

## GENERACIÓN DE ENERGÍA A PARTIR DE LAS OLAS: UN DESAFÍO INTERDISCIPLINARIO

Mosquera, Facundo D.; Evangelista, Carolina A.; Puleston, Paul F.

Instituto de Investigaciones en Electrónica, Control y Procesamiento de Señales; LEICI; UNLP y CONICET; Calle 48 y 116, CC 91 (1900); La Plata – Buenos Aires – Argentina.

contacto: [facundo.mosquera@ing.unlp.edu.ar](mailto:facundo.mosquera@ing.unlp.edu.ar)

### Introducción

Las jornadas de la facultad de ingeniería son el espacio perfecto para que los institutos que forman parte de la universidad den a conocer sus trabajos en curso. En esta ocasión, el trabajo que se presenta tiene ese objetivo y se diseñó para mostrar, difundir e incentivar a las distintas ramas de la ingeniería que se forman en esta facultad a que conozcan la generación de energía de las olas, o también llamada energía undimotriz.

El trabajo se realiza desde el punto de vista de un ingeniero en electrónica, por lo tanto, lo presentado tendrá ese sesgo y los temas que escapan al alcance de la carrera tendrán sus correspondientes falencias. Por este motivo, si a algún lector de este trabajo se interesa en la temática, desde nuestro grupo de trabajo estaremos disponibles para entablar una comunicación.

### Desarrollo y Discusiones

En esta sección se presentarán las distintas etapas en las que se puede separar el estudio de los sistemas de extracción de energía undimotriz. Cada subsección tendrá en su título la carrera que los autores consideran apta para trabajar con la temática, sin embargo, otras carreras no nombradas también pueden aportar en cada etapa del modelado.

#### Generación de las olas (Ingeniería Hidráulica, Civil)

Cualquiera que haya estado observando las olas desde la playa y vea el daño que provocan a las estructuras costeras se da cuenta de la gran cantidad de energía que ellas pueden contener. Sin embargo, para capturar esa energía es necesario entender algunas características diferentes a lo ya conocido con respecto a la industria marítima. Es por eso que esta temática presenta nuevos desafíos para la investigación.

#### Transporte de energía

Una ola puede ser vista como una onda que transporta energía desde un punto al otro. Uno puede observar una ilustración de este fenómeno cuando arroja una piedra sobre un lago de aguas calmadas. Un patrón de olas se forma de manera radial alrededor del lugar donde cayó la piedra. Esos valles y crestas que viajan en círculos que se expanden, se hacen más pequeños a medida que se alejan del punto de generación. En este caso, esas ondas llevan una porción de la energía cinética que traía la piedra al caer al agua. Un fenómeno similar ocurre cuando el viento sopla sobre una región de la superficie del océano, generando olas que son más rápidas y largas de acuerdo con la intensidad del viento [1].

#### Proceso de generación de las olas

Si se lo analiza en gran detalle, las olas siempre comienzan como pequeñas oscilaciones. Las cuales van aumentando de tamaño a medida que el viento se mantiene transmitiendo energía al mar. Esto continúa hasta que llega un punto en que las olas no pueden crecer más, porque empiezan a perder energía, en ese momento se las considera que están completamente desarrolladas. Considerar o no a un mar completamente desarrollado depende de la velocidad y la distancia (*fetch*) sobre la cual el viento está soplando. Sin embargo, cuando el viento deja de soplar, las olas continúan existiendo y pueden viajar largas distancias con una reducida pérdida de energía (cuando se encuentran en aguas profundas). En este último estado, normalmente se las considera olas *swell* porque el viento responsable de su generación ya no se encuentra presente. Por lo tanto, se definen olas locales cuando el viento responsable de su generación se encuentra presente y olas *swell* cuando fueron creadas por un viento que ya no está [2].

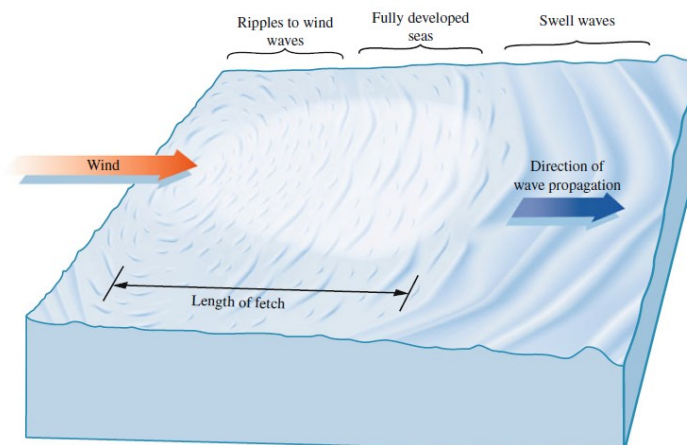


Figura 1: Proceso de generación de las olas [2].

### Modelado de las olas

En su representación más simple e intuitiva, las olas se modelan como una onda sinusoidal con un período  $T$  y una altura  $H$  únicas. Sin embargo, para representar el clima de ola de un determinado lugar, se utiliza el espectro de amplitudes de ola, que es la descripción más efectiva disponible [1]. Este espectro se define con la altura significativa,  $H_s$ , y el período pico,  $T_p$ . El primero se determina a partir del promedio del primer tercio de las olas más grandes (definición que se hereda de la época cuando la altura de ola la medían personas que observaban el mar) y el segundo está asociado (de manera inversa) a la frecuencia del espectro donde éste tiene su valor máximo.

### Convertidores de energía de olas (Ingeniería Civil, Hidráulica, Mecánica, en Energía Eléctrica)

La historia relacionada con los dispositivos diseñados para aprovechar la energía de las olas tiene sus inicios hace más de doscientos años. La primer patente adjudicada a un proyecto relacionado con el diseño de una máquina de olas fue otorgado a Monsier Girard y su hijo en París allá por el 1799. La propuesta de Girard se basaba en utilizar el movimiento oscilatorio de los buques de guerra franceses, atracados en el muelle, para generar energía mecánica y mover bombas, sierras u otros elementos mecánicos. Luego, ya para 1973 existían más de mil patentes relacionadas con la extracción de energía de las olas [3].

Debido a la gran cantidad de dispositivos es común clasificarlos en función de su principio de funcionamiento y su ubicación con respecto a la costa. El principio de operación puede ser descripto de varias maneras, sin embargo, el Centro Europeo de Energía Marina (EMEC en inglés) recomienda el siguiente [3]:

- **Atenuador:** Es un dispositivo flotante largo y fino, con su dimensión más larga alineada para que se encuentre paralela a la dirección de las olas. Típicamente, es una estructura articulada que parece una serpiente. Está compuesta por varias secciones que se doblan (o tuercen) cuando las olas pasan a través de ellas. Estos dispositivos extraen energía del movimiento relativo entre los cuerpos que lo componen, que se mueven en diferentes sentidos con el paso de la ola. Figura 2a), convertidor de ola *Pleamis*.
- **Absorbedor puntual (boya):** Es una estructura flotante que absorbe energía en todas las direcciones a partir de sus movimientos sobre la superficie del agua. Convierte el movimiento relativo entre la boya superior y su base en energía eléctrica. Figura 2b), convertidor de ola de *Ocean Power Technologies*.
- **Oscilador de empuje de ola:** Consiste en un módulo anclado en el fondo del mar que oscila empujado por las olas, su forma más común es la de una paleta. Al oscilar, acciona unos pistones hidráulicos, los cuales a su vez entregan el agua de mar presurizada a una unidad de transformación hidroeléctrica terrestre. Figura 2c), convertidor de ola *Oyster Wave Power*.
- **Columna de agua oscilante:** Están considerados como una de las mejores técnicas para convertir la energía de las olas en electricidad. Será descripto en la próxima subsección.

- Colector de ola: Estos dispositivos capturan la energía de un frente de olas mediante un colector de olas, el cual se asemeja a una piqueta, para mover una o varias turbinas hidráulicas de salto reducido denominadas turbinas Kaplan. Figura 2d), convertidor de ola *Wave Dragon*.
- Diferenciador de presión sumergido: Estos dispositivos se ubican típicamente cerca de la costa y son fijados en el lecho marino. El movimiento de las olas causa que el nivel del mar se incremente y decaiga por encima del dispositivo, induciendo una presión diferencial en el mismo. Esta variación en la presión empuja el fluido a través de un sistema que genera electricidad. Figura 2e), convertidor de ola *Ceto WEC*.
- Masa rotante: Este dispositivo utiliza dos formas de rotación para capturar energía a través del movimiento, la de oscilación y la de flotación. Este movimiento se transfiere a un peso excéntrico o un giroscopio de precesión. En ambos casos, el movimiento está acoplado a un generador eléctrico dentro del dispositivo. Figura 2f), Convertidor de ola *Inertial Sea Wave Energy Converter*.
- Otros: En esta categoría se cubren los dispositivos que tienen un diseño único y muy diferente a las tecnologías anteriores.

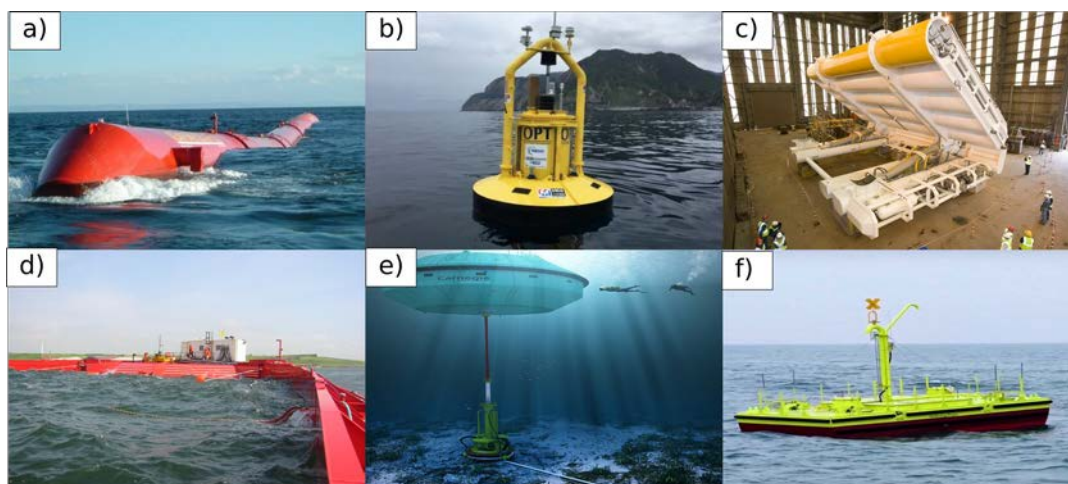


Figura 2: Convertidores de ola con diferente principio de operación [3].

#### Convertidor basado en columna de agua oscilante

Este convertidor está compuesto por una estructura hueca que tiene un orificio por debajo del nivel del agua y otro en su parte superior. Las olas entran y salen por el orificio inferior provocando una variación de presión del aire encerrado por la cámara. Esta variación de presión, genera un flujo de aire bidireccional que mueve una turbina autorrectificante conectada a un generador eléctrico. Que la turbina sea autorrectificante significa que va a girar siempre para el mismo lado independientemente del sentido del flujo de aire.

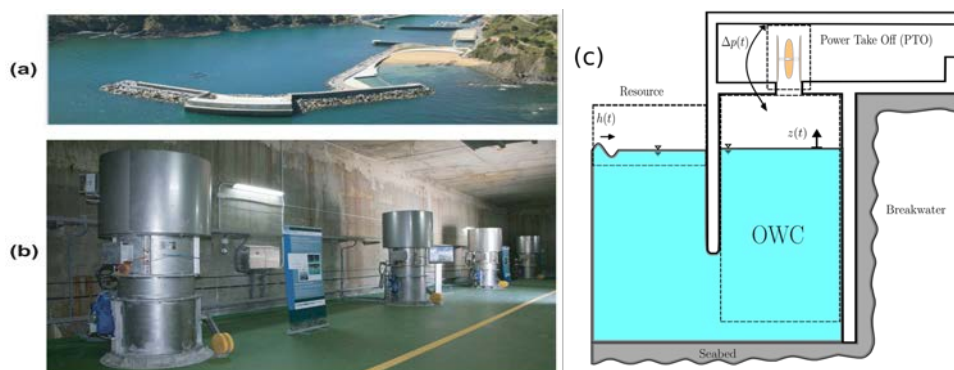


Figura 3: a) Planta de extracción de energía de olas en Mutriku. b) Imagen del sistema de extracción de potencia (turbina-generador) de la planta undimotriz de Mutriku. c) Esquema representativo de un sistema de columna de agua oscilante incluido en una escollera.

### Tipos de turbinas (Ingeniería Mecánica y Aeronáutica)

La mayoría de las turbinas autorrectificantes diseñadas para la conversión de energía de las olas son máquinas de flujo axial, sin embargo, hace pocos años se diseñó una alternativa de flujo radial. Las opciones más utilizadas actualmente son [4],[5]:

- Turbina Wells (Figura 4a)): Compuesta por un perfil de palas simétricas colocadas de manera perpendicular con respecto al eje del rotor. Su construcción es económica y tiene las velocidades de rotación más altas para las turbinas autorrectificantes, llegando a los 2000rpm.
- Turbina de impulso autorrectificante (Figura 4c)): Esta turbina es la alternativa más frecuente a la turbina Wells. La turbina de impulso las palas del rotor forman canales o ductos, provocando que el ángulo de salida del flujo de aire sea aproximadamente igual al ángulo de salida de las palas. La geometría de las palas del rotor es una versión modificada de las turbinas impulsadas por vapor.
- Turbina biradial (Figura 4 c)): Recientemente diseñada, esta turbina trabaja con un flujo aire que entra y sale del rotor de manera radial. El rotor está rodeado por guías de flujo radiales, que mejoran la circulación de aire por la turbina.

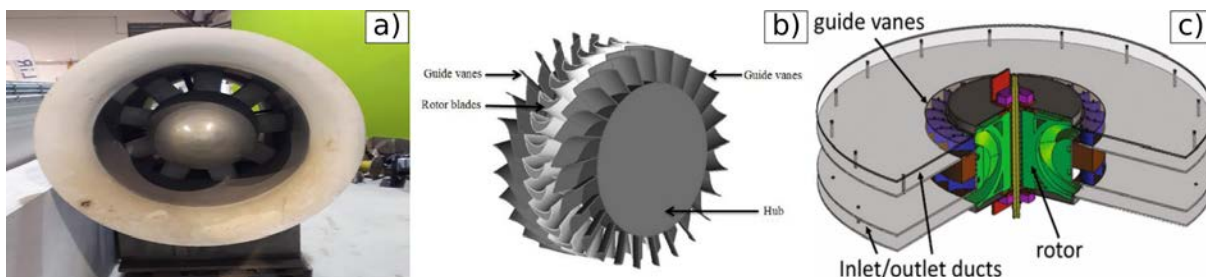


Figura 4: a) Turbina Wells. b) Turbina de impulso [4]. c) Turbina biradial [5].

### Propuesta de control – Extracción de energía (Ingeniería en Energía Eléctrica, en Electrónica y en Automatización y Control)

En nuestro grupo de investigación, perteneciente al instituto LEICI de la Facultad de Ingeniería, se está trabajando actualmente en estrategias de control para un convertidor de ola de columna de agua oscilante. El sistema con el cual se está trabajando actualmente se compone de una turbina Wells y un generador sincrónico de imán permanente [6]. Sin embargo, previamente se ha estado trabajando con la misma turbina y un generador de inducción doblemente alimentado [7]. La propuesta desarrollada en este grupo de investigación busca maximizar la extracción de potencia mecánica en la turbina, de manera tal de obtener luego un máximo de extracción de energía global desde la ola a la red de energía eléctrica, a la cual estos dispositivos se conectan. El esquema sobre el cual se propuso la técnica de control se muestra en la Figura 5. La técnica utilizada para llevar adelante el objetivo, en esta nueva propuesta, fueron los modos deslizantes de segundo orden adaptables y en particular el algoritmo de *Twisting* adaptable basado en el enfoque de Bartolini, Pisano y Ferrara [8].

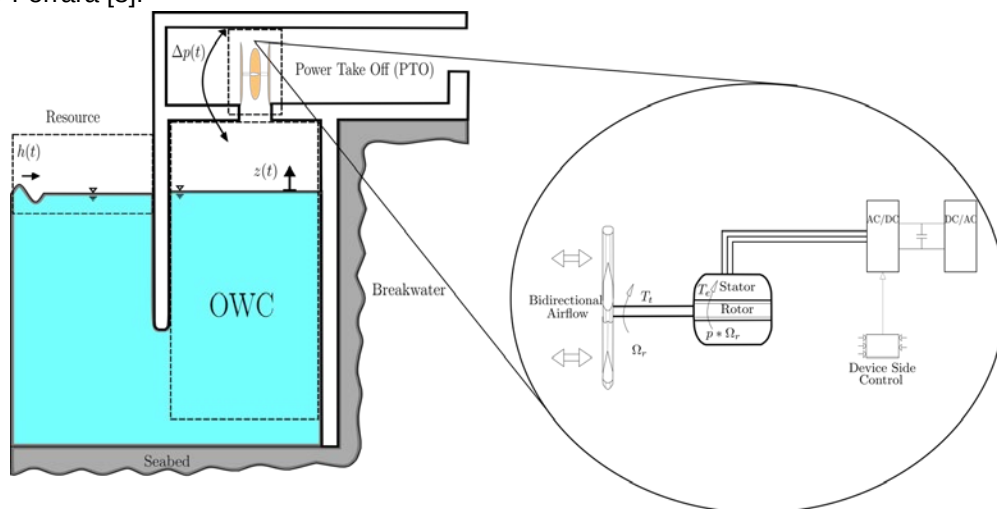


Figura 5: Esquema del sistema a controlar

El algoritmo de control tiene la siguiente forma:

$$v_{ASM}(\sigma) = -\alpha_T W^j \text{sign}(\sigma) - W^j \text{sign}(d\sigma/dt)$$

donde  $v_{ASM}$  es la acción de control,  $\alpha_T$  una ganancia multiplicativa,  $W^j$  la ganancia a actualizar y  $\sigma$  la variable de deslizamiento, que es donde se define el objetivo a cumplir por la acción de control. El controlador está basado en contar la cantidad de cruces por cero que tiene la variable de deslizamiento durante un tiempo fijo de ventana, esa cuenta se compara contra un umbral previamente definido por el diseñador del controlador. Si la cuenta es superior que el umbral, significa que el control puede relajarse y se reduce la ganancia. En cambio, si la cuenta queda por debajo del umbral es necesario aumentar la ganancia porque el sistema podría estar perdiendo el control.

### Resultados

Aplicando la acción de control diseñada en la subsección anterior al sistema de columna de agua oscilante se obtuvieron los resultados de la Figura 6.

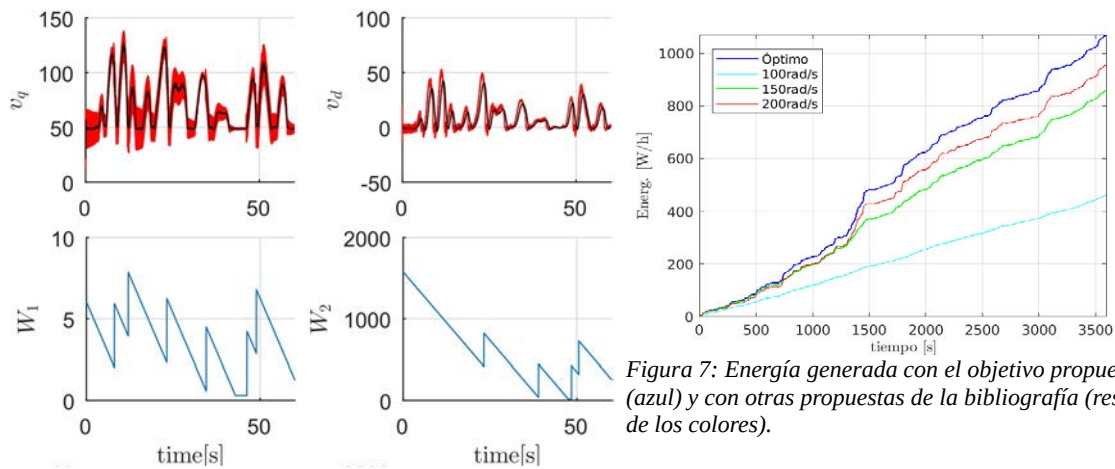


Figura 6: Acciones de control y ganancias variables

En la primer fila de resultados se pueden observar las acciones de control utilizadas, el diseño de control se realizó en el plano d-q del generador eléctrico y por ese motivo se tiene una tensión de control en cuadratura y otra tensión de control directa. Las acciones de control se encargan de asegurar el cumplimiento de los objetivos propuestos. Estos objetivos fueron: maximizar la potencia mecánica extraída de la turbina realizando un seguimiento de velocidad óptima y regular la corriente directa en cero para reducir las oscilaciones en la cupla electromecánica. Finalmente, la tercer fila de la Figura 6 muestra el comportamiento de las ganancias del controlador, las cuales se van modificando de acuerdo con la necesidad del control de volverse más agresivo (aumentar ganancias) o su posibilidad de relajarse (reducir ganancias). Los resultados obtenidos demuestran que el esquema de control es apropiado para cumplir con los objetivos propuestos.

Por otra parte, en la figura 7 puede observarse la energía extraída del sistema en una simulación de una hora. En esta figura se realizó una comparación del método propuesto que realiza un seguimiento del óptimo y distintas propuestas que se encuentran en la bibliografía que buscan regular la velocidad de rotación en un valor fijo.

## Conclusiones

Este trabajo se realizó para dar a conocer a la comunidad que integra la facultad de ingeniería un desafío altamente interdisciplinario como lo es la extracción de energía de las olas. Argentina tiene una gran extensión costera y el desarrollo de sistemas que aprovechen nuevas energías alternativas, que además se complementan muy bien con las energías explotadas actualmente como lo son el viento y el sol, genera un alto valor para la matriz energética del país. Es importante que los ingenieros sean quienes lleven adelante este tipos de desarrollos y para hacerlo es necesario una coordinación interdisciplinaria, para la cual las Jornadas ITE son un gran punto de encuentro. Por ese motivo, en esta publicación se recorrió la generación de la ola, pasando por los dispositivos que pueden aprovecharla y llegando a un ejemplo del funcionamiento de un dispositivo en particular que puede aprovechar esa energía. Desde el instituto LEICI hace cuatro años que se viene trabajando con este tipo de sistemas y actualmente se han realizado conexiones con la universidad de Quilmes, la Universidad de Maynooth en Irlanda y el Politécnico di Torino en Torino, Italia. Sin embargo, para poder completar los desafíos necesarios para el desarrollo de estos sistemas se necesita la participación de especialidades de todas las ramas de la ingeniería. Por estos motivos esperamos que este trabajo despierte el interés por la generación de energía undimotriz.

## Bibliografía

- [1] U. Korde and J. Ringwood. *Hydrodynamic Control of Wave Energy Devices*. Cambridge University Press: Cambridge. 2017
- [2] M. Folley. "The Wave Energy Resource" in *Handbook of Ocean Wave Energy*. Ch.3. Springer International Publishing. 2016
- [3] P. A. Lynn. *Electricity from Wave and Tide*. Wiley. 2013
- [4] A. Falcao and J. Henriques. "Oscillating-water-column wave energy converters and air turbines: A review". *Renew. Energy* , Vol. 85. Elsevier BV. p. 1391-1424.
- [5] A. Falcao, L. Gato and E. Nunes. "A novel radial self-rectifying air turbine for use in wave energy converters".
- [6] F. D. Mosquera, C. A. Evangelista, P. F. Puleston and J. V. Ringwood, "Control Twisting con Adaptación Basada en Cruce por Cero para un Sistema de Columna de Agua Oscilante con Generador Sincrónico". 27 ° Congreso Argentino de Control Automático AADECA'20 Virtual. 2020
- [7] F. D. Mosquera and C. A. Evangelista and P. F. Puleston and J. V. Ringwood. "Optimal wave energy extraction for oscillating water columns using second-order sliding mode control". *IET Renewable Power Generation* , Vol. 14, No. 9. 2019
- [8] G. Bartolini and A. Levant and A. Pisano and E. Usai. "Adaptive second-order sliding mode control with uncertainty compensation". *International Journal of Control* , Vol. 89, No. 9, 2016