

MECANISMO DE BRAZO OSCILANTE PARA APROVECHAR LA ENERGÍA DE LAS OLAS

Guillermo Valencia Astudillo; Pedro Viggiani
Universidad Simón Bolívar
Joaquim Lloveras Macia
Universidad Politécnica de Cataluña

Abstract

In this paper the design of an oscillating-arm mechanism with a ratchet link to a power shaft, is presented. This device is an original idea of the authors and it might make possible to harvest the potential energy of the ocean waves. This mechanism is formed by an arm linked to a rotating shaft in one of its ends, through a ratchet union, while in the other end it has a linked floating body in contact with the waves. The shaft is supported by bearings located on fixed supports, and it moves a load. The ratchet union connects the arm with the shaft when the arm is moving down; therefore this is the power generation step. This mechanism could operate in an individual or in a group way, over one shaft, to increase the power output. In this paper are presented the equations involved and a general design procedure that, given some particular parameters as input, it is capable to dimension the device and also estimate its performance for those conditions.

Keywords: *wave energy; oscillating-arm; ocean waves*

Resumen

Se presenta el diseño de un mecanismo de brazo oscilante conectado, a través de un trinquete, con un eje de potencia. Este dispositivo es una idea original de sus autores y puede significar la posibilidad de aprovechar la energía potencial proveniente de las olas del océano. Está formado por un brazo (barra) unido a un eje rotativo en uno de sus extremos a través de un trinquete, mientras que en el otro extremo tiene un cuerpo flotante que se mantiene en contacto con las olas. El eje está soportado por rodamientos localizados en una plataforma fija y puede mover una carga. La unión tipo trinquete conecta el brazo al eje cuando el brazo se mueve hacia abajo, por lo tanto ésta es la etapa generadora de potencia. Se podría convertir en un mecanismo de cuatro barras articuladas para aprovechar el movimiento hacia arriba y hacia abajo del cuerpo flotante. Puede operar sobre un eje de forma individual o en grupo, para aumentar la salida de potencia. Se presentan las ecuaciones involucradas y un procedimiento general de diseño que, dados algunos de los parámetros de entrada, sirve para dimensionar el mecanismo al igual que para obtener una estimación de su comportamiento. Se presenta un ejemplo de aplicación de este algoritmo de diseño.

Palabras clave: *energía olas; mecanismo olas del mar*

1. Introducción

Debido a, entre otras causas, la tendencia de aumento constante en los precios de los hidrocarburos y a la creciente contaminación acumulada en el planeta, el aprovechamiento de las energías renovables se ha convertido en una verdadera necesidad, particularmente de aquellas que tienen un bajo impacto sobre el medio ambiente. Este es el caso de la energía extraída de las olas del océano.

1.1. Revisión

Es difícil establecer una clasificación general para todos los tipos de convertidores de energía de la ola (CEO) encontrados en las diferentes referencias consultadas. En forma amplia, existen cinco categorías de acuerdo con sus principios de funcionamiento.

Columna de Oscilación de Agua: Comprende una estructura parcialmente sumergida (colector), abierta al mar debajo de la superficie del agua, de manera que contenga una columna de agua. El aire queda atrapado sobre la superficie de la columna de agua. A medida que las olas entran y salen del colector, la columna de agua se mueve arriba y abajo y actúa como un pistón sobre el aire empujándolo hacia adelante y hacia atrás. El aire se canaliza hacia una turbina y la obliga a girar. La turbina se acopla a un generador para producir electricidad (Hotta, 1995), (Mayazaki, 1995), (Whittaker & Raghunathan, 1993), (Whittaker & Stewart, 1993), (White, 1989).

Overtopping: Consiste de una estructura sobre la cual las olas se estrellan, un reservorio para almacenar el agua e hidro-turbinas instaladas en el fondo del reservorio. La altura del agua recogida mueve las turbinas cuando fluye de vuelta al mar. Las turbinas se acoplan a generadores para producir electricidad. Un CEO overtopping típico es el Tapchan (Tjungen, 1995).

Punto de absorción: Esta es una estructura que flota y absorbe energía en todas direcciones en virtud de sus movimientos en o cerca de la superficie del agua. Es posible que sea diseñado así para resonar, lo que significa que se mueve en más largas amplitudes que la de las olas. Esta característica maximiza la cantidad de potencia disponible para su captura (McCabe et al., 1993).

Terminator: También es una estructura flotante que se mueve dentro o cerca de la superficie del agua, pero absorbe energía en una sola dirección. El dispositivo se extiende en la dirección normal a la dirección predominante de las olas, de manera que cuando llegan las olas el dispositivo las refrena. De nuevo, la resonancia puede ser empleada y el sistema de recolección de potencia puede alcanzar formas diversas. El ejemplo clásico de este tipo es el Salter Duck (Salter, 1993), (Thorpe, 1992).

Attenuator: Este dispositivo es una estructura flotante larga como el Terminator, pero esta orientado paralelamente a las olas en lugar de ser normal a ellas. Cabalga las olas como un barco y sus movimientos de proa y a lo largo de su longitud pueden restringirse de manera de extraer energía. En teoría, una ventaja del **Attenuator** sobre el **Terminator** es que su área normal a las olas es pequeña y por lo tanto la fuerza que experimenta es mucho menor. Un ejemplo que se ajusta a esta categoría es el Pelamis (Pizer et al., 2003), (Yemm, Henderson & Taylor, 2000), (Pizer, Retzler, & Yemm, 2000).

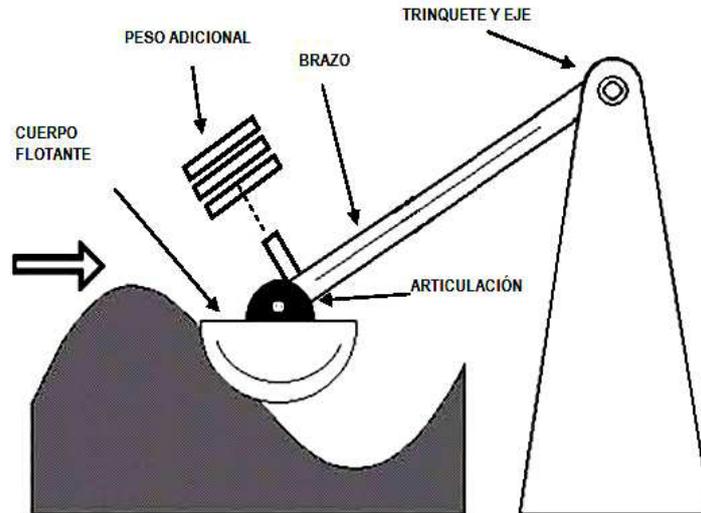
Además de la información ya presentada, algunas bases de datos de patentes disponibles en la web fueron consultadas con el fin de asegurar la originalidad del dispositivo propuesto aquí, (Oficina de patentes USA, Oficina de patentes Europea, Oficina de patentes del Japón, 2010). No se encontraron convertidores de la energía de las olas similares al aquí presentado.

2. Objetivos

El objetivo de este trabajo es el de diseñar un mecanismo de brazo oscilante conectado a un eje de potencia a través de una unión de trinquete (Figura 1), (Valencia et al., 2001), con el fin de aprovechar la energía potencial de las olas del océano. En primer lugar, se llevó a cabo un análisis cinemático, dinámico, energético y estructural del mecanismo. Como resultado se obtuvieron las ecuaciones que determinaron la posición angular, la velocidad y aceleración del brazo, la fuerza de sustentación, la energía y la potencia generadas, al igual que la energía y la potencia extraídas de las olas por el mecanismo. También se generó un

algoritmo de diseño, el cual utiliza las ecuaciones anteriormente mencionadas, para dimensionar el mecanismo y estimar su comportamiento. Finalmente, se presenta un ejemplo de aplicación de este algoritmo de diseño.

Figura 1: Dibujo esquemático del mecanismo de brazo oscilante.



Nomenclatura

- A Amplitud de la ola del océano.
- A_s Sección transversal del brazo.
- D_f Diámetro del cuerpo flotante.
- E_E Energía aprovechada.
- $F_f(t)$ Fuerza de sustentación.
- F_{fmax} Fuerza máxima de sustentación.
- S.F. Factor de seguridad estructural.
- g Aceleración de la gravedad.
- h_o Distancia desde el fondo de mar hasta el eje de potencia.
- H Amplitud total de la ola.
- h_c Altura del centro de gravedad.
- $h(t)$ Distancia desde el fondo del mar hasta la superficie de la ola.
- h_m Profundidad promedio del océano.
- I_c Inercia corregida del brazo.
- I_o Inercia del brazo al comienzo de cada iteración.
- L_o Longitud del brazo.
- L_1 Profundidad del agua en la longitud de la ola.
- L_f Longitud del cuerpo flotante.

- m_b Masa del Brazo.
- m_c Masa Adicional.
- m_f Masa del cuerpo flotante.
- $M_o(t)$ Momento en el eje de potencia.
- $M(\xi)$ Momento de flexión en el brazo.
- M_{max} Máximo momento de flexión en el brazo.
- P_f Peso del cuerpo flotante.
- P_b Peso del brazo.
- P_c Peso adicional.
- P_E Potencia aprovechada de las olas del océano.
- Pot_m Potencia promedio en el eje.
- q Carga uniforme por unidad de longitud.
- R_f Relación de aspecto del cuerpo flotante.
- S_x Modulo de sección del brazo.
- S_y Esfuerzo de cedencia del material.
- T Período de la ola.
- t Tiempo.
- $V_s(t)$ Volumen sumergido del cuerpo flotante. γ
- V_f Volumen del cuerpo flotante.
- $\theta(t)$ Posición angular de brazo con respecto a la horizontal.
- $\alpha(t)$ Velocidad angular del brazo.
- $\alpha(t)$ Aceleración angular del brazo.
- Δm Diferencial de masa.
- Δx Diferencial de longitud de la ola.
- Δy Diferencial de espesor de la ola.
- ΔPE Variación de energía potencial.
- ΔPE_u Variación de energía potencial por unidad de volumen.
- ΔV Diferencial de volumen.
- $\eta(t)$ Altura de la ola con respecto a la profundidad promedio del mar.
- γ_b Peso específico del brazo.
- γ_f Peso específico del cuerpo flotante.
- γ_{H_2O} Peso específico del agua del océano en la superficie del mismo.
- σ Frecuencia angular de la ola.
- σ_{max} Esfuerzo máximo en el brazo.

- ξ Coordenada generalizada usada para el análisis del momento de flexión.
- ρ Densidad del agua del océano en la superficie del mismo.

3. Metodología

3.1 Metodología de cálculo

Modelo de la ola

El comportamiento de las olas del océano fue modelado usando un modelo sinusoidal (Fig. 2), (Rahman, 1995), donde la altura de la superficie de la ola con respecto al fondo del mar, para cualquier instante, es representada por:

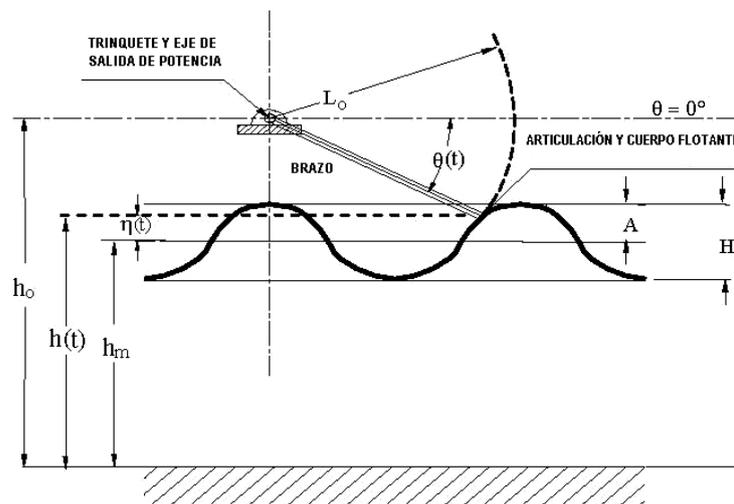
$$h(t) = h_m + \eta(t) \quad (1)$$

donde

$$\eta(t) = A \sin(-\sigma t) \quad (2)$$

$$\sigma = \frac{2\pi}{T} \quad (3)$$

Figura 2: Modelo sinusoidal para las olas.



Análisis Cinemático del mecanismo

El análisis cinemático se llevó a cabo asumiendo siempre la existencia del contacto entre el cuerpo flotante y la ola.

De la geometría del mecanismo en contacto con la ola puede obtenerse lo siguiente:

$$\text{sen } \theta(t) = \frac{h_o - h(t)}{L_o} \quad (4)$$

$$\theta(t) = \text{sen}^{-1} \left[\frac{h_o - h(t)}{L_o} \right] \quad (5)$$

Considerando la altura de la ola con respecto a la profundidad promedio del mar, para el punto de contacto.

$$\eta(t) = A \text{sen}(-\sigma t) = A \text{sen} \left(\frac{-2t\pi}{T} \right) \quad (6)$$

definiendo,

$$\varphi = \frac{-2\pi}{T} \quad (7)$$

$$\eta(t) = A \text{sen}(\varphi t) \quad (8)$$

sustituyendo la ecuación (8) en la ecuación (1):

$$h(t) = h_m + A \text{sen}(\varphi t) \quad (9)$$

sustituyendo la ecuación (9) en la ecuación (5):

$$\theta(t) = \text{sen}^{-1} \left[\frac{h_o - (h_m + A \text{sen}(\varphi t))}{L_o} \right] \quad (10)$$

$$\theta(t) = \text{sen}^{-1} \left[\left(\frac{h_o - h_m}{L_o} \right) - \left(\frac{A \text{sen}(\varphi t)}{L_o} \right) \right] \quad (11)$$

definiendo:

$$\beta_1 = \frac{h_o - h_m}{L_o} \quad (12)$$

$$\beta_2 = \frac{-A}{L_o} \quad (13)$$

la posición angular del brazo puede obtenerse para cualquier instante por:

$$\theta(t) = \text{sen}^{-1}[\beta_1 + \beta_2 \text{sen}(\varphi t)] \quad (14)$$

Aplicando a la ecuación (14) el operador derivativo con respecto al tiempo, se puede obtener la velocidad angular del brazo:

$$\omega(t) = \frac{d\theta}{dt} = \left[\frac{\beta_2 \varphi \cos(\varphi t)}{\beta_3} \right] \quad (15)$$

donde,

$$\beta_3 = \sqrt{1 - [\beta_1 + \beta_2 \text{sen}(\varphi t)]^2} \quad (16)$$

Aplicando a la ecuación (15) el operador derivativo con respecto al tiempo, se puede obtener la aceleración angular del brazo:

$$\alpha(t) = \frac{d^2\theta}{dt^2} \quad (17)$$

$$\alpha(t) = \left[\frac{-\beta_2 \varphi^2 \text{sen}(\varphi t)}{\beta_3} \right] + \left[\frac{\beta_2^2 \varphi^2 \cos^2(\varphi t) [\beta_1 + \beta_2 \text{sen}(\varphi t)]}{\beta_3^3} \right] \quad (18)$$

Análisis Dinámico del mecanismo

Considerando que el movimiento del brazo está determinado por el perfil de la ola, aparecen dos etapas (Figura 3 y 4), una cuando el brazo sube y la otra cuando baja. En ambos casos la ecuación que rige la dinámica del brazo es:

$$\sum M = I_c \alpha(t) \quad (19)$$

donde,

$$I_c = \frac{m_b L_o^2}{3} + m_c L_o^2 + m_f L_o^2 \quad (20)$$

Etapas brazo en subida: El trinquete que une el brazo con el eje es desactivado, desconectando el brazo del eje, por lo tanto, $M_o(t) = 0$. El diagrama de cuerpo libre del brazo se muestra en la Figura 3, la ecuación (19) queda:

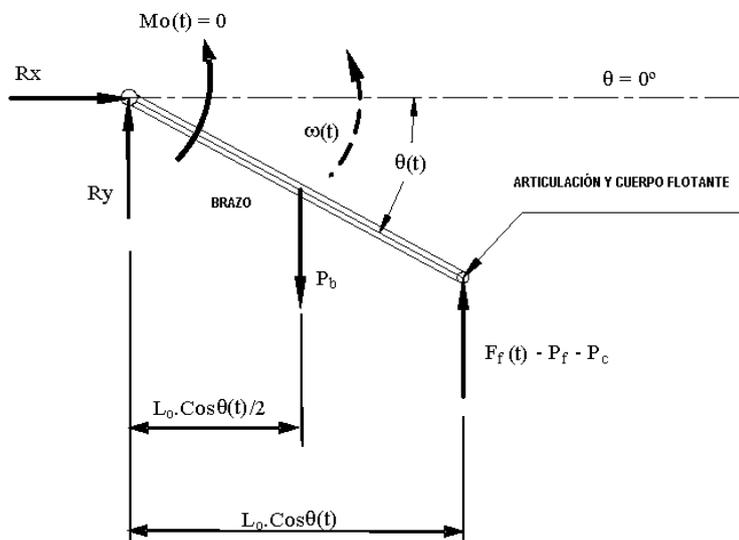
$$\left(\frac{-P_b}{2} - P_c - P_f \right) L_o \cos\theta(t) + F_f(t) L_o \cos\theta(t) + M_o(t) = I_c \alpha(t) \quad (21)$$

Etapa brazo en bajada: Esta es la etapa de generación de potencia. El trinquete que une el brazo con el eje es activado, por lo tanto, $M_o(t) > 0$, lo que significa que aparece una carga sobre el eje. El diagrama de cuerpo libre del brazo se muestra en la Figura 4. En este caso la ecuación (19) queda:

$$\left(\frac{-P_b}{2} - P_c - P_f \right) L_o \cos\theta(t) + F_f(t) L_o \cos\theta(t) + M_o(t) = I_c \alpha(t) \quad (22)$$

Las ecuaciones (21) y (22) se usan para calcular la fuerza de sustentación producida durante las etapas de subida y de bajada, este valor permite diseñar el cuerpo flotante. Para este propósito $M_o(t)$ se considera una función conocida para cualquier instante.

Figura 3: Cargas sobre el brazo durante la etapa en subida.



Fuerza de sustentación:

Etapa brazo en subida: Partiendo de la ecuación (21) puede obtenerse la fuerza de sustentación sobre el cuerpo flotante durante el movimiento en subida:

$$F_f(t) = \frac{P_b}{2} + P_c + P_f + \left(\frac{I_c \alpha(t)}{L_o \cos\theta(t)} \right) \quad (23)$$

donde,

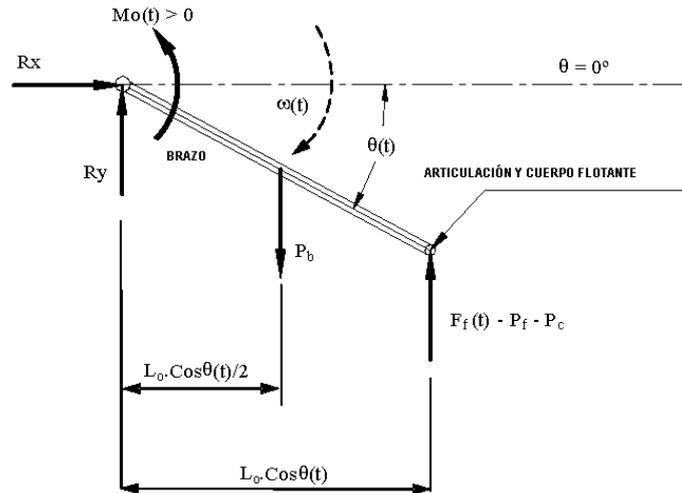
$$P_b = A_s L_o \gamma_b \quad (24)$$

Etapa brazo en bajada: De la ecuación (22) puede obtenerse la fuerza de sustentación sobre el cuerpo flotante durante el movimiento en bajada:

$$F_f(t) = \frac{P_b}{2} + P_c + P_f + \left(\frac{I_c \alpha(t) - M_o(t)}{L_o \cos\theta(t)} \right) \quad (25)$$

el torque $M_o(t)$ requerido en el eje es conocido.

Figura 4: Cargas sobre el brazo durante la etapa en bajada.



Cuerpo Flotante:

La fuerza de sustentación puede ser expresada en cualquier instante por:

$$F_f(t) = V_s(t) \gamma_{H_2O} \quad (26)$$

$$V_s(t) = \frac{F_f(t)}{\gamma_{H_2O}} \quad (27)$$

El volumen del agua desplazada es igual al volumen sumergido del cuerpo flotante ($V_s(t)$) en cualquier instante. El volumen del cuerpo flotante (V_f) se define como el volumen máximo sumergido calculado para un período. Por lo tanto, la fuerza máxima de sustentación es:

$$F_{fmax} = V_f \gamma_{H_2O} \quad (28)$$

el peso del cuerpo flotante es:

$$P_f = V_f \gamma_f = \frac{F_{fmax} \gamma_f}{\gamma_{H_2O}} \quad (29)$$

definiendo,

$$\mu = \frac{\gamma_f}{\gamma_{H_2O}} \quad (30)$$

la ecuación (29) queda:

$$P_f = F_{\max} \mu \quad (31)$$

para un cuerpo flotante semicircular (Figura 5), el volumen puede ser calculado como:

$$V_f = \frac{\pi D_f^2 L_f}{8} = \frac{F_{\max}}{\gamma_{H_2O}} \quad (32)$$

para una relación de aspecto,

$$R_f = \frac{L_f}{D_f} \quad (33)$$

la ecuación (32) queda :

$$V_f = \frac{\pi D_f^3 R_f}{8} = \frac{F_{\max}}{\gamma_{H_2O}} \quad (34)$$

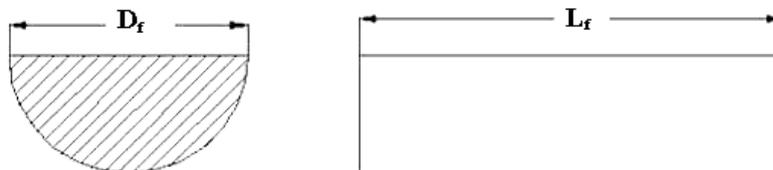
de la ecuación (34) se puede obtener el diámetro del cuerpo flotante:

$$D_f = \left[\frac{8F_{\max}}{\pi \gamma_{H_2O} R_f} \right]^{1/3} \quad (35)$$

una vez conocido el diámetro, la longitud del cuerpo flotante puede ser obtenida de la relación de aspecto:

$$L_f = R_f D_f \quad (36)$$

Figura 5: Forma del cuerpo flotante.



Energía potencial de las olas

La energía potencial de una columna de agua de longitud Δx , espesor Δy y altura $(h_m + \eta)$ (Figura 6), con respecto al fondo del mar es:

$$\Delta PE = h_c g \Delta m \quad (37)$$

$$\Delta PE = \frac{(h_m + \eta)}{2} [\Delta x \Delta y (h_m + \eta)] \rho g \quad (38)$$

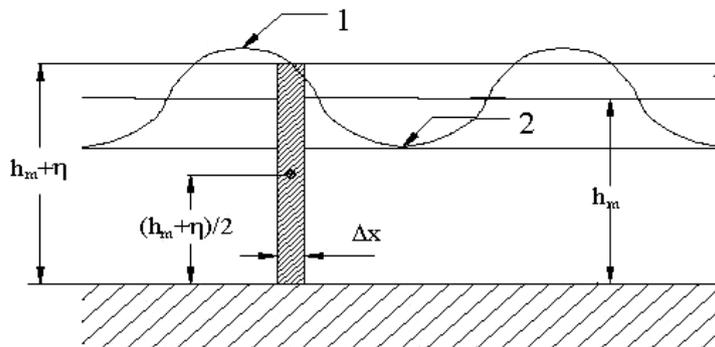
$$\Delta PE = \frac{(h_m + \eta)^2}{2} \Delta x \Delta y \rho g \quad (39)$$

Aplicando la ecuación (39) a los puntos 1 y 2 en la Figura 3, resulta:

$$\Delta PE_1 = \frac{(h_m + A)^2}{2} \Delta x \Delta y \rho g \quad (40)$$

$$\Delta PE_2 = \frac{(h_m - A)^2}{2} \Delta x \Delta y \rho g \quad (41)$$

Figura 6: Elemento diferencial de volumen usado para el cálculo de la energía potencial.



la variación de la energía potencial entre el punto 1 y 2 queda :

$$\Delta PE_{1-2} = \Delta PE_1 - \Delta PE_2 = \frac{[(h_m + A)^2 - (h_m - A)^2]}{2} \Delta x \Delta y \rho g \quad (42)$$

el volumen promedio de un elemento diferencial en un período es:

$$\Delta V = h_m \Delta x \Delta y \quad (43)$$

la variación de la energía potencial por unidad de volumen puede ser expresada en:

$$\Delta PE_u = \Delta PE_{1-2} = \frac{[(h_m + A)^2 - (h_m - A)^2]}{2h_m} \rho g \quad (44)$$

$$\gamma_{H_2O} = \rho g \quad (45)$$

la ecuación (44) queda :

$$\Delta PE_u = 2 \gamma_{H_2O} A \quad (46)$$

la energía aprovechada por el mecanismo, la máxima energía que puede ser extraída de las olas por medio del mecanismo en un período de tiempo, se define como:

$$E_E = \Delta PE_u V_f \quad (47)$$

entonces, la potencia aprovechada por el mecanismo puede ser obtenida a través de:

$$P_E = \frac{\Delta PE_u V_f}{T} \quad (48)$$

sustituyendo la ecuación (46) en la ecuación (48) queda :

$$P_E = \frac{2 \gamma_{H_2O} A V_f}{T} \quad (49)$$

Potencia en el eje

La potencia de salida generada por el mecanismo, se representa por:

$$Pot(t) = M_o(t) \omega(t) \quad (50)$$

Eficiencia en la captura

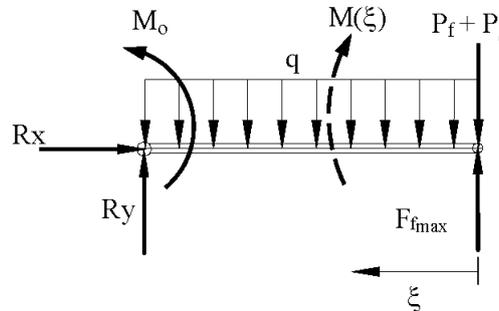
Pueden ocurrir algunas pérdidas durante el proceso de transmisión de potencia entre la ola y el cuerpo flotante. La eficiencia del mecanismo, para esta etapa de generación de potencia se define como:

$$\epsilon_c = \frac{\text{Potencia de salida promedio}}{\text{Potencia extraída de la ola}} \quad (51)$$

$$\epsilon_c = \frac{Pot_m}{P_E} \quad (52)$$

$$\epsilon_c = \frac{Pot_m}{\left(\frac{2 \gamma_{H_2O} A V_f}{T} \right)} \quad (53)$$

Figura 7: Diagrama de cargas utilizado en el cálculo del momento por flexión.



Análisis Estructural

El brazo fue modelado como una viga, apoyada en una articulación plana en uno de sus extremos y en un apoyo simple en el otro, como se muestra en la Figura 7. La ecuación del momento de flexión del brazo, para la situación crítica está representada por:

$$M(\xi) = (F_{fmax} - P_f - P_c)\xi - \frac{q\xi^2}{2} \quad (54)$$

aplicando el operador derivativo a la ecuación (55) con respecto a ξ y usando la ecuación (32), queda :

$$\frac{dM(\xi)}{d\xi} = F_{fmax}(1 - \mu) - P_c - q\xi = 0 \quad (55)$$

el momento máximo de flexión del brazo tiene lugar para la coordenada espacial ξ_{max} ,

$$\xi_{max} = \frac{F_{fmax}(1 - \mu) - P_c}{\left(\frac{P_b}{L_o}\right)} \quad (56)$$

y su valor es,

$$M_{max} = \frac{[F_{fmax}(1 - \mu) - P_c]^2}{2P_b} L_o \quad (57)$$

el esfuerzo normal máximo en la sección transversal del brazo es:

$$\sigma_{max} = \frac{M_{max}}{S_x} \quad (58)$$

y el factor de seguridad del análisis estructural es:

$$S.F. = \frac{\sigma_{\max}}{S_y} \quad (59)$$

3.2 Metodología de diseño

El diagrama de flujo mostrado en la Figura 9, explica cómo las ecuaciones ya derivadas son usadas para llevar a cabo el diseño del mecanismo y estimar su comportamiento. Como datos de entrada (ver Tabla 1) se requieren los siguientes parámetros:

Características de las olas del océano: Período de la ola (T), amplitud de la ola (A), peso específico del agua del océano en la superficie del mar (γ_{H_2O}), profundidad promedio del mar (h_m).

Características del brazo: longitud del brazo (L_o), altura del eje de potencia con respecto al fondo del mar (h_o), peso específico del brazo (γ_b), inercia inicial del brazo con respecto al eje para cada iteración (I_o), esfuerzo de cedencia (S_y), y masa adicional en el brazo (m_c).

Características de la sección transversal del brazo: área de la sección transversal del brazo (A_s) y módulo de sección (S_x),

Carga: Torque sobre el eje (M_o).

Características del cuerpo flotante: El peso específico del cuerpo flotante (γ_f), y la relación de aspecto del cuerpo flotante (R_f).

Todos los cálculos se realizan para un ciclo de la ola, como se explica a continuación (ver Figura 9):

Como primer paso se calcula posición angular, velocidad y aceleración, asumiendo que siempre hay contacto entre el cuerpo flotante y la ola, para este propósito se usan las ecuaciones (14), (15) y (18).

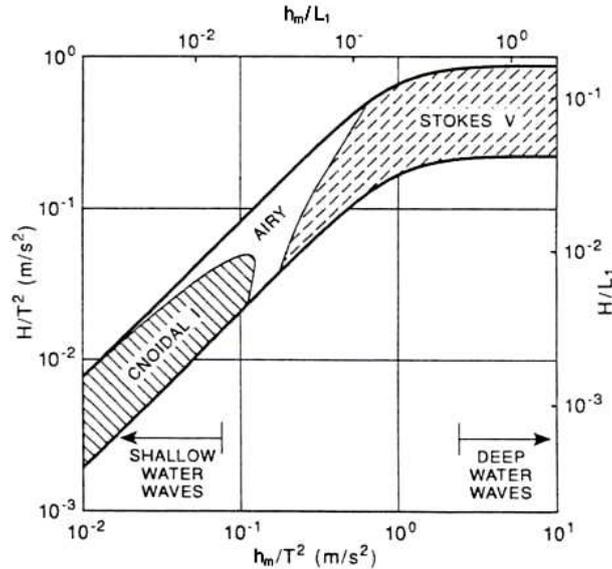
Después de eso, la fuerza de sustentación se calcula en forma discreta para los diferentes valores de tiempo dentro de un período, esto se logra usando las ecuaciones (23) y (25), usando estos valores se puede obtener el volumen sumergido del cuerpo flotante, en forma discreta, usando la ecuación (27). El volumen del cuerpo flotante se dimensiona con el valor máximo del volumen sumergido del cuerpo flotante. Esto asegura que siempre existirá contacto entre el cuerpo flotante y la ola y, al mismo tiempo, el torque requerido sobre el eje (M_o) podría suministrarse en cualquier momento.

Es importante enfatizar que el volumen del cuerpo flotante es desconocido dentro de los parámetros de entrada, por lo tanto, su masa al comienzo del procedimiento de diseño es considerada cero. Este hecho hace que la metodología de diseño sea un proceso iterativo. Para cada iteración el peso del cuerpo flotante (P_f) se calcula usando la ecuación (31), este valor se usa para calcular la masa del cuerpo flotante (m_f), con este parámetro la inercia del brazo con respecto al eje puede ser corregida (I_c), usando la ecuación (20). El proceso iterativo termina cuando la inercia del brazo corregido (I_c), es similar a la inercia al comienzo de la iteración (I_o), dentro de una tolerancia predefinida.

Cuando se logra esta última condición es cuando la potencia de salida y la potencia extraída de las olas pueden ser calculadas usando las ecuaciones (50) y (49), después de lo cual puede ser obtenida la eficiencia de la captura a través de la ecuación (53). Finalmente, el factor seguridad del análisis estructural puede ser obtenido por medio de la ecuación (59). Si es necesario optimizar el diseño, bien debido a que el brazo sufrió una falla por deformación o porque la salida de potencia no llena los requerimientos, entonces el proceso

iterativo podría continuarse haciendo los cambios adecuados sobre los parámetros de entrada.

Figura 8: Comparación de diferentes modelos de ola que mejor se ajustan con valores experimentales



La metodología de diseño explicada anteriormente fue implementada a través de la elaboración de un programa de computación en Fortran, cuyos parámetros de entrada se muestran en la Tabla 1 y que arroja los resultados presentados en la Tabla 2 y Tabla 3. En la Tabla 4 se puede observar la convergencia del proceso iterativo.

4. Resultados y Discusión

La metodología descrita anteriormente fue aplicada a un ejemplo de diseño del mecanismo de brazo oscilante. Con el fin de hacer más realista el uso del modelo sinusoidal, se utilizó el diagrama mostrado en la Figura 8 (Rahman), donde se muestra la validez física de varias teorías matemáticas de las olas, usadas para modelar las olas del océano. Del diagrama podemos obtener la relación entre el promedio de la profundidad del océano (h_m) y el periodo de la ola (T), al igual que la relación entre la amplitud de la ola (A) y el periodo de la ola (T).

En el diagrama mostrado en la Figura 8, las coordenadas del punto P son:

$$\frac{h_m}{T^2} = 10^{-1} \quad (60)$$

$$\frac{H}{T^2} = 4 \times 10^{-2} \quad (61)$$

donde,

$$H = 2A \quad (62)$$

$$h_m = 10^{-1} T^2 \quad (63)$$

$$A = 4 \times 10^{-2} T^2 \quad (64)$$

Los datos de entrada usados para el ejemplo se presentan en la Tabla 1. Una vez desarrollado el procedimiento de diseño, se obtienen los parámetros de salida que son presentados en la Tabla 2 y Tabla 3.

Tabla 1: Parámetros de Entrada

Características de las olas:	
T	6 s
h_m	3.6 m
A	0.72 m
γ_{H_2O}	1 027 kgf/m ³
Características del brazo:	
L_0	1.2 m
h_o	3.6 m
m_c	800 kg
γ_b	7850 kgf/m ³
S_y	2500 kgf/m ³
A_s	14.2 cm ²
S_x	54.7 cm ³
Características del cuerpo flotante:	
R_f	1.2
γ_f	100 kgf/m ³
Torque en el eje:	
M_0	800 kgf m
Parámetros del programa:	
Λ_t	0.3 s
Tol	0.1
$Iter_{max}$	1000

Tabla 2: Parámetros de Salida

Cuerpo Flotante:	
D_f	1.28 m
L_f	1.54 m
V_f	0.99 m
P_f	99.29 kgf
Cálculos Energéticos:	
E_E	14 390 J
P_E	2.4 kw
Pot_m	1.8 kw
ϵ_e	75.08 %
Análisis Estructural:	

M_{max}	65 072 kgf cm
σ_{max}	1 189 kgf/cm ²
S_y	2500 kgf/cm ²
S.F.	2.1

TABLA 3. Parámetros cinemáticos, dinámicos y energéticos

t [s]	h(t) [m]	$\theta(t)$ [deg]	$\omega(t)$ [rad/s]	$\alpha(t)$ [rad/s ²]	$F_f(t)$ [kgf]	$V_s(t)$ [m ³]	Pot (t) [kw]
0.00	3.60	0.00	0.63	0.00	239.30	0.23	4.93
0.30	3.38	10.69	0.61	-0.14	212.09	0.21	4.77
0.60	3.18	20.65	0.54	-0.30	157.80	0.15	4.26
0.90	3.02	29.04	0.42	-0.51	78.92	0.08	3.31
1.20	2.92	34.79	0.24	-0.72	-3.30	0.00	1.85
1.50	2.88	36.87	0.00	-0.82	-41.14	0.04	0.00
1.80	2.92	34.79	-0.24	-0.72	808.52	0.79	0.00
2.10	3.02	29.94	-0.42	-0.51	841.44	0.82	0.00
2.40	3.18	20.65	-0.54	-0.30	870.24	0.85	0.00
2.70	3.38	10.68	-0.61	-0.14	890.52	0.87	0.00
3.00	3.60	0.00	-0.63	0.00	905.97	0.88	0.00
3.30	3.82	-10.69	-0.61	0.14	921.41	0.90	0.00
3.60	4.02	-20.65	-0.54	0.30	941.69	0.92	0.00
3.90	4.18	-29.04	-0.42	0.51	970.49	0.94	0.00
4.20	4.28	-34.79	-0.24	0.72	1003.42	0.98	0.00
4.50	4.32	-36.87	0.00	0.82	1019.74	0.99	0.00
4.80	4.28	-34.79	0.24	0.72	191.60	0.19	1.85
5.10	4.18	-29.04	0.42	0.51	207.97	0.20	3.31
5.40	4.02	-20.65	0.54	0.30	229.25	0.22	4.26
5.70	3.82	-10.68	0.61	0.14	242.98	0.24	4.77
6.00	3.60	0.00	0.63	0.00	239.30	0.23	4.93

TABLA 4. Convergencia del algoritmo de diseño

Iteración	ABS ($I_c - I_0$)	Tolerancia
1	127.31	0.1
2	13.96	0.1
3	1.53	0.1
4	0.17	0.1
5	0.02	< 0.1

En la Tabla 2 se muestra, como resultado del procedimiento de diseño, las características finales del cuerpo flotante, al igual que la potencia de salida generada por el mecanismo, la eficiencia de captura y el reporte de análisis estructural. Para el dimensionamiento del cuerpo flotante se consideró la fuerza de sustentación máxima (1019.74 Kg.), por lo tanto el volumen máximo sumergido del cuerpo flotante es igual al volumen del cuerpo flotante. La eficiencia de captura (75.08%) representa la habilidad del mecanismo de transmitir la potencia desde las olas hasta el eje. El promedio de la salida de potencia generada por un brazo fue de 1.8 Kw. en un período de tiempo de 6 segundos,

esto resulta en un trabajo de 1080 Kwh., asumiendo que el período de la ola es constante en el tiempo. Es difícil evaluar la factibilidad de este mecanismo sin un prototipo, porque el valor de 1080 Kwh. no toma en cuenta la pérdida de potencia que se experimentará cuando la potencia en el eje se convierta en energía eléctrica. Basándonos en los datos disponibles en [20], donde se presenta el consumo de energía per cápita de varios países, podemos observar que los países menos desarrollados tienen un promedio de consumo de energía per cápita de 95 Kwh (Sur de Asia 554 Kwh., Latino América y el Caribe 1888 Kwh., Haití 67 Kwh., Islas Salomón 71Kwh, Guatemala 481 Kwh., etc.) La baja magnitud de requerimientos energéticos per cápita de algunos países y el hecho de que este mecanismo puede operar en grupo, amplificando la potencia generada, hace de este dispositivo un proyecto prometedor.

Del análisis estructural se puede concluir que el brazo no presenta fallas estructurales, porque el factor de seguridad obtenido es de 2.1.

La Tabla 3 muestra en forma discreta, y para un ciclo de la ola, los valores de las variables cinemáticas, dinámicas y energéticas, al igual que el volumen sumergido del cuerpo flotante (valores negativos de θ (t) indican que la posición angular del brazo está por encima de la horizontal). Para este ejemplo en particular puede observarse que la fuerza de sustentación siempre es positiva excepto para los instantes 1,20 s y 1.50 s, cuando la fuerza de sustentación registra un valor negativo. El signo negativo indica que el contacto entre el cuerpo flotante y la ola está roto, por lo que el cuerpo flotante tiende a separarse de la superficie de la ola; sin embargo, la metodología de diseño se basa en la hipótesis que el cuerpo flotante siempre esta en contacto con la superficie de la ola, esto se logra matemáticamente por medio de la generación de una fuerza de sustentación ficticia negativa. Al no tomar en cuenta el fenómeno de la separación se limita la metodología de diseño presentada en este trabajo, lo cual introduce algo de error en el cálculo de la potencia de salida, porque durante la separación, la velocidad angular del brazo no está determinada por el movimiento de la ola. Por lo tanto, solamente durante la separación (1.20 s a 1.50 s, para el ejemplo presentado) la ecuación (15) no es válida y en consecuencia, el cálculo de la potencia de salida posee cierto error, como puede ser observado en la ecuación (50).

Se puede utilizar un volante de inercia para darle continuidad a la generación de energía eléctrica, lo que, además, minimizaría este efecto de separación. El dimensionamiento del volante de inercia requiere el cálculo del par resistente.

5. Conclusiones

En este trabajo se ha obtenido la ecuación para llevar a cabo los cálculos de la posición angular, velocidad y aceleración de un mecanismo de brazo oscilante para cualquier instante, basado en las variables geométricas del mecanismo y de las olas. También, se presentó la ecuación que describe la fuerza de sustentación, la cual es usada para dimensionar el cuerpo flotante, además se ha llevado a cabo un análisis estructural bajo el criterio del límite de cedencia. Con el fin de estimar el comportamiento del mecanismo, se han deducido las ecuaciones para determinar la potencia de salida y la potencia aprovechada de las olas.

Aunque para el ejemplo presentado se han usado los datos particulares mostrados en la Tabla 1, la metodología de diseño descrita en este artículo es general y permite diseñar el mecanismo propuesto variando los parámetros relacionados con olas, brazo, cuerpo flotante y torque requerido sobre el eje.

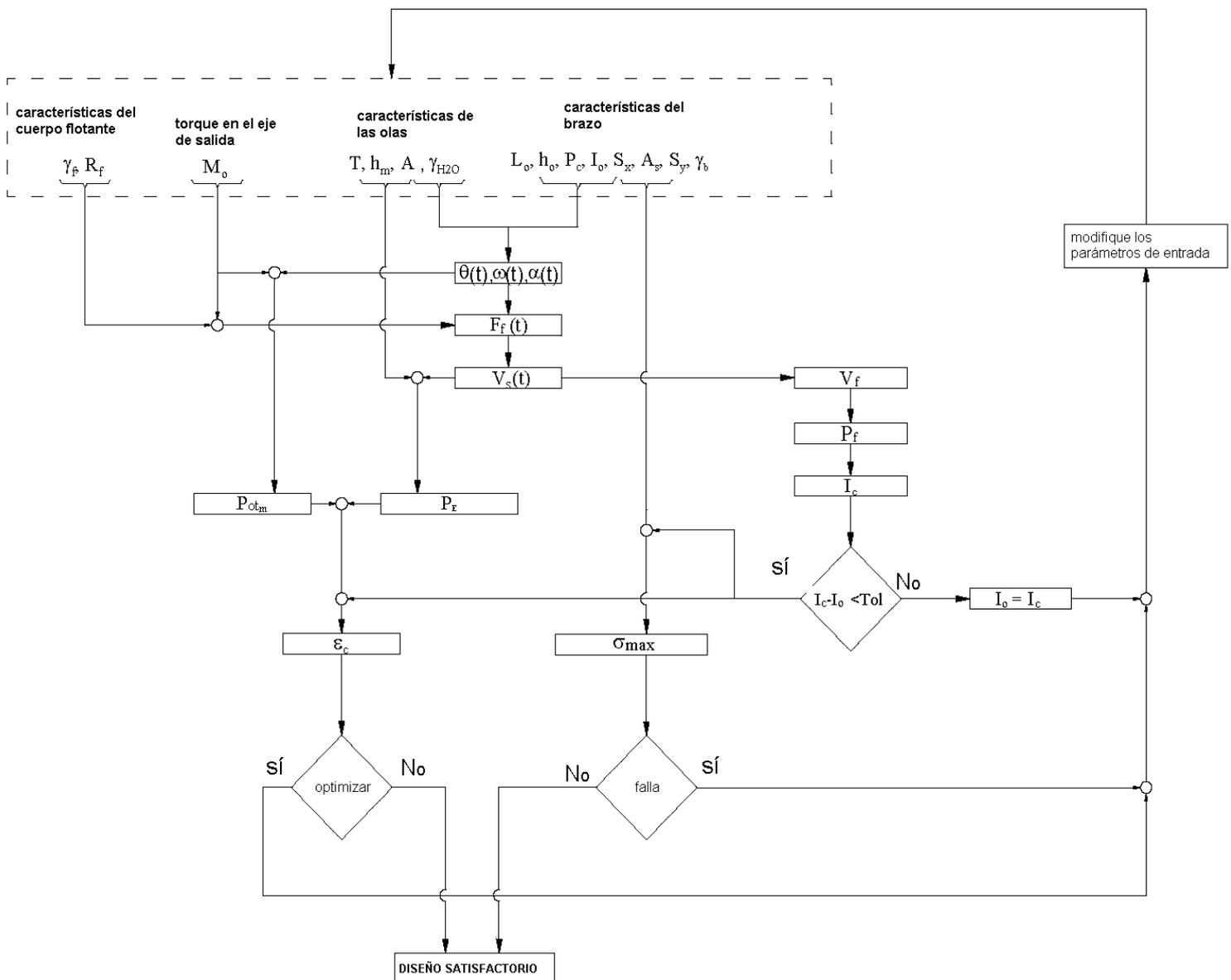
Basado en los valores de consumo de energía per cápita mas conocidos y la cantidad de energía generada por el mecanismo en el ejemplo presentado y también basándonos en el

hecho de que este dispositivo puede ser operado en grupo, amplificando la potencia aprovechada, puede concluirse que la aplicación práctica de este mecanismo parece ser prometedora y viable.

Las ecuaciones y la metodología desarrollada están basadas en la suposición de que el contacto entre el cuerpo flotante y las olas nunca se rompe. Sin embargo, los resultados obtenidos han mostrado que en algunas condiciones esta suposición es falsa, esto puede observarse cuando la fuerza de sustentación registra un valor negativo, lo cual es físicamente imposible. Por esta razón el fenómeno de separación debe ser incluido dentro de la metodología de diseño con el fin de eliminar esta limitación. Los trabajos posteriores deben ser orientados para alcanzar este objetivo.

Es importante caracterizar el mecanismo con el fin de conocer que tan bien será su comportamiento bajo diferentes condiciones en las olas del océano, con el propósito de diseñar un mecanismo ideal para cada escenario o ubicación geográfica.

Figura 9: Metodología de diseño del mecanismo de brazo oscilante



Referencias

- Hotta H. (1995). R&D on Wave Power in Japan. *Proceedings of the Second European Wave Power Conference*, Lisbon, Portugal, November 8-10.
- Mayazaki, T.(1995). Japanese Wave Energy Devices. *Proceedings of the Second European Wave Power Conference*, Lisbon, Portugal, November 8-10.
- McCabe, A.P., Bradshaw, A., Widden, M.B., Chaplin, R.V., French, M.J. & Meadowcroft, J.A.C.(1993). PS FROG MK 5: An Offshore Point Absorber Wave Energy Converter. *Fifth European Wave Energy Conference*, Cork, Ireland, September 17-20.
- Oficina de Patentes del Japón , <http://www.jpo.go.jp/> (2 de Noviembre del 2010)
- Oficina de Patentes Europea, <http://ep.espacenet.com/> (6 de Noviembre del 2010)
- Oficina de patentes de USA, <http://www.uspto.gov/> (6 de Noviembre del 2010)
- Pizer D., Rtzler, C., Henderson, R., Ahlqvist, J., Cowieson, S. & Shaw, M.(2003). Pelamis WEC – Advances in the Numerical and Experimental Modeling Programme Ocean Power Delivery Ltd. *Fifth European Wave Energy Conference*, Cork, Ireland, September 17-20.
- Pizer, D.J. Retzler, C.H. & Yemm, R.W.(2000). The OPD Pelamis: Experimental and Numerical Results from the Hydrodynamic Work Programme. *Proceedings of the Fourth European Wave Energy Conference*, Aalborg, Denmark.
- Rahman, M.(1995). *Water Waves*. Clarendon Press.
- Salter, S.(1993). Changes to the 1981 Design of Spine Based Ducks. *Proceedings of the First European Wave Energy Symposium*, Edimburgh U.K., July 21-24.
- Thorpe, T.W.(1992). A Review of Wave Energy. Vols. 1 y 2, ETSU Report Number R-72, December 1992.
- Tjugen,K.J.(1995). TAPCHAN Ocean Wave Energy Proyect at Java, Updated Project Status. *Proceedings of the Second European Wave Power Conference*, Lisbon, Portugal, November 8-10.
- White, P. (1989). Developments in Norwegian Wave Energy. *Proceedings of a Conference on Wave Energy Devices*, Coventry, U.K.
- Whittaker, T.J.T & Raghunathan, S.(1993). Islay European Shoreline Wave Power Station. *Proceedings of the First European Wave Energy Symposium*, Edimburgh U.K., July 21-24.
- Whittaker, T.J.T. & Stewart, T.P.(1993). An Experimental Study of Nearshore and Shoreline Oscillating Water Columns with Harbours. *Proceedings of the First European Wave Energy Symposium*, Edimburgh U.K., July 21-24.
- Valencia, G., García, N., Rojas, M. & Viggiani, P.(2001). Diseño Conceptual de un Sistema para utilizar la energía contenida en las olas del mar. *Actas del V Congreso Iberoamericano de Ingeniería Mecánica*, Mérida Venezuela.

Yemm, R.W., Henderson, R.M. & Taylor, C. A. E.(2000). El OPD Pelamis WEC: Current Status and Onward programme. *Proceedings of the Fourth European Wave Energy Conference*, Aalborg, Denmark.