico por la corriente del Nordeste del Brasil, que posteriormente alimenta la corriente del Golfo, y en el Pacífico por la corriente de Humbolt, que se mueve por la costa occidental de Suramérica desde el Ártico y es una corriente fría. Debido a que el fin de esta investigación es el aprovechamiento energético de las corrientes y las tecnologías cuya investigación es más promisorias, y se necesitan velocidades altas las cuales no se generan en las corrientes oceánicas que afectan al país, este trabajo se enfoca en las corrientes inducidas por mareas.

Las mareas, que están definidas como el cambio en el nivel de las aguas del mar, se pueden dividir en marea astronómica y meteorológica. En las costas, la marea

meteorológica es producida por fenómenos meteorológicos cercanos o alejados en el mar; su principal variable es el viento, que puede ser incrementado por sistemas de baja presión y produce el oleaje (e.g., seas y swell), y que al impactar en la costa incrementa el nivel del mar en ella. Las mareas meteorológicas en ambas costas colombianas son muy diferentes y es necesario analizarlas por separado, lo cual se hará en futuros estudios. Para el caso que nos ocupa, se considerará únicamente la marea astronómica, lo que genera una estimación conservadora de la cantidad de energía que se puede producir.

La marea astronómica es el movimiento periódico de ascenso y descenso de las aguas del mar producido por la atracción de los astros, principalmente el sol y la luna [5]. Si bien la atracción producida por el sol y la luna es muy pequeña comparada con la fuerza gravitacional de la tierra, es suficiente como para registrar cambio promedio mayor de 3m en el Pacífico colombiano.

Acudiendo a la ley de la gravitación de Newton, podemos observar la influencia gravitatoria promedio que tienen el sol y la luna en los objetos que se encuentran sobre la superficie de la tierra.

$$F = -G \frac{m_1 m_2}{r^2} \quad (1)$$

Donde:

$F$  = fuerza de atracción

$m_1$  = masa objeto 1

$m_2$  = masa objeto 2

$G$  = gravitación universal

Los objetos que se encuentran sobre la superficie terrestre experimentan una aceleración debida a la gravedad de la tierra de aproximadamente  $9.8169 \text{ m/s}^2$ ; de la misma manera, el sol y la luna ejercen sobre ellos una fuerza gravitatoria que genera una aceleración promedio de  $0.0059 \text{ m/s}^2$  y  $0.0343 \text{ m/s}^2$ , respectivamente. Si bien las fuerzas gravitatorias del sol y la luna son pequeñas en comparación con la tierra, son suficientes para generar cambios de mareas máximos mayores a 4 m en la Costa Pacífica de Colombia y mayores a 13 m en algunos lugares del mundo. Las co-

rientes inducidas por mareas se generan por el tránsito de la onda de marea; esto hace que en bahías con boca estrecha se produzcan grandes velocidades que pueden ser aprovechadas en generación energética.

Existen muchas y muy diversas formas propuestas para el aprovechamiento de las corrientes por mareas. Sin embargo, se considerarán para este artículo el uso de molinos de agua debido a su gran similitud con los molinos de viento pues se utilizan comercialmente en varios países y son ampliamente conocidos.

Una de las mayores ventajas de los molinos de agua es que aprovechan una mayor densidad energética, ya que la densidad del agua es más de 800 veces mayor que la del aire. Esto hace posible aprovechamientos energéticos con velocidades desde los 2 m/s; las cuales son muy inferiores a las necesarias para producir energía eólica.

Para el cálculo de las corrientes en los estrechos se utilizará el modelo de Keulegan propuesto en [2], el cual parte de datos como el área de la bahía, su profundidad, el rango de mareas, la longitud del canal, su ancho y profundidad; y, a su vez, obtiene como resultado la velocidad de salida en la boca de la bahía, la amplitud de la marea en la bahía y el ángulo de desfase entre la marea en la bahía y en mar abierto.

Las principales suposiciones del modelo son: las paredes de la bahía se asumen verticales, no hay ríos entrando en la bahía, no se presentan corrientes por densidad, la fluctuación de la marea se comporta sinusoidal, el nivel del mar crece uniformemente en la bahía, el área transversal del canal es constante y se desprecia la inercia del agua en el canal. Este modelo se basa en las ecuaciones de movimiento de los fluidos y de conservación de masa [6].

#### METODOLOGÍA DE LA INVESTIGACIÓN

El estudio realizado comenzó con el uso de imágenes Landsat del año 2000 de toda la costa colombiana, con resolución de píxel de 14.25 m, que fueron

empalmadas en el sistema de información geográfica (SIG) ARCGIS. Se digitalizó toda la línea costera con el fin de ubicar las bahías existentes mediante la creación de un Shape [7]. Una vez realizada la identificación se procedió al cálculo del área de cada bahía, utilizando las herramientas del SIG como se muestra en la Figura 1



Figura 1. Bahías potenciales para generación de energía mareomotriz en la Costa Caribe

Para el proyecto se consiguieron 2 fuentes batimétricas: la primera fue ETOPO 2 [8], que al tener baja resolución solo fue usada como ayuda visual en la digitalización de la línea costera, y la segunda base de datos se obtuvo de las batimetrías publicadas por la Dirección General Marítima de Colombia (DIMAR) [9]. La comparación de los mapas de la DIMAR con las imágenes landsat permitió el cálculo de la profundidad media en las bahías, así como el cálculo de la profundidad media, ancho y longitud del canal de salida de las bahías.

Los datos utilizados en el cálculo de la marea promedio para cada sitio son un promedio de los pronósticos de mareas astronómicas publicados por el Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales de Colombia (IDEAM) para los años 2005 y 2006 [10].

Para ilustrar el uso del modelo de Keulegan, tomaremos como ejemplo el cálculo de la velocidad de la corriente en la bahía adyacente a Punta Catripe, ubicada en la Costa Pacífica de Colombia con latitud  $5^{\circ} 18' 00''$  y longitud  $77^{\circ} 24' 00''$ .

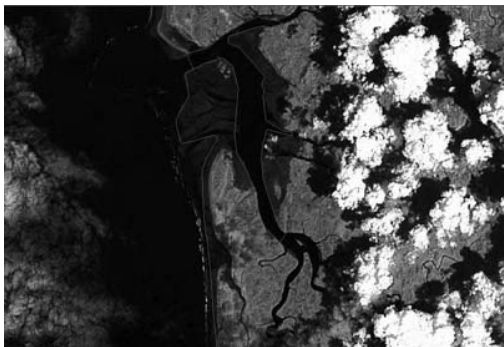


Figura 2. Ensenada Catripe. Costa Pacífica colombiana.

Con ayuda del programa ARCGIS, se estableció que esta bahía tiene un área ( $A_b$ ) de  $1.376 \text{ km}^2$ , una longitud del cauce de salida ( $L$ ) de  $1300 \text{ m}$  y un ancho ( $B$ ) de  $350 \text{ m}$ .

El rango de mareas ( $r$ ) que se usó fue el rango medio de la estación de Bahía Solano, situada a  $300 \text{ km}$  al norte de Punta Catripe, el cual se calculó en  $3.09 \text{ m}$ . Se asume un periodo de marea semidiurno de  $T=12.42 \text{ h}$ .

Para encontrar la profundidad media del canal ( $d$ ) y la bahía ( $db$ ), se utilizaron las batimetrías de la DIMAR y se obtuvieron  $3 \text{ m}$  en ambos casos; es pertinente aclarar el hecho de que, si bien los molinos de generación de energía tienen aspas de entre  $5 \text{ m}$  y  $11 \text{ m}$ , aún cabe la posibilidad de instalarlos en la parte más profunda del cauce.

Con los datos anteriores calculamos algunas características geométricas del canal, como son su área transversal ( $A_c$ ) y su radio hidráulico ( $R$ ).

Calculamos también el coeficiente de pérdidas por fricción ( $f$ ) en función del  $n$  de Manning que, debido a las condiciones del canal, se asume igual a  $0.20$  [11]

$$f = \frac{116 n^2}{R^{1/3}} = \frac{116 \times 0.02}{2.95^{1/3}} = 0.032 \quad (2)$$

Posteriormente se realizó una sumatoria de pérdidas considerando las pérdidas por fricción a la entrada

( $k_{en}$ ) y a la salida ( $k_{ex}$ ) de la bahía, que son asumidas como  $1.0$  y  $0.1$ , respectivamente, por sugerencia del autor [6].

$$F = k_{en} + k_{ex} + \frac{fL}{4R} = 1.0 + 0.1 + \frac{0.032 + 1300}{4 \times 2.95} = 4.67 \quad (3)$$

Ahora es posible calcular los parámetros del modelo  $K_1$  y  $K_2$ :

$$K_1 = \frac{a_o A_b F}{2L A_c} = \frac{(3.09/2)(1.376 \times 10^7) 4.67}{2 \times 1300 \times 1050} = 36.33 \quad (4)$$

$$K_2 = \frac{2\pi}{T} \sqrt{\frac{L A_b}{g A_c}} = \frac{2\pi}{12.4 \times 60 \times 60} \sqrt{\frac{1300 \times 1.376 \times 10^7}{9.8 \times 1050}} = 0.19 \quad (5)$$

Ingresando a las gráficas del método [6] se puede obtener la razón entre la amplitud de la marea en la bahía ( $a_b/a_s$ ) y el océano, un factor de velocidad máxima ( $V'm$ ) y el ángulo de retardo ( $\epsilon$ ) en la ocurrencia de la marea en la bahía.

$$\frac{a_b}{a_s} = 0.88 \quad V'm = 0.9 \quad \epsilon = 43^\circ$$

Por lo tanto, es posible calcular la velocidad máxima ( $V_m$ ) y el caudal máximo de acuerdo a las siguientes ecuaciones:

$$V_m = \frac{V'm 2\pi a_s A_b}{A_c T} = \frac{0.9 \times 2\pi \times (3.09/2) \times 1.376 \times 10^7}{1050 \times 12.42 \times 3600} = 2.56 \text{ m/s} \quad (6)$$

Finalmente se chequea el periodo asumido.

$$T \gg \frac{L_b}{\sqrt{g d_b}} = \frac{4600}{\sqrt{9.8 \times 3}} = 848 \text{ s} \ll 12.42 \text{ h} \quad (7)$$

donde  $L_b$  es la distancia desde la desembocadura hasta el punto más alejado de la bahía.

Para el cálculo de la potencia de generación por sitio, se parte de la ecuación de energía cinética y se deduce la fórmula de potencia

$$E_c = \frac{1}{2}mv^2 \quad (8)$$

Donde:

$E_c$  = energía cinética

$m$  = masa

$v$  = velocidad

Dividiendo por el tiempo, reemplazando la masa por la velocidad  $y$ , finalmente, utilizando la ecuación de continuidad se llega a las expresiones de potencia y potencia por unidad de área:

$$P = \frac{1}{2}\rho Av^3 \quad (9)$$

Donde:

$A$  = área

Para el caso del análisis de un molino de corrientes se utiliza un coeficiente de pérdidas  $C_p$  cuyo valor usual es 0.3.

$$P = \frac{1}{2}C_p\rho Av^3 \quad (10)$$

Donde:

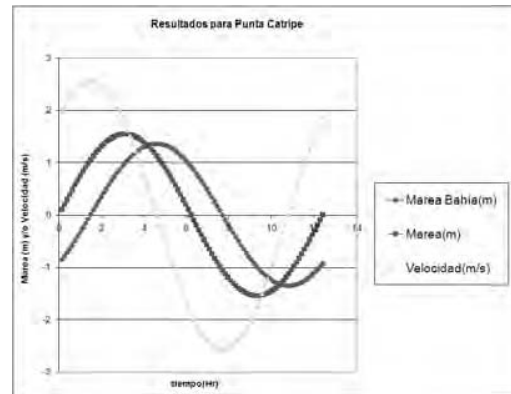
$C_p$  = coeficiente de pérdidas

Para el cálculo de la energía aprovechable en una bahía, estudios anteriores sugieren un 10% de la energía total; esto debido a requerimientos ambientales y a la dificultad operativa para captar una energía mayor [12].

## RESULTADOS

Con la tecnología actual, el aprovechamiento del potencial energético es posible en la costa pacífica colombiana debido a que las mareas son superiores a los 3m. Como parte de este estudio, se encontraron 45 posibles bahías en el Litoral Pacífico cuyo potencial energético se calculó en 120 MW; de los cuales cabe destacar Bahía Málaga con 3.5 MW y la ensenada de Tribugá con 0.5 MW como zonas con potencial energético importante para las necesidades de las comunidades cercanas; así mismo, Punta Catripe (8MW), Bocana Bazán (6MW) y Boca Naya (13MW) son interesantes por su potencial energético.

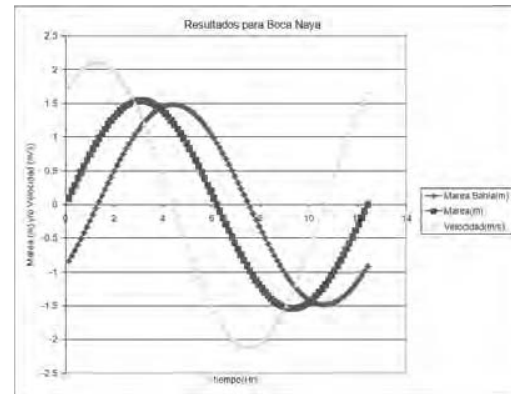
La variación promedio de la marea para el Pacífico colombiano se encontró similar a lo largo de todo el litoral; teniendo en cuenta pronósticos para Bahía Solano, Buenaventura, Cupica, Los Negritos y Tumaco, el valor medio es de 3.09 m [10].



(3a)



(3b)



(3c)

Figura 3. Diagramas sinusoidales de las tres velocidades más altas en la Costa Pacífica colombiana.

Para la Costa Atlántica, el modelo utilizado no mostró velocidades de más de 1.2 m/s para ningún sitio a excepción de la Ciénaga Grande de Santa Marta, debido a su gran tamaño; sin embargo, no es utilizable en el corto plazo debido a que su salida al mar se encuentra bloqueada por una carretera.

Los gráficos anteriores muestran el cambio de la marea dentro y fuera de la bahía y la velocidad en el canal de la bahía para las 3 mejores velocidades encontradas en la Costa Pacífica. Nótese que la velocidad es directamente proporcional con la energía que puede obtenerse de las corrientes inducidas por mareas.

#### DISCUSIÓN

Una vez se han encontrado los lugares con un mayor potencial energético, es necesario determinar qué otras variables son de importancia para determinar hacia qué lugares apuntar los esfuerzos en su estudio y caracterización.

Se presenta, entonces, un modelo que espera identificar en qué zonas se deben concentrar los esfuerzos para estudiarlas con mayor profundidad en el futuro. Las variables de importancia son definidas como tal por el conocimiento experto de los investigadores y funcionarios de empresas electrificadoras dedicados a la planeación de proyectos energéticos en Colombia, y a recomendaciones de la literatura para aprovechamientos energéticos.

El modelo utilizado fija unos rangos de variables de importancia en la producción energética como la velocidad de la corriente en la boca de la bahía; a estos datos se les asigna un puntaje para así calificar y escoger las ubicaciones de mayor potencial.

Se utilizaron dos tipos de árboles de decisión: uno de tipo discreto, con el fin de realizar un primer filtrado, y otro de tipo continuo, con el fin de calificar cada uno de los sitios potenciales.

Se encontró que existen variables de tipo discreto que limitan ampliamente la selección de los lugares, como

lo es la velocidad de la corriente, ya que si ésta es inferior a 1.5 m/s no es viable un aprovechamiento energético

Las variables consideradas fueron:

- La energía que actualmente se produce por Diesel en el lugar pues la mayor parte de la Costa Pacífica, donde se realiza este análisis, no está interconectada al sistema eléctrico nacional.
- La disponibilidad de infraestructura para acceso de materiales con el fin de dar un mayor estímulo a los lugares donde, por infraestructura, sea más sencillo realizar un proyecto piloto.
- La velocidad como requisito hidrodinámico.
- La potencia producida por corrientes que estimula los sitios de mayor potencial energético.
- La variable población que busca satisfacer al mayor número de personas.
- La variable necesidades básicas (NBI) insatisfechas que busca considerar la situación económica en la que se encuentran los habitantes del litoral.

#### CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

En el Litoral Caribe de Colombia no es posible implementar el aprovechamiento energético con las tecnologías actuales. Esto se conocía a priori, sin embargo, la metodología utilizada una vez implementada en la Costa Pacífica no requería de mayores tiempos computacionales para ser implementada en la Costa Caribe. Adicionalmente, se obtuvieron resultados procesados útiles para futuras investigaciones en la Costa Caribe.

En el Litoral Pacífico de Colombia se identificaron varias bahías, en las cuales se observa un potencial de generación de energía utilizando las corrientes inducidas por mareas. Las zonas más propicias para proyectos de generación por corrientes son: Punta Catripe, Delta Chavica, Bocana Raposo, Boca Naya y Bocana Armerías.

La herramienta de decisión utilizada permitió captar el conocimiento experto en gestión de proyectos eléctricos y realizar una valoración de las bahías encontradas, no solo en términos ingenieriles sino que se incluyeron aspectos ambientales, sociales y económicos.

Los modelos utilizados representan casos simples y no pretenden obtener datos confiables para realizar un estudio de factibilidad de generación de energía. Más bien se busca orientar los esfuerzos para futuras mediciones en campo y uso de modelos más elaborados (e.g., elementos finitos), basándose en la poca información secundaria existente.

Se recomienda medir las corrientes en las bahías propuestas, con el fin de obtener datos reales para validar esta investigación con datos que, como mínimo, capten las velocidades generadas en luna llena o nueva.

#### REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] “191 millones de barriles de petróleo han ingresado a las reservas de crudo”. (SNE) Presidencia de la República de Colombia. Fecha de consulta: Octubre 2007. Disponible en: [http://www.presidencia.gov.co/prensa\\_new/sne/2005/abril/12/01122005.htm](http://www.presidencia.gov.co/prensa_new/sne/2005/abril/12/01122005.htm)
- [2] “Producción de crudo, la mayor en seis años”. *Portafolio*. Fecha de consulta: Abril 2008. Disponible en: <http://www.eltiempo.com/archivo/documento/MAM-2902817>
- [3] **J. M. Polo G. A. Zarruk y A. Sarmiento.** “Existing Technologies For The Generation Of Wave and Tidal Energy”. International seminar of Environment and Sustainable Development, Bucaramanga, Colombia, 2006.
- [4] “Parque eólico Jepirachi”. Empresas Públicas de Medellín. Fecha de consulta: Octubre 2007. Disponible en: [http://www.eppm.com/epm/Institucional/energia/infra\\_infra\\_genera\\_enoper\\_parquejepi.html?id=2](http://www.eppm.com/epm/Institucional/energia/infra_infra_genera_enoper_parquejepi.html?id=2)
- [5] **J. W. Kamphuis.** *Introduction to Coastal Engineering and Management*. World Scientific, 2002.
- [6] **USACE.** *Coastal Engineering Manual*. Washington D.C.: U.S. Army Corps of Engineers, 2002.
- [7] **I. Santiago.** “Fundamentos de ArcGIS”. Puerto Rico: Oficina de gerencia y presupuesto estado libre asociado de Puerto Rico, 2005.
- [8] “Etopo2”. National Oceanic & Atmospheric Administration (NOAA), U.S. Department of Commerce (NOAA) 2006. Fecha de consulta: Octubre 2007. Disponible en: <http://www.ngdc.noaa.gov/mgg/image/2minrelief.html>
- [9] *Atlas Cartográfico de los Océanos y Costas de Colombia*. Ministerio de Defensa Nacional, Armada Nacional, Dirección General Marítima (DIMAR), 2ª. edición, 2005.
- [10] **J. E. Soler, y J. C. Franco.** *Pronóstico de pleamares y bajamares en la Costa Pacífica colombiana año 2004*. Servicio Mareográfico Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales. IDEAM, Ministerio de Medio Ambiente y Desarrollo Territorial, 2003.
- [11] **V. T. Chow.** *Hidráulica de canales abiertos*. Mc Graw Hill, 1994.
- [12] **I. G. Bryden, T. Grinsted and G. T. Melville.** “Assessing the potential of a simple tidal channel to deliver useful energy”. *Applied Ocean Research*. Vol. 26, No. 5, July 2004, pp.198-204.