

UNIVERSIDAD TÉCNICA DEL NORTE
FACULTAD DE INGENIERÍA EN CIENCIAS APLICADAS
CARRERA DE ELECTRICIDAD



**ANÁLISIS COMPARATIVO DE SISTEMAS DE CONVERSIÓN DE ENERGÍA DE LAS
OLAS EN ENERGÍA ELÉCTRICA PARA LA APLICACIÓN EN EL ECUADOR**

Trabajo de grado presentado ante la Ilustre Universidad previo a la obtención del título de
Ingeniera Eléctrica

AUTOR:

Jessica Maribel Suárez Cadena

DIRECTOR:

Mgs. Julio Esteban Guerra Masson

Ibarra - Ecuador

2024



**UNIVERSIDAD TÉCNICA DEL NORTE
BIBLIOTECA UNIVERSITARIA**

**AUTORIZACIÓN DE USO Y PUBLICACIÓN
A FAVOR DE LA UNIVERSIDAD TÉCNICA DEL NORTE**

1. IDENTIFICACIÓN DE LA OBRA

En cumplimiento del Art. 144 de la Ley de Educación Superior, hago la entrega del presente trabajo a la Universidad Técnica del Norte para que sea publicado en el Repositorio Digital Institucional, para lo cual pongo a disposición la siguiente información:

DATOS DE CONTACTO	
CÉDULA DE IDENTIDAD:	1004708028
APELLIDOS Y NOMBRES:	Jessica Maribel Suárez Cadena
DIRECCIÓN:	Imantag
EMAIL:	jmsuarezc@utn.edu.ec
TELÉFONO MÓVIL:	0961320260

DATOS DE LA OBRA	
TÍTULO:	“ANÁLISIS COMPARATIVO DE SISTEMAS DE CONVERSIÓN DE ENERGÍA DE LAS OLAS EN ENERGÍA ELÉCTRICA PARA LA APLICACIÓN EN EL ECUADOR”
AUTOR (ES):	Jessica Maribel Suárez Cadena
FECHA DE APROBACIÓN: DD/MM/AAAA	08 de marzo de 2024
PROGRAMA:	<input checked="" type="checkbox"/> PREGRADO <input type="checkbox"/> POSGRADO
TITULO POR EL QUE OPTA:	Ingeniera Eléctrica
ASESOR /DIRECTOR:	MSc. Julio Esteban Guerra Masson

2. CONSTANCIA

El autor manifiesta que la obra objeto de la presente autorización es original y se la desarrolló, sin violar derechos de autor de terceros, por lo tanto, la obra es original y que es el titular de los derechos patrimoniales, por lo que asume la responsabilidad sobre el contenido de la misma y saldrá en defensa de la Universidad en caso de reclamación por parte de terceros.

Ibarra, a los 08 días del mes de marzo del 2024

AUTOR:



Jessica Maribel Suárez Cadena

C.I. 100470802-8



UNIVERSIDAD TÉCNICA DEL NORTE
FACULTAD DE INGENIERÍA EN CIENCIAS APLICADAS

CERTIFICADO DEL DIRECTOR DE TRABAJO DE INTEGRACIÓN
CURRICULAR

Yo, MSc. Julio Esteban Guerra Masson en calidad de director de la señorita estudiante Suárez Cadena Jessica Maribel, certifico que ha culminado con las normas establecidas en la elaboración del Trabajo de Integración Curricular con el tema: "ANÁLISIS COMPARATIVO DE SISTEMAS DE CONVERSIÓN DE ENERGÍA DE LAS OLAS EN ENERGÍA ELÉCTRICA PARA LA APLICACIÓN EN EL ECUADOR".

Para la obtención del título de Ingeniera Eléctrica, aprobando la defensa, impresión y empastado.

MSc. Julio Esteban Guerra Masson

DIRECTOR DE TRABAJO DE INTEGRACIÓN CURRICULAR

DEDICATORIA

Primeramente, quiero dedicar este trabajo a Dios, por llenarme de valor, salud y fuerza para poder llegar a concluir una meta más.

También se lo dedico mi familia, quienes me han apoyado y guiado cada día, convirtiéndose en un pilar fundamental durante el desarrollo de mi formación como profesional, ya que siempre han ido forjándome con valores de responsabilidad, humanidad y humildad, los cuáles han sido esenciales tanto en el ámbito estudiantil como personal, así mismo agradezco por inspirarme cada día y ayudarme con todos los recursos necesarios para poder llegar a ser una profesional logrando así cumplir una meta más.

AGRADECIMIENTO

Agradezco a Dios por guiarme y haberme dado la suficiente fuerza para no rendirme ante los obstáculos que se han presentado a lo largo de todo el trayecto.

Asi mismo quiero agradecer a mi familia quienes me han apoyado y confiado en mí, motivándome siempre para continuar con mis estudios y metas personales.

Finalmente quiero agradecer a los docentes de la carrera de Electricidad, especialmente a mi tutor el MSc. Julio Esteban Guerra Masson, quien con su paciencia y su valioso conocimiento ha sabido guiarme durante la elaboración de este trabajo logrando concluirlo satisfactoriamente.

Tabla de contenido

RESUMEN	xii
ABSTRACT	xii
CAPÍTULO I.....	1
INTRODUCCIÓN	1
Planteamiento del problema	1
Formulación del Problema	1
Objetivo General	2
Objetivos Específicos	2
Alcance.....	2
Justificación.....	3
CAPITULO II	5
Contextualización.....	5
Energías Renovables	6
2.1. Energía Oceánica	7
2.1.1. Energía mareomotriz.....	7
2.1.2. Energía Maremotérmica	8
2.1.3. Energía Osmótica.....	9
2.2. Olas del mar.....	10
2.2.1. Clasificación de las olas.....	11

2.2.2. Parámetros/Características de las Olas	12
2.2.3. Fenómenos de las Olas	13
2.2.4. Densidad de las Olas.....	13
2.3. Energía Undimotriz.....	14
2.3.1. Características de la energía undimotriz.....	16
2.3.2. Aplicaciones de la Energía undimotriz.....	18
2.4. Perfil costero Ecuatoriano.....	19
2.4.1. Caracterización del espacio marino costero.....	20
CAPÍTULO III	22
3.1. Metodología.....	22
3.2. Diagrama de proceso	23
3.2.1. Criterios de Búsqueda.....	25
3.2.2. Criterios de Inclusión y exclusión	26
3.3. Herramientas y Materiales	29
3.3.1. Programas computacionales y bases bibliográficas.....	29
3.3.2. Ecuaciones matemáticas para el cálculo de la potencia presente el borde costero	30
3.3.3. Ecuaciones matemáticas para el cálculo del rendimiento del SSG y la energía generada	32
CAPITULO IV	34
4.1. Wave Energy Converters	34
4.2. Columna de Agua Oscilante (OWC)	34

4.2.1. Dispositivos de tipo OWC disponibles para la conversión de energía.....	36
4.3. Sistemas de cuerpo oscilante (OB)	43
4.3.1. Descripción de los sistemas de tipo OB	44
4.4. Sistemas de Desbordamiento	54
4.4.1. Descripción de Dispositivos de tipo desbordamiento.....	54
4.5. Comparativa y selección del dispositivo WEC.....	57
4.5.1. Análisis entre el dispositivo SeaPower y el Pontoon Power	57
4.5.2. Análisis comparativo de los tres tipos de WECs seleccionados	58
4.6. Cuantificación de la Energía en el Ecuador	60
4.6.1. Oleaje presente en el borde costero continental.....	60
4.6.2. Cálculo de la Potencia por metro de frente de Ola en el borde costero continental	62
4.6.3. Cuantificación del rendimiento de potencia del SSG	64
4.6.4. Cuantificación de energía eléctrica generada por el SSG	67
Conclusiones	68
Recomendaciones.....	69
Referencias	70

Índice de figuras

Figura 1. Formación de las mareas por medio del efecto gravitatorio de la Luna	7
Figura 2. Central maremotérmica situada en el mar	9
Figura 3. Generación de energía eléctrica por medio del proceso de Osmosis.....	10
Figura 4. Parámetros de las Olas	12
Figura 5. Potencial de las Olas alrededor del mundo	14
Figura 6. Origen de las Olas por medio de la interacción del viento	15
Figura 7. Energía mecánica contenida en las Olas	15
Figura 8. Caracterización del Oleaje suscitado en los diferentes meses del año 2020	20
Figura 9. Procedimiento para realizar la revisión sistemático	24
Figura 10. Diagrama de flujo PRISMA empleado para el filtrado de la información	28
Figura 11. Principio de acción de los dispositivos OWC	35
Figura 12. Esquema de las turbinas de aire autorrectificantes	35
Figura 13. Principio estructural básico de los cuerpos oscilantes	43
Figura 14. Transmisión hidráulica/neumática	44
Figura 15. Estructura básica de los sistemas de desbordamiento	54
Figura 16. Boyas desplegadas a lo largo de la zona costera	60
Figura 17. Modelo Operacional INOCAR-SWAN: Grilla de Ecuador	61
Figura 18. Altura promedio de las olas en el año 2023.....	62
Figura 19. Altura significativa del año 2023.....	64

Índice de Tablas

Tabla 1. Documentos obtenidos con los diferentes criterios de búsqueda.	26
Tabla 2. Criterios de inclusión y exclusión para la selección de documentos.....	27
Tabla 3. Plantas y dispositivos de tipo OWC	42
Tabla 4. Dispositivos y prototipos de tipo OB.....	53
Tabla 5. Dispositivos de tipo desbordamiento.....	56
Tabla 6. Comparativa entre los WEC de tipo Cuerpo Oscilante	57
Tabla 7. Comparativa de los diferentes tipos de WECs	59
Tabla 8. Alturas y períodos promedio de las olas en el año 2023.	62
Tabla 9. Potencia por cada metro de frente de ola suscitado en el año 2023	64
Tabla 10. Flujo de potencia de las olas de cada mes del año.....	65
Tabla 11. Potencia capturada por el SSG.....	66
Tabla 12. Energía generada por el SSG.....	67

RESUMEN

Durante los últimos años las energías renovables han caído en la dependencia de un solo recurso de generación eléctrica (hidroenergía) que cada año se va afectado significativamente a consecuencia de las variaciones en los patrones de lluvia, provocando un desabastecimiento en la demanda de energía eléctrica. El presente trabajo tiene por objetivo la comparativa de los sistemas de conversión de energía de las olas en energía eléctrica con el fin de conocer nuevas fuentes de generación. Para dicha comparativa se recopiló información obtenida de la base bibliográfica Scopus a través de un criterio de búsqueda avanzada y que fue filtrada por medio de los criterios de inclusión y exclusión con el objetivo de seleccionar la información más relevante para dicho estudio. Una vez realizada la comparativa se seleccionó el sistema más factible en base al análisis de la potencia nominal, características y principales ventajas y desventajas. Finalmente, se recolectó la información de los parámetros del oleaje presente en el borde costero continental durante el año 2023, dicha información fue extraída de la página del INOCAR, en donde se alberga los datos tanto de altura y período de las olas indispensables para calcular el flujo de potencia presente en esas olas el cual aborda los 18,41 kW/m en promedio y que teóricamente puede ser capturado por el dispositivo seleccionado para finalmente ser transformado en energía eléctrica. Como resultado se obtuvo que el dispositivo más factible es el Seawave Slot Cone Generator (SSG) debido a su gran potencia nominal, su adaptación a cualquier lugar de implementación y su capacidad de almacenamiento de agua ante la presencia de olas bajas lo que evita la interrupción de generación eléctrica, se estima que este dispositivo puede capturar hasta 335,40 kW con un ancho de captura de 10m que al ser transformado a energía eléctrica se obtendría 117,38 kW.

Palabras clave: Wave Energy Converters, energía undimotriz, energía eléctrica, Conversión de energía undimotriz.

ABSTRACT

In recent years, renewable energies have become dependent on a single electricity generation resource (hydro energy) which is significantly affected each year due to variations in rainfall patterns, leading to a shortage in electricity supply. This study aims to compare wave energy conversion systems for electricity generation in order to explore new sources of generation. To conduct this comparison, information was gathered from the Scopus bibliographic database using advanced search criteria and filtered through inclusion and exclusion criteria to select the most relevant information for the study. After conducting the comparison, the most feasible system was selected based on analysis of nominal power, characteristics, and main advantages and disadvantages. Finally, information on wave parameters along the continental coastline during the year 2023 was collected from the INOCAR website, including data on wave height and period essential for calculating power flux in these waves, which averages 18.41 kW/m and theoretically can be captured by the selected device and transformed into electrical energy. The results show that the most feasible device is the Seawave Slot Cone Generator (SSG) due to its high nominal power, adaptability to any implementation location, and its capacity to store water in the presence of low waves, thus avoiding interruptions in electricity generation. It is estimated that this device can capture up to 335.40 kW with a capture width of 10m, which when converted into electrical energy would yield 117.38 kW.

Keywords: Wave Energy Converters, wave power, electrical energy, wave energy conversion.

CAPÍTULO I

INTRODUCCIÓN

Análisis comparativo de sistemas de conversión de energía de las olas en energía eléctrica para la aplicación en el Ecuador

Planteamiento del problema

Durante los últimos años la matriz energética en el Ecuador ha alcanzado una importante transformación, centrando la mayor parte de su generación (92%) en fuentes hidroeléctricas y apenas el 8% en otro tipo de fuentes (7% térmica y 1% no convencionales), con lo cual se ha logrado satisfacer la demanda eléctrica requerida satisfactoriamente, sin embargo, ante el constante crecimiento de la población, su consumo ha sufrido un incremento del 30,9% entre el año 2011 y 2021, por lo que satisfacer esta demanda se torna cada vez más difícil [1].

Así mismo, la falta de diversificación de las fuentes de energía ha conllevado a la profunda dependencia de un solo recurso (hidroenergía), motivo por el cual no se puede garantizar la seguridad energética ya que, gracias al constante cambio climático en el país, la capacidad hidroeléctrica puede ser afectada significativamente por las variaciones en los patrones de lluvia, debido a que altera los caudales de los ríos, generando un desabastecimiento difícil de solventar ya que es imposible contar con fuentes de energías diversas que permitan mitigar estos riesgos.

Formulación del Problema

¿Qué sistema de conversión de energía de las olas (Wave Energy Converter) en energía eléctrica es el más adecuado para su aplicación en el país?

Objetivo General

Realizar un análisis comparativo de los sistemas de conversión de energía de las olas en energía eléctrica para la determinación de un sistema aplicable en el Ecuador, mediante una revisión sistemática de tecnologías.

Objetivos Específicos

1. Analizar las principales características de la energía undimotriz y sus aplicaciones.
2. Describir las tecnologías de los sistemas Wave Energy Converter disponibles para la conversión de la energía undimotriz en energía eléctrica.
3. Realizar una comparativa de los sistemas Wave Energy Converter para la selección de un sistema que se adapte al país.

Alcance

El presente trabajo de investigación tiene como propósito establecer un sistema Wave Energy Converter (convertidor de energía undimotriz en energía eléctrica) efectivo y viable para su aplicación en el Ecuador, por lo que inicialmente se realizará una amplia investigación bibliográfica en literatura de especialidad como bases bibliográficas, revistas indexadas y artículos científicos, etc., de donde se obtendrá información acerca de la energía undimotriz (energía de las olas), sus parámetros y características, así como también una descripción detallada de los avances que ha sufrido a lo largo de los años tanto a nivel global como en el país.

Posteriormente se describirá las tecnologías de los sistemas Wave Energy Converter (WEC) para realizar una comparativa en donde se seleccionará el sistema más efectivo y viable, que se adapte correctamente a las condiciones y características propias del oleaje en las costas ecuatorianas.

Finalmente se determinará el potencial de energía eléctrica que producirá las costas ecuatorianas por medio del sistema seleccionado, dicho cálculo se realizará con la información proporcionada por los centros de investigación oceanográfica (Instituto Oceanográfico y Antártico de la Armada y Fundemar).

Justificación

Durante los últimos años el Ecuador ha ido cambiando su matriz energética a través de fuentes renovables y amigables con el ambiente, siendo la hidráulica la principal fuente de generación de energía actualmente, sin embargo, con el transcurso de los años, es muy difícil cubrir toda la demanda requerida, por lo que es indispensable contemplar otras fuentes de generación alternas, como la undimotriz, debido a que esta energía aún no ha sido explotada en el país, sin embargo, existen artículos como el “Aprovechamiento de la energía undimotriz en el Ecuador” [2] en donde se establece “Según los estudios y cálculos realizados sobre el potencial energético del mar ecuatoriano, se llegó a la conclusión que tiene un gran potencial“, lo que demuestra que en el Ecuador es posible aprovechar el recurso marino para la generación de energía eléctrica.

El presente trabajo de investigación se encuentra enfocado en fomentar el aprovechamiento de la energía undimotriz como fuente de generación eléctrica, lo que contribuirá a evitar posibles desabastecimientos a futuro en el Ecuador, debido a que esta fuente posee un gran potencial energético y es considerada como una energía limpia lo cual a su vez contribuye a la reducción de la contaminación atmosférica.

La conversión de esta energía en electricidad se lo realiza por medio de los sistemas de conversión de las olas (Wave Energy Converter) sin embargo, para lograr una óptima extracción de este recurso es necesario seleccionar el sistema que mejor se adapte a las condiciones del perfil costero, motivo por el cual esta comparativa dará a conocer el sistema más efectivo y viable para la aplicación en las costas ecuatorianas

CAPITULO II

MARCO TEÓRICO

Contextualización

La energía es un componente fundamental para el desarrollo económico y social de la población [3], sin embargo, su alto consumo es considerado como uno de los problemas más importantes y difíciles de solventar [4], ya que cada año la demanda de este recurso sufre un incremento debido al crecimiento de la población [5], motivo por el cual se ha emprendido la búsqueda de nuevas fuentes y sistemas de producción [6].

Una de las fuentes que ha tomado mayor fuerza son las renovables, debido a que son capaces de regenerarse por medios naturales, facilitándoles la posibilidad de satisfacer netamente la demanda de abastecimiento de energía [7], pero su desarrollo aún se encuentra en un punto crítico ya que no han llegado a su fase de madurez para que su producción sea rentable económicamente [8]. Uno de los casos es la energía undimotriz la cual posee un enorme potencial energético a nivel mundial pero que aún no ha sido aprovechado [9].

Según Fernández [10], establece que la energía undimotriz “no es competitiva en el mercado eléctrico actual, pero si bastante influyente” (pág. 94), por lo que ante la búsqueda de aprovechar este recurso, diversos países como Noruega, Portugal, Reino Unido, España y Dinamarca han desarrollado varios equipos pre comerciales [9], viéndose reflejado este avance en Australia, en donde se dio inicio al proyecto de Carnegie Wave Energy en Perth, el cual por medio de la fuerza de las olas a través de una tecnología basada en boyas, suministra electricidad al Departamento de Defensa de Australia y a su base naval más grande HMAS Stirling [10].

El Ecuador gracias a su gran inversión económica ha logrado transformar la matriz energética notablemente [11], por lo que actualmente la generación de energía se produce gracias fuentes renovables (hidroeléctricas, fotovoltaicas, eólicas y termoeléctricas) y no renovables (combustibles fósiles) [12], las cuales en el año 2021 generaron 32206,88GWh, encontrándose disponibles para el sistema de distribución 26450,77 GWh de lo cual 16174,89 GWh (86.40%) fueron consumidos [13], sin embargo, en el año 2022 de los 27638,49 GWh disponibles en el sistema de distribución, fueron consumidos 23975,90 GWh (86,75%) [14]. Estos datos mencionados anteriormente reflejan un incremento con respecto a los obtenidos en el 2021 por lo que se debe considerar la generación de energía de las fuentes renovables aun no aprovechadas.

Uno de los casos es la energía marina, ya que Ecuador posee un perfil costero con una extensión de 670 km aproximadamente [15] el cual por medio de Sistemas WEC se aprovecharía su energía [16].

Energías Renovables

Las energías renovables se obtienen por medio de recursos naturales propios de la naturaleza (sol, agua, aire, etc.) los cuales son considerados inagotables y renovables, este tipo de energía busca sustituir a las fuentes convencionales como el petróleo, gas y el carbón [17].

La energía marina se origina por medio de diferentes procesos naturales que suceden en su propio ambiente, por lo que se clasifica a las energías renovables marinas en energía eólica, bioenergía, geotérmica y oceánica [18].

2.1. Energía Oceánica

Los mares y océanos representan el 71% de la superficie terrestre, en donde el 97% del agua se encuentra contenida en los océanos [19]. La International Renewable Energy Agency (IRENA) establece que los océanos poseen un alto potencial energético por lo que se estima que la energía contenida en los océanos podría generar hasta 130 000 TWh de electricidad anualmente, sin embargo, las tecnologías para su extracción aún se encuentran en su fase inicial [20].

El océano posee diferentes fuentes de energía gracias a los fenómenos naturales que se originan en este como las mareas, corrientes, gradiente térmico, gradiente salino y finalmente el oleaje [21].

2.1.1. Energía mareomotriz

La energía mareomotriz se obtiene a partir de las mareas las cuales se producen por el desnivel de las corrientes marinas, sin embargo, este fenómeno se origina por la acción gravitatoria de la luna y el sol con respecto a la Tierra [22]. En la Figura 1 se puede observar la formación de las mareas gracias al efecto gravitatorio de la luna atrayendo al agua marina produciendo un desnivel.

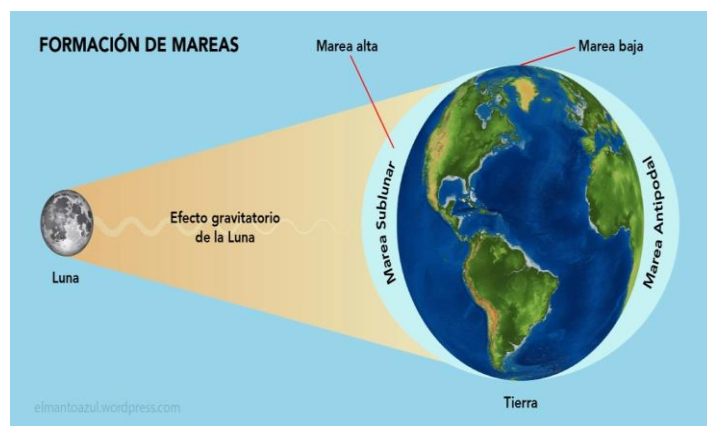


Fig. 1. Formación de las mareas por medio del efecto gravitatorio de la Luna [23].

El aprovechamiento de esta energía se lo puede realizar por medio de centrales mareomotrices las cuales están formados de turbinas y alternadores que transforman la energía cinética y potencial contenida en las mareas en energía eléctrica [24].

2.1.2. Energía Maremotérmica

Conocida también como Conversión de Energía Térmica (OTEC), este tipo de energía aprovecha la diferencia de temperatura generada entre la superficie del océano (más caliente) y las aguas profundas (más fría) para generar electricidad, esta diferencia de temperaturas es provocada gracias a la radiación solar la cual generalmente penetra aproximadamente 100m de profundidad, sin embargo, su propagación puede alcanzar los 1000m dependiendo de su turbidez razón por la cual el mar es considerado como un gran recolector solar y almacenador más grande del mundo [25].

El océano está compuesto por dos capas separadas entre sí por la termoclina, la primera capa (superior) se encuentra relativamente caliente y abarca una profundidad de hasta 200m, en esta capa el agua posee una densidad y salinidad menor que las aguas profundas, seguidamente se localiza la termoclina que divide a las aguas superficiales de las más frías (profundas) y cuya profundidad es de hasta 400m, finalmente se encuentra la capa inferior que posee una profundidad de 1000m y su temperatura va decreciendo continuamente hasta llegar a los 4°C, sin embargo su profundidad puede llegar a los 1500m o más en donde su temperatura también decrecerá paulatinamente [26]. En la figura 2 se puede observar una central maremotérmica con sus componentes principales la cual se encuentra situada en el mar para producir energía eléctrica.

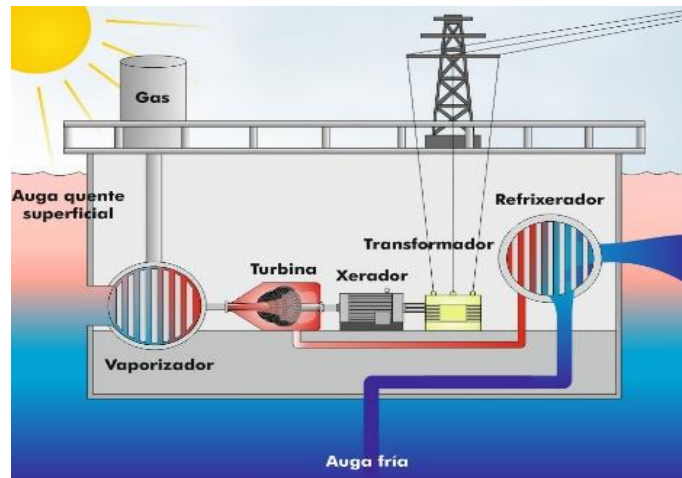


Fig. 2. Central maremotérmica situada en el mar [27]

2.1.3. Energía Osmótica

Esta energía consiste en el aprovechamiento de la energía química que se libera al mezclarse naturalmente dos soluciones con diferente contenido de salinidad [28]. Este potencial se aprovecha por medio de dos métodos:

- Ósmosis por presión retardada (OPR): Combina el agua dulce y salada por medio de una membrana semipermeable que obstruye el paso de la sal y solo permite el paso del flujo del agua dando origen a una diferencia de presión la cual se usa para producir energía eléctrica.
- Electrodialísis inversa (RED): El principio de funcionamiento es similar al OPR, pero a diferencia de este, la electrodialísis permite el paso de la sal y obstruye el paso del agua, este método en un inicio (electrólisis estándar) presentaba problemas ya que los sólidos suspendidos incrementaban la resistencia de la membrana debido a las cargas eléctricas que portaban, sin embargo, este problema fue resuelto invirtiendo la polaridad del potencial eléctrico aplicado en intervalos de tiempos determinados [29]. En la figura 3 se observa el proceso de generación de energía a partir de la energía osmótica u energía azul.

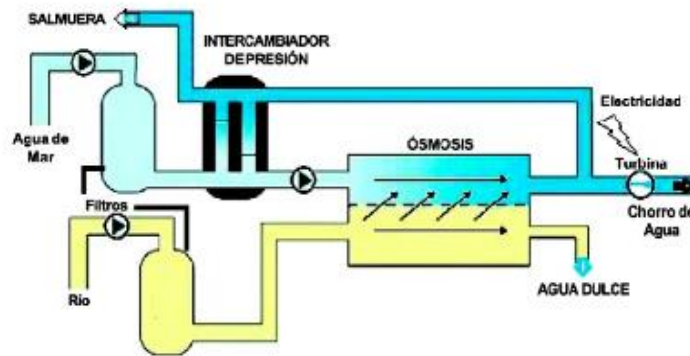


Fig. 3. Generación de energía eléctrica por medio del proceso de Osmosis [30]

2.2. Olas del mar

Las ondas del mar se desplazan grandes distancias hasta llegar a la costa o zonas pocas profundas en donde se rompen o quiebran produciendo que la ola toque fondo y libere toda su energía, gracias a este desplazamiento y almacenamiento de energía con pocas pérdidas estas ondas presentan una densidad energética mayor que las demás fuentes de energía como la solar y eólica [9].

Las olas poseen 4 fenómenos que pueden ser usados para la generación de electricidad, el primero es la fuerza de desplazamiento de la ola lo cual depende de su velocidad, el segundo es la energía potencial que depende de su altura, el tercero es el intervalo de tiempo o período del oleaje y finalmente también se puede aprovechar la variación de la presión originada por la diferencia de la profundidad [31]. Sin embargo, las olas al acercarse a la costa pierden su velocidad y longitud de onda debido al desplazamiento y rozamiento de las masas de agua, pero gana energía potencial por lo que se dice que una gran cantidad de energía se pierde por la fricción y turbulencia debido a los desplazamientos de agua [32].

2.2.1. Clasificación de las olas

Las olas se forman a partir de diversos tipos de ondas debido a que la energía que contienen depende de este parámetro.

a) De acuerdo con el movimiento de la onda se clasifican en:

- ✓ Ondas estacionarias: Poseen uno o varios puntos nodales en donde no existe movimiento y uno o varios puntos ventrales donde el movimiento es máximo.
- ✓ Ondas progresivas: Se producen en la superficie por acción del viento o en el interior gracias a las masas oceánicas, en este tipo de olas sus puntos varían tanto en tiempo como en espacio [16].

b) De acuerdo con la longitud de la onda pueden ser:

- ✓ Ondas largas: Son ondas solitarias que se desplazan desde el epicentro del océano hasta las costas, estas ondas son originadas principalmente por los terremotos costeros.
- ✓ Ondas Cortas: Poseen una longitud de onda menor a la profundidad del mar por donde se propagan y son originadas por la acción del viento [16].

c) De acuerdo con la fuerza que las genera pueden ser:

- ✓ Ondas libres: Se originan por acciones instantáneas lo que deja que la ola se propague libremente.
- ✓ Ondas forzadas: Se originan por una acción continuada.

d) Dependiendo de su duración (período) pueden ser:

- ✓ Olas de largo período: Son las olas cuyo período de duración es de 5min hasta 24h
- ✓ Ondas de gravedad: Olas con un período de 1 seg a 30 seg.
- ✓ Olas capilares: Son las olas con una duración de menos de 0,1 seg. [16].

2.2.2. Parámetros/Características de las Olas

A través de los parámetros de las olas es posible calcular la energía y potencia que se encuentra contenida en las olas [33]. En la figura 4 se muestra las principales características de las olas del mar.

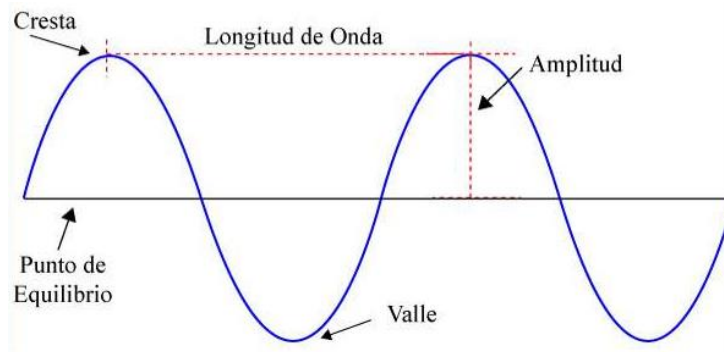


Fig. 4. Parámetros de las Olas [34]

Según Espinosa [33] las características de las olas son:

- Cresta: Es el punto más alto de la onda.
- Valle: Es el punto más bajo de la onda.
- Altura de onda (H): Es la longitud que hay entre el valle y la cresta de la ola.
- Longitud: Es la longitud que existe entre dos picos consecutivos es decir la distancia que hay de valle a valle o cresta a cresta.
- Período: Es el tiempo que se demora en recorrer la longitud de onda una cresta o un valle.
- Frecuencia: Es la cantidad de olas que pasan por un punto específico en un tiempo establecido.
- Celeridad: Es la velocidad con la que una ola se propaga.

El océano se encuentra compuesto por una superposición de varias ondas las cuales contienen características propias, esta combinación puede ser observada al mirar la superficie del mar. Las olas

viajan miles de kilómetros desde su área de origen con pocas pérdidas de energía para originar grandes olas motivo por el cual existen olas en donde no hay corrientes de viento.

Las olas que se propagan en aguas profundas poseen una dirección la cual es dada por el viento que las originó, esta es la razón de que existan olas de diferente lugar y direcciones en una zona [35].

2.2.3. Fenómenos de las Olas

Para captar la energía de las olas los dispositivos aprovechan los fenómenos que poseen las ondas marinas como son:

- Variación de la presión bajo la superficie: Se basa en la presión del volumen del aire que existe en el oleaje.
- Variación de altura en la superficie: Las olas por medio de estructuras obtienen un movimiento vertical alternativo.
- Empuje de la ola: La velocidad del agua es explotada cuando la onda se dispersa.

Estos fenómenos que posee el recurso undimotriz pueden ser aprovechados para la generación de electricidad [36].

2.2.4. Densidad de las Olas

La energía undimotriz llega a los perfiles costeros gracias a su capacidad de desplazamiento con pocas pérdidas de energía motivo por el cual llega a 336.000 Km de longitud por lo que se considera una densidad media energética de 8 KW/m de costa siendo mayor con respecto a la solar que posee 300 W/m^2 [36]. En la figura 5 se puede observar el potencial de la energía de las olas distribuido a nivel global.

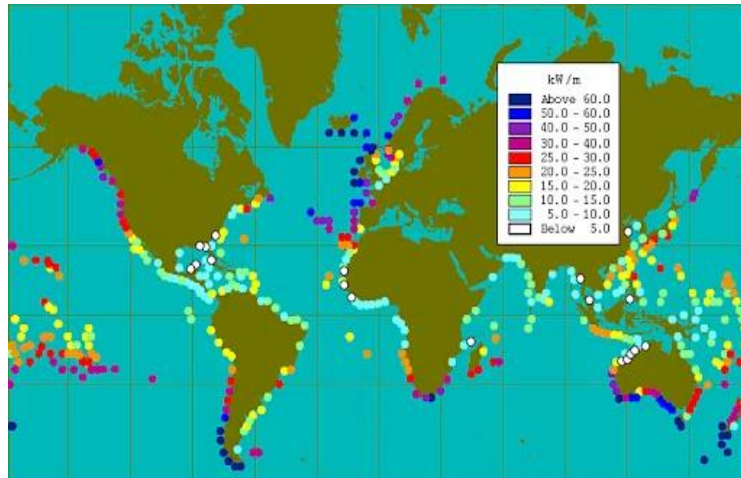


Fig. 5. *Potencial de las Olas alrededor del mundo* [37].

La disponibilidad de la energía undimotriz puede variar en diferentes partes del mundo, este valor va desde los 8 kW/m que es considerado un valor medio hasta los 60 kW/m disponible en zonas que se encuentran más cerca a los polos con un fuerte oleaje como es el caso de Australia, Reino Unido, Nueva Zelanda y Portugal [36].

2.3. Energía Undimotriz

La energía undimotriz o también llamada energía de las olas es el aprovechamiento de la energía mecánica contenida en las olas de los mares y océanos, se estima que esta energía posee un potencial energético de 30,000 TWh al año [38].

Las olas del mar también conocidas como ondas mecánicas son la propagación de una perturbación la cual conlleva consigo misma una cantidad de energía desplazándose por medio del agua [29]. Las ondas se originan gracias al calentamiento desigual de la superficie de la tierra causando corrientes de aire llamadas viento, el cual al interactuar con la superficie del océano da origen a las olas las cuales al superponerse unas con otras aumentan su tamaño y como consecuencia también aumenta su energía [9]. En la figura 6 se observa el origen del viento gracias a la irradiación del sol, el cual al interactuar con la superficie del mar produce las olas.



Fig. 6. Origen de las Olas por medio de la interacción del viento [32].

La energía undimotriz es considerada un potencial global ilimitado debido a que la energía cinética y potencial generada por el viento es almacenada en las olas de los océanos que representan el 71% de la superficie de la tierra, así mismo estas olas pueden propagarse largas distancias con pérdidas de energía mínima lo que permite su máximo aprovechamiento [39].

Las olas realizan su propagación por medio del desplazamiento transversal y longitudinal por lo que contienen energía cinética y potencial dando como resultado energía mecánica u total (W/m) la cual representa la potencia de la ola (m) frente a la ola [32]. En la figura 7 se observa los tipos de energía que contiene las olas debido a su desplazamiento.

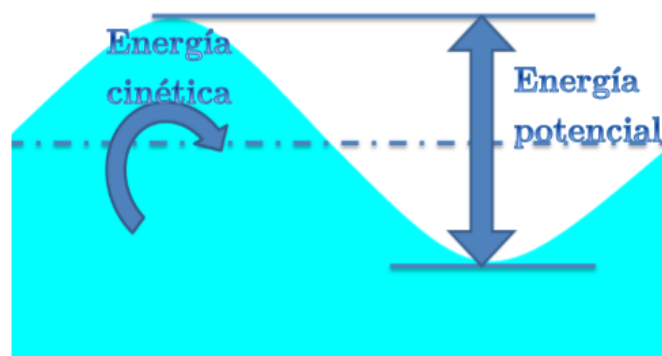


Fig. 7. Energía mecánica contenida en las Olas [32]

- Energía cinética: Originada por el desplazamiento u movimiento de las olas

- Energía potencial: Originada por la deformación de la superficie plana produciéndose un levantamiento del agua [38].

2.3.1. Características de la energía undimotriz

La energía undimotriz presenta múltiples características, a continuación, se establece las más relevantes:

- Fuente renovable y limpia

La energía undimotriz es una fuente de energía renovable y limpia más prometedora durante los últimos años, sin embargo el desarrollo tecnológico para su extracción aún se encuentra en la fase inicial, por lo que muchos científicos han ido enfocándose en buscar nuevas formas de aprovechar este recurso por lo que se ha ido implementando algunos dispositivos a lo largo del mundo principalmente en países de Europa en donde una de las tecnologías más usadas son los WEC (Wave Energy Converter) que extraen la energía de las olas y la convierte en energía eléctrica mediante 4 etapas que son la absorción, transmisión, generación y acondicionamiento.

Estos sistemas se basan principalmente en las estadísticas de potencia de su matriz la cual se caracteriza por la altura de las olas y su período, pero debido a la inestabilidad de las olas la potencia de salida de estos dispositivos no es la ideal para ser conectada directamente a la red por lo que se requiere un proceso de integración [40].

- Alto potencial de energía

La energía undimotriz es considerada una fuente con un potencial muy alto debido a que este recurso se expresa en kilo Watt por frente de onda (kW/m) de donde se obtiene que este valor es directamente proporcional al cuadrado de su altura por su período por lo que se estima que el recurso aprovechable es de 45000 TWh por año, así mismo se considera que los valores energéticos en las

costas oceánicas oscilan de 10 a 100 kW/m de frente de onda dando como resultado un valor medio de 20kW/m [9].

- Impacto Ambiental

Este tipo de fuente renovable es considerada amigable con el medio ambiente debido a que no emana gases de efecto invernadero gracias a que no utiliza combustibles fósiles para la generación de electricidad, sin embargo, para su producción es necesario introducir los diferentes tipos de dispositivos para su captación por lo que es difícil de predecir los diferentes impactos ambientales los cuales se asocian a las diferentes estructuras de soporte (plataformas), los materiales y la energía necesaria para el funcionamiento de estos dispositivos.

Según León [41] establece que los impactos negativos que se generan al introducir los dispositivos de captación en el medio marino producen un cambio en el paisaje marino, reducción del movimiento de las aguas, ruido submarino, daños a la diversidad marina, contaminación química y térmica así como cambios en su topografía, sin embargo existen impactos positivos al realizar su implementación como el efecto arrecife el cual consiste en la colonización de cables por organismos bentónicos, el efecto reserva donde se considera este espacio como exclusivo prohibiendo diversas actividades como la pesca, explotación de petróleo, lo que ayuda al desarrollo de las especies que habitan en este medio, así mismo por medio de los sistemas WEC ayudan a reducir la erosión costera debido a que se produce una barrera física lo que impide el ataque de las olas a estas zonas.

- Recurso Predecible

La energía de las olas o undimotriz es considerado como un recurso predecible debido a que se puede conocer con mucha exactitud acerca de la información de las olas y mareas que se producirán [42].

Actualmente en el Ecuador la entidad que se encarga de monitorear el ambiente marino es el Instituto Oceanográfico y Antártico de la Armada del Ecuador (INOCAR) el cual por medio de boyas mantiene una predicción constante de las olas que llegan a las costas ecuatorianas [43].

- Disponibilidad

La energía undimotriz se encuentra disponible en todo el mundo debido a que el planeta tierra se encuentra rodeado por mares y océanos en su gran mayoría, estos son considerados una gran fuente de energía ya que por medio de las olas las cuales son producto del viento y las fuerzas gravitacionales de la luna y el sol, almacenan y transporta la energía que transmiten estos agentes en el mar, motivo por el cual se dice que estas son un derivado terciario de la energía solar [35].

2.3.2. Aplicaciones de la Energía undimotriz

- Bombeo de Agua

La energía undimotriz es utilizada como una fuente de energía para el bombeo de agua principalmente en zonas cercanas al mar donde existen viviendas que no disponen de una conexión de este recurso, uno de los dispositivos más relevantes en este ámbito es el llamado “Dragon de mar” el cual se encuentra situado en las costas de Valparaíso bajo la superficie marina, este sistema aprovecha la energía de las olas para elevar una columna de agua por medio de una manguera la cual se bloquea por medio de una válvula para evitar su retorno, este ciclo se repite cada que pasa una ola por el equipo bombeando así el agua al área de desalinización para su tratamiento [35].

- Desalinización del agua

Debido a los bajos recursos hídricos presentes en las distintas zonas es necesario la desalinización del agua del mar para abastecer el consumo humano y el regadío de los cultivos, este proceso se lo realiza por medio de un tratamiento llamado desalación el cual se basa en la separación

de las sales del agua, existen múltiples métodos para realizar este tratamiento sin embargo el más usado es el método de osmosis inversa, el cual separa por medio de una membrana semipermeable a los dos tipos de líquidos con diferente contenido de sal generando una presión y separando las moléculas [44], uno de los proyectos más relevantes es el prototipo Gaia situado en la Plataforma Oceánica de Canarias (Plocan) el cual aprovecha la energía undimotriz de forma directa (sin transformar a electricidad) para realizar la desalinización del agua del mar y dotar de agua a las zonas cercanas [45].

- Generación de energía eléctrica

Debido a la creciente demanda eléctrica ha surgido la necesidad de buscar nuevas fuentes de generación como es el caso de la energía undimotriz la cual puede ser convertida en electricidad por medio de los Wave Energy Converter (WEC) los cuales transforman la energía cinética y potencial presente en las olas en energía mecánica para a partir de esta obtener la electricidad [29].

2.4. Perfil costero Ecuatoriano

El Ecuador se encuentra limitado al norte por Colombia, al sur y este por Perú y al oeste por el Océano pacífico sin embargo Costa Rica es considerado un país limítrofe debido a que comparten frontera marítima en donde se tiene en cuenta la ubicación de las Islas Galápagos y del Coco.

El territorio marino-costero posee una superficie de 1'092.140 km^2 lo que equivale a 5,3 veces el territorio terrestre dando como resultado una extensión de 1'300.000 km^2 la cual se encuentra distribuida por los espacios marítimos jurisdiccionales los cuales se encuentran normados por la CONVEMAR [46].

2.4.1. Caracterización del espacio marino costero

En las costas ecuatorianas existe la presencia de dos tipos de olas, las primeras olas que se originan mar adentro (Swell) las cuales poseen un alto contenido de energía y una amplia longitud de onda, y también existe la presencia de olas que se generan por la acción del viento en el mismo sitio. Durante los meses de diciembre a marzo las olas Swell que arriban a las costas ecuatorianas son generalmente procedentes del noroeste y norte, mientras que de abril a octubre las olas que arriban son las procedentes del sur oeste [47]. En la figura 9 se puede observar la caracterización del oleaje en las costas ecuatorianas en los diferentes meses.

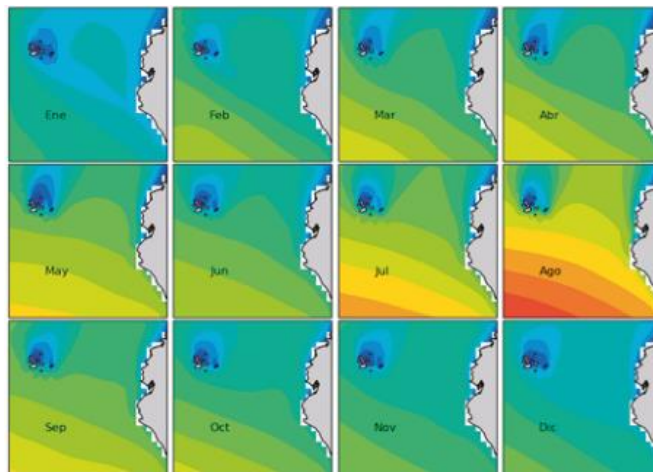


Fig. 8. Caracterización del Oleaje suscitado en el año 2020 [47]

La altura de las olas depende de las condiciones del viento por lo tanto también la energía que estas transportan, las olas en la zona costera del Ecuador se incrementan de norte a sur por lo que se concluye que desde la Puntilla de Santa Elena hacia el sur la zona marina posee un oleaje con una mayor intensidad, variabilidad y dirección.

La temperatura de las zonas costeras se ve influenciada por las corrientes de Humboldt y Panamá, así como la contracorriente de Cromwell influye en la productividad primaria del Archipiélago de Galápagos.

así mismo en esta zona predomina las mareas semidiurnas, las cuales presentan una amplitud mayor en los meses de diciembre a abril por lo que oscilan entre 2,4m en la Libertad, en Mataje y Cabo San Francisco oscilan los 3,4m y en el Golfo de Guayaquil sobre los 3m por lo que la costa ecuatoriana es considerada una costa mesoma real, sin embargo, cuando estas coinciden con los periodos de oleaje se produce rebosamientos y rompimientos de las olas en la costa [47].

En conclusión, se estima que las costas ecuatorianas gracias a los oleajes que presenta cada año poseen una gran fuente de generación de energía renovable la cual puede ser extraída y convertida en electricidad por medio de los Wave Energy Converter para así diversificar la matriz productiva eléctrica lo cual a su vez contribuye a la reducción de los gases de efecto invernadero y contaminación que produce la generación de energía por medio de combustibles fósiles.

CAPÍTULO III

MATERIALES Y MÉTODOS

En este capítulo se presenta la metodología y materiales empleados para el estudio, descripción y comparación de los diferentes dispositivos disponibles para conversión de energía undimotriz en electricidad con el fin de establecer un dispositivo que pueda ser aplicado en el borde costero continental ecuatoriano.

3.1. Metodología

Para el desarrollo del presente trabajo de investigación se ha adoptado un enfoque cualitativo el cual implica la investigación de carácter científica, descripción de los Wave Energy Converters y la selección de un dispositivo factible para la posible implementación en el borde costero continental ecuatoriano.

La descripción de los Wave Energy Converter (WEC) se realizó mediante una revisión de documentos científicos que fueron recopilados usando de criterios de búsqueda avanzados en las bases de datos bibliográficas a las que se tiene libre acceso gracias a la membresía estudiantil, dado a que en estas bases se puede encontrar un sin número de artículos y demás documentos se procedió a emplear el método PRISMA para la selección correcta de los artículos encontrados, ya que dicho método está diseñado para garantizar una revisión sistemática completa, transparente y precisa dando a conocer el motivo por el cual se la realizó y que se ha logrado encontrar con su desarrollo [48].

El método prisma incluye un conjunto de ítems o directrices basados en la información que debe incluir o contener para el desarrollo de una revisión sistemática y meta-análisis por lo que, para la correcta selección de información fueron puestas en práctica durante el desarrollo de este trabajo,

con lo que se logró elaborar una síntesis y análisis de los WEC disponibles para la conversión de energía undimotriz en electricidad [48].

El empleo de este método permitió facilitar la selección de los documentos para la elaboración de la revisión bibliográfica, permitiendo realizar un análisis exhaustivo del estado del arte de la energía undimotriz y los diferentes dispositivos capaces de transformar esta energía en electricidad. Así mismo se emplearon ecuaciones matemáticas que permitieron determinar los diferentes parámetros de las olas facilitando así el cálculo de la potencia presente en el lugar de estudio. Finalmente , el análisis de las características de los WECs permitió realizar una comparativa entre todos estos dispositivos con el fin de establecer un dispositivo que sea factible para la aplicación en el borde costero ecuatoriano y que en un futuro pueda ser implementado.

3.2. Diagrama de proceso

Para la revisión sistemática de los Sistemas WEC se realizó una serie de procesos ante la búsqueda de información, mismos que se detalla en la figura 10 mediante un diagrama de flujo donde se establece las etapas y resultados obtenidos.

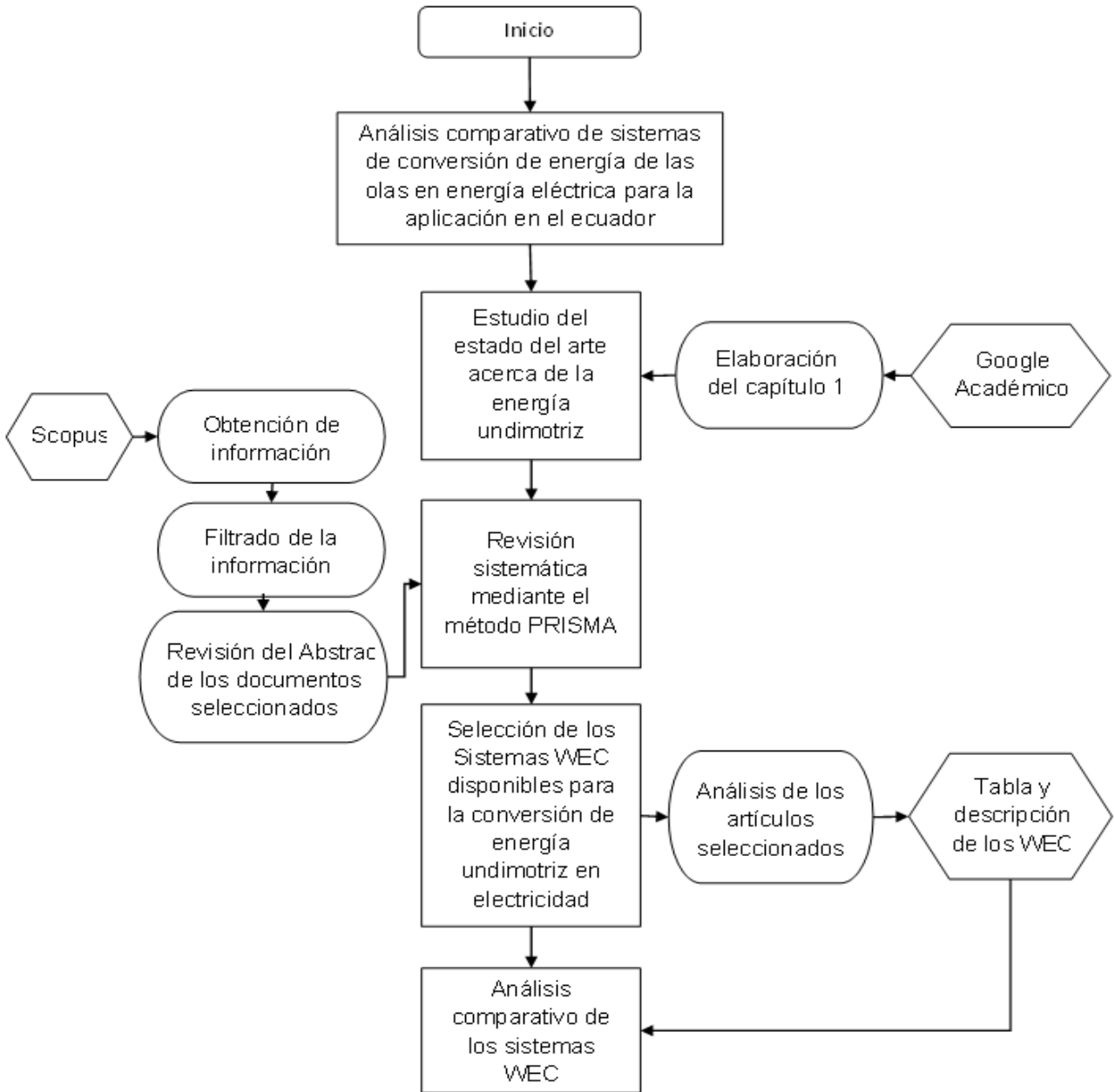


Fig. 9. Procedimiento para la elaboración de la revisión sistemática

Para el desarrollo de este análisis se inició con un estudio del arte acerca de la energía de las olas, con lo que se pudo conocer el estado actual de esta energía en los diferentes países, posteriormente se realizó una búsqueda avanzada de las tecnologías disponibles para el aprovechamiento y conversión de esta energía en electricidad, para lo que se definió a la base de datos

bibliográficos Scopus debido a que la institución posee los permisos de uso de esta plataforma, motivo por el cual se tuvo acceso a muchos artículos científicos relacionados con el tema, sin embargo, después de un análisis exhaustivo de estos por medio de criterios de inclusión y exclusión, se descartó la mayor parte de estos ya que no aportaban nada a la investigación y se tomaron en consideración a los que tenían un gran aporte con lo que se logró hacer la descripción de las diversas tecnologías disponibles.

3.2.1. Criterios de Búsqueda

Una vez definida la base de datos, se procedió a realizar la búsqueda de artículos y documentos relacionados con el tema, inicialmente se utilizó términos puntuales como “Wave energy”, “Wave power” y “Wave energy converters” logrando una gran cantidad de resultados, sin embargo, al analizar esta información se pudo notar que era poco útil y no contribuía a la investigación por lo que se vio a necesidad de usar operadores booleanos como OR y AND para mejorar a los términos de búsqueda “Wave energy”, “Wave Energy Converters”, “Wave power” y “wind waves”, obteniendo nuevamente una gran serie de resultados los cuales otorgaron una visión general acerca del tema pero su aporte aún seguía siendo mínimo, en consecuencia se incluyó más términos que fueron ligados por medio de los operadores booleanos utilizados anteriormente, definiendo así un criterio de búsqueda más eficaz: ("wave energy" OR "Wave energy converter" OR "Wave power") AND ("ocean waves" OR "wind waves").

En la tabla 1, se presenta un resumen de los resultados obtenidos con cada uno de los criterios de búsqueda empleados en las diferentes etapas de la investigación realizados en la base bibliográfica Scopus.

CRITERIO DE BÚSQUEDA	RESULTADOS OBTENIDOS
“wave energy”	341.984 documentos encontrados
“wave power”	243.912 documentos encontrados
“wind waves”	71.781 documentos encontrados
"Wave energy converter"	9.729 documentos encontrados
("wave energy" AND "Wave energy converter" OR "Wave power")	7.948 documentos encontrados
("wave energy" OR "Wave energy converter" OR "Wave power") AND ("ocean waves" OR "wind waves")	3.333 documentos encontrados

Tabla 1. Documentos obtenidos con los diferentes criterios de búsqueda.

Con el último criterio de búsqueda empleado se logró encontrar 3.333 documentos mismos que serán sometidos a las diferentes etapas de selección de documentos en donde se establecerá aquellos que cumplen y contribuyen a la investigación.

3.2.2. Criterios de Inclusión y exclusión

Con la información recopilada bajo el criterio de búsqueda mencionado, se llevó a cabo un proceso de filtrado con el fin de definir la documentación que será analizada más adelante, para esto se tomó en consideración varios criterios los cuales se detallan en la Tabla 2.

<i>Criterios de inclusión</i>	<i>Criterios de Exclusión</i>
Que los documentos sean de tipo Artículos, documentos de sesión o revistas en inglés	Artículos que se centran en energías diferentes a la undimotriz
Artículos Publicados en los últimos 5 años con lo que se garantiza la relevancia y su actualidad	Estudios de energía oceánica en general
Estudios que se enfocan en la conversión de energía undimotriz a electricidad	Estudios que solo discuten el potencial teórico de la energía de las olas, sin abordar tecnologías específicas
Estudios que hacen un análisis comparativo de diferentes tecnologías de conversión.	

Tabla 2. *Criterios de inclusión y exclusión para la selección de documentos.*

Para el desarrollo del trabajo, se realizó una revisión sistemática de la literatura de especialidad, para lo que se optó por el uso de las directrices o ítems del método PRISMA, dicho método fue utilizado con la finalidad de seleccionar, evaluar y sintetizar de manera correcta la documentación y realizar un trabajo transparente y confiable. En la figura 10 se observa la cantidad de documentos obtenidos por medio del criterio de búsqueda antes mencionado y las diferentes etapas realizadas para el filtrado y selección de la información.

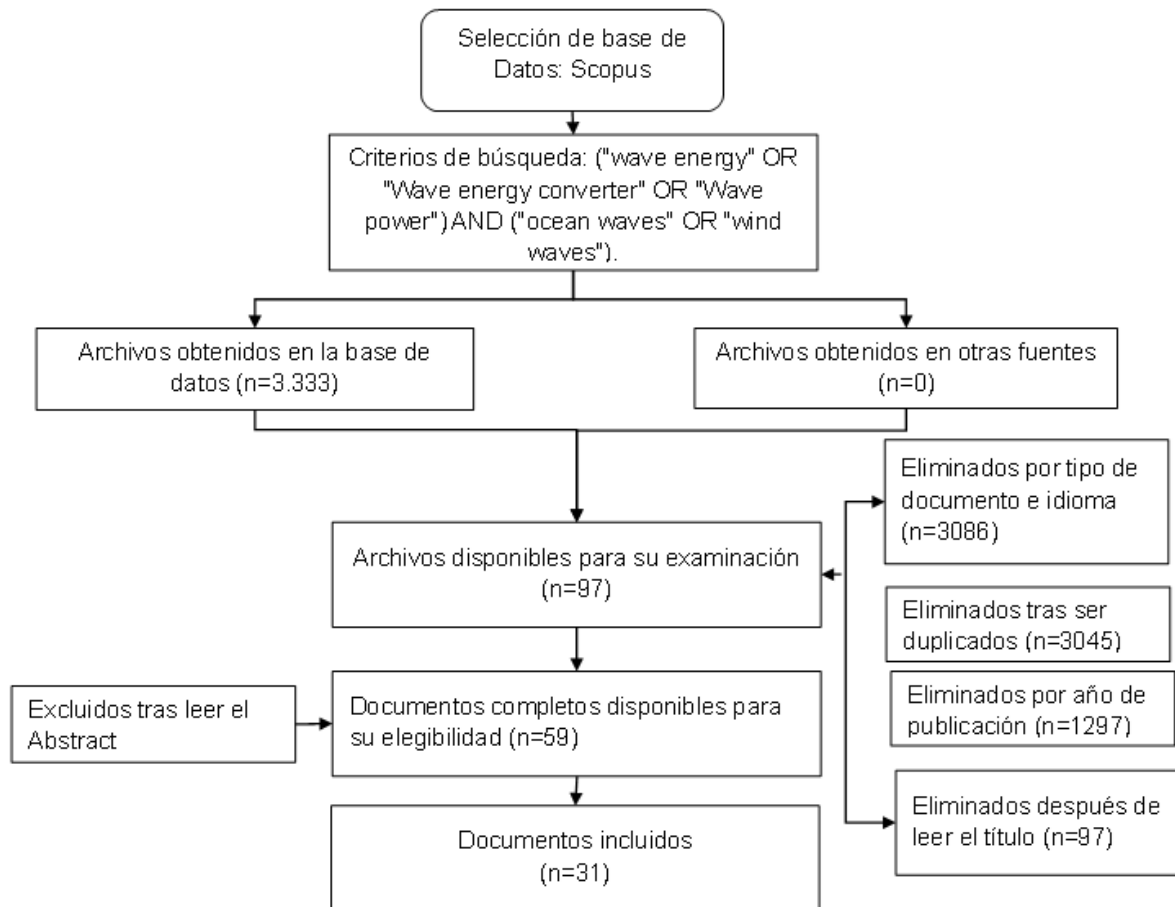


Fig. 10. Diagrama de flujo PRISMA empleado para el filtrado de la información

Con el empleo del criterio de búsqueda antes mencionado se lograron obtener 3.333 documentos relacionados con el tema de investigación, por lo que se llevó a cabo un proceso de selección y filtrado de los mismos aplicando los criterios expuestos en la Tabla 2.

Inicialmente se aplicó el primer filtro en la misma base bibliográfica Scopus en donde se consideró el primer criterio de inclusión quedando un total de 3.086 documentos, con los cuales se formó una base de datos en Excel en donde se pudo notar la existencia de información repetida, motivo por el cual fueron eliminados, dando así un total de 3.045 documentos; posteriormente se consideró que la información debe ser lo más actual posible por lo que se tomó en cuenta el segundo criterio de inclusión eliminando así la información que tenía una antigüedad mayor a 5 años, dando

como resultado 1.297 documentos disponibles para su análisis, de este total se realizó una lectura únicamente de los títulos para comprobar que cumplan el tercer y cuarto criterio de inclusión, pero dado a la diversidad de estudios realizados muchos de estos se referían a otros tipos de investigación obteniendo únicamente 97 artículos adecuados. Una vez obtenidos estos documentos se dio lectura al Abstrac o Resumen con lo que se pudo notar que muchos de estos a pesar de poseer un título relacionado con el tema de investigación, no aporta con nada para la misma ya que su enfoque era de manera muy general, considerando así 59 documentos aptos, sin embargo una vez analizado su contenido se concluyó que varios de estos no están desarrollados acorde a lo que presentan en su resumen quedando excluidos, obteniendo finalmente así los artículos que se emplearán en la descripción y comparación de las diferentes tecnologías disponibles para la conversión de energía de las olas en energía eléctrica.

3.3. Herramientas y Materiales

Para la elaboración del presente trabajo se requiere el uso de herramientas básicas con el fin de proporcionar una mayor facilidad durante el proceso de investigación, dichas herramientas poseen un software libre debido a que sirven únicamente de apoyo para el investigador en diversos ámbitos, a continuación, se detallará las herramientas utilizadas.

3.3.1. Programas computacionales y bases bibliográficas

Las bases bibliográficas nos permiten acceder a un gran número de artículos mismos que fueron la base de la investigación para lo cual se utilizó la base que se detalla a continuación:

- ***Scopus***

Es la mayor base de datos bibliográfica referentes a actas de congresos, libros y revistas en diferentes campos como la ciencia, tecnología, medicina, ciencias sociales, artes y humanidades, por

lo que posee una serie de herramientas inteligentes las cuales facilitan el proceso de rastreo, análisis y visualización de la investigación [49].

- ***Microsoft Excel***

Pertenece al paquete de Office por lo que es considerada una de las herramientas más importantes debido a que permite realizar cálculos aritméticos sin importar el nivel de complejidad [50]. Este software es usado dentro de la investigación para tener una visualización avanzada de los datos y así poder realizar los filtros de manera más fácil.

3.3.2. Ecuaciones matemáticas para el cálculo de la potencia presente en el borde costero continental.

A continuación, se muestran las ecuaciones empleadas durante el cálculo de la potencia de las olas las cuales pueden ser consideradas como una onda sinusoidal la cual posee varias características.

- ***Longitud de Ola***

La longitud de onda en aguas someras es igual a la distancia recorrida durante un ciclo y se mide en metros . En la Ecuación 1 se determina la ecuación para el cálculo de longitud de onda.

$$\lambda = \sqrt{gH} T \quad (1)$$

Donde:

g = Gravedad con un valor de $9,8 \text{ m/s}^2$

H = Altura de las olas

T = Período

- ***Velocidad de la Ola***

La velocidad de la ola es la distancia recorrida por una ola en una unidad de tiempo. Su fórmula está establecida en la Ecuación 2.

$$v = \sqrt{\frac{g\lambda}{2\pi}} \quad (2)$$

Donde:

g = Gravedad con un valor de $9,8 \text{ m/s}^2$

λ = Longitud de la ola

π = Se toma el valor referencial de 3,1416

- ***Masa del agua***

La masa del agua se calcula empleando la Ecuación 3

$$m = \rho \times \frac{H}{2} \times \frac{\lambda}{2} \times b \quad (3)$$

Donde:

ρ = densidad del agua de mar, en donde se toma el valor de 1027 kg/m^3

H = Altura de las olas

λ = Longitud de la ola

b = Ancho de frente de ola

- ***Energía cinética***

La energía cinética es la energía se asocia a al movimiento de un cuerpo y se calcula mediante la aplicación de la Ecuación 4

$$E_c = \frac{1}{2} m v^2 \quad (4)$$

Donde:

m = masa del agua

v = Velocidad de la ola

- ***Potencia por metro de frente de ola***

La potencia por frente de ola hace referencia a la cantidad de energía que pasa a través de un metro de ancho de la cresta de la ola, la cual se calcula empleando la Ecuación 5.

$$P = \frac{E_c}{T} \quad (5)$$

Donde:

E_c = Energía cinética

T = Período

3.3.3. Ecuaciones matemáticas para el cálculo del rendimiento del SSG y la energía generada.

Existen dos parámetros para cuantificar el rendimiento de un WEC, el primero se relaciona con el ancho de captura (CW) medido en metros, el cual se define como la relación entre la potencia (P_{wec}) y el flujo de energía de las olas (F) [51].

$$CW = \frac{P_{wec}}{F} \quad (6)$$

Donde

CW se refiere al ancho de captura en metros

F representa la potencia de las olas disponible por metro de ancho de la cresta de la ola.

Debido a que el comportamiento del oleaje varía dependiendo de la época del año se lo considera como un mar irregular, por lo cual, la ecuación a emplearse para el cálculo del flujo de energía de la ola se detalla a continuación

$$F = 0.5 H_s^2 * T_e \quad (7)$$

Donde

H_s es la altura significativa de la ola en metros

T_e es el período en segundos

Finalmente, la energía generada por el SSG hace referencia al producto entre su potencia de captura y su eficiencia.

$$E = P_{wec} * \text{eficiencia} \quad (8)$$

Donde

P_{wec} : hace referencia a la potencia del SSG

CAPITULO IV

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

En este capítulo se describe a los diferentes tipos de WECs encargados de transformar la energía undimotriz en electricidad, destacando las características más importantes las cuales fueron analizadas y comparadas para la selección del dispositivo más adecuado para su posible aplicación en el país. Así mismo se muestra el potencial de energía presente en el borde costero ecuatoriano y la posible cantidad de energía que produciría el WEC en caso de ser implementado en el país.

4.1. Wave Energy Converters

Los convertidores de energía de las olas conocidos como WEC son tecnologías que por medio de un dispositivo (ECD) captura la energía que poseen las olas y las convierte en energía mecánica para posteriormente enviarla a un dispositivo de toma de fuerza (PTO) en donde se transforma esta energía mecánica en energía eléctrica [52].

Según Hasan [53] los WEC se clasifican de acuerdo con varios criterios:

- Por su principio operativo: Columna de agua oscilante, Cuerpo oscilante, Desbordamiento.
- Por su ubicación: Cercanos a la costa, Terrestres y Marinos.
- Por su tamaño y la dirección con respecto a las olas: Atenuadores, Absorbedores puntuales, Terminadores.
- Por el tipo de movimiento activado: Alternativos, Unidireccionales.

4.2. Columna de Agua Oscilante (OWC)

Son una de las principales tecnologías de extracción de energía de las olas, estas pueden ser de tipo flotante o a su vez pueden ser instaladas en estructuras fijas, su principio de funcionamiento se

basa en recoger el agua en una cámara que se encuentra parcialmente sumergida y expuesta al aire debido a que posee una abertura en la parte superior, a medida que el nivel de agua aumenta el aire se comprime para impulsar una turbina de aire generando así electricidad [52][54]. En la figura 12 se muestra un esquema de los dispositivos de tipo OWC.

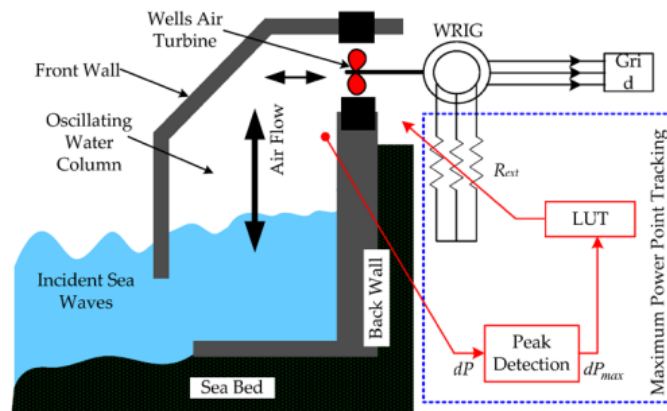


Fig. 11. Principio de acción de los dispositivos OWC [29].

- **Toma de fuerza**

El aire contenido posee presiones oscilantes que varían de acuerdo con el aumento o disminución del agua, este aire una vez que pasa por la turbina (turbinas Wells, de impulso autorrectificadora y Dennis Auld) es liberado hacia la atmósfera [55][56]. En la figura 13 se puede observar los diferentes tipos de turbinas empleados en este tipo de dispositivos.

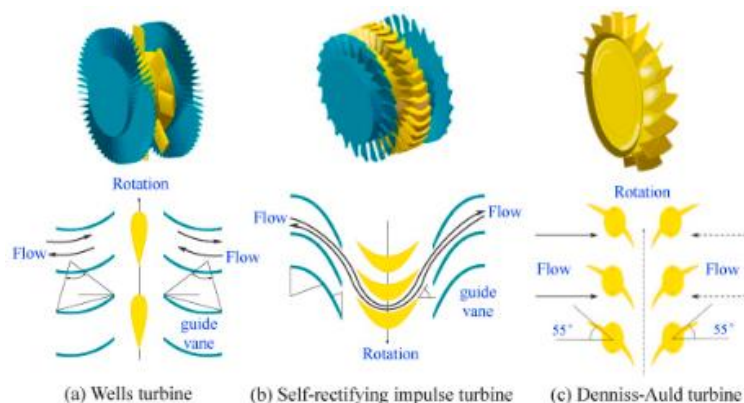


Fig. 12. Esquema de las turbinas de aire autorrectificantes [56]

- a) La turbina Wells para flujo axial, es el tipo más común de rectificadora automática que fue diseñada en 1970 y es utilizada mayormente en este tipo de tecnologías ya que posee un flujo axial auto-rectificante y su par no es afectado fácilmente por la dirección del flujo de aire, presentando alta eficiencia y bajo costo de fabricación [57][56].
- b) La turbina de impulso auto rectificante fue patentada en 1975, posee un rotor cuya estructura interna es igual a la de la turbina de impulso axial de vapor (un solo paso tradicional), y se instala únicamente un conjunto de álabes guía simétricamente en la sección transversal axial del rotor. Esta presenta ventajas respecto a la absorción de la energía ya que las palas tienen una velocidad y esfuerzo centrífugo menor con respecto a la turbina Wells [56]
- c) La turbina Denniss Auld posee una estructura del rotor similar a la Wells de paso variable, sin embargo, presenta una variación con respecto al ángulo escalonado de las palas del rotor cuyos bordes de ambos lados son iguales para cargar el borde delantero o trasero (alternadamente) de acuerdo con la dirección del flujo de aire alternante.

4.2.1. Dispositivos de tipo OWC disponibles para la conversión de energía

Las OWC son una de las tecnologías más prometedoras representando el 26,79% del uso mundial [55], por lo que, durante la revisión bibliográfica realizada se encontraron múltiples dispositivos y plantas de tipo OWC existentes e implementadas a lo largo de los años en varias partes del mundo como se muestra en la Tabla 3, con el fin de convertir la energía de las olas (undimotriz) a electricidad, reduciendo así una parte de la dependencia de energías convencionales.

<i>TIPO</i>	<i>AUTOR</i>	<i>DISPOSITIVO</i>	<i>DESCRIPCIÓN</i>
OWC	[53]	Con Casco rígido	Aloja y protege de la corrosión e inundación a los componentes internos del WEC dentro de un casco rígido y estanco a excepción de las líneas de amarre y cables de transmisión, estos dispositivos son compactos y portátiles (flotadores/boyas). Algunos dispositivos de Columna de agua oscilante poseen un casco rígido que encapsula a toda la columna de agua aislándola del agua abierta, en estos dispositivos el agua (otros líquidos) puede oscilar dentro de un simple depósito o de un tubo en forma de U que impulsa directamente una turbina (hidráulica o de aire) para generar electricidad.
OWC	[54]	OSPREY	Su estructura estaba formada por una boya de acero semiesférica con una altura de 20 metros la cual en su interior albergaba 2 turbinas Wells con una potencia de 2 MW por lo que fue considerada una de las más grandes de la época, pero lamentablemente fue destruida en el año de 1995 durante una fuerte tormenta.
Flotador	[54]	Mighty Whale	Posee una potencia nominal de 110 kW y está conformado por una estructura flotante la cual contiene tanques de flotabilidad y tres cámaras de aire ubicadas consecutivamente que se encuentran conectadas a las turbinas de tipo Wells para aprovechar la energía producida por las olas.
OWC	[54][55]	BBDB OWC	Aprovecha los movimientos de elevación, cabeceo y el movimiento de las boyas para producir electricidad, estos dispositivos no necesitan rectificar el flujo de aire ya que la turbina gira en una

			<p>misma dirección independientemente de la dirección del flujo. Este dispositivo fue construido a un modelo a escala 1:4 en Galway, Irlanda, el cual estaba conformado por una turbina de impulso con álabes guía estacionarios alcanzando una potencia nominal de 13 kW y funcionó hasta el año 2011.</p>
OWC	[54] [58]	U-OWC	<p>Posee un conducto en forma de U que permite ajustar su dinámica a un determinado período de la onda reduciendo las variaciones de salida de potencia sin considerar las condiciones de las olas. Boccotti en 2007 propuso un U-OWC incrustado en un rompeolas con una estructura larga con respecto a la cresta de la ola, pero estrecha en el sentido de proa a proa permitiendo una extensión de la longitud del dispositivo sin colocar la abertura muy debajo de la superficie marina.</p>
OWC de circuito cerrado	[54][59]	Tupperwave	<p>Este tipo de dispositivos dividen al aire en dos cámaras cerradas utilizando válvulas de retención para generar flujo de aire en un circuito cerrado, un ejemplo es el Tupperwave que utiliza válvulas rectificadoras para crear un flujo suave de aire unidireccional que es aprovechado por la turbina que se encuentra ubicada en medio de las cámaras de baja y alta presión.</p>
Multi OWC	[54][60]	Seabreath	<p>Este dispositivo fue desarrollado por la Universidad de Padua, está compuesto por cámaras de aire rectangulares sin fondo conectadas a dos conductos longitudinales por medio de válvulas antirretornos que alimentan a una turbina de aire unidireccional, este dispositivo cuenta con una turbina de 3kW y</p>

			factor de capacidad del 40% mismos que fueron dimensionados para una aplicación de prueba, la cual una vez concluida que arrojó que Seabreath puede convertir 6.6kW en promedio es decir 58MWh/año.
OWC	[55]	Sea of Japan	Fue construida en el año de 1983 y es considerada la primera planta de este tipo, estaba conformada por una boya y una turbina de aire Wells alcanzando una potencia nominal de 40 kW.
OWC	[55]	Kvaerner	Esta planta estaba situada en Noruega, fue construida en el año de 1985 y estaba constituida por una turbina de eje vertical Wells con una potencia de 500 kW, pero como producto de una tormenta sus instalaciones fueron destruidas y quedó fuera de servicio.
OWC	[55]	Planta en China	En el año de 1989 China construyó una planta en la ciudad de Shanwei la cual estaba conformada por una turbina de impulso con guía de ondas fija alcanzando una potencia de hasta 100 kW, sin embargo, años más tarde empezó a presentar fallas por lo que dejó de funcionar.
OWC	[55]	Planta en Sakata	Se construyó en el año de 1990 en Sakata- Japón, esta planta integraba el sistema convertidor con el rompeolas debido a que se trataba de un dique con cajones de hormigón posicionados verticalmente en donde se ubicaba una turbina Wells para convertir la energía de las olas, logrando alcanzar una potencia nominal de 60 kW.

OWC	[55]	Planta Trivandrum	Fue construida en la India en el año de 1990, esta planta utilizó una turbina de tipo Wells en su convertidor con lo que logró alcanzar 125 kW, sin embargo, años después reemplazó a dicha turbina por una turbina de impulso.
OWC	[55]	Energetech	Es un dispositivo de estructura fija que consta de un muro parabólico y una turbina Wells con control de ángulo variable obteniendo así una potencia de 500 kW, este sistema fue implementado en Australia en el año 2005 y se encuentra anclado a zonas poco profundas por lo que concentra el oleaje en el colector.
OWC	[55]	Planta en Vizhinjam	Esta planta fue construida en el año de 1990 en Vizhinjam-India, consta de un cajón de hormigón anclado en el rompeolas, en donde inicialmente se albergaba una turbina Wells, la cual en el año de 1997 fue reemplazada por una turbina de impulso con una aleta guía unida a la turbina quien controlaba el ángulo de dichas aletas de manera automática, esta planta alcanzaba una potencia nominal de 75 kW durante los meses de abril a noviembre y de 25 kW en los meses de diciembre a marzo.
OWC	[55]	Planta en la isla Pico en Azores	En 1999 se construyó una planta basada en el mismo diseño del Mighty Whale, es decir estaba conformada por una turbina Wells con aletas guía la cual fue instalada en una estructura fija situada en Pico Island, alcanzando una potencia nominal de hasta 400 kW durante 12 años de manera continua, no obstante, en 2010 fue desmantelada.

OWC	[55]	Planta en Niigata	Esta planta fue construida en Niigata-Japón, estaba conformada por una turbina de impulso con lo que se logró alcanzar una potencia nominal de 450W y una potencia máxima de 800 W, sin embargo, esta planta solo pudo funcionar durante 4 meses (junio-septiembre).
OWC	[55][61]	REWEC3	Fue implementada en el año 2016 en el puerto de Civitavecchia en Italia, esta plata utiliza un sistema OWC en forma de U la cual está integrado en un rompeolas vertical con 17 cajones convertidores de energía de onda resonante, alcanzando una potencia nominal de 25 kW y encontrándose en funcionamiento hasta la actualidad.
OWC On shore	[55] [62][63]	LIMPET	Esta OWC de estructura fija fue construida en la isla Islay en Escocia en el año 2012, fue equipada con una cámara cerrada con una abertura en el fondo marino por donde ingresa el agua gracias a las incidencias de las olas, aumentando el nivel del agua dentro de la cámara, y disminuyendo cuando el agua vuelve al mar, originando una variación de presión de aire la cual avanza y retrocede a través de una turbina Wells de contrarrotación que a su vez está conectada a un generador, alcanzando una potencia máxima de 500 kW, no obstante un año después su potencia se redujo a 250 kW con la que operó hasta el año 2018, año que dejó de funcionar, sin embargo, actualmente es utilizada como planta de pruebas para las turbinas de Voith Hydro Wavage quienes han acumulado más de 60000 horas de funcionamiento de la turbina [57].

OWC	[55][61]	Mutriku	El modelo Mutriku fue implementado en España en el año 2011 (funciona hasta la fecha), en un rompeolas vertical utilizando 16 turbinas Biplane Wells de 18,5 kW cada una, logrando una potencia de salida de 296 kW.
OWC	[57]	Kaimei	Este dispositivo se encontraba desplegado en el mar y constaba de 13 cámaras (42-50 m ²) de tipo OWC de fondo abierto las cuales estaban incorporadas a una barcaza de 80m x 12m que fue desplegada en la costa oeste de Japón en el año de 1985 a 1986.
OWC	[64][65]	OE Buoy	Posee una cámara (abierta) semisumergida y una bolsa de aire atrapada sobre la columna de agua, la cual oscila gracias a las olas ya que empujan al aire hacia una turbina bidireccional convirtiendo este flujo aire en electricidad. Este dispositivo posee una potencia nominal de 2880 kW y su producción depende de las características del oleaje (altura y período).

Tabla 3. *Plantas y dispositivos de tipo OWC*

4.3. Sistemas de cuerpo oscilante (OB)

Son dispositivos que están constituidos por boyas sumergidas que se mueven hacia abajo o arriba según el movimiento de las olas, estos cuentan con una estructura de referencia fija y aprovechan el movimiento, cabeceo y balanceo del cuerpo como producto de las olas para generar electricidad por medio de un motor hidráulico y un generador giratorio [52][54][62]. Estos dispositivos son instalados en barcos o plataformas en las profundidades del mar, o a su vez flotando en el mar a una profundidad mayor a 40m en donde la densidad de la energía de las olas es más alta por lo que el dispositivo puede tener una mayor capacidad [62].

- **Estructura**

Un OB tiene seis grados de libertad que son: ascenso y descenso (heave), avance (surge), balanceo lateral (sway), giro (yaw), inclinación hacia adelante/atrás (pitch) y giro alrededor del eje longitudinal tal como se puede observar en la figura 14, sin embargo, estos utilizan únicamente el heave, pitch o roll del cuerpo bajo la excitación de las olas con lo que logran impulsar el dispositivo PTO para producir electricidad.

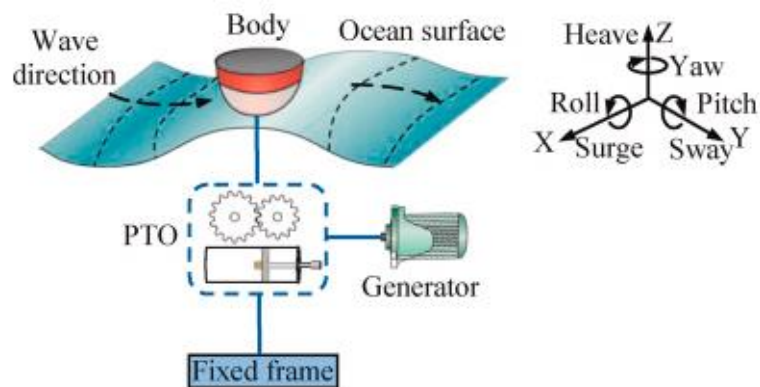


Fig. 13. Principio estructural básico de los cuerpos oscilantes [56]

- **Toma de fuerza**

Los sistemas WEC utilizan diferentes dispositivos PTO para transformar la energía de las olas y generar electricidad constante, uno de los métodos más utilizados es el tipo de

transmisión mecánica la cual se puede dividir en transmisión por husillo de bolsa, por engranajes y finalmente por cremallera y piñón. En la figura 15 se observa el proceso de generación de energía eléctrica mediante un sistema de presión de líquido/aire que amortigua la energía contenida en las olas para mejorar su calidad y acumularla cuando tiene velocidades bajas, logrando así garantizar la continuidad y estabilidad de generación [56].

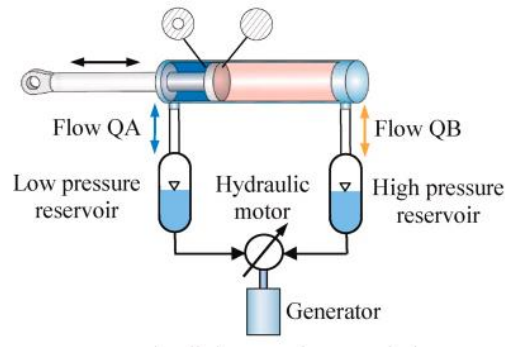


Fig. 14. Transmisión hidráulica/neumática [56].

Una manera de generar electricidad de forma directa es por medio de la transmisión de accionamiento directo, debido a que aprovecha el movimiento ondulante de las olas (vertical) para accionar un generador y producir un movimiento lineal alternativo, generando electricidad sin la necesidad de transmisión y reduciendo el costo de mantenimiento y requisitos de operación debido a que su diseño es menos complejo [56]. En la Tabla 4 se muestra los distintos dispositivos que se han ido implementando a lo largo de los años.

4.3.1. Descripción de los sistemas de tipo OB

Uno de los OB más relevantes son los absorbedores puntuales (PA) ya que son fáciles de construir, mantienen un costo bajo y son más eficientes debido a que poseen una mayor capacidad de producción de energía dado que capturan la energía en cualquier dirección que se propague la ola [66]. A continuación, en la Tabla 4, se describe los dispositivos OB empleados para la conversión de energía.

TIPO	AUTOR	TECNOLOGÍA	DESCRIPCIÓN
Péndulo Inverso Resonante	[52]	RIPWEC	Está conformado por una plataforma u boya en donde se conecta un péndulo invertido el cual se encuentra sumergido completamente por lo que posee un mecanismo de elevación y giro para que el RIPWEC descienda y enfrente las olas evitando ser impactado, este dispositivo permite ajustar la rigidez hidrostática hasta llegar a 0 haciendo que su período natural sea infinito con lo que se garantiza la capacidad de resonancia de su banda ancha. La eficiencia de generación del RIPWEC en V es del 26,5% al 46% y la relación del ancho de captura es del 39,4% al 76,5%.
Absorbedor puntual	[54]	G-1 Tit	Es considerado uno de los OB con una dimensión de 1,8m y 1,2m a nivel de la superficie del agua, este dispositivo aprovecha el movimiento vertical de las olas el cual se transmite por medio de una estructura de acero que se encuentra fijada a un rompeolas.
Absorbedor puntual	[54]	Boya Noruega	Conformado por un flotador de forma esférica que capta las oscilaciones de cabeceo con respecto a un ancla en el fondo del mar y fue probado en Trondheim en el año de 1983.
Flotador	[54]	Amortiguador de punto bipartito	Conformado por un flotador interior y exterior, en donde el exterior (referencia) tiene una frecuencia de resonancia menor con respecto al exterior ya que este actúa como un absorbedor resonante. Este sistema fue analizado a través de modelos lineales y de tercer orden con el fin de entender mejor la interacción de sus partes, sin embargo, se observó que los efectos no

			lineales afectaban significativamente su capacidad de absorción de energía motivo por el cual pocos prototipos lograron una comercialización a gran escala.
Flotador	[54]	Boya IPS	Se trata de boya conectada a un tubo rígido vertical que se encuentra sumergido totalmente, éste cuenta con aberturas en sus extremos en donde se aloja un pistón el cual se mueve a la par con el sistema de tubo-boya impulsando así un mecanismo de toma de fuerza.
Absorbedor Puntual	[54][64][65]	AquaBuOY	Consta de una boya flotante (parte visible) montada sobre un pistón que se sitúa dentro de un tubo el cual presenta una abertura en sus dos extremos en donde se acopla una bomba de manguera, conforme la boya se eleva o se contrae las bombas de manguera producen un flujo de agua a presión enviándolo hacia una turbina de tipo Pelton que se encuentra acoplada a un generador. Este sistema posee una potencia nominal de 250 kW.
Flotador	[54]	Wavebob	Este proyecto se basa en dos boyas asimétricas coaxiales que aprovechan los movimientos axiales relativos para generar electricidad a través de un sistema de aceite de alta presión. La boya interior se encuentra conectada a un cuerpo sumergido coaxial que es el encargado de permitir el ajuste a la frecuencia promedio de las olas y aumentar la inercia sin reducir las fuerzas hidrodinámicas de excitación y radiación. El Wavebob tiene una potencia nominal de 1000 kW y su producción de energía depende de las características de las olas (período y altura).

			Las pruebas de funcionamiento se realizaron en la Bahía de Galway sin embargo el proyecto no pudo completarse a gran escala debido a la falta de financiación por lo que la empresa cerró.
Flotador	[54]	PowerBuoy PB3	Este sistema se encuentra anclado a un lugar fijo, en donde una boya se mueve a lo largo de un mástil (reduce el movimiento) en respuesta al movimiento de las olas logrando impulsar una varilla de empuje en el mástil en donde un mecanismo mecánico convierte este movimiento lineal en rotatorio alimentando al generador eléctrico que está controlado por vectores.
Flotador	[54]	Oceanus 2	Posee una forma de anillo hexagonal y se encuentra anclado al fondo marino por lo que puede ser ubicado a 16 km de la costa, está constituido por una boya que se mueve arriba/abajo a la par con el movimiento de las olas con lo que activa una bomba (contenida dentro de la estructura) que aumenta la presión del agua para posteriormente ser canalizada a través de un conducto hacia una turbina hidroeléctrica la cual puede generar 162 kW de energía.
Flotador	[54]	DataRay, SeaRay y StingRay	Compuestos por boyas delanteras y traseras en donde se alberga un generador rotativo el cual es accionado con el movimiento de dichas boyas, con lo que se logra generar la energía eléctrica y transmitirla a la red. La empresa C-Power con el fin de innovar la electrificación de equipos marinos y reducir el uso de combustibles de carbono desarrolló estos dispositivos, el DataRay con una capacidad <1 kW diseñado para sensores marinos, SeaRay con una capacidad de 1 a 5

			kW implementado para vehículos marinos no tripulados y el StingRay fue diseñado para cubrir diversas las necesidades de >500 kW.
Tipo	[54]	Hull Reservoir	Consta de un depósito flotante y una solapa con bisagras (dentro del depósito) que se mueve por acción del flotador y del fluido que contiene dicho flotador, por lo tanto, el movimiento relativo de estos dispositivos (flotador y solapa) capturan la energía para posteriormente transformarla en energía eléctrica.
Péndulo			
Flotador	[54]	VAPA	Consta de un cilindro hueco flotante con un techo el cual permite regular su apertura, sin embargo, se determinó que al estar completamente abierto o cerrado la absorción de energía era mayor según las condiciones de las olas, por lo que la apertura intermedia se la utilizó como una herramienta para el cuidado del dispositivo ya que minimizada el movimiento vertical evitando daños.
	[54]	REEFS	Es un dispositivo multipropósito que puede ubicarse cerca de las costas (sumergido), este dispositivo además de convertir la energía de las olas sirve como medida de protección de las costas. El REEFS aprovecha la diferencia de presión y velocidad de la ola en el espacio para producir electricidad.

Flap	[54]	ModuleRaft	Está conformado por un flap flotante y cuatro balsas acopladas a la estructura principal las cuales gracias a su movimiento (cabeceo) permite el aprovechamiento de la energía cinética y potencial de las olas para producir energía eléctrica, este dispositivo aprovecha la energía de las olas sin importar su dirección.
Absorbedor puntual	[62][64][65]	Arquímedes	Está conformado por una cámara con una tapa que se encuentra totalmente sumergida y llena de aire, esta puede moverse verticalmente en relación con un basamento fijo en el fondo marino, a medida que una ola atraviesa por el dispositivo, la tapa se mueve como consecuencia de los cambios de presión del agua, dicha tapa se encuentra acoplada a un generador lineal el cual convierte ese movimiento en energía eléctrica. El AWS posee una potencia máxima de 2470 kW, sin embargo, no posee un nivel de potencia nominal efectiva, pero la potencia de salida aumenta en relación con las características de las olas (altura y período). Un prototipo de este dispositivo se encuentra instalado en Portugal, el cual posee una potencia máxima de 2MW.
OB	[64][65]	Langlee	Posee cuatro aletas articuladas que están unidas a un marco común las cuales al entrar en contacto con las olas se mueven de un lado a otro, este movimiento en relación con la estructura de soporte es transformado en electricidad por medio de un sistema hidráulico de toma de fuerza (PTO). Este dispositivo posee una potencia nominal de 1660 kW y su rendimiento depende

			principalmente del periodo de las olas, sin embargo, para la mayor parte lugares su rendimiento aborda el 80% del rango operativo.
Flotador	[64][65]	Pelamis	Está conformado por una serie de secciones cilíndricas semisumergidas unidas por articulaciones, el movimiento (elevación o balanceo) inducido por las olas es resistido por los cilindros hidráulicos quienes por medio de motores bombean aceite a alta presión e impulsan a los generadores eléctricos. El Pelamis posee una capacidad nominal de 750 kW.
Absorbedor Puntual	[64][65]	Pontoon Power	Está conformado por muchas boyas flotantes acopladas mediante un sistema de fuerza PTO a una estructura sumergida común, este dispositivo responde poco a las olas (cortas o largas) por lo que la matriz de potencia tiene únicamente el 12% de los compartimientos con una producción de potencia superior normalizada de 0,4. La matriz de potencia está considerada en base a que 10 boyas flotadoras producen una potencia máxima de 3600 kW aproximadamente.
Atenuador	[64][65]	SeaPower	Posee dos pontones de hormigón grandes los cuales oscilan alrededor de una bisagra, este movimiento por medio del sistema PTO puede ser convertido en electricidad o ser utilizado para otras actividades como bombeo de agua hacia la costa, etc. Este dispositivo posee una potencia máxima de 3600kW aproximadamente y su rendimiento depende mayormente de la altura de las olas.

OB	[65]	WaveStar	Se encuentra conformado por flotadores en movimiento acoplados a una plataforma que se encuentra anclada al fondo marino, dicho movimiento de los flotadores (ascenso y descenso) es transferido mediante un sistema PTO hidráulico hacia un generador eléctrico accionándolo y produciendo así energía eléctrica. Este sistema posee una potencia nominal de 2709 kW.
OB	[65]	Seabased AB	Está compuesto por boyas ubicadas en la superficie las cuales están unidas a un generador lineal (fijado al fondo marino), estas boyas son accionadas (arriba/abajo) gracias al movimiento de las olas lo que genera electricidad. Este dispositivo es pequeño y posee una potencia nominal de 15 kW.
OB	[65]	Oyster	Este dispositivo (fijado al mar) está conformado por una aleta flotante y articulada que se mueve de un lado a otro como consecuencia del movimiento de las olas, así mismo posee dos pistones hidráulicos que bombean agua a alta presión hacia una estación hidroeléctrica situada en la tierra la cual es la encargada de impulsar un generador para producir la energía eléctrica. El Oyster posee una potencia nominal de 291 kW.
OB	[65]	Oyster 2 (BO-OF)	Este sistema está compuesto por aletas basculantes que oscilan alrededor de un eje fijo anclado al fondo marino, este dispositivo utiliza una bomba que fuerza aceite hidráulico o agua a presión

			<p>hacia una estación en la tierra en donde es transformada la energía hidráulica en energía eléctrica. Su potencia máxima es de 3332 kW.</p>
OB	[65]	Heave Buoy	<p>Esta matriz está conformada por 60 boyas hemisféricas las cuales se encuentran conectadas a un brazo montado y están distribuidas en los lados de tres marcos de una estructura de un puente fijo. La energía cinética rotacional producido por este sistema es convertido a energía eléctrica mediante un sistema de aprovechamiento hidráulico. Su potencia nominal es de 2192 kW.</p>
Absorbedor puntual	[67]		<p>Proponen un dispositivo que consta de 4 bombas de aire de dos tiempos con absorción puntual que son accionadas por las olas con un almacenamiento de aire comprimido el cual alimenta a una turbina de chorro de aire permitiendo que un volante de inercia de eje vertical gire a una velocidad máxima.</p>
Absorbedor Puntual	[68]	Flotador con copa invertida	<p>Proponen un innovador diseño para el flotador con copa invertida, el cual consiste en un flotador con un deflector (1,6 veces el diámetro del flotador) a su alrededor , este dispositivo utiliza el movimiento mecánico unidireccional bajo el efecto de movimiento ondulatorio alternativo, y sus pruebas experimentales demostraron que es más eficiente que el flotador sin deflector el cual arrojó un 6% de energía capturada frente al 19% del flotador con copa invertida.</p>

Flotador	[68]	Aegir Dynamo	Desarrollaron un dispositivo formado por flotador y un generador eléctrico situado en una columna fija escalada, a medida que el nivel del agua presentaba variaciones el flotador se movía de arriba//abajo originando un movimiento rotatorio el cual estaba conectado al generador. Durante las pruebas realizadas se concluyó que este dispositivo aprovechaba el 14% de la energía presente en las olas.
Absorbedor Puntual	[68]	Ocean Harvester	Este sistema fue construido por dos tambores (alimenta al eje de transmisión), un generador (inmerso en el flotador) y un engranaje conectado a una masa pesada para que logre entrar en sincronización con las olas, este a su vez estaba conectado a un generador generando así la energía, este dispositivo se sometió a estudios para conocer su eficiencia, sin embargo, no fueron positivas ya que se obtuvo apenas un 29% de eficiencia en todas las condiciones.

Tabla 4. *Dispositivos y prototipos de tipo OB*

4.4. Sistemas de Desbordamiento

Estos sistemas (near shore) utilizan el desbordamiento de las crestas de las olas (no el movimiento) para almacenar el agua en un depósito situado por encima del nivel del mar, esta agua es liberada gradualmente para impulsar una turbina hidráulica y convertir la energía potencial en energía útil, existen muchos sistemas de este tipo como los WEC flexibles que pueden capturar la energía a diversas alturas y frecuencias [54]. La estructura de estos dispositivos es simple, sin embargo, poseen una fuerte resistencia a las olas y al viento, pero no son muy eficientes debido a que no aprovechan totalmente la energía presente en las olas [62].

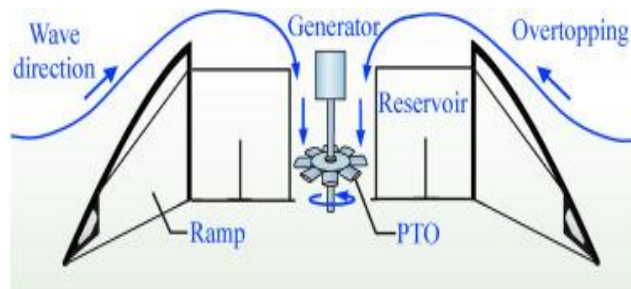


Fig. 15. Estructura básica de los sistemas de desbordamiento [56]

- **Toma de fuerza**

El sistema PTO que utiliza este tipo de convertidores es similar a la de una central hidroeléctrica que emplea una turbina de flujo axial por lo que es una de las tecnologías que más se ha ido desarrollando a lo largo de los años. Las turbinas más empleadas para la generación de energía por medio de las olas son las de tipo Pelton, Kascheme y Francis [56].

4.4.1. Descripción de Dispositivos de tipo desbordamiento

A lo largo de los años debido a la falta de investigación se ha ido desarrollando pocos dispositivos de este tipo, los cuales se reflejan en la Tabla 5.

TIPO	AUTOR	TECNOLOGÍA	DESCRIPCIÓN
Estructura fija	[54]	TAPCHAN	Esta planta fue instalada en 1980 Toftestallen (Noruega), estaba situada fuera del mar (tierra) y su capacidad abarcaba los 350kW, sin embargo, años más tarde (1998) se instaló una nueva planta en la isla Indonesia de Java con una capacidad de 1,1MW.
Terminador	[54][65][69] [63]	Wave Dragón	Es considerado el primer dispositivo fabricado para instalarse en el mar, posee dos alas reflectoras de olas que ayudan a concentrar la masa de agua de las olas que llegan, lo que permite que las olas sobrepasen una rampa, elevando el depósito de agua por encima del mar, el cual al ser liberado acciona múltiples turbinas para producir energía eléctrica. Inicialmente (2003) este dispositivo tenía una capacidad de 140kW, sin embargo, gracias a los avances tecnológicos logró suministrar 7 MW a la red de Gales, 12MW en Portugal y 1,5MW y 4MW a Dinamarca. El Wave Dragon posee una resistencia a los peligros ambientales soportando cualquier balanceo y cabeceo producto de las olas.
FlexWEC	[54]	mWave	Está conformado por una serie de membranas de goma inflables que cubren a las celdas cóncavas que se encuentran en una estructura de base instalada a un ángulo definido en relación con las olas entrantes, las cuales, a medida que pasan por las membranas, el aire contenido en las celdas es expulsado hacia un conducto de aire unidireccional por medio de

			<p>válvulas impulsando una turbina de flujo unidireccional conectada a un generador de velocidad variable, produciendo así energía eléctrica. Esta tecnología destaca por no poseer componentes mecánicos lo que facilita el mantenimiento, reduce el tiempo de inactividad y maximiza la producción de energía simultáneamente. Este proyecto ha entrado a la fase final de prueba y montaje con capacidad de 1,5 MW en Pembrokeshire.</p>
	[54]	<p>Proyecto de demostración Pembrokeshire</p>	<p>En el año de 2022 Bombora inició la fase final de su proyecto con una capacidad de 1,5MW, en donde los módulos de las celdas fueron diseñados para adaptarse tanto a aerogeneradores fijos como flotantes. Así mismo pusieron a prueba un tanque de integración de un mWave con una capacidad de 4MW que contenía un aerogenerador semisumergible de 10MW, formando una plataforma integrada flotante combinando la energía de las olas con la eólica.</p>
Terminador	[65]	<p>Seawave Slot Cone Generator (SSG)</p>	<p>Posee varios depósitos (uno encima de otro) que almacenan el agua proveniente de las olas como energía potencial y la dirigen hacia una turbina para producir electricidad. La potencia nominal de este dispositivo es de 20000 kW ya que los múltiples depósitos que contiene mejora la eficiencia de la producción.</p>

Tabla 5. *Dispositivos de tipo desbordamiento*

4.5. Comparativa y selección del dispositivo WEC

Una vez realizada la revisión y descripción acerca de los Wave Energy Converter (WEC) se presenta el análisis de sus diferentes tipos, para lo que se eligió a los dispositivos con mayor potencia nominal, sin embargo, debido a que se presenta la existencia de dos WEC del mismo tipo con la misma potencia, primeramente se realizó un cuadro comparativo entre estos dos dispositivos con el fin de seleccionar uno de ellos, para seguidamente realizar un segundo cuadro comparativo en donde se expone varias características, con la finalidad de obtener una visión acerca del dispositivo más adecuado.

4.5.1. Análisis entre el dispositivo SeaPower y el Pontoon Power

El análisis comparativo de estos dos WECs de tipo Cuerpo Oscilante se basó en la comparativa de las características principales como el material del cual está construido, las principales desventajas, su eficiencia y sus aplicaciones tal como se muestra en la Tabla 6.

Características	SeaPower	Pontoon Power
Materiales y componentes	Dos Pontones de Hormigón	Boyas flotantes acopladas a una estructura semisumergible
Desventajas	Su rendimiento depende de la altura de las olas	Es insensible ante la presencia de ondas cortas o largas
Eficiencia	La salida de potencia normalizada es de $> 0,4$ para varios estados del mar representando alrededor del 80% del rango operativo	La matriz de potencia tiene el 12% de los compartimentos con una salida de potencia normalizada mayor a 0,4
Aplicaciones	Generar electricidad o bombear agua	Generar electricidad

Tabla 6. Comparativa entre los WEC de tipo Cuerpo Oscilante

Al realizar la comparación entre los dos dispositivos de Cuerpo Oscilante se llegó a la conclusión que el dispositivo que presenta mayor beneficio es el SeaPower, debido a que presenta una mayor eficiencia y una aplicación alternativa ante la ausencia de la necesidad de generar electricidad.

4.5.2. Análisis comparativo de los tres tipos de WECs seleccionados

Una vez realizado a selección del dispositivo de tipo Cuerpo oscilante más eficiente, se realiza la comparativa entre los tres tipos principales de WECS para la determinación del sistema más factible para su implementación, para lo cual se toma en cuenta sus principales características, tal como se muestra en la Tabla 7.

Análisis comparativo de los parámetros de los Sistemas WEC			
	Columna de Agua Oscilante	Sistemas de Cuerpo Oscilante	Sistemas de desbordamiento
Dispositivo	Buoy OE	SeaPower	SSG
Material	<ul style="list-style-type: none"> • Cámara semisumergida 	<ul style="list-style-type: none"> • Dos pontones de hormigón 	<ul style="list-style-type: none"> • Hormigón robusto
Sitio de construcción	<ul style="list-style-type: none"> • Alta mar (Offshore) • Cerca de la costa (Nearshore) 	<ul style="list-style-type: none"> • Alta mar (Offshore) • Cerca de la costa (Nearshore) 	<ul style="list-style-type: none"> • Alta mar (Offshore) • Cerca de la costa (Nearshore) • En un rompeolas
Potencia	<ul style="list-style-type: none"> • Potencia nominal de 2880 kW 	<ul style="list-style-type: none"> • Potencia nominal de 3600 kW 	<ul style="list-style-type: none"> • Potencia nominal de 20000 kW
Ventajas	<ul style="list-style-type: none"> • Posee una turbina bidireccional 	<ul style="list-style-type: none"> • Puede utilizarse para generar electricidad o bombear agua de mar. 	<ul style="list-style-type: none"> • Posee varios depósitos para almacenar agua en forma de energía potencial mejorando su eficiencia.

			<ul style="list-style-type: none"> • Facilidad para la adaptación de una turbina Multi- Stage la cual minimiza las secuencias de parada y marcha para que su funcionamiento continúe aún con un solo depósito de suministro de agua. • Para cada etapa individual presenta un 90% de eficiencia.
Desventajas	<ul style="list-style-type: none"> • Posee un menor porcentaje de adaptabilidad con respecto a los climas costeros ambientales (condiciones de las olas) • Su producción depende de las características del oleaje 	<ul style="list-style-type: none"> • Posee un menor porcentaje de adaptabilidad con respecto a los climas costeros ambientales (condiciones de las olas) 	<ul style="list-style-type: none"> • Ruido de la turbina

Tabla 7. Comparativa de los diferentes tipos de WECs

Con la comparativa de las características realizada entre estos tres tipos de WECs, se obtiene que el dispositivo más factible es el SSG debido a su capacidad de almacenamiento y alta potencia nominal ya que posee cámaras de almacenamiento ante la presencia de olas bajas, disminuyendo la interrupción de generación de electricidad. Así mismo puede ser instalado en varios lugares del mar, lo que es considerado uno de los factores determinantes para su costo.

4.6. Cuantificación de la Energía en el Ecuador

4.6.1. Oleaje presente en el borde costero continental

Para la generación de energía eléctrica por medio de las olas es necesario conocer sus características y movimientos presentes en la zona costera del Ecuador (Fig. 16), actualmente el encargado de la monitorización del mar es el Instituto Oceanográfico y Antártico de la Armada (INOCAR), motivo por el cual la información necesaria (características de las olas) para la cuantificación de la energía presente en el borde costero se la obtuvo de su base de datos, ya que esta institución posee boyas desplegadas a lo largo de la zona costera con el fin de conocer los oleajes y aguajes presentes en esta zona.



Fig. 16. Boyas desplegadas a lo largo de la zona costera [70]

En la Figura 17 se muestra una grilla del borde costero continental en donde se puede visualizar la altura en metros del oleaje presente en esta zona, dicha grilla fue extraída de la página oficial del INOCAR.

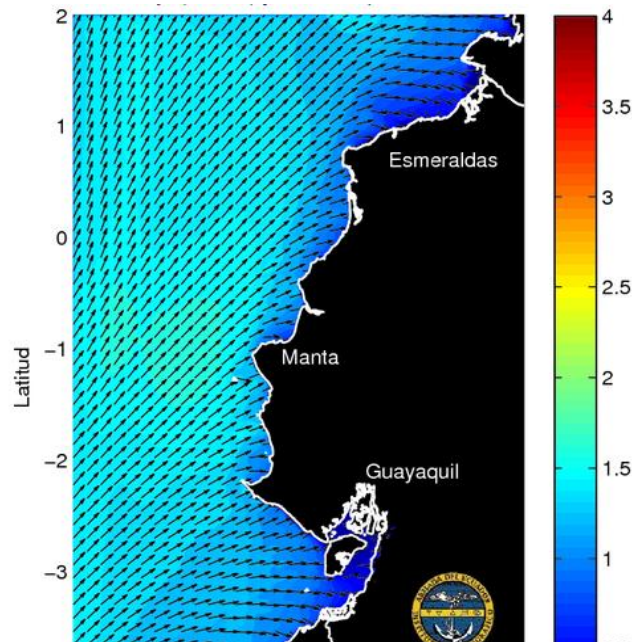


Fig. 17. Modelo Operacional INOCAR-SWAN: Grilla de Ecuador [71]

En la figura 17 se puede observar que la altura de las olas en el borde costero continental oscila entre el 1,3 y 1,6m de altura, sin embargo, para obtener un cálculo más preciso fue necesario realizar un seguimiento del oleaje durante todo el año 2023 con el fin de cuantificar con mayor exactitud la energía. En la Tabla 8 se muestra la altura media y periodo de cada mes del año.

Mes	Oleaje Promedio (m)	Período (s)
Enero	1,31	15,40
Febrero	1,13	14,18
Marzo	0,98	13,34
Abril	0,97	11,85
Mayo	1,45	15,45
Junio	1,31	14,2
Julio	1,25	12,96

Agosto	1,19	14,85
Septiembre	1,31	14,28
Octubre	1,40	15,21
Noviembre	1,27	14,18
Diciembre	1,63	14,5

Tabla 8. Alturas y períodos promedio de las olas en el año 2023.

Esta información fue recopilada de la página web del INOCAR el cual emite los boletines de estos parámetros diariamente, por lo que para calcular la altura y período para cada mes se realizó un promedio de los datos diarios obtenidos. A continuación, en la figura 18 se muestra de manera gráfica la altura de las olas mensualmente.



Fig. 18. Altura promedio de las olas en el año 2023

4.6.2. Cálculo de la Potencia por metro de frente de Ola en el borde costero continental

Con los datos expuestos en la Tabla 8 se procede a calcular la longitud de la ola empleando la ecuación 1, en donde se considera el valor de la gravedad de $9,81 \text{ m/s}^2$.

$$\lambda = 55,25 \text{ m}$$

Tomando en consideración el valor de la longitud de ola obtenido anteriormente y considerando igualmente el valor de la gravedad de $9,81 \text{ m/s}^2$, se calcula la velocidad de la ola por medio de la ecuación 2, en donde se obtiene un valor de:

$$v = 9,29 \frac{\text{m}}{\text{s}}$$

Para el cálculo de la masa de agua se debe tomar en cuenta la densidad del agua que es igual a 1027 kg/m^3 para agua de mar [2], también el ancho de frente de ola será de 1 m debido a que se calculará la potencia por cada metro de frente de ola, por lo tanto, empleando la Ecuación 3 se obtiene que:

$$m = 18599,70 \text{ kg}$$

Una vez obtenida el valor de la masa es necesario calcular la energía cinética presente en las olas, para lo que se utiliza la Ecuación 4, obteniendo como resultado:

$$Ec = 802,16 \text{ KJ}$$

Finalmente, a través de la Ecuación 5 se calcula la potencia por cada metro de frente de ola.

$$P = 52,08 \text{ kW} \text{ por cada metro de frente de ola}$$

Como resultado se obtiene que para el mes de Enero de 2023 la potencia por metro de frente de ola fue de $52,08 \text{ kW}$, siguiendo este mismo proceso se realiza el cálculo para los demás meses los cuales se reflejan en la Tabla 9.

Mes	Altura del Oleaje	Potencia (kW/m)
Enero	1,31	52,08
Febrero	1,13	35,62
Marzo	0,98	25,30

Abril	0,97	21,77
Mayo	1,45	64,02
Junio	1,31	48,16
Julio	1,25	39,94
Agosto	1,19	41,83
Septiembre	1,31	48,32
Octubre	1,40	58,62
Noviembre	1,27	45,10
Diciembre	1,63	75,74

Tabla 9. Potencia por cada metro de frente de ola suscitado en el año 2023

4.6.3. Cuantificación del rendimiento de potencia del SSG

Tomando en cuenta la altura de las olas y el período obtenido de los datos históricos del oleaje presente en el borde costero continental ecuatoriano, es necesario conocer la altura significativa, para lo cual se tomó el tercio de los datos de cada mes de los resultados de las olas promedio más alto. En la figura 19 se muestra la altura significativa calculada para cada mes del año 2023 de registro de datos

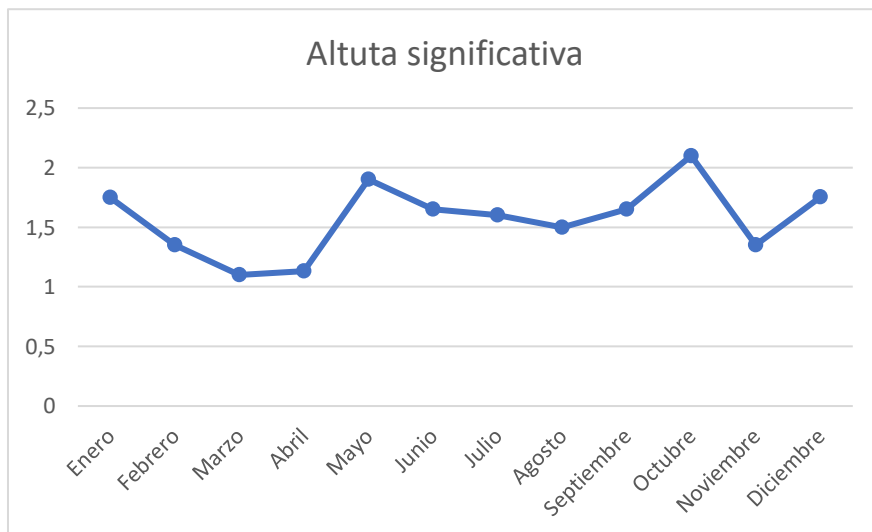


Fig. 19. Altura significativa del año 2023

Como se puede apreciar, el comportamiento del oleaje varía de acuerdo con la época del año, afectado a su vez el potencial energético, por lo que usando la ecuación 7 descrita anteriormente se calcula el flujo de potencia perteneciente al mes de Enero.

$$F = 23,58 \text{ kW/m}$$

De acuerdo con los resultados anteriormente, en la tabla 10 se muestra los valores de potencia de frente de ola realizados, en donde se considera la Hs de cada uno de los meses del año.

Mes	Altura Significativa (m)	Flujo de Potencia (kW/m)
Enero	1,75	23,58
Febrero	1,35	12,92
Marzo	1,1	8,07
Abril	1,13	7,61
Mayo	1,9	27,89
Junio	1,65	19,33
Julio	1,6	16,60
Agosto	1,5	16,71
Septiembre	1,65	19,44
Octubre	2,1	33,54
Noviembre	1,35	12,92
Diciembre	1,76	22,34

Tabla 10. *Flujo de potencia de las olas de cada mes del año*

Analizando los datos obtenidos en la tabla anterior se puede ver que los meses con mayor potencial de energía son octubre y mayo, sin embargo, durante los meses restantes también se cuenta con un potencial considerable, por lo que, para conocer el potencial medio aproximado

del borde costero continental, se realizó un promedio de todos los datos obtenidos dando como resultado 18,41 kW/m.

De igual manera, para conocer la potencia de captura de un WEC se emplea la ecuación 8, en donde es necesario conocer el ancho de captura el cual según Jim [72] menciona que el ancho de captura (CW) para el SSG es igual al ancho del dispositivo que es de 10m, por lo tanto, tomando en consideración el flujo de potencia de las olas descrito en la Tabla 10 se obtiene la potencia capturada por el SSG durante los meses del año.

Mes	Potencia (kW/m)	Pwave (kW)
Enero	23,59	235,86
Febrero	12,92	129,20
Marzo	8,07	80,70
Abril	7,61	76,10
Mayo	27,89	278,90
Junio	19,33	193,30
Julio	16,60	166,00
Agosto	16,71	167,12
Septiembre	19,44	194,43
Octubre	33,54	335,40
Noviembre	12,92	129,25
Diciembre	22,34	223,44

Tabla 11. *Potencia capturada por el SSG*

Según los cálculos realizados se estima que el SSG puede capturar hasta 335,40 kW de potencia con un ancho de captura de 10m, sin embargo, existe meses como abril en donde el potencial

capturado es muy poco debido a la potencia presente en el oleaje. A pesar de ello existen meses significativos donde la captura de potencia es representativa y viable para su transformación.

4.6.4. Cuantificación de energía eléctrica generada por el SSG

Para saber la energía eléctrica que produciría el SSG se relaciona a la energía capturada con la eficiencia de este dispositivo, el cual posee una eficiencia global de conversión de energía de las olas en eléctrica del 25% al 35% [73], por lo tanto, se procede a calcular la energía producida por este dispositivo en cada mes, aplicando la ecuación 8.

Mes	P_{wave} (kW)	Energía Generada (kW)
Enero	235,86	58,97 - 82,55
Febrero	129,20	32,30 – 45,22
Marzo	80,70	20,17 – 28,24
Abril	76,10	19,03 – 26,64
Mayo	278,90	69,73 – 97,62
Junio	193,30	48,32 – 67,65
Julio	166,00	41,50 – 58,10
Agosto	167,12	41,78 – 58,49
Septiembre	194,43	48,61 – 68,05
Octubre	335,40	83,84 – 117,38
Noviembre	129,25	32,31 – 45,24
Diciembre	223,44	55,86 – 78,21

Tabla 12. *Energía generada por el SSG.*

Con lo expuesto en la tabla 12 se concluye que el SSG puede generar hasta 117,38 kW, convirtiéndolo en una posible opción de implementación.

Conclusiones

1. El análisis realizado con respecto a las principales características y aplicaciones de la energía undimotriz ha permitido revelar un campo muy prometedor dentro del ámbito de las energías renovables, debido a que esta energía se basa en la captura cinética de las olas presentando así características distintivas con respecto a otras fuentes, así mismo las aplicaciones de esta fuente abarca diversas áreas logrado posicionarse como una de las energías más competentes en un futuro.
2. Por medio de la investigación detallada de los Wave Energy Converter se ha podido revelar una gran diversidad de enfoques innovadores y soluciones técnicas, ya que estos dispositivos durante los últimos años han ido evolucionando notablemente para abordar los desafíos relacionados tanto con la eficiencia de captura de energía, la resistencia a las condiciones marinas y la facilidad de mantenimiento, todo esto con el fin de perfeccionar las tecnologías disponibles, es así que varios países como Reino Unido, Portugal, Dinamarca, Australia, entre otros han ido adquiriendo esta tecnología con el fin de generar electricidad a través de la energía undimotriz buscando diversificar sus fuentes de generación.
3. Una vez realizada la comparativa entre las principales características de los diversos WECs se concluye que uno de los dispositivos que puede ser implementado en el país es el SSG debido a que su instalación puede realizarse tanto de manera Onshore, Offshore y Nearshore, reduciendo los costos de mantenimiento e implementación y sirviendo a su vez como un medio de protección evitando la erosión del suelo, así mismo su capacidad de almacenamiento permite generar electricidad de una manera constante e ininterrumpida convirtiéndolo en una buena opción de implementación. Así mismo se estima que el SSG puede generar 117,38 kW.

Recomendaciones

Basándonos en el análisis comparativo de los Wave Energy Converters realizado para una posible aplicación en el Ecuador, se recomienda enfocar a las futuras investigaciones en la selección y adaptación de tecnologías más específicas con respecto al ambiente marino presente en las costas ecuatorianas, impactos ambientales y viabilidad económica, debido a que estos parámetros son fundamentales para una mejor selección de dispositivos WEC, así mismo se sugiere la posibilidad de explorar nuevas estrategias de integración con otras fuentes, con el fin de mejorar la eficiencia, confiabilidad y estabilidad del suministro de energía.

Referencias

- [1] Ministerio de Energía y Minas, “Balance Energético Nacional,” Quito, 2021. [Online]. Available: www.recursoyenergia.gob.ec
- [2] M. J. Chimbo Campuzano and R. R. Rodriguez Santos, “APROVECHAMIENTO DE LA ENERGÍA UNDIMOTRIZ EN EL ECUADOR,” *Ingenius*, no. 17, p. 23, Dec. 2016, doi: 10.17163/INGS.N17.2017.03.
- [3] “LA ENERGÍA Y EL DESARROLLO DE LA HUMANIDAD | TotalEnergies.” Accessed: Jan. 27, 2024. [Online]. Available: <https://www.totalenergies.es/es/pymes/blog/la-energia-y-el-desarrollo-de-la-humanidad>
- [4] Otorongo Manuel, “Análisis técnico – económico de factibilidad de implementación de sistemas de alumbrado público inteligente en el Ecuador,” *Escuela Politécnica Nacional*, Apr. 2021, Accessed: Apr. 22, 2023. [Online]. Available: <http://bibdigital.epn.edu.ec/handle/15000/21759>
- [5] Barragán Edgar, Zalamea Estevan, Terrados Julio, and Vanegas Pablo, “Factores que influyen en la selección de energías renovables en la ciudad,” vol. 45, pp. 1–1, Jan. 2019, Accessed: Apr. 21, 2023. [Online]. Available: https://www.scielo.cl/scielo.php?pid=S0250-71612019000100259&script=sci_arttext
- [6] Barragán Rommel and Llanes Edilberto, “THE GENERATION OF ELECTRICAL ENERGY FOR INDUSTRIAL DEVELOPMENT IN ECUADOR FROM THE USE OF RENEWABLE ENERGY,” Universidad Internacional SEK. Accessed: Apr. 21, 2023. [Online]. Available: <https://uctunexpo.autanabooks.com/index.php/uct/article/view/364/759>
- [7] Castro Felipe, “Modelación, diseño, fabricación y validación experimental de un convertidor undimotriz de dos cuerpos.,” Apr. 2020, doi: 10.7764/TESISUC/ING/28651.
- [8] Escalona Ana, “Estudio de los diseños y procesos fluidodinámicos que se encuentran en la generación de energía eléctrica proveniente de las olas: Absorbedores puntuales,” Oct. 2018, Accessed: Apr. 21, 2023. [Online]. Available: <http://addi.ehu.es/handle/10810/29371>
- [9] A. Haim *et al.*, “ENERGÍA UNDIMOTRIZ-TECNOLOGIA ARGENTINA PARA LA GENERACIÓN DE ENERGÍA ELECTRICA,” Sep. 2019. [Online]. Available: <http://swanmodel.sourceforge.net/>
- [10] Fernández Carlos, “Análisis socio-económico de viabilidad de un parque undimotriz: aplicación en la costa cántabra,” *Universidad de Cantabria*, Jul. 2018, Accessed: Apr. 22, 2023. [Online]. Available: <https://repositorio.unican.es/xmlui/handle/10902/14164>
- [11] “Enlace Ciudadano N° 306: Ecuador transforma la matriz energética y productiva – Vicepresidencia de la República del Ecuador,” Vicepresidencia de la República del Ecuador. Accessed: Apr. 22, 2023. [Online]. Available: <https://www.vicepresidencia.gob.ec/enlace-306-matriz-energetica-productiva/>

- [12] Ministerio de Energía y Minas, “ECUADOR CONSOLIDA LA PRODUCCIÓN ELÉCTRICA A PARTIR DE FUENTES RENOVABLES – Ministerio de Energía y Minas.” Accessed: Apr. 22, 2023. [Online]. Available: <https://www.recursoyenergia.gob.ec/ecuador-consolida-la-produccion-electrica-a-partir-de-fuentes-renovables/>
- [13] ARCERNNR, “ESTADÍSTICA ANUAL Y MULTIANUAL DEL SECTOR ELÉCTRICO ECUATORIANO,” 2021. Accessed: Apr. 22, 2023. [Online]. Available: <https://www.controlrecursoyenergia.gob.ec/wp-content/uploads/downloads/2022/04/Estadistica2021.pdf>
- [14] ARCERNNR, “Estadística Anual y multianual del sector eléctrico ecuatoriano,” 2022.
- [15] Varela Andrea and Ron Santiago, “Geografía y clima,” PUCE. Accessed: Apr. 22, 2023. [Online]. Available: <https://bioweb.bio/fungiweb/GeografiaClima/>
- [16] Amor Cristina and Vela Julio, “ESTUDIO DE VIABILIDAD DE SISTEMAS DE CONVERSIÓN DE LA ENERGÍA DE LAS OLAS EN LA COSTA DE CANTABRIA,” *UNIVERSIDAD DE CANTABRIA*, Feb. 2018.
- [17] W. E. Guastay Cajo and E. A. Llanes Cedeño, “THE USE OF HYDRAULIC ENERGY FOR THE GENERATION OF ELECTRICAL ENERGY AS A STRATEGY FOR INDUSTRIAL DEVELOPMENT IN ECUADOR,” *Universidad Ciencia y Tecnología*, vol. 24, no. 104, pp. 28–35, Sep. 2020, doi: 10.47460/UCT.V24I104.363.
- [18] V. Cabello, “Plantas de energías renovables marinas: Efectos potenciales en mamíferos marinos y medidas de mitigación,” 2022. Accessed: Jan. 27, 2024. [Online]. Available: <http://cicese.repositorioinstitucional.mx/jspui/handle/1007/3698>
- [19] J. L. Pelegrí, H. Marotta, S. A. Navarrete, and A. Pascual, “El papel regulador de los océanos en el sistema terrestre,” 2019, Accessed: Jan. 27, 2024. [Online]. Available: <https://digital.csic.es/handle/10261/191591>
- [20] L. Agencia Internacional de las Energías Renovables, “Las energías renovables marinas: Impulsan la economía azul”.
- [21] C. Ossandón Rosales, “SISTEMA DE PERMISOS EN MATERIA DE ENERGÍAS MARINAS: LOS CASOS DE CANADÁ Y ESTADOS UNIDOS EN CONTRASTE CON CHILE. BRECHAS Y DESAFÍOS DESDE UNA PERSPECTIVA DE DERECHO COMPARADO,” *Revista de derecho (Concepción)*, vol. 88, no. 248, pp. 233–264, Jun. 2020, doi: 10.29393/RD248-18SPJO10018.
- [22] M. Mendonça, C. Alves, M. Pereira, and M. Ferreira, “Energia maremotriz: Análise e fundamentos,” *Revista Técnica-Científica do CREA-PR*, no. 28, 2022.
- [23] “Las mareas, ¿por qué el mar sube y baja? | El Manto Azul.” Accessed: Jan. 27, 2024. [Online]. Available: <https://elmantoazul.wordpress.com/2022/04/01/las-mareas-por-que-el-mar-sube-y-baja/>

- [24] “Qué es la energía mareomotriz y cómo genera electricidad | Endesa.” Accessed: Jan. 27, 2024. [Online]. Available: <https://www.endesa.com/es/la-cara-e/energias-renovables/energia-mareomotriz-que-es-y-como-genera-electricidad>
- [25] M. Abreu, “Selección de sitios para la obtención de energía maremotérmica terrestre utilizando tecnología satelital,” 2022. Accessed: Jan. 27, 2024. [Online]. Available: https://www.researchgate.net/publication/365285118_Seleccion_de_sitios_para_la_obtencion_de_energia_maremotermica_terrestre_utilizando_tecnologia_satelital
- [26] J. Pérez and A. Reyes, “Estudio de la factibilidad para la instalación de una planta maremotérmica en la costa de Oaxaca,” 2018. doi: <http://tesis.ipn.mx/handle/123456789/27733>.
- [27] “central_maremotermica.jpg (925×756).” Accessed: Jan. 27, 2024. [Online]. Available: http://www.sotaventogalicia.com/recursos/custom/zona_interactiva/comun/imaxes/central_maremotermica.jpg
- [28] E. Janeth *et al.*, “Energías del Océano Energía del Gradiente Salino Colección Energías Renovables del Océano”.
- [29] A. Castellà, “Estudio de la viabilidad de la energía undimotriz y de las corrientes marinas en Cataluña,” 2021, Accessed: Jan. 27, 2024. [Online]. Available: <https://upcommons.upc.edu/handle/2117/355571>
- [30] “Glosario de términos ambientales y de las energías renovables - caloryfrio.com.” Accessed: Jan. 27, 2024. [Online]. Available: <https://www.caloryfrio.com/energias-renovables/glosario-terminos-ambientales-energias-renovables.html#potencia-osmotica-energia-azul>
- [31] E. García, “Potencial de la Energía Undimotriz en Costas Mexicanas y Usos Potenciales.,” 2019, [Online]. Available: <http://132.248.52.100:8080/xmlui/handle/132.248.52.100/16411>
- [32] A. Jaramillo, “Diseño de un sistema de generación undimotriz para suministrar la demanda de electricidad del Astillero Marypol E I R L en Puerto Salaverry, 2018,” UNIVERSIDAD NACIONAL “PEDRO RUIZ GALLO”, 2019. Accessed: Jan. 27, 2024. [Online]. Available: <https://1library.co/document/zpn93n0y-diseno-generacion-undimtriz-suministrar-electricidad-astillero-marypol-salaverry.html>
- [33] M. Espinosa, “Aprovechamiento de la energía de las olas con fines de generación de energía eléctrica,” 2018. [Online]. Available: http://bibliotecavirtual.dgb.umich.mx:8083/xmlui/handle/DGB_UMICH/7653
- [34] M. Hoyos, “CARACTERIZACIÓN DE ONDAS MECÁNICAS.” [Online]. Available: <https://cursoparalaunam.com/caracterizacion-de-ondas-mecanicas>
- [35] R. Martínez Aneiros, “Estudio de las olas y su aprovechamiento en energía undimotriz,” 2018, Accessed: Jan. 27, 2024. [Online]. Available: <https://riull.ull.es/xmlui/handle/915/9217>

- [36] J. Laz and A. Acebo, “Mecanismo de boyas para la obtención de energía undimotriz en zonas costeras,” 2020, [Online]. Available: <https://publicacionescd.uileam.edu.ec/index.php/aula-24/article/view/438/738>
- [37] P. Amruta, “Ocean Thermal Energy - Environment Notes.” [Online]. Available: <https://prepp.in/news/e-492-ocean-thermal-energy-environment-notes>
- [38] J. Gómez, “Estrategia de diseño de plantas de energía undimotriz para generación distribuida,” 2018. [Online]. Available: <http://repositorio.ugto.mx/handle/20.500.12059/357>
- [39] A. Mata, “Diseño y evaluación de un modelo hidráulico a escala para captación de energía undimotriz en la costa del Pacífico de Costa Rica,” 2023. [Online]. Available: <https://repo.sibdi.ucr.ac.cr/handle/123456789/19854>
- [40] H. A. Said and J. V. Ringwood, “Grid integration aspects of wave energy—Overview and perspectives,” *IET Renewable Power Generation*, vol. 15, no. 14, pp. 3045–3064, Oct. 2021, doi: 10.1049/RPG2.12179.
- [41] M. León, “Evaluación de los impactos ambientales de tecnologías de generación de energía a partir del océano a través del enfoque de ciclo de vida,” 2021. doi: <https://hdl.handle.net/20.500.14330/TES01000819565>.
- [42] A. López and J. Ruiz, “Estudio de pre-factibilidad de generación de energía ola motriz para la ciudad de Santa Marta.” [Online]. Available: <https://repository.unimilitar.edu.co/handle/10654/36599>
- [43] “Instituto Oceanográfico y Antártico de la Armada - Reseña histórica.” [Online]. Available: <https://www.inocar.mil.ec/web/index.php/institucion/quienes-somos/resena-historica?start=2>
- [44] S. Castro González, “Estudio de un sistema de desalación alimentado con energía undimotriz para cultivo en el norte de Tenerife,” 2019, [Online]. Available: <https://riull.ull.es/xmlui/handle/915/16566>
- [45] El espejo Canario, “Ocean Oasis presenta el prototipo ‘Gaia’ de desalación undimotriz que se probará en Plocan.” [Online]. Available: <https://www.elespejocanario.es/secciones/ocean-oasis-presenta-el-prototipo-gaia-de-desalacion-undimotriz-que-se-probara-en-plocan/>
- [46] A. Roby, “Extensión territorial y límites del Ecuador: ¿Cuánto verdaderamente conoces de tu país?,” 2018. [Online]. Available: <https://es.linkedin.com/pulse/extensi%C3%B3n-territorial-y-l%C3%ADmites-del-ecuador-arturo-roby-nivelo>
- [47] Secretaría Técnica Planifica Ecuador, “PLAN DE ORDENAMIENTO DEL ESPACIO MARINO COSTERO 2017-2030,” *Ministerio del Ambiente, Agua y Transición Ecológica*, 2021, [Online]. Available: <https://www.ambiente.gob.ec/ecuador-presenta-plan-de-ordenamiento-del-espacio-marino-y-costero/>
- [48] J. J. Yepes-Nuñez, G. Urrútia, M. Romero-García, and S. Alonso-Fernández, “Declaración PRISMA 2020: una guía actualizada para la publicación de revisiones sistemáticas,” *Rev Esp Cardiol*, vol. 74, no. 9, pp. 790–799, Sep. 2021, doi: 10.1016/J.RECESP.2021.06.016.

- [49] Scopus, “What is Scopus about?” [Online]. Available: https://service.elsevier.com/app/answers/detail/a_id/15100/c/10544/supporthub/scopus/
- [50] G-Talent, “¿Qué es Excel y qué aplicación tiene?” [Online]. Available: <https://www.g-talent.net/blogs/microsoft/que-es-excel-y-que-aplicacion-tiene>
- [51] S. Jin, S. Zheng, and D. Greaves, “On the scalability of wave energy converters,” *Ocean Engineering*, vol. 243, Jan. 2022, doi: 10.1016/j.oceaneng.2021.110212.
- [52] Y. Zheng, Q. Chen, X. Yue, D. Geng, Y. Niu, and X. Gu, “Active-resonance technology for wave energy utilization: An efficient offshore distributed renewable power generation alternative,” *Energy Convers Manag*, vol. 292, 2023, doi: 10.1016/j.enconman.2023.117359.
- [53] M. Hasan Maheen and Y. Yang, “Wave energy converters with rigid hull encapsulation: A review,” *Sustainable Energy Technologies and Assessments*, vol. 57. Elsevier Ltd, Jun. 01, 2023. doi: 10.1016/j.seta.2023.103273.
- [54] S. Rehman, L. M. Alhems, M. M. Alam, L. Wang, and Z. Toor, “A review of energy extraction from wind and ocean: Technologies, merits, efficiencies, and cost,” *Ocean Engineering*, vol. 267. Elsevier Ltd, Jan. 01, 2023. doi: 10.1016/j.oceaneng.2022.113192.
- [55] D. H. Yacob, S. Sarip, H. M. Kaidi, J. A. Ardila-Rey, and F. Muhammad-Sukki, “Oscillating Water Column Geometrical Factors and System Performance: A Review,” *IEEE Access*, vol. 10. Institute of Electrical and Electronics Engineers Inc., pp. 32104–32122, 2022. doi: 10.1109/ACCESS.2022.3160713.
- [56] Y. Zhang, Y. Zhao, W. Sun, and J. Li, “Ocean wave energy converters: Technical principle, device realization, and performance evaluation,” *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 141. Elsevier Ltd, May 01, 2021. doi: 10.1016/j.rser.2021.110764.
- [57] S. Kushwah, “An Oscillating Water Column (OWC): The Wave Energy Converter,” *Journal of The Institution of Engineers (India): Series C*, vol. 102, no. 5. Springer, pp. 1311–1317, Oct. 01, 2021. doi: 10.1007/s40032-021-00730-7.
- [58] P. Boccotti, “Caisson breakwaters embodying an OWC with a small opening—Part I: Theory,” *Ocean Engineering*, vol. 34, no. 5, pp. 806–819, 2007, doi: <https://doi.org/10.1016/j.oceaneng.2006.04.006>.
- [59] P. Benreguig, V. Pakrashi, and J. Murphy, “Assessment of primary energy conversion of a closed-circuit OWC wave energy converter,” *Energies (Basel)*, vol. 12, no. 10, 2019, doi: 10.3390/en12101962.
- [60] L. Martinelli, P. Pezzutto, and P. Ruol, “Experimentally based model to size the geometry of a new OWC device, with reference to the mediterranean sea wave environment,” *Energies (Basel)*, vol. 6, no. 9, pp. 4696–4720, 2013, doi: 10.3390/en6094696.
- [61] B. N. Fox, R. P. F. Gomes, and L. M. C. Gato, “Analysis of oscillating-water-column wave energy converter configurations for integration into caisson breakwaters,” *Appl Energy*, vol. 295, Aug. 2021, doi: 10.1016/j.apenergy.2021.117023.

- [62] J. Zhang, H. Yu, and M. Chen, “Direct-Drive wave energy conversion with linear generator: A review of research status and challenges,” *IET Renewable Power Generation*, vol. 17, no. 4. John Wiley and Sons Inc, pp. 1020–1034, Mar. 16, 2023. doi: 10.1049/rpg2.12637.
- [63] O. Farrok, K. Ahmed, A. D. Tahlil, M. M. Farah, M. R. Kiran, and M. R. Islam, “Electrical power generation from the oceanic wave for sustainable advancement in renewable energy technologies,” *Sustainability (Switzerland)*, vol. 12, no. 6. MDPI, Mar. 01, 2020. doi: 10.3390/su12062178.
- [64] S. Bozzi, G. Besio, and G. Passoni, “Wave power technologies for the Mediterranean offshore: Scaling and performance analysis,” *Coastal Engineering*, vol. 136, pp. 130–146, Jun. 2018, doi: 10.1016/j.coastaleng.2018.03.001.
- [65] A. G. Majidi, B. Bingölbali, A. Akpınar, G. Iglesias, and H. Jafali, “Downscaling wave energy converters for optimum performance in low-energy seas,” *Renew Energy*, vol. 168, pp. 705–722, May 2021, doi: 10.1016/j.renene.2020.12.092.
- [66] G. He *et al.*, “Review on research approaches for multi-point absorber wave energy converters,” *Renew Energy*, vol. 218, Dec. 2023, doi: 10.1016/j.renene.2023.119237.
- [67] R. Kamali-Sarvestani and H. Nademi, “Harnessing the Power of Ocean Waves to Make Electric Energy,” in *2022 IEEE Conference on Technologies for Sustainability, SusTech 2022*, Institute of Electrical and Electronics Engineers Inc., 2022, pp. 173–176. doi: 10.1109/SusTech53338.2022.9794259.
- [68] A. Ramadan, M. H. Mohamed, and H. A. Gabbar, “Experimental analysis of an enhanced design of float with inverted cup for wave energy conversion,” *Ocean Engineering*, vol. 249, Apr. 2022, doi: 10.1016/j.oceaneng.2022.110910.
- [69] A. Darwish and G. A. Aggidis, “A Review on Power Electronic Topologies and Control for Wave Energy Converters,” *Energies*, vol. 15, no. 23. MDPI, Dec. 01, 2022. doi: 10.3390/en15239174.
- [70] Instituto Oceanográfico y Antártico de la Armada, “Estaciones de monitoreo.” Accessed: Jan. 20, 2024. [Online]. Available: <https://www.inocar.mil.ec/web/index.php/productos/estaciones-de-monitoreo>
- [71] Instituto Oceanográfico y Antártico de la Armada, “Modelos numéricos.” Accessed: Jan. 27, 2024. [Online]. Available: <https://www.inocar.mil.ec/web/index.php/productos/modelos-numericos#modelo-swan-2>
- [72] S. Jin, S. Zheng, and D. Greaves, “On the scalability of wave energy converters,” *Ocean Engineering*, vol. 243, p. 110212, Jan. 2022, doi: 10.1016/J.OCEANENG.2021.110212.
- [73] D. Vicinanza, L. Margheritini, J. P. Kofoed, and M. Buccino, “The SSG wave energy converter: Performance, status and recent developments,” *Energies*, vol. 5, no. 2. MDPI AG, pp. 193–226, 2012. doi: 10.3390/en5020193.