

**Potencial de los mares colombianos para producir energía en las poblaciones de los  
litorales; revisión de literatura**

Juan Jacinto García Herrera

Corporación Universitaria del Meta

Facultad de Ingenierías

Programa de Ingeniería Eléctrica

Villavicencio

2024

**Potencial de los mares colombianos para producir energía en las poblaciones de los  
litorales; revisión de literatura**

Juan Jacinto García Herrera

Trabajo de grado presentado como requisito parcial para optar al título de  
Ingeniero Eléctrico.

Dr.

Corporación Universitaria del Meta

Facultad de Ingenierías

Programa de Ingeniería Eléctrica

Villavicencio

2024

Nota de aceptación:

---

---

---

---

---

---

---

Firma del presidente del jurado

---

Firma del jurado

---

Firma del jurado

Villavicencio, mayo de 2024.

## **Dedicatoria**

Este trabajo de investigación lo quiero dedicar primeramente a Dios, quien me ha dado salud y fuerza para superar todos los momentos tediosos que se cruzaron durante este proceso y seguidamente a mí mismo por alentarme a ser una mejor persona y no renunciar a mis sueños todo lo contrario llegar hasta el final y culminarlos.

## **Agradecimientos**

Quiero expresar mi profundo agradecimiento a mis directores de tesis, quienes con su experiencia y sabiduría guiaron este trabajo de investigación de manera fenomenal.

A mi hijo, quien me brinda su amor incondicional y apoyo emocional durante este largo proceso, GRACIAS por estar siempre para mí.

## Tabla de contenido

Resumen .....	10
Introducción.....	11
1. Problema.....	15
2. Justificación.....	16
3. Objetivos.....	18
3.1. Objetivo general.....	18
3.2. Objetivos específicos .....	18
4. Antecedentes.....	19
5. Marco de referencia .....	22
5.1. Marco Teórico.....	22
5.1.1. <i>Olas</i> .....	22
5.1.2. <i>Corrientes oceánicas</i> .....	23
5.1.3. <i>Gradientes Térmicos</i> .....	24
5.1.4. <i>Gradientes de salinidad</i> .....	26
5.2. Marco conceptual.....	28
5.3. Marco legal .....	28
6. Metodología.....	31
7. Resultados.....	32
7.1. Fuentes potenciales de energía eléctrica que pueda ser explotados en los mares en Colombia.....	32
7.1.1. <i>Oleaje</i> .....	32
7.1.2. <i>Mareas</i> .....	34

7.1.3. <i>Corrientes</i> .....	35
7.1.4. <i>Gradiente de temperatura</i> .....	36
7.1.5. <i>Gradiente de salinidad</i> .....	37
7.2. Tecnologías actualmente usadas y futuras para la explotación de Energías Renovables	
Marinas .....	40
7.2.1. <i>Oleaje</i> .....	40
7.2.2. <i>Mareas</i> .....	55
7.2.3. <i>Corrientes</i> .....	57
7.2.4. <i>Gradiente de temperatura</i> .....	59
7.2.5. <i>Gradiente de salinidad</i> .....	62
7.3. Sugerencias para la explotación de Energías Renovables Marinas en Colombia con las fuentes de mayor posibilidad de materializar .....	65
8. Conclusiones.....	68
Referencias .....	71

**Lista de figuras**

Figura 1. Corrientes marinas en el mar caribe colombiano .....	36
Figura 2. Criterios para elección de sistema convertidor de energía de las olas .....	41
Figura 3. Clasificación del convertidor de energía de las olas en función de la distancia a la línea de costa.....	42
Figura 4. Vistas trasera ( izquierda ) y en perspectiva ( derecha ) de la planta de CAO en Yongsoo .....	44
Figura 5. Principio de funcionamiento del proyecto Lysekil .....	47
Figura 6. Vista de renderizado (izquierda) y vista externa (derecha) de Wavebob.....	48
Figura 7. Principio de funcionamiento de Archimedes Wave Swing.....	49
Figura 8. Pato cabeceador de Salter. Sección (izquierda) y vista de renderizado (derecha).....	50
Figura 9. Principio de funcionamiento de Oyster .....	51
Figura 10. Vista renderizada de Wavestar .....	52
Figura 11. Vista (izquierda) y vista esquemática en planta (derecha) de Tapchan .....	54
Figura 12. Funcionamiento turbina mareomotriz (izquierda) y presa de marea (derecha) .....	56
Figura 13. Turbinas hidrocinéticas .....	58
Figura 14. Esquema del sistema de ciclo cerrado.....	61
Figura 15. Esquema de funcionamiento del proceso de generación de energía por gradientes de salinidad mediante el método de Electrodialisis Inversa (RED) .....	63
Figura 16. Esquema de funcionamiento del proceso de generación de energía por gradientes de salinidad mediante el método de Osmosis por presión retardada .....	64

### Lista de tablas

Tabla 1. Estimación de la potencia de la ola para la Península de la Guajira **¡Error! Marcador no definido.**

Tabla 2. Características de los sitios de posible uso de energía mareomotriz en Colombia  
.....**¡Error! Marcador no definido.**

Tabla 3. Potencial energético del gradiente de salinidad en el mar caribe **¡Error! Marcador no definido.**

Tabla 4. Resumen de los principales dispositivos columna de agua oscilante..... **¡Error! Marcador no definido.**

Tabla 5. Resumen de los principales dispositivos WAB.....**¡Error! Marcador no definido.**

Tabla 6. Resumen de los principales dispositivos OD.....**¡Error! Marcador no definido.**

## **Resumen**

La presente monografía tiene por objeto presentar un estudio detallado y exhaustivo sobre el potencial de los mares colombianos para producir energía en las poblaciones de los litorales. La monografía basada en la investigación de tipo documental, bajo el método deductivo, y apoyados en el enfoque cualitativo.

Los resultados obtenidos dan cuenta de la identificación de las fuentes potenciales de energía eléctrica que pueda ser explotados en los mares en Colombia; así como de la descripción de las tecnologías actualmente usadas y futuras para la explotación de Energías Renovables Marinas; en consideración a lo anterior se hacen sugerencias para la explotación de Energías Renovables Marinas en Colombia con las fuentes de mayor posibilidad de materializar.

En conclusión, el potencial de los mares colombianos para producir energía en las poblaciones de los litorales llega ser significativo, según la investigación presentada. Se destaca el aprovechamiento del oleaje en el Caribe durante ciertos meses del año, así como en el Pacífico, en donde los niveles de energía que se podrían obtener del oleaje son menores, sin embargo, son constantes a lo largo del año, ofreciendo oportunidades para zonas pobladas no interconectadas.

*Palabras clave:* mares, potencial energético, Colombia, litorales, revisión de literatura.

## **Introducción**

Los mares y océanos representan una inigualable fuente de energía renovable aún por descubrir en su totalidad. En este contexto, los litorales colombianos emergen como un crisol de posibilidades, donde las corrientes, el oleaje, el gradiente de temperatura y salinidad prometen una fuente sustentable y prometedora de electricidad. Este documento se pretende introducir y justificar la importancia de un estudio sobre el potencial de los mares colombianos, destacando su relevancia en un contexto nacional e internacional de transición hacia fuentes de energía limpias y sostenibles.

La costa colombiana, bañada por el Mar Caribe al norte y el Océano Pacífico al oeste, alberga una diversidad de condiciones oceanográficas que brindan un escenario ideal para la generación de energía. Desde las vigorosas corrientes del Pacífico hasta el suave oleaje del Caribe, cada fenómeno ofrece oportunidades únicas para la captura y conversión de energía, capaces de alimentar tanto zonas urbanas densamente pobladas como comunidades costeras remotas.

La urgencia de explorar estas posibilidades no puede subestimarse, especialmente en un mundo cada vez más consciente de los impactos devastadores de los combustibles fósiles en el medio ambiente y la estabilidad climática, la búsqueda de alternativas energéticas se ha vuelto imperativa. Colombia, un país con una rica biodiversidad y una creciente economía, se encuentra en una posición única para liderar este cambio hacia la sostenibilidad energética.

Sin embargo, para capitalizar plenamente este potencial, es necesario un profundo entendimiento de los mares colombianos y sus características particulares. Esto implica un análisis exhaustivo de los patrones de mareas, las velocidades y direcciones de las corrientes, las variaciones estacionales del oleaje y los gradientes de temperatura y salinidad en las aguas

costeras. Solo a través de una investigación rigurosa y sistemática se pueden identificar y evaluar las áreas más propicias para la instalación de infraestructuras de generación de energía marina.

Por lo tanto, la presente monografía se enfoca en presentar un estudio detallado y exhaustivo sobre el potencial de los mares colombianos para producir energía en las poblaciones de los litorales.

El presente documento se encuentra conformado por 8 capítulos, iniciando con el problema, en él se identifica y delimita el problema de investigación que motiva el estudio, examinando las deficiencias en la matriz energética actual del país, destacando la dependencia de los combustibles fósiles y los impactos ambientales asociados. Además, se analizan las necesidades energéticas de las comunidades costeras y las oportunidades que ofrece la energía marina para abordar estos desafíos.

El capítulo de justificación se delinea la importancia y relevancia del estudio en el contexto nacional e internacional. Se argumenta la necesidad de diversificar las fuentes de energía y reducir la dependencia de los combustibles fósiles para mitigar los efectos del cambio climático y garantizar la seguridad energética del país. Además, se destacan los beneficios socioeconómicos y ambientales que pueden derivarse de la explotación de energías renovables marinas en Colombia.

Los objetivos, tanto general como específicos, delinear claramente la dirección de la investigación. El objetivo general del estudio es presentar un análisis detallado y exhaustivo del potencial de los mares colombianos para producir energía en las poblaciones de los litorales. Los objetivos específicos se enfocan en identificar y analizar las fuentes potenciales de energía marina en Colombia, evaluar las tecnologías disponibles para su explotación y ofrecer sugerencias para su aprovechamiento eficiente y sostenible.

El capítulo cuarto, se revisan los antecedentes y estudios previos relacionados con el tema de la energía marina en Colombia y a nivel internacional. Se examinan investigaciones basadas sobre el potencial de las diferentes fuentes de energía marina, así como los avances en tecnologías de aprovechamiento y los casos de éxito en otros países. Esto proporciona un contexto histórico y académico para el estudio actual.

El quinto capítulo aborda el marco de referencia de la investigación, incluyendo el marco teórico, conceptual y legal. Se presentan los fundamentos teóricos relacionados con las diferentes fuentes de energía marina, así como los conceptos clave y las leyes y regulaciones pertinentes a nivel nacional e internacional que afectan su desarrollo y explotación en Colombia.

En el sexto capítulo se describe la metodología utilizada en la investigación, incluyendo los métodos de recolección y análisis de datos. Se detallan los procedimientos empleados para identificar y evaluar las fuentes potenciales de energía marina en Colombia, así como para analizar las tecnologías disponibles para su explotación y las sugerencias para su implementación.

El séptimo capítulo presenta los resultados de la investigación, divididos en dos secciones principales: las fuentes potenciales de energía eléctrica en los mares de Colombia y las tecnologías actualmente usadas y futuras para su explotación. Se proporciona un análisis detallado de cada fuente de energía marina identificada, así como una revisión de las tecnologías disponibles y sus aplicaciones en el contexto colombiano.

En el último capítulo se presentan las conclusiones de la investigación, resumiendo los hallazgos clave y destacando las implicaciones para el desarrollo futuro de energías renovables marinas en Colombia. Se discuten las limitaciones del estudio y se ofrecen recomendaciones para futuras investigaciones y acciones políticas en este campo.

Finalmente, se incluye una lista de referencias bibliográficas utilizadas en la investigación, proporcionando una base académica y científica para el estudio y permitiendo a los lectores profundizar en los temas tratados.

## 1. Problema

Con el pasar de los años, y a medida que ha evolucionado la tecnología, el ser humano demanda consumo de energía eléctrica para realizar actividades de su vida diaria, un ejemplo de ello es que en el año 2015 los procesos energéticos representaron en Europa un 78% de las emisiones totales [6].

La energía generada por medios tradicionales como termoeléctricas e hidroeléctricas puede tener un impacto negativo en el medio ambiente. Además, la construcción de presas y represas en los ríos puede interrumpir el flujo natural del agua y afectar a los ecosistemas acuáticos y a las comunidades que dependen de ellos. Además, el proceso de construcción y mantenimiento de estas centrales eléctricas puede generar emisiones de CO<sub>2</sub>, contribuyendo al cambio climático [7].

Durante décadas, la idea de utilizar energías renovables marinas ha sido atractiva y ha permitido desarrollar diversas aplicaciones, que van desde la producción de electricidad hasta la defensa costera. Además, un porcentaje significativo de áreas insulares, incluidas las islas ubicadas en el océano o en mares cerrados, está definido por importantes recursos de energía eólica y undimotriz [9, 10].

No obstante, la aplicación de tecnologías para obtener energía renovable marina en Colombia han sido poco utilizadas [4], pese al potencial energético que podría desarrollar Colombia, por contar con dos litorales y una gran superficie oceánica en dos mares [11].

Por lo tanto, la presente monografía busca dar respuesta a la siguiente pregunta de investigación: ¿Cuál es el potencial de los mares colombianos para producir energía en las poblaciones de los litorales?

## 2. Justificación

Una parte importante de la población mundial vive cerca de las zonas costeras. Se estima que casi el 20% de la población total se encuentra en una franja de 25 km de la costa. La participación aumenta hasta el 40% de la población total al extender el área de la franja considerada a 100 km. Una particularidad de estas zonas es que son entornos muy dinámicos, que presentan un crecimiento urbanístico anual del 2,6%. Al mismo tiempo, el número de ciudades costeras se ha multiplicado por 4,5 desde 1950 [12, 13].

Los Objetivos de Desarrollo Sostenible (ODS) adoptados por el PNUD se basan en un llamamiento al desarrollo de energías neutras en carbono; especialmente el séptimo ODS orientada a garantía del acceso universal a sistemas energéticos fiables, asequibles y modernos, por lo que se fija como meta para 2030 el aumento de la proporción sustancial de energías renovables en la combinación energética mundial [14].

Colombia, como país integrante de la ONU está llamado a cumplir con los ODS [15], por lo tanto, debe procurar el desarrollo de energías renovables. La energía solar y la eólica han abierto camino en tierra, pero están limitadas por el espacio. Tecnologías recientes que aún representan sólo el 0,03% de la combinación energética mundial están experimentando un crecimiento acelerado en todo el mundo, a veces superior al 80% anual: son las Energías Renovables Marinas (ERM) [16].

La presente monografía busca presentar un estudio detallado y exhaustivo sobre el potencial de los mares colombianos para producir energía en las poblaciones de los litorales, incluyendo las tecnologías actualmente maduras (eólica marina, terrestre o flotante) o en fase de desarrollo (energía de las corrientes y de las olas, energía térmica marina). El potencial teórico global de las ERM, incluidas la biomasa y la energía osmótica (no contempladas en este

estudio), que puedan ser aprovechadas por el Gobierno Nacional para beneficiar las localidades costeras.

Se estima a nivel mundial que las Energías Renovables Marinas podrían producir más de 2 millones de Tera vatios hora (TWh) al año, de los cuales algo más de 100.000 TWh al año son técnicamente explotables, lo que permitiría cubrir más de la mitad de la demanda mundial observada en 2016, sumando todas las fuentes de energía, y casi 5 veces el total del consumo mundial actual de electricidad [16], siendo ello una gran oportunidad para las poblaciones más vulnerables que se encuentran localizadas a orillas de los mares que bañan a Colombia.

Por ello la Corporación Universitaria del meta tiene en las Energías Renovables Marinas una gran oportunidad de contribuir al desarrollo de energías limpias desde los océanos, no sólo poniendo un granito de arena al cumplimiento del CONPES 3990 [17] el cual pone a los océanos en la agenda pública nacional como Potencia Bioceánica Sostenible, sino al desarrollo sostenible de las comunidades costeras e insulares; para lo cual la presente monografía se convierte en punto de partida, pues permitirá establecer un estado del arte actual de energías de los mares en Colombia para la explotación del potencial energético, a través de una revisión documental, para que a partir de allí las entidades gubernamentales e instituciones académicas puedan diseñar estrategias para su consolidación.

### **3. Objetivos**

#### **3.1. Objetivo general**

Realizar un documento que sirva como base para un estudio posterior sobre el potencial de los mares colombianos para producir energía en las poblaciones de los litorales.

#### **3.2. Objetivos específicos**

- Identificar las fuentes potenciales de energía eléctrica que pueda ser explotados en los mares en Colombia.
- Describir las tecnologías actualmente usadas y futuras para la explotación de Energías Renovables Marinas.
- Pretender ser un punto de partida que brinde solución de una problemática como es el abastecimiento de energía

#### 4. Antecedentes

Los combustibles fósiles son muy finitos y dan paso a cambios climáticos indeseables, mientras que la energía renovable se considera como energía limpia y pueden utilizarse como sustituto de las energías fósiles Nematain y Rahimi [1], llevaron a cabo un estudio comparativo entre diferentes energías renovables híbridas (eólica y solar) en cinco ciudades de Irán. Para evaluar la viabilidad del uso de energías renovables en lugares de alto consumo hospitales, hoteles grandes, oficinas medianas y centros comerciales. El software HOMER se ha utilizado para analizar y optimizar diferentes configuraciones. Teniendo en cuenta los perfiles de carga de los casos elegidos, se obtiene y analiza la solución óptima para diferentes configuraciones junto con el resumen de costos. Los resultados de la simulación muestran que Kish Island posee el mayor perfil de carga entre otras ciudades y PV-Diesel-Battery-Converter es el sistema híbrido más adecuado, que posee el costo óptimo para los edificios considerados. Además, Chabahar tiene principalmente la mayor cantidad de emisiones de carbono para los estudios de caso propuestos y posee el sistema de costo máximo más bajo entre todas las ciudades consideradas, excepto en el caso de los grandes hoteles donde Jask tiene el máximo costo de capital inicial.

A su vez, Mustapa et al. [2] realizaron una revisión, elaborando el estado más reciente sobre la integración del dispositivo de energía de las olas con otras instalaciones marinas, que es la estructura del rompeolas que posiblemente puede ayudar a compartir los costos. La mayoría de las investigaciones realizadas en este campo destacaron los países que experimentan condiciones de mar agitado y se centraron menos en países con condiciones de olas medias como las que enfrenta el continente asiático. El potencial para la extracción de energía y la disipación de olas para la condición de onda media se discutirá en esta revisión al considerar varios aspectos que incluyen confiabilidad, efectividad y rendimiento. Finalmente, esta revisión

muestra que la integración abre una nueva dimensión para reconocer la tecnología que aprovecha las olas del océano, especialmente para los países asiáticos que experimentan la condición de olas medias.

Por su parte Rusu y Onea [3] adelantaron una revisión de literatura con el fin de proporcionar una imagen completa de las tecnologías de olas existentes que se utilizan para la extracción de energía de las olas. La descripción general explicará su potencial y también los desafíos que enfrentan las tecnologías de olas. El artículo también discute brevemente los beneficios de los proyectos combinados de energía eólica marina, también conocidos como híbridos. Se describirán los factores clave y los impactos en las tecnologías de olas existentes relevantes, incluido el factor de capacidad y el ancho de captura. Finalmente, se discutirán los objetivos de costo nivelado de energía (LCOE) para las tecnologías más prometedoras.

En el entorno nacional, Perdomo et al. [4] publicaron un artículo donde examinan la viabilidad de producir energía eléctrica utilizando las olas en la costa del norte del Pacífico colombiano. Este enfoque busca reducir el impacto ambiental de la generación de energía actual, la cual se basa en el uso de combustibles fósiles como el diésel y la gasolina. Además, esta alternativa permitiría reducir los costos asociados con la generación de energía, incluyendo los gastos de transporte y almacenamiento de combustible, lo que posibilitaría que las comunidades locales tengan acceso a electricidad durante todo el día.

Así mismo, Osorio et al [5] estimaron el potencial de energía marina disponible a partir de diferentes tipos de recursos en Colombia: olas, mareas, corrientes, gradientes de salinidad y gradientes térmicos, enfocándose en lugares específicos, utilizando modelos numéricos oceánicos con datos de modelos de re análisis, datos climáticos de sensores remotos y datos primarios de instrumentación con trabajo de campo. Para cada recurso marino, primero explicaron el método utilizado para evaluar el potencial energético; luego presentaron el

resultado potencial de energía marina. Además, lleva a cabo un análisis de políticas donde se discuten no solo el potencial energético sino también las barreras (principalmente el costo) que enfrenta la energía marina. Dados los potenciales encontrados por estudios anteriores.

## 5. Marco de referencia

### 5.1. Marco Teórico

Existen varias alternativas para obtener energía marina: olas, mareas, corrientes, gradientes de temperatura y gradientes de salinidad. Todos ellos han sido estudiados extensamente, sin embargo, su implementación está íntimamente relacionada con las condiciones particulares del mar local.

#### 5.1.1. Olas

La interacción de los vientos y la superficie del mar produce olas, cuya energía es una de las fuentes más abundantes del mundo, con el potencial de competir con los combustibles fósiles [18, 19]. Este tipo de recurso se puede extraer de la energía cinética o potencial del movimiento de las olas [20].

Una primera estimación de la potencia de las olas del océano global realizada por Isaacs y Seymour [21] indicó que era del orden de 1 a 10 TW. Más recientemente, Sannasiraj y Sundar [22] sugirieron que la energía de las olas disponible en todo el mundo está entre 8000 y 80 000 TW/año y que cada cresta de ola podría transmitir entre 10 y 15 kW/m.

Algunos estudios, incluidos Cornett [23] y Mork [24], han investigado la distribución de energía de las olas en todo el mundo. Cornett [23] analizó los recursos energéticos de las olas a nivel mundial, considerando una predicción del clima de olas de 10 años dada por el modelo NWW3-Global wind-wave (o WAVEWATCH III), que es una herramienta para simular el comportamiento de los océanos, sin tener en cuenta los efectos de las aguas poco profundas. Los resultados de este modelo fueron validados a partir de comparaciones con datos de boyas y satélites disponibles en la literatura. Los resultados presentados por Cornett [23] sugieren que México tiene un potencial máximo de energía undimotriz de 10–20 kW/m, específicamente en

el Océano Pacífico. Más tarde, Mork et al. [24] estimaron el potencial energético global teórico con la base de datos WorldWaves [25]. Este paquete de datos de olas incluye una base de datos global de olas en alta mar, modelos costeros para la propagación de olas (por ejemplo, SWAN) y un módulo de análisis estadístico para regiones costa afuera y cercanas a la costa. Sus resultados indican que para México, la disponibilidad de energía más baja se encuentra en el Golfo de México y el Golfo de California ( $\sim 5\text{--}10$  kW/m), mientras que en las regiones noroeste y suroeste del país hay una energía undimotriz anual de  $\sim 10\text{--}20$  kW/m, lo que concuerda bastante bien con los resultados de Cornett [23]. Aunque los resultados presentados son teóricos, sugieren que la energía potencial de las olas en las regiones cercanas a la costa de México, particularmente en sitios en el Pacífico, podría recolectarse con dispositivos apropiados. Sin embargo, aún se requieren análisis de variación temporal y criterios bien sustentados para la preselección de sitios potenciales para proyectos de conversión de energía.

### ***5.1.2. Corrientes oceánicas***

Las corrientes oceánicas, el flujo continuo del agua del océano en una dirección específica, son atractivas como fuente de energía renovable debido a su previsibilidad, persistencia y sostenibilidad [26]. Algunos sistemas de corrientes muy conocidos muestran un comportamiento casi constante en el tiempo y serían una excelente fuente de energía hidrocínética. Se han publicado muchos estudios relacionados con la caracterización de recursos en regiones cercanas a estos sistemas, como la corriente de Agulhas cerca del sur de África [27, 28], la corriente de Kuroshio en Asia [29] y la corriente del Golfo frente a la costa este de América del Norte [26, 30, 31].

Marais et al., [28] consideraron los 200 m superiores de la Corriente de Agulhas a lo largo de la costa este de Sudáfrica, definiendo algunos sitios potenciales y estimando un

potencial técnico de aproximadamente 1200 MW (~3% de la demanda de energía de Sudáfrica en 2010).

Con respecto a la evaluación de la energía hidrocínética en América del Norte, Duerr y Dhanak [30] investigaron una sección de la Corriente de Florida de la Corriente del Golfo. La evaluación se realizó con las bases de datos disponibles (p. ej., el modelo oceánico coordinado híbrido, HYCOM y los perfiladores de corriente Doppler acústicos, ADCP), lo que sugiere una disponibilidad de energía total de 20 a 25 GW. Sin embargo, estimado de manera más realista, la potencia era mucho menor: 1 a 4 GW. En su estimación, también consideraron las evaluaciones técnicas, incluidos los conjuntos de turbinas, y concluyeron que podrían producir ~ 200 MW. Algunos años más tarde, Yang et al. [26] generó una geodatabase para la potencia de las corrientes oceánicas disponible en EE. UU., destacando el sistema Gulf Stream. Afirmaron que podría haber una densidad de potencia cinética en esa región (es decir, potencia por unidad de área) de más de  $2 \text{ kW/m}^2$ , mientras que en otras regiones de los EE. UU., la extracción de potencia probablemente era inferior a  $100 \text{ W/m}^2$ . En el mismo año, Kabir et al. [31] evaluó la potencia disponible de la Corriente del Golfo en una latitud más alta, en la región de Carolina del Norte. Consideraron la variabilidad actual y encontraron una densidad de potencia de entre  $0,5$  y  $1 \text{ kW/m}^2$ . Estos resultados sugieren que también podría haber oportunidades para la extracción de energía hidrocínética frente a México, donde la Corriente del Golfo tiene un flujo casi constante desde el Mar Caribe.

### ***5.1.3. Gradientes Térmicos***

La energía de gradiente térmico se genera a partir del intercambio de calor entre fluidos a diferentes temperaturas. La primera demostración de conversión de energía de gradiente térmico fue una planta OTEC (Ocean Thermal Energy Conversion) instalada en la Bahía de Matanzas, Cuba en 1929 por Georges Claude. Se trataba de una central de 2 km de longitud,

con tuberías de 1,6 m de diámetro, que fracasó por la selección de un mal sitio y problemas con los sistemas de energía y agua de mar [32]. A pesar de una segunda falla en 1930, la planta de Georges Claude generó ~22 kW de energía eléctrica durante 10 días, utilizando un gradiente de temperatura de 14 °C [32].

Mucho más tarde, los prototipos de OTEC en Hawái en 1979 (~50 kW de potencia bruta), Tokio en 1981 (~120 kW de potencia bruta) y nuevamente en Hawái en 2015 (~100 kW de capacidad de potencia) han continuado el desarrollo de energía térmica. tecnología de energía de gradiente. La planta de 2015 fue la primera planta terrestre de ciclo cerrado. Instalada por Makai Ocean Engineering, fue una de las centrales eléctricas OTEC más grandes del mundo [33].

Es difícil lograr una estimación confiable del recurso de gradiente térmico global debido a varias limitaciones logísticas y técnicas. Las estimaciones brutas oscilan entre 5 TW y 1000 TW [33]. Sin embargo, es importante considerar que la estimación de la potencia del gradiente térmico también puede depender del tipo de planta desplegada, así como del gradiente térmico disponible a lo largo del tiempo.

Las plantas OTEC pueden ser sistemas de ciclo cerrado (CC-OTEC), de ciclo abierto (OC-OTEC) o de ciclo híbrido (HC-OTEC) [19]. Los primeros emplean un fluido de trabajo para fluir entre dos intercambiadores de calor en un ciclo cerrado. Los segundos consideran vapor a baja presión como fluido de trabajo. La energía eléctrica se genera a partir del vapor en un generador. Luego, se usa agua fría de las profundidades del océano para condensar el vapor. Los sistemas de ciclo híbrido combinan los procedimientos de los sistemas de ciclo cerrado y abierto. Así, como se puede inferir, la evaluación de los recursos energéticos de gradiente térmico depende en gran medida de las características de la planta considerada.

Se ha sugerido que OTEC puede ofrecer una mayor disponibilidad de energía en comparación con otros tipos de energías oceánicas, alrededor de  $\sim 14\text{TW}$  [34]. En áreas tropicales, se estima que los sistemas OTEC podrían ofrecer alrededor de  $1000\text{ TW}$  [35]. Nihous [36] propuso una formulación ampliamente utilizada para las estimaciones de potencia bruta y neta asociadas con un gradiente de energía térmica. Algunos años más tarde, Nihous [36] amplió este enfoque para realizar una evaluación preliminar de la energía térmica oceánica potencial en todo el mundo utilizando las bases de datos disponibles. También se han realizado evaluaciones de recursos energéticos de gradiente térmico en regiones específicas, como Puerto Rico [37], Florida [33], las islas de Hawái [38], partes del océano Índico [39] y el sudeste asiático [40].

Para México, una estimación de los recursos de energía térmica en regiones específicas fue realizada recientemente por García et al. [41], quienes encontraron que varios sitios en las costas de México son aptos para la instalación de plantas OTEC. Sin embargo, estos autores no examinaron todo el país y concluyeron que aún se deben considerar las variaciones temporales en los gradientes térmicos al seleccionar los sitios adecuados para el despliegue del dispositivo. Por lo tanto, aún se necesita una evaluación de la disponibilidad de energía de gradiente térmico para todo México.

#### ***5.1.4. Gradientes de salinidad***

La energía de gradiente de salinidad (EGS) también se conoce como “energía azul” o “poder osmótico” [42], y proviene de la interacción de un fluido de baja concentración de salinidad, como el agua de un río, con un fluido de mayor salinidad, como Agua de mar. La energía resultante de este fenómeno se puede convertir en energía eléctrica mediante dispositivos de conversión apropiados. EGS se puede aprovechar donde hay una diferencia considerable entre las salinidades de los dos fluidos, ya sea en un sistema lago-río (es decir, los ríos tienen sus desembocaduras en un lago, como en Emdadi et al. [43]) o en un sistema océano-

río (es decir, los ríos tienen sus desembocaduras en un océano, como en Alvarez-Silva y Osorio [44]).

El proceso EGS se puede entender mejor como un proceso de desalinización inversa. En un proceso de desalinización, se necesita energía para la extracción de agua dulce del agua de mar [45], por lo que un proceso de desalinización inversa liberaría energía.

Desde la década de 1950, EGS se ha visto como una fuente alternativa de energía eléctrica ampliamente disponible, como lo informó Pattle [46], quien propuso el proceso de electrodiálisis inversa, explicando que la energía producida al mezclar un río y agua de mar sería similar a la entregada por una cascada de ~270 m de altura. Aunque hubo varios estudios sobre EGS en las décadas de 1970 y 1980, no fue posible una aplicación práctica en ese momento, debido a la falta de tecnología [47]. Los avances recientes en la tecnología de membranas han convertido a EGS en una fuente de energía factible.

Las primeras estimaciones de los recursos teóricos de EGS en el mundo [48, 49] sugirieron que el potencial global de EGS está entre 1,4 y 2,6TW, [47]. Aaberg y Osmotic [50] y Stenzel et al. [51], quienes informaron potenciales de EGS de 0,228 TW y 3,13 TW, respectivamente. Álvarez-Silva y Osorio [44] informaron recientemente que la estimación global de la EGS teórica es de 0,22 a 3,16 TW.

Más recientemente, Álvarez-Silva et al. [44] realizaron una evaluación global de la extracción de EGS en las desembocaduras de los ríos. Consideraron que el potencial teórico se ve afectado por restricciones relacionadas con la idoneidad, sostenibilidad y confiabilidad de la explotación de EGS e incluyeron estas restricciones en su estimación de potencia. En la estimación final de potencia se debe considerar un factor de extracción, un factor de capacidad, una adecuada selección de sitios y las suposiciones realizadas en los modelos utilizados para estimar el potencial teórico. Teniendo en cuenta estos factores, concluyeron que un potencial

global más realista sería ~625 TWh por año (es decir, ~0,071 TW), que es aproximadamente el 3 % del consumo mundial de electricidad.

## 5.2. Marco conceptual

La *energía* se puede describir como la capacidad de un sistema físico para realizar trabajo, mientras que el trabajo se refiere al desplazamiento de un objeto causado por la aplicación de una fuerza. Ambos conceptos son intercambiables y se miden con las mismas unidades. Por lo tanto, la energía no es una entidad material presente en los objetos, sino que se relaciona con la materia en una cantidad cuantificable. La energía es una abstracción matemática que representa una propiedad de la materia, y su magnitud depende de factores como el movimiento, la temperatura, la composición química, la masa, la posición en el espacio, entre otros [52].

A su vez, las *energías renovables* se refieren a fuentes de suministro de energía que son amigables con el medio ambiente; entre estas fuentes destacan la energía eólica, solar, de mares y océanos, biomasa y geotérmica [53].

La *energía de mares* es una forma de energía renovable que se obtiene a partir del aprovechamiento de las mareas, las corrientes oceánicas y las olas del mar para generar electricidad. La energía de mares es una fuente de energía limpia y renovable que puede contribuir a la diversificación de la matriz energética de los países y a la reducción de su dependencia de los combustibles fósiles [54].

## 5.3. Marco legal

Pese a que desde 1991, la Constitución Política de Colombia [55], en su artículo noveno establece el derecho que tienen todas las personas a gozar de un ambiente sano, y llama al Estado a su protección, sólo fue hasta el año 2013, mediante la ratificación del Estatuto de la Agencia Internacional de Energías Renovables (IRENA), por medio de la Ley 1665 de 2013 [56], que se

empezaron a implementar como tal las Fuentes de Energías Renovables en el país, viéndolas como una alternativa para mitigar el uso de energías fósiles contaminantes.

Aunque con la aprobación de la Ley 1715 de 2014 [57], fue que Colombia empezó a contar con un marco normativo para la promoción y desarrollo de las Fuentes No Convencionales de Energía Renovable; la normativa mencionada establece las diversas formas de energía, como la *energía de mares*, la biomasa, energía eólica, la energía de pequeños aprovechamientos hidroeléctricos, la energía solar y energía geotérmica, entre otras.

Con el ánimo de reglamentar la anterior norma fueron expedidos los siguientes decretos y resoluciones:

- El Decreto 1623 de 2015 tiene como propósito la expansión de la cobertura del servicio de energía eléctrica tanto en zonas interconectadas como no interconectadas, para lo cual se establece la necesidad de utilizar y priorizar fuentes no convencionales de energía, incluyendo las fuentes de energía renovable [58].

- El Decreto 2143 de 2015 es importante porque adiciona algunos apartes relacionados con incentivos tributarios para energías renovables, los cuales se pueden obtener a través de los procedimientos establecidos en él [59].

- El Decreto 1543 de 2017 reglamenta el Fondo de Energías No Convencionales y Gestión Eficiente de la Energía, FENOGE, al cual se destinarán las contribuciones económicas para el desarrollo e implementación de energías no convencionales, incluyendo las energías renovables [60].

- La Resolución 0281 de 2015, establece el límite máximo de potencia de la autogeneración a pequeña escala [61].

- La Resolución 1283 de 2016 establece el procedimiento y requisitos para expedir el certificado de beneficio ambiental por invertir en proyectos de fuentes no convencionales de

Energías Renovables y gestión eficiente de la energía, lo que conlleva a beneficios como la deducción especial de renta y complementarios, exclusión del IVA, exención de gravamen arancelario y depreciación acelerada. Esta resolución es importante por su objeto y beneficios [62].

Posteriormente, en el año 2021 fue modificada y adicionada la Ley 1715 de 2014, por medio de la Ley 2099 de 2021 [63], tratando con ello de modernizar la legislación, además de incentivar el desarrollo sostenible por medio de la adopción de nuevas fuentes de generación de energía renovable no convencional, a su vez, se busca la eficiencia energética y la movilidad sostenible.

## 6. Metodología

De acuerdo a los objetivos planteados se adelantó una monografía basada en la investigación de tipo documental, bajo el método deductivo, y apoyados en el enfoque cualitativo.

Es de anotar que el método deductivo utiliza una premisa general para llegar a conclusiones específicas y necesarias a través de la aplicación de reglas lógicas, en este caso se consultan bibliografía sobre energías de mares, aterrizando en el Pacífico y el Caribe para después analizar el potencial energético de los océanos en Colombia.

El enfoque cualitativo según Hernández-Sampieri et al. [64] se refiere a una metodología de investigación que se enfoca en la exploración y comprensión detallada de los fenómenos sociales y humanos, a través de la recolección y análisis de datos no numéricos y basados en la interpretación.

A su vez, la investigación documental se basa en el análisis crítico de fuentes documentales, tales como libros, artículos, informes, registros y otros materiales impresos o digitales, con el fin de obtener información detallada y precisa sobre el tema investigado [64].

Para adelantar la monografía se consultaron bases de datos indexadas y libros en biblioteca, que permitan identificar las fuentes potenciales de energía eléctrica que pueda ser explotados en los mares en Colombia.

De la misma forma, la revisión documental fue la fuente para describir las tecnologías actualmente en su y futuras para la explotación de Energías Renovables Marinas.

Además, considerando los datos bibliográficos encontrados se procedió al diseño de sugerencias para la explotación de Energías Renovables Marinas en Colombia con las fuentes de mayor posibilidad de materializar.

## **7. Resultados**

El en presente capítulo se presenta un análisis exhaustivo del potencial de los mares colombianos para la generación de energía eléctrica a partir de diversas fuentes renovables. Se inicia con la identificación de las principales fuentes de energía marina, incluyendo el oleaje, las mareas, las corrientes, el gradiente de temperatura y el gradiente de salinidad, destacando las características y el potencial de cada una en el contexto colombiano. A continuación, se revisan las tecnologías actualmente utilizadas y las futuras innovaciones para la explotación de estas energías renovables, proporcionando una visión integral de las soluciones tecnológicas disponibles y su aplicabilidad en Colombia. Finalmente, se ofrecen sugerencias específicas para la explotación de las fuentes de energía marina con mayor posibilidad de materializarse, basadas en el análisis de los recursos disponibles y las condiciones locales, con el objetivo de guiar el desarrollo sostenible y eficiente de la energía marina en el país.

### **7.1. Fuentes potenciales de energía eléctrica que pueda ser explotados en los mares en Colombia**

Seguidamente se identifican las oportunidades más interesantes, y se ha empezado a definir la ruta a seguir para que la energía marina sea una realidad en Colombia. En la investigación de los fenómenos oceanográficos se obtuvieron hallazgos destacados, entre ellos:

#### **7.1.1. Oleaje**

En el Caribe, el oleaje más intenso (con una potencia de 5-7 kilovatios por metro de frente de onda) se presenta en los meses de diciembre a abril, coincidiendo con la época seca del país. En este período, los precios de la energía eléctrica son más elevados debido a la disminución de los niveles de los ríos y embalses, lo que reduce significativamente la generación

hidroeléctrica y aumenta la demanda de energía, lo que a su vez eleva el costo de la energía. Por lo tanto, el oleaje podría ser una alternativa importante para suplir la demanda de energía en estas épocas. Se identificaron sitios cercanos a importantes centros poblados y puertos, como Barranquilla y Santa Marta, con la mayor potencia de oleaje en el Caribe [5].

Un ejemplo concreto de este potencial lo plantean Torres y Andrade [65], quienes calcularon los datos para la Península de la Guajira consignados en la tabla 1, donde se puede observar que la suma de la potencia multiplicada por la ocurrencia asciende a 102,219 kilovatios hora por metro al año. Dividiendo esta cantidad por las 8,760 horas que hay en un año, se obtiene un promedio anual de potencia de ola o flujo de energía para la región de La Guajira, el cual es de  $11.67 \text{ KWm}^{-1}$ . Esta cifra se acerca a la estimación realizada por la Red Temática Europea para la Energía por Olas en el Caribe colombiano ( $11\text{KWm}^{-1}$ ). Sin embargo, lamentablemente, resulta demasiado baja para considerar la viabilidad de aprovechar la energía contenida en las olas para la producción de electricidad con la tecnología actual.

**Tabla 1.**

*Estimación de la potencia de la ola para la Península de la Guajira*

Altura ola (m)	Periodo Ola (s)	Longitud Onda (m)	Potencia Ola ( $\text{KWm}^{-1}$ )	Ocurrencia	Horas/Año (h/a)	Potencia x ocurrencia ( $\text{KW} \cdot \text{h/m} \cdot \text{a}$ )
0.5	-	-	0.0	2	175	0
1.0	4.66	33.9	4.5	60	5.256	23.867
2.0	5.38	45.2	21.0	35	3.066	64.293
3.0	6.10	58.0	53.5	3	263	14.059
<b>Sumatoria</b>				100	8.760	<b>102.2019</b>

Fuente: Torres y Andrade [65].

En el Pacífico, aunque los valores de energía del oleaje son menores que los máximos del Caribe (3-4 kilovatios por metro de frente de onda), se mantienen constantes a lo largo del año, lo que los convierte en una opción interesante para abastecer zonas no interconectadas como Bahía Solano o Nuquí. En cambio, en San Andrés y Providencia los valores de oleaje son demasiado bajos para considerar proyectos de energía [5].

Los mapas generados muestran la disponibilidad espacial del recurso. Para cuantificar las variaciones temporales se generaron series de oleaje basadas en la modelación computacional a modo de boyas virtuales, y a estas se les hicieron tratamientos estadísticos. Una revisión de las fichas muestra que la información generada y presentada es coherente con los mapas energéticos y con la información de las boyas oceanográficas en aguas colombianas [5].

### **7.1.2. Mareas**

Desde el principio del proyecto se definió que, en caso de aprovecharse la marea para la generación energética, se utilizarían las corrientes de marea o energía cinética. El otro enfoque, el de cerramientos grandes, como la central de La Rance, fue descartado de entrada porque tiene grandes impactos ambientales debido a los requerimientos de infraestructura, en una zona donde esta es escasa y hay muchas áreas naturales protegidas, como es el Pacífico colombiano.

En el informe de Polo et al. [65], se encontraron 45 bahías en el Litoral Pacífico con potencial para la generación de energía que se estimó en 120 MW. De estas, Bahía Málaga con 3.5 MW y la ensenada de Tribugá con 0.5 MW destacan como zonas con gran potencial energético para satisfacer las necesidades de las comunidades locales. Además, se identificaron Punta Catripe (8 MW), Bocana Bazán (6 MW) y Boca Naya (13 MW) como áreas de interés debido a su potencial energético.

**Tabla 2.***Características de los sitios de posible uso de energía mareomotriz en Colombia*

Sitio	Área (km <sup>2</sup> )	Pi (MW)	Em (GWh)	Presa (m)	L/Em
Ensenada de Utría	4	7,9	17,4	1.100	63,2
<b>Boca Virudó</b>	9	18	39	400	10,3
<b>Ensenada Catripe</b>	11	21,8	47,7	600	12,6
<b>Río Baudó</b>	7	13,9	30,4	600	19,7
Bocana Usaragá	7	13,9	30,4	1.500	49,3
Río Decampano	16	31,7	69,4	2.500	36,0
Bahía Ijúa	8	15,8	34,7	800	23,1
<b>Bahía Málaga</b>	80	16,0	34,7	2.700	7,8
Boca Cajambre	6	11,9	26	1.000	38,5
<b>Boca de Yarumanguí</b>	16	31,7	69,4	1.100	15,9
Boca Naya	18	35,6	78,1	3.200	41,0
Río Guandipa	6	11,9	26	1.600	61,5
Bocana Hoja Blanca	8	15,8	34,7	900	25,9
Bocana del Rosario	5	9,9	21,7	2.000	92,2
Chilvi	5	9,9	21,7	1.400	64,5

*Nota:* Pi= Potencia Instalada; Em= Energía Media; L/Em= Longitud del dique sobre Energía Media.

*Fuente:* elaboración propia a partir de Gómez y Burgos [67]<sup>[v1]</sup>

Es de anotar que en el documento “Actualización del Inventario de Posibilidades de Generación de Energía Mareomotriz en Colombia” [67], se presentaron opciones para aprovechar energéticamente las mareas mediante el cálculo del potencial mareomotriz en el país (ver tabla 2). Entre los factores evaluados para determinar el potencial energético de cada sitio considerado se encuentra la relación entre la longitud del dique de contención y la energía generada: cuanto menor sea esta relación, menor será el costo de instalación (ver tabla 2). Los cinco lugares más adecuados para el aprovechamiento de la energía mareomotriz son boca Virudó, bahía Málaga, boca Yarumanguí, ensenada Catripe y río Baudó.

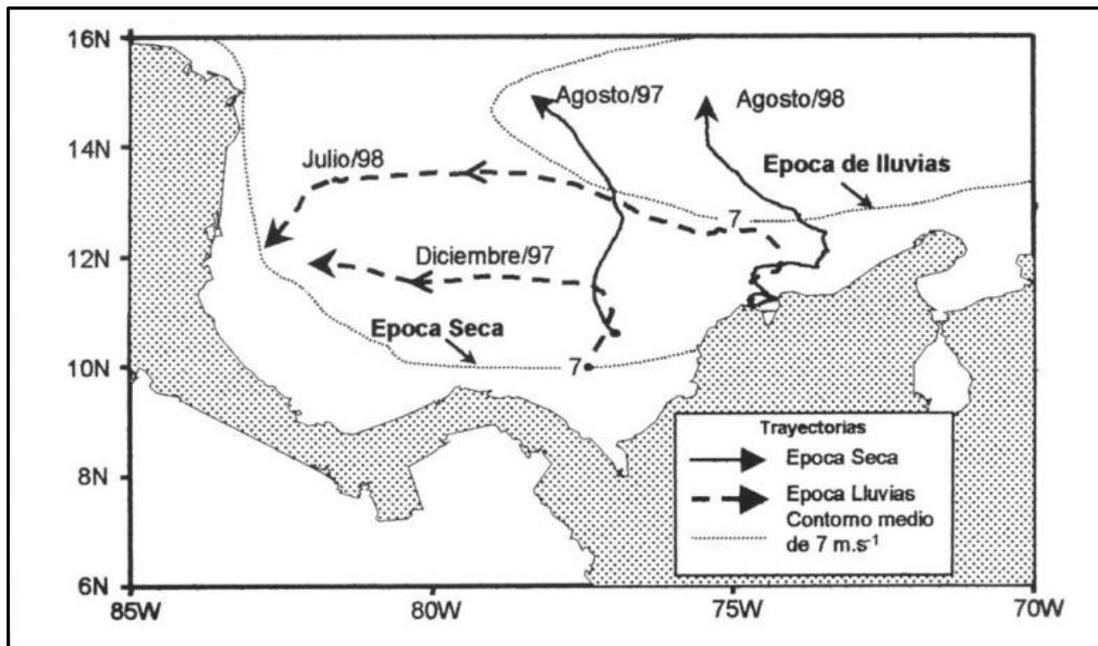
### 7.1.3. Corrientes

Para las corrientes se hacen modelaciones computacionales en aguas territoriales del país. Las corrientes máximas en las cuencas marítimas colombianas son del orden de 70

centímetros por segundo, por lo que este recurso podría no ser el más adecuado para explotación energética, ya que se recomiendan corrientes mayores a 1.5 metros. Por tal razón, se confirma lo que se había planteado en informes anteriores: la generación de energía usando las corrientes marinas no es factible en el país [5].

**Figura 1.**

*Corrientes marinas en el mar caribe colombiano*



Fuente: Andrade (2001).

El principal problema es que las corrientes generalmente se encuentran muy lejos de la línea de costa, por lo que los costos de conexión y construcción hacen que cualquier aprovechamiento sea inviable. Otro de los problemas es la alta variabilidad de muchas de las corrientes a lo largo del año.

**7.1.4. Gradiente de temperatura**

Es posible generar energía usando la diferencia de temperatura (también llamado gradiente de temperatura) entre el agua caliente en la superficie y el agua fría del fondo. El agua del fondo se bombea desde las profundidades y para ello se usa un motor de calor. Al ser

Colombia un país tropical, las aguas superficiales mantienen las temperaturas cálidas a lo largo del año, con lo cual el aprovechamiento de las diferencias de temperatura está sujeto a la disponibilidad de acceso a las aguas profundas. Para aprovechar las diferencias de temperatura se necesitan valores de diferencia de 20°C entre la superficie y el fondo. Las modelaciones muestran que para ciertos sitios las diferencias de temperatura se encuentran en el rango de los 600 a 700 metros, lo que reduciría fuertemente las pérdidas de energía por los bombeos.

La plataforma continental se extiende varios kilómetros a lo largo de la costa Pacífica y de casi toda la costa Caribe, lo cual dificulta el acceso a aguas frías tomadas de grandes profundidades. Sin embargo, en las proximidades de la Sierra Nevada de Santa Marta existe un abismo de más de 2.000 m cercano al litoral, que podría ser usado para tomar el agua fría que requiere el proceso. La conversión de energía térmica oceánica, OTEC por sus siglas en inglés, tiene muy altos costos de inversión, y es posible que no pueda competir en la generación en la red del Sistema de Transmisión Nacional (STN). Sin embargo, puede ser útil para sitios aislados con altos consumos de energía de fuentes fósiles, donde la generación de energía eléctrica es muy costosa [5].

#### ***7.1.5. Gradiente de salinidad***

No todos los ríos ofrecen condiciones adecuadas para la operación de plantas de generación de energía por gradiente de salinidad. Para la operación de estas plantas se necesita tener disponible agua dulce y agua de mar altamente salada en la menor distancia, pero las zonas donde se presenta una mezcla muy intensa de ambas aguas no son apropiadas. Esto ocurre porque para aprovechar la energía se necesitan las diferencias de salinidad. Si hay una zona de mezcla muy grande, no habrá un gradiente que se pueda aprovechar. Por ejemplo, en las grandes desembocaduras del Pacífico, la marea hace que las aguas se mezclen completamente y que se pierda el gradiente que se podría aprovechar.

Colombia tiene territorio costero tanto en el océano Pacífico como en el mar Caribe. En ambos desembocan grandes ríos, entre los que se destacan San Juan, Guapi, Patía, Dagua y Mira en el océano Pacífico, y Magdalena, Sinú, Atrato, León, Ranchería y el Canal del Dique en el mar Caribe. Sin embargo, las condiciones de marea y salinidad en ambos mares difieren significativamente. En la costa Pacífica colombiana se presentan rangos de marea con amplitudes entre 3.5 y 4.5 m, mientras que en el mar Caribe se presenta un rango con amplitudes no superiores a los 0.4 m. Dadas las características de ambos mares, y según los criterios de selección de zonas de aprovechamiento expuestos anteriormente, es de esperar que el potencial de generación de energía por gradiente salino en Colombia sea mayor en el mar Caribe que en el océano Pacífico, y por tanto se hizo mayor énfasis en la evaluación detallada de este potencial energético en el mar Caribe, identificada como una de las zonas más propicias del mundo [5].

En la práctica, no todo el potencial teórico de la mezcla de agua salina puede ser explotado debido a las limitaciones técnicas del proceso de conversión de la energía; el potencial estimado teniendo en cuenta estas restricciones se denomina potencial técnico. Dicho potencial se puede calcular utilizando los coeficientes estimados por Stenzel y Wargen [68] para plantas de energía osmótica (PRO). Estos coeficientes técnicos tienen en cuenta la eficiencia del bombeo, el intercambiador de presión, la turbina y el generador, así como la caída de presión por el paso del agua por la membrana, las pérdidas por mezcla en el intercambiador de presión, la relación entre la presión hidráulica y la presión osmótica a ambos lados de la membrana y la relación entre el volumen de agua dulce entrante y permeada.

Además de las restricciones asociadas a la conversión de energía, otro factor importante que restringe el potencial técnico es el porcentaje del caudal de los ríos que realmente puede utilizarse para generar energía. No todo el caudal medio de los ríos se puede utilizar, dado que se debe garantizar la conservación de los ecosistemas y la continuidad de las actividades

relacionadas con el río, como la navegación y la pesca. El potencial que tiene en cuenta estas restricciones se llama potencial ecológico.

Los estudios muestran el gran potencial de generación de energía por gradiente de salinidad en Colombia; la existencia de fuertes gradientes de salinidad en corta distancia en las desembocaduras del golfo de Urabá y en la bahía Barbacoas, según lo muestran los resultados preliminares, sumado a los altos caudales que descargan los ríos, indican que existe la factibilidad técnica para llevar a cabo este proyecto.

**Tabla 3.**

*Potencial energético del gradiente de salinidad en el mar caribe (en MW)*

River		No-ENSO year		El Niño year		La Niña year	
		Dry season	Rainy season	Dry season	Rainy season	Dry season	Rainy Season
Magdalena	Max	14,089	15,733	15,752	15,719	15,776	15,701
	Mean	13,582	15,478	15,599	15,466	15,496	15,321
	Min	13,141	15,107	15,363	14,942	15,137	14,562
Canal del Dique	Max	213	219	118	205	222	219
	Mean	157	212	41	86	215	213
	Min	40	191	2	17	199	200
Atrato	Max	51	205	57	200	65	179
	Mean	33	181	32	134	39	136
	Min	15	63	2	35	8	53
León	Max	190	189	193	189	190	190
	Mean	184	188	188	186	188	186
	Min	160	186	182	118	185	114

Fuente: [Álvarez y Osorio [44]. [v2]

Considerando la información presentada en la tabla 3, que muestra los cuatro ríos con mayor potencial energético, por su gradiente de salinidad, que desembocan en el mar Caribe, se determinó que, aunque el río Magdalena tiene el mayor potencial, aunque no hay registros de

zonas no interconectadas cercanas a este río. Por esta razón, el afluente que tiene mayor potencial para generar energía a zonas no interconectadas es el canal de Dique. Según los datos recopilados, el canal de Dique tiene un potencial energético mínimo de 40 MW en años sin fenómenos climáticos extremos. En años con fenómeno del Niño, este potencial es de 2 MW en la temporada seca y 17 MW en la temporada de lluvias. Por otro lado, en años con fenómeno de la Niña, el potencial varía entre 199 MW en la temporada seca y 200 MW en la temporada de lluvias. Además, se registra una temperatura ambiental promedio de 27,6 °C, una temperatura máxima de 32,9 °C en el mes de junio (considerado el más caluroso) y una temperatura mínima de 23,1 °C en enero (el mes más frío) [69]. El caudal mínimo del canal de Dique se estima en 217 m<sup>3</sup>/s.

Existen otros sitios en donde los potenciales y las condiciones de demanda e infraestructura se muestran muy interesantes, como la desembocadura del Canal del Dique, que se encuentra ubicado muy cerca de la zona industrial de Mamonal y tiene condiciones favorables (como gran caudal a lo largo del año y la influencia de Barú), que pueden ser propicias para ofrecer mayores gradientes de salinidad, debido a la cercanía de agua de mar completamente salada; además, se puede sacar agua dulce de la desembocadura del Canal del Dique, sin que haya una zona de mezcla muy grande que haga muy caro el proceso.

## **7.2. Tecnologías actualmente usadas y futuras para la explotación de Energías Renovables Marinas**

Las energías renovables marinas se pueden explotar utilizando diversas tecnologías, siendo ellas:

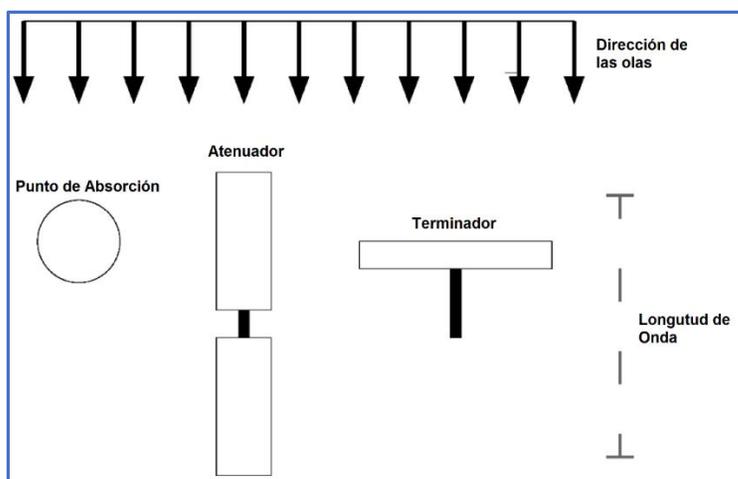
### ***7.2.1. Oleaje***

El dispositivo capaz de extraer energía de las olas del mar y producir energía eléctrica u otra salida de energía útil se define comúnmente como convertidores de energía de las olas

[70]. Estos sistemas se clasifican utilizando diferentes criterios como la posición con respecto a la costa, el tamaño típico, la orientación con respecto a la dirección de propagación de las olas o el principio de funcionamiento [71]. Como se muestra en la figura 2, considerando la orientación del sistema con respecto a la dirección de propagación de la onda, es posible definir [72]:

**Figura 2.**

*Criterios para elección de sistema convertidor de energía de las olas*



Fuente: Curto et al. [72]

- **Atenuadores**, estos sistemas están orientados paralelos a la dirección de la onda. Dado que el dispositivo tiene una longitud del mismo orden que la longitud de onda, adapta su forma al perfil de la ola, extrayendo energía de las olas del mar.

- **Absorbedores puntuales**, estos sistemas funcionan independientemente de la dirección de la onda debido a sus pequeños tamaños en comparación con la longitud de onda.

- **Terminadores**, estos sistemas están orientados perpendicularmente a la dirección de propagación de las ondas. La ola del mar termina en el dispositivo, transfiriendo su energía.

Teniendo en cuenta el principio de funcionamiento, se identifican las siguientes categorías [73]:

- **Columna de agua oscilante.** En este sistema, las olas del mar ingresan al interior de una cámara abierta a la atmósfera. Dentro de la cámara, las olas del mar producen una oscilación vertical del agua. El aire dentro de la cámara es presurizado y despresurizado por la oscilación del agua, produciendo un flujo de aire bidireccional utilizable para hacer funcionar turbinas eólicas especiales. El sistema puede instalarse en la costa o integrarse en un dispositivo flotante.

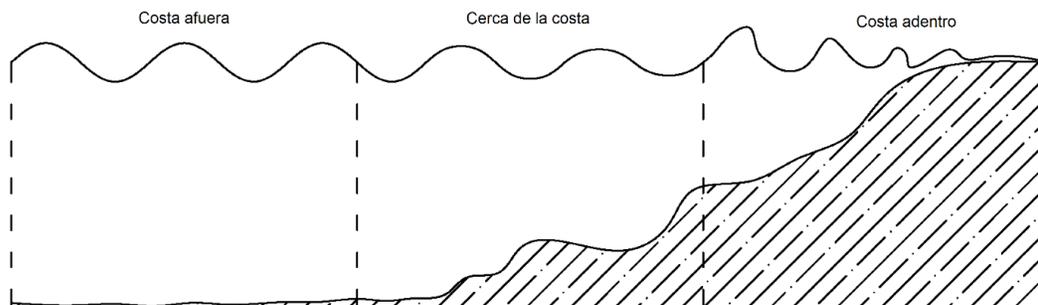
- **Cuerpos activados por ondas.** En este caso, las olas del mar producen movimientos relativos en los sistemas que accionan los convertidores de energía. Este tipo de sistema se puede montar en varias configuraciones para producir una rotación o una traslación. En cuanto a la instalación, existen sistemas flotantes y sumergidos.

- **Dispositivos de desbordamiento.** En este caso, el agua de mar se transporta a un embalse, utilizando una rampa para convertir la energía cinética de las olas del mar en energía potencial. En consecuencia, el agua se derrama del embalse y se utiliza para producir electricidad, utilizando una turbina hidráulica de baja altura.

Respecto a la distancia a la línea de costa, es común definir las siguientes regiones, como se muestra en la figura 3 [73].

### Figura 3.

*Clasificación del convertidor de energía de las olas en función de la distancia a la línea de costa*



Fuente: Zhao et al. [73]

- **En tierra.** En este caso, el sistema se fija directamente a tierra firme, simplificando el mantenimiento y la instalación del dispositivo.

- **Cerca de la costa.** Representa la región de transición entre la costa y el área marina efectiva. En esta zona, la energía de las olas del mar comienza a ser disipada por el fondo marino. En términos simples, la región cercana a la costa comienza donde la profundidad del agua es aproximadamente la mitad de la longitud de onda y termina donde la profundidad es una vigésima parte de la longitud de onda.

- **Mar adentro,** la región donde el fenómeno de las olas del mar prácticamente no se ve influenciado por el fondo marino. En esta zona el oleaje es fuerte y regular.

#### *7.2.1.1. Columna de agua oscilante*

En el pasado se han propuesto varios dispositivos de columna de agua oscilante (CAO). Según la posición del sistema desde la costa, los dispositivos CAO se pueden clasificar como fijos o flotantes [74].

En el primer caso, la planta CAO se instala a través de una estructura fija en la costa o cerca de ella, o en estructuras naturales o artificiales, como rompeolas y acantilados rocosos [74].

La instalación de WEC directamente en la costa tiene varios beneficios. Las operaciones de mantenimiento se simplifican, reduciendo los costes relativos. Al mismo tiempo se minimizan los costes del sistema de amarre. Además, todo el equipamiento eléctrico para la conversión de energía se instala fuera del agua [70].

Como se mencionó anteriormente, los dispositivos CAO están diseñados para producir una oscilación vertical de agua dentro de una cámara para producir la compresión y expansión alternativa del aire dentro de la misma cámara. Dado que el flujo de aire cambia continuamente de dirección, no se pueden adoptar las tradicionales turbinas de aire de eje horizontal. Una

solución está representada por la turbina Wells, desarrollada a mediados de la década de 1970 por Alan Arthur Wells (en ese período profesor de la Universidad Queen de Belfast) [70].

La turbina Wells es una turbina de aire de baja presión, caracterizada por la capacidad de girar en una dirección independientemente de la dirección del flujo de aire. Las palas se caracterizan por superficies aerodinámicas simétricas donde el plano de simetría es el mismo que el plano de rotación y perpendicular a la dirección del flujo de aire. Como se informa en [70], la turbina Wells se ve afectada por un par bajo (o negativo) en el caso de un caudal de aire pequeño; importantes pérdidas aerodinámicas y ruido en comparación con otros aerogeneradores. Por tanto, esta turbina requiere una mayor sección para conseguir la misma potencia que otras turbinas. Aunque, la turbina Wells se ha aplicado en varias plantas de CAO.

Como ejemplo de un sistema CAO es la planta de Yongsoo (ver figura 4) es un sistema fijo que se completó en julio de 2016 cerca de la isla de Jeju (República de Corea) [75]. El sistema está instalado en el fondo del mar, a 1,5 km de la costa [76]. Está equipado con dos turbinas de impulso de eje horizontal, conectadas a diferentes tipos de generadores (un generador síncrono y un generador de inducción), ambos con una potencia nominal de 250 kW [75]. La planta tiene una longitud de 37 m y una anchura de 31 m.

#### **Figura 4.**

*Vistas trasera (izquierda) y en perspectiva (derecha) de la planta de CAO en Yongsoo*



Fuente: Cascajo et al. [75]

La siguiente tabla resume los principales detalles de las tecnologías actuales para la recolección de olas del mar, basadas en el principio CAO:

**Tabla 4.**

*Resumen de los principales dispositivos columna de agua oscilante*

Proyecto	País	Posición	Inst.	Potencia [V3]	Estado	Nota	Árbitro.
CAO de Kværner Brug	Toftesfjorden (Noruega)	Fijo en tierra	1985	500 kilovatios	Fuera de servicio	Dañado por una fuerte tormenta en 1988. 29 MWh producidos.	[70, 42, 43, 44]
Vizhinjam CAO	Trivandrum (Kerala, India)	Fijo cerca de la costa	1990	150 kilovatios	Retirado en 2011	Producción bajo las expectativas, con alta variabilidad. Inactivo durante un largo período.	[45, 46, 47]
Lapa	Islay (Escocia, Reino Unido)	Fijo en tierra	2000	500 kilovatios	Retirado en 2012	Alto nivel de ruido. La atenuación provoca fallos de funcionamiento	[50, 51]
Pico CAO	Isla de Pico (Azores, Portugal)	Fijo en tierra	1999	400 kilovatios	El proyecto concluyó en 2018.	Mal funcionamiento por turbina Wells y sus soportes.	[50, 52]
Planta de Mutriku	Mutriku (España)	Fijo Onshore (integrado por puerto)	2011	296 kilovatios	Operando	Producción eléctrica total 2,1 GWh (finales de septiembre de 2020)	[53, 54]
REWEC 3	Civitavecchia (Italia)	Fijo Onshore (integrado por puerto)	2016	2,5 megavatios	Operando	Producción anual entre 500 y 800 MWh/y	[3, 37, 55]
planta yongsoo	Isla de Jeju (República de Corea)	Fijo Offshore (1 km hasta la costa)	2016	500 kilovatios	Operando	Adopción de dos turbinas de impulso, conectadas a	[3, 56]

Proyecto	País	Posición	Inst.	Potencia [V3]	Estado	Nota	Árbitro.
						diferentes generadores.	
Oleaje	Isla Rey (Tasmania, Australia)	Fijo Nearshore (100 m a la costa)	2019	200 kilovatios	Operando	El dispositivo se probará durante un año.	[57, 58]
Boya de conducto doblado hacia atrás	Japón	Flotante	1960-70	Concepto			[70, 59, 60]
Boya IPS inclinada	Edimburgo (Reino Unido)	Flotante	1970-80	Concepto			[61, 62]
Boya de mástil	Portugal	Flotante	2000-15	Concepto			[61, 63]
poderosa ballena	Bahía de Gokasho (Japón)	Flotante Offshore (1,5 km hasta la costa)	1998	120 kilovatios	Retirado en 2002		[64, 65, 66, 67]

Fuente: Elaboración propia.

### 7.2.1.2. Cuerpo activado por ondas

La categoría de cuerpos activados por las olas (WAB) comprende varios tipos de soluciones para la explotación de las olas del mar. Estos sistemas generalmente se componen de dos o más partes, dispuestas para producir un movimiento relativo y hacer funcionar el convertidor de energía [77].

Estos sistemas generalmente están diseñados para instalación cerca de la costa o en alta mar, para aprovechar las olas más regulares del mar abierto, en comparación con los sistemas instalados en la costa. Sin embargo, la instalación alejada de la costa aumenta el número de problemas. De hecho, se necesitan largos cables o tuberías submarinos para transferir la energía recogida por el convertidor de energía de las olas al continente. Estos dispositivos también

necesitan un sistema de amarre lo suficientemente fuerte como para resistir condiciones climáticas extremas [78].

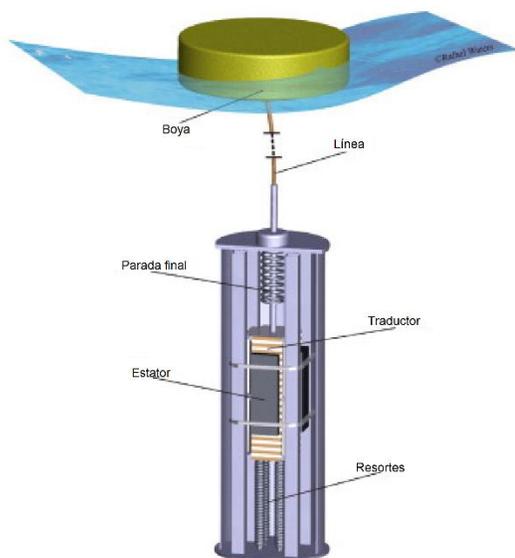
Dado que existen varios WAB, se introduce una clasificación considerando el principio de funcionamiento del dispositivo como criterio [70]: boyas de levantamiento de un solo cuerpo, sistemas de levantamiento de dos cuerpos, sistemas de levantamiento completamente sumergidos, dispositivos de cabeceo, sistemas con bisagras en el fondo y sistemas de muchos cuerpos.

#### 7.2.1.2.1. Boyas de levantamiento de un solo cuerpo

Un ejemplo es un sistema compuesto esencialmente por una boya capaz de moverse a lo largo de un puntal metálico anclado al fondo marino mediante una junta universal. La idea era aprovechar este movimiento vertical para presurizar una reserva de aire y, en consecuencia, hacer funcionar una turbina de aire. Una solución de esta tecnología (Figura 5) fue desarrollada en la Universidad de Uppsala (Suecia), denominada proyecto Lysekil [70, 79].

#### Figura 5.

*Principio de funcionamiento del proyecto Lysekil*



Fuente: Falcão [70].

Como se muestra en la figura 5, el movimiento vertical se utiliza para hacer funcionar un generador lineal, con una potencia nominal de 10 kW. Esta planta se amplió con las otras dos WEC y hoy se encuentra operativa, alcanzando una potencia total instalada de 30 kW [80].

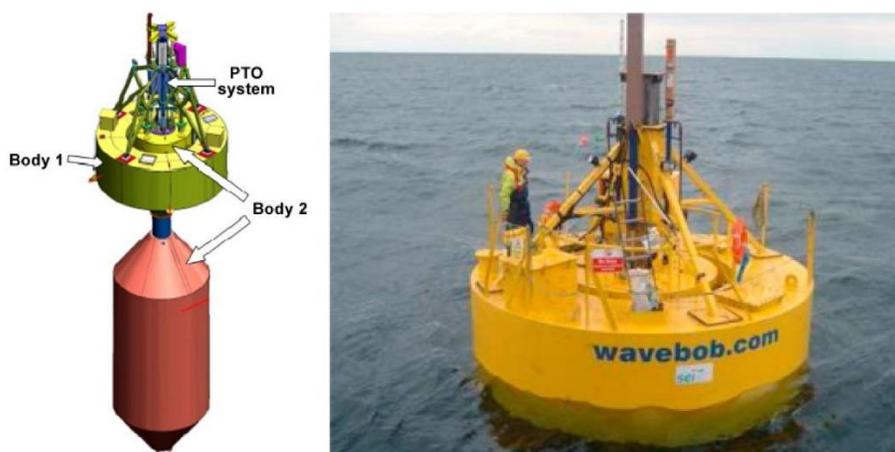
#### 7.2.1.2.2. Boyas agitadoras de dos cuerpos

La categoría "sistemas de levantamiento de dos cuerpos" se introdujo para resolver el problema de la distancia entre la boya flotante y la estructura fija en el fondo del mar, donde se produce la producción de energía. En este caso, el WEC se compone de dos boyas flotantes para producir un movimiento relativo utilizable para extraer energía. Las formas de los dos flotadores normalmente son diferentes para maximizar el movimiento relativo.

Como se muestra en la figura 6, Wavebob es un ejemplo de un sistema de elevación de dos cuerpos. Para mejorar el movimiento relativo entre las dos partes del WEC, la boya central está equipada con una gran masa, aumentando la inercia y limitando el movimiento vertical. La boya inferior está diseñada para sumergirse a una profundidad suficiente para minimizar la interferencia con las olas del mar [70, 81].

#### Figura 6.

*Vista de renderizado (izquierda) y vista externa (derecha) de Wavebob*



Fuente: Falcão [32].

El movimiento vertical producido por la boya superior (cuerpo 1) se utiliza para hacer funcionar un sistema de bombeo de petróleo. Se probó un prototipo a pequeña escala (1:4) en la Bahía de Galway (Irlanda) [70, 81]. El prototipo fue instalado en 1999 y dado de baja en 2015 porque durante 2013 se acabó la financiación.

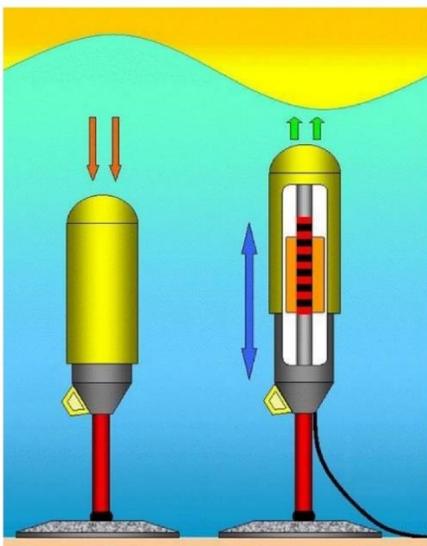
### 7.2.1.2.3. Sistemas de elevación completamente sumergidos

En cuanto a los sistemas de elevación totalmente sumergidos, un ejemplo es el Archimedes Wave Swing, desarrollado en Holanda por Teamwork Technology en 1993.

Como se muestra en la Figura 7, el sistema consta de dos partes: un sótano anclado al fondo marino y un flotador. El dispositivo funciona mediante la variación de la presión hidrostática aplicada al flotador que empuja hacia arriba y hacia abajo un generador lineal instalado en su interior. En 2004 se probó con éxito una planta piloto en Portugal [70]. Después de esta prueba, se fundó AWS Ocean Energy Ltd. en Escocia. Noticias recientes informan sobre el desarrollo de un dispositivo de 16 kW [82].

#### Figura 7.

*Principio de funcionamiento de Archimedes Wave Swing*



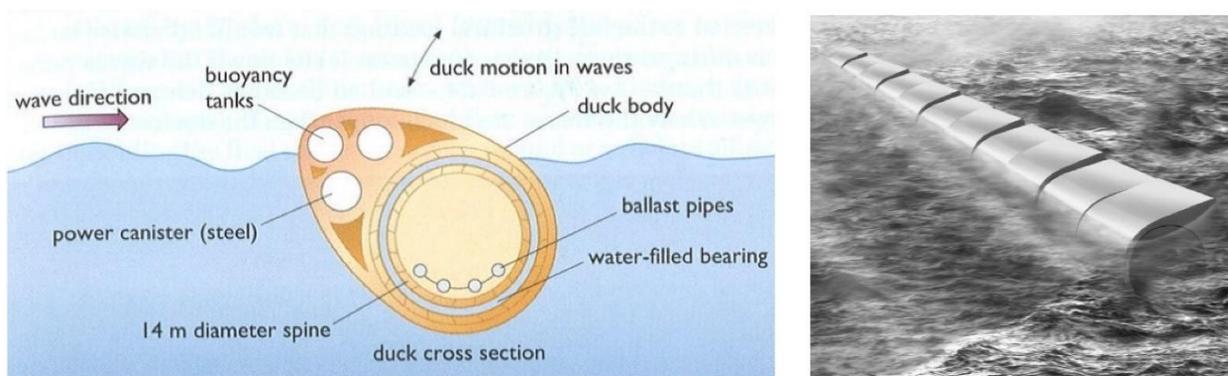
Fuente: Blackledge et al. [83].

#### 7.2.1.2.4. Dispositivos de lanzamiento

En los dispositivos de cabeceo, el movimiento principal es una rotación relativa (normalmente cabeceo) entre las piezas.

Un primer ejemplo fue el pato de Salter (también llamado pato cabeceante), desarrollado por el equipo del profesor Stephen Salter de la Universidad de Edinburg (Reino Unido), entre los años 1970 y 1980. En detalle, este dispositivo está compuesto por un flotador, con forma de leva (ver Figura 8) [84, 85]. Como primera solución se propuso un sistema de bombeo hidráulico para convertir el movimiento giratorio en electricidad. Como solución alternativa, algunos años más tarde se propuso un sistema de giroscopio [85].

**Figura 8. Pato cabeceador de Salter. Sección (izquierda) y vista de renderizado (derecha)**



Fuente: Falnes [84].

#### 7.2.1.2.5. Sistemas con bisagras inferiores

Los sistemas con bisagras inferiores están diseñados para aprovechar las olas del mar en aguas poco profundas (10 a 15 m), donde el movimiento del mar es principalmente horizontal. Un ejemplo es Oyster, que se ilustra en la Figura 9 [86, 87].

Este dispositivo consta esencialmente de una barrera, formada por cinco cilindros apilados horizontalmente. Dado que la barrera está fijada por una bisagra horizontal, la onda de frenado produce una rotación que activa una bomba de alta presión [88].

**Figura 9.***Principio de funcionamiento de Oyster*

Fuente: Evans [86].

El agua a presión se transporta a través de tuberías hasta la costa, donde se instalan turbinas hidráulicas y alternadores para producir electricidad. Este tipo de WEC fue propuesto por el equipo del profesor Trevor Whittaker, de la Queen's University de Belfast. La empresa Aquamarine Power desarrolló y probó dos plantas a gran escala en el polígono de pruebas Billia Croo del Centro Europeo de Energía Marina (Orkney): Oyster 1 (315 kW) y Oyster 2 (800 kW). La segunda versión estuvo conectada a la red en 2012 hasta 2015, cuando la empresa dejó de operar [88].

**7.2.1.2.6. Sistema de muchos cuerpos**

Wavestar es un ejemplo de sistemas de muchos cuerpos [70]. El primer estudio sobre este dispositivo lo iniciaron en el año 2000 Niels y Keld Hansen en Dinamarca. En 2004 se probó un prototipo a pequeña escala (1:40) en el laboratorio de la Universidad de Aalborg. En 2005 se instaló en Nissum Bredning una planta piloto de pequeña escala (1:10) conectada a la red. Finalmente, en 2009 se conectó a la red un prototipo a escala 1:2 en Hanstholm. La planta fue desmantelada en 2013 [89]. Al igual que otros sistemas descritos anteriormente, Wavestar

utiliza la rotación relativa de las boyas para bombear aceite a alta presión y acciona motores hidráulicos [70]. Actualmente, los investigadores están trabajando en la escala completa del dispositivo. Como se muestra en la Figura 10, Wavestar está compuesto por 20 boyas (10 m de diámetro), dispuestas en dos líneas, y capaces de extraer hasta 6 MW según las condiciones climáticas del Mar del Norte. El sistema también podría montarse en forma de estrella, utilizando 60 boyas y alcanzando una potencia nominal total de 18 MW [89, 90].

**Figura 10.**

*Vista renderizada de Wavestar*



Fuente: Jordan Wavestar [90].

En la Tabla 5 se resume los principales detalles de las tecnologías actuales para la captación de olas del mar, basadas en el principio WAB.

**Tabla 5.**

*Resumen de los principales dispositivos WAB*

Proyecto	País	Posición	Inst.	Potencia [V4]	Estado	Nota	Árbitro.
Proyecto Lysekil	Lysekil (Suecia)	Mar adentro (2 km hasta la costa)	2006	30 kW (10 kW cada uno)	Operando	Actualmente en funcionamiento y ampliado con 2 WEC (junio de 2009)	[32, 70, 71]

Proyecto	País	Posición	Inst.	Potencia [V4]	Estado	Nota	Árbitro.
Bob Ola	Bahía de Galway (Irlanda)	Costa afuera	1999	Prototipo escala 1:4	Retirado en 2015	En 2013, fin de la financiación.	[32, 72]
boya eléctrica	Atlantic City (Nueva Jersey, EE. UU.)	Mar adentro (22,5 km hasta la costa)	2005	Hasta 7,5kW	Operando	Actualízate en 2020 con paneles fotovoltaicos	[32, 70, 73, 74, 95]
Columpio de onda de Arquímedes	Portugal	Costa afuera	2004	Planta piloto	Fuera de servicio	Actualización disponible hasta 16 kW	[32, 75, 76]
CETO 6	Albany, Australia Occidental	Costa afuera	2014	1,5 megavatios	Interrumpido	Proyecto interrumpido el 31 de octubre de 2019.	[77, 78, 79]
Pato cabeceador de Salter	Edimburgo (Reino Unido)	Cerca de la costa	1970-1980		Concepto		[80, 81]
Pelamis P1	Aguzadura, Portugal	Mar adentro (5 km hasta la costa)	23 de septiembre de 2008	Tres dispositivos (750 kW cada uno) 2,25 MW	Retirado de servicio en noviembre de 2008	Funcionó sólo durante dos meses debido a fallas técnicas en los rodamientos. Problemas financieros bloquearon las actividades	[32, 96]
ostra 2	EMEC Orcadas (Reino Unido)	Cerca de la costa	2012	800 kilovatios	Fuera de servicio	La planta funcionó hasta 2015 cuando la empresa dejó de operar.	[86, 87, 88]
apisonadora	Järvenpää (Finlandia)	Cerca de la costa (0,3 a 2 km de la costa)	2015	350 kilovatios	Proyecto finalizado	El proyecto finalizó en octubre de 2013, quedando el dispositivo in situ para su seguimiento.	[89, 90]
estrella de onda	Hanstholm (Dinamarca)	Cerca de la costa (300 m de la costa)	2009	600 kilovatios	Fuera de servicio	La planta fue desmantelada en 2013.	[32, 91, 92]

Proyecto	País	Posición	Inst.	Potencia [V4]	Estado	Nota	Árbitro.
Ola ecológica	Gibraltar	En tierra	2016	100 kilovatios	Operando		[3, 93]
Caballo de mar	Pecém (Brasil)	En tierra	2012	50 kilovatios	Operando		[3, 94]

Fuente: Elaboración propia.

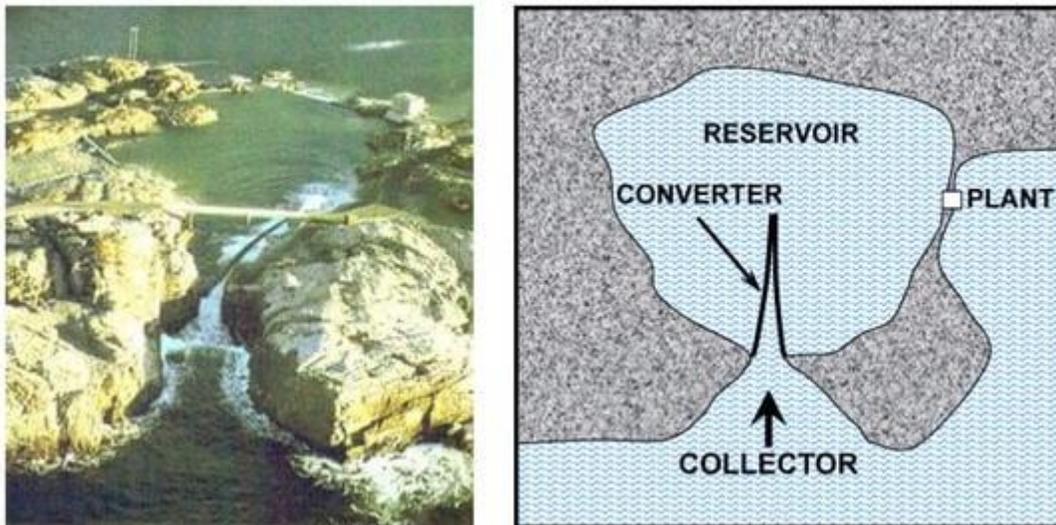
### 7.2.1.3. Dispositivos de desbordamiento

En los dispositivos de desbordamiento (OD), la explotación de las olas del mar se basa en la conversión de la energía cinética del agua en energía potencial, aprovechable por una turbina hidráulica de baja caída.

Se debe crear una reserva artificial de agua a un nivel superior al nivel del mar. Para recargar el sistema, se requiere una rampa para conducir las olas del mar dentro de la reserva de agua.

#### Figura 11.

Vista (izquierda) y vista esquemática en planta (derecha) de Tapchan



Fuente: Ecthelion [91].

Históricamente, la primera planta piloto de OD fue Tapchan (Dispositivo de energía de onda de canal cónico), realizada en Toftestallen (Noruega) en 1985 (ver Figura 11) [70, 91]. El colector fue excavado en un acantilado rocoso, realizando una entrada de unos 60m de ancho y elevando el agua a un depósito a 3m sobre el nivel del mar y con una superficie de 8500 m<sup>2</sup>. Para convertir la energía potencial en electricidad, se adoptó una turbina hidráulica tipo Kaplan de baja altura, con una potencia nominal de 350 kW. Esta planta resultó dañada por la tormenta de 1988. La planta fue clausurada en 1991.

La Tabla 6 resume los principales detalles de las tecnologías actuales para la recolección de olas del mar, basadas en el principio OD.

**Tabla 6.**

*Resumen de los principales dispositivos OD*

Proyecto	País	Posición	Inst.	Fuerza	Estado	Nota	Árbitro.
tapchan	Toftestallen (Noruega)	En tierra (3 m sobre el nivel del mar)	1985	350 kilovatios	Retirado en 1991	Dañado por una tormenta en 1988	[32, 97]
Dragón Ola	Nissum Bredning (Dinamarca)	Cerca de la costa	2003	20 kW (escala 1:4,5)	Fuera de servicio		[32, 70, 99]
Generador de conos de ranura Seawave	Noruega	En tierra			Planeado pero no realizado		[3, 100]
OIST-WEC	Isla Kandooma (Maldivas)	Cerca de la costa	2018	8 kilovatios	Operando		[101]

Fuente: Elaboración propia.

### 7.2.2. Mareas

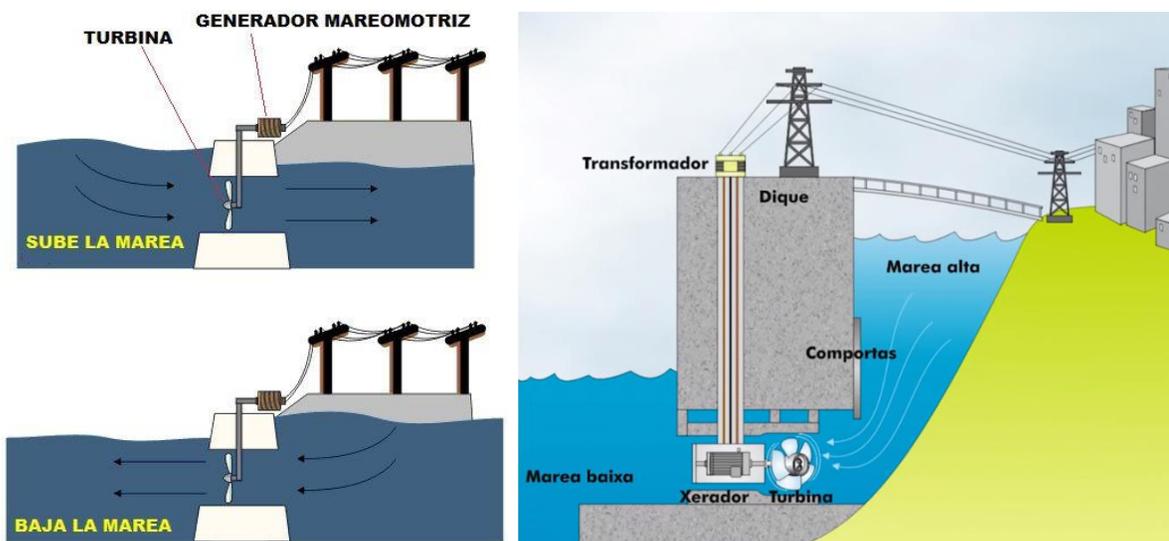
Para producir energía mareomotriz se utilizan turbinas, las cuales tienen un diseño similar a las turbinas eólicas, pero se instalan bajo el agua y son impulsadas por el movimiento

de las corrientes de marea. A medida que la marea entra y sale, las aspas de la turbina giran y generan electricidad, que luego se transmite a la red [92].

Las presas de marea, por otro lado, funcionan utilizando el poder de la marea para mover el agua a través de una serie de turbinas. A medida que la marea sube y baja, el agua queda atrapada detrás de una barrera, lo que crea una diferencia en los niveles del agua. Cuando baja la marea, el agua detrás de la barrera se libera y, a medida que fluye a través de las turbinas, genera electricidad [92].

### Figura 12.

*Funcionamiento turbina mareomotriz (izquierda) y presa de marea (derecha)*



Fuente: WTS Energy [92].

Una de las principales ventajas de la energía mareomotriz es que es una fuente de energía limpia y sostenible. A diferencia de los combustibles fósiles, que liberan gases de efecto invernadero y contribuyen al cambio climático, la energía mareomotriz no produce emisiones ni contaminantes nocivos [92].

Sin embargo, la energía mareomotriz también tiene algunas desventajas. Por un lado, la instalación y el mantenimiento de turbinas mareomotrices y presas pueden ser costosos y su

construcción puede tener algún impacto ambiental. Además, la energía mareomotriz se limita a zonas costeras con fuertes corrientes de marea, lo que puede limitar su uso generalizado [92].

A pesar de estos desafíos, la energía mareomotriz tiene el potencial de desempeñar un papel importante para satisfacer las necesidades energéticas del mundo de manera sostenible. Los gobiernos y empresas de todo el mundo están invirtiendo en proyectos de energía mareomotriz y los investigadores están trabajando para mejorar la eficiencia y la rentabilidad de la tecnología de energía mareomotriz.

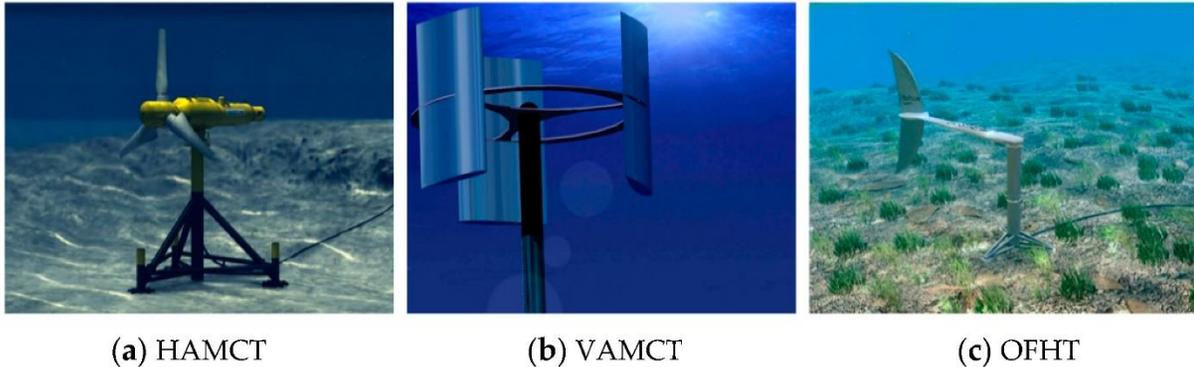
### **7.2.3. Corrientes**

Como dispositivo de conversión de energía de primera clase para la energía de las corrientes oceánicas, la turbina de corrientes oceánicas es el componente central de los dispositivos de generación de energía de las corrientes oceánicas, y su rendimiento hidrodinámico es clave para el desarrollo y la utilización eficientes de la energía de las corrientes oceánicas. Por lo tanto, la investigación sobre el rendimiento hidrodinámico de las turbinas de energía de corrientes marinas ha sido un foco y un punto candente de la investigación actual. Los diseños seleccionados del perfil aerodinámico y de las palas de la turbina determinan el rendimiento hidrodinámico de la turbina energética de corrientes marinas. Las turbinas de corriente marina de eje horizontal (HAMCT), las turbinas de corriente marina de eje vertical (VAMCT) y las turbinas hidrocinéticas de lámina oscilante (OFHT) son los principales tipos de turbinas hidrocinéticas, como se muestra en la figura 13. Kai-Wern Ng revisa la investigación sobre HAMCT, que cubre los aspectos del diseño de turbinas y modificaciones novedosas [93]. Dependiendo de si las medidas se recopilan utilizando sensores específicos o los sensores de corriente de fase del generador incorporados, Xie revisó las técnicas y métodos utilizados para la detección de fallas en las palas de las turbinas de corriente marina [94]. Senad implementó un prototipo de convertidor de energía de corriente marina, que es un VAMCT de

paso fijo con un generador síncrono de imán permanente (PMSG) [95]. Katsutoshi Shirasawa propuso una novedosa turbina sumergida de eje horizontal de corriente oceánica, similar a las cometas [96].

**Figura 13.**

*Turbinas hidrocinéticas*



Para mejorar la estanqueidad de una corriente marina, In-cheol Kim diseñó un acoplamiento que aumentó la potencia máxima de salida de la turbina en aproximadamente un 5% y el coeficiente hidrodinámico de potencia en aproximadamente un 2% [97]. LIU diseñó y probó una turbina de corriente de marea de eje horizontal de tres palas a escala 1/5 y la potencia máxima superó los 29 kW. Sin embargo, la potencia de la turbina no es muy eficiente [98]. Para maximizar la relación sustentación-arrastre del hidroala, LUO propuso un método de optimización multipunto para el foil en el rango operativo de  $0^\circ$  a  $15^\circ$  del ángulo de ataque [99]. Molland llevó a cabo experimentos en túneles de cavitación en cuatro secciones representativas derivadas de la serie NACA, y los resultados mostraron que la resistencia tiende a ser mayor que los valores publicados en la región  $\alpha = 7-13^\circ$  [100]. Krishnil presentó secciones de perfil aerodinámico para una turbina de 20 kW utilizando el algoritmo genético multiobjetivo, diseñó una turbina utilizando las características de perfil aerodinámico de la familia de perfiles USP07-45XX, con el código de optimización de rotor HARP\_Opt del Laboratorio Nacional de

Energía Renovable (NREL), y proporcionó evidencia de la utilidad de los perfiles aerodinámicos modernos [101]. Este artículo se centrará en las turbinas de corriente marina de eje horizontal (HAMCT) más utilizadas.

La conversión de energía de las corrientes oceánicas es similar a la conversión de energía eólica [102]. Dado que el sistema de generación de energía con control de transmisión hidráulica tiene un gran potencial para absorber las fluctuaciones de energía del flujo de agua o viento, mejorando la confiabilidad del sistema, la calidad de la energía y la generación de energía, además de reducir los costos de fabricación, operación y mantenimiento, ha atraído la atención de muchos fabricantes e investigadores nacionales y extranjeros, y gradualmente se convierte en un punto de acceso a la investigación. La frecuencia del voltaje, como principal índice de evaluación de la calidad de la energía, depende principalmente de la velocidad del generador síncrono para un sistema de generación de energía controlado por transmisión hidráulica, por lo que si podemos capturar la mayor cantidad posible de energía de la corriente oceánica bajo la premisa de velocidad constante y precisión control del motor hidráulico (error de  $\pm 0,4\%$ ), podemos dar un gran impulso para mejorar la calidad de la energía y la capacidad de generación anual de energía de las unidades generadoras existentes. Al mismo tiempo, debido a las características de la conexión hidráulica flexible y la gran escalabilidad, para las características de baja velocidad de flujo en aguas profundas, se pueden combinar múltiples grupos de bombas hidráulicas de baja velocidad y gran desplazamiento para impulsar la generación de una sola bomba hidráulica [103].

#### ***7.2.4. Gradiente de temperatura***

Las plantas de conversión de energía térmica oceánica pueden construirse en tierra o en plataformas flotantes marinas. El tipo terrestre requiere largas tuberías de entrada para bombear agua de mar a la tierra, altos costos iniciales de construcción, grandes cantidades de energía para

operar las bombas, podría verse limitado por la disponibilidad del recurso térmico cerca de la costa y podría aumentar los impactos ambientales. Sin embargo, estas plantas se mantienen y reparan fácilmente y proporcionan agua para múltiples propósitos, como agua potable (desalada), maricultura y sistemas de aire acondicionado y refrigeración (aire acondicionado de agua de mar, SWAC), lo que las convierte en una alternativa prometedora, por ejemplo, en pequeñas islas del Caribe. Las plataformas flotantes pueden ser más grandes y no requieren el uso de terrenos costeros valiosos. Sin embargo, estas plantas conllevan el gasto añadido de transportar energía a la costa y también es necesario construir grandes estructuras para anclar y proteger la plataforma del viento, las olas y otras condiciones climáticas adversas [104].

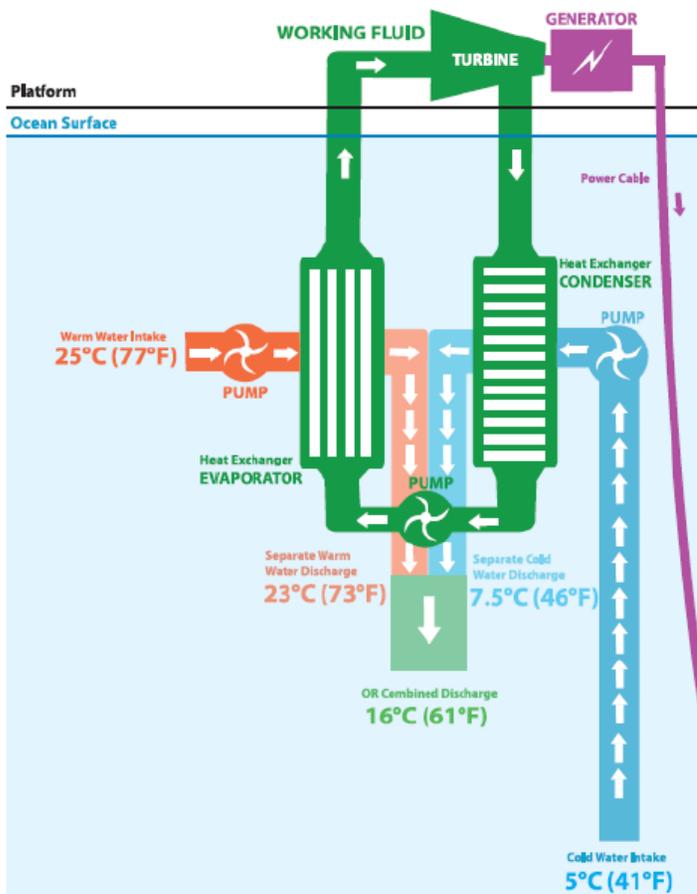
Vega [105] concluyó que las plantas terrestres parecen ser más rentables donde las aguas profundas están muy cerca de la costa. Se destaca que en este estudio no se consideraron las plataformas de conversión de energía térmica marina ya que el gradiente térmico requerido se encuentra a pocos kilómetros de la costa. Sin embargo, si la demanda energética de la isla continúa creciendo en el futuro, se podría considerar la conversión de energía térmica marina en una segunda etapa del proyecto una vez que se recuperen los costos de construcción en tierra.

Una de las tecnologías más utilizadas es el Sistema de alimentación de conversión de energía térmica oceánica de ciclo cerrado (ver figura 14), el cual consta de un sistema de motor térmico con una fuente de calor (es decir, agua caliente) y un dissipador de calor (por ejemplo, agua fría). El agua caliente pasa a través de un intercambiador de calor (es decir, un evaporador) que está en contacto con un circuito cerrado de fluido de trabajo (probablemente amoníaco). El agua caliente evapora el fluido de trabajo en un vapor que se expande e impulsa una turbina. La turbina, conectada a un generador, es la fuente de energía mecánica. El generador convierte la energía mecánica en energía eléctrica. Después de que el fluido de trabajo vaporizado pasa a través de la turbina y el generador, ingresa a otro intercambiador de calor (es decir, condensador)

que está en contacto con el agua fría. El fluido de trabajo vaporizado se condensa de nuevo en un líquido que luego se bombea de nuevo al evaporador para completar el ciclo. Tanto el agua caliente enfriada como el agua fría calentada se descargan en el océano después de haber pasado por los intercambiadores de calor [106].

**Figura 14.**

*Esquema del sistema de ciclo cerrado*



Fuente: NOAA [106].

Una característica única de una instalación OTEC es la tubería de agua fría. La tubería debe ser capaz de soportar los rigores del medio marino para poder permanecer unida a la plataforma OTEC. Para obtener el diferencial de temperatura requerido para el sistema (20 °C), la tubería debe ser capaz de extraer agua fría a una profundidad de aproximadamente 3300 pies

(1000 metros). Para acomodar los grandes flujos de agua fría, el tamaño de la tubería para una instalación de 100 MW puede ser de aproximadamente 33 pies (10 metros) de diámetro. La construcción, el despliegue y la instalación de la tubería de agua fría siguen siendo un desafío de ingeniería [106].

#### ***7.2.5. Gradiente de salinidad***

La tecnología para generar energía eléctrica por gradiente salino está en constante innovación e investigación y se encuentra en etapas muy tempranas de desarrollo y se dividen de acuerdo a los distintos procesos mediante los cuales puede obtenerse energía: (1) Procesos de intercambio iónico, (2) Procesos osmóticos, (3) Procesos de mezcla directa, (4) Procesos de adsorción y desorción (5) procesos basados en la diferencia de presión de vapor [107].

En los procesos de intercambio iónico, el mecanismo encargado del cambio de concentración en dos corrientes con diferentes valores de salinidad es el transporte de iones (cationes y aniones).

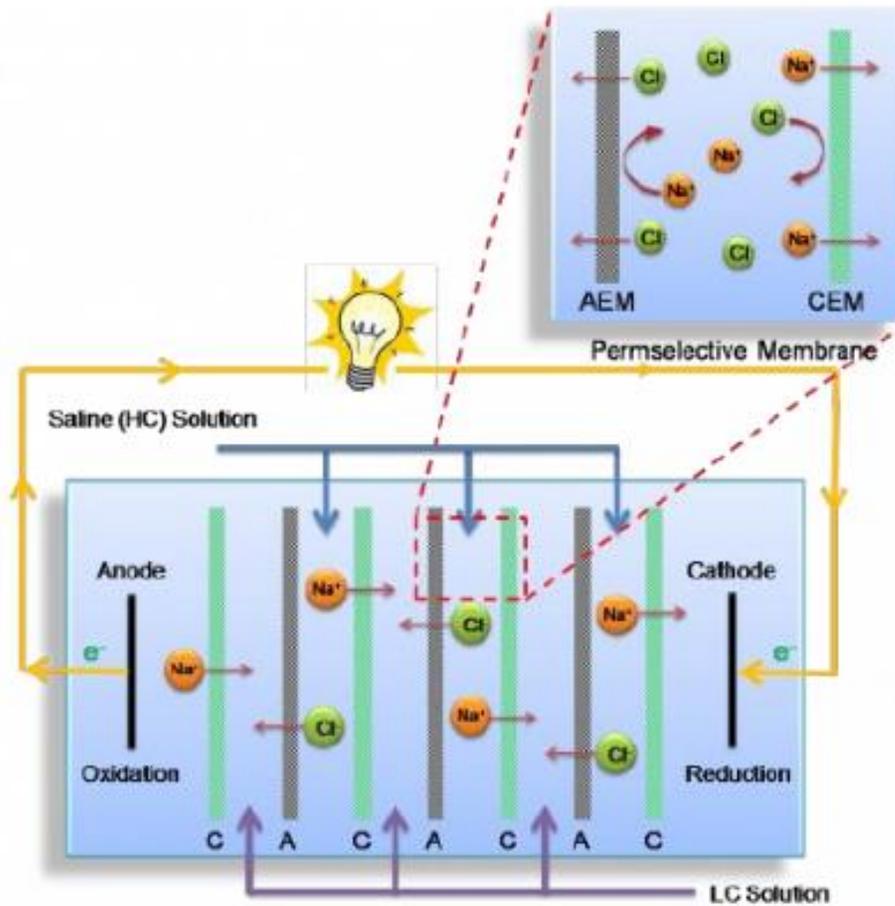
Al día de hoy, los dos métodos más explorados son la técnica de electrodiálisis inversa (técnica de intercambio iónico) y la técnica de ósmosis inversa.

##### ***7.2.5.1. Método por electrodiálisis inversa (RED)***

En este método, el agua fluye entre membranas catiónicas y aniónicas (membranas ion-selectivas) colocadas de forma alternada a modo de batería o acumulador. Los aniones  $\text{Cl}^-$  de la sal sólo pueden pasar a través de la membrana de intercambio de aniones, mientras que los cationes  $\text{Na}^+$  sólo a través de la membrana de intercambio de cationes. Como resultado surge un voltaje por la diferencia de cargas positivas y negativas, similar a una batería y así generar corriente eléctrica (Figura 15) [107].

**Figura 15.**

*Esquema de funcionamiento del proceso de generación de energía por gradientes de salinidad mediante el método de Electrodialisis Inversa (RED)*



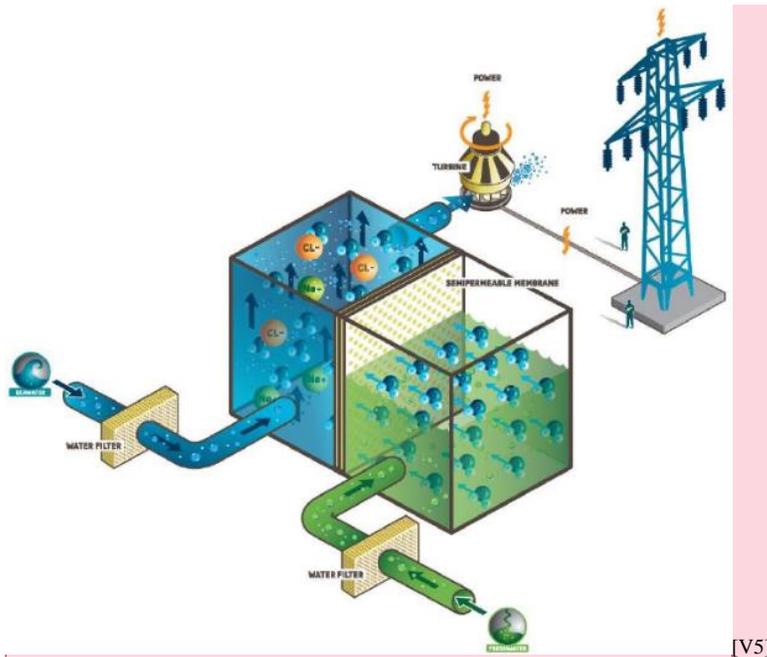
Fuente: Climate Technology Centre and Network [107].

#### 7.2.5.2. Método de ósmosis por presión retardada (PRO)

Este método consiste en poner en contacto dos fluidos con diferentes concentraciones de salinidad, entre los que se coloca una membrana semipermeable que permite el paso del agua, pero no de las sales. El agua dulce fluye a través de la membrana hacia una cámara que contiene el agua salada incrementando la presión en ella y la cual puede ser empleada para impulsar una turbina y generar así la electricidad (Figura 16) [107].

**Figura 16.**

*Esquema de funcionamiento del proceso de generación de energía por gradientes de salinidad mediante el método de Osmosis por presión retardada*



Fuente: Climate Technology Centre and Network [107].

Para esta tecnología existen varios retos, dos de los más importantes son lo costoso del tratamiento de agua para llevar a cabo el proceso, ya que siendo agua de sistemas naturales, es necesario someterlas antes de ingresar al sistema a un proceso de limpieza ya que las membranas son delicadas y son propensas a sufrir de fouling. Otro reto es relacionado con las membranas y es en cuanto a su vida útil la cual hasta el momento es muy corta [107].

Las tecnologías de gradiente de salinidad se encuentran en su fase de escala parcial (tanque), lo que significa que los conceptos y prototipos se están sometiendo a pruebas en el entorno de laboratorio. Es evidente que las otras tecnologías de energía oceánica han avanzado más en el proceso de I+D. Sin embargo, se estima que el potencial global de la tecnología de

utilizar el gradiente de salinidad para obtener energía es de alrededor de 2000 teravatios hora anualmente (TWh/año) [107].

### **7.3. Sugerencias para la explotación de Energías Renovables Marinas en Colombia con las fuentes de mayor posibilidad de materializar**

Las posibilidades de aprovechar la energía de los mares que rodean a Colombia son diversas. A continuación, se presentan algunas sugerencias para explotarla como una posible solución para mejorar tanto el entorno ecológico como el desarrollo social en las comunidades costeras.

Para aprovechar el potencial del oleaje, se plantea que una central de energía marina podría desplegarse como un complemento significativo al sistema energético durante los meses de verano. Esto no solo contribuiría a la reducción de las emisiones de gases de efecto invernadero, sino que también permitiría la venta de energía a precios competitivos [5]. Este tipo de proyecto podría ser viable específicamente para satisfacer la demanda durante estas temporadas. Considerando que entre los meses de diciembre y abril se registra una mayor abundancia de oleaje, se identifican las ciudades de Barranquilla y Santa Marta como puntos de interés para tales iniciativas, dado su tamaño, acceso a la red eléctrica y condiciones favorables de energía generada por las olas. Además, la presencia de puertos en estas ciudades facilitaría la coordinación de mantenimiento y transporte necesarios para el proyecto.

En la costa del Pacífico, donde el oleaje persiste a lo largo de todo el año, surge una alternativa atractiva para abastecer de energía a las zonas no interconectadas. Aunque existen numerosas áreas con estas características a lo largo de la costa del Pacífico colombiano, la implementación de un proyecto de esta envergadura demandaría considerables inversiones, por lo que debería priorizarse en poblaciones relativamente grandes con una demanda energética

suficiente para justificar la inversión. En este contexto, destacan lugares como Nuquí, Bahía Solano y El Valle, importantes centros ecoturísticos de la región.

Debido a factores geográficos y de conectividad, la explotación de la energía mareomotriz solo sería factible en las bahías del Pacífico colombiano, especialmente en Tumaco y Buenaventura, dado que otras áreas del país enfrentan numerosas restricciones ambientales. Para evaluar el potencial de esta fuente energética, se llevaron a cabo modelizaciones de la marea astronómica y meteorológica en dichas bahías utilizando un modelo que simula la velocidad de las corrientes basándose en la variación de la marea. Sin embargo, los resultados de estas modelizaciones revelan que las velocidades son insuficientes para aprovechar las corrientes mareales, ya que en el mejor de los casos alcanzan apenas 0.8 metros por segundo, muy por debajo de la velocidad mínima considerada viable, que es de alrededor de 2 metros por segundo. Por lo tanto, la explotación comercial de las corrientes mareales en Colombia se descarta como opción.

No obstante, tras conversaciones con asesores internacionales, se ha contemplado utilizar este tipo de energía en una escala menor, sin cerrar completamente un estuario, sino una fracción cercana a infraestructuras existentes. Esta estrategia permitiría implementar pequeñas instalaciones en áreas con población que lo requiera, reduciendo así los costos de conexión, infraestructura y los impactos ambientales. La tecnología necesaria para este enfoque de explotación ya está disponible comercialmente. Aunque se consideró que este enfoque podría ser adecuado para Buenaventura, los costos de las obras civiles hacen que el proyecto no sea viable.

Por otro lado, las condiciones del gradiente de temperatura en el mar al sur de la isla de San Andrés cumplen con los requisitos para la instalación de un ciclo OTEC. Una planta de este tipo podría satisfacer parte de la demanda energética de la isla y además producir agua

desalinizada para su potabilización. Dada la alta tarifa eléctrica en San Andrés, el elevado consumo de energía y la escasez de agua potable, el OTEC se presenta como una opción muy atractiva como proyecto integral para el suministro de energía y agua, lo cual beneficiaría considerablemente a la población de la isla.

Para finalizar, al considerar que las estimaciones del potencial técnico y ecológico del gradiente de salinidad aún son aproximadas, se considera que son aceptables y factibles para la construcción de una planta en el río León que pueda generar entre 5 y 6 megavatios, como mencionado por Polo et al. [65]. De acuerdo con los datos de consumo energético del país proporcionados por la Unidad de Promoción Minero Energética [108], una planta de esta capacidad podría abastecer de energía a alrededor de 35,000 personas, lo que la convierte en una excelente opción como planta piloto que podría integrarse a la red eléctrica en Apartadó, mejorando así el suministro eléctrico en la zona. En contraste, el río Atrato, a pesar de su caudal elevado, se encuentra demasiado distante del punto de conexión más cercano a la red (Turbo) y carece de la infraestructura necesaria para la construcción de una planta, por lo que se descarta como ubicación para un proyecto de este tipo.

Además, la principal apuesta que el país debe hacer radica en aprovechar los gradientes salinos en el Caribe. Aunque la tecnología, específicamente en el área de membranas, se encuentra en una etapa inicial y requiere de un desarrollo significativo, la abundancia del recurso, las condiciones óptimas de la región, la confiabilidad y la oportunidad de instalar cientos de megavatios muy cerca de centros poblados en el Caribe hacen que sea una estrategia muy prometedora.

## 8. Conclusiones

La investigación revela que las fuentes potenciales de energía eléctrica en los mares de Colombia ofrecen una visión detallada y prometedora sobre las oportunidades y los desafíos que enfrenta el país en este ámbito. La evaluación de fenómenos oceanográficos clave, como el oleaje, las mareas, las corrientes, el gradiente de temperatura y el gradiente de salinidad, revela una variedad de opciones para la generación de energía renovable marina. Se destaca el potencial del oleaje en el Caribe durante los meses de diciembre a abril para complementar el suministro eléctrico, especialmente en ciudades como Barranquilla y Santa Marta, donde la demanda energética es alta. Sin embargo, se reconoce que, aunque las condiciones del oleaje en la región de La Guajira son favorables, los niveles de potencia son insuficientes para proyectos de energía a gran escala con la tecnología actual. En el Pacífico, aunque los valores de energía del oleaje son menores, se mantienen constantes a lo largo del año, lo que los convierte en una opción interesante para zonas no interconectadas como Bahía Solano o Nuquí. A pesar de la baja viabilidad de la explotación de corrientes marinas en Colombia debido a su baja velocidad y ubicación lejana de la costa, se identifican áreas con potencial para proyectos de energía mareomotriz, como Bahía Málaga y la ensenada de Tribugá en el Pacífico. Además, se señala la prometedora posibilidad de aprovechar el gradiente de temperatura en aguas profundas cercanas a la Sierra Nevada de Santa Marta para la generación de energía oceánica térmica (OTEC), aunque se reconoce que esta tecnología enfrenta desafíos financieros y técnicos significativos. Por último, se destaca el potencial del gradiente de salinidad en el mar Caribe, especialmente en la desembocadura del Canal del Dique, como una opción atractiva para la generación de energía debido a la alta disponibilidad de agua salada y dulce. A pesar de las limitaciones técnicas y económicas, la investigación proporciona una base sólida para el

desarrollo futuro de proyectos de energía renovable marina en Colombia, lo que podría contribuir significativamente a la seguridad energética y la mitigación del cambio climático en el país.

A su vez, la exploración y explotación de las energías renovables marinas ha resultado ser una vía prometedora para diversificar las fuentes de energía y mitigar los impactos ambientales asociados con los combustibles fósiles. En particular, las tecnologías para aprovechar el oleaje han demostrado una variedad de enfoques ingeniosos y efectivos. Desde sistemas de atenuación hasta dispositivos de desbordamiento, se están desarrollando soluciones innovadoras para capturar la energía de las olas del mar en diferentes contextos geográficos y operativos. Además, la investigación sobre tecnologías para la explotación de energías renovables marinas, como las mareomotriz, las corrientes oceánicas, y los gradientes de temperatura y salinidad, revela un panorama diverso de oportunidades y desafíos. Si bien estas tecnologías ofrecen un potencial significativo para una generación de energía limpia y sostenible, también enfrentan obstáculos importantes. Desde la necesidad de costosas infraestructuras y el impacto ambiental asociado hasta la limitación geográfica de su aplicación, cada una de estas tecnologías presenta desafíos únicos. Sin embargo, el compromiso continuo de gobiernos, empresas y la comunidad científica con la investigación y el desarrollo de estas tecnologías sugiere un reconocimiento del valor intrínseco de la energía renovable marina. A medida que avanzamos hacia un futuro más sostenible, la inversión en estas tecnologías y la superación de sus desafíos técnicos y económicos se vuelven cada vez más cruciales para aprovechar plenamente el vasto potencial de la energía renovable del océano.

Así mismo, la investigación evidencia que las posibilidades de explotación de Energías Renovables Marinas en las poblaciones de los litorales de Colombia ofrecen sugerencias valiosas que podrían mejorar significativamente el entorno ecológico y el desarrollo social en

las comunidades costeras del país. Se destaca la viabilidad de aprovechar el potencial del oleaje durante los meses de verano, identificando lugares estratégicos como Barranquilla y Santa Marta en el Caribe y Nuquí, Bahía Solano y El Valle en el Pacífico como áreas propicias para proyectos de energía marina. Aunque se descarta la explotación de la energía mareomotriz debido a limitaciones de velocidad de corriente, se plantea la implementación de proyectos a menor escala cerca de infraestructuras existentes para reducir costos y minimizar impactos ambientales. Además, se resalta el potencial del ciclo OTEC en el sur de la isla de San Andrés como una alternativa integral para el suministro de energía y agua potable en una región con alta demanda y escasez de recursos. Finalmente, se enfatiza la importancia de aprovechar los gradientes salinos en el Caribe como una estrategia prometedora que, a pesar de requerir un desarrollo tecnológico adicional, ofrece beneficios ambientales y socioeconómicos significativos para el país.

En conclusión, el potencial de los mares colombianos para producir energía en las poblaciones de los litorales es diverso y significativo, según la investigación presentada. Se destaca el aprovechamiento del oleaje en el Caribe durante ciertos meses del año, así como en el Pacífico, donde aunque los niveles de energía del oleaje son menores, son constantes a lo largo del año, ofreciendo oportunidades para zonas no interconectadas. A pesar de la baja viabilidad de la explotación de corrientes marinas, se identifican áreas con potencial para proyectos de energía mareomotriz en el Pacífico. Además, se menciona la posibilidad de aprovechar gradientes de temperatura cerca de la Sierra Nevada de Santa Marta para la generación de energía térmica, y el potencial del gradiente de salinidad en el Caribe. Por lo tanto, los mares colombianos ofrecen diversas oportunidades para la producción de energía renovable, aunque se reconocen desafíos técnicos y económicos que deben abordarse para su pleno aprovechamiento.

## Referencias

- [1] J. Nematian e I. Rahimi, “Feasibility study of using renewable energies in Iranian Seas: A comparative study”, *Renewable Energy*, vol. 189, pp. 383-391, 2022, <https://doi.org/10.1016/j.renene.2022.02.109>
- [2] M. A. Mustapa, O. B. Yaakob, Y. M. Ahmed, C. K. Rheem, K. K. Koh, y F. A. Adnan, “Wave energy device and breakwater integration: A review”, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 77, pp. 43-58, 2017, <https://doi.org/10.1016/j.rser.2017.03.110>
- [3] E. Rusu, y F. Onea, “A review of the technologies for wave energy extraction”, *Clean Energy*, vol. 2, no. 1, pp. 10-19, 2018, <https://doi.org/10.1093/ce/zky003>
- [4] A. J. Perdomo, H. Diaz y J. Palacios, “Viabilidad técnica de tecnologías para aprovechamiento de la energía undimotriz en la costa del pacifico colombiano”, *Avances: Investigación en Ingeniería*, vol. 15, no. 1, pp. 286-301, 2018.
- [5] A. F. Osorio, S. Ortega y S. Arango-Aramburo, “Assessment of the marine power potential in Colombia”, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 53, pp. 966-977, 2016.
- [6] J. J. Dionisio, “La evolución de la energía total y renovable en los nuevos miembros de la Unión Europea,” Tesis de Doctorado, Universidad de Sevilla, Sevilla, España, 2021.
- [7] L. F. Peña y M. F. Flechas, “Energía fotovoltaica, una solución ecológica con beneficios tributarios para el alto consumo de energía en el sector financiero colombiano a raíz de la digitalización bancaria,” Tesis de Especialista, Fundación Universitaria del Área Andina, Bogotá, Colombia, 2020.
- [8] J. F. Frier y S. Michalak, “From black energy to blue energy”, Analysis n. 5-Climate, Energy and Safety Programme, 2017.

- [9] M. Bernardino, L. Rusu y C. G. Soares, “Evaluation of the wave energy resources in the cape verde islands”, *Renew. Energy*, vol. 101, pp. 316-326, 2017.
- [10] G. Mattiazzo, “State of the art and perspectives of wave energy in the mediterranean sea: Backstage of ISWEC”, *Front. Energy Res.*, vol. 7, pp. 114, 2019.
- [11] A. F. Osorio, P. Agudelo, L. Otero, J. Correa y S. Ortega, “Las energías del mar.” propiedadpublica.com. <http://www.propiedadpublica.com.co/las-energias-del-mar/> (acceso Abr. 28, 2023).
- [12] N. Rangel-Buitrago, A. T. Williams y G. Anfuso, “Estructuras duras de protección como principal estrategia de manejo de la erosión costera en la costa caribeña de Colombia. Una crónica de trampas”, *Océano. Costa. Administrar*, vol. 156, pp. 58-75, 2018.
- [13] Y. Octifany y D. Hudalah, “Agglomeration and Extension in Northern Coast of West Java: A Transformation into Mega Region, Proceedings of the Cities 2016,” presentado en la International Conference: Coastal Planning for Sustainable Maritime Development, Sepuluh, Indonesia, Oct. 18, Iop Publishing Ltd., vol. 79, 2017.
- [14] S. Sajith, R. S. Aswani, M. Y. Bhat, Kumar, A. y Dhingra, T. “Can offshore wind energy lead to a sustainable and secure South China Sea?”, *Energy & Environment*, vol. 0, no. 0, pp. 1-18, 2022, [https://www.researchgate.net/profile/Shambhu-Sajith-2/publication/363739764\\_Can\\_offshore\\_wind\\_energy\\_lead\\_to\\_a\\_sustainable\\_and\\_secure\\_South\\_China\\_Sea/links/632c2cdf70cc936cd329a666/Can-offshore-wind-energy-lead-to-a-sustainable-and-secure-South-China-Sea.pdf](https://www.researchgate.net/profile/Shambhu-Sajith-2/publication/363739764_Can_offshore_wind_energy_lead_to_a_sustainable_and_secure_South_China_Sea/links/632c2cdf70cc936cd329a666/Can-offshore-wind-energy-lead-to-a-sustainable-and-secure-South-China-Sea.pdf)
- [15] M. García-Parra, F. de la Barrera, N. Plazas-Leguizamón, Colmenares-Cruz, A., Cancimance, A. y Soler-Fonseca, D. “Los Objetivos de Desarrollo Sostenible en América: Panorama”, *La Granja: Revista de Ciencias de la Vida*, vol. 36, no. 2, pp. 45-59, 2022.

- [16] J. F. Frier y S. Michalak, “From black energy to blue energy.” Analysis n. 5-Climate, Energy and Safety Programme, 2017.
- [17] Departamento Nacional de Planeación [DNP], “Documento CONPES 3990, Colombia Potencia Bioceánica Sostenible 2030”. DNP, Bogotá, 2020.
- [18] R., Alamian, Shafaghat, R., Shadloo, M. S., Bayani, R. y Amouei, A. H. “An empirical evaluation of the sea depth effects for various wave characteristics on the performance of a point absorber wave energy converter”, *Ocean Eng.*, vol. 137, pp. 13–21, 2017.
- [19] M. Melikoglu, “Current status and future of ocean energy sources: A global review”, *Ocean Eng.*, vol. 148, pp. 563–573, 2018.
- [20] J. V. Hernández-Fontes, Felix, A., Mendoza, E., Cueto, Y. R. y Silva, R. “On the marine energy resources of Mexico”, *Journal of Marine Science and Engineering*, vol. 7, no. 6, pp. 191, 2019, <https://doi.org/10.3390/jmse7060191>
- [21] J. Isaacs y R. Seymour, “The ocean as a power resource”, *Int. J. Environ. Stud.*, vol. 4, pp. 201–205, 1973.
- [22] S. A. Sannasiraj y V. Sundar, “Assessment of wave energy potential and its harvesting approach along the Indian coast”, *Renew. Energy*, vol. 99, pp. 398-409, 2016.
- [23] A. M. Cornett, “A global wave energy resource assessment,” presentado en la *Proceedings of the International Offshore and Polar Engineering Conference*, ISOPE-2008-TCP-579, Vancouver, BC, Canada, 6-11; pp. 1-9, 2008.
- [24] G. Mork, Barstow, S., Kabuth, A. y Pontes, M. T. (2010). Assessing the Global Wave Energy Potential. En *Proceedings of the 29th International Conference on Ocean, Offshore and Arctic Engineering*, Shanghai, China, 6-11 Junio; 3, 447-454.
- [25] S. F. Barstow, G. Mørk, Lønseth, L., Schjøllberg, P., Machado, U., Asa, O., Trondheim, N.-; Athanassoulis, G., Belibassakis, K., Gerostathis, T., et al. (2003). *Worldwaves: High*

- Quality Coastal and Offshore Wave Data Within Minutes for Any Global Site. En *Proceedings of the ASME 22nd International Conference on Offshore Mechanics and Arctic Engineering*, Cancun, Mexico, 8–13 Junio; pp. 1-10.
- [26] X. Yang, Haas, K. A., Fritz, H. M., French, S. P., Shi, X., Neary, V. S. y B. Gunawan, “National geodatabase of ocean current power resource in USA”, *Renew. Sustain. Energy Rev.*, vol. 44, pp. 496–507, 2015.
- [27] Meyer, I. y Van Niekerk, J. L. (2016). Towards a practical resource assessment of the extractable energy in the Agulhas ocean current. *International Journal Mar. Energy*, 15, 116–132.
- [28] Marais, E., Chowdhury, S. y Chowdhury, S. P. (2011). Theoretical resource assessment of marine current energy in the Agulhas Current along South Africa’s East coast. *IEEE Power Energy Soc. Gen. Meet.*, 1–8.
- [29] F. Chen, “Kuroshio power plant development plan”, *Renew. Sustain. Energy Rev.*, vol. 14, pp. 2655-2668, 2010.
- [30] Duerr, A. E. S. y Dhanak, M. R. (2012). An assessment of the hydrokinetic energy resource of the Florida current. *IEEE J. Ocean. Eng.*, 37, 281-293.
- [31] Kabir, A., Lemongo-Tchamba, I. y A. Fernandez, “An assessment of available ocean current hydrokinetic energy near the North Carolina shore”, *Renew. Energy*, vol. 80, pp. 301-307, 2015.
- [32] Kim, A. S., Kim, H. J., Lee, H. S. y Cha, S. (2016). Dual-use open cycle ocean thermal energy conversion (OC-OTEC) using multiple condensers for adjustable power generation and seawater desalination. *Renew. Energy*, 85, 344–358.
- [33] VanZwieten, J. H., Rauchenstein, L. T. y Lee, L. (2017). An assessment of Florida’s ocean thermal energy conversion (OTEC) resource. *Renew. Sustain. Energy Rev.*, 75, 683-691.

- [34] K. Rajagopalan y G. C. Nihous, "An Assessment of Global Ocean Thermal Energy Conversion Resources With a High-Resolution Ocean General Circulation Model", *Journal Energy Resour. Technol.*, vol. 135, pp. 041202, 2013.
- [35] IEA Solar Energy Perspectives, "Key World Energy Statistics," International Energy Agency, Paris, France, pp. 17–44, 2013.
- [36] G. C. Nihous, "An Order-of-Magnitude Estimate of Ocean Thermal Energy Conversion Resources", *J. Energy Resour. Technol.*, vol. 127, pp. 328, 2005.
- [37] D. K. Atwood, P. Duncan, Stalcup, M. C. y M. J. Barcelona, "Ocean Thermal Energy Conversion: Resource Assessment and Environmental Impact for Proposed Puerto Rico Site (Report)," Atlantic Oceanographic and Meteorological Laboratory, 1976.
- [38] Nihous, G.C. "Mapping available Ocean Thermal Energy Conversion resources around the main Hawaiian Islands with state-of-the-art tools", *Journal Renew. Sustain. Energy*, vol. 2, no. 1-9, 2010.
- [39] Hammar, L., Ehnberg, J., Mavume, A., Cuamba, B. C. y Molander, S. (2012). Renewable ocean energy in the Western Indian Ocean. *Renew. Sustain. Energy Rev.*, 16, 4938-4950.
- [40] Quirapas, M. A. J. R., Lin, H., Abundo, M. L. S., Brahim, S. y Santos, D. 2015. "Ocean renewable energy in Southeast Asia: A review," *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, Elsevier, 41(C), 799-817.
- [41] García, A., Rodríguez, Y., Silva, R., Mendoza, E. y Vega, L. A. (2018). Determinación del gradiente térmico potencial para el Océano Pacífico Mexicano. *Revista de Ciencias e Ingeniería Marinas*, 6(1), 20.
- [42] Abbasi-Garravand, E., Mulligan, C. N., Laflamme, C. B. y Clairet, G. (2016). Role of two different pretreatment methods in osmotic power (salinity gradient energy) generation. *Renew. Energy*, 96, 98-119.

- [43] A. Emdadi, P. Gikas, Farazaki, M. y Emami, Y. “Salinity gradient energy potential at the hyper saline Urmia Lake - ZarrinehRud River system in Iran”, *Renew. Energy*, vol. 86, pp. 154-162, 2016.
- [44] Alvarez-Silva, O. y Osorio, A. F. (2014). Salinity gradient energy potential in Colombia considering site specific constraints. *Renew. Energy*, 74, 737-748.
- [45] Z. Jia, B. Wang, S. Song y Y. Fan, “Blue energy: Current technologies for sustainable power generation from water salinity gradient”, *Renew. Sustain. Energy Rev.*, vol. 31, pp. 91-100, 2014.
- [46] R. E. Pattle, “Production of Electric Power by mixing Fresh and Salt Water in the Hydro-electric Pile”, *Nature*, vol. 174, 660, 1954.
- [47] J. Kuleszo, C. Kroeze, J. Post y B. M. Fekete, “The potential of blue energy for reducing emissions of CO<sub>2</sub> and non-CO<sub>2</sub> greenhouse gases”, *Journal Integr. Environ. Sci.*, vol. 7, pp. 89-96, 2010.
- [48] R. S. Norman, “Water salination: A source of energy”, *Science*, vol. 186, pp. 350-352, 1974.
- [49] G. L. Wick y W. R. Schmit, “Prospects for renewable energy from sea”, *Mar. Technol. Soc. Journal*, vol. 11, pp. 16–21, 1977.
- [50] R. J. Aaberg, Osmotic Power: A new and powerful renewable energy source? *Refocus*, vol. 4, pp. 48-50, 2003.
- [51] P. Stenzel y H. Wagner, “Osmotic power plants: Potential analysis and site criteria,” presentado en la Proceedings of the 3rd International Conference on Ocean Energy, Bilbao, Spain, 6 Octubre; pp. 1–5, 2010.

- [52] R., Villalobos, C. Chaparro, Latorre, X., Hahn, N., Basoalto, V., Figueroa, R., Contreras, C. y Figueroa, J. “Guía de apoyo docente: La eficiencia energética en la escuela”, vol. 1. Departamento de Educación Ambiental y Participación Ciudadana, 2013.
- [53] F. C. Gobba y N. G. Pazos, “Incidencias económicas del uso de energía solar en construcciones urbanas,” Tesis de grado, Universidad de la República de Uruguay, Universidad, 2010.  
<https://www.colibri.udelar.edu.uy/jspui/bitstream/20.500.12008/297/1/M-CD4173.pdf>
- [54] I. Martínez, “Evaluación del potencial energético asociado a gradiente salino del Río Champotón,” Tesis de Maestría, Universidad Autónoma de Campeche, Campeche, México, 2016.
- [55] Constitución política de Colombia [Const. P.] (1991). Colombia: Legis.
- [56] Ley 1665/13, julio 16, 2013. Diario Oficial [D. O.] 48853. (Colombia).
- [57] Ley 1775/14, mayo 13, 2014. Diario Oficial [D. O.] 49150. (Colombia).
- [58] Decreto 1623/15, agosto 11, 2015. Presidencia de la República. (Colombia).
- [59] Decreto 2143/15, noviembre 4, 2015. Presidencia de la República. (Colombia).
- [60] Decreto 1543/17, septiembre 16, 2017. Presidencia de la República. (Colombia).
- [61] Resolución 0281/15, junio 5, 2015. Unidad de Planeación Minero Energética. (Colombia).
- [62] Resolución 1283/16, agosto 3, 2016. Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible. (Colombia).
- [63] Ley 2099/21, julio 10, 2021. Diario Oficial [D. O.] 51731. (Colombia).
- [64] R. Hernández-Sampieri, C. Fernández y P. Baptista, “Metodología de la Investigación”, 6ta Ed. Mc Graw Hill, México, 2014.

- [65] R. R. Torres y C. A. Andrade, "Potencial en Colombia para el aprovechamiento de la energía no convencional de los océanos", *Boletín Científico CIOH*, no. 24, pp. 11-25, 2016.
- [66] J. M. Polo, J. Rodríguez, y A. Sarmiento, "Potencial de generación de energía a lo largo de la costa colombiana mediante el uso de corrientes inducidas por mareas," *Rev. Ing.*, vol. 28, pp. 99-105, 2008.
- [67] L. A. Gómez y W. Y. Burgos, "Actualización del inventario de posibilidades de generación de energía mareomotriz en Colombia," Tesis de Grado, Universidad de La Salle, 2008.  
[En línea]. Disponible en:  
[https://ciencia.lasalle.edu.co/cgi/viewcontent.cgi?article=1068&context=ing\\_electrica](https://ciencia.lasalle.edu.co/cgi/viewcontent.cgi?article=1068&context=ing_electrica)
- [68] P. Stenzel y H.-J. Wagne, "Osmotic power plants: Potential analysis and site criteria", 3ra International Conference on Ocean Energy, 6 October, Bilbao, 2010.
- [69] M. M. Aguilera, "El Canal del Dique y su subregión: una economía basada en la riqueza hídrica," *Documentos de Trabajo Sobre Economía Regional y Urbana*, no. 72, 2006.
- [70] Falcão, A.F.d.O. Wave energy utilization: A review of the technologies. *Renew. Sustain. Energy Rev.* 2010, 14, 899–918.
- [71] Wang, L.; Isberg, J.; Tedeschi, E. Review of control strategies for wave energy conversion systems and their validation: The wave-to-wire approach. *Renew. Sustain. Energy Rev.* 2018, 81, 366–379.
- [72] Curto, D.; Franzitta, V.; Trapanese, M. Designing an innovative system for sea wave utilization. In Proceedings of the OCEANS 2018 MTS/IEEE Charleston, Charleston, SC, USA, 22–25 October 2018; pp. 1–6.
- [73] Zhao, X.L.; Ning, D.Z.; Zou, Q.P.; Qiao, D.S.; Cai, S.Q. Hybrid floating breakwater-WEC system: A review. *Ocean Eng.* **2019**, 186, 106126.

- [74] Aderinto, T.; Li, H. Ocean Wave energy converters: Status and challenges. *Energies* **2018**, *11*, 1250.
- [75] Cascajo, R.; García, E.; Quiles, E.; Correcher, A.; Morant, F. Integration of marine wave energy converters into seaports: A case study in the port of Valencia. *Energies* **2019**, *12*, 787.
- [76] Korea Institute of Ocean Science and Technology KIOST. Yongsoo OWC. Disponible en: [https://openei.org/wiki/PRIMRE/Databases/Technology\\_Database/Devices/Yongsoo\\_OWC](https://openei.org/wiki/PRIMRE/Databases/Technology_Database/Devices/Yongsoo_OWC) (acceso en marzo 2024).
- [77] Vicinanza, D.; Margheritini, L.; Kofoed, J.P.; Buccino, M. The SSG Wave Energy Converter: Performance, Status and Recent Developments. *Energies* **2012**, *5*, 193–226.
- [78] Yemm, R.; Pizer, D.; Retzler, C.; Henderson, R. Pelamis: Experience from concept to connection. *Philos. Trans. R. Soc. A Math. Phys. Eng. Sci.* **2012**, *370*, 365–380.
- [79] Poullikkas, A. Technology Prospects of Wave Power Systems. *Electron. J. Energy Environ.* **2014**, *2*, 47–69.
- [80] Leijon, M.; Boström, C.; Danielsson, O.; Gustafsson, S.; Haikonen, K.; Langhamer, O.; Strömstedt, E.; Stålberg, M.; Sundberg, J.; Svensson, O.; et al. Wave energy from the North Sea: Experiences from the lysekil research site. *Surv. Geophys.* **2008**, *29*, 221–240.
- [81] Tarrant, K.; Meskell, C. Investigation on parametrically excited motions of point absorbers in regular waves. *Ocean Eng.* **2016**, *111*, 67–81.
- [82] Frangoul, A. In Scotland, Wave Energy Device Reaches Critical Milestone, Gears up for Testing. *CNBC*. Disponible en: <https://www.cnbc.com/2021/06/25/wave-energy-device-reaches-critical-milestone-gears-up-for-testing-.html> (acceso en marzo 2024).

- [83] Blackledge, J.; Coyle, E.; Kearney, D.; McGuirk, R.; Norton, B. Estimation of wave energy from wind velocity. *Eng. Lett.* **2013**, *21*, 158–170
- [84] Falnes, J. A review of wave-energy extraction. *Mar. Struct.* **2007**, *20*, 185–201.
- [85] Salter's Nodding Duck. Disponible en: <https://baonguyen1994.wordpress.com/introduction-to-wave-energy/ocean-wave-technologies/terminators/salters-nodding-duck/> (acceso en marzo 2024).
- [86] Evans, P. Oyster Ocean Power System to Provide 1 GW by 2020. Disponible en: <https://newatlas.com/oyster-ocean-power-system/11180/> (acceso en marzo 2024).
- [87] Poenaru, V.; Scurtu, I.C.; Dumitrache, C.L.; Popa, A. Review of wave energy harvesters. *J. Phys. Conf. Ser.* **2019**, *1297*, 012028.
- [88] EMEC. AQUAMARINE POWER. Disponible en: <http://www.emec.org.uk/about-us/wave-clients/aquamarine-power/> (acceso en marzo 2024).
- [89] Energy Innovation Cluster. WAVESTAR. Disponible en: <https://wavepartnership.dk/wavestar-0> (acceso en marzo 2024).
- [90] Jordan Wavestar-002. Disponible en: <https://www.neozone.org/ecologie-planete/wavestar-la-centrale-electrique-qui-utilise-la-houle-pour-produire-de-lenergie/attachment/wavestar-002/> (acceso en marzo 2024).
- [91] Ecthelion. Norwave Wave Power Plant. Disponible en: <https://sketchfab.com/3d-models/norwave-wave-power-plant-482851fc4c8041d99d456289c01dc764> (acceso en marzo 2024).
- [92] WTS Energy. Tidal Energy. Disponible en: <https://www.wtsenergy.com/glossary/tidal-energy/> (acceso en marzo 2024).
- [93] Ng, K.-W.; Lam, W.-H.; Ng, K.-C. 2002–2012: 10 Years of Research Progress in Horizontal-Axis Marine Current Turbines. *Energies* **2013**, *6*, 1497–1526

- [94] Xie, T.; Wang, T.; He, Q.; Diallo, D.; Claramunt, C. A Review of Current Issues of Marine Current Turbine Blade Fault Detection. *Ocean Eng.* **2020**, *218*, 108194.
- [95] Apelfröjd, S.; Ekström, R.; Thomas, K.; Leijon, M. A Back-to-Back 2L-3L Grid Integration of a Marine Current Energy Converter. *Energies* **2015**, *8*, 808–820.
- [96] Shirasawa, K.; Minami, J.; Shintake, T. Scale-Model Experiments for the Surface Wave Influence on a Submerged Floating Ocean-Current Turbine. *Energies* **2017**, *10*, 702.
- [97] Kim, I.; Wata, J.; Tongphong, W.; Yoon, J.-S.; Lee, Y.-H. Magnetic Coupling for a 10 KW Tidal Current Turbine: Design and Small Scale Experiments. *Energies* **2020**, *13*, 5725.
- [98] Liu, H.; Zhou, H.; Lin, Y.; Li, W.; Gu, H. Design and Test of 1/5th Scale Horizontal Axis Tidal Current Turbine. *China Ocean Eng.* **2016**, *30*, 407–420.
- [99] Luo, X.-Q.; Zhu, G.-J.; Feng, J.-J. Multi-point design optimization of hydrofoil for marine current turbine. *J. Hydrodyn. Ser. B* **2014**, *26*, 807–817.
- [100] Molland, A.F.; Bahaj, A.S.; Chaplin, J.R.; Batten, W.M.J. Measurements and Predictions of Forces, Pressures and Cavitation on 2-D Sections Suitable for Marine Current Turbines. *Proc. Inst. Mech. Eng. Part M J. Eng. Marit. Environ.* **2004**, *218*, 127–138.
- [101] Ram, K.R.; Lal, S.P.; Ahmed, M.R. Design and Optimization of Airfoils and a 20 KW Wind Turbine Using Multi-Objective Genetic Algorithm and HARP\_Opt Code. *Renew. Energy* **2019**, *144*, 56–67.
- [102] Forslund, J.; Lundin, S.; Thomas, K.; Leijon, M. Experimental Results of a DC Bus Voltage Level Control for a Load-Controlled Marine Current Energy Converter. *Energies* **2015**, *8*, 4572–4586.
- [103] Borkowski, D.; Majdak, M. Small Hydropower Plants with Variable Speed Operation—An Optimal Operation Curve Determination. *Energies* **2020**, *13*, 6230.

- [104] A. Devis-Morales, R. A. Montoya-Sánchez, A. F. Osorio y L. J. Otero-Díaz, "Ocean thermal energy resources in Colombia," *Renewable Energy*, vol. 66, pp. 759-769, 2014, <https://doi.org/10.1016/j.renene.2014.01.010>.
- [105] L.A. Vega. "Ocean thermal energy conversion primer," *Mar Technol Soc J*, vol. 36, no. 4, 2002, pp. 25-35, <https://doi.org/10.4031/002533202787908626>.
- [106] NOAA, "Ocean Thermal Energy Conversion (OTEC) Technology," Disponible en: <https://coast.noaa.gov/data/czm/media/technicalfactsheet.pdf> (acceso en marzo 2024).
- [107] Climate Technology Centre and Network, "Poder osmótico", Disponible en: <https://www.ctc-n.org/technologies/salinity-gradient-electricity-generation-ocean-energy> (acceso en marzo 2024).
- [108] Unidad de Planeación Minero Energética (UPEM), "Plan Energético Nacional 2020-2050," UPEM. Disponible en: [https://www1.upme.gov.co/DemandaEnergetica/PEN\\_documento\\_para\\_consulta.pdf](https://www1.upme.gov.co/DemandaEnergetica/PEN_documento_para_consulta.pdf) (acceso en marzo 2024).