

Cuantificación del potencial energético undimotriz en las costas del Caribe colombiano

Quantification of Colombian Caribbean shore potential wave energy

Jaime PEREZ Zapata [1](#)

Recibido: 05/09/2017 • Aprobado: 22/09/2017

Contenido

- [1. Introducción](#)
 - [2. Caracterización de las olas en las costas del Caribe colombiano](#)
 - [3. Cuantificación del potencial energético undimotriz en las costas del Caribe colombiano](#)
 - [4. Avances en la verificación del potencial energético](#)
 - [5. Conclusiones](#)
- [Referencias](#)

RESUMEN:

Este documento muestra los avances realizados con relación a la cuantificación del potencial energético undimotriz en las costas del Caribe colombiano. Inicialmente se ha estimado que el potencial energético Near Shore (cercano a las costas) teórico que poseen las olas de las costas del departamento del Atlántico es de 1107 MW aproximadamente. Así mismo se muestran los avances del diseño de un sistema *Near Shore* para la verificación del potencial energético de la zona objetivo.

Palabras-Clave: Energía undimotriz, altura significativa de la ola, potencial de energía undimotriz, boya oceanográfica

ABSTRACT:

This document describes the progress made regarding the quantification of colombian Caribbean shore potential wave energy. Currently, the theoretical energetic potential estimated at the Near Shore in the Atlantic coast waves is approximately 1107 MW. Also shows the progress of the Near Shore system design for the verification of the wave energetic potential in this zone.

Keywords: Wave energy, Significant wave height, wave period, Wave power potential, Oceanographic buoy

1. Introducción

Este documento describe los avances realizados con relación a la cuantificación del potencial de energía undimotriz, que es aquella que se obtiene mediante las olas del mar (Brooke, 2003), en las costas del Caribe Colombiano. Hasta el momento se ha cuantificado el potencial en las

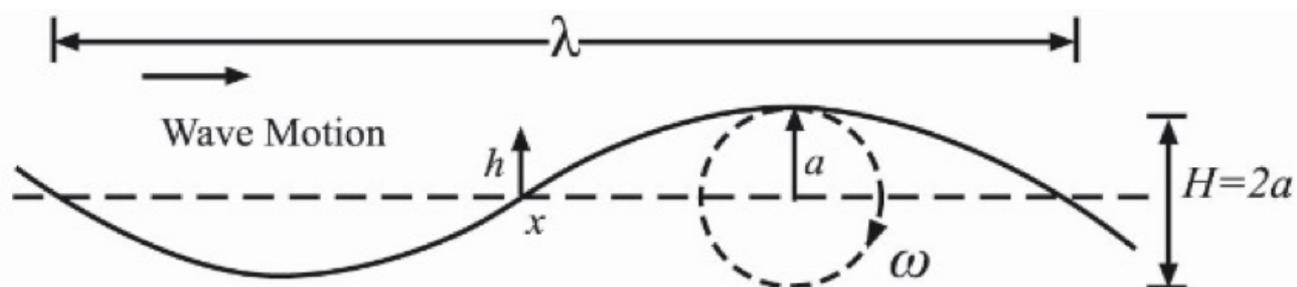
costas del departamento del Atlántico. La metodología utilizada servirá como punto de partida para establecer el potencial que tiene el Caribe colombiano en este tipo de Fuente no Convencional de Energía Renovable (FNCER) y con esto atraer el interés por parte de la comunidad investigadora nacional e internacional en la implementación de tecnologías que aprovechen este tipo de energía primaria para convertirla en energía eléctrica. Con esto se logra de igual manera, realizar transferencia de conocimientos y de tecnología.

En Colombia la energía undimotriz es poco conocida y desarrollada, además ha sido poco investigada desconociendo el gran potencial energético que poseen las olas, sumado a la gran extensión de costas que posee el país. Para cumplir con el objetivo se requiere conocer el potencial energético que poseen las olas y esto fue posible con la aplicación de ecuaciones consultadas las cuales tienen en cuenta variables como: altura de la ola, periodo de las olas, densidad del agua de mar, temperatura y velocidad del viento en la zona. Estos datos han sido recopilados en conjunto con La Dirección General Marítima (DIMAR) y al Centro de Investigaciones Oceanográficas (CIOH) adscritas al Ministerio de Defensa Nacional (MINDEFENSA) ("CIOH Oceanografía Operacional," 2017). Los datos han sido recopilados y procesados desde el mes de enero de 2014, es decir con un historial de datos mayor a tres años. Si bien es cierto que se requiere de un mayor historial de datos, los obtenidos hasta el momento son los que se encuentran disponibles en las bases de datos del CIOH. Consideramos que los datos procesados dan confiabilidad a los cálculos realizados para la determinación del potencial energético undimotriz de la zona objetivo, dado que el comportamiento de las olas en el área de estudio muestra poca variabilidad de un año a otro. No se realizan comparaciones con otras zonas costeras colombianas por los pocos estudios realizados con relación a las características de las olas y mucho menos el conocer su potencial energético, también a que se quiere estudiar sólo el comportamiento de las olas en las costas del Caribe Colombiano.

2. Caracterización de las olas en las costas del Caribe colombiano

Tomando como base la teoría de estudios anteriormente realizados las olas poseen las características que se muestran en la figura 1:

Figura 1
Parámetros de una onda (Muñoz, 2017)



La diferencia de altura entre la cresta y el valle es la altura de la ola H , y la amplitud es la mitad de la altura; la longitud de la onda λ es la distancia entre 2 crestas consecutivas, y ω es la frecuencia angular (Muñoz, 2017), la cual se muestra en la ecuación (1):

$$\omega = 2\pi/T \quad (1)$$

Donde π es una constante matemática aproximadamente igual a 3,1416 y T es el periodo de la onda, el periodo es el tiempo que una onda tarda en recorrer toda su longitud (Muñoz, 2017).

Otro parámetro de las ondas es su velocidad, también denominada velocidad de fase, que es la velocidad con la que se mueve la onda [1]:

$$c = \lambda/T \quad (2)$$

La velocidad de fase cambia en relación a la profundidad del mar sobre la cual pasan las

olas[3], para aguas profundas (donde la profundidad es mayor a la mitad de la longitud de onda) la velocidad de fase es:

$$c = g/2\pi T \quad (3)$$

Para aguas poco profundas, donde la profundidad del mar es menor a 1/20 la longitud de la onda (o la longitud de la onda multiplicada por 0,05) la velocidad de fase es igual a:

$$c = \sqrt{gH} \quad (4)$$

Donde g es la fuerza de gravedad (9,80665 m/s²) y H es la altura de la ola.

Cuando la profundidad del mar es mayor a la mitad de la longitud de onda y menor que 0,05 por la longitud de la onda las aguas se consideran intermedias, la fórmula de la velocidad de fase de una ola en estas aguas es:

$$c = \sqrt{\frac{g}{k} \tan H (kH)} \quad (5)$$

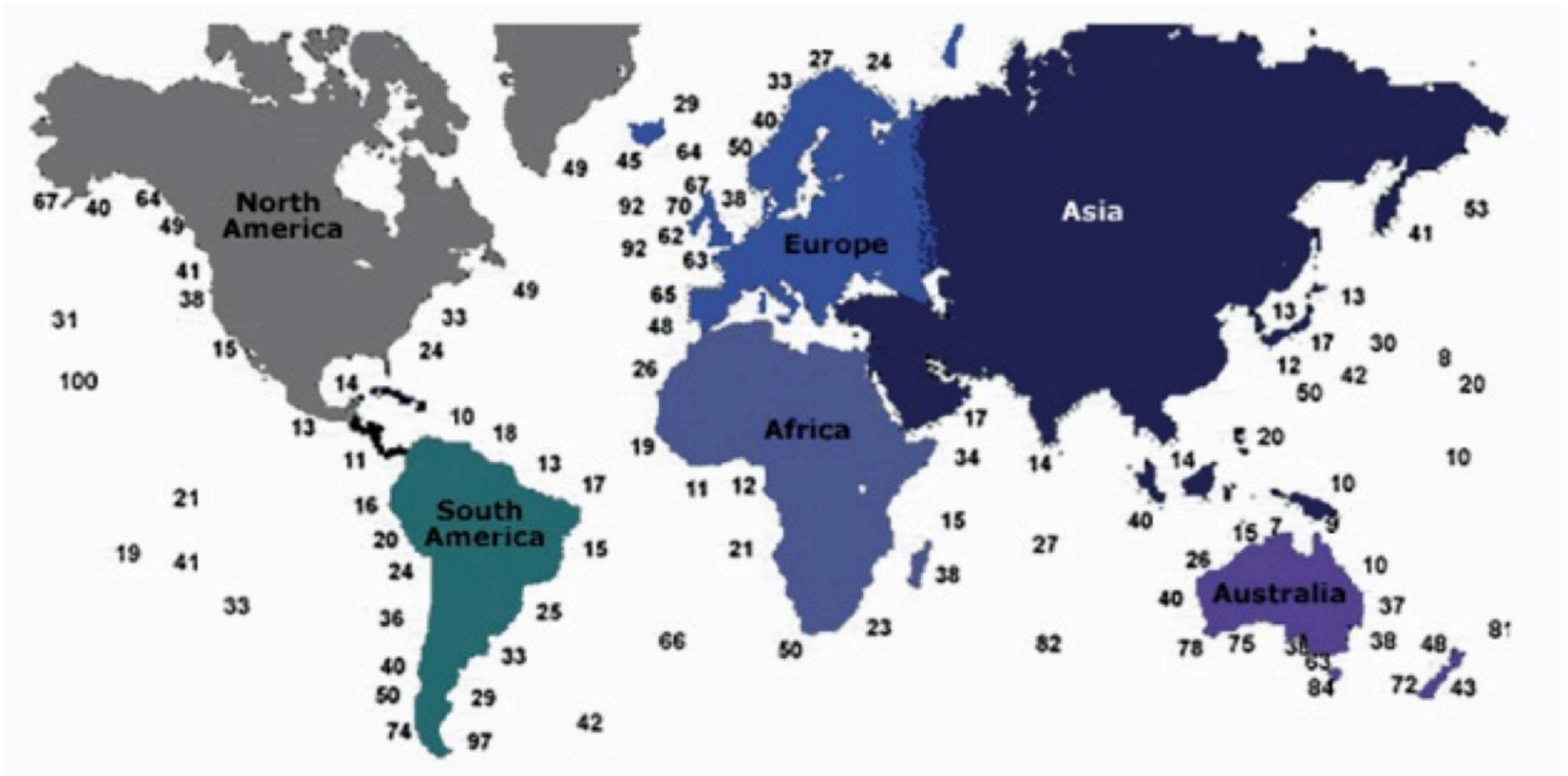
Donde H es la altura de la ola, g es la gravedad y k es el número de onda.

Teniendo en cuenta lo anterior, el área de estudio se caracteriza como aguas de poca profundidad.

3. Cuantificación del potencial energético undimotriz en las costas del Caribe colombiano.

Los potenciales relativos de los recursos de la energía disponible en las olas de los océanos en el mundo se encuentran alrededor de 2.700 GW (McCormick & Ertekin, 2008) y el total de energía disponible para usarse es de casi 500 GW. Se estima que la energía undimotriz total que incide en las costas del mundo sobre la superficie del océano es de más o menos 2,11 TW (Gunn & Stock-Williams, 2012). De acuerdo a estudios, en el Océano Atlántico en cercanías a las costas colombianas en el Mar Caribe, el promedio anual de niveles de energía undimotriz oscila de 10 a 20 kW/m de Frente de Ola (Brooke, 2003), como se aprecia en la figura 2.

Figura 2
Potenciales de energía undimotriz en el mundo Oleaje



Sin embargo, para la elaboración de este documento se realizaron cálculos basados en datos medidos localmente de las variables que intervienen en la cuantificación del potencial energético. Implementamos una metodología las cuales arrojaron resultados que son mostrados posteriormente.

3.1. Ecuaciones utilizadas

Teniendo en cuenta todas las consultas bibliográficas realizadas con relación al tema estudiado, se ha seleccionado las ecuaciones mostradas a continuación basados en las aproximaciones con el comportamiento de las olas del mar en la zona delimitada de las costas del departamento del Atlántico teniendo en cuenta variables como altura significativa y periodo de las mismas. Estas formulaciones pueden ser de igual manera utilizadas para cuantificar el potencial por lo menos en las costas del Mar Caribe colombiano.

En un oleaje idealizado, en el cual la altura y el periodo de las olas es constante, la energía de las olas puede calcularse utilizando la siguiente formula (Duckers, 1992):

$$P = \frac{\rho g^2 H^2 T}{32\pi} \quad (6)$$

Dónde: P: Potencia (W), ρ : Densidad del agua (en este caso agua salada de mar): 1.025 kg/m³, g: Gravedad (9.8m/s²) T: Periodo de la ola (s), H: Altura promedio de la ola (m). Sin embargo, El típico estado del mar está generalmente compuesto por olas que poseen diferentes alturas, periodos, y direcciones. Para un mar irregular, la energía total promedio que se encuentra en las olas se calcula (Muñoz, 2017):

$$P = k H_s^2 T_e \quad (7)$$

Donde k es una constante que viene dada por la siguiente ecuación (McCormick & Ertekin, 2008):

$$k = \frac{\rho g^2}{64\pi} \quad (8)$$

Donde ρ es la densidad del agua de mar (1025 kg/m³), es la gravedad (9.80665 m/s²) y π es una constante matemática cuyo valor aproximado es igual a 3.1416 como k es una constante, y

se conocen sus variables, basta con hallar su valor y reemplazarlo para que la ecuación de la energía undimotriz quede de la siguiente manera:

$$P = 490,27H_s^2T_e \approx 0,49H_s^2T_e \quad (9)$$

Donde P es el flujo de energía de la ola expresado en kW/m, H_s es la altura significativa de la ola y T_e es el período en segundos.

La altura significativa H_s , se define como la altura promedio del tercio de olas más altas dentro de un grupo de olas considerado. Este valor se aproxima a la altura que un observador en una embarcación reportara de una inspección visual del estado del mar, ya que tal observador tiende a omitir las olas más pequeñas y menos evidentes. El periodo de energía T_e , que es el periodo de ola promedio con respecto al espectro de distribución de transporte de energía de las olas (Gunn & Stock-Williams, 2012).

Los mares reales contienen olas que poseen alturas, periodos y direcciones aleatorios. Dentro de un corto periodo de tiempo, las características de los mares reales permanecen constantes, componiéndose así de un estado del mar (Stock-williams & Gunn, 2016). Con el fin de describir estos estados del mar y determinar sus características relevantes para los dispositivos de energía undimotriz, se utilizan parámetros estáticos antes mencionados, los cuales se pueden obtener utilizando dispositivos de medida de las características de las olas como las boyas oceanográficas o también conocidas como boyas de oleaje ("Ciencias marinas y otros asuntos," n.d.).

La ecuación (9) se utilizó para realizar las primeras estimaciones del posible potencial energético undimotriz *Near Shore* que tienen las costas del departamento del Atlántico

3.2. Datos obtenidos

Los datos necesarios para aplicarlos en la ecuación seleccionada se obtuvieron de la base de datos disponible en el CIOH[2], la cual es una dependencia de DIMAR y estas forman parte del MINDEFENSA.

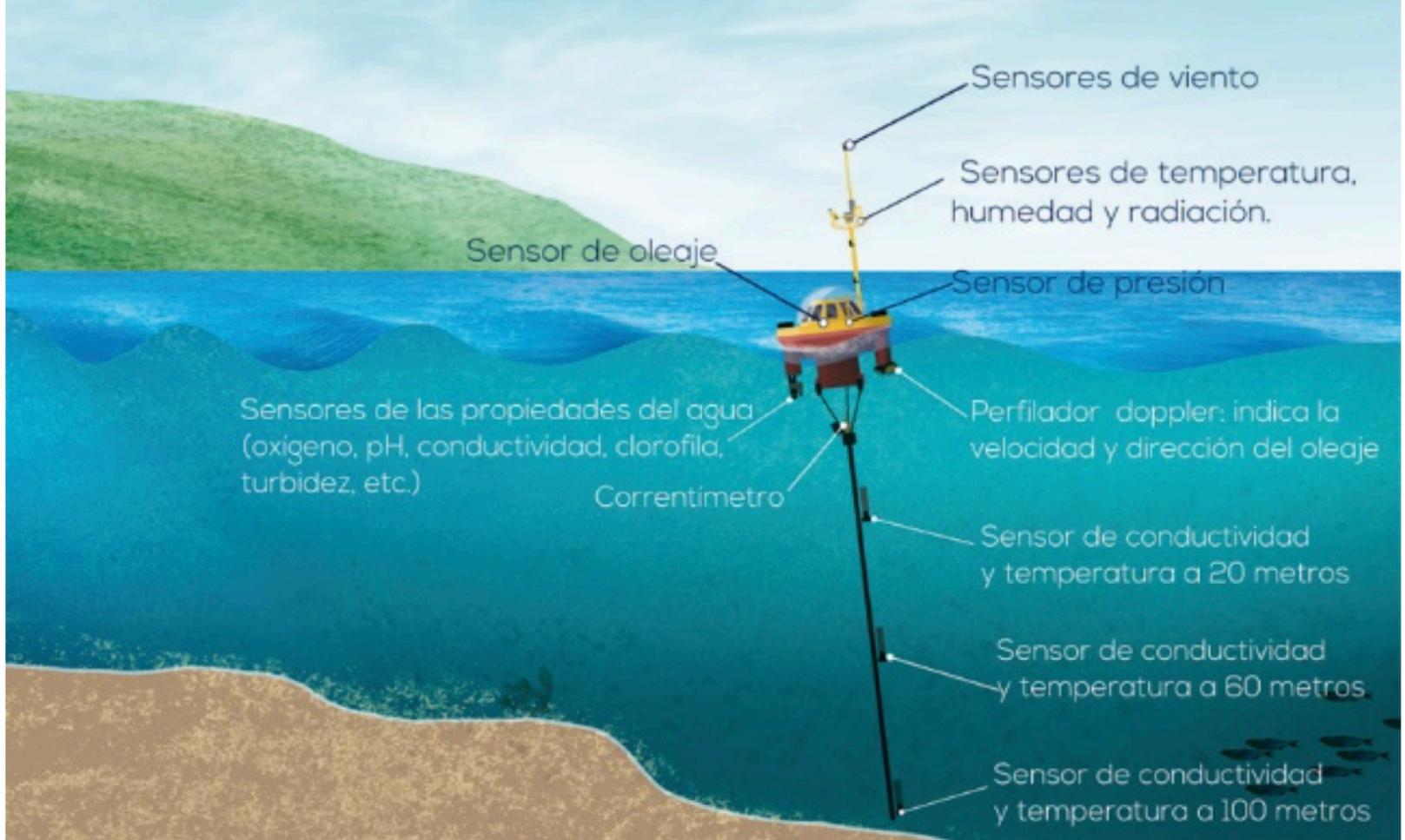
Para poder conocer las características del oleaje anteriormente descrito, se hace uso de las denominadas boyas oceanográficas; las cuales son utilizadas para registrar las diferentes variables océano-atmosféricas que pueda haber en los mares, como la altura y dirección de las olas, así como su periodo, la dirección y fuerza del viento, la temperatura tanto del agua como del aire, la presión atmosférica, entre otros.

Estos dispositivos constan de un ordenador el cual se encarga de recoger la información que obtienen de sus medidores en tiempo real y la envían a través de un sistema de comunicación inalámbrico hacia una estación receptora en tierra para su posterior análisis ("Ciencias marinas y otros asuntos," n.d.).

Para abastecer de energía los componentes de la boya se hace uso de paneles fotovoltaicos, los cuales están protegidos del mar y el viento por medio de una cúpula de vidrio. Por otro lado, la boya se encuentra anclada al fondo marino, como se puede ver en la figura 3. y en caso de soltarse, posee un sistema de rastreo que permite conocer su ubicación en tiempo real.

Figura 3

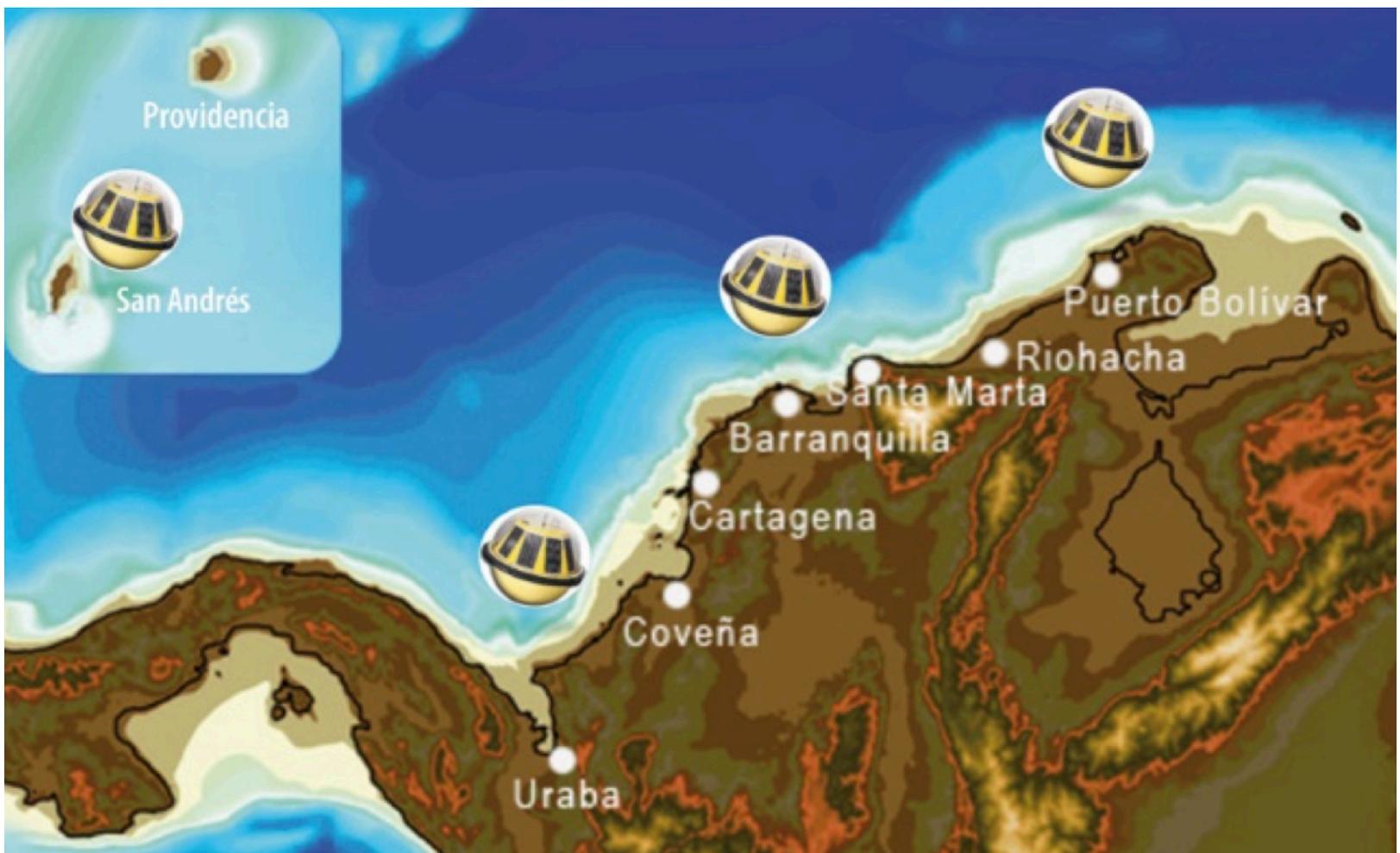
Esquema de una boya oceanográfica("MEDCLIC: Infraestructuras Fijas," n.d.).



El CIOH cuenta con 4 boyas oceanográficas ubicadas en el mar caribe de la siguiente manera: Una en las cercanías a las Islas de San Andrés y Providencia, una en las Cercanías de Puerto Bolívar en la Guajira, una en las cercanías de Barranquilla y una en las cercanías de Coveñas, como se muestra en la figura 4.

Figura 4

Ubicación boyas en la costa Atlántica ("CIOH Oceanografía Operacional," 2017).



Para la zona Objetivo se recopilaron datos suministrados por el CIOH registrados por la boya de oleaje ubicadas en diferentes zonas de la costa del departamento del Atlántico. Como ejemplo,

en las Tablas 1 y 2 se muestra información sobre las características del oleaje en diferentes zonas durante algunos días del mes de septiembre del 2016.

Tabla 1
Oleaje en "El muelle" (MagicSeaWeed, s.f.)

Día	Oleaje (m)	Periodo (s)
13	0.4	6.25
14	0.51	5.87
15	0.6	6.87
16	0.52	6.75
17	0.71	6.5
18	0.7	7
19	0.71	7
20	0.55	7

Tabla 2
Oleaje en "El Bolsillo" Pradomar (MagicSeaWeed, s.f.)

Día	Oleaje (m)	Periodo (s)
13	0.44	6.25
14	0.55	5.87
15	0.66	6.87
16	0.54	6.75
17	0.77	6.5
18	0.82	7
19	0.74	7
20	0.6	7

Se cuenta con datos en otras zonas pertenecientes a las costas del departamento del Atlántico como son: Oleaje en "Punta Roca" (Salgar), Oleaje en "Puerto Velero" y Oleaje en "Charco Grande". Estos datos pueden ser consultados en la base de datos del CIOH, los cuales son utilizados para la realización de esta investigación.

Para establecer un oleaje promedio en la zona objetivo y con el fin de obtener información del oleaje más generalizada además de darle mayor confiabilidad a los cálculos realizados, es necesario hacer un seguimiento al oleaje durante un periodo más amplio que el mostrado anteriormente, es por esto que para la realización de los cálculos realizados en este estudio se tuvo en cuenta la altura que podían alcanzar las olas en un día dado, entre las fechas del 1 de enero de 2016 y el 31 de enero de 2017 (es decir, durante 13 meses) periodo que se tomó como muestra. Con dicha información se obtuvo la altura significativa del oleaje presente en cada mes, de esta forma se puede obtener mayor precisión en el conocimiento del comportamiento del oleaje. La información utilizada para realizar lo anteriormente descrito se puede encontrar (día por día) en el sitio web del CIOH, así como también, otros datos acerca del mar y el clima en la costa Caribe colombiana. Como ejemplo, en las Figuras 5 y 6 se muestra la altura promedio calculada del oleaje registrado en los meses de enero y diciembre 2016:

Figura 5

Oleaje promedio calculado diario mes de enero 2016.

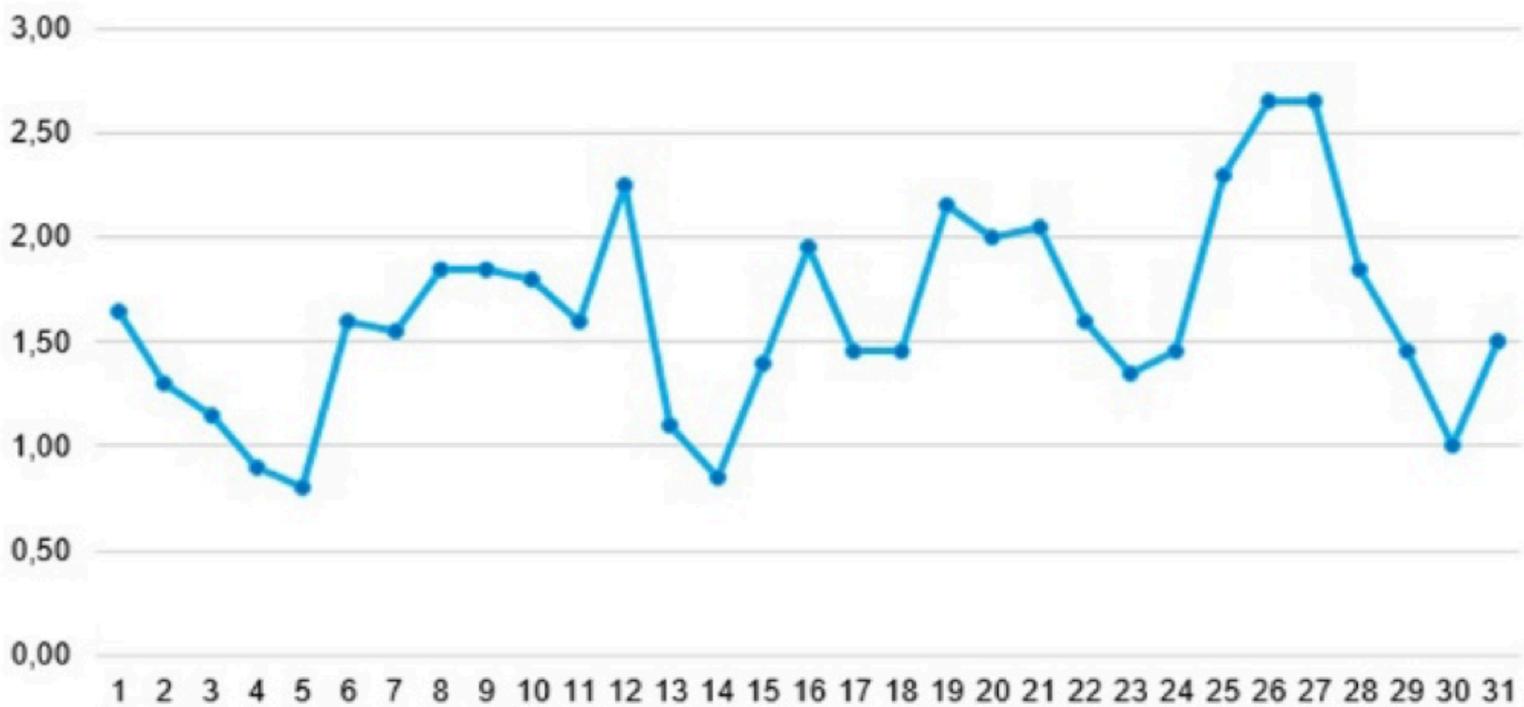


Figura 6

Oleaje promedio calculado diario mes de diciembre 2016.



3.3. Cálculos del potencial energético undimotriz

Después de haber obtenido la altura promedio calculada con base en los datos obtenidos, procedimos a calcular la altura significativa H_s aplicando el concepto anteriormente descrito. Se tomó el tercio de los datos correspondiente a un mes de los resultados de altura de olas promedio más alto. En la Figura 7 se muestra la altura significativa calculada para los 13 meses de registro de datos.

Figura 7
Altura significativa del oleaje en el Atlántico



Como se puede observar el comportamiento del oleaje varía de acuerdo a la época del año, por ende, el potencial energético también.

Usando la ecuación (9) del potencial undimotriz anteriormente descrita, se puede hacer una aproximación de lo que sería el potencial energético undimotriz teórico presente en las costas del Atlántico. La ecuación (9) tiene en cuenta el periodo de la ola, por lo que, con base al periodo registrado en distintos puntos de la zona y para efectos prácticos se utiliza un periodo de 6 segundos. Como ejemplo, para el mes de enero del 2016, la potencia ofrecida (kW/m) por el oleaje se calculó de la siguiente manera:

$$P = 0,49H_s^2T$$

$$P = 0,49 \times (2.17m)^2 \times 6s$$

$$P = 13,84kW$$

(10)

En la Tabla 3 se muestran los cálculos de potencia de frente de ola realizados teniendo en cuenta la altura significativa H_s de cada mes.

Tabla 3
Potencia de frente de ola estimada

Mes	Altura significativa (m)	Potencia (kW/m)
Enero 2016	2.17	13.84

Febrero 2016	2.35	16.24
Marzo 2016	2.55	19.12
Abril 2016	1.36	5.44
Mayo 2016	1.87	10.28
Junio 2016	2.11	13.09
Julio 2016	2.31	15.69
Agosto 2016	1.8	9.53
Septiembre 2016	1.24	4.52
Octubre 2016	1.75	9.00
Noviembre 2016	1.37	5.52
Diciembre 2016	2.17	13.84
Enero 2017	2.85	23.88

Así, analizando los datos obtenidos en la tabla anterior, los mayores potenciales de energía de las olas están presentes entre los meses de enero y marzo, los meses de mayo hasta julio y en el mes de diciembre. Cabe destacar que en todos los meses se cuenta con un considerable potencial energético.

Con los anteriores datos se calcula la potencia total promedio de frente de ola de los meses estimados dando como resultado 12,3 kW/m. Si tenemos en cuenta la extensión de la costa del Atlántico la cual es de 90 km daría como resultado un potencial teórico aproximado de 1'107.000 kW o mejor 1.107 MW para aplicación de tecnología Near Shore. Para lo anterior, se deben realizar algunos ajustes bajo la premisa que no sería posible la instalación de tecnología aplicada al aprovechamiento de la energía undimotriz en toda la extensión de la costa, ya que esto dependería de las políticas ambientales locales y de la selectividad de las zonas con mayor potencial. También se debe tener en cuenta las eficiencias de los equipos de conversión de energía undimotriz para ajustar el potencial calculado que dependerá de la tecnología escogida. Debemos tener en cuenta que este potencial puede aumentar si se tienen en cuenta aplicar tecnología On Shore y Off Shore simultáneamente, las cuales no han sido consideradas aún en este estudio.

4. Avances en la verificación del potencial energético

Con el objetivo de demostrar cuantitativamente el potencial energético contenido en las olas del mar presentadas en el departamento del Atlántico se está trabajando en el diseño de un sistema de aprovechamiento Near shore, el cual forma parte de las tecnologías denominadas Point absorbers. Los dispositivos "Point Absorbers" son estructuras flotantes con componentes que se mueven debido a la acción de la ola, estos dispositivos han sido de los más investigados desde el comienzo del desarrollo de la energía undimotriz.

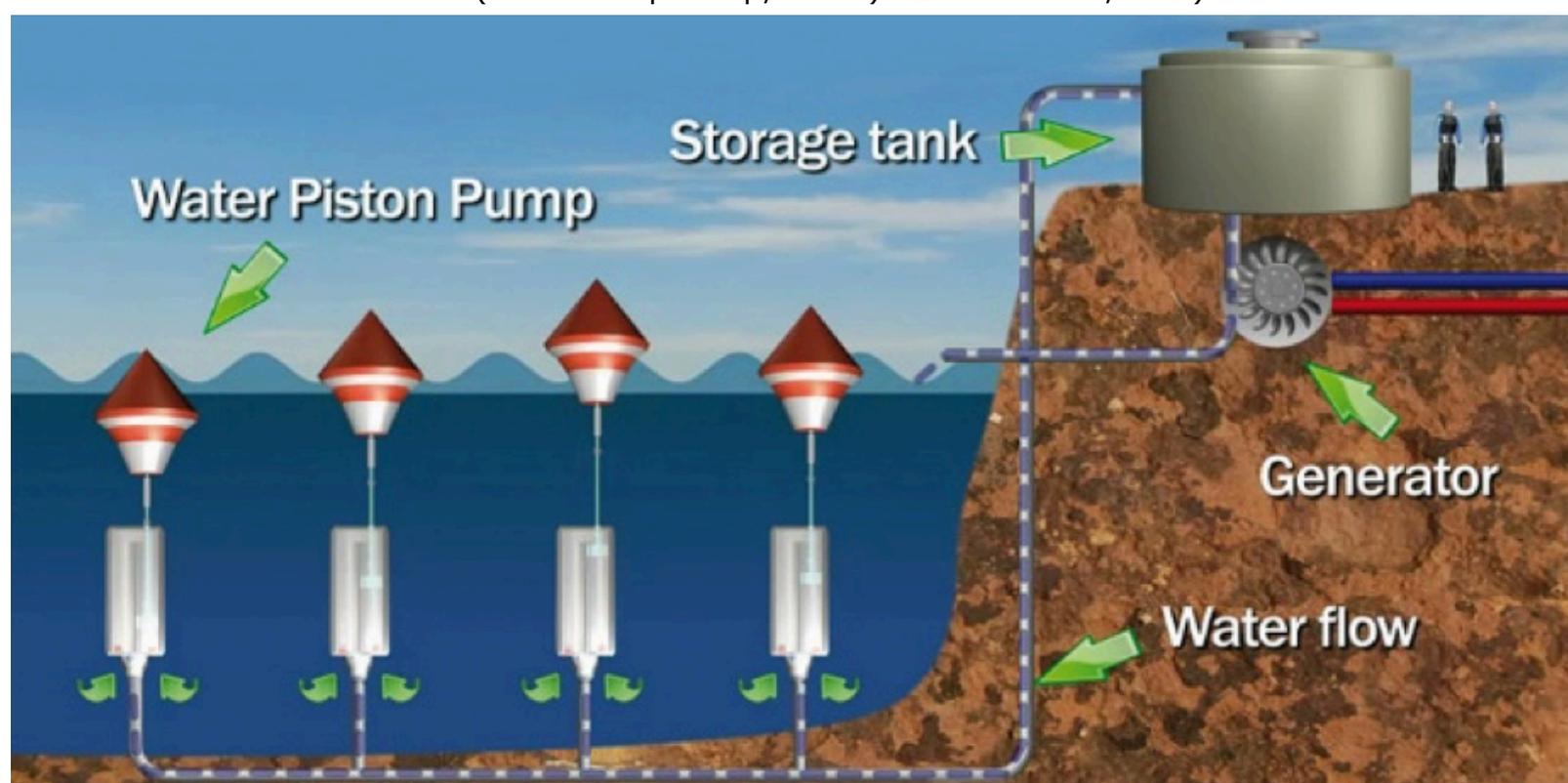
Los "Point Absorbers" utilizan boyas las cuales se mueven junto con las olas, el movimiento relativo hacia arriba y hacia abajo de las olas que pasan para que conversores de energía

electromecánica o hidráulica generen energía. La forma de la boya no tiene un impacto significativo a la hora de absorber la energía de las olas, esto, debido a que una boya con un tamaño razonable posee un periodo de oscilación mayor que la frecuencia de las olas. Entre más grande sea la boya, más energía puede absorber del mar, sin embargo, si la boya es demasiado grande la ola no será capaz de pasar sobre ella y no hará funcionar al dispositivo "Point Absorber". De este modo, para poder hacer buen uso de este tipo de dispositivo es necesario hacer un diseño que absorba la mayor cantidad de energía que le sea posible teniendo en cuenta el tamaño de la boya, así como también otros factores (Engstrom, 2011). Si el periodo de oscilación del dispositivo "Point Absorber" coincide con el de las olas que en el inciden, podrá absorber y enviar más energía de las olas hacia el sistema de extracción de energía.

El sistema de aprovechamiento que se está diseñando consiste en un dispositivo de este tipo el cual transforma la energía cinética de las olas del mar en energía mecánica para bombear agua a una determinada altura convirtiéndola en energía potencial gravitacional para que posteriormente se deje caer y mueva un generador. Se puede apreciar el esquema del sistema en la figura 8.

Figura 8

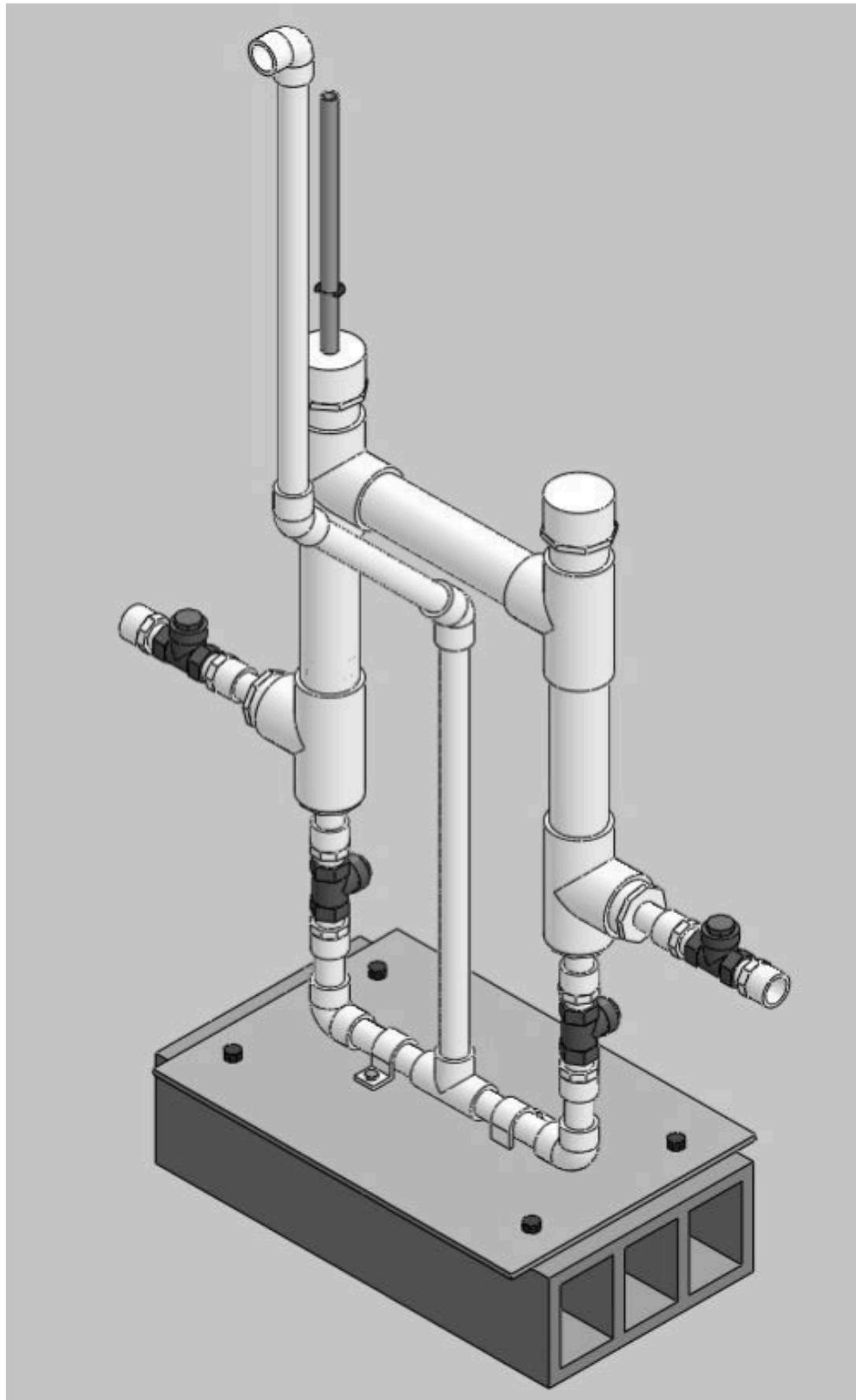
Esquema del sistema en etapa de diseño ("Blue Energy - Ocean Power (Piston Pump & Racks) - Earth Protect," n.d.).



Actualmente nos encontramos en la etapa de diseño de la bomba hidráulica que bombeará el agua de mar a una determinada altura, esta será diseñada a escala. Lo anterior permitirá medir el potencial energético real en las costas del Atlántico, así como también sentar las bases para el diseño de un sistema de captación a mayor escala. En la figura 9. se muestra el diseño de la bomba.

Figura 9

Diseño bomba hidráulica accionada por boya



La bomba está constituida principalmente por 2 cilindros de 7,5 pulgadas (19,05 centímetros) de largo y 1,5 pulgadas (3,81 centímetros) de diámetro los cuales están unidos en la parte de arriba por una tubería. En uno de los cilindros se encuentran un vástago de 19,68 pulgadas (50 centímetros) de largo y un émbolo, el vástago y el émbolo se encontrarán unidos a una boya calculada de 6 kg con una geometría definida, esta es la que se encarga de bombear el agua hacia las tuberías. A los costados de ambos cilindros hay un agujero en el cual se aloja una válvula unidireccional que es la que permite el paso del agua hacia ambos cilindros. La intención de la misma es que con el movimiento de las olas (ascendente y descendente) la boya pueda ejercer la presión continua suficiente para bombear el agua de mar hasta un tanque de almacenamiento, el cual se encontrará ubicado a una determinada altura; cuando el tanque este lleno hasta cierto nivel se dejará caer el agua a través de un tramo de tuberías para que mueva un generador de corriente alterna, y, de esta forma, generar energía eléctrica.

4.1. Cálculo de la potencia de la bomba hidráulica

La potencia que la bomba obtendrá de las olas del mar para bombear el agua hasta el tanque elevado se puede estimar con la utilización de la siguiente ecuación ("Aula Virtual proyecto fin de carrera Ingeniería Química," n.d.):

$$P = \gamma \times Q \times H_t \quad (11)$$

Donde P es la potencia de la bomba, en vatios (W), γ es el peso específico del líquido que se va a bombear, el peso específico se halla multiplicando la densidad del líquido, que en este caso es agua de mar (1025 Kg/m³) por la gravedad (9,80665 m/s²); esta operación da como resultado, que el peso específico del agua de mar es de 10051,81 N/m³, Q es el caudal, el cual posee un valor medido de 0,000145092 m³/s, y H_t es la altura total a la que se va a elevar el agua bombeada.

La altura total de elevación se calcula con la siguiente ecuación ("MEDCLIC: Infraestructuras Fijas," n.d.):

$$H_t = H_a + H_f \quad (12)$$

Donde H_e es la altura de elevación del agua, que para este diseño será de 4 metros (m), y H_f son las pérdidas de carga totales que hay en las tuberías, en metros (m).

Para hallar las pérdidas totales se tienen en cuenta dos tipos de pérdidas, las generales, que son las que se encuentran en la tubería de conducción, y las pérdidas específicas, que se encuentran en los accesorios que forman parte de la tubería de conducción.

Hallamos primero las generales, para ello se utiliza la ecuación de Darcy-Weisbach ("MEDCLIC: Infraestructuras Fijas," n.d.):

$$H_g = f \times \left(\frac{L_c}{D}\right) \times \left(\frac{v^2}{2g}\right) \quad (13)$$

Donde H_g son las pérdidas de carga en la tubería de conducción, debido a la fricción del agua dentro de esta, expresadas en metros, f es el coeficiente de fricción de Darcy-weisbach, un valor adimensional que se calcula teniendo en cuenta el número de Reynolds y la rugosidad relativa. Para este diseño, el coeficiente de fricción posee un valor de 0.022, L_c es la longitud de la tubería de conducción en metros. En este diseño se utilizará un tramo de tubería de conducción de 35 metros de largo, D es el diámetro de la tubería de conducción también en metros, el cual será de 0.0127 metros (1.27 centímetros), v es la velocidad del agua en la tubería de conducción en metros por segundo (m/s) y g es la gravedad.

Hallamos la velocidad, que es el valor que hace falta, de la siguiente forma:

$$v = \frac{Q}{A} \quad (14)$$

Donde Q es el caudal en la tubería de conducción y A es el área de esa misma tubería, el cual es igual a:

$$A = \frac{\pi}{4} \times D^2 \quad (15)$$

$$A = \frac{\pi}{4} \times (0,0127 \text{ m})^2$$

$$A = 0,000126 \text{ m}^2$$

Ahora, reemplazamos en la ecuación (14) de la velocidad del agua en las tuberías:

$$v = \frac{0,000145092 \text{ m}^3/\text{s}}{0,000126 \text{ m}^2}$$

$$v = 1,15 \text{ m/s}$$

Como ya se tiene la velocidad, se pueden reemplazar los valores de la ecuación (13) de Darcy-weisbach:

$$H_f = 0,022 \times \left(\frac{35 \text{ m}}{0,0127 \text{ m}} \right) \times \left(\frac{(1,15 \frac{\text{m}}{\text{s}})^2}{2 \times 9,80665 \text{ m/s}^2} \right)$$

$$H_g = 0,022 \times 2755,9 \text{ m}^2 \times 0,0674 \text{ m}$$

$$H_g = 4,08 \text{ m}$$

Las pérdidas en la tubería de conducción debido a la fricción son de 4.08 metros; a estas pérdidas generales se le suman las pérdidas específicas en los accesorios del tramo de tubería de conducción para tener un valor más exacto de las pérdidas de carga. Las pérdidas de carga en accesorios se calculan con la siguiente ecuación ("MEDCLIC: Infraestructuras Fijas," n.d.):

$$H_e = K \times \frac{v^2}{2g} \quad (16)$$

Donde H_e son las pérdidas específicas en los accesorios de la tubería de conducción, K es un coeficiente igual a la suma de las longitudes equivalentes a tubería recta de los accesorios del tramo de tubería de conducción. Dicho tramo tendrá un (1) accesorio T de 90 grados y 2 codos de 45 grados, los coeficientes de K para la T y los codos son 1.38 y 0.86 respectivamente, sumados estos dos valores dan como resultado un coeficiente K de 2.24. Enseguida se reemplazan los valores en la ecuación (16) de pérdidas:

$$H_a = 2,24 \times \frac{(1,15 \text{ m/s})^2}{2 \times 9,80665 \text{ m/s}^2}$$

$$H_a = 2,24 \times 0,0674 \text{ m}$$

$$H_a = 0,15 \text{ m}$$

Ya con ambas pérdidas, generales y específicas de los accesorios, se calculan las pérdidas totales en la tubería de conducción, para obtener las pérdidas totales y, con estas últimas, hallar la altura total de elevación, reemplazando en la ecuación (12):

$$H_t = 4 \text{ m} + (4,08 \text{ m} + 0,15 \text{ m})$$

$$H_t = 4 \text{ m} + 4,23 \text{ m}$$

$$H_t = 8,23 \text{ m}$$

Conociendo todas las variables necesarias para calcular la potencia de la bomba hidráulica, solo queda reemplazarlas en la ecuación (11) y resolverla:

$$P = 10051,81 \text{ N/m}^3 \times 0,000145092 \text{ m}^3/\text{s} \times 8,23 \text{ m}$$

$$P = 12 \text{ W}$$

4.2. Cálculo del peso de la boya

Para calcular este valor se utiliza la siguiente ecuación:

$$Peso_{boya} = ((A_i \times D_c) \times \rho) + ((A_c \times L_c) \times \rho) \quad (17)$$

Donde:

A_i = área de la tubería de impulsión, donde se bombea el agua (0,00114 m²)

D_c = distancia de la camisa de la bomba, desde el émbolo (en su posición más alta) hasta el fondo de camisa, esta distancia es de 22,5 cm (0,225 m)

A_c = es el área del tramo de tubería de conducción (0,000126 m²)

L_c = es la longitud del tramo de tubería de conducción (35 m)

ρ = es la densidad del agua de mar

Al multiplicar $A_i \times D_c$ y $A_c \times L_c$ obtendremos los volúmenes de la camisa de la bomba y el del tramo de tubería de conducción respectivamente. Sabiendo esto, la ecuación puede simplificarse y quedará como:

$$Peso_{boya} = ((V_i) \times \rho) + ((V_c) \times \rho) \quad (18)$$

En la que V_i es el volumen de la camisa (0,000256 m³), y V_c es el volumen del tramo de tubería de conducción (0,00441 m³):

$$Peso_{boya} = (0,000256 \text{ m}^3 \times 1025 \text{ kg/m}^3) + (0,00441 \text{ m}^3 \times 1025 \text{ kg/m}^3)$$

$$Peso_{boya} = (0,26 \text{ Kg}) + (4,52 \text{ kg})$$

$$Peso_{boya} = 4,78 \text{ kg}$$

De acuerdo con el resultado, la boya debe tener un peso mínimo de 4,78 kg, aunque preferiblemente el peso de la boya deberá ser mayor al resultado de la fórmula, para garantizar un funcionamiento óptimo de la bomba hidráulica. Por esta razón y por efectos prácticos se ha decidido que la boya para el dispositivo será de 6,6 kg de peso, por encontrar en el mercado pesas calibradas de 2,2 kg.

5. Conclusiones

Es evidente que existe un potencial de energía undimotriz en las costas del Caribe colombiano y, para que pueda ser aprovechado, es importante dar el primer paso en su identificación y cuantificación. Apoyándonos en los resultados obtenidos, en las costas del departamento del Atlántico, el potencial de energía undimotriz teórico estimado resulta interesante para la aplicación de tecnologías que aprovechen este tipo de energía. Si bien los datos nos orientan a la aplicación de tecnologías near shore, estos nos pueden servir como referencia para las aplicaciones on shore y off shore, aumentando el potencial estimado. De acuerdo con los cálculos realizados para la bomba hidráulica a escala que se propone, se dan unos resultados que nos indican la factibilidad de obtener energía eléctrica en las olas de las costas del Atlántico, teniendo en cuenta las características del oleaje presentado.

Referencias

Aula Virtual proyecto fin de carrera Ingenieria Química. (n.d.). Retrieved July 14, 2017, from <http://www.ugr.es/~aulavirtualpfc/q/Bbombasytuberias.html>

Blue Energy - Ocean Power (Piston Pump & Racks) - Earth Protect. (n.d.). Retrieved July

14, 2017, from <http://www.earthprotect.com/index.php/media-gallery/mediaitem/3067-blue-energy-ocean-power-piston-pump-racks>

Brooke, J. (2003). *Wave Energy Conversion*. Annapolis: Elsevier Science Ltd.

Ciencias marinas y otros asuntos. (n.d.). Retrieved July 14, 2017, from http://www.madrimasd.org/blogs/ciencia_marina/2007/08/20/72161

CIOH Oceanografía Operacional. (2017). Retrieved July 14, 2017, from <https://www.cioh.org.co/meteorologia/index.php>

Duckers, L. (1992). *Renewable Energy*. Elsevier Inc. <https://doi.org/10.1016/B978-0-08-041268-9.50008-0>

Engstrom, J. (2011). Hydrodynamic Modelling for a point Absorbing Wave Energy Converter. *Digital Comprehensive Summaries of Uppsala Dissertations from the Faculty of Science and Technology*, 878.

Gunn, K., & Stock-Williams, C. (2012). Quantifying the global wave power resource. *Renewable Energy*, 44, 296–304. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2012.01.101>

McCormick, M., & Ertekin, C. (2008). Renewable Power. *Renewable Energy*, (June).

MEDCLIC: Infraestructuras Fijas. (n.d.). Retrieved July 14, 2017, from <http://www.medclic.es/es/instrumentos/infraestructuras-fijas/>

Muñoz, J. (2017). Ondas regulares y su aplicación a la ingeniería de costas. Cádiz, ES: Servicio de Publicaciones de la Universidad de Cádiz, 2011. ProQuest ebrary. Web. 13 January 2017. Copyright © 2011. Servicio de Publicaciones de la Universidad de Cádiz. All rights res (p. 2). Servicio de publicaciones de la Universidad de Cádiz.

Stock-williams, C., & Gunn, K. (2016). Quantifying the global wave power resource. *Renewable Energy*, (November). <https://doi.org/10.1016/j.renene.2012.01.101>

1. Ingeniero Electricista. Docente Facultad de Ingenierías Institución Universitaria ITSA. Soledad – Atlántico, Colombia. Contacto: jperez@itsa.edu.co

Revista ESPACIOS. ISSN 0798 1015
Vol. 39 (Nº 03) Año 2018

[Index]

[En caso de encontrar un error en esta página notificar a [webmaster](#)]

©2018. revistaESPACIOS.com • ®Derechos Reservados