

Energía undimotriz: revisión del desarrollo de absorbedores puntuales y su madurez tecnológica

Wave energy: a review of point absorber development and associated TRLs

Claudia Belén Álvarez Sánchez* 

María Guadalupe Navarro Rojero 

Julio César Sánchez Jiménez** 

CIATEQ A.C. Centro de Tecnología Avanzada, Querétaro, México

*claudia.alvarez@ciateq.edu.mx

**julio.sanchez@ciateq.mx

DOI: 10.61820/dcuaq.2395-8847.2206

Fecha de recepción: 13 de marzo del 2026

Fecha de aceptación: 19 de mayo del 2026

Resumen

La energía undimotriz es una fuente renovable con potencial para diversificar la matriz energética global. Sin embargo, la amplia gama de diseños, geometrías y principios de funcionamiento de los dispositivos existentes ha dificultado la convergencia hacia soluciones estandarizadas. Este trabajo presenta una revisión sistemática del desarrollo reciente de absorbedores puntuales mediante una consulta en PRIMRE, Google Scholar, Scopus, Elsevier e IEEE Xplore, con un periodo de búsqueda de noviembre del 2024 a diciembre del 2025. A partir de 130 convertidores de energía marina identificados, se filtraron 59 absorbedores puntuales, de los cuales 22 contaban con un $TRL \geq 6$. Con base en una función de puntuación ponderada que considera madurez tecnológica, potencia nominal, actualidad de la documentación, estado operativo y verificabilidad de los datos, se seleccionaron cinco dispositivos para un análisis detallado: CorPower C4, Archimedes Waveswing, Triton-C, PB3 PowerBuoy y Wavestar. Los resultados evidencian una heterogeneidad tecnológica significativa, con TRLs de entre 7 y 9, potencias nominales de 15 a 600 kW y diferencias notables entre los datos reportados por los fabricantes y los valores verificados experimentalmente.



Palabras clave: conversión de energía undimotriz, dispositivos flotantes, energía renovable marina, estado del arte

Abstract

Wave energy is a renewable source with significant potential to diversify the global energy matrix. However, the wide diversity of designs, geometries, and operating principles among existing devices has hindered convergence toward standardized solutions. This work presents a systematic review of the recent development of point absorber wave energy converters through searches in PRIMRE, Google Scholar, Scopus, Elsevier, and IEEE Xplore, covering the period from November 2024 to December 2025. From 130 identified marine energy devices, 59 point absorbers were filtered, of which 22 had TRLs ≥ 6 . Using a weighted scoring function considering technology readiness level, nominal power, documentation recency, operational status, and data reliability, five devices were selected for detailed analysis: CorPower C4, Archimedes Waveswing, Triton-C, PB3 PowerBuoy, and Wavestar. Results reveal significant technological heterogeneity, with TRL values between 7 and 9, nominal power ranging from 15 to 600 kW, and notable differences between manufacturer-reported data and experimentally verified values.

Keywords: floating devices, marine renewable energy, state of the art, wave energy conversion

Introducción

El aprovechamiento de fuentes de energías renovables es una prioridad en la transición energética global para cumplir los objetivos del Acuerdo de París, particularmente la meta de no sobrepasar el aumento de temperatura de 1.5° C. En este contexto, el sector energético global continúa siendo la principal fuente de emisiones de gases de efecto invernadero, lo que subraya la necesidad de acelerar la transición hacia fuentes limpias y diversificar la matriz energética más allá de las ya consolidadas, como la solar y la eólica (IRENA, 2024). Por ello, se debe impulsar el desarrollo de tecnologías renovables, así como profundizar la investigación de aquellas que se encuentran en fases avanzadas, pero no han alcanzado la madurez comercial.

Un ejemplo de energía renovable poco difundida es la oceánica. Las estimaciones globales de su potencial energético varían según la metodología empleada. IRENA (2014) reportó que el Panel Intergubernamental sobre Cambio Climático del 2012 calculaba un potencial teórico de 29,500 TWh por año y el del 2007 un potencial técnico de 500 GW de capacidad

instalable, asumiendo que estas tecnologías se desplegarían únicamente en el 2% de los 800,000 km de costa mundial.

En este sentido, la energía undimotriz, obtenida a partir del movimiento de las olas, destaca por su abundancia, alta predictibilidad y densidad energética (IRENA, 2020). Sin embargo, su avance enfrenta retos técnicos y económicos que han limitado su implementación a gran escala. En 2020, su capacidad instalada fue de 2.31 MW (IRENA, 2020), cifra que contrasta marcadamente con el potencial teórico estimado. Este dato revela la magnitud del desafío tecnológico para aprovechar este tipo de energías con los convertidores de energía undimotriz (WECs) actuales.

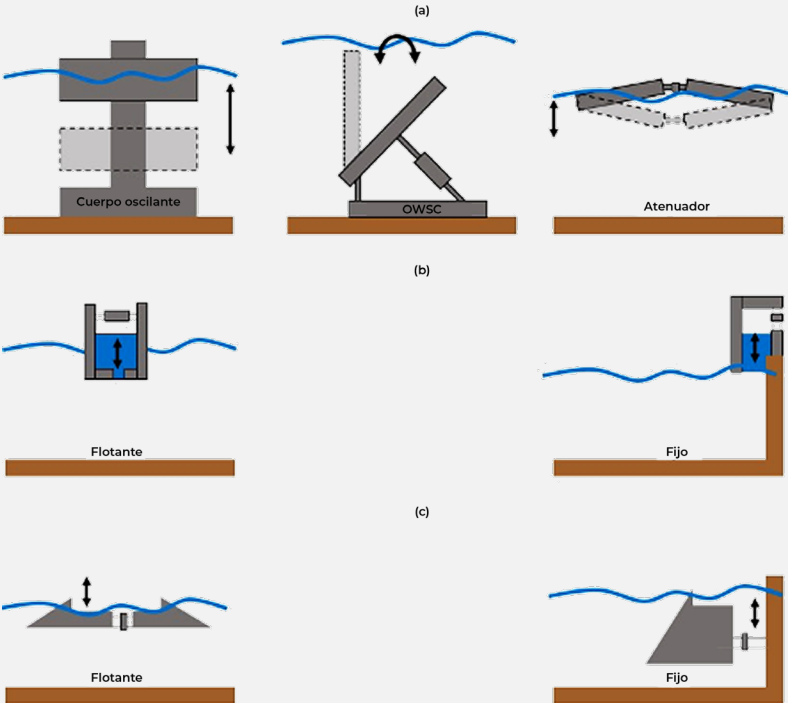
Del mismo modo, uno de los obstáculos para su consolidación es la falta de consenso en el diseño, geometrías y principios de funcionamiento de los WECs. Esta diferencia dificulta su estandarización, ya que solo pueden mejorarse en torno a condiciones específicas, lo cual limita su transferencia a otras regiones. Pese a ello, de acuerdo al reporte de IRENA (2020), se prevé que en los próximos años la energía undimotriz experimentará un crecimiento significativo, siguiendo el ejemplo de la mareomotriz.

En 2019, la Comisión Electrotécnica Internacional (IEC) publicó la especificación técnica IEC TS 62600, que indica las pautas para el diseño, prototipado, evaluación y caracterización del recurso de dispositivos relacionados con energía marina (undimotriz, eólica, de corrientes y de marea). El apartado 101 de este referente, con la caracterización del recurso energético en condiciones reales, se ha utilizado en dispositivos como el CorPower y el PB3 PowerBuoy. Mientras tanto, los apartados 2 y 3, que abordan el diseño de los dispositivos y las cargas mecánicas, rara vez han sido empleados en la energía undimotriz, siendo más común su aplicación en la mareomotriz, particularmente en turbinas marinas.

Según el Centro Europeo de Energía Marina (EMEC, s.f.), los WECs se clasifican en tres tipos generales en función de su principio de funcionamiento: cuerpos oscilantes, columnas oscilantes de agua y convertidores de sobretensión de onda, como se muestra en la Figura 1.

Figura 1

Clasificación de los WECs de acuerdo a su principio de funcionamiento: a) cuerpos oscilantes, b) columnas oscilantes de agua y c) convertidores de sobretensión de onda



Fuente: adaptado de “On the scalability of wave energy converters” (p. 10) [Imagen], por Jin et al., 2022 (<https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0029801821015274?via%3Dihub>)

En la Tabla 1 se presentan los grados de libertad asociados a los distintos WECs, usando la clasificación de la EMEC.

Tabla 1

Clasificación de los WECs y sus grados de libertad

Clasificación	Tipo	Grado de libertad
Cuerpos oscilantes	De movimiento vertical (<i>heaving</i>)	1
	Convertidor de oleaje oscilante (OWSC)	1
	Articulado	2
Columnas oscilantes de agua	Flotante	3
	Fijo	0
Convertidores de sobretensión de onda	Flotante	3
	Fijo	0

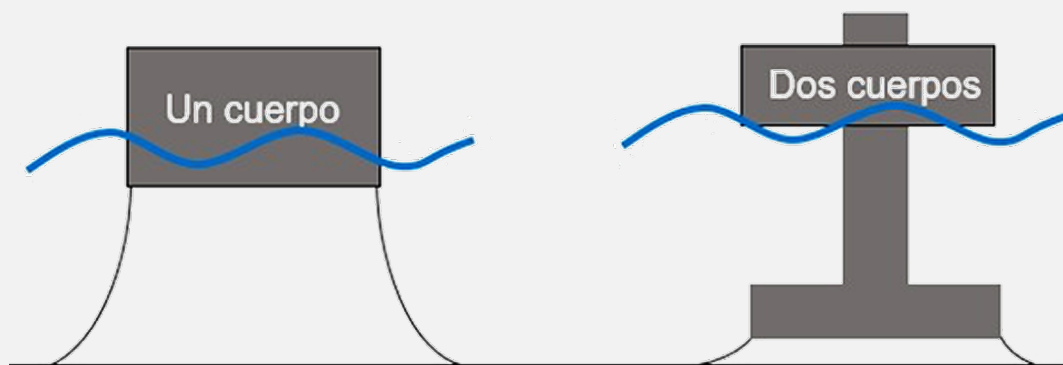
Fuente: elaboración propia (Álvarez, 2026)

Los convertidores de cuerpos oscilantes, en especial los absorbedores puntuales, representan una solución prometedora por su diseño compacto, capacidad de operación con hasta 6 grados de libertad y facilidad de adaptación ante diversas condiciones oceánicas. Los absorbedores puntuales se basan en el movimiento relativo inducido por el oleaje y pueden adoptar dos configuraciones principales:

- a) **Absorbedores puntuales de un solo cuerpo:** consisten en un flotador anclado al fondo marino mediante un sistema de toma de potencia (PTO). La energía se captura con el movimiento vertical del flotador, como se muestra a la izquierda en la Figura 2. Esta configuración es más simple pero menos eficiente en mares con componentes direccionales complejas.
- b) **Absorbedores puntuales de dos cuerpos:** consisten en un flotador y una masa generalmente sumergida que se desplazan de forma relativa entre sí (Asai y Sugiyura, 2021; Fard *et al.*, 2025). Obtienen la energía a partir de dos modos de movimiento, como se muestra a la derecha de la Figura 2. Esta configuración permite sintonizar la frecuencia natural del sistema con la frecuencia predominante del oleaje, mejorando así la captura de energía.

Figura 2

Clasificación de los absorbedores puntuales según su configuración



Fuente: elaboración propia (Álvarez, 2025)

A diferencia de otros sistemas más complejos, estos dispositivos combinan la simplicidad mecánica y la escalabilidad, por lo que son candidatos ideales para superar los desafíos de estandarización que limitan el desarrollo de este tipo de tecnologías. Esta ventaja coincide con las proyecciones que anticipan el despegue de la energía undimotriz.

Este trabajo se centra en absorbedores puntuales con un nivel de madurez tecnológica igual o superior a 6 o, en otras palabras, aquellos que han sido probados en condiciones reales y tienen potencial para comercializarse. Se excluyeron los terminadores y atenuadores con el fin de priorizar diseños compactos que podrían adaptarse mejor a contextos locales. A través de una revisión sistemática, se busca reunir información técnica clave que suele encontrarse dispersa en fuentes académicas, reportes gubernamentales y documentación industrial. El propósito es ofrecer una visión clara y actualizada del estado de esta tecnología, identificando tendencias, brechas de conocimiento y oportunidades para futuras investigaciones.

Principios físicos de los absorbedores puntuales

Los absorbedores puntuales operan sobre la base de la interacción entre una estructura flotante y el campo de ondas incidentes. Su principio fundamental es la resonancia hidrodinámica: cuando la frecuencia natural de oscilación del sistema coincide con la frecuencia predominante del oleaje, la amplitud de movimiento se maximiza, lo que incrementa la energía disponible para el sistema de PTO. Esta condición de resonancia se describe con la ecuación de Cummins (1962), que modela la dinámica del cuerpo flotante en el dominio del tiempo considerando las fuerzas de excitación del oleaje, las fuerzas de radiación (representadas por coeficientes de la masa añadida y el amortiguamiento de radiación) y las fuerzas de restauración hidrostáticas.

El sistema de PTO desempeña un papel central en la eficiencia del absorbedor puntual, ya que se encarga de transformar la energía mecánica del movimiento del cuerpo en energía eléctrica utilizable. Los PTO pueden clasificarse en cuatro categorías principales según su principio de operación: hidráulicos, electrohidráulicos, de accionamiento directo y mecánicos. Los hidráulicos convierten el movimiento lineal o rotacional en presión de fluido a través de pistones o bombas, que a su vez accionan un motor hidráulico acoplado a un generador eléctrico. Su principal ventaja es la capacidad de suavizar la potencia de salida mediante acumuladores, aunque existe el riesgo de que el fluido hidráulico se fugue en el entorno marino. Por su parte, los de accionamiento directo generan electricidad sin etapas intermedias, por lo que eliminan ineficiencias de conversión, a cambio de una mayor complejidad en la electrónica de potencia (Guo y Ringwood, 2021).

La geometría del cuerpo flotante influye directamente en la respuesta hidrodinámica del dispositivo. Esta relación entre

la geometría y el clima de oleaje es una de las razones por las cuales la mayoría de los dispositivos analizados ha sido optimizada para ajustarse a las condiciones específicas del lugar de interés, y su desempeño puede degradarse de manera significativa al transferirse a otras regiones oceánicas (Fard *et al.*, 2025).

Finalmente, la escalabilidad es un aspecto crítico en el diseño de los absorbedores puntuales. Jin *et al.* (2022) demuestran que la potencia que capturan escala de manera no lineal con sus dimensiones, de modo que duplicar el diámetro del flotador no implica necesariamente duplicar la potencia generada, ya que la eficiencia de captura depende de la relación entre el tamaño del dispositivo y la longitud de onda del oleaje incidente. Esta relación limita el beneficio de aumentar de forma indiscriminada el tamaño del dispositivo y motiva el interés en arreglos de múltiples absorbedores puntuales, donde el efecto de interacción entre dispositivos tiene el potencial de aumentar la eficiencia colectiva del sistema.

Metodología

Los convertidores se seleccionaron mediante un proceso de revisión técnica sistemática en fuentes académicas, informes de proyectos, documentación gubernamental del país de origen de los dispositivos y reportes de instituciones de energía entre noviembre del 2024 y diciembre del 2025. Como base de datos principal se utilizó el Portal y Repositorio de Información de Energía Marina Renovable (PRIMRE, 2026) del Departamento de Energía de Estados Unidos. Para verificar la existencia de literatura académica asociada a los modelos estudiados se consultaron fuentes como Google Scholar, Scopus, Elsevier e IEEE Xplore, con los términos de búsqueda “*point absorber*”, “*wave energy device*”, “*WEC point absorber*” y “*WEC technology readiness level*”, en combinación con el nombre específico de cada dispositivo o su desarrollador. En los casos donde contaban con financiamiento gubernamental, la búsqueda condujo también a informes oficiales de agencias de energía del país de origen. Adicionalmente, se consultó Google Patents para comprobar que hubiera propiedad industrial activa.

A partir de PRIMRE, se identificaron inicialmente 130 dispositivos cosechadores de energía marina de distintos tipos. De estos, solo se contemplaron aquellos clasificados como absorbedores puntuales, es decir, 59. El primer criterio de filtrado fue un $TRL \geq 6$, lo que redujo el conjunto a 22, los cuales fueron

sometidos al proceso de búsqueda descrito y evaluados con la siguiente función de puntuación ponderada:

$$s_f = 0.25(TRL) + 0.3(Pn) + 0.2(Ac) + 0.15(Eo) + 0.1(Vd)$$

Donde:

- **TRL (25%)**: nivel de madurez tecnológica, normalizado en una escala 0-5, proporcional a la escala de TRL máxima de 9. Refleja el grado de validación experimental del dispositivo.
- **Pn (30%)**: potencia nominal reportada, evaluada por rangos en una escala 1-5 (> 1,000 kW = 5; 501-1,000 kW = 4; 101-500 kW = 3; 11-110 kW = 2; < 10 kW = 1).¹
- **Ac (20%)**: actualidad de la documentación, evaluada como el promedio de dos subcriterios con igual peso: año de la publicación más reciente (2023-2024 = 5; 2020-2022 = 3; anterior a 2020 = 1) y cantidad de estudios identificados (≥ 3 estudios = 5; 1-2 estudios = 3; ninguno = 0).
- **Eo (15%)**: estado operativo (activos = 5, inactivos = 2.5).
- **Vd (10%)**: verificabilidad de los datos (datos oficiales o respaldados por dos o más fuentes independientes = 5, información parcial o de una sola fuente = 3, información no verificable = 1).

Las ponderaciones fueron definidas con base en la relevancia de cada criterio respecto al objetivo de la revisión: identificar absorbedores puntuales que cuenten con un respaldo documental sólido y madurez tecnológica demostrada, a partir de contrastes del estado del arte, donde métodos formales, como el proceso de análisis jerárquico (AHP), son más apropiados para estudios de selección de sitio o inversión. La Tabla 2 resume las características destacadas de los 22 dispositivos evaluados, incluyendo la ponderación final.

¹ Se reconoce que los valores no verificados experimentalmente pueden introducir un sesgo, por lo que la tabla comparativa distingue entre potencia reportada y potencia verificada.

Tabla 2
Resumen comparativo de los absorbedores puntuales

Dispositivo	Nivel de madurez tecnológica (25%)	Energía en kW (30%)	Energía en kW verificada	Cantidad de estudios (20%)	Estado del dispositivo (15%)	Información comprobable (10%)	Ponderación
Archimedes Waveswing (AWS)	7	500	500	9	Activo	Sí	7.5
Azura	7	20	20	4	Activo	Sí	6.5
BOLT Lifesaver	7	50	50	6	Activo	Sí	7
CorPower C4	7	300	300	+ 20	Activo	Sí	8.2
MANTA	6	4.6	4.6	3	Activo	Sí	5.8
MPS WaveSub	6	5,000	500-1,000	4	Activo	Parcialmente	6.3
NEMOS WEC	6	1000	1,000	8	Activo	Sí	7.5
Neptune Model 3.1	6	225	No verificable	0	Inactivo	No	3
OSCAR	6	Sin datos	No verificable	0	Activo	No	2.5
PB3 PowerBuoy	9	15	15	5	Activo	Sí	9
Protean Wave Technology	6	Sin datos	No verificable	0	Inactivo	No	2
Resen Smart Power Buoy	8	0.6	0.6	3	Activo	Sí	6.2
Rotary Wave Butterfly Device	6	500	No verificable	1	Inactivo	No	7.2
Seabased WEC	8	2,000	200-500	7	Activo	Sí	7.2
SeaDog Wave Pump	6	Sin datos	No verificable	1	Activo	No	3.2
SINN Power WEC	6	750	50-150	12	Activo	Sí	6.8
Squid 6	6	7.5	7.5	5	Activo	Sí	5.2
Triton-C	8	100	100	5	Activo	Sí	7.2
Waverider	7	Sin datos	No verificable	2	Activo	No	5

Wavestar WEC	7	600	600	+ 10	Activo	Sí	8
WaveSurfer	6	2,100	No verificable	0	Activo	No	3.5
Wedge W1	8	400	No verificable	1	Activo	No	5.5

Fuente: elaboración propia (Álvarez, 2026)

Resultados

Si bien la función de puntuación ponderada orientó el proceso de selección como un criterio estructurado, al final se priorizó la representatividad tecnológica del conjunto. En este sentido, a partir de la matriz comparativa de 22 dispositivos, se eligieron cinco que destacaron por su nivel de madurez tecnológica, documentación técnica disponible y relevancia en el campo. Por ejemplo, el PB3 PowerBuoy se incluyó por ser el único del grupo con un TRL de 9, representando el estado más avanzado de validación comercial, y el Triton-C por su diseño de múltiples grados de libertad y sus recientes pruebas en condiciones reales del océano Pacífico, características excepcionales dentro del conjunto. Esta combinación permitió llevar a cabo una comparación más completa del panorama tecnológico actual que la que resultaría al solo contemplar los dispositivos con mayor puntaje agregado.

A continuación, se muestran de forma individual los cinco dispositivos seleccionados, describiendo su principio de funcionamiento, tipo de PTO, potencia alcanzada, estado actual y ventajas frente a otros absorbedores puntuales, así como los retos tecnológicos predominantes. Adicionalmente, se incluyen dos dispositivos complementarios que, aunque no se analizaron a detalle, presentan características significativas para la discusión.

CorPower C4

Desarrollado por la empresa sueca CorPower Ocean, se trata de un absorbedor puntual cuyo principio de funcionamiento se basa en el movimiento relativo entre un flotador esférico y una estructura reactiva anclada al fondo marino. Una de sus innovaciones notables es el sistema WaveSpring, un mecanismo neumático pretensado que permite almacenar energía potencial y sincronizar el movimiento del dispositivo con el de las olas. Esta tecnología, descrita en la patente US20130236347A1 (Lundbäck, 2016), está inspirada en el bombeo del corazón humano: genera una fuerza de retorno que impulsa el flotador

hacia abajo tras cada cresta de la ola, mejorando hasta tres veces la producción de energía para un mismo tamaño de boya en comparación con otras tecnologías (CorPower Ocean, s.f.).

Este dispositivo cuenta con 9 m de diámetro, 19 m de largo y 70 t de peso, y una sola boya puede generar entre 300 y 700 kW en condiciones óptimas de oleaje (CorPower Ocean, s.f.). En la Figura 3 se puede observar el dispositivo siendo preparado para las pruebas en mar abierto.

Figura 3

Preparación del CorPower C4 para las pruebas en mar abierto



Fuente: CorPower C4 WEC at quayside 'launchpad' [Fotografía], por CorPower Ocean, 2022 (<https://corpowerocean.com/cor-power-c4-wec-at-quayside-launchpad/>)

En 2022, el CorPower C4 fue sometido a la prueba IronMan en un banco de pruebas en seco ubicado en la sede de la empresa en Estocolmo. Bajo una carga de olas simuladas de 7.2 MW, el dispositivo se evaluó bajo condiciones representativas de diversas regiones oceánicas, con una fase de funcionamiento continuo de tres meses y exposición a cargas equivalentes a una tormenta severa con olas de 18.5 m. CorPower Ocean (2022) indica que los resultados demostraron la robustez del diseño y la eficacia del sistema WaveSpring para proteger el dispositivo en condiciones extremas. Se proyecta que en 2025 alcance un nivel de madurez tecnológica de 8 (CorPower Ocean, s.f.).

Entre sus ventajas destacan su alta eficiencia por unidad de masa, su capacidad de sintonización activa con el oleaje y su diseño robusto demostrado en pruebas en seco. El sistema WaveSpring permite que el dispositivo opere en condiciones de resonancia de manera controlada, lo que maximiza la captura de energía sin exponer la estructura a sobrecargas.

Triton-C

El Triton-C, desarrollado por Oscilla Power, Inc., es un absorbedor puntual diseñado para operar en seis grados de libertad (Oscilla Power, Inc., s.f./a) debido a su configuración de dos cuerpos: un flotador superficial y un plato verticalmente asimétrico conectado mediante correas flexibles de alta resistencia. De acuerdo a su ficha técnica, esta disposición permite que el dispositivo funcione en múltiples modos de movimiento generados por el oleaje, incluyendo arfada, empuje, oscilación, cabeceo, balanceo y guiñada. La capacidad de aprovecharlos simultáneamente le confiere una ventaja significativa frente a los absorbedores puntuales convencionales de un solo grado de libertad, ya que incrementa el ancho de banda de captura de energía y reduce la sensibilidad a la direccionalidad del oleaje.

Oscilla Power, Inc. (s.f./b) indica que el sistema de PTO consiste en transmisiones hidráulicas rotativas instaladas en el flotador y optimizadas para transformar el movimiento relativo entre ambos cuerpos en energía con alta eficiencia y confiabilidad operativa. Cada correa flexible está conectada a un cilindro hidráulico que presuriza el fluido, lo cual acciona un motor hidráulico acoplado a un generador eléctrico, como se describe en la patente US11293398B2 (Mundon, 2022).

El Triton-C fue creado para suministrar energía a comunidades remotas con acceso limitado a la infraestructura eléctrica. La Oficina de Tecnologías de Energía Hidráulica (WPTO, 2022) señala que su diseño modular y capacidad de autodespliegue favorecen una instalación rápida mediante embarcaciones de bajo costo, lo que reduce los tiempos y costos de implementación.

Este dispositivo se encuentra actualmente en un nivel de madurez tecnológica de 8 y fue evaluado con éxito en 2023 en el Sitio de Pruebas de Energía Marina (WETS) de Hawái, donde se demostró que es capaz de operar de forma estable en condiciones reales de oleaje (Ingram, 2023). Durante las pruebas, el dispositivo registró datos de rendimiento que validaron los modelos numéricos calculados de manera previa, incluyendo la generación eléctrica bajo diferentes estados de mar y la respuesta del sistema de PTO ante cargas variables. Estos ensayos suponen un hito, ya que el entorno de Hawái reproduce condiciones del océano Pacífico que son de interés para un eventual despliegue en regiones costeras de América.

Gracias a su construcción innovadora y su capacidad de operar de forma autónoma, el Triton-C representa una opción prometedora entre los absorbedores puntuales de dos cuerpos. A diferencia de los dispositivos que requieren infraestructura

portuaria especializada para instalarse, como se mencionó, este puede desplegarse con embarcaciones convencionales, lo que reduce los costos logísticos y amplía el rango de sitios potenciales de instalación. La Figura 4 muestra el dispositivo durante su preparación para las pruebas realizadas.

Figura 4

Preparación del Triton-C para las pruebas en un espacio controlado



Fuente: Oscilla Power - model Triton-C - wave energy converter [Fotografía], por Oscilla Power, Inc., 2023 (<https://www.energy-xprt.com/products/oscilla-power-model-triton-c-wave-energy-converter-911070>)

Archimedes Waveswing

El Archimedes Waveswing (AWS) es un absorbedor puntual desarrollado por AWS Ocean Energy Ltd en Escocia. Contrario a la mayoría de los dispositivos de su tipo, este se encuentra completamente sumergido en el mar, lo que le permite operar protegido frente a tormentas oceánicas severas y minimizar el impacto acústico y visual (AWS Ocean Energy Ltd, 2022). Esta característica lo distingue de los absorbedores superficiales, ya que la ausencia de partes visibles desde la superficie reduce el riesgo de daños por condiciones climáticas extremas y facilita su integración en zonas con restricciones visuales o de navegación.

El dispositivo consta de dos componentes principales: un silo anclado al fondo marino y un flotador que actúa como carcasa o tapón del silo (Ali et al., 2025), como se observa en la Figura 5. Su principio de funcionamiento se basa en los cambios de presión hidrostática generados por el paso de las olas. A medida que aumenta la presión sobre el flotador, este se desplaza hacia abajo y, cuando disminuye, el flotador asciende.

AWS Ocean Energy Ltd (s.f.) indica que este movimiento vertical es aprovechado por un sistema de conversión de energía de tipo directo (*direct-drive*) que transforma la energía mecánica sin etapas intermedias.

Figura 5

Archimedes Waveswing, completamente ensamblado, previo a las pruebas operativas



Fuente: AWS wave energy converter takes shape in Glasgow ahead of testing [Fotografía], por AWS Ocean Energy, 2022 (<https://awsocan.com/2021/06/waveswing-takes-shape-in-glasgow/>)

El documento *Advanced Archimedes Waveswing. WES novel wave energy converter. Stage 3 project. Public report* (AWS Ocean Energy Ltd, 2022) informó que la potencia teórica alcanzada por el dispositivo en su diseño a escala real se estima en 500 kW, mientras que su nivel de madurez tecnológica es de 7, tras ser evaluado en una escala de 1:2 en condiciones reales de operación en el EMEC, ubicado en las islas Orcadas, Escocia. Las pruebas a escala incluyeron ciclos continuos de operación bajo distintos estados del mar, validando tanto el sistema de PTO de accionamiento directo como la estructura del silo. Por otro lado, la inmersión total del dispositivo requiere al menos 25 m de profundidad, lo que restringe su aplicabilidad geográfica (AWS Ocean Energy Ltd, 2022). Además, con esta característica, las acciones de mantenimiento correctivo

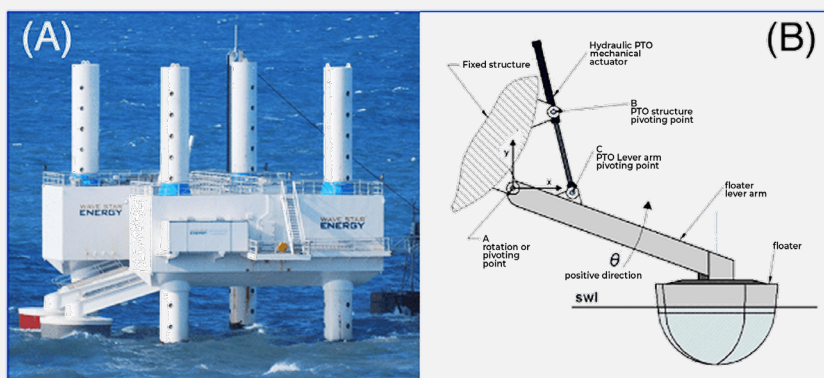
resultan más complejas y costosas que en dispositivos superficiales, puesto que se precisan equipos de buceo o vehículos submarinos controlados de manera remota.

Wavestar

El Wavestar es un dispositivo de energía undimotriz desarrollado en Dinamarca por Wave Star Energy A/S. Se diseñó bajo el concepto de absorbedor puntual múltiple, por lo que se compone de una estructura elevada montada sobre postes, a la cual se integran flotadores semiesféricos distribuidos a lo largo de su base. Estos flotadores se mueven de forma independiente con el vaivén de las olas, y dicho movimiento se transmite a un sistema hidráulico que acciona un generador eléctrico, como se describe en las patentes US7956478B2 (Steenstrup, 2011) y US7694513B2 (Steenstrup *et al.*, 2010). La Figura 6 muestra el diseño de planta y el método de captación de energía de Wave Star.

Figura 6

a) Plataforma del Wavestar en el mar del Norte, en Dinamarca, y b) esquema del flotador



Fuente: “Balancing power output and structural fatigue of wave energy converters by means of control strategies” (p. 2246) [Imagen], por A. Ferri *et al.*, 201425 (<https://doi.org/10.3390/en7042246>), *Energies*, 7(4).

Durante su creación, el dispositivo fue probado en escalas de 1:40, 1:10 y 1:2 (Wave Star Energy, s.f./b). El prototipo a escala 1:2, instalado en el mar del Norte, incorporaba dos de los veinte flotadores contemplados para la versión a escala real (Wave Star Energy, s.f./a). Con esta configuración se logró generar una potencia de salida de 110 kW, mientras que el diseño completo tenía como objetivo alcanzar una potencia nominal de 600 kW.

Hoy día, el proyecto se encuentra inactivo, ya que en abril del 2016 fue descontinuado al no conseguir el autofinanciamiento requerido como contraparte del financiamiento otorgado por el programa EU Horizon 2020 para la construcción de un WEC de 1 MW en Bélgica, lo que llevó al cierre definitivo de Wave Star A/S (EUDP, s.f.). No obstante, el concepto tecnológico del Wavestar ha sido retomado en investigaciones recientes como las de Li *et al.* (2025), Luan *et al.* (2024) y Jahangir *et al.* (2025), donde se proponen sistemas híbridos que integran absorbedores puntuales con turbinas eólicas marinas en plataformas compartidas, aprovechando sinergias de infraestructura en instalación, amarre y transmisión eléctrica.

PB3 PowerBuoy

El PB3 PowerBuoy es un absorbedor puntual desarrollado por la empresa estadounidense Ocean Power Technologies (OPT). Su principio de funcionamiento se basa en el movimiento lineal relativo entre el flotador y el cuerpo central de la boya, el cual permanece fijo debido a su masa y al sistema de anclaje (Parsa *et al.*, 2017). Este desplazamiento vertical activa un sistema de PTO de accionamiento directo que convierte la energía mecánica del oleaje en energía eléctrica.

La energía generada se almacena localmente en un conjunto de baterías integrado en el dispositivo, lo que permite un suministro eléctrico continuo. El PB3 PowerBuoy cuenta con un diámetro de 2.65 m y una longitud total de 13.3 m, así como una capacidad de generación de hasta 15 kW (Parsa *et al.*, 2017; PRIMRE, 2026). La Figura 7 muestra el PB3 durante su instalación en el Puerto de San Antonio, previo a su despliegue en la bahía de Cartagena, Chile.

En la actualidad, el nivel de madurez tecnológica de 9 del PB3 lo convierte en un referente de madurez comercial en el campo de la energía undimotriz (PRIMRE, 2026). Su diseño está optimizado para aplicaciones de generación a pequeña escala, lo cual explica su potencia considerablemente menor a la de otros dispositivos como el CorPower C4 y el AWS. La filosofía de su diseño no apunta a maximizar la potencia por unidad, sino a garantizar la confiabilidad operativa a largo plazo, la facilidad de despliegue y la capacidad de autoalimentación de sistemas de monitoreo remoto en entornos oceánicos.

En contraste con otros dispositivos pensados para generar mayor potencia, el PB3 se concibió como un sistema autónomo, enfocado en el suministro de energía a comunidades remotas, boyas oceanográficas y sistemas de vigilancia marítima. Ha sido desplegado en proyectos como el Open Sea Lab en

Chile, donde alimentó sensores oceanográficos continuamente durante su operación en el océano Pacífico Sur (Cortés *et al.*, 2022). Sus principales diferenciadores competitivos son su autonomía energética y la capacidad de operar sin conexión a la red eléctrica, aunque su potencia limitada lo excluye de aplicaciones que requieran alimentar infraestructura de mayor consumo. No obstante, el PB3 abre la puerta a mercados nicho de alto valor en los que la confiabilidad supera en importancia el costo por kWh generado.

Figura 7

PB3 PowerBuoy previo al despliegue para pruebas



Fuente: Ocean Power Technologies deploys commercial PowerBuoy with energy storage [Fotografía], por Power Magazine, 2016 (<https://www.powermag.com/ocean-power-technologies-deploys-commercial-powerbuoy-energy-storage/>)

Dispositivos adicionales relevantes

Además de los cinco dispositivos seleccionados, otros absorbedores puntuales merecen mención por sus características notables:

- **Seabased WEC:** desarrollado por Seabased AB (Suecia), es un absorbedor puntual de un solo cuerpo con un generador lineal de imanes permanentes conectado al flotador. Su arquitectura de accionamiento directo elimina componentes mecánicos intermedios, lo que reduce los puntos de falla y simplifica su mantenimiento. Ha sido objeto de estudios numéricos comparativos por ser un referente en el diseño de generadores lineales en el contexto de los absorbedores puntuales (Jahangir *et al.*, 2025).
- **NEMOS WEC:** desarrollado por NEMOS GmbH (Alemania), es un absorbedor de dos cuerpos con un sistema de PTO hidráulico cuyo diseño modular apunta al despliegue en configuraciones de múltiples unidades. Se enfoca en ge-

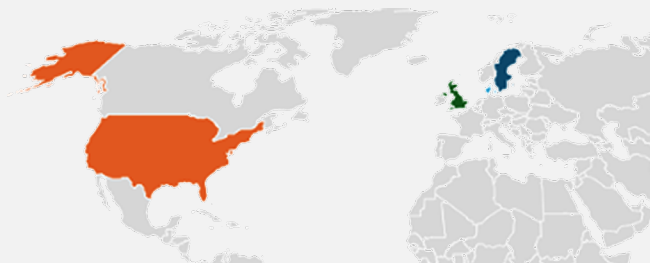
nerar energía para microrredes costeras y ha sido incluido en evaluaciones comparativas del ciclo de vida de WECs (Jahangir et al., 2025).

Análisis geográfico y madurez tecnológica

La Figura 8 muestra la ubicación geográfica de los dispositivos descritos y que cumplen con un nivel de madurez tecnológica mayor o igual a 6. Se concentran en Europa (especialmente Reino Unido, Suecia, Dinamarca y Portugal) y Estados Unidos (Hawái y Oregón), regiones que poseen zonas ideales para pruebas, como el mar del Norte, el Atlántico Norte y las costas de Hawái.

Figura 8

Ubicación geográfica de los absorbedores puntuales con TRLs ≥ 6

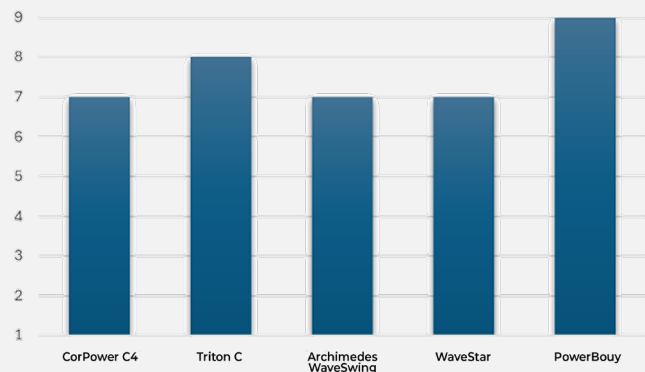


Fuente: elaboración propia (Sánchez, 2025)

La Figura 9 resume el nivel de madurez tecnológica de los cinco absorbedores puntuales analizados. Se observa que la mayoría se encuentra en el punto 7, con solo el PB3 en el 9, seguido del Triton-C en el 8. Esto indica que, si bien la tecnología ha avanzado significativamente, aún queda camino por recorrer para alcanzar la madurez comercial en aplicaciones de media y alta potencia.

Figura 9

Madurez tecnológica de los cinco absorbedores puntuales



Fuente: elaboración propia (Sánchez, 2025)

Discusión

El análisis comparativo de los cinco dispositivos elegidos, junto con la revisión de los otros absorbedores puntuales, evidencian la amplia gama de enfoques tecnológicos de los convertidores de energía undimotriz. Cada ejemplar refleja un diseño condicionado tanto por el entorno operativo como por su objetivo funcional. Esta diversidad no solo afecta la estandarización tecnológica, sino que limita la posibilidad de trasladar un diseño exitoso de una región oceánica a otra (Mahmoodi *et al.*, 2020; Guo y Ringwood, 2021), de modo que un dispositivo concebido para el mar del Norte puede no ser viable en el océano Pacífico debido a las diferencias en la batimetría y el clima de las zonas. Ejemplo de ello es el AWS, que al estar completamente sumergido necesita ser instalado cuando menos a una profundidad de 25 m para funcionar de manera óptima, lo cual restringe su aplicabilidad geográfica (AWS Ocean Energy Ltd, 2022).

En cuanto a los sistemas de PTO, se observa una tendencia hacia configuraciones de accionamiento directo, presentes en el AWS y el PB3. Este tipo de PTO elimina etapas intermedias de conversión mecánica, lo que simplifica el sistema y reduce los puntos de falla. Sin embargo, los generadores lineales de accionamiento directo presentan una mayor complejidad en la electrónica de potencia asociada y son más costosos de fabricar que las soluciones hidráulicas convencionales (Guo y Ringwood, 2021). Los PTO hidráulicos, como los del Triton-C, ofrecen más madurez industrial y permiten desacoplar la generación eléctrica de las fluctuaciones del oleaje mediante acumuladores de presión.

Un hallazgo clave es la evidente falta de documentación técnica accesible. Gran parte de la información disponible sobre los dispositivos es genérica, enfocada en el PTO o en pruebas de laboratorio, sin detalles de elementos críticos como la geometría del flotador, el acoplamiento mecánico, los materiales estructurales o los resultados cuantitativos de las pruebas de campo. Esta limitación se acentúa porque muchos proyectos son financiados por empresas privadas o agencias gubernamentales cuyos datos se consideran confidenciales. Resulta relevante distinguir entre la información declarada por el fabricante y aquella validada experimentalmente, ya que en varios de los 22 dispositivos seleccionados, la potencia nominal reportada no pudo corroborarse mediante fuentes independientes, lo que produce incertidumbre en la comparación. Esta opacidad dificulta la evaluación objetiva entre tecnologías y ralentiza la curva de aprendizaje del sector.

La mayoría de los 22 dispositivos analizados en la etapa comparativa aún se encontraban en niveles de madurez tecnológica inferiores a 7, lo cual se traduce en una escasez de patentes publicadas y una falta de resultados comparables entre prototipos a escala real. De los cinco dispositivos seleccionados para una revisión minuciosa, solo el PB3 ha alcanzado el máximo nivel de madurez, aunque con una potencia nominal de apenas 15 kW y un enfoque orientado a aplicaciones de monitoreo oceánico. El CorPower C4 y el AWS, los más prometedores en términos de potencia, se encuentran en el nivel 7, con miras a escalar al 8 en los próximos años de acuerdo con sus desarrolladores. Esta disparidad entre la madurez tecnológica y la potencia generada refleja la dificultad inherente del campo: los dispositivos más avanzados tecnológicamente tienden a ser los de menor potencia, mientras que los de mayor capacidad aún requieren validación adicional en entornos reales.

Finalmente, la tendencia a construir los dispositivos en torno a sitios y condiciones particulares incrementa los costos de diseño, validación y operación. Esta personalización contrasta con la trayectoria de maduración de la energía eólica marina, donde la estandarización de plataformas y componentes redujo de forma drástica el costo nivelado de energía (LCOE) en menos de dos décadas (IRENA, 2024). El LCOE actual de la energía undimotriz, significativamente superior al de la eólica o la solar, limita su competitividad en mercados de electricidad convencionales (Guo y Ringwood, 2021).

No obstante, el sector muestra señales de avance: la tendencia hacia sistemas híbridos, como los propuestos por Li *et al.* (2025) y Luan *et al.* (2024), que integran absorbedores puntuales con plataformas eólicas flotantes, podría reducir los costos de instalación y mantenimiento al compartir infraestructura. Asimismo, el ciclo de vida ambiental de los absorbedores puntuales ha comenzado a evaluarse de manera sistemática (Jahangir *et al.*, 2025), lo que representa un indicador de madurez del campo y un requisito previo para acceder a financiamiento climático internacional.

Conclusión

La revisión del estado del arte sobre los absorbedores puntuales de energía undimotriz revela una gran cantidad de desarrollos e iniciativas en diferentes partes del mundo. No obstante, casi todos han caído en abandono en etapas tempranas, quedando relegados a prototipos teóricos o cancelados a causa de desafíos técnicos o económicos. De los 59 dispositivos identificados

como absorbedores puntuales, solo 22 alcanzaron un TRL ≥ 6 y únicamente cinco cuentan con la documentación técnica suficiente para someterse a un análisis comparativo robusto.

Los dispositivos revisados presentan una heterogeneidad significativa en cuanto al diseño, PTO, escala de potencia y nivel de madurez. Si bien el PB3 es el único con un TRL de 9, está orientado a aplicaciones de baja potencia. El CorPower C4 y el AWS muestran el mayor potencial de escalamiento, con potencias nominales verificadas de 300 kW y 500 kW respectivamente, ambos con un TRL de 7. Esta disparidad entre madurez tecnológica y capacidad de generación refleja la dificultad de validar estos sistemas en entornos reales a escala comercial.

Desde el punto de vista metodológico, este trabajo presenta limitaciones propias de una revisión del estado del arte. Por ejemplo, la disponibilidad de información dependiente en gran medida de la documentación pública de los fabricantes introdujo una asimetría entre los dispositivos con mayor y menor transparencia de datos. A su vez, la función de puntuación ponderada empleada para la selección, aunque estructurada, no se validó mediante un proceso formal como el AHP, lo que representa una oportunidad de mejora para estudios futuros.

Como líneas prioritarias de investigación futura se identifican la estandarización de protocolos de prueba en entorno real, el desarrollo de metodologías de comparación que integren el LCOE como criterio de selección, la evaluación del ciclo de vida ambiental de los dispositivos más avanzados y la exploración de configuraciones híbridas que combinen absorbedores puntuales con plataformas eólicas flotantes. La colaboración entre las instituciones académicas, la industria y los organismos gubernamentales será clave para superar los retos de financiamiento y estandarización que actualmente limitan el despliegue comercial de estas tecnologías.

Referencias

- Ali, R., Meek, M. y Robertson, B. (2025). Submerged wave energy converter dynamics and the impact of PTO-mooring configuration on power performance. *Renewable Energy*, 243, 122525. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2025.122525>
- Asai, T. y Sugiura, K. (2021). Numerical evaluation of a two-body point absorber wave energy converter with a tuned inerter. *Renewable Energy*, 171, 217-226. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2021.02.021>
- AWS Ocean Energy. (2022). AWS wave energy converter takes shape in Glasgow ahead of testing. <https://awsoccean.com/2021/06/waveswing-takes-shape-in-glasgow/>

- AWS Ocean Energy Ltd. (s.f.). *Archimedes Waveswing*. <https://awsocean.com/archimedes-waveswing/>
- AWS Ocean Energy Ltd. (2022). *Advanced Archimedes Waveswing. WES novel wave energy converter. Stage 3 project. Public report*. https://www.waveenergyscotland.co.uk/media/a3tne2my/22-014r1-wes_nw31_aws_publicreport_v10.pdf
- CorPower Ocean. (s.f.). *Wave energy technology*. <https://corpowerocean.com/technology/>
- CorPower Ocean. (22 de diciembre del 2022). *CorPower C4 WEC at quayside 'launchpad'*. <https://corpowerocean.com/corpower-c4-wec-at-quayside-launchpad/>
- Cortés, J., Lucero, F., Suarez, L., Escauriaza, C., Navarrete, S.A., Tampier, G., Cifuentes, C., Cienfuegos, R., Manriquez, D., Parragué, B., Osia-dacz, N. y Finke, R. (2022). Open Sea Lab: an integrated coastal ocean observatory powered by wave energy. *Journal of Marine Science and Engineering*, 10(9), 1249. <https://doi.org/10.3390/jmse10091249>
- Cummins, W.E. (25-27 de enero de 1962). The impulse response function and ship motions [Ponencia]. *Symposium on ship theory*. Universidad de Hamburgo, Hamburgo, Alemania. https://dome.mit.edu/bitstream/handle/1721.3/49049/DTMB_1962_1661.pdf
- Energy Technology Development and Demonstration Programme (EUDP) (s.f.). *Final report (Effektivisering af bølgeenergi vha Tryksatte cyklontanke [Efficiency improvement of wave energy via pressurized cyclone tanks])*. https://eudp.dk/files/slutrapporter/slutrapport_tryksat_cyklontank_eudp_2015-i.pdf
- Fard, H.R., Mahmoodi, K. y Vaghefi, M. (2025). Geometry optimization of a two-body heaving point absorber wave energy converter based on the long-term Oman Gulf wave climate. *Renewable Energy*, 253, 123498. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2025.123498>
- Ferri, F., Ambühl, S., Fischer, B. y Kofoed, J.P. (2014). Balancing power output and structural fatigue of wave energy converters by means of control strategies. *Energies*, 7(4), 2246-2273. <https://doi.org/10.3390/en7042246>
- Guo, B. y Ringwood, J.V. (2021). A review of wave energy technology from a research and commercial perspective. *IET Renewable Power Generation*, 15(14), 3065-3090. <https://doi.org/10.1049/rpg2.12302>
- Ingram, E. (29 de agosto del 2023). *Oscilla Power prepares to launch Triton-C wave energy converter off Hawaii*. Renewable Energy World. <https://www.renewableenergyworld.com/hydro-power/tidal-wave-energy/oscilla-power-prepares-to-launch-triton-c-wave-energy-converter-off-hawaii/>
- International Electrotechnical Commission (IEC). (2019). *IEC TS 62600-1: Marine energy-wave, tidal and other water current converters-Part 1:*

- Terminology*. <https://cdn.standards.iteh.ai/samples/17411/4a6f300d-22cc4777ac323bc3223d74f7/IEC-TS-62600-1-2011.pdf>
- International Renewable Energy Agency (IRENA). (2014). *Ocean energy: technology readiness, patents, deployment status and outlook*. https://www.irena.org/-/media/Files/IRENA/Agency/Publication/2014/IRENA_Ocean_Energy_report_2014.pdf
- International Renewable Energy Agency (IRENA). (2020). *Fostering a blue economy: offshore renewable energy*. https://www.irena.org/-/media/Files/IRENA/Agency/Publication/2020/Dec/IRENA_Fostering_Blue_Economy_2020.pdf
- International Renewable Energy Agency (IRENA). (2024). *World energy transitions outlook 2024*. https://www.irena.org/-/media/Files/IRENA/Agency/Publication/2024/Nov/IRENA_World_energy_transitions_outlook_2024.pdf
- Jahangir, M.H., Tayebi, M. y Najafabadi, S.G. (2025). A comparative life cycle assessment of three wave energy converters with an economic-environmental approach. *Ocean Engineering*, 329, 121080. <https://doi.org/10.1016/j.oceaneng.2025.121080>
- Jin, S., Zheng, S. y Greaves, D. (2022). On the scalability of wave energy converters. *Ocean Engineering*, 243, 110212. <https://doi.org/10.1016/j.oceaneng.2021.110212>
- Li, M., Wei, C., Li, L., Yuan, Z., Liu, Y. y Xue, G. (2025). Numerical study of hybrid systems combining different WECs microarrays based on the TGL semi-submersible floating platform. *Frontiers in Marine Science*, 12, 1563310. <https://doi.org/10.3389/fmars.2025.1563310>
- Luan, Z., Chen, B., He, G., Cui, T., Ghassemi, H., Zhang, Z. y Liu, C. (2024). Research on wavestar-like wave energy converter arrays with a truss-type octagonal floating platform in the South China Sea. *Energy*, 313, 134070. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2024.134070>
- Lundbäck, S. (2016). *Energy transforming unit and energy transforming system comprising such a unit* (U.S. Patent No. US20130236347A1). U.S. Patent and Trademark Office. <https://patents.google.com/patent/US20130236347A1/en?q=US20130236347A1>
- Mahmoodi, K., Ghassemi, H. y Razminia, A. (2020). Performance assessment of a two-body wave energy converter based on the Persian Gulf wave climate. *Renewable Energy*, 159, 519-537. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2020.06.071>
- Mundon, T.R. (2022). *Drivetrain for a wave energy converter* (U.S. Patent No. US11293398B2). U.S. Patent and Trademark Office. <https://patents.google.com/patent/US11293398B2/en>
- Oscilla Power, Inc. (2023). *Oscilla Power - model Triton-C - wave energy converter*. Energy XPRT. <https://www.energy-xprt.com/products/oscilla-power-model-triton-c-wave-energy-converter-911070>

- Oscilla Power, Inc. (s.f./a). *Technology*. <https://www.oscillapower.com/technology>
- Oscilla Power, Inc. (s.f./b). *Triton-C*. <https://www.oscillapower.com/triton-c-1>
- Parsa, K., Mekhiche, M., Sarokhan, J. y Stewart, D. (2017). Performance of OPT's commercial PB3 PowerBuoyTM during 2016 ocean deployment and comparison to projected model results. *Proceedings of the ASME 2017 36th International Conference on Ocean, Offshore and Arctic Engineering. Volume 10: Ocean Renewable Energy (V010T09A021)*. American Society of Mechanical Engineers. <https://doi.org/10.1115/OMAE2017-62008>
- Power Magazine. (1 de septiembre del 2016). *Ocean Power Technologies deploys commercial PowerBuoy with energy storage* [Fotografía]. <https://www.powermag.com/ocean-power-technologies-deploys-commercial-powerbuoy-energy-storage/>
- PRIMRE. (2026). Recuperado el 10 de noviembre del 2025. <https://openei.org/wiki/PRIMRE>
- Steenstrup, P.R. (2011). *Installation comprising a wave power apparatus and a support structure therefor* (U.S. Patent No. US7956478B2). U.S. Patent and Trademark Office. <https://patents.google.com/patent/US7956478B2/en?q=US7956478B2>
- Steenstrup, P.R., Hansen, N.A. y Hansen, K. (2010). *Wave power apparatus comprising a plurality of arms arranged to pivot with a mutual phase shift* (U.S. Patent No. US7694513B2). U.S. Patent and Trademark Office. <https://patents.google.com/patent/US7694513B2/en?q=US7694513B2>
- The European Marine Energy Centre LTD (EMEC). (s.f.). *Wave devices*. <https://www.emec.org.uk/marine-energy/wave-devices/>
- Water Power Technologies Office (WPTO). (2022). *2022 Project Peer Review*. <https://doi.org/10.2172/1971607>
- Wave Star Energy. (s.f./a). *Technology*. <https://wavestarenergy.com/about/>
- Wave Star Energy. (s.f./b). *Wave Star. Unlimited Clean Energy*. <https://wavestarenergy.com/>