

Selección de un convertidor de energía de las olas de tipo oscilante y un sistema de toma de fuerza para el aprovechamiento de la energía undimotriz de Colombia

Selection of an oscillating type wave energy converter and a power take-off system for the use of wave energy in Colombia

Juan Pablo Castaño-Serna ^{1a}, Edwin Chica-Arrieta ^{1b}

¹ Grupo de Investigación Energía Alternativa (GEA), Facultad de Ingeniería, Universidad de Antioquia, Colombia.
Orcid: 0000-0001-7789-0345 ^a, 0000-0002-5043-6414 ^b. Correos electrónicos: juan.castano16@udea.edu.co ^a,
edwin.chica@udea.edu.co ^b

Recibido: 22 noviembre, 2022. Aceptado: 22 abril, 2023. Versión final: 3 junio, 2023.

Resumen

Los dispositivos de generación undimotriz son dispositivos que se encargan de transformar la energía proveniente de las olas del mar en energía eléctrica. Los sistemas de toma de fuerza se caracterizan por tomar la energía mecánica obtenida mediante el dispositivo undimotriz y facilitar su conversión a energía eléctrica. En este trabajo, inicialmente se realizó una búsqueda y evaluación de los dispositivos tipo oscilantes convertidores de energía de las olas y sistemas de toma de fuerza disponibles en la literatura para identificar sus ventajas y desventajas con el fin de seleccionar los sistemas más indicados para el aprovechamiento del recurso undimotriz de Colombia. Los sistemas seleccionados corresponden a dispositivos undimotriz acoplados a estructuras fijas a la costa y sistemas de toma mecánica directa debido a que, estos presentan mayores ventajas en cuanto a su proceso de fabricación, puesta a punto, operación y mantenimiento. Finalmente se presenta un diagrama de flujo del proceso de diseño de estos sistemas.

Palabras clave: convertidor undimotriz; convertidor undimotriz tipo oscilante; sistema de toma de fuerza; PTO; WEC; OWSC.

Abstract

Wave energy converter devices are devices that are responsible for transforming the energy from sea waves into electrical energy. Power take-off systems are characterized by taking the mechanical energy obtained through the wave energy converter and facilitating its conversion to electrical energy. In this work, initially, a search and evaluation of the oscillating wave energy converter devices and power take-off available in the literature was carried out to identify their advantages and disadvantages in order to select the most suitable systems for the use of the wave energy resource of Colombia. The selected systems correspond to wave energy converters devices coupled to structures fixed to the coast and power take-off with direct mechanical connection because these have greater advantages in terms of their manufacturing process, set-up, operation and maintenance. Finally, a flowchart of the design process of these systems is presented.

Keywords: wave energy converter; oscillating wave energy converter; power take off; PTO; WEC, OWSC.

1. Introducción

Las grandes emisiones de gases de efecto invernadero (GEI) provenientes de la generación de energía por medio de fuentes de origen fósil (gas, petróleo, carbón, etc.) son uno de los principales problemas ambientales de la actualidad. Según el Banco Mundial, entre los años 2000 y 2019 se tuvo un incremento del 41% en las emisiones y seguirán aumentando a través del tiempo si no se cambian la forma en que se genera y se consume la energía a nivel mundial. En este sentido, es indispensable mitigar el uso de combustibles de origen fósil para la generación de energía, reconociendo que, en el contexto de generación de energía, las Fuentes No Convencionales de Energía Renovable (FNCR) se presentan como una posibilidad para disminuir significativamente las emisiones de GEI [1].

A través del tiempo se han incorporado a la canasta energética mundial diferentes tipos de fuentes de energía, sin embargo, a pesar de mostrar avances tecnológicos en cuanto a la implementación de FNCR, esto no se ha visto reflejado en disminución en el uso de fuentes de energía de origen fósil [2]. Pues es evidente la dependencia a nivel mundial del uso de hidrocarburos como el carbón, petróleo y gas natural no solo para la generación de energía sino también en todos los ámbitos productivos (Figura 1).

Por su parte, la Organización Meteorológica Mundial en la edición del “Boletín de Gases de Efecto Invernadero”

para el año 2019, señaló que, el constante aumento de los GEI se ha convertido en una tendencia y sería el causante de más perjuicios al clima en el futuro [3]. En consecuencia, con lo anterior, la energía renovable ha sido considerada como una alternativa importante en cuanto a recurso energético en la búsqueda de reducir las emisiones de carbono y de esta manera prevenir la contaminación medioambiental [4], [5]. Además, la comunidad global de energía renovable REN21, en su reporte global para el año 2021, señaló que, la transición hacia energías renovables en el futuro, ha sido reconocida a nivel mundial como un factor principal en respuesta al cambio climático [1].

La energía undimotriz, considerada una de las principales fuentes de energía renovable, además de tener bajos impactos negativos al medio ambiente en comparación con las otras energías renovables, ofrece la posibilidad de satisfacer gran parte de la demanda energética mundial [6]. A nivel global, se estima que el potencial de energía de las olas del océano es alrededor de 2.11 TW [7] y su densidad de potencia ($2-3 \text{ kW}/\text{m}^2$) es mayor que el de otras fuentes renovables (eólica $0.4-0.6 \text{ kW}/\text{m}^2$; solar $2 \text{ 0.1-0.2 kW}/\text{m}^2$) [8], siendo evidente de esta manera su gran potencial energético.

Según la Agencia Internacional de Energía Renovable, la energía undimotriz es un tipo de energía prometedor que se encuentra en etapa de investigación y desarrollo.

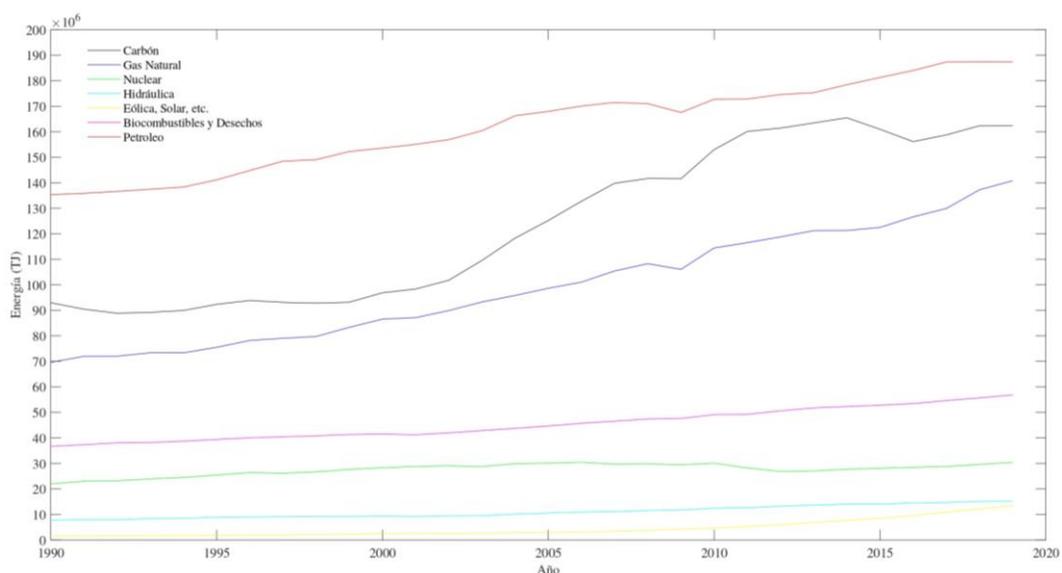


Figura 1. Oferta total de energía por fuente requerida en terajoules (TJ) entre 1990-2019 Fuente: adaptado de [2].

En la **Figura 2**, se puede apreciar que, la energía generada para el año 2019 a partir de energía proveniente del océano es de 3511.44 TJ, lo que corresponde al 0.0019% de lo generado con carbón y al 0.026% de lo generado por medio de fuentes como solar y eólica [9].

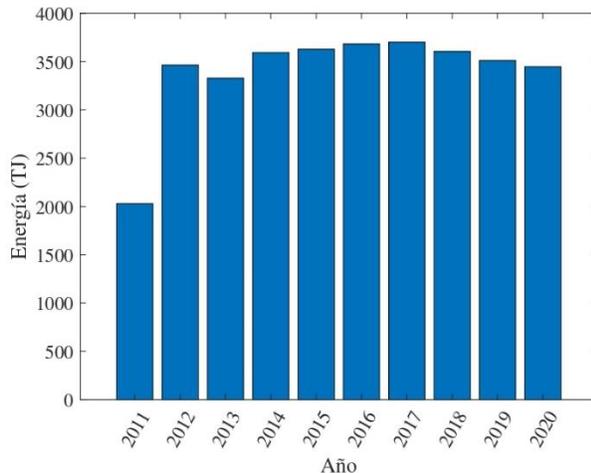


Figura 2. Generación proveniente de energía del océano. Fuente: adaptado de [9].

En los últimos años se han presentado avances en el desarrollo de gran cantidad de tecnologías de energía undimotriz, esto se ve reflejado en la lista de los dispositivos desarrollados la cual cuenta con 256 compañías desarrolladoras [10]. Lo que demuestra el gran esfuerzo encaminado en el aprovechamiento del potencial de la energía undimotriz.

En este sentido, los diferentes tipos de convertidores de energía de las olas (WEC, por su sigla en inglés) propuestos se encuentran los WEC oscilantes, los cuales pueden ser usados ampliamente para el despliegue en altamar. Para este tipo de WEC, el movimiento oscilante se convierte en electricidad mediante una adecuada selección de un sistema de toma de fuerza (PTO, por sus siglas en inglés), el cual se encarga del proceso de conversión entre el WEC y el generador eléctrico tomando la energía mecánica del dispositivo y obteniendo finalmente energía eléctrica [11].

En cuanto a los PTO, se encuentran diferentes tipos que pueden ser clasificados en cinco grupos en los que se encuentran los sistemas de transmisión mecánica directa, turbina hidráulica y de aire, sistema de motor hidráulico y sistema de transmisión eléctrica directa. El motor hidráulico y los sistemas de transmisión mecánica directa son los sistemas de PTO más usados en los prototipos WEC oscilantes debido a la madurez de la tecnología y a su principio de funcionamiento [12].

Este trabajo tiene como objetivo principal seleccionar un dispositivo WEC y un sistema PTO para el aprovechamiento del recurso undimotriz en Colombia. Partiendo inicialmente de una revisión de la literatura en cuanto a los dispositivos WEC oscilantes y sistemas PTO más usados en esos WEC. Finalmente, se analiza el principio de funcionamiento tanto de los WEC como de los PTO, identificando sus ventajas y desventajas en su proceso de operación.

2. Metodología

La metodología de obtención de la información se divide en dos secciones que corresponden la búsqueda de investigaciones en cuanto a los dispositivos WEC tipo oscilante y a los PTO. En este sentido a continuación se presenta la metodología de búsqueda de la información.

2.1. Dispositivos undimotriz tipo oscilante

Con el uso de la base de datos SCOPUS, se realizó la revisión sistemática de la literatura, filtrando en principio ingresando las palabras "Wave Energy Converter", esta búsqueda inicial arrojó como resultado 5,212 resultados de trabajos sobre el tema. En segunda instancia, se ingresó al apartado keywords seleccionando palabras claves que son de interés en la revisión a realizas, así entonces, estas son las palabras clave: Wave energy, Wave energy conversión, Wave power, Buoys.

Debido a que el algoritmo de búsqueda de SCOPUS varía a medida que se filtra la información y hasta este punto contiene el conector "AND" para las palabras clave, se considera que el algoritmo restringe más de lo necesario la búsqueda, por esta razón, se modificó por el conector "OR" para garantizar una búsqueda más amplia sin desviarse del tema de investigación arrojando como resultado 43,586 trabajos del tema en cuestión.

Se refina la búsqueda en el tipo de documentos y área de interés, en este caso, se consideraron documentos tales como "article", "reviews" "conference papers" y "conference reviews" y áreas como "engineering", "energy" y "environmental science". Además, se excluyen de la búsqueda temas que no son relevantes en la revisión y que amplían la cantidad de resultados arrojados por el algoritmo, se utiliza el comando "AND NOT" a las palabras (wells, well, turbine, turbines, oscillating wáter column, OWC, breakwater, pipelines, flooding, Graphene, Plasma). Finalmente se obtienen como resultado 11,523 documentos.

No obstante, hasta este punto, se obtienen como resultado gran cantidad de documentos de poco interés para la revisión en cuestión, por esta razón, se realiza un cambio

en las palabras principales en la búsqueda usando las expresiones “oscillating wave surge converter”, “OWSC”, “pendulus”, y “type flap wave energy converter”, buscando obtener mayor cantidad de estudios sobre los convertidores de energía undimotriz tipo oscilante. En este sentido, se obtienen como resultado de la búsqueda 84 documentos correspondientes a estudios de los últimos 10 años. El algoritmo final de búsqueda es el siguiente:

TITLE (“oscillating wave surge converter” OR “OWSC” OR “pendulus” OR “type flap wave energy converter” AND NOT (“wells” OR “well” OR “turbine” OR “turbines” OR “oscillating water column” OR “OWC” OR “biplane” OR “pipelines” OR “flooding” OR “graphene” OR “plasma”)) AND (LIMIT-TO (SUBJAREA, “ENGI”)OR LIMIT-TO (SUBJAREA, “ENER”) OR LIMIT-TO (SUBJAREA, “ENVI”)) AND (LIMIT-TO(DOCTYPE, “ar”) OR LIMIT-TO (DOCTYPE, “re”) OR LIMIT-TO (DOCTYPE, “cp”) OR LIMIT-TO (DOCTYPE, “cr”)) AND (LIMIT-TO (PUBYEAR, 2022) OR LIMIT-TO (PUBYEAR, 2021) OR LIMIT-TO (PUBYEAR, 2020) OR LIMIT-TO (PUBYEAR, 2019)OR LIMIT-TO (PUBYEAR, 2018) OR LIMIT-TO (PUBYEAR, 2017) OR LIMIT-TO (PUBYEAR, 2016) OR LIMIT-TO (PUBYEAR, 2015) OR LIMIT-TO (PUBYEAR, 2014) OR LIMIT-TO (PUBYEAR, 2013)).

En este sentido, la **Figura 3** muestra que los estudios acerca de dispositivos WEC tipo oscilante ha estado presente en el tiempo, mostrando su máximo pico en el año 2020 donde empieza a caer posiblemente debido a la crisis socio-económica mundial derivada de la pandemia ocasionada por el COVID-19 a inicios del 2020, lo cual causó alteración en el desarrollo normal de las actividades cotidianas.

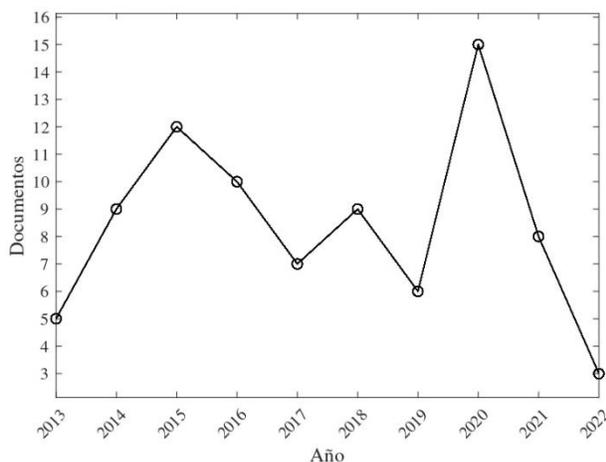


Figura 3. Documentos publicados por año.

La **Figura 4**, presenta la clasificación por tipo de documento, donde la mayoría de los resultados se presentan como artículos, seguido por documentos de conferencias y finalmente revisiones a la literatura.

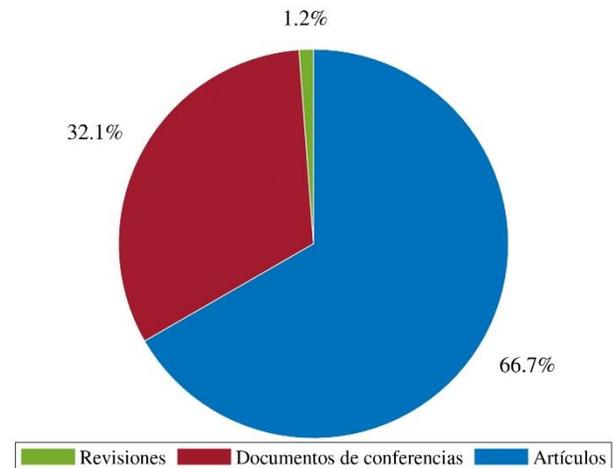


Figura 4. Clasificación de resultados por tipo de documento.

En la **Figura 5**, se identifican que los países o regiones de mayor número de publicaciones en el tema son el Reino Unido, Irlanda, China y Francia.

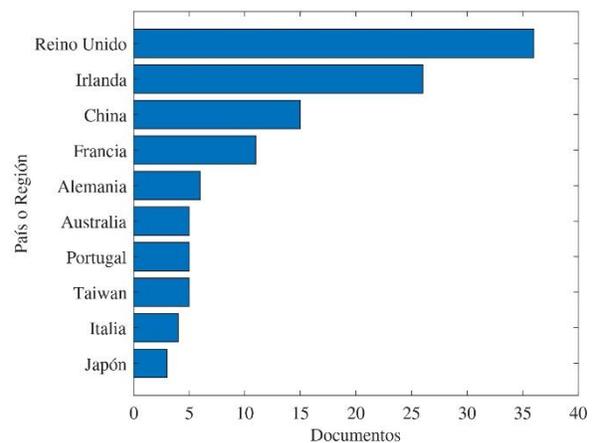


Figura 5. Documentos por país o región.

Además, se encuentra que, el autor con mayor número de publicaciones es el matemático Frédéric Días, profesor con vínculo en el Colegio Universitario de Dublín, Irlanda, al que se le atribuye estudios relevantes en cuanto a energía undimotriz y dispositivos WEC en específico [13], [14], (**Figura 6**).

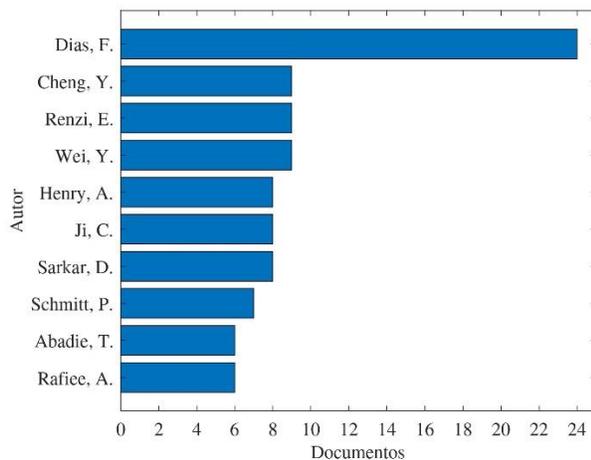


Figura 6. Documentos por autor.

Finalmente, de los resultados obtenidos en la búsqueda se toman los documentos más relevantes para el tema de interés. Reportando algunas ventajas, desventajas y principio de funcionamiento de los dispositivos en cuestión adquiriendo criterios que servirán de ayuda en la selección del dispositivo final.

2.2. Sistemas de toma de fuerza (PTO)

En cuanto a los sistemas de toma de fuerza (PTO) por sus siglas en inglés, se realizó la búsqueda inicial en la herramienta SCOPUS mediante la expresión “Power take off”, arrojando como resultado 2,170 documentos sobre el tema. Seguido a esto, en el apartado Keywords se seleccionaron algunas palabras que se refieren al tema de interés. A continuación, se muestran las palabras: Power takeoffs, Power take-off systems, Takeoff.

Esta búsqueda arrojó 12,022 resultados de trabajos en cuanto a los sistemas de toma de fuerza, siendo claro la importancia de filtrar aún más la información, se hace el uso de algunas palabras específicas y se excluyen las que no son de gran interés en la revisión, además se buscan trabajos de los últimos años y del área de estudio en específico. Finalmente, se obtuvo 182 resultados de búsqueda entre documentos de conferencias y artículos correspondientes a estudios de los últimos 5 años. El algoritmo final de búsqueda es el siguiente:

TITLE (“power take off” OR “Power Takeoffs” OR “Power Take-off Systems” OR “Takeoff” AND NOT (“wells” OR “well” OR “turbine” OR “turbines” OR “oscillating water column” OR “OWC” OR “biplane” OR “breakwater” OR “pipelines” OR “flooding” OR “graphene” OR “plasma” OR “CO2” OR “GPS” OR “vehicle” OR “drone” OR “aeronautical” OR “data” OR “boiling” OR “aircraft” OR “flights” OR “multi-body”

OR “stochastic” OR “airports” OR “osmosis” OR “mathematical” OR “electric” OR “cost” OR “draft” OR “nanogenerator” OR “floatplane” OR “airplane” OR “proton” OR “gyroscopic” OR “fertilizer” OR “biomass” OR “agricultural” OR “diesel” OR “fatigue” OR “engine” OR “robot” OR “oil” OR “basketball” OR “magnetolectric” OR “hysteresis”)) AND (LIMIT-TO (DOCTYPE, “ar”) OR LIMIT-TO (DOCTYPE, “cp”)) AND (LIMIT-TO (SUBJAREA, “ENGI”) OR LIMIT-TO (SUBJAREA, “ENER”) OR LIMIT-TO (SUBJAREA, “ENVI”)) AND (LIMIT-TO (PUBYEAR, 2023) OR LIMIT-TO (PUBYEAR, 2022) OR LIMIT-TO (PUBYEAR, 2021) OR LIMIT-TO (PUBYEAR, 2020) OR LIMIT-TO (PUBYEAR, 2019)

Las Figuras 7, 8, 9 y 10, muestran los trabajos publicados por año, por tipo de documento, por región o país y por autor, respectivamente.

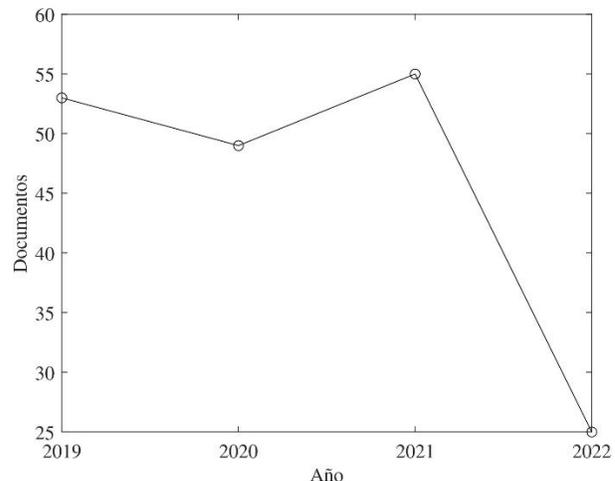


Figura 7. Documentos publicados por año.

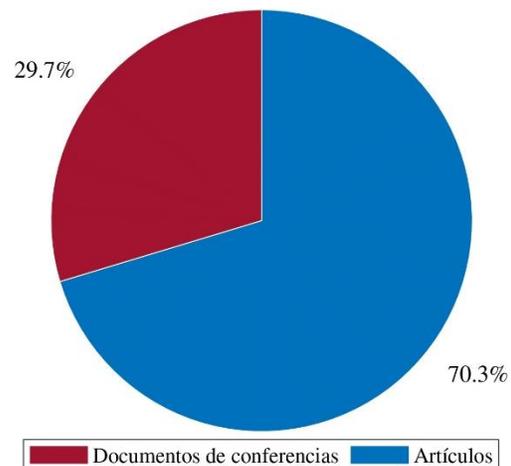


Figura 8. Clasificación de resultados por tipo de documento.

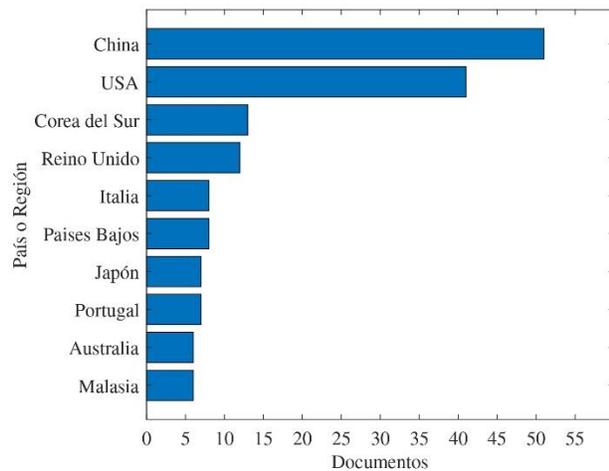


Figura 9. Documentos por país o región.

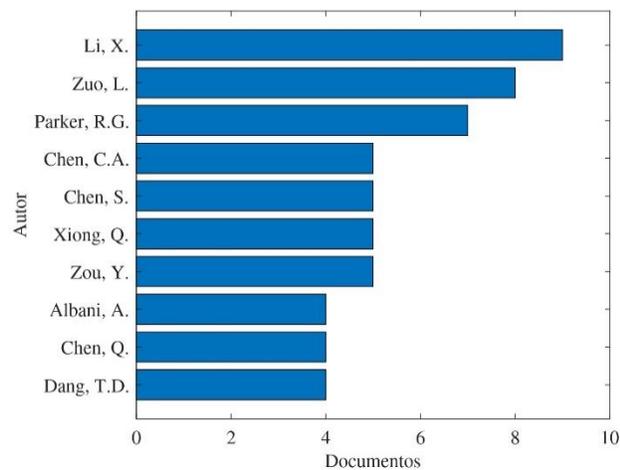


Figura 10. Documentos por autor.

Finalmente, de los resultados obtenidos en la búsqueda se toman algunos de los documentos considerados relevantes para la revisión de la literatura, mencionando a la vez las ventajas, desventajas y principio de funcionamiento de los diferentes sistemas, los cuales serán tenidos en cuenta en el momento de seleccionar el sistema PTO.

3. Resultados

3.1. Convertidores undimotriz tipo oscilante

Un convertidor de energía de las olas es un dispositivo que se encarga de convertir la energía de las olas en electricidad, o brindar energía para otros fines. Por lo general, un WEC consta de dos o tres etapas principales para convertir la energía de las olas en energía útil. En el proceso de conversión primario, la energía se puede convertir en energía mecánica, neumática o potencial, mientras que, en la conversión secundaria se utilizan

sistemas de toma de fuerza para convertir la energía atrapada por el WEC en energía mecánica útil y por último en la etapa de conversión terciaria, se utiliza un generador eléctrico para generar electricidad [15].

El mecanismo principal de conversión de los WEC tipo oscilante, es convertir el movimiento relativo entre un cuerpo oscilante y un cuerpo fijo, en electricidad. En este tipo de WEC, es posible adaptar sistemas de toma de fuerza de transmisión mecánica directa o hidráulica [16]. La ventaja principal de estos dispositivos radica en su alta eficiencia de extracción de la energía de las olas, debido a que la conversión de energía proviene de grandes movimientos de los cuerpos oscilantes que entran en resonancia con la ola incidente, es decir, la frecuencia natural de los dispositivos se acerca a la frecuencia de las olas. No obstante, la capacidad de los WEC oscilantes para mantener su integridad estructural puede presentar problemas debido a los grandes movimientos de los cuerpos oscilantes, especialmente cuando se enfrentan a las condiciones del mar [17].

Algunos ejemplos de WEC de cuerpo oscilante son WEC de elevación o CETO WEC [18], convertidores de sobretensión de onda oscilante o el Oyster WEC [19] y Pelamis WEC [20].

En la literatura, se han presentado clasificaciones de manera simple de las tecnologías de los WEC oscilantes en dos tipos principales, en los cuales están los dispositivos flotantes y los sumergidos [21]. Además, se encuentran algunos WEC oscilantes adaptados a estructuras fijas en la costa [22], [23].

3.1.1. WEC oscilantes en estructuras fijas

El dispositivo WEC nombrado Alettone, diseñado por Albert et al. [22], es un dispositivo adaptable a un rompeolas vertical, basado en un mecanismo de cuatro barras con movilidad en un plano vertical (Figura 11). En este sentido, el eslabón inferior es un elemento flotante que está en contacto directo con el oleaje y conectado al rompeolas por una articulación en el nivel medio del mar (punto O). Otro elemento más corto se acopla en la parte superior de la estructura de soporte. De esta manera, debido al movimiento de las olas, el elemento "c" oscila y acciona el elemento "a" a través del elemento "b". Finalmente, en el punto A se encuentra el PTO y el generador eléctrico [22].

La característica principal del Alettone, es que consta de un mecanismo cuatro barras que se encarga de transmitir el movimiento adquirido por la paleta que se encuentra en contacto con las olas hacia el PTO. A diferencia del dispositivo Wave Clapper (Figura 12), el cual consta de

una armadura similar a un péndulo y consta de un flotador fijo a esta armadura. El dispositivo es posible instalar en estructuras ya existentes en tierra y cerca de la costa. Su sistema de PTO incluye un cilindro hidráulico el cual se encuentra fijo en una estructura cerca a la orilla junto con el generador [22].

Además de su diferencia estructural, ambos dispositivos difieren en su sistema PTO, en los cuales para Alettone el PTO es un sistema mecánico directo y en Wave Clapper es un sistema hidráulico. Sin embargo, su principio de funcionamiento es similar en cuanto a la extracción de la energía de las olas.

En cuanto al dispositivo Alettone, se considera una ventaja su proceso de fabricación, debido a que el mecanismo de cuatro barras es simple, no requiere de gran precisión y los componentes como los embragues unidireccionales y generador eléctrico se encuentran listos para usar. En este sentido, se encuentra que, los sistemas PTO de transmisión mecánica directa son la

mejor opción para este tipo de dispositivos debido a que, se evita totalmente el uso de fluidos en sistemas hidráulicos y sistemas de generadores que requieren imanes permanentes grandes y costosos que además deben ser protegidos del contacto con el agua del mar.

La instalación del WEC en un rompeolas vertical es relativamente simple, siendo necesario únicamente realizar conexiones mecánicas en la estructura que soporta el dispositivo y la conexión del generador eléctrico sin necesidad de sistemas de tuberías hidráulicas o de aire.

Sin embargo, a pesar de que el tipo de mecanismo del Alettone es relativamente sencillo, el comportamiento dinámico del dispositivo es bastante complejo ya que este depende de variedad de interacciones entre sistemas independientes no lineales, es decir, el mecanismo cuatro barras, las fuerzas tanto hidrodinámicas como hidrostáticas que se presentan sobre la paleta o balancín flotante y la transmisión de potencia.

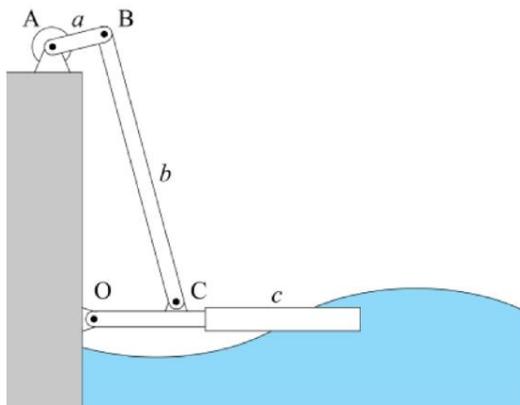


Figura 11. Dispositivo WEC Alettone. Fuente: adaptado de [22].

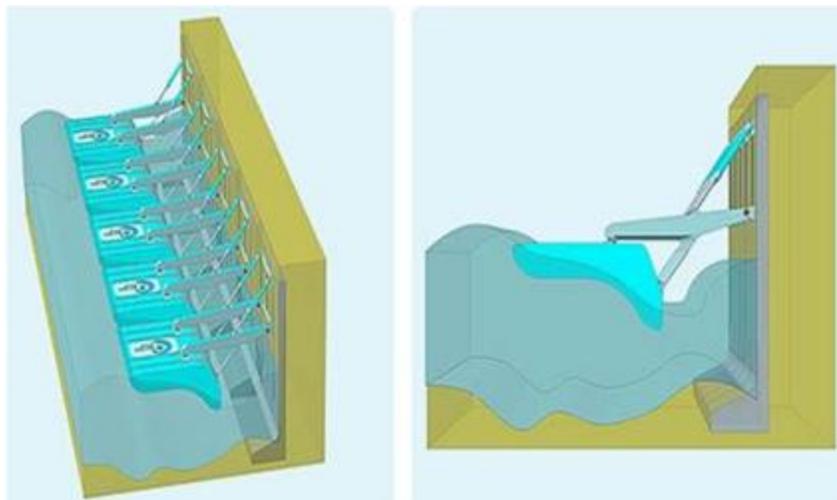
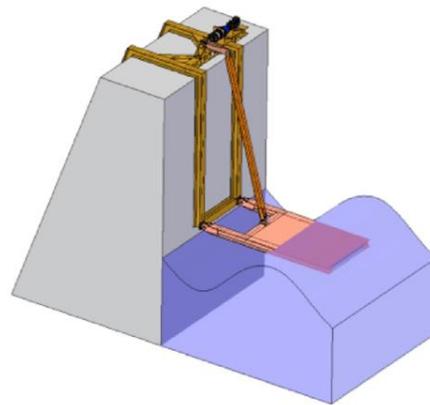


Figura 12. Dispositivo WEC Wave Clapper. Fuente: adaptado de [24].

Además, el dispositivo no cuenta con un sistema de fácil adaptación a cambios significativos aleatorios en el movimiento de las olas [22].

En la misma línea, Zhao et al. [23], estudiaron un dispositivo WEC absorbedor puntual (recoge la energía en todas las direcciones a través de sus movimientos) que tiene como característica que es posible adaptarse a una estructura fija como un rompeolas, además, el dispositivo cuenta con un mecanismo similar al Wave Clapper ya que consta de un cuerpo flotante adaptado a una estructura tipo péndulo (Figura 13). Estudio que se asemeja el desarrollo del dispositivo WEC Wave Star que cuenta con el mismo principio de funcionamiento generando energía mientras está acoplado a una estructura fija [25].

Los dispositivos Wave Clapper y el de tipo absorbedor al no contar con el mecanismo cuatro barras sino con un sistema de adaptación más sencillo al rompeolas vertical cuenta con beneficios evitando las complejidades del comportamiento hidrodinámico del WEC. No obstante, estos dispositivos presentan sistemas PTO hidráulicos que, aunque son uno de los mejores para estos WEC, podrían presentar mayores desventajas en cuanto al mantenimiento y costos en comparación a estos dispositivos con sistemas PTO de transmisión mecánica directa [23].

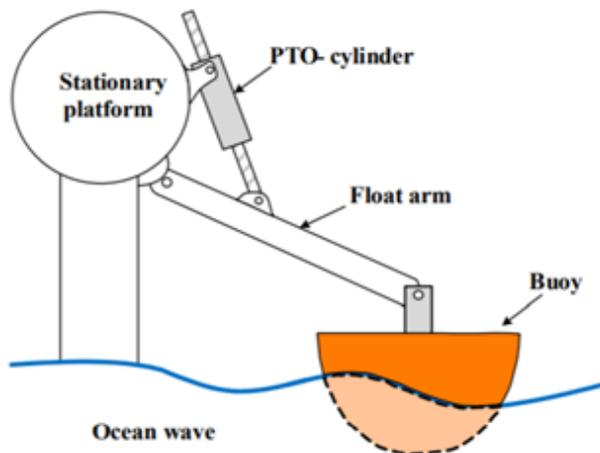


Figura 13. Dispositivo WEC absorbedor puntual.

Fuente: adaptado de [23].

El desarrollo de estos WEC acoplados a rompeolas verticales está soportado por investigaciones como la de Vicinanza et al. [26], donde se considera que, la combinación de WEC y rompeolas representa la respuesta a la ingeniería costera a los problemas sobre la importancia de invertir en fuentes de energía alternativas

a las tradicionales, creando una alternativa inteligente y a su vez, un camino de innovación. Los autores en su estudio presentaron una revisión de rompeolas para la generación de energía undimotriz. Lograron determinar que, centrándose en el sector de la energía undimotriz, estas tecnologías de los WEC integradas en los rompeolas representan un beneficio inesperado teniendo en cuenta los bajos costos comparado con la construcción de rompeolas tradicionales, así como el fácil acceso para la construcción y mantenimiento del dispositivo.

Por su parte, Cascajo et al. [27], evaluaron la viabilidad para la instalación de WEC en un puerto mediterráneo español. El objetivo final fue evaluar la posibilidad de construir una nueva infraestructura que combine un rompeolas y un WEC capaz de suministrar energía al puerto comercial de Valencia. Se realizó además una revisión de los tipos de WEC existentes con el fin de elegir la tecnología más adecuada para su instalación en un entorno portuario. Los autores discuten las principales ventajas y problemas de la integración del WEC en los rompeolas de los puertos. Los problemas, son en particular con respecto a la presión de levantamiento que actúa debajo de la base horizontal, la cual es de suma importancia para el análisis de estabilidad de la estructura del rompeolas para conversión de energía [27].

3.1.2. WEC oscilantes flotantes

El funcionamiento de estos dispositivos WEC se basa en uno o más cuerpos flotantes que adquieren su movimiento de la energía de las olas. El movimiento oscilatorio se puede presentar en dirección horizontal, vertical o una combinación de ellos. El movimiento del dispositivo puede ser impulsado por un movimiento absoluto entre el cuerpo flotante y una referencia fija externa o sobre dos o más cuerpos.

Tao et al. [28], presentaron un WEC absorbedor puntual considerado tipo oscilante que utiliza un cilindro como parte principal del convertidor (Figura 14). Este WEC integrado a una plataforma flotante se mueve de manera vertical transmitiendo el movimiento al sistema PTO encargado de convertir este movimiento recíproco en un movimiento con un solo sentido de giro para ser acoplado a un generador eléctrico.

Al igual que en WECs como el Alettone, Wave Clapper y el de tipo absorbedor puntual, en este dispositivo es posible usar sistema PTO con transmisión mecánica directa con un sistema de doble cremallera y embragues unidireccionales [29].

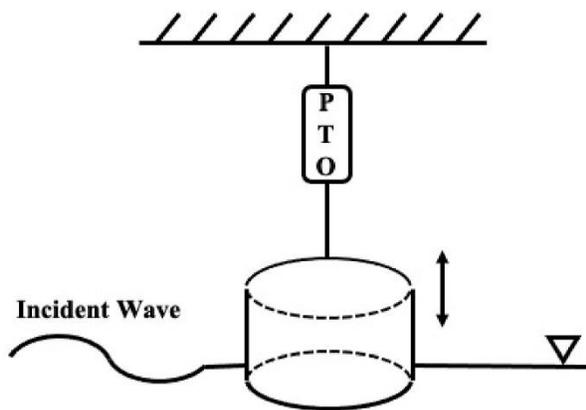


Figura 14. Absorbedor puntual flotante. Fuente: adaptado de [28].

Similar a esto, Babajani et al. [30], presentaron un estudio de un WEC que consta de un cilindro flotante o boya unido a un pistón, este dispositivo utiliza el movimiento periódico de las olas para bombear el agua del mar a una altura más alta del nivel del mar con la finalidad de almacenar esta agua en estanques y generar electricidad con el uso de turbinas hidráulicas de baja demanda. En este WEC, el cilindro flotante es empujado hacia arriba por la fuerza ejercida por las olas del mar. Posterior esto, las boyas se mueven hacia abajo debido a que su peso supera fuerzas como la de fricción de la pared y este movimiento oscilante junto con el pistón acoplado al WEC hace posible el bombeo de agua y la generación mediante otros dispositivos como turbinas. En la misma línea, Veerabhadrapa et al. [31], presentaron el dispositivo AquaBouy, en el cual, el agua bombeada se dirige hacia un sistema conformado por una turbina Pelton encargada de impulsar el generador eléctrico.

En este sentido, es claro que, además de encontrar dispositivos WEC que cuentan con algún sistema de toma de fuerza para generar energía de manera directa, también se encuentran dispositivos que, aunque son indispensables para su sistema de generación en cuestión, no es el dispositivo principal con el cual se genera, siendo el WEC en este caso el encargado de brindarle energía potencial al agua de mar, para finalmente hacerla pasar por las turbinas hidráulicas desarrolladas con anterioridad y lograr generar energía en el momento que sea necesaria. Una de las ventajas de estos sistemas que pueden ser llamados híbridos es que disminuyen los problemas en cuanto a almacenamiento de energía. Sin embargo, debido a que, los sistemas de generación que cuentan con turbinas hidráulicas como la Pelton, requieren de construcción de obras civiles para captar el fluido buscando llevarlo a grandes alturas y sistemas de tuberías [32]. Estos montajes pueden ser más complejos

y aumentan los costos del sistema en general, además requieren de mayor mantenimiento y conocimientos técnicos en comparación con los sistemas de generación con el dispositivo WEC únicamente.

En consonancia con lo anterior, se encuentra que, los sistemas híbridos de dispositivos WEC y turbinas hidráulicas, a pesar de poder resolver problemas en cuanto al almacenamiento de energía, requieren de grandes construcciones y son más complejos que los sistemas de generación con dispositivos WEC únicamente. En este sentido, de no ser necesario, es posible buscar otras alternativas diferentes a los sistemas híbridos ya mencionados.

Es posible encontrar en la literatura otros tipos de WEC oscilatorios flotantes diferentes a los cilindros con movimiento en el eje vertical o sistemas flotantes anclados. En este sentido, Thomson et al. [33], presentaron un análisis del dispositivo Pelamis, el cual consta de múltiples segmentos de cuerpos flotantes en forma de serpiente, los diferentes segmentos de sección cilíndrica son unidas por juntas articuladas (Figura 15) en la que se aloja el sistema PTO hidráulico. El dispositivo analizado tiene 120 m de largo, 3.5 m de diámetro, potencia nominal de 750 kW y un peso de 700 toneladas.



Figura 15. Prototipo Pelamis. Fuente: adaptado de [31].

Además, se han realizado análisis sobre el uso del WEC Pelamis para un sistema híbrido con energía solar o eólica, mostrando gran potencial debido a la alta densidad de potencia de la energía undimotriz [34].

Estos dispositivos como el Pelamis flotan en el mar utilizando las olas de la superficie. El sistema PTO y el generador deben estar alojados en los mismos dispositivos.

3.1.3. WEC oscilantes sumergidos

Finalmente, se encuentran dispositivos WEC oscilantes que se encuentran sumergidos completa o parcialmente según su principio de funcionamiento.

Por su parte, Gonzales et al. [35], presentan el dispositivo Archimedes Wave Swing el cual utiliza la diferencia de presión entre el dispositivo y las olas. Este WEC consta de un cilindro en la parte superior que es móvil y lleno de aire. Cuando por el WEC pasa una cresta o un valle de la ola, el dispositivo se mueve hacia abajo o hacia arriba respectivamente, generando de esta manera el movimiento oscilatorio y por medio de un sistema PTO interno se lleva a cabo la generación de energía. Como se puede ver en la Figura 16, este WEC se encuentra sumergido completamente, además el dispositivo se debe anclar en el fondo del mar para mantenerse en la posición deseada para su funcionamiento.

Dias et al. [36], desarrollaron un WEC llamado Oyster en forma de paleta sumergido y articulado en el lecho marino, en el cual el movimiento oscilante acciona un conjunto de cilindros hidráulicos encargados de bombear fluido a alta presión a través de tuberías. Este movimiento del fluido se convierte en energía eléctrica con el uso de una turbina Pelton. Estos WEC articulados con bisagras en la parte inferior han sido diseñados para instalarse en zonas cercanas a la costa, en profundidades alrededor de entre 10 y 5 metros (Figura 17).



Figura 16. Archimedes Wave Swing. Fuente: adaptado de [31].

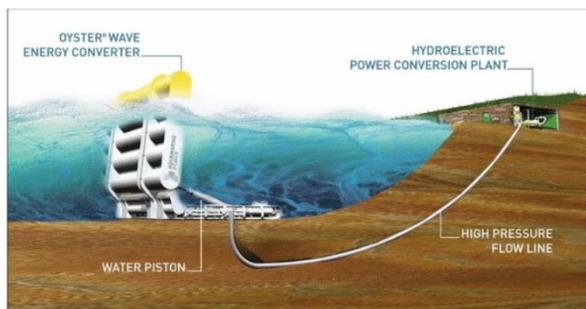


Figura 17. Oyster WEC. Fuente: adaptado de [36].

En este sentido, otros autores han realizado estudios en cuanto a los WEC oscilantes sumergidos tipo paleta articulados en la parte inferior (OWSC, por sus siglas en inglés), desarrollando trabajos referentes a experimentación a escala y simulación de los dispositivos. Además, reportando metodologías para llevar a cabo los análisis de estos dispositivos de carácter experimental en canales de olas o en simulación fluido-dinámica con software de análisis computacional.

La Tabla 1, muestra una descripción de algunos estudios publicados sobre los OWSC. De la cual se puede notar la gran variedad de estudios acerca de estos dispositivos, los cuales aportan información sobre diferentes metodologías para el estudio de los OWSC en cuanto a la simulación numérica y a los parámetros y restricciones a tener en cuenta en la experimentación en canales de olas de los dispositivos. Así como estudios acerca de la geometría de la paleta, donde se concluye que, al tener geometrías de la paleta diferentes (Figura 18), el rendimiento del dispositivo o no se ve afectado en el caso de usar un solo OWSC [37], es decir, la potencia máxima es aproximadamente la misma cuando se tiene una aleta rectangular y cuando es una aleta en forma de cuña.

A pesar de que el OWSC puede ser una buena alternativa para el aprovechamiento del recurso undimotriz, puede contar con algunas limitaciones en algunos casos, debido a que, la mayoría de los sistemas PTO usados en estos dispositivos son con pistones hidráulicos y sumergidos en el mar, lo cual presenta mayor grado de complejidad en el proceso de montaje y mantenimiento. También se ha propuesto sistemas de toma de fuerza mecánica directa con el uso de bandas y poleas para transmitir la potencia a la superficie en donde no hay contacto con el agua.

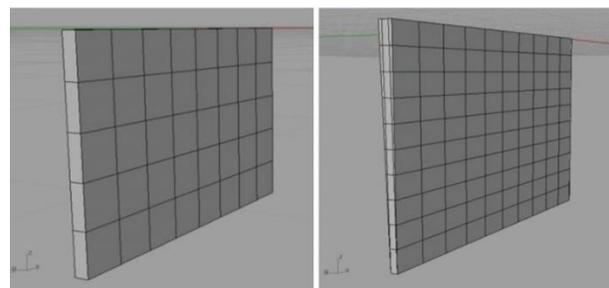


Figura 18. Geometrías estudiadas en un OWSC. Fuente: adaptado de [37].

Otros estudios desarrollados por Gioia et al. [38] y Cai et al. [39], han presentado dispositivos WEC en forma de péndulo, que podrían ser adaptados a los OWSC, pero en este caso articulados en la parte superior, evitando así tener el sistema PTO sumergido al tener la bisagra en la

parte superior de la paleta, como lo muestra Ogai et al. [40].

Así entonces, con este tipo de dispositivos, es posible tener un sistema de toma de fuerza mecánica directa que no es necesario sumergir en el agua. Otra ventaja de este

dispositivo, es que, en caso de querer acoplarlo a un rompeolas vertical, la fabricación de la estructura también es externa al agua y esto facilita su proceso de montaje y luego su mantenimiento.

Tabla 1. Estudios acerca de WEC oscilantes tipo paleta con bisagra inferior

Autor y año	Descripción
Zhang et al. 2021 [41]	En este trabajo fue estudiado el comportamiento de las olas y su interacción con un OWSC mediante el método de hidrodinámica de partículas suavizadas (SPH, por sus siglas en inglés), mostrando ser un solucionador preciso para predecir la rotación del WEC y las cargas de las olas en este al ser comparados con estudios experimentales.
Ashish et al. 2017 [42]	Este artículo presenta la simulación en 3D de la interacción entre un WEC oscilante con bisagra inferior y las olas, mediante herramientas que resuelven las ecuaciones de NavierStokes considerando los efectos importantes que afectan el dispositivo. Fueron llevado a cabo experimentos a escala de laboratorio que tenían como objetivo predecir, mediante la escala de Froude, la respuesta de los WEC a escala completa en el océano. Los resultados de la simulación mostraron una excelente concordancia con los datos experimentales publicados.
Brito et al. 2020 [43]	Se explican los principales comportamientos dinámicos de un OWSC, comparando en primer lugar los datos experimentales con resultados analíticos presentes en la literatura, observando gran discrepancia entre estos, causada por el comportamiento no lineal de la interacción entre las olas y el OWSC. Determinaron que, los resultados analíticos no son precisos para describir la hidrodinámica de OWSC observada en los datos experimentales.
Saeidtehrani 2021 [44]	Este artículo presenta una metodología para estudiar el comportamiento de un WEC tipo paleta utilizando simulación física y numérica híbrida. La metodología se desarrolló para un sistema compuesto por cinco paletas ubicadas en un rompeolas vertical, sin embargo, puede aplicarse a cualquier dispositivo WEC. Además, desarrollaron pruebas experimentales en un canal de olas para evaluar la respuesta dinámica del sistema de paletas bajo la acción de las olas. Encontraron que, el sistema de paletas ubicadas en el rompeolas vertical y la proximidad entre ellas provoca un cambio continuo en la hidrodinámica y las paletas experimentan una interacción significativa en cuanto a la salida de potencia.
Ning et al. 2017 [45]	En este artículo se presenta un estudio experimental de un WEC tipo paleta con bisagra inferior al cual es posible modificar la distribución de masa de la paleta, variando así el momento de inercia de esta y así mismo su frecuencia natural de oscilación. Encontraron que, el espectro de ola y la distribución de masa de la paleta tienen efectos significativos en el rendimiento del OWSC. En este sentido, se puede decir que el dispositivo tendrá mejor comportamiento hidrodinámico cuando su frecuencia natural se acerca a la frecuencia del espectro de las olas, es decir, entran en resonancia.
Jiang et al. 2018 [46]	Llevaron a cabo una investigación experimental sobre el rendimiento de OWSC con bisagra inferior configuraciones de sistemas PTO. En cuanto a la experimentación, recomiendan que, la relación entre el ancho del WEC y el ancho del canal de olas no debe exceder 0.25, esto para reducir en medida de lo posible el efecto de bloqueo que causan las olas al chocar con las paredes del canal.
Wei et al. 2013 [47]	En este estudio se llevó a cabo la simulación numérica de un OWSC mediante el software Ansys Fluent, se describe las características de la malla y la simulación, la cual se realizó usando el método de malla dinámica y fueron comparadas las respuestas del dispositivo a diferentes espectros de ola. Concluyeron que, el OWSC es posible simularlo con el método de volumen de fluido (VOF, por sus siglas en inglés) combinado con el método de malla dinámica y se puede emplear para simular diferentes arreglos y llegar a obtener un OWSC óptimo.
Sarkar y Dias 2015 [48]	Los autores realizan análisis del comportamiento de un dispositivo OWSC cuando se instala cerca de un rompeolas vertical. Encontraron que, el dispositivo al estar cerca del rompeolas puede mejorar significativamente su rendimiento en comparación a cuando se encuentra en el océano abierto, mostrando esto una gran ventaja en cuando a la instalación y mantenimiento del WEC, además, al encontrarse cerca a la costa se espera que el costo del sistema sea más bajo.

3.2. Sistemas de toma de fuerza

En un dispositivo WEC, el sistema PTO es el encargado de tomar la potencia entregada por el dispositivo y transmitirla hacia un generador eléctrico para de esta manera obtener electricidad. Los sistemas PTO pueden ser clasificados en sistemas mecánicos de toma directa, motor hidráulico, turbina hidráulica, turbina de aire y sistemas de transmisión eléctrica directa. Sin embargo, como se ha mencionado, los sistemas de más uso en los WEC oscilantes son los de toma mecánica directa y de motor hidráulico debido al avance tecnológico y su principio de funcionamiento. En este sentido, son presentados diversos sistemas PTO de toma mecánica directa e hidráulicos, su principio de funcionamiento, ventajas y desventajas.

3.2.1. Sistemas PTO de transmisión mecánica directa

Uno de los sistemas PTO más atractivo para los dispositivos WEC tipo oscilante son los de transmisión mecánica directa, los cuales transmiten el movimiento de las olas de manera mecánica al PTO y este se acopla a un generador eléctrico. En la literatura, se encuentran diferentes tipos de PTO de este tipo, en donde uno de los principales problemas a resolver es el de convertir el movimiento oscilatorio en dos sentidos de giro en un movimiento con un único sentido de giro para así aprovechar ambos movimientos del dispositivo para generar energía.

En consonancia con lo anterior, Porter et al. [29], proponen un mecanismo para maximizar la energía capturada a lo largo de un ciclo de olas, en el cual se incluyen embragues para activar o no un juego de piñones y cremallera según la dirección del movimiento del WEC para así garantizar la utilización de los dos movimientos y convertirlos en un solo sentido de giro. La Figura 19, muestra un esquema del diseño propuesto. Dos ejes de transmisión, cada uno contiene dos piñones conectados al rotor y estátor del generador. Se encuentra una cremallera que corre sobre cada uno de los piñones. El flotador del absorbedor puntual está conectado a la parte superior de cada bastidor. Las cremalleras a ambos lados del generador que operan dentro de la misma carrera del flotador están conectadas en lados opuestos de los piñones para que el movimiento de cada eje impulsor sea en la dirección apropiada (rotación contraria). Durante la carrera opuesta del flotador, un embrague o mecanismo de rueda libre empleado dentro de los piñones evita la rotación hacia atrás del eje de transmisión. La adición del segundo piñón y cremallera a cada lado del generador, colocado en el lado opuesto del piñón en comparación con el primer accionamiento,

permite que el generador continúe funcionando en la dirección requerida.

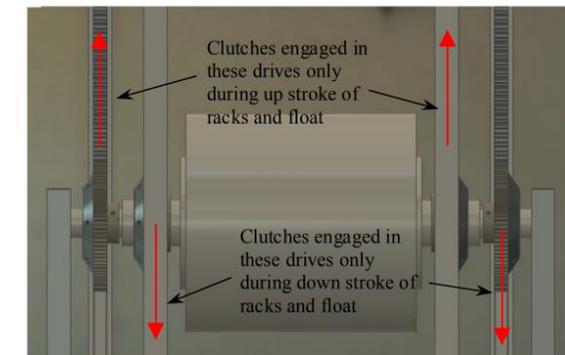
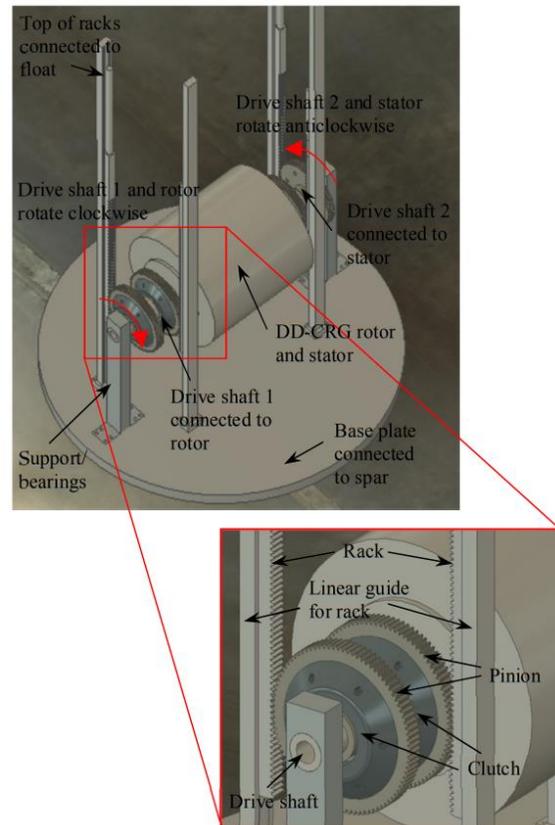


Figura 19. Sistema PTO. Descripción general de los componentes del sistema y las direcciones de rotación.

Fuente: [29].

En la misma línea, Albert et al. [22], en el diseño del Alettone, presentan el diseño de un mecanismo capaz de convertir el movimiento oscilatorio en un movimiento con único sentido de giro en el eje de salida hacia el generador (Figura 19). El movimiento oscilatorio ingresa por el brazo a, este, dependiendo del sentido de giro activa o no la transmisión del movimiento a uno de los dos piñones ubicados a cada lado del miembro de

entrada, cada uno de estos cuenta con un embrague unidireccional instalados de manera contraria para así garantizar el aprovechamiento de ambos movimientos transmitiéndolos como un movimiento con único sentido de giro para ser acoplado finalmente a un generador eléctrico (Figura 20).

Similar a esto, Wu et al. [49], presentan un sistema PTO que cuenta con dos embragues unidireccionales buscando aprovechar ambos sentidos de giro del eje en la salida del dispositivo (Figura 21).

Así mismo, Liang et al. [50], proponen un sistema PTO en el que los componentes principales son dos cremalleras, dos piñones, dos embragues unidireccionales y un eje de salida. En este mecanismo, dos piñones están montados en el eje de salida utilizando los embragues o rodamientos unidireccionales, los cuales permiten la transmisión de movimiento desde una sola dirección. Así, mediante el enganche o desenganche del embrague unidireccional, como máximo uno de los piñones se engrana con el eje de salida en cualquier momento, sin importar en qué dirección se esté moviendo

la cremallera. Finalmente, como resultado se tiene que, el eje de salida y el generador giran en una única dirección proveniente de un movimiento bidireccional (Figura 22).

Otros autores [51], [52], también han presentado sistemas PTO de toma mecánica directa que constan de cajas de engranajes con embragues o rodamientos unidireccionales, garantizando tomar un movimiento reciproco u oscilatorio y convertirlo finalmente en un movimiento de rotación en un único sentido de giro el cual es posible acoplar directamente al generador eléctrico.

A su vez, Xiaofan et al. [53], presentan el diseño de un sistema PTO que consta de un mecanismo de transmisión mecánica mediante un conjunto de engranajes cónicos equipado con rodamientos unidireccionales garantizando convertir el movimiento oscilatorio bidireccional del WEC en rotación unidireccional (Figura 23), este tipo de mecanismo ha sido denominado rectificador de movimiento mecánico (MMR, por sus siglas en inglés).

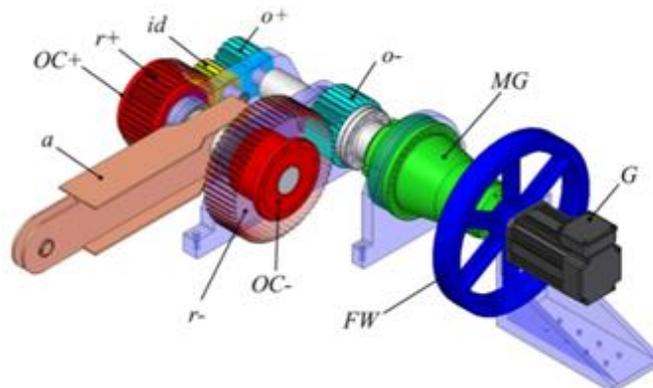


Figura 20. Sistema PTO del WEC Alettone. Fuente: [22].

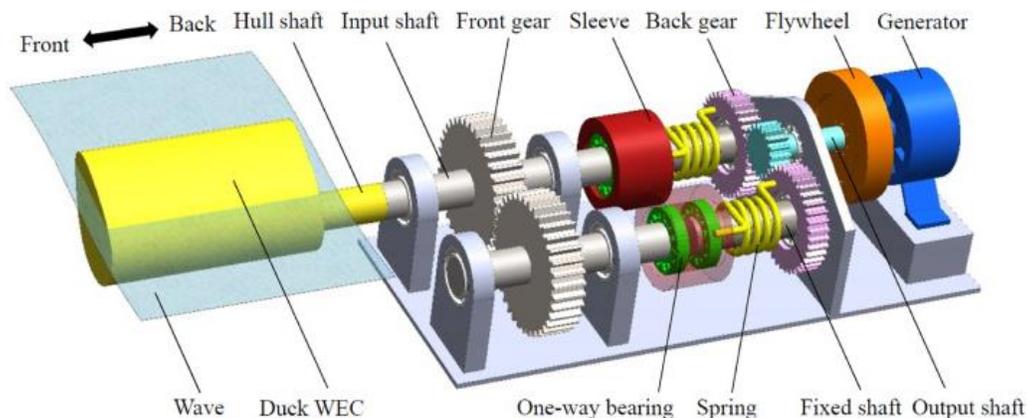


Figura 21. Sistema PTO con doble embrague unidireccional. Fuente: [49].

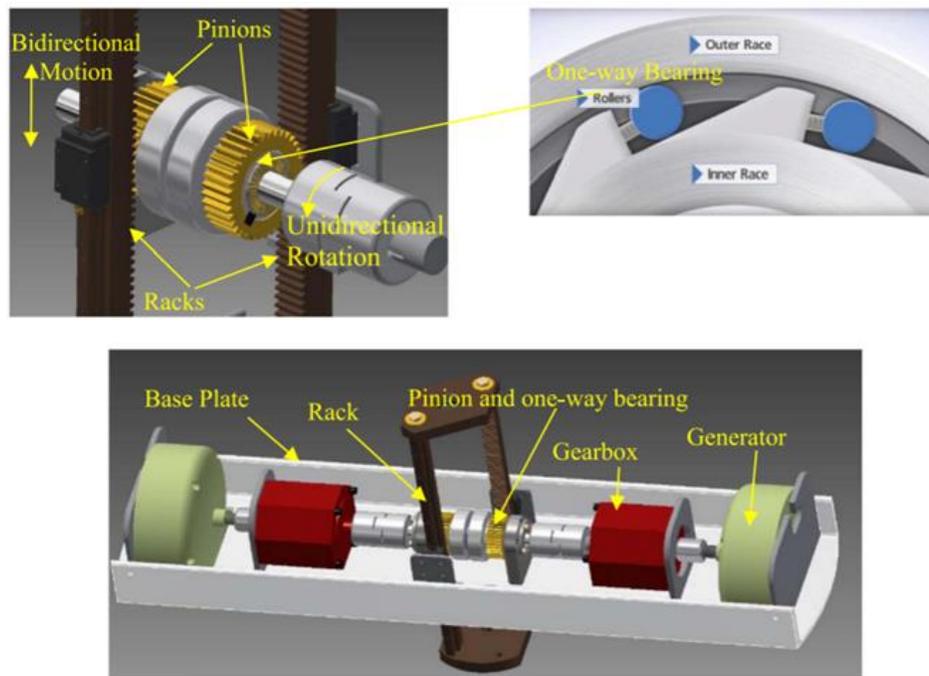


Figura 22. Sistema PTO con cremallera y embragues unidireccionales. Fuente: [50].

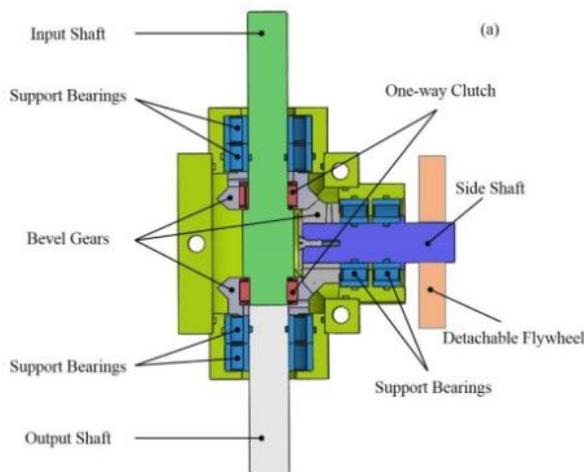


Figura 23. Detalle del PTO MMR. Fuente: [53].

Asimismo, Xiaofan et al. [54], caracterizaron un dispositivo undimotriz usando un sistema PTO con mecanismo MMR, garantizando de igual manera rectificar el movimiento bidireccional alternativo en rotación unidireccional (Figura 24).

Algunas ventajas que presentan los sistemas PTO de toma mecánica directa son que, el sistema de piñón-cremallera o de engranajes con embragues unidireccionales no son sistemas complejos de diseñar y

fabricar, no contienen sustancias contaminantes que se derramen al mar y no cuenta con partes móviles peligrosas. Además, si el dispositivo se instala cerca a la costa anclado a estructuras fijas como en un rompeolas vertical, es posible tener el sistema PTO por fuera del agua y al no estar sumergido se evitan complicaciones en los procesos de mantenimiento ya que se contaría con fácil acceso al sistema.

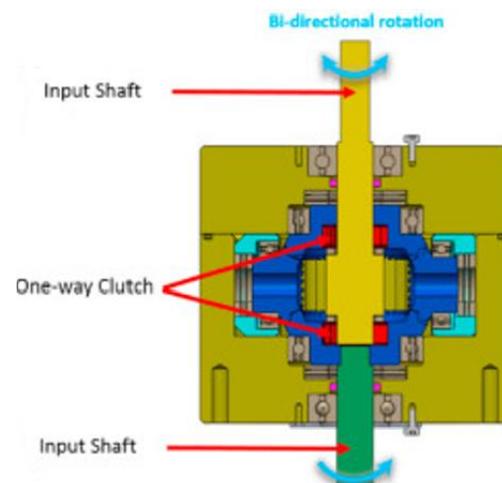


Figura 24. Dispositivo WEC con PTO MMR. Fuente: [54].

Además, debido a que se reduce en gran parte la fricción en comparación con los sistemas de motor hidráulico, los sistemas PTO de transmisión mecánica directa logra obtener más energía de las olas que los sistemas hidráulicos. Asimismo, presentan mayor rendimiento debido a que, en estos sistemas se presentan a lo sumo tres etapas de conversión de la energía tomada de las olas [12], obteniendo eficiencias en los sistemas de piñón-cremallera de hasta 97% [55].

A pesar de los estudios presente en la literatura acerca de estos mecanismos para sistemas PTO en donde convierten un movimiento oscilatorio (bidireccional) en movimiento giratorio en un solo sentido de giro mediante sistemas de engranajes acoplados a embragues o rodamientos unidireccionales, no ha sido posible encontrar dicho mecanismo comercialmente para ser utilizado en estas de aplicaciones como lo son los dispositivos WEC tipo oscilante, en este sentido, es evidente la importancia del diseño y desarrollo de estos sistemas PTO que son de gran utilidad en los dispositivos WEC oscilantes para contribuir en el avance acerca del uso de la energía undimotriz en el mundo y específicamente en Colombia.

3.2.2. Sistemas PTO de motor hidráulico

Los sistemas PTO de motor hidráulico son sistemas que están compuestos por un cilindro hidráulico, un motor hidráulico, un acumulador y un generador. Las olas del mar impulsan el cilindro hidráulico aumentando la presión de un fluido de trabajo (por lo general aceite hidráulico), convirtiendo el movimiento del WEC ya sea de traslación o rotación en energía hidráulica, la cual hace funcionar el motor hidráulico [12]. Finalmente, el motor hidráulico mueve el generador eléctrico para generar energía [56]. En la Figura 25, se presenta el esquema del proceso de conversión de la energía en dispositivos WEC con PTO de motor hidráulico [57]. En la Figura 26, se presenta el Esquema de sistema PTO con motor hidráulico [12].

En este sentido, se han propuesto dispositivos WEC con sistemas PTO hidráulicos, como el presentado por Zhang et al. [58], el cual es un WEC en forma de balsa de dos cuerpos los cuales están sujetos por bisagras que permiten que haya movimiento relativo entre ellos. El sistema PTO se encuentra dentro de cada uno de los cuerpos y está conformado en principio por cilindros hidráulicos encargados de tomar el movimiento del WEC y aumentar la presión de un fluido (Figura 27).

Asimismo, Shuangwu et al. [59], presentaron un dispositivo WEC en forma de boya oscilante de dos cuerpos que cuenta con un cilindro hidráulico externo a

la boya y es el encargado de convertir el movimiento del WEC en energía hidráulica (Figura 28).

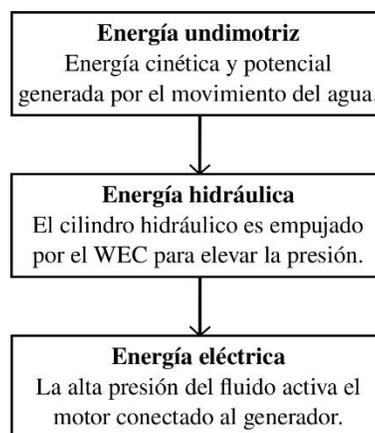


Figura 25. Proceso de conversión de energía en sistema PTO de motor hidráulico. Fuente: adaptado de [57].

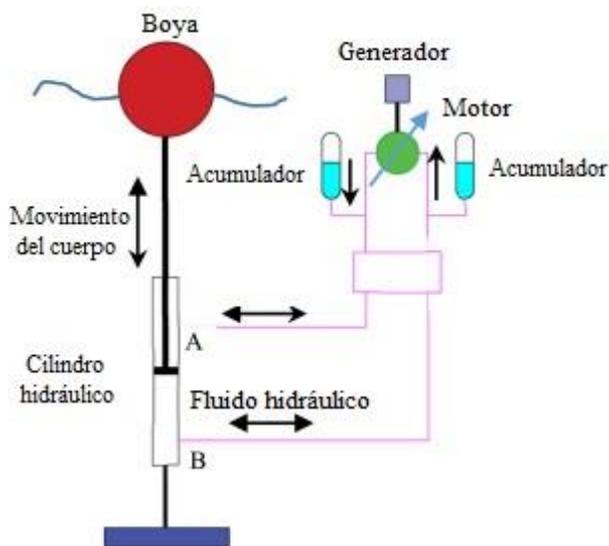


Figura 26. Esquema de sistema PTO con motor hidráulico. Fuente: adaptado de [12].

Gran cantidad de los dispositivos OWSC se relacionan en que su sistema PTO está conformado por un cilindro hidráulico, como en el caso del WEC Oyster, sin embargo, es posible adaptar sistemas PTO de transmisión mecánica directa a estos dispositivos [46] (Figura 29), siendo evidente la posibilidad de utilizar alguno de estos dos sistemas según el contexto y los requerimientos de diseño de los dispositivos WEC.

Los sistemas PTO de motor hidráulico, a pesar de ser considerados de los más importantes en los dispositivos WEC oscilantes, cuentan con algunas desventajas en su proceso de operación y mantenimiento.

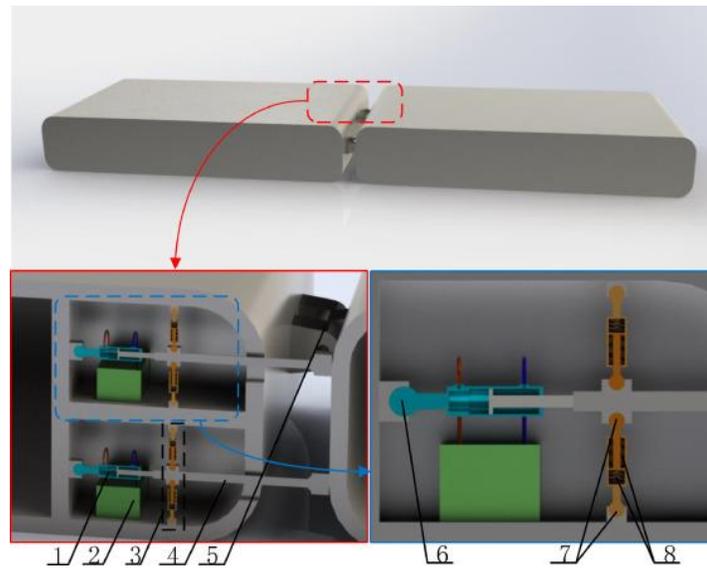


Figura 27. WEC con sistema PTO de cilindros hidráulicos. 1. Cilindro hidráulico, 2. Sistema de conversión, 3. Mecanismo de rigidez lineal del WEC, 4. Biela, 5. Bisagra, 6. Articulación del PTO, 7. Articulación mecanismo de rigidez lineal, 8. Resorte. Fuente: adaptado de [58].

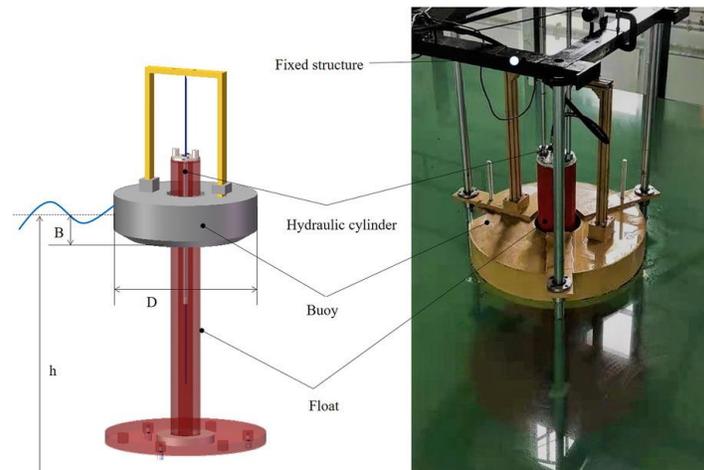


Figura 28. Boya con sistema PTO hidráulico. Fuente: adaptado de [59].



Figura 29. OWSC con PTO de transmisión mecánica. Fuente: adaptado de [46].

En los sistemas hidráulicos se pueden presentar fugas de aceite hidráulico debido a la compresión y descompresión del fluido, presentando de esta manera impactos negativos al medio ambiente marino [60]. Por otra parte, los sistemas hidráulicos cuentan con gran cantidad de piezas móviles, lo que convierte estos sistemas en estructuras complejas que requieren un habitual mantenimiento en el entorno del mar, lo que requiere de gran tiempo, puede ser peligroso y es costoso [12].

4. Energía undimotriz en Colombia

Colombia, al ser el único país de América del Sur en contar con costa en los océanos Atlántico y Pacífico, en el cual, al rededor del 50% del territorio nacional corresponde a zonas marítimas; es uno de los países en el que se encuentra gran potencial en cuanto al desarrollo sistemas o proyectos que involucran el aprovechamiento de estos recursos [61].

En la actualidad, es evidente la importancia de una transición energética en la cual se le dé prioridad a incrementar la presencia de FNCER en la canasta energética colombiana. En este sentido, Colombia está haciendo esfuerzos por diversificar su matriz energética, razón por la cual el Ministerio de Minas y Energía expidió el decreto 570 de 2018 [62], mediante el cual se establecen lineamientos para la diversificación de la matriz energética mediante la implementación de proyectos de generación de energía proveniente de fuentes renovables.

En Colombia, la generación de energía proveniente de fuentes renovables ha ganado gran interés a través del tiempo. En este sentido, la energía undimotriz al ser un recurso con gran disponibilidad y pocos impactos ambientales, puede ser aprovechado para cumplir con una parte de la demanda energética del país [63].

En cuanto al potencial de energía undimotriz, autores como Appendini et al. [64], evaluaron el potencial de la energía de las olas en el mar Caribe mediante una predicción retrospectiva de las olas de 30 años, enfocándose en el Golfo de México y algunos lugares del mar Caribe ubicados en Colombia. Encontraron que, estas regiones cuentan con buen potencial (8-14 kW/m) para la instalación de dispositivos WEC. Además, presentan gradientes espaciales que pueden ser tenidos en cuenta para la ubicación de los dispositivos.

Asimismo, Pérez-Zapata [65], realiza una estimación del potencial energético undimotriz en las costas del departamento del Atlántico, encontrando potencia por metro de frente de ola entre 4.52 y 23.88 kW/m; en

promedio, se encontró que, la densidad de potencia es de 12.3 kW/m y considerando que la costa del departamento del Atlántico cuenta con una longitud de 90 km, se estima una potencia de 1107 MW.

Por su parte, Perdomo et al. [66], realizan una estimación del potencial undimotriz en el pacífico colombiano, obteniendo potencial de hasta 14 kW en Bahía Solano y hasta 8 kW en Buenaventura y Tumaco. En la misma línea, Portilla et al. [67], realizaron un estudio del espectro de ola en el océano pacífico colombiano, las cuales se pueden apreciar en la **Tabla 2**. Identificaron seis tipos de oleajes principales. El primero fluye hacia el noreste mientras que el segundo fluye hacia el sureste. Estas olas fueron halladas por fuera del área de estudio, en el Pacífico Sur y Norte respectivamente. El tercer sistema, igual que el primero, fluye hacia el noreste, pero en este caso con frecuencias más altas que el primero. El cuarto sistema de oleaje encontrado fluye hacia el sur y es originado en el chorro de viento de Panamá. Por su parte, el quinto sistema de oleaje reportado fluye hacia el este, mostrando magnitudes altas en meses específicos (octubre – noviembre). Por último, el sexto sistema de oleaje representa toda una amplia gama de condiciones de viento en el mar que cubre una amplia gama de direcciones.

Otros autores como Romero et al. [68], diseñaron un WEC para las condiciones del Océano Pacífico colombiano con un sistema PTO de toma lineal directa mediante simulación numérica, encontrando que, este dispositivo se considera como una alternativa de gran interés para las poblaciones que se encuentran en las Zonas No Interconectadas (ZNI) de Colombia y a la vez cerca a las costas, logrando generar en condiciones tanto de olas regulares como irregulares potencia de 1.17 y 0.5 kW, respectivamente.

Tabla 2. Espectro de ola en cuatro ubicaciones del océano pacífico en Colombia

Ubicación	Altura significativa	Periodo
Tumaco	1.01 m	6.86 s
Isla Gorgona	1.13 m	7.76 s
Buenaventura	0.96 m	8.21 s
Bahía Solano	1.17 m	10.61 s

Fuente: adaptado de [67].

La mayoría de los estudios acerca de la energía undimotriz en Colombia se han enfocado en caracterizar el recurso tomando mediciones en cuanto a la altura y periodo de las olas, y no en el diseño, optimización y

caracterización de los dispositivos. En este sentido, es pertinente la investigación y desarrollo de dispositivos WEC y sistemas PTO para la generación de energía con base en el recurso disponible en el país.

En este sentido, con base en la información presentada en cuanto a las ventajas, desventajas y principios de operación de los dispositivos WEC y los sistemas PTO, se definen criterios de selección que servirán como base para escoger un tipo de WEC y PTO para el contexto de Colombia. En la **Tabla 3**, se presentan los criterios de selección considerados y su descripción.

Tabla 3. Descripción de los criterios de selección

Criterio	Descripción
Costo general	Consideración cualitativa del costo general de los sistemas con base en la literatura.
Mantenimiento	Fácil acceso al dispositivo WEC y/o al sistema PTO para realizar mantenimiento requerido. Además, considera la dificultad del mantenimiento a realizar.
Impacto ambiental	Considera si se tienen impactos ambientales en cuanto al derrame de fluidos contaminantes al entorno.
Complejidades fluido estructurales	Estructuras que ocasionan complejidades en la interacción del fluido con la estructura del dispositivo en el proceso de generación.
Proceso de fabricación	Considera si el WEC o PTO requiere procesos complejos de fabricación.

En la **Tabla 4**, se presentan los tipos de WEC y PTO estudiados con los criterios de selección a los cuales se les asignan pesos de 1 a 5 considerándose un factor mayor impacto negativo o positivo, respectivamente para la selección del sistema, es decir, un criterio al cual se le asigna el (5), quiere decir que es un criterio que garantiza mayores ventajas para el ítem analizado en cuestión.

Los criterios de selección son elegidos considerando que, en el contexto de Colombia, el dispositivo WEC y el sistema PTO a utilizar se espera que cuente con bajo grado de complejidad para realizar mantenimiento el cual pueda ser efectuado por personas capacitadas pertenecientes a los lugares donde se instale el dispositivo, y en este sentido, que el sistema en general no cuente con grandes complejidades en la interacción entre el fluido y la estructura; que su proceso de fabricación pueda ser llevado a cabo en el país, evitando importaciones o servicios de empresas externas, lo cual aumentaría el costo del dispositivo y el sistema de toma de fuerza; se espera que el dispositivo ofrezca el menor impacto ambiental posible buscando evitar la afectación del entorno en el que se encuentra; y finalmente, al contar con sistemas de bajo costo es posible llevar a cabo la ejecución de proyectos de generación de energía a partir de las olas del mar mediante dispositivos WEC y su respectivo sistema PTO.

Se encuentra que, los WEC con mayores ventajas son el dispositivo en forma de péndulo y los dispositivos en estructuras fijas como rompeolas, sin embargo, estos últimos pueden presentar sistemas complejos como el mecanismo cuatro barras del WEC Alettone.

Tabla 4. Criterios de selección de dispositivo WEC y sistema PTO

	Sistema/ Dispositivo	Costo general					Mantenimiento					Impacto ambiental					Complejidades fluido estructurales					Proceso de fabricación					T
		1	2	3	4	5	1	2	3	4	5	1	2	3	4	5	1	2	3	4	5	1	2	3	4	5	
P T O	Hidráulico	1						2					2					2					2				9
	Mecánico directo				5					4					5					4					4		22
W E C	En estructuras fijas a la costa				4						5				4		1								4		18
	Flotantes			3				2					2							4					4		15
	Sumergidos	1					1					2					2					2					8
	Péndulo				4						5				5					4					4		22

En este sentido, es posible combinar estos dos tipos de WEC en uno solo considerando sus mayores ventajas, es decir, un dispositivo WEC tipo péndulo en una estructura fija a la cosa como lo es un rompeolas vertical con un sistema similar al OWSC, con la diferencia de ser articulado en la parte superior, siendo posible de esta manera obtener un sistema PTO de toma mecánica directa (mejor sistema según [Tabla 4](#)) acoplado directamente al eje donde articula el WEC.

En este sentido, en la [Figura 30](#), se presenta un diagrama que corresponde al diseño de concepto del dispositivo y sistema PTO seleccionado, siendo evidente el dispositivo similar al OWSC con bisagra superior, acoplado a una estructura fija a un rompeolas vertical y un sistema PTO de toma mecánica directa.

El diseño de concepto presentado en la [Figura 30](#), es acorde a los dispositivos similares a un péndulo (PeWEC), presentados en las [Figuras 31](#) y [32](#), en los cuales además de contar con el principio de funcionamiento similar a un péndulo, en uno de ellos la paleta se encuentra acoplada a un sistema PTO de toma mecánica directa y en el otro a un sistema de motos hidráulico.

En el proceso de diseño del dispositivo y el sistema PTO, se parte del WEC y el PTO seleccionado anteriormente. Es importante definir las variables de entrada según las condiciones en las que se encuentre el sistema, es decir, el espectro de ola a la que se enfrenta. Seguido a esto, identificar qué factores son importantes en el montaje del dispositivo y el sistema en general, (por ejemplo, la distancia del WEC al rompeolas, distancia del WEC sumergido en el mar, etc.). Es posible con estos factores plantear un diseño experimental mediante el cual se obtenga la configuración óptima del sistema que se reconoce por ser la que mayor potencia obtenga en el eje que articula el WEC; conociendo estos valores, se cuenta

con la información necesaria para el cálculo y diseño del mecanismo del sistema PTO para luego ser fabricado. Finalmente, cuando se cuente con el WEC y el PTO fabricados ya sea a escala real o de laboratorio, es posible realizar experimentación del dispositivo para realizar comparación entre los resultados obtenidos en la simulación fluido-dinámica y los experimentales. En este sentido, la [Figura 33](#), presenta un diagrama del proceso de diseño del sistema de generación con dispositivo WEC y PTO.

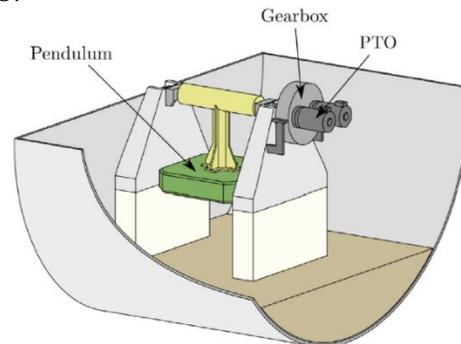


Figura 31. Dispositivo PeWEC. Fuente: [69].

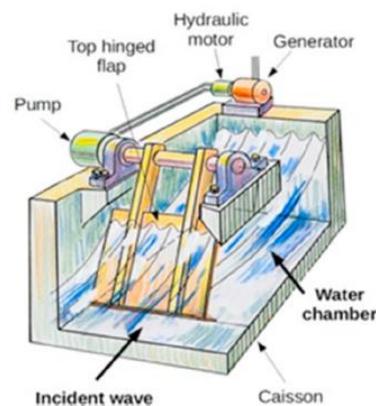


Figura 32. Dispositivo tipo paleta similar a un péndulo. Fuente: [70].

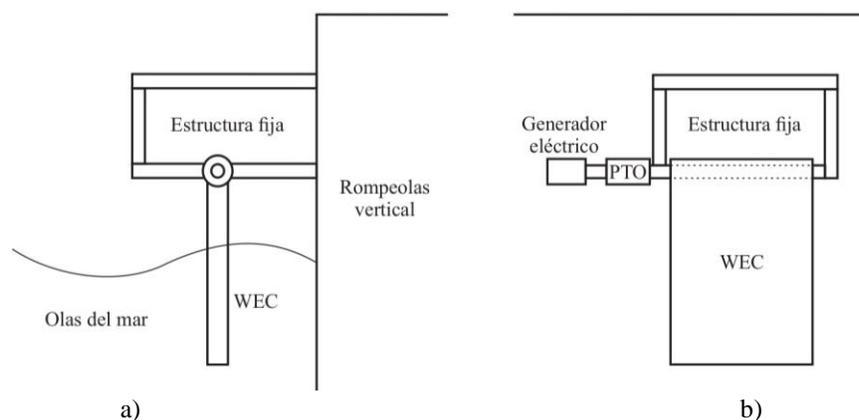


Figura 30. Diagrama conceptual del dispositivo WEC y sistema PTO seleccionado. a) vista lateral. b) vista frontal.

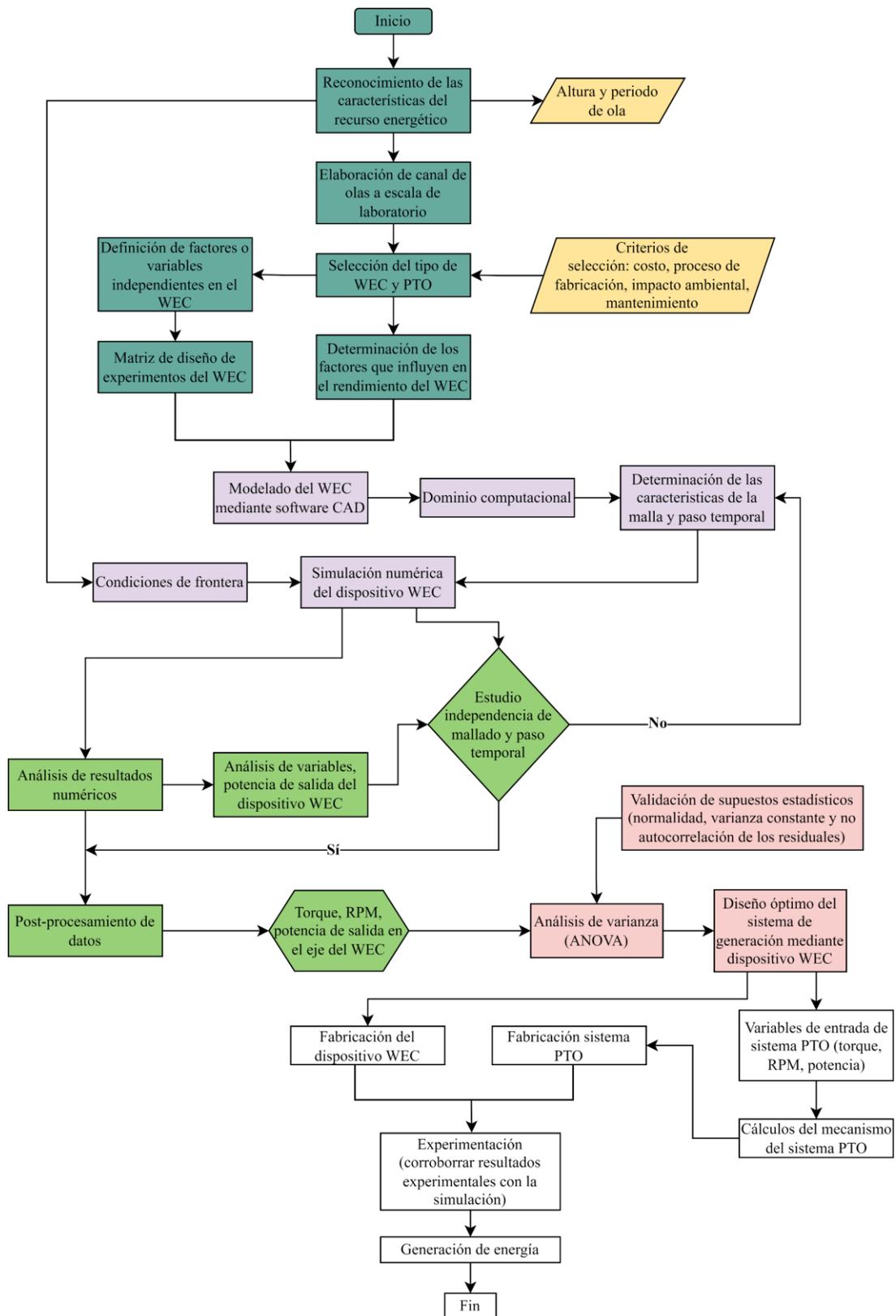


Figura 33. Proceso de diseño de dispositivo WEC y PTO.

5. Conclusiones

La energía undimotriz se presenta como una buena alternativa para generar energía proveniente de FNCER buscando de esta manera una transición energética que disminuya cada vez más la dependencia a los combustibles de origen fósil. En Colombia, no existe gran cantidad de investigaciones en cuanto al diseño de dispositivos WEC, debido a que la mayoría de los estudios se han enfocado en la caracterización del recurso undimotriz y no en sistemas de generación, encontrando en esto una gran oportunidad para la investigación y desarrollo de proyectos encaminados al diseño y fabricación de dispositivos WEC y sistemas PTO.

Los dispositivos WEC oscilantes se dividen en tres categorías: sumergidos, anclados a una estructura fija a la costa y flotantes. En el contexto de Colombia, se selecciona un dispositivo anclados a estructuras fijas debido a que estos presentan ventajas en cuanto a costo en general del sistema, proceso de mantenimiento, proceso de fabricación e impactos ambientales. No obstante, estos WEC requieren de gran planeación y en algunos casos construcciones de obras civiles como los rompeolas verticales.

Los sistemas PTO más utilizados en los dispositivos WEC oscilantes son los de motor hidráulico y de toma mecánica directa. Sin embargo, con los sistemas de motor hidráulico es posible presentar impactos negativos al medio ambiente debido a presencia de fugas del fluido de trabajo (aceite hidráulico), además son considerados sistemas más complejos y de mayor demanda de mantenimiento en comparación con los sistemas PTO de toma mecánica directa. En este sentido, se presenta como una buena alternativa los sistemas de dispositivos WEC fijos a la costa con sistema PTO de toma mecánica directa.

Financiación

Convocatoria No. 890 de 2020 de Minciencias, 2020 (Contrato No. 2022-0452) y Universidad de Antioquia (Estrategia de Sostenibilidad 2020-2021, ES84190067).

Contribuciones de los autores

J. P. Castaño-Serna: conceptualización, curación de datos, análisis formal, investigación, metodología, redacción – borrador original. E. Chica-Arrieta: validación, visualización, redacción – borrador original, redacción – revisión y edición.

Todos los autores han leído y aceptado la versión publicada del manuscrito.

Conflictos de interés

Los autores declaran no tener conflicto de intereses.

Declaración de la Junta de Revisión Institucional

No aplica.

Declaración de consentimiento informado

No aplica.

Referencias

[1] H. E. Murdock, D. Gibb, T. André, J. L. Sawin, A. Brown, L. Ranalder, U. Collier, C. Dent, B. Epp, C. Hareesh Kumar et al., “Renewables 2021-global status report,” 2021.

[2] “Data & Statistics - IEA.” [En línea]. Disponible en: <https://www.iea.org/data-and-statistics/data-browser?country=WORLD&fuel=EnergySupply&indicator=TESbySource>

[3] World Meteorological Organization, “Wmo greenhouse gas bulletin,” World Meteorological Organization: Geneva, Switzerland, 2021. [En línea]. Disponible en: <https://public.wmo.int/en/greenhouse-gas-bulletin#:~:text=WMO's%20Greenhouse%20Gas%20Bulletin%20reported,biological%20and%20human%20induced%20processes.>

[4] Q. Tu, J. Mo, R. Betz, L. Cui, Y. Fan, Y. Liu, “Achieving grid parity of solar pv power in china-the role of tradable green certificate,” *Energy Policy*, vol. 144, p. 111681, 2020, doi: <https://doi.org/10.1016/j.enpol.2020.111681>

[5] P. Dato, “Investment in energy efficiency, adoption of renewable energy and household behavior: Evidence from oecd countries,” *The Energy Journal*, vol. 39, no. 3, 2018, doi: <https://www.jstor.org/stable/26534449>

[6] P. Sun, B. Xu, J. Wang, “Long-term trend analysis and wave energy assessment based on era5 wave reanalysis along the chinese coastline,” *Applied Energy*, vol. 324, p. 119709, 2022, doi: <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2022.119709>

[7] K. Gunn, C. Stock-Williams, “Quantifying the global wave power resource,” *Renewable Energy*, vol. 44, pp. 296–304, 2012, doi: <https://doi.org/10.1016/j.renene.2012.01.101>

- [8] I. López, J. Andreu, S. Ceballos, I. M. De Alegría, I. Kortabarria, “Review of wave energy technologies and the necessary powerequipment,” *Renewable and sustainable energy reviews*, vol. 27, pp. 413–434, 2013, doi: <https://doi.org/10.1016/j.rser.2013.07.009>
- [9] “Energía del océano.” [En línea]. Disponible en: <https://www.irena.org/ocean>
- [10] “Wave developers: EMEC: European Marine Energy Centre.” [En línea]. Disponible en: <https://www.emec.org.uk/marine-energy/wave-developers/>
- [11] X. Zhang, J. Yang, “Power capture performance of an oscillating-body wec with nonlinear snap through pto systems in irregular waves,” *Applied Ocean Research*, vol. 52, pp. 261–273, 2015, doi: <https://doi.org/10.1016/j.apor.2015.06.012>
- [12] R. Ahamed, K. McKee, I. Howard, “Advancements of wave energy converters based on power take off (pto) systems: A review,” *Ocean Engineering*, vol. 204, p. 107248, 2020.
- [13] A. Henry, O. Kimmoun, J. Nicholson, G. Dupont, Y. Wei, F. Dias, “A two dimensional experimental investigation of slamming of an oscillating wave surge converter,” in *The Twenty-fourth International Ocean and Polar Engineering Conference, OnePetro*, 2014.
- [14] E. Renzi, F. Dias, “Resonant behaviour of an oscillating wave energy converter in a channel,” *Journal of Fluid Mechanics*, vol. 701, pp. 482–510, 2012. <https://doi.org/10.1017/jfm.2012.194>
- [15] B. Sorensen, *Renewable energy conversion, transmission and storage*. Elsevier, 2007, doi: <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-374262-9.X5001-0>
- [16] A. Têtu, “Power take-off systems for wecs,” in *Handbook of ocean wave energy*. Springer, Cham, 2017, pp. 203–220, doi: https://doi.org/10.1007/978-3-319-39889-1_8
- [17] H. Nguyen, C. Wang, Z. Tay, V. Luong, “Wave energy converter and large floating platform integration: A review,” *Ocean Engineering*, vol. 213, p. 107768, 2020, doi: <https://doi.org/10.1016/j.oceaneng.2020.107768>
- [18] O. M. Mazzaretto, F. Lucero, G. Besio, R. Cienfuegos, “Perspectives for harnessing the energetic persistent high swells reaching the coast of Chile,” *Renewable Energy*, vol. 159, pp. 494–505, 2020, doi: <https://doi.org/10.1016/j.renene.2020.05.031>
- [19] E. Renzi and F. Dias, “Hydrodynamics of the oscillating wave surge converter in the open ocean,” *European Journal of Mechanics-B/Fluids*, vol. 41, pp. 1–10, 2013, doi: <https://doi.org/10.1016/j.euromechflu.2013.01.007>
- [20] W. Ni, X. Zhang, W. Zhang, S. Liang, “Numerical investigation of adaptive damping control for raft-type wave energy converters,” *Renewable Energy*, vol. 175, pp. 520–531, 2021, doi: <https://doi.org/10.1016/j.renene.2021.04.128>
- [21] F. d. O. Antonio, “Wave energy utilization: A review of the technologies,” *Renewable and sustainable energy reviews*, vol. 14, no. 3, pp. 899–918, 2010, doi: <https://doi.org/10.1016/j.rser.2009.11.003>
- [22] A. Albert, G. Berselli, L. Bruzzone, P. Fanghella, “Mechanical design and simulation of an onshore four-bar wave energy converter,” *Renewable Energy*, vol. 114, pp. 766–774, 2017, doi: <https://doi.org/10.1016/j.renene.2017.07.089>
- [23] A. Zhao, W. Wu, Z. Sun, L. Zhu, K. Lu, H. Chung, F. Blaabjerg, “A flower pollination method based global maximum power point tracking strategy for point-absorbing type wave energy converters,” *Energies*, vol. 12, no. 7, p. 1343, 2019, doi: <https://doi.org/10.3390/en12071343>
- [24] M. Güney, “Wave energy conversion systems,” *Journal of Naval Sciences and Engineering*, vol. 11, no. 2, pp. 25 – 51, 2016.
- [25] C. Windt, J. Davidson, J. V. Ringwood, “Numerical analysis of the hydrodynamic scaling effects for the wavestar wave energy converter,” *Journal of Fluids and Structures*, vol. 105, p. 103328, 2021, doi: <https://doi.org/10.1016/j.jfluidstructs.2021.103328>
- [26] D. Vicinanza, E. D. Lauro, P. Contestabile, C. Gissoni, J. L. Lara, I. J. Losada, “Review of innovative harbor breakwaters for wave energy conversion,” *Journal of Waterway, Port, Coastal, and Ocean Engineering*, vol. 145, no. 4, p. 03119001, 2019, doi: [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)WW.1943-5460.0000519](https://doi.org/10.1061/(ASCE)WW.1943-5460.0000519)

- [27] R. Cascajo, E. García, E. Quiles, A. Correcher, F. Morant, “Integration of marine wave energy converters into seaports: A case study in the port of Valencia,” *Energies*, vol. 12, no. 5, p. 787, 2019, doi: <https://doi.org/10.3390/en12050787>
- [28] J. Tao, M. Hann, D. Greaves, H. Shi, “Numerical study of a point absorber wave energy converter with different power take-off systems,” *Ocean Engineering*, vol. 242, p. 110181, 2021, doi: <https://doi.org/10.1016/j.oceaneng.2021.110181>
- [29] K. Porter, S. Ordóñez-Sánchez, C. Johnstone, S. Conesa, “Integration of a direct drive contra-rotating generator with point absorber wave energy converters,” in *12th European Wave and Tidal Energy Conference*, 2017.
- [30] A. Babajani, M. Jafari, P. Hafezisefat, M. Mirhosseini, A. Rezaei, L. Rosendahl, “Parametric study of a wave energy converter (searaser) for Caspian sea,” *Energy Procedia*, vol. 147, pp. 334–342, 2018, doi: <https://doi.org/10.1016/j.egypro.2018.07.101>
- [31] K. Veerabhadrapa, B. Suhas, C. K. Mangrulkar, R. S. Kumar, V. Mudakappanavar, K. Seetharamu et al., “Power generation using ocean waves: A review,” *Global Transitions Proceedings*, 2022, doi: <https://doi.org/10.1016/j.gltp.2022.05.001>
- [32] E. Quaranta, C. Trivedi, “The state-of-art of design and research for pelton turbine casing, weight estimation, counterpressure operation and scientific challenges,” *Heliyon*, vol. 7, no. 12, p. e08527, 2021, doi: <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2021.e08527>
- [33] R. C. Thomson, J. P. Chick, G. P. Harrison, “An lca of the pelamis wave energy converter,” *The International Journal Of Life Cycle Assessment*, vol. 24, no. 1, pp. 51–63, 2019, doi: <https://doi.org/10.1007/s11367-018-1504-2>
- [34] M. H. Jahangir, A. Shahsavari, M. A. V. Rad, “Feasibility study of a zero emission pv/wind turbine/wave energy converter hybrid system for stand-alone power supply: A case study,” *Journal of Cleaner Production*, vol. 262, p. 121250, 2020, doi: <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2020.121250>
- [35] A. González-Esculpi, C. Verde, P. Maya Ortiz, “Comparison of estimates of the excitation force for fault diagnosis in a wave energy converter,” *IFAC-PapersOnLine*, vol. 55, no. 6, pp. 396–401, 2022, doi: <https://doi.org/10.1016/j.ifacol.2022.07.161>
- [36] F. Dias, E. Renzi, S. Gallagher, D. Sarkar, Y. Wei, T. Abadie, C. Cummins, A. Rafiee, “Analytical and computational modelling for wave energy systems: the example of oscillating wave surge converters,” *Acta Mechanica Sinica/Lixue Xuebao*, vol. 33, no. 4, pp. 647–662, 2017, doi: <https://doi.org/10.1007/s10409-017-0683-6>
- [37] A. Kumawat, D. Karmakar, C. Guedes Soares, “Wave energy conversion by multiple bottom-hinged surging WEC,” in *Proceedings of the Fourth International Conference in Ocean Engineering (ICOE2018)*, 2019, pp. 913–929, doi: https://doi.org/10.1007/978-981-13-3134-3_67
- [38] D. G. Gioia, E. Pasta, P. Brandimarte, G. Mattiazzo, “Data-driven control of a pendulum wave energy converter: A gaussian process regression approach,” *Ocean Engineering*, vol. 253, p. 111191, 2022, doi: <https://doi.org/10.1016/j.oceaneng.2022.111191>
- [39] Q. Cai, S. Zhu, “Applying double-mass pendulum oscillator with tunable ultra-low frequency in wave energy converters,” *Applied Energy*, vol. 298, p. 117228, 2021, doi: <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2021.117228>
- [40] S. Ogai, S. Umeda, H. Ishida, “An experimental study of compressed air generation using a pendulum wave energy converter,” *Journal of Hydrodynamics*, vol. 22, no. 1, pp. 290–295, 2010, doi: [https://doi.org/10.1016/S1001-6058\(09\)60209-2](https://doi.org/10.1016/S1001-6058(09)60209-2)
- [41] C. Zhang, Y. Wei, F. Dias, X. Hu, “An efficient fully lagrangian solver for modeling wave interaction with oscillating wave surge converter,” *Ocean Engineering*, vol. 236, p. 109540, 2021, doi: <https://doi.org/10.1016/j.oceaneng.2021.109540>
- [42] A. Pathak, C. Freniere, M. Raessi, “Advanced computational simulations of water waves interacting with wave energy converters,” *European Journal of Computational Mechanics*, vol. 26, no. 1-2, pp. 172–204, 2017, doi: <https://doi.org/10.1080/17797179.2017.1306829>
- [43] M. Brito, R. M. Ferreira, L. Teixeira, M. G. Neves, L. Gil, “Experimental investigation of the flow field in the vicinity of an oscillating wave surge converter,” *Journal of Marine Science and Engineering*, vol. 8, no. 12, p. 976, 2020, doi: <https://doi.org/10.3390/jmse8120976>

- [44] S. Saeidtehrani, “Flap-type wave energy converter arrays: Nonlinear dynamic analysis,” *Ocean Engineering*, vol. 236, p. 109463, 2021, doi: <https://doi.org/10.1016/j.oceaneng.2021.109463>
- [45] D. Ning, C. Liu, C. Zhang, M. Göteman, H. Zhao, B. Teng, “Hydrodynamic performance of an oscillating wave surge converter in regular and irregular waves: an experimental study,” *Journal of Marine Science and Technology*, vol. 25, no. 5, p. 4, 2017.
- [46] X. Jiang, S. Day, D. Clelland, “Hydrodynamic responses and power efficiency analyses of an oscillating wave surge converter under different simulated pto strategies,” *Ocean Engineering*, vol. 170, pp. 286–297, 2018, doi: <https://doi.org/10.1016/j.oceaneng.2018.10.050>
- [47] Y. Wei, A. Rafiee, B. Elsaesser, F. Dias, “Numerical simulation of an oscillating wave surge converter,” in *International Conference on Offshore Mechanics and Arctic Engineering*, vol. 55317. American Society of Mechanical Engineers, 2013, doi: <https://doi.org/10.1115/OMAE2013-10189>
- [48] D. Sarkar, F. Dias, “Performance enhancement of the oscillating wave surge converter by a breakwater,” in The Twenty-fifth International Ocean and Polar Engineering Conference. *OnePetro*, 2015.
- [49] J. Wu, L. Qin, N. Chen, C. Qian, S. Zheng, “Investigation on a spring-integrated mechanical power take-off system for wave energy conversion purpose,” *Energy*, vol. 245, p. 123318, 2022, doi: <https://doi.org/10.1016/j.energy.2022.123318>
- [50] C. Liang, J. Ai, L. Zuo, “Design, fabrication, simulation and testing of an ocean wave energy converter with mechanical motion rectifier,” *Ocean Engineering*, vol. 136, pp. 190–200, 2017, doi: <https://doi.org/10.1016/j.oceaneng.2017.03.024>
- [51] M. Shadman, G. O. G. Avalos, S. F. Estefen, “On the power performance of a wave energy converter with a direct mechanical drive power take-off system controlled by latching,” *Renewable Energy*, vol. 169, pp. 157–177, 2021, doi: <https://doi.org/10.1016/j.renene.2021.01.004>
- [52] Z. Liu, R. Zhang, H. Xiao, X. Wang, “A survey of power take-off systems of ocean wave energy converters,” *Preprints.org*, 2019, doi: <https://doi.org/10.20944/preprints201907.0335.v1>
- [53] X. Li, C. Chen, Q. Li, L. Xu, C. Liang, K. Ngo, R. G. Parker, L. Zuo, “A compact mechanical power take-off for wave energy converters: Design, analysis, and test verification,” *Applied Energy*, vol. 278, p. 115459, 2020, doi: <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2020.115459>
- [54] X. Li, D. Martin, C. Liang, C. Chen, R. G. Parker, L. Zuo, “Characterization and verification of a two-body wave energy converter with a novel power take-off,” *Renewable Energy*, vol. 163, pp. 910–920, 2021, doi: <https://doi.org/10.1016/j.renene.2020.08.113>
- [55] M. Penalba, J. V. Ringwood, “A review of wave-to-wire models for wave energy converters,” *Energies*, vol. 9, no. 7, p. 506, 2016, doi: <https://doi.org/10.3390/en9070506>
- [56] D. Zhang, W. Li, Y. Lin, J. Bao, “An overview of hydraulic systems in wave energy application in china,” *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 16, no. 7, pp. 4522–4526, 2012, doi: <https://doi.org/10.1016/j.rser.2012.04.005>
- [57] S. Sheng, K. Wang, H. Lin, Y. Zhang, Y. You, Z. Wang, A. Chen, J. Jiang, W. Wang, and Y. Ye, “Model research and open sea tests of 100 kw wave energy converter sharp eagle wanshan,” *Renewable Energy*, vol. 113, pp. 587–595, 2017, doi: <https://doi.org/10.1016/j.renene.2017.06.019>
- [58] H. Zhang, J. Zhang, X. Zhou, Q. Shi, D. Xu, Z. Sun, Y. Lu, B. Wu, “Robust performance improvement of a raft-type wave energy converter using a nonlinear stiffness mechanism,” *International Journal of Mechanical Sciences*, vol. 211, p. 106776, 2021, doi: <https://doi.org/10.1016/j.ijmecsci.2021.106776>
- [59] S. Wu, Y. Liu, J. Qin, “Experimental analyses of two-body wave energy converters with hydraulic power take-off damping in regular and irregular waves,” *IET Renewable Power Generation*, vol. 15, no. 14, pp. 3165–3175, 2021, doi: <https://doi.org/10.1049/rpg2.12218>
- [60] S. Zou, O. Abdelkhalik, “Control of wave energy converters with discrete displacement hydraulic power take-off units,” *Journal of Marine Science and Engineering*, vol. 6, no. 2, p. 31, 2018, doi: <https://doi.org/10.3390/jmse6020031>
- [61] Comisión Colombiana De Océano, “Cco-límites de Colombia.” [En línea]. Disponible en: <https://cco.gov.co/cco/prensa/noticias/115-asuntos-internacionales/338-limites-de-colombia.html>

- [62] “Decreto 570 de 2018 - gestor normativo - función pública.” [En línea]. Disponible en: <https://www.funcionpublica.gov.co/eva/gestornormativo/norma.php?i=85659>
- [63] A. Rubio-Clemente, L. Velásquez, E. Chica, “Design of a water channel to model the wave conditions in the colombian pacific ocean,” in *20th International Conference on Renewable Energies and Power Quality (ICREPQ’22)*, 2022. [En línea]. Disponible en: <https://www.icrepq.com/posters/icrepq22/325-rubio.pdf>
- [64] C. M. Appendini, C. P. Urbano-Latorre, B. Figueroa, C. J. Dagua-Paz, A. Torres-Freyermuth, P. Salles, “Wave energy potential assessment in the caribbean low level jet using wave hindcast information,” *Applied energy*, vol. 137, pp. 375–384, 2015, doi: <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2014.10.038>
- [65] J. Pérez Zapata et al., “Identificación y cuantificación del potencial de energía undimotriz en la costa del departamento del atlántico, Colombia,” *Revista Ingeniería, Investigación y Desarrollo*, vol 17, no 2, 2017, doi: <https://doi.org/10.18041/1794-4953/avances.1.4740>
- [66] A. J. P. Idárraga, H. Diaz, J. A. P. Peñaranda, “Viabilidad técnica de tecnologías para aprovechamiento de la energía undimotriz en la costa del pacífico colombiano,” *Avances: Investigación en Ingeniería*, vol. 15, no. 1, pp. 286–301, 2018, doi: <https://doi.org/10.18041/1794-4953/avances.1.4740>
- [67] J. Portilla, A. L. Caicedo, R. Padilla-Hernández, L. Cavaleri, “Spectral wave conditions in the colombian pacific ocean,” *Ocean Modelling*, vol. 92, pp. 149–168, 2015, doi: <https://doi.org/10.1016/j.ocemod.2015.06.005>
- [68] F. R. Menco, A. Rubio-Clemente, E. Chica, “Design of a wave energy converter system for the Colombian Pacific Ocean,” *Revista Facultad de Ingeniería Universidad de Antioquia*, no. 94, pp. 8–23, 2020, doi: <https://doi.org/10.17533/udea.redin.20190406>
- [69] D. G. Gioia, E. Pasta, P. Brandimarte, G. Mattiazzo, “Data-driven control of a pendulum wave energy converter: A gaussian process regression approach,” *Ocean Engineering*, vol. 253, p. 111191, 2022, doi: <https://doi.org/10.1016/j.oceaneng.2022.111191>
- [70] S. Gunawardane, G. Bandara, Y.-H. Lee, “Hydrodynamic analysis of a novel wave energy converter: Hull reservoir wave energy converter (hrwec),” *Renewable Energy*, vol. 170, pp. 1020–1039, 2021, doi: <https://doi.org/10.1016/j.renene.2021.01.140>