

UNIVERSIDAD DEL VALLE DE GUATEMALA

Facultad de Ingeniería



Estudio de factibilidad para la aplicación de tecnología undimotriz en la
cuenca del Río Motagua

Trabajo de graduación presentado por José Gerardo Revolorio Guzmán para
optar por el grado académico de Licenciado en Ingeniería Civil

Guatemala,

2025

UNIVERSIDAD DEL VALLE DE GUATEMALA

Facultad de Ingeniería



Estudio de factibilidad para la aplicación de tecnología undimotriz en la
cuenca del Río Motagua

Trabajo de graduación presentado por José Gerardo Revolorio Guzmán para
optar por el grado académico de Licenciado en Ingeniería Civil

Guatemala,

2025

Vo.Bo.:



(f)

Ing. Jorge Carlos Escobar Polanco

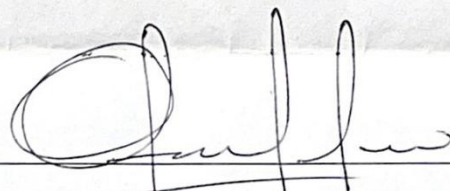
Tribunal Examinador:



(f)

Ing. Jorge Carlos Escobar Polanco

(f)



Ing. Otoniel Alejandro Echeverría Castellanos

(f)



Ing. Héctor Francisco Espinoza García

Fecha de aprobación: Guatemala, 20 de febrero de 2025

ÍNDICE

RESUMEN.....	vi
ABSTRACT.....	vii
I. INTRODUCCIÓN.....	1
II. JUSTIFICACIÓN.....	3
III. IMPORTANCIA.....	5
IV. OBJETIVOS	6
A. OBJETIVO GENERAL.....	6
B. OBJETIVOS ESPECÍFICOS	6
V. MARCO TEÓRICO.....	7
A. GENERACIÓN DE ENERGÍA	7
1. ENERGÍA NO RENOVABLE.....	7
2. ENERGÍA RENOVABLE	9
B. HISTORIA DE LA ENERGÍA UNDIMOTRIZ	11
1. PRIMEROS CONCEPTOS Y PROTOTIPOS	11
2. PROYECTOS DE ENERGÍA UNDIMOTRIZ.....	13
C. CASOS DE ÉXITO UNDIMOTRICES	15
1. <i>PELAMIS</i>	15
2. <i>POWERBUOY</i>	18
3. <i>AQUABUOY</i>	21
4. <i>WAVEROLLER</i>	23
5. <i>WAVE DRAGON</i>	26
6. <i>OYSTER</i>	28
A. COMPARATIVA DE LOS DISTINTOS GENERADORES UNDIMOTRICES	29
B. VENTAJAS DE LA ENERGÍA UNDIMOTRIZ.....	32
C. DESVENTAJAS DE LA ENERGÍA UNDIMOTRIZ.....	34
D. POTENCIAL ENERGÍA UNDIMOTRIZ.....	37
E. CONCEPTOS FÍSICOS.....	41
F. CONDICIONES DEL MAR	42
G. UBICACIONES CON POTENCIAL UNDIMOTRIZ.....	44
H. ASPECTOS ECONÓMICOS	46
D. DISPOSITIVOS UNDIMOTRICES.....	47
1. COMPONENTES DE UN GENERADOR UNDIMOTRIZ.....	48
2. SUBCOMPONENTES DE UN GENERADOR UNDIMOTRIZ.....	50
3. DIRECCIÓN DEL OLEAJE DE LOS DISPOSITIVOS	51
4. TECNOLOGÍAS DE GENERACIÓN UNDIMOTRIZ	53

5.	LOCALIZACIÓN DE LOS DISPOSITIVOS	56
E.	MARCO LEGAL.....	58
VI.	METODOLOGÍA.....	59
VII.	RESULTADOS.....	62
IX.	DISCUSIÓN DE RESULTADOS.....	75
X.	CONCLUSIONES.....	79
XI.	RECOMENDACIONES	80
XII.	BIBLIOGRAFÍA	81
XIII.	ANEXOS	86

LISTA DE TABLAS

Tabla 1: Proyectos undimotrices a lo largo de la historia	14
Tabla 2: Datos técnico dispositivo PELAMIS	15
Tabla 3: Datos técnicos dispositivo POWERBUOY	18
Tabla 4: Datos técnicos dispositivo POWERBUOY	21
Tabla 5: Datos técnicos dispositivo WAVEROLLER.....	23
Tabla 6: Datos técnicos dispositivo WAVEDRAGON	26
Tabla 7: Datos técnicos dispositivo WAVEROLLER.....	28
Tabla 8: Comparativa de generadores undimotrices.....	30
Tabla 9: Políticas relacionadas a energía renovables en Guatemala.....	58
Tabla 10: Regiones fisiográficas en la cuenca del río Motagua	63
Tabla 11: Zonas de vida dentro de la cuenca del río Motagua.....	64
Tabla 12: Rangos de precipitación anual en zonas de la cuenca	64
Tabla 13: Departamento dentro de la cuenca del río Motagua parcial o totalmente	64
Tabla 14: Caudales máximos y mínimos al año de la cuenca del río Motagua	65

LISTA DE FIGURA

Figura 1: Consumo mundial de combustibles fósiles en 2022	7
Figura 2: Esquema de funcionamiento molinos de marea.....	11
Figura 3: Dispositivo "Pato de Salter"	12
Figura 4: Dispositivo PELAMIS (Proyecto en Escocia).....	16
Figura 5: Matriz de potencia dispositivo PELAMIS.....	18
Figura 6: Matriz de potencia OPT Powerbuoy	19
Figura 7: Partes de Boya Powerbuoy	20
Figura 8: Esquema de dispositivo Powerbuoy	22
Figura 9: Matriz de potencia Aquabuoy	23
Figura 10: Matriz de potencia WEVEROLLER.....	25
Figura 11: Representación de dispositivo WaveRoller sumergido	26
Figura 12: Representación y partes de dispositivo WaveRoller	27
Figura 13: Matriz de potencia WAVEDRAGON	27
Figura 14: Dispositivo OYSTER 2	28
Figura 15: Matriz de potencia OYSTER.....	29
Figura 16: Comparación de generadores undimotrices según altura de ola, período y potencia generada.....	29
Figura 17: Áreas de operación de distintos generadores undimotrices	30
Figura 18: Detalle del potencial mundial de la energía producida por las olas.....	40
Figura 19: Esquema de movimiento de una ola	41
Figura 20: Dispositivo finalizador (flotante asimétrico)	52
Figura 21: Dispositivo puntuales (captador en Langosteira, Coruña).....	53
Figura 22: Esquema de funcionamiento de columna oscilante	54
Figura 23: Esquema de funcionamiento de dispositivo de desbordamiento	55
Figura 24: Dispositivo oscilante (Power Buoy)	56
Figura 25: Representación gráfica de la localización de los diferentes tipos de dispositivos	57
Figura 26: Mapa de caudal específico medio anual	66
Figura 27: Mapa de caudal específico en año húmedo.....	67
Figura 28: Mapa de caudal específico en año seco	68
Figura 29: Mapa de amenazas por inundaciones.....	69
Figura 30: Mapa de pendientes río Motagua.....	96
Figura 31: Mapa de corrientes río Motagua	96
Figura 32: Mapa de flujo río Motagua	97
Figura 33: Mapa de microcuencas río Motagua.....	98

LISTADO DE ABREVIATURAS

Abreviatura	Significado
IRENA	International Renewable Energy Agency (Agencia Internacional de Energías Renovables)
OPT	Ocean Power Technologies
OTEC	Ocean Thermal Energy Conversion (Conversión de Energía Térmica Oceánica)
OWC	Oscillating Water Column (Columna de Agua Oscilante)
PCF	Power Connector Frame
PCU	Power Capture Unit
SCADA	Supervisory Control and Data Acquisition (Control de Supervisión y Adquisición de Datos)
WEC	Wave Energy Converter (Convertidor de Energía de Olas)

RESUMEN

Este proyecto tiene como objetivo investigar la viabilidad de implementar tecnología undimotriz en la cuenca del río Motagua. Para ello, se realizó un análisis exhaustivo de distintos sistemas que aprovechan el movimiento de las olas y corrientes para generar energía, con el propósito de identificar las soluciones más adecuadas para las condiciones específicas de la región. La investigación abarca componentes técnicos como el diseño de los sistemas, su funcionamiento, eficiencia energética, localización óptima, y requisitos de mantenimiento.

Una vez seleccionados los dispositivos más apropiados para la zona de estudio, se profundizó en aspectos como la logística de instalación, materiales, transporte, y su comportamiento en función de las condiciones locales. También se evaluaron los factores económicos y legales relacionados con la implementación de estas tecnologías.

En la segunda fase, se procedió a describir y clasificar los dispositivos seleccionados según su ubicación, modo de operación, sistema interno y capacidad de generación de potencia en función de las características del oleaje. Se calcularon los costos promedio por unidad energética, producción eléctrica estimada, impacto ambiental, y costos de implementación.

Finalmente, se llevó a cabo un análisis detallado de la zona de instalación, considerando parámetros como altura de las olas, periodo y probabilidad de ocurrencia de distintos estados del oleaje en la cuenca del río Motagua. Estos factores se emplearon para evaluar la potencia de los dispositivos bajo diferentes condiciones, permitiendo una comparación técnica y económica que conduzca a la selección del sistema más adecuado para la región. Los criterios de comparación para la selección de los dispositivos a instalar incluyen: potencia instalada, costo energético, impacto ambiental, y viabilidad económica, con el fin de determinar la tecnología más apta para su implementación.

ABSTRACT

This project aims to investigate the feasibility of implementing wave energy technology in the Motagua River basin. To do so, a thorough analysis was conducted on different systems that harness the movement of waves and currents to generate energy, with the goal of identifying the most suitable solutions for the region's specific conditions. The research covers technical components such as system design, functionality, energy efficiency, optimal location, and maintenance requirements.

Once the most appropriate devices for the study area were selected, the focus shifted to aspects such as installation logistics, materials, transportation, and their performance based on local conditions. Economic and legal factors related to the implementation of these technologies were also evaluated.

In the second phase, the selected devices were described and classified based on their location, mode of operation, internal system, and power generation capacity in relation to the characteristics of the waves. Average costs per energy unit, estimated electrical production, environmental impact, and implementation costs were calculated.

Finally, a detailed analysis of the installation area was carried out, considering parameters such as wave height, period, and the likelihood of different wave states occurring in the Motagua River basin. These factors were used to evaluate the devices' power under varying conditions, allowing for a technical and economic comparison that would lead to the selection of the most suitable system for the region. The comparison criteria for selecting the devices to be installed include installed power, energy cost, environmental impact, and economic feasibility, to determine the most appropriate technology for implementation.

I. INTRODUCCIÓN

Las energías renovables son aquellas que se obtienen de fuentes naturales virtualmente inagotables, debido a la enorme cantidad de energía que contienen o por su capacidad de regenerarse de forma natural. Las principales fuentes de energías renovables que se utilizan en la actualidad son la solar, eólica, hidroeléctrica, geotérmica, biomasa y marina. En 2023, se agregaron aproximadamente 473 gigavatios (GW) de nueva capacidad de generación de electricidad renovable en todo el mundo, lo que llevó la capacidad total instalada a 3.865 GW, representando un crecimiento del 14% respecto a 2022 y marcando la mayor adición anual hasta ahora. La energía solar fotovoltaica tuvo un aumento récord de 347 GW, elevando su capacidad acumulada a 1.411 GW, superando al sector hidroeléctrico, cuya expansión fue más moderada con 1.265 GW. La energía eólica ocupó el tercer lugar, alcanzando 1.017 GW totales, con 115 GW añadidos en 2023. Otras tecnologías renovables, como la bioenergía, contribuyeron con una porción menor, sumando 149 GW en total. (IRENA, 2024)

Países como Noruega, Suecia, Dinamarca, Brasil y Nueva Zelanda poseen un 40% o más de su consumo energético proveniente de fuentes renovables. Guatemala posee un potencial renovable inmenso, se estima que se tiene alrededor de 9,000 MW de energía por medio del agua, vapor de tierra, viento, sol y biomasa, de esto únicamente se está utilizando un 23%.

La generación de electricidad a través de fuentes renovables ofrece grandes beneficios al ambiente y economía, disminuyendo el costo de la electricidad a largo plazo, lo que brinda estabilidad en la tarifa de consumo final de los usuarios. En Guatemala la energía hidroeléctrica es la más abundante debido a la cantidad de ríos y una orografía privilegiada para pequeñas y medianas centrales hidroeléctricas y por esto que existen alrededor de 70 hidroeléctricas operando, según la Asociación de Generadores con Energía Renovable (AGER), durante el año 2023 se generó 44.9% de la energía producida en el país a través de este recurso.

Gracias a la gran cantidad de ríos en el país y la orografía privilegiada del país, la aplicación de una nueva fuente de energía renovable como lo es la undimotriz, puede tener un gran impacto positivo principalmente dentro de la cuenca del Río Motagua como una fuente de electricidad para las poblaciones que se encuentran a su alrededor.

Esta tesis investiga las posibilidades de aprovechar la energía undimotriz dentro del río Motagua mediante un análisis detallado de las diferentes tecnologías para la captura de este recurso. Se estudian los desafíos geográficos, económicos y ambientales para la implementación de los sistemas de este tipo de energía y se evalúan las tecnologías más prometedoras en el contexto guatemalteco. Por medio de estudios de casos y análisis comparativos, se determinan los equipos adecuados para las condiciones locales, considerado factores como tipos de suelo, fisiografía, temperatura, precipitación, caudal y consumos energéticos de la región.

Los resultados ofrecen recomendaciones prácticas para el desarrollo de futuros proyectos de energía undimotriz en el país, contribuyendo al avance de las fuentes renovables y proporcionando una base para nuevas investigaciones en el ámbito de la energía marítima.

II. JUSTIFICACIÓN

Guatemala, al igual que otros países, enfrenta desafíos significativos en cuanto a la seguridad energética, la diversificación de fuentes de energía, su generación y distribución en todo el país. Las comunidades que aún no tienen acceso a energía eléctrica en el país satisfacen sus necesidades básicas utilizando leña como su principal fuente de energía. La iluminación en estos hogares se resuelve con velas y queroseno. Las necesidades básicas se cubren principalmente con leña, usada tanto para cocinar (70.39%) como para calefacción (27.51%). Estas viviendas, que suman 272,139, consumen anualmente unas 2,617 toneladas métricas de leña, preferentemente encino y pino. La dependencia de la leña como fuente de energía en el sector residencial trae consigo impactos negativos, como problemas de salud derivados del humo, la falta de protección ambiental y la baja eficiencia de las tecnologías utilizadas para su quema. (Política Nacional, 2019)

Actualmente, existen diversas alternativas para la generación de energía eléctrica. En la matriz energética de Guatemala, la energía hidroeléctrica es la principal fuente, generando 21,722 MWh, lo que representa el 55.65% de la energía del país. Otras fuentes incluyen la energía geotérmica, que aporta 748 MWh (1.92%), y la energía solar, que produce 451 MWh, equivalente al 1.96% del total. En 2024, según la CNEE, se generaron 22,952 MWh a partir de recursos renovables, lo que equivale al 58.80% de la energía eléctrica total del país. Energías emergentes e innovadoras, como la undimotriz, tienen el potencial de contribuir significativamente a esta matriz energética en el futuro.

La energía undimotriz es una fuente de energía renovable con bajo impacto ambiental comparado con otros métodos. Su proceso de generación no requiere combustión ni explosión, lo que la convierte en una opción ambientalmente segura. Esta forma de energía aprovecha el movimiento de las olas del mar, que al ser más densas que el aire, almacenan una mayor cantidad de energía. Esto le confiere un alto potencial energético. Además, la energía undimotriz ofrece una excelente relación entre el espacio utilizado y el rendimiento obtenido. Con una superficie marina de poco más de 2 kilómetros cuadrados, es posible generar suficiente electricidad para abastecer a una población de hasta 20,000 hogares. Además, la implementación exitosa de proyectos en este campo puede generar empleos y oportunidades económicas, impulsando el desarrollo local y regional.

A pesar de tener extensas costas colindantes al océano Pacífico y en el mar Caribe, Guatemala no ha explorado completamente el potencial que posee esta fuente de energía. La implementación de tecnología undimotriz en un lugar como lo es en la cuenca del Río Motagua podría representar un importante avance para las poblaciones aledañas. El acceso a la electricidad es fundamental para mejorar la calidad de vida, impulsar el desarrollo económico, facilitar el acceso a tecnologías de información y comunicación, mejorar la salud pública y aumentar la seguridad en la región.

Esta investigación no solo beneficiará a Guatemala a nivel nacional, sino que puede contribuir con el conocimiento sobre tecnologías undimotrices globalmente. El producto obtenido puede ser referencia para otros países con características geográficas similares, ampliando la comprensión internacional de esta fuente de energía. Además, los resultados podrían servir como base para la formulación de nuevas políticas relacionadas con la energía renovable en Guatemala y este tipo de información puede tener gran importancia para la toma de decisiones respecto a proyectos de esta índole.

III. IMPORTANCIA

Investigar este tema es crucial para explorar nuevas fuentes de energía renovable, lo que puede reducir la dependencia de los combustibles fósiles y diversificar la matriz energética de Guatemala. Además, impulsa la sostenibilidad ambiental al buscar una fuente de energía limpia y libre de emisiones contaminantes, contribuyendo así a reducir la huella de carbono y mitigar los efectos del cambio climático. Este estudio también proporciona una base técnica y económica para evaluar la viabilidad de la energía undimotriz en la región, teniendo en cuenta factores como la instalación, el mantenimiento, los costos asociados y el impacto ambiental. Asimismo, abre la puerta a la introducción de tecnologías emergentes que mejoren la eficiencia energética y permitan desarrollar un sistema energético capaz de coexistir con planes de adaptación en zonas costeras afectadas por el cambio climático.

Adicionalmente, el estudio ofrece datos valiosos para la toma de decisiones en materia de políticas energéticas, ambientales y de planificación territorial. Las empresas dedicadas a la generación de energía pueden utilizar los resultados para diversificar sus fuentes energéticas y realizar inversiones estratégicas en tecnologías renovables. Además, las comunidades locales se verán beneficiadas a largo plazo con el acceso a energía más limpia, proyectos de desarrollo económico y la creación de empleos relacionados con la instalación y mantenimiento de dispositivos undimotrices. Finalmente, tanto organizaciones ambientales nacionales como internacionales podrán aprovechar los resultados para promover iniciativas de protección ambiental, fomentar el uso de esta tecnología y fortalecer la lucha contra el cambio climático.

IV. OBJETIVOS

A. Objetivo general

Evaluar la viabilidad técnica, económica y ambiental de la implementación de tecnología undimotriz en la cuenca del río Motagua, con el propósito de proponer un modelo sostenible y eficiente para la generación de energía renovable, contribuyendo así al desarrollo sostenible de la región y mitigando los impactos ambientales.

B. Objetivos específicos

1. Analizar el desempeño energético de los dispositivos undimotrices más viables para la cuenca del río Motagua, evaluando su eficiencia en función de las condiciones locales y proporcionando información clave para la toma de decisiones en el sector energético de Guatemala.
2. Determinar el potencial undimotriz en la cuenca del río Motagua mediante estudios detallados de las condiciones oceanográficas y características geográficas de la zona.
3. Realizar un análisis técnico de la factibilidad, considerando aspectos como la capacidad de generación, la eficiencia de conversión de energía y la durabilidad de los dispositivos undimotrices.

V. MARCO TEÓRICO

A. Generación de energía

La energía eléctrica se ha generado a nivel mundial en un 28 por ciento a partir de energía renovable según un estudio realizado por Enerdata en 2020 y el 72 por ciento proviene de fuentes que son de energía no renovables, por lo que nos da un indicio que no se tiene un buen ritmo evolutivo en los sistemas energéticos.

El principal problema de las fuentes de energía no renovable son los altos niveles de contaminación que provocan un cambio climático. Según la OMS, 8 millones de personas mueren cada año a causa de la contaminación que se encuentra en el aire y gran parte de la población se encuentra en lugares con una baja calidad de este. (Santander, 2022)

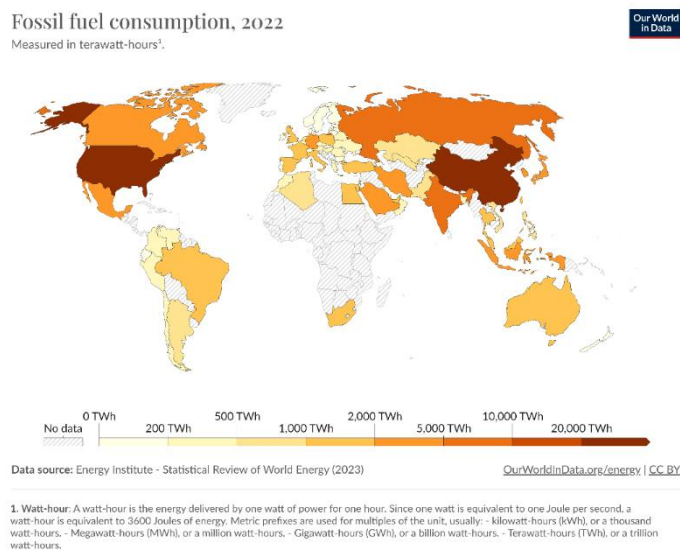


Figura 1: Consumo mundial de combustibles fósiles en 2022

Nota. Adaptado de OurWorldData (2022).

1. Energía no renovable

Las energías no renovables aprovechan los recursos naturales susceptibles de agotarse, lo cual constituye la diferencia fundamental con las energías renovables. Durante su explotación y utilización, estos recursos pueden extinguirse o necesitar un largo período para regenerarse, lo que las convierte en fuentes energéticas más vulnerables. (BBVA, 2023) En términos de clasificación, se distinguen:

Combustibles fósiles

Durante millones de años, los combustibles fósiles son el resultado de la transformación de materia orgánica muerta, la cual ha experimentado calor y presión bajo la tierra. Los residuos de plantas y animales se han convertido en considerables reservas de estos combustibles, que pueden encontrarse en formas líquidas, sólidas o gaseosas y son extraídos de la corteza terrestre a través de métodos de perforación o minería. Su alta densidad energética, es decir, la gran cantidad de energía que contienen por unidad de masa los ha posicionado como elementos fundamentales en la economía desde la Revolución Industrial.

Esta fuente no es renovable, puesto que tarda millones de años en generarse y no es sostenible desde el punto de vista medioambiental. En 2021, la cantidad de energía derivada de combustibles fósiles consumida a nivel mundial fue de 136,000 teravatios-hora, según información recopilada por la Universidad de Oxford, mediante el BP Statistical Review of World Energy. Los países con mayor consumo per cápita son Estados Unidos, Australia, Alemania y China, si bien no todos ellos utilizan el mismo tipo de combustible de manera uniforme. (BBVA, 2023)

- *Petróleo*

Es el combustible fósil más prevalente y desempeña un papel crucial en el transporte, ya que se utiliza en la producción de gasolina y diésel. En el año 2021, se utilizaron 51,200 teravatios-hora de energía generada a partir del petróleo. Aunque Estados Unidos lidera en el consumo de petróleo, su uso está ampliamente distribuido entre todas las economías desarrolladas a nivel mundial. (BBVA, 2023)

- *Carbón*

El carbón fue el primer recurso fósil en ser extraído y utilizado. Antes de 1900, el gas y el petróleo no tenían aplicaciones significativas. Hoy en día, todavía se consume una cantidad considerable de energía, 44,500 teravatios-hora, generada a partir del carbón. La mitad de este consumo se concentra en China. Los principales tipos de carbón incluyen turba, lignito, hulla y antracita. (BBVA, 2023)

- *Gas natural*

Las reservas de gas están estrechamente asociadas con las de petróleo y consisten principalmente en metano. Después de ser tratado, el gas se emplea principalmente para calefacción, cocina y aplicaciones industriales. En el año 2021, se utilizaron 40,400 teravatios-hora de gas en todo el mundo, siendo Estados Unidos y Rusia los principales consumidores. (BBVA, 2023)

Energía nuclear

Las centrales nucleares generan energía mediante la fisión de ciertos elementos químicos radiactivos. Aunque se están desarrollando nuevas tecnologías, en la actualidad la mayoría del combustible nuclear proviene de la extracción y procesamiento de mineral de uranio, un elemento radiactivo natural que se encuentra en la Tierra y del cual existen reservas limitadas, lo que la convierte en una fuente de energía no renovable. Según la Agencia Internacional de la Energía (AIE), 32 países tienen centrales nucleares en funcionamiento, y este tipo de energía proporciona aproximadamente el 10 % de toda la electricidad consumida a nivel mundial. (BBVA, 2023)

2. Energía renovable

Conocidas también como energías limpias, las energías renovables destacan por su significativa contribución al cuidado del medio ambiente y al progreso tecnológico. Estas fuentes se basan en la utilización de recursos naturales inagotables, como la radiación solar, el viento, y el agua, entre otros, para la obtención de energía. (BBVA, 2023) Entre las diversas fuentes de energía renovable se incluyen:

- *Eólica*

La energía eólica se basa en aprovechar la energía cinética del viento mediante la instalación de turbinas eólicas en tierra firme, en alta mar o sobre cuerpos de agua dulce. Aunque el uso de la energía eólica tiene una larga historia que se remonta a milenios atrás, las tecnologías terrestres y marítimas han experimentado avances significativos en las últimas décadas, lo que ha permitido convertirla en una fuente boyante de generación eléctrica. Estos avances incluyen turbinas más altas y rotores con diámetros más grandes. (Naciones Unidas, 2024)

- *Hidráulica*

La energía hidroeléctrica aprovecha la energía generada por el movimiento del agua al subir o bajar de manera abrupta, y puede ser generada a partir de embalses y ríos. Las plantas hidroeléctricas en embalses utilizan el agua almacenada, mientras que las plantas fluviales aprovechan la energía del flujo del agua en un río. Los embalses hidroeléctricos tienen diversas aplicaciones, incluyendo la producción de agua potable, riego, control de inundaciones y sequías, navegación, además de la generación de energía eléctrica.

Actualmente, la energía hidroeléctrica es la principal fuente de energía renovable en el sector eléctrico. Dependiendo de patrones de lluvias generalmente estables, puede ser afectada negativamente por sequías relacionadas con el cambio climático o cambios en los ecosistemas que alteren los patrones de precipitación. (Naciones Unidas, 2024)

- *Geotérmica*

La energía geotérmica aprovecha el calor térmico presente en el interior de la Tierra, el cual se extrae de depósitos geotérmicos mediante pozos u otros métodos. Estos se dividen en dos categorías: los depósitos hidrotermales, que son naturalmente permeables y poseen temperaturas elevadas, y los sistemas geotérmicos mejorados, que cuentan con suficiente calor, pero requieren de estímulos hidráulicos.

Una vez en la superficie, los fluidos a diferentes temperaturas pueden ser utilizados para generar electricidad. Esta tecnología, que implica la generación de electricidad a partir de depósitos geotérmicos, ha alcanzado un nivel de madurez y fiabilidad considerable, y ha sido utilizada durante más de un siglo. (Naciones Unidas, 2024)

- *Solar*

Esta forma de energía renovable implica utilizar la radiación electromagnética del sol mediante dispositivos como células fotovoltaicas, colectores solares o heliostatos. La energía solar puede ser de dos tipos: fotovoltaica o térmica. La diferencia radica en que la energía solar fotovoltaica convierte directamente la radiación solar en electricidad, mientras que la térmica utiliza la energía solar para generar calor.

Las tecnologías solares tienen la capacidad de generar calor, refrigeración, iluminación natural, electricidad y también combustibles para una variedad de aplicaciones. En la última década, el costo de fabricación de los paneles solares ha experimentado una drástica reducción, lo que los hace no solo asequibles, sino frecuentemente la opción más económica para la generación de electricidad. Los paneles solares suelen tener una vida útil de alrededor de 30 años y están disponibles en una amplia gama de tonalidades, dependiendo del tipo de material utilizado en su fabricación. (Naciones Unidas, 2024)

- *Undimotriz*

Se centra en el aprovechamiento de la energía por medio del movimiento de las olas y de las corrientes de las mareas. La energía de las olas es producida por el viento al soplar en el mar, ya que se crea un movimiento periódico. En el caso de la energía por el flujo de las mareas se utilizan las corrientes de agua horizontales. Según la IRENA la energía marina tiene una capacidad de 500 MW, hoy en la actualidad es una enorme reserva de energía prácticamente sin utilizar, la cual tienen una potencia inagotable. (Naciones Unidas, 2024)

B. Historia de la energía undimotriz

1. Primeros conceptos y prototipos

Los primeros molinos de marea tuvieron sitio en Venecia y en el puerto de Dover, Inglaterra antes de todos los conceptos relacionados con el origen de las mareas, estos tenían la capacidad de llenar un tanque mientras subía la marea y vaciarse cuando la marea bajaba para accionar sus palas al mismo tiempo. La primera patente relacionada con la energía undimotriz se registró en 1799 por el ingeniero francés Pierre-Simon Girard quien ideó un dispositivo para extraer energía del movimiento de las olas, este consistía en una palanca con un extremo conectado a la orilla y el otro conectado a un flotador que descansa sobre el mar, lo que lograba transferir lo movimiento del flotador energía. (Rolle, 2013)

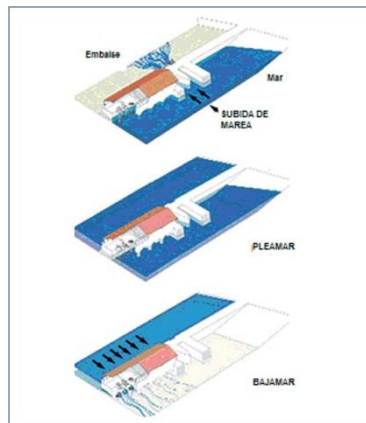


Figura 2: Esquema de funcionamiento molinos de marea

Nota. Adaptado de Rolle (2013).

A finales del siglo XIX en España se buscaba obtener energía de las olas y fue José Barrufet quien presentó hacia 1884 su máquina para aprovechar las olas del mar como fuerza motriz, a la que llamó Marmotor. Esta era una ingeniosa plataforma que, a través de un sistema de boyas articuladas y un mecanismo de trinquetes y volantes de inercia, permitía convertir el oleaje en energía a través de un eje giratorio que, a su vez, se podría utilizar para mover bombas de agua o bien generadores eléctricos. (Nbenitezgonzalez, 2019). En 1910, para proporcionar electricidad en su casa de Royan, el francés Bochaux-Praceique construyó un dispositivo basado en columnas de agua oscilante. (Newsletter, 2024)

Yoshio Masuda puede ser considerado el padre de la tecnología moderna de energía de las olas, con estudios en Japón desde 1940. En estos años desarrolló una boya de navegación impulsada por energía de las olas, equipada con una turbina de aire, que de hecho hoy en día es conocida como una columna de agua oscilante (OWC). (OES, 2024)

El trabajo de Salter en la energía undimotriz llevó al desarrollo del dispositivo conocido como el "Pato de Salter" en 1974, que más tarde fue renombrado como "Pato de Edimburgo". Este dispositivo era altamente eficiente en la conversión de la energía de las olas en electricidad. Estudiado intensamente en las décadas de 1970 y 1980, sirvió como inspiración directa para el Pelamis Wave Power, que se convirtió en la primera máquina de olas en generar electricidad para la red eléctrica.

Pelamis continuó fabricando y probando cinco máquinas adicionales, incluyendo una que fue instalada en el sitio de pruebas de Aguçadoura, en el norte de Portugal, donde recientemente CorPower Ocean ha colocado su primer dispositivo a escala comercial. En 1973, la crisis del petróleo generó un cambio significativo en el ámbito de las energías renovables y despertó un mayor interés por la producción de energía a partir de las olas a gran escala. En 1975, el gobierno británico lanzó un ambicioso programa de investigación y desarrollo en energía undimotriz, pero su financiamiento fue suspendido en 1982. Posteriormente, Noruega retomó la iniciativa y construyó dos prototipos a tamaño real cerca de la costa de Bergen, uno de 350 kW y otro de 500 kW. A principios de los años 90, la actividad en Europa se limitaba al ámbito académico, destacando la instalación de un prototipo de columna de agua oscilante (OWC) de 75 kW en la isla de Islay, Escocia. Al mismo tiempo, en Asia se construyeron dos prototipos de OWC: un convertidor de 60 kW integrado en un rompeolas en el puerto de Sakata, Japón, y una planta de 125 kW en Trivandrum, India. (Rebenius, 2024)

La situación en Europa cambió drásticamente en 1991, cuando la Comisión Europea decidió incluir la energía de las olas en su programa de investigación y desarrollo en energías renovables. Desde entonces, la Comisión ha financiado alrededor de treinta proyectos relacionados con esta tecnología, involucrando a numerosos equipos europeos. En años recientes, el interés por la energía undimotriz ha crecido en países como Estados Unidos, Canadá, Corea del Sur, Australia, Nueva Zelanda, Brasil, Chile, México y otros. (OES, 2024)

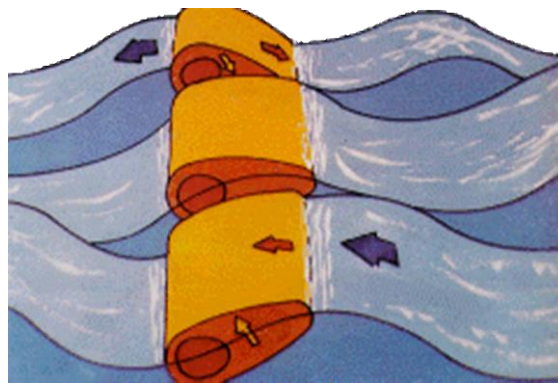


Figura 3: Dispositivo "Pato de Salter"

Nota. Adaptado de Palomino (2017).

2. Proyectos de energía undimotriz

<i>Nombre de la central o dispositivo</i>	<i>Descripción</i>
Rance Tidal Power Station	En 1966 se construyó la primera central mareomotriz en el mundo, consiste en una larga presa que bloquea el delta del río Rance, cuyas aguas fluyen hacia el mar por medio de 24 colectores que poseen sus respectivas turbinas. (Structuralia, 2018)
Central Maremotérmica OTEC	Aprovecha la diferencia de temperatura entre las aguas superficiales y profundas del océano para generar energía. Funciona mediante un ciclo termodinámico que utiliza un fluido de trabajo, como el amoníaco, que se vaporiza en un intercambiador de calor con agua caliente superficial y luego se expande en una turbina para producir electricidad. (Webmaster, 2012)
Central Kobold	Construida a 200 metros de la costa en el estrecho de Mesina, fue capaz de convertir energía cinética producida por las corrientes marinas en energía mecánica rotativa con alta eficiencia. (Griseldacarreras, 2021)
Turbinas captación de energía	En 2010 nace en Escocia el mayor proyecto para captar energía de las corrientes marinas, cada una con una potencia de 1.5 MW. (Griseldacarreras, 2021)
Red Eléctrica Perth Wave Energy Project	En 2015 se conecta a la red eléctrica las máquinas de energía undimotriz en Australia y en 2016 la empresa Nova Innovation conecta la primera serie de máquinas de energía mareomotriz a la red eléctrica en Escocia. (Power Technology, 2020)
Planta OWC en Mutriku	Inaugurada el 8 de julio de 2011, convirtiéndose en la primera instalación de energía undimotriz en Europa en comercializar la energía generada. Situada en el exterior del dique de abrigo del puerto local, cuenta con 16 turbinas de aire comprimido que operan mediante la generación de corrientes de aire inducidas por el cambio de nivel del agua en una cámara, causado por las olas. (Munguía, 2017)
UniWave200	El 10 de enero de 2021 se logra instalar con éxito un generador de energía undimotriz en la isla de King en Tasmania. Con una capacidad de 200

UniWave200	kW, aprovecha el recurso undimotriz para suministrar electricidad a la red local. El equipo se basa en el principio de una columna de agua oscilante (OWC), donde el agua de las olas entra en una cámara hueca ubicada debajo de la línea de flotación. (Griseldacarreras, 2021)
Planta Piloto OWC Yongsoo	Con una capacidad de 500 kW, utiliza el sistema de Columna de Agua Oscilante. Fue instalada en 2016 a una distancia de 1,2 km de la costa en la isla de Jeju, Corea del Sur. La planta, que tiene unas dimensiones de 37 m de largo por 31 m de ancho, está equipada con dos turbinas de flujo axial y dos generadores de 250 kW, los cuales están conectados a la red a través de un cable submarino de 22,9 kV AC. (Griseldacarreras, 2021)
WaveRoller 350 kW	En 2019, AW-Energy Ltd instaló su primer dispositivo WaveRoller de 350 kW en Peniche, Portugal, conectándolo a la red eléctrica y monitoreando su rendimiento remotamente. El dispositivo, anclado al lecho marino a profundidades entre 8 y 20 metros, ha sido probado en distintas condiciones de marea, con resultados satisfactorios. Durante la última década, la empresa ha desarrollado y probado varios modelos de WaveRoller, destacando sus ensayos en la playa de Almagreira como un hito importante. (Griseldacarreras, 2021)
Plataforma marítima Wavegem	La plataforma híbrida WAVEGEM, diseñada por GEPS Techno, combina energía undimotriz y solar. Desde agosto de 2019, ha sido probada durante 18 meses en alta mar en SEM-REV, Francia. La plataforma convierte la energía undimotriz a través del movimiento de flotadores que generan un circuito cerrado de agua, el cual pasa por una turbina de baja velocidad. Este tipo de tecnología está dirigida a sectores como el petróleo y gas, la acuicultura, las energías renovables y la minería marina, además de ser una fuente de energía para islas remotas.

Tabla 1: Proyectos undimotrices a lo largo de la historia

Nota. Elaboración propia (2024).

C. Casos de éxito undimotrices

1. PELAMIS

DATOS TÉCNICOS PELAMIS							
Longitud (m)	Diámetro (m)	Longitud punta (m)	Peso (ton)	Profundidad (m)	Potencia (kW)	Potencia generadores (kW)	Tipo de tecnología
150	3.5	5	700	50 - 70	750	125	Atenuador

Tabla 2: Datos técnico dispositivo PELAMIS

Nota. Elaboración propia (2024).

El parque undimotriz Agucadoura, ubicado a 5 km de la costa de Portugal, fue el primer proyecto comercial de energía undimotriz en el mundo. Comenzó a operar en septiembre de 2008, generando 2,25 MW de electricidad a través de tres generadores Pelamis. La empresa Pelamis Wave Power, antes conocida como Ocean Power Delivery (OPD), suministró las tres primeras máquinas Pelamis P-750, y se planeaba instalar otras 28 para alcanzar una capacidad de 22,5 MW en la segunda fase del proyecto, en colaboración con Energías de Portugal. Sin embargo, tras solo cuatro meses de funcionamiento, los generadores fueron retirados debido a problemas técnicos, y la crisis financiera global de 2008 complicó la financiación para su reinstalación, lo que llevó al cierre del parque. (PowerTechnology, 2021)

El proyecto inicial, valorado en 8,2 millones de euros, fue financiado por un consorcio liderado por Enersis, y se esperaba que abasteciera de energía a 1.500 hogares en su fase inicial. Al completarse ambas fases, se proyectaba que el parque pudiera cubrir la demanda eléctrica de 15.000 hogares y reducir en 60.000 toneladas las emisiones de CO₂ al año. (PowerTechnology, 2021)

En 2009, E. ON UK encargó un dispositivo de segunda generación, el P2-001, que fue probado en 2010, y ScottishPower instaló el P2-002 en 2012. No obstante, en noviembre de 2014, Pelamis quebró, y el dispositivo P2-001 fue adquirido por Wave Energy Scotland, desmantelado en 2016 y vendido al Consejo de las Islas Orcadas. El P2-002 también fue desmantelado en el mismo año y vendido al Centro Europeo de Energía Marina. (PowerTechnology, 2021)

La investigación sobre la energía undimotriz comenzó con el desarrollo del "Pato de Salter", un dispositivo creado por el profesor Stephen Salter en la Universidad de Edimburgo. Este dispositivo tenía una eficiencia cercana al 90% y se movía verticalmente con el oleaje. Aunque su desarrollo fue interrumpido por problemas técnicos y la falta de apoyo del gobierno británico, inspiró la creación del Pelamis. (PowerTechnology, 2021)

El primer prototipo a escala real de Pelamis se probó en el Centro Europeo de Energía Marina en Orkney, y su diseño fue verificado de manera independiente por WS Atkins, siguiendo los estándares offshore.

Los módulos del proyecto para Portugal fueron fabricados por Ross DeepTech, especialista en plataformas marinas, y ensamblados en Lewis con segmentos tubulares fabricados por Camcal. En marzo de 2006, los componentes fueron enviados al puerto de Peniche, en Portugal, para su montaje final y puesta en funcionamiento cerca de la costa norte, a 5 km de Póvoa de Varzim. (PowerTechnology, 2021)



Figura 4: Dispositivo PELAMIS (Proyecto en Escocia)

Nota. Adaptado de PowerTechnology (2021).

Descripción y funcionamiento

El convertidor de energía de olas Pelamis funciona aprovechando el movimiento vertical de las olas mediante boyas eléctricas que suben y bajan sobre una estructura similar a un pistón, donde se encuentra una bomba hidráulica. Esta bomba utiliza el movimiento del agua para impulsar un generador que produce electricidad, la cual se transmite a tierra mediante un cable submarino. (Kessler, 2008)

El Pelamis es una tecnología emergente en la generación de energía undimotriz, diseñada para convertir una parte de la energía del oleaje en electricidad. Aunque no busca la máxima eficiencia en la conversión de energía, se ha optimizado para resistir condiciones marinas extremas, minimizando la necesidad de mantenimiento. Su diseño consiste en secciones cilíndricas conectadas por juntas articuladas que, al moverse con las olas, activan un sistema hidráulico que bombea aceite a alta presión hacia motores que accionan un generador eléctrico. (Kessler, 2008)

Potencia

La estructura del Pelamis mide 150 metros de largo por 3,5 metros de diámetro y está dividida en tres secciones, cada una con tres generadores de 250 KW, sumando un total de 750 KW por unidad, y generando 2,25 MW por parque, con una producción máxima anual de 8,1 GWh. (Kessler, 2008)

Un parque con 30 unidades de Pelamis podría abastecer a unas 20,000 viviendas con un consumo promedio europeo. La energía generada por cada unidad se transmite a una base submarina, donde se conectan varias unidades para enviar la electricidad hacia la costa a través de un único cable. Aunque el sistema Pelamis tiene un impacto ambiental relativamente bajo, se ha señalado que produce ruido, lo que podría afectar a la fauna marina, aunque sus efectos aún no están completamente claros. (Kessler, 2008)

Costos

Cada unidad del dispositivo Pelamis tiene una potencia nominal de 750 kW. Sin embargo, la cantidad de energía que puede generar depende en gran medida de las condiciones específicas del sitio de instalación. En promedio, las máquinas Pelamis logran producir entre el 25% y el 40% de su capacidad total a lo largo de un año, lo que significa que la producción efectiva de energía puede variar considerablemente en función de los recursos de las olas en la región donde se instalen. (Aser, 2011)

La tecnología Pelamis ofrece importantes ventajas económicas y operativas. Una de las características clave es que la disponibilidad del sistema es prácticamente del 100%, lo que significa que está diseñada para operar continuamente sin necesidad de intervenciones frecuentes en alta mar. Esta característica reduce significativamente los costos operativos y mejora la confiabilidad del sistema, lo que resulta en una mayor eficiencia en términos de generación de energía. (Aser, 2011)

En cuanto a los costos, los dispositivos Pelamis presentan costos por kWh más bajos en comparación con otras tecnologías de energía renovable, lo que los hace competitivos en el mercado energético. Además, el alto potencial de rentabilidad de esta tecnología, junto con su trayectoria comercial comprobada, ha hecho que sea una opción atractiva para los proyectos de energía undimotriz. La tecnología ha sido verificada y asegurada por organismos independientes, lo que añade una capa de confianza tanto para inversores como para operadores del sector energético. (Aser, 2011)

Impacto ambiental

El impacto ambiental del Pelamis se considera bajo, ya que se instala lejos de la costa y no requiere una intervención significativa en el entorno marino. No presenta barreras físicas importantes para la fauna marina, y su diseño flotante minimiza el contacto con el fondo marino, lo que reduce las alteraciones del ecosistema.

$T_e(s) H_e(m)$	Power matrix (in kW)																
	5	5.5	6	6.5	7	7.5	8	8.5	9	9.5	10	10.5	11	11.5	12	12.5	13
0.5	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
1	0	22	29	34	37	38	38	37	35	32	29	26	23	21	0	0	0
1.5	32	50	65	76	83	86	86	83	78	72	65	59	53	47	42	37	33
2	57	88	115	136	148	153	152	147	138	127	116	104	93	83	74	66	59
2.5	89	138	180	212	231	238	238	230	216	199	181	163	146	130	116	103	92
3	129	198	260	305	332	340	332	315	292	266	240	219	210	188	167	149	132
3.5	0	270	354	415	438	440	424	404	377	362	326	292	260	230	215	202	180
4	0	0	462	502	540	546	530	499	475	429	384	366	339	301	267	237	213
4.5	0	0	544	635	642	648	628	590	562	528	473	432	382	356	338	300	266
5	0	0	0	739	726	731	707	687	670	607	557	521	472	417	369	348	328
5.5	0	0	0	750	750	750	750	750	737	667	658	586	530	496	446	395	355
6	0	0	0	0	750	750	750	750	750	750	711	633	619	558	512	470	415
6.5	0	0	0	0	750	750	750	750	750	750	750	743	658	621	579	512	481
7	0	0	0	0	0	750	750	750	750	750	750	750	750	676	613	584	525
7.5	0	0	0	0	0	0	750	750	750	750	750	750	750	750	686	622	593
8	0	0	0	0	0	0	0	750	750	750	750	750	750	750	750	690	625

Figura 5: Matriz de potencia dispositivo PELAMIS

Nota. Adaptado de Silva et al. (2013).

2. POWERBUOY

DATOS TÉCNICOS POWERBUOY							
Longitud poste (m)	Diámetro boya (m)	Diámetro poste (m)	Altura (m)	Altura no sumergida (m)	Peso (Ton)	Potencia (kW)	Tipo de tecnología
10.8	2.5	1.1	13	3.4	10	50	Convertidor de columna oscilante

Tabla 3: Datos técnicos dispositivo POWERBUOY

Nota. Elaboración propia (2024).

Descripción y funcionamiento

El sistema PowerBuoy de OPT es una innovadora boya de 14 metros de altura, de los cuales solo tres emergen por encima de la superficie del agua, mientras que el resto permanece sumergido a más de un metro. Con un peso cercano a las 10 toneladas, este dispositivo anclado a más de un kilómetro de la costa en el fondo marino convierte el movimiento de las olas en energía eléctrica. Su diseño, que no genera residuos ni afecta el hábitat oceánico, está equipado con un sistema de baterías de 50 kWh. (Aser, 2012)

El movimiento ascendente y descendente de las olas impulsa la boya, lo que genera fricción mecánica dentro de su estructura y acciona un generador eléctrico. La electricidad generada se convierte en corriente continua de alto voltaje y se transmite a tierra a través de un cable submarino. Además de producir energía, el dispositivo alimenta sensores que monitorizan las condiciones oceánicas y los subsistemas de la boya. En caso de olas extremadamente grandes, el sistema se desconecta automáticamente, volviendo a conectarse cuando el mar se estabiliza. (Aser, 2012)

Este sistema no solo permite la generación de electricidad limpia, sino que también recopila datos valiosos para el estudio de las olas y el comportamiento del océano, maximizando así la comprensión y el aprovechamiento de los recursos renovables marinos, para olas de entre 2 a 3 metros, el dispositivo genera su potencia óptima, mientras que, con olas de menor altura o mayores periodos, su rendimiento disminuye. (Aser, 2012)

Potencia

El dispositivo PowerBuoy APB350 de Ocean Power Technologies (OPT) ha mostrado un desempeño sobresaliente en pruebas marinas. Es capaz de generar energía aprovechando el movimiento vertical de las olas, con una potencia nominal de 40 kW, aunque en condiciones óptimas ha logrado producir hasta 32 kWh en un solo día, lo que es más del doble de su capacidad teórica de producción. (Ocean Power Technologies, 2022)

La Figura 6 muestra las condiciones de oleaje con las cuales el dispositivo posee una mayor potencia, estos datos provienen de la empresa OPT la cual realizó diferentes pruebas de la boya situada en las costas de New Jersey (EE. UU.), de esta se extraen los datos que hacen su matriz de potencia. (Blanco, 2016)

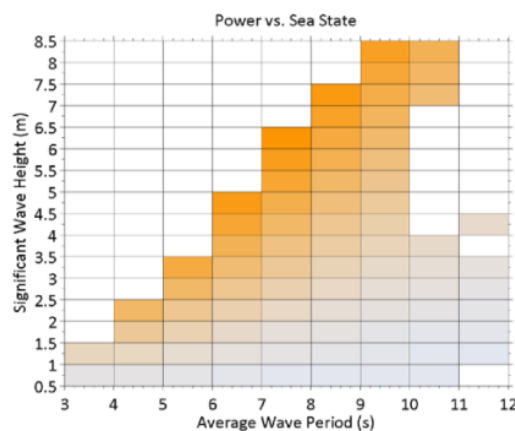


Figura 6: Matriz de potencia OPT Powerbuoy

Nota. Adaptado de Ocean Power Technologies (2022).

Características del dispositivo

- El sistema está diseñado con boyas robustas y materiales convencionales probados, lo que incluye un anclaje seguro y cables submarinos confiables para la transmisión de energía. Estos componentes garantizan una durabilidad y resistencia óptimas en entornos marinos exigentes. (Ocean Power Technologies, 2022)
- Requiere un mantenimiento mínimo y de bajo costo a lo largo de su vida útil, que se estima en unos 30 años. Esto reduce significativamente los gastos operativos en comparación con otras tecnologías energéticas, haciéndolo atractivo desde el punto de vista financiero. (Ocean Power Technologies, 2022)

- La instalación es sencilla, lo que permite un despliegue rápido y eficiente, minimizando los tiempos de inactividad y los costos asociados a la instalación de infraestructuras complejas. (Ocean Power Technologies, 2022)
- En términos económicos, el sistema es altamente competitivo frente a las fuentes tradicionales de energía, presentándose como una opción viable y rentable en el mercado energético global. (Ocean Power Technologies, 2022)
- Su capacidad de generación es comparable a la de grandes plantas eléctricas de más de 100 MW, lo que le permite aportar una cantidad significativa de energía a la red. (Ocean Power Technologies, 2022)
- La energía generada puede ser integrada de inmediato en la red eléctrica, proporcionando una fuente constante y confiable de electricidad. Alternativamente, también puede ser almacenada para su uso posterior, lo que ofrece flexibilidad en la gestión energética y contribuye a la estabilidad de la red. (Ocean Power Technologies, 2022)

Impacto ambiental

El impacto ambiental del PowerBuoy es relativamente bajo. Al ser una instalación flotante, tiene un contacto mínimo con el fondo marino, lo que reduce la alteración de los hábitats marinos. No representa una barrera física significativa para la fauna marina, y su diseño compacto permite que se integre de manera armoniosa en el entorno oceánico. Sin embargo, es necesario considerar el posible impacto durante la fase de instalación, especialmente en lo que respecta al anclaje y las operaciones en alta mar. (Ocean Power Technologies, 2022)

Estudios de la misma empresa se llegó a la conclusión de que este tipo de dispositivos no afectan negativamente a la fauna y flora locales, es más, se descubrió que el sistema de anclaje de la PowerBuoy al fondo marino proporcionaba un nuevo hábitat a ciertas especies marinas, contribuyendo de este modo al desarrollo del medio ambiente en la zona. (Blanco, 2016)

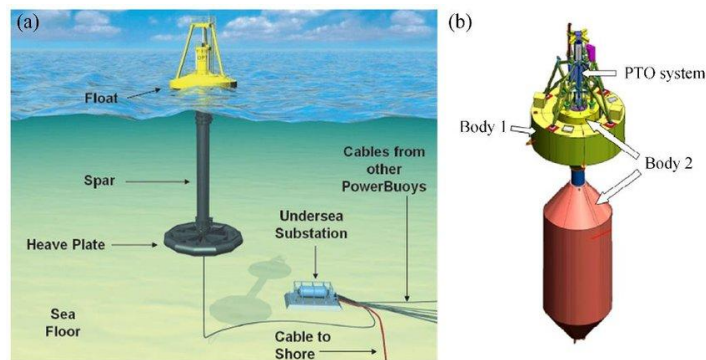


Figura 7: Partes de Boya Powerbuoy

Nota. Adaptado de Ocean Power Technologies (2022).

3. AQUABUOY

DATOS TÉCNICOS AQUABUOY					
Longitud tubo (m)	Diámetro (m)	Altura (m)	Profundidad (m)	Potencia (kW)	Tipo de tecnología
30	6	4	40	250	Absorbedores de punto

Tabla 4: Datos técnicos dispositivo POWERBUOY

Nota. Elaboración propia (2024).

Descripción y funcionamiento

El Aquabuoy es un dispositivo de absorción de energía que flota en el agua y funciona en coordinación con un tubo de reacción sumergido, que actúa como masa de agua. Este tubo de reacción genera movimiento en una serie de pistones que accionan una bomba de agua elastomérica reforzada con acero, conocida como bomba de manguera. Esta bomba presuriza el agua, llevándola a un nivel de alta presión. (UNIVERSITY OF STRATHCLYDE, 2014)

Para estabilizar la salida de energía, se utiliza un acumulador que regula el flujo de potencia, y luego la presión acumulada se libera en una turbina de impulso que genera electricidad. La sincronización con la red eléctrica se logra mediante un variador de velocidad, mientras que un transformador elevador ajusta el voltaje a los niveles adecuados para su integración en la red. (UNIVERSITY OF STRATHCLYDE, 2014)

La bomba de manguera envía el agua a un acumulador, lo que permite suavizar la salida de energía a lo largo de los ciclos de las olas. Luego, la presión del agua es liberada, lo que impulsa una turbina hidráulica de impulso. El sistema de transmisión de energía puede diseñarse como un circuito cerrado o abierto, según las necesidades del proyecto. La regulación del dispositivo se realiza ajustando gradualmente el nivel de presión en el acumulador hidráulico, ya que no es posible adaptarlo rápidamente a cada ola que pasa. Esta limitación en la capacidad de ajuste rápido del sistema de transmisión de energía puede reducir su eficiencia. (UNIVERSITY OF STRATHCLYDE, 2014)

El sistema de amarre del Aquabuoy utiliza una configuración de amarre flojo. Dado que el Aquabuoy es un dispositivo relativamente pequeño, con un diámetro de 6 metros, el costo del amarre representa una parte importante de la estructura de costos en comparación con dispositivos más grandes, especialmente en plantas de energía de tamaño fijo. Generalmente, cada Aquabuoy requiere tres líneas de amarre. Este tipo de amarre flojo es común en aplicaciones marinas donde es necesario que el dispositivo tenga libertad de movimiento, sin estar sujeto a fuerzas de amarre vertical. Este sistema fue exitosamente probado en el Mar del Norte durante las primeras pruebas con su predecesor, la boya IPS. (UNIVERSITY OF STRATHCLYDE, 2014)

El Aquabuoy se conecta a la red mediante un convertidor de velocidad variable que transforma la corriente alterna (CA) en corriente continua (CC) y luego nuevamente en CA. Un transformador elevador se encarga de aumentar el voltaje. La conexión entre los dispositivos y la red se realiza mediante cables flexibles que llegan a una caja de conexiones ubicada en el fondo del mar. Este proceso es estándar y no presenta desafíos significativos. (UNIVERSITY OF STRATHCLYDE, 2014)

Debido a su tamaño reducido, el Aquabuoy puede ser fácilmente remolcado hasta un puerto cercano para realizar mantenimiento o revisiones. Para su transporte, se debe colocar en posición horizontal, lo cual se puede lograr utilizando una grúa para mover el tubo de contra reacción o inyectando aire en los compartimentos submarinos para alterar su flotabilidad. (UNIVERSITY OF STRATHCLYDE, 2014)

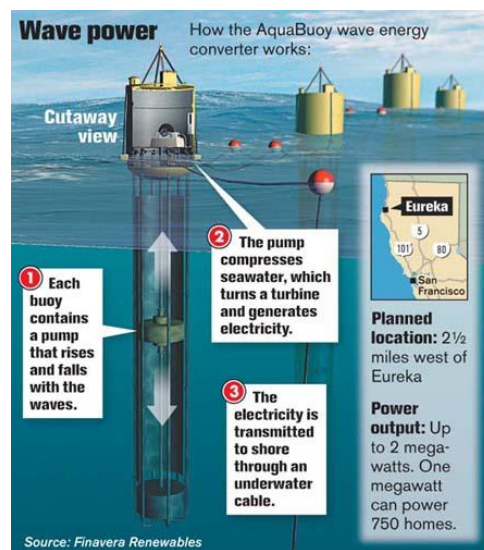


Figura 8: Esquema de dispositivo Powerbuoy

Nota. Adaptado de UNIVERSITY OF STRATHCLYDE (2014).

Potencia

Las pruebas realizadas en tanques de olas, en conjunto con los modelos teóricos desarrollados por la empresa, han mostrado cierta incertidumbre en cuanto al rendimiento previsto del Aquabuoy. Esto puede deberse a que el modelo ha tratado el tubo de contra reacción solo como una masa, sin tomar en cuenta las interacciones hidrodinámicas. El rendimiento también está limitado por la toma de fuerza, que ajusta lentamente el dispositivo al período dominante de las olas. La capacidad de generación por dispositivo es de 250 kW, con un factor de capacidad estimado en un 12%, aunque se prevé que un factor de capacidad del 40% podría proporcionar un rendimiento óptimo de generación de energía. (UNIVERSITY OF STRATHCLYDE, 2014)

El Aquabuoy ha implementado un mecanismo efectivo para evitar sobrecargas estructurales. Si las bombas de manguera se extienden demasiado, el pistón en el tubo de contra reacción llega a una sección más ancha, lo que permite que el agua circule sin generar más tensiones en el dispositivo. Este mecanismo de sobrecarga ayuda a proteger el sistema. La vida útil estimada del Aquabuoy es de 20 años. (UNIVERSITY OF STRATHCLYDE,2014)

Aunque el sistema de monitoreo remoto aún está en desarrollo, existen preocupaciones sobre la facilidad de mantenimiento, ya que los componentes sumergidos, como las bombas de manguera, los pistones y las válvulas de retención, son difíciles de inspeccionar. Para acceder a estos componentes, será necesario colocar el dispositivo en posición horizontal flotante. Los elementos de turbo maquinaria, en cambio, probablemente sean accesibles desde el interior del casco de la boya. El fabricante está investigando nuevas estrategias de operación y mantenimiento para hacer frente a estos desafíos. (UNIVERSITY OF STRATHCLYDE, 2014)

T_p (s) H_t (m)	Power matrix (in kW)												
	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17
1	0	0	8	11	12	11	10	8	7	0	0	0	0
1.5	0	13	17	25	27	26	23	19	15	12	12	12	7
2	0	24	30	44	49	47	41	34	28	23	23	23	12
2.5	0	37	47	69	77	73	64	54	43	36	36	36	19
3	0	54	68	99	111	106	92	77	63	51	51	51	27
3.5	0	0	93	135	152	144	126	105	86	70	70	70	38
4	0	0	0	122	176	198	188	164	137	112	91	91	49
4.5	0	0	0	223	250	239	208	173	142	115	115	115	62
5	0	0	0	250	250	250	250	214	175	142	142	142	77
5.5	0	0	0	250	250	250	250	250	211	172	172	172	92

Figura 9: Matriz de potencia Aquabuoy

Nota. Adaptado de Autor Silva et al. (2013).

4. WAVEROLLER

DIMENSIONES WAVEROLLER				
Ancho (m)	Altura (m)	Profundidad (m)	Potencia (kW)	Tipo de tecnología
10	18	8 - 20	1000	Convertidor de energía de oscilación de panel

Tabla 5: Datos técnicos dispositivo WAVEROLLER

Nota. Elaboración propia (2024).

Descripción y funcionamiento

El WaveRoller es un dispositivo diseñado para transformar la energía de las olas del océano en electricidad. Opera en zonas cercanas a la costa, a distancias de entre 0,3 y 2 kilómetros de la orilla, y a profundidades que varían entre 8 y 20 metros. Dependiendo de las condiciones de la marea, puede estar parcial o completamente sumergido y se encuentra anclado al fondo marino. (AW-Energy, 2022)

A medida que el panel del WaveRoller se mueve y capta la energía de las olas, activa unas bombas hidráulicas de pistón conectadas al panel, que bombean fluidos dentro de un circuito hidráulico cerrado. Todos los componentes del sistema hidráulico están sellados dentro de una estructura hermética, lo que garantiza que no entren en contacto con el medio marino, eliminando el riesgo de fugas al océano. Los fluidos a alta presión se almacenan en un sistema de acumulación que regula el flujo de energía, el cual luego se transfiere a un motor hidráulico que acciona un generador eléctrico. La energía generada se conecta a la red eléctrica mediante un cable submarino, proporcionando electricidad renovable a partir de las olas del océano. (AW-Energy, 2022)

Potencia

Cada unidad de WaveRoller, que incluye tanto el panel como el sistema de transmisión de energía, tiene una capacidad nominal que oscila entre 350 kW y 1000 kW, con un factor de capacidad del 25 al 50% según las condiciones del oleaje en el sitio de instalación. La tecnología puede desplegarse tanto como unidades individuales o formando parques de generación. (AW-Energy, 2022)

El movimiento oscilante del agua generado por las olas pone en funcionamiento el panel del WaveRoller. Para optimizar la cantidad de energía que este panel puede capturar, el dispositivo se instala bajo el agua a profundidades de entre 8 y 20 metros, donde la fuerza del oleaje es más intensa. Cada panel puede absorber entre 1,5 y 2 MW de energía proveniente de las olas. El panel cubre casi toda la altura de la columna de agua, desde el fondo marino hasta la superficie. (AW-Energy, 2022)

El WaveRoller aprovecha las olas, que contienen significativamente más energía que el viento en un área de tamaño similar. En términos de capacidad de generación de energía nominal, un WaveRoller puede producir aproximadamente siete veces más que una turbina eólica en un espacio comparable. Además de su pequeño tamaño, el WaveRoller opera bajo el agua y tiene un impacto visual mínimo. La altura de su panel está diseñada para reducir al mínimo su protrusión sobre la superficie del agua, asegurando así la preservación de la belleza natural del océano y la costa. (AW-Energy, 2022)

		Te (s)										
		5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
Hs (m)	1	0.043	0.051	0.060	0.062	0.065	0.065	0.064	0.061	0.061	0.057	0.057
	2		0.198	0.226	0.238	0.232	0.240	0.233	0.225	0.212	0.197	0.191
	3			0.465	0.485	0.491	0.454	0.463	0.454	0.440	0.408	0.399
	4				0.744	0.697	0.782	0.745	0.698	0.722	0.659	0.631
	5					0.973	1.000	0.998	0.982	0.953	0.889	0.844

Figura 10: Matriz de potencia WAVEROLLER

Nota. Adaptado de Maki, Vuorinen y Mucha (2014).

Características del dispositivo

El dispositivo está instalado y operando en una zona cercana a la costa, lo que facilita el acceso al sitio, protege contra condiciones extremas y reduce los costos de la infraestructura de la planta. La energía es capturada mediante un panel fijo en el fondo marino (un convertidor de oleaje oscilante), lo que permite una captación eficiente de energía. Este sistema puede funcionar sin interrupciones en condiciones de mar bajo, medio y alto, y cuenta con una única parte móvil, lo que simplifica su operación. El movimiento de las olas se convierte en electricidad mediante un sistema hidráulico integrado con almacenamiento de energía a bordo, lo que asegura una salida de energía estable y compatible con la red eléctrica. Además, el sistema está diseñado para establecer y mantener la estabilidad de la red, ofreciendo una operación de bajo mantenimiento, con los inversores localizados en tierra para mayor facilidad de acceso y gestión. (AW-Energy, 2022)

Impacto ambiental

La tecnología WaveRoller se encuentra en una posición favorable para sustituir fuentes de energía dañinas para el medio ambiente por energía limpia y renovable proveniente de las olas del océano. Esta energía azul, aprovechada por WaveRoller, no solo es más amigable con el medio ambiente en comparación con las tecnologías basadas en combustibles fósiles, sino que también presenta menos riesgos que la energía nuclear, además de ser comparable o incluso superior a otras fuentes de energía renovables. (AW-Energy, 2022)

Un WaveRoller no genera emisiones durante su operación. Las emisiones generadas a lo largo de su ciclo de vida, desde la fabricación hasta el desecho de los dispositivos, son considerablemente menores que las de las plantas que utilizan combustibles fósiles. WaveRoller se adapta al movimiento del agua, lo que lo hace muy respetuoso con la vida marina circundante. Además, sus sistemas hidráulicos, mecánicos y eléctricos están completamente sellados dentro del casco, lo que protege a la fauna marina del ruido y otros contaminantes potenciales. (AW-Energy, 2022)



Figura 11: Representación de dispositivo WaveRoller sumergido

Nota. Adaptado de AW-Energy (2022).

5. WAVE DRAGON

DATOS TÉCNICOS WAVEDRAGON						
Longitud (m)	Ancho (m)	Altura (m)	Profundidad (m)	Peso (ton)	Potencia (kW)	Tipo de tecnología
170	260	33	20 – 30	33000	7000	Convertidor de energía de acumulación

Tabla 6: Datos técnicos dispositivo WAVEDRAGON

Nota. Elaboración propia (2024).

El Wave Dragon es un WEC flotante que funciona mediante el principio de sobre pasamiento. Dos brazos reflectores sirven para enfocar las olas entrantes hacia la rampa de sobre pasamiento, llenando un embalse de agua ubicado por encima del nivel medio del mar. Se produce energía a medida que el agua del embalse pasa a través de turbinas hidroeléctricas de baja caída en su camino de regreso al mar. La plataforma principal se construirá en hormigón armado y el calado se puede ajustar mediante cámaras de aire ubicadas debajo de la plataforma. (WaveDragon, 2024)

Descripción y funcionamiento

El agua sobrepasa la rampa y fluye hacia el embalse, que se encuentra por encima del nivel del mar. La gravedad hace que el agua regrese a la superficie del mar y es guiada a través de las turbinas hidroeléctricas, las cuales producen electricidad. Wave Dragon se basa en tecnología probada y un concepto sorprendentemente simple. La plataforma del embalse está construida con hormigón armado de grado marino, con una vida útil garantizada de más de 50 años, y requiere muy poca inspección y mantenimiento en alta mar. La plataforma estable asegura un fácil acceso, incluso en mares agitados. La planta de energía opera de manera autónoma utilizando inteligencia artificial y es monitoreada y controlada de forma remota mediante un avanzado sistema SCADA. (WaveDragon, 2024)

La cantidad de energía capturada por el dispositivo se incrementa mediante alas reflectoras montadas a ambos lados del embalse, que canalizan las olas hacia la rampa central. El dispositivo está anclado de forma flexible para permitir que se gire en la dirección principal de las olas. (WaveDragon, 2024)

Cámaras de aire presurizado (debajo de la unidad) aumentan la producción de energía al optimizar la altura de la cresta de la rampa según el estado real del mar. Las únicas partes móviles son los generadores de turbina. Las turbinas Kaplan son una tecnología ecológica bien conocida con más de 100 años de trayectoria. Wave Dragon utiliza turbinas Kaplan simplificadas con álabes guía de entrada fijos y palas de hélice. El generador está acoplado directamente al rodete. La velocidad variable del generador se controla midiendo la presión real sobre las turbinas, asegurando una eficiencia constante de más del 90%. Las turbinas se mantendrán en tierra cada 5 años. Este mantenimiento planificado se llevará a cabo en el período de verano, cuando la energía de las olas es relativamente baja y, por lo tanto, no se necesita el conjunto completo de turbinas. Esto significa que no habrá pérdida de producción de energía debido a la renovación de las turbinas. (WaveDragon, 2024)

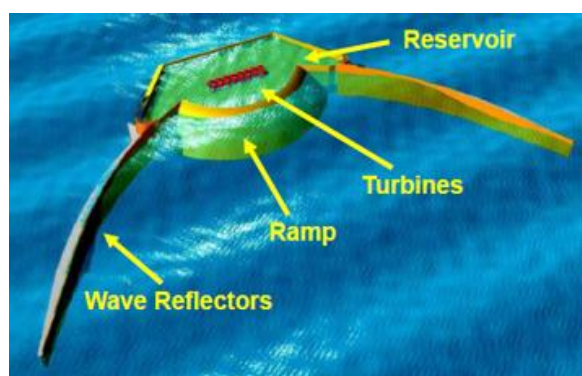


Figura 12: Representación y partes de dispositivo WaveRoller

Nota. Adaptado de WaveDragon (2024).

T_p (s) H_r (m)	Power matrix (in kW)												
	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17
1	160	250	360	360	360	360	360	360	320	280	250	220	180
2	640	700	840	900	1190	1190	1190	1190	1070	950	830	710	590
3	0	1450	1610	1750	2000	2620	2620	2620	2360	2100	1840	1570	1310
4	0	0	2840	3220	3710	4200	5320	5320	4430	3930	3440	2950	2460
5	0	0	0	4610	5320	6020	7000	7000	6790	6090	5250	3950	3300
6	0	0	0	0	6720	7000	7000	7000	7000	7000	6860	5110	4200
7	0	0	0	0	0	7000	7000	7000	7000	7000	7000	6650	5740

Figura 13: Matriz de potencia WAVEDRAGON

Nota. Adaptado de Silva et al. (2013).

6. OYSTER

DATOS TÉCNICOS OYSTER							
Longitud (m)	Ancho (m)	Altura (m)	Profundidad cimiento (m)	Altura sumergida (m)	Altura anclaje (m)	Potencia (kW)	Tipo de tecnología
30	6	13	10	9	3	290	Convertidor de energía de flexión

Tabla 7: Datos técnicos dispositivo WAYEROLLER

Nota. Elaboración propia (2024).

El dispositivo Oyster aprovecha el movimiento de las olas costeras mediante un panel articulado fijo al lecho marino, que impulsa agua a alta presión hacia una turbina ubicada en tierra para producir energía. Creado por la empresa escocesa Aquamarine Power, este sistema destaca por su facilidad de instalación y mantenimiento en comparación con otros dispositivos de generación undimotriz, y ha sido reconocido con premios por sus innovaciones en energía renovable. (Prensa Revista ElectroIndustrial, 2011)

Descripción y funcionamiento

El dispositivo Oyster está diseñado para funcionar en profundidades de 10 a 12 metros, aprovechando la energía de las olas costeras. Consta de un marco de conexión de energía PCF y una unidad de captura de energía PCU. (Prensa Revista ElectroIndustrial, 2011)

El PCF, que pesa 36 toneladas, se fija al fondo marino mediante pilotes de hormigón y requiere una instalación y nivelación precisas para ajustarse a terrenos rocosos irregulares. La PCU, una aleta flotante de 200 toneladas y dimensiones de 18 x 12 x 4 metros, está articulada al PCF. La PCU oscila con las olas, activando dos pistones hidráulicos que bombean agua a alta presión a través de tres conductos submarinos hacia una turbina hidroeléctrica en tierra. Esta turbina impulsa un generador eléctrico, transformando la energía de las olas en electricidad. (Prensa Revista ElectroIndustrial, 2011)



Figura 14: Dispositivo OYSTER 2

Nota. Adaptado de Prensa Revista Electro Industrial (2011).

$T_e(s) H_s(m)$	Power matrix (in kW)								
	5	6	7	8	9	10	11	12	13
0.5	0	0	0	0	0	0	1	3	3
1	20	30	38	42	44	44	45	47	45
1.5	80	85	92	97	102	103	104	100	104
2	140	147	152	158	155	155	160	161	156
2.5	192	197	208	202	203	209	211	201	204
3	241	237	237	241	243	230	236	231	235
3.5	0	271	272	269	268	267	270	260	260
4	0	291	290	290	280	287	276	278	277
4.5	0	291	290	290	280	287	276	278	277
5	0	0	290	290	280	287	276	278	277
5.5	0	0	290	290	280	287	276	278	277
6	0	0	290	290	280	287	276	278	277

Figura 15: Matriz de potencia OYSTER

Nota. Adaptado de Silva et al. (2013).

a. Comparativa de los distintos generadores undimotrices

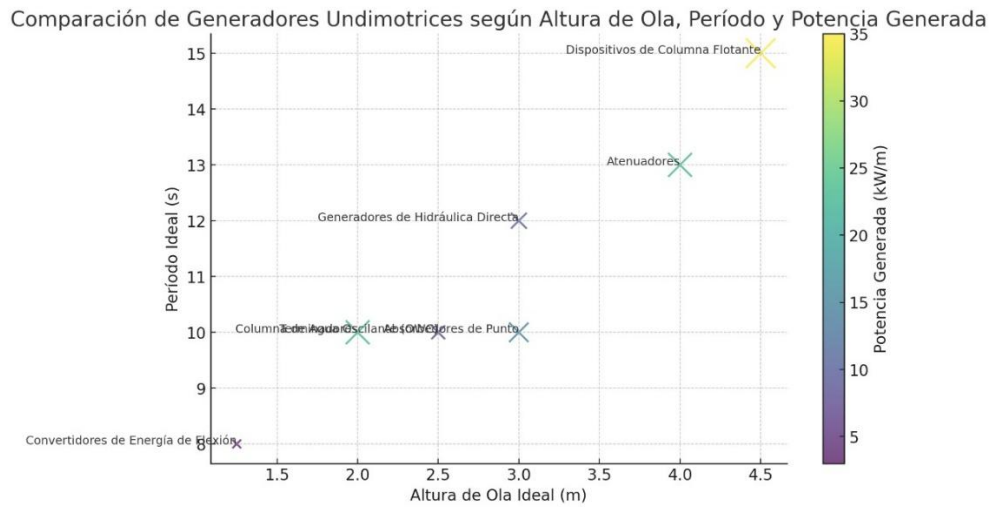


Figura 16: Comparación de generadores undimotrices según altura de ola, período y potencia generada

Nota. Adaptado de Falcao y Silva (2010).

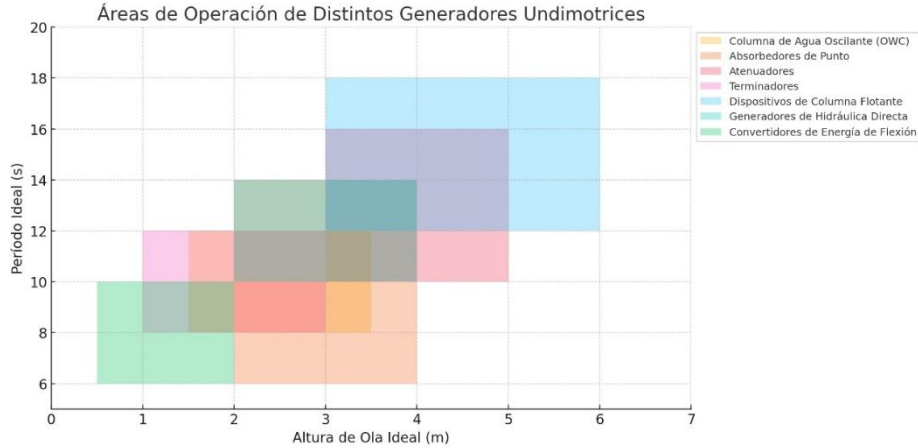


Figura 17: Áreas de operación de distintos generadores undimotrices

Nota. Adaptado de Falcao y Silva (2010).

Las gráficas anteriores muestran una comparación de diferentes tipos de generadores undimotrices en función de tres variables principales: altura de ola ideal (m), período ideal (s) y potencia generada (kW/m).

El eje X representa la altura ideal de la ola (en metros) que es necesaria para que el dispositivo opere eficientemente y el eje Y muestra el período ideal de la ola (en segundos), indicando el tiempo entre crestas de onda óptimo para cada dispositivo. El área corresponde a un tipo específico de generador de energía undimotriz y destaca las condiciones en las que cada tipo opera de manera óptima. Una escala de color muestra la potencia generada, la escala varía entre los 5 y 35 kW/m, entre más claro es el color mayor potencia representa. En la figura 22, se establece un valor ideal para las distintas tecnologías empleadas en la generación de potencia undimotrices, estas son:

Tipo de generador	Altura de la ola (m)	Período de la ola (s)	Potencia (kW)
Convertidores de energía a flexión	0.5 - 1	8	5 - 10
Columna de agua oscilante	2	10	5 - 10
Atenuadores	4	11	20 - 25
Generadores de hidráulica directa	3	12	15- 20
Generadores de punto	3	10	10 - 15
Dispositivos de columna flotante	4.5	15	30 - 35

Tabla 8: Comparativa de generadores undimotrices

Nota. Elaboración propia (2024).

Los convertidores de energía en flexión se encuentran en la esquina inferior izquierda, con una altura de ola ideal de alrededor de 1 metro y un período de ola de aproximadamente 8 segundos. Estos dispositivos están diseñados para operar en zonas con olas más pequeñas y con períodos relativamente cortos. Su estructura generalmente se flexiona con el movimiento de las olas, convirtiendo la energía de esta flexión en electricidad. Debido a sus bajos requerimientos de altura y período de ola, son adecuados para ubicaciones donde la actividad de las olas no es tan intensa. Generan una potencia baja entre 5 a 10 kW/m

La columna de agua oscilante estos dispositivos están alrededor de una altura de ola de 2 metros y un período de 10 segundos. Producen una potencia media-baja en comparación con otros dispositivos en el gráfico. Estos dispositivos funcionan bien en regiones costeras con olas moderadas, su rango de potencia se encuentra entre los 20 y 15 kW/m.

Los atenuadores están ubicados a la derecha, con una altura ideal de ola de 4 metros y un período de 11 segundos. Generan una potencia media-alta, lo cual los hace adecuados para áreas con olas grandes y constantes, como en zonas oceánicas más profundas, con una potencia aproximadamente de 25 kW/m.

Los generadores de hidráulica directa se encuentran hacia el centro, con alturas de ola de alrededor de 3 metros y períodos de unos 12 segundos. Pueden operar con olas de tamaño medio y períodos largos, lo cual los hace eficientes en ubicaciones donde las olas son estables y de tamaño moderado. Tienen una potencia de salida media, siendo versátiles en cuanto a los requisitos de altura y período de ola, con una potencia de 20 kW/m.

Los generadores de punto están cerca de la columna de agua oscilante, con una altura de ola cercana a 3 metros y un período ideal de 10 segundos. Son útiles en áreas con olas de altura y períodos moderados y, debido a su diseño compacto, pueden instalarse en aguas cercanas a la costa. Tienen una potencia generada media, adecuada para ubicaciones con olas moderadas, con una potencia aproximada de 15 kW/m

Y, por último, las columnas flotantes están en la parte superior derecha, con una altura de ola de aproximadamente 4 metros y un período largo de 15 segundos. Debido a sus requerimientos altos de altura y período de ola, son adecuados para ubicaciones de mar abierto donde las olas son más grandes. Generan una potencia alta, lo que los hace eficientes para capturar energía en ambientes de alta energía, como océanos. Estos tienen el mayor potencial con 35 kW/m de potencia generada

En términos generales, el gráfico muestra cómo cada tipo de dispositivo tiene un rango específico de operación en cuanto a altura y período de ola. Los Convertidores de Energía de Flexión y Columna de Agua Oscilante funcionan en olas pequeñas y períodos más cortos, ideales para zonas costeras con actividad de olas moderada. Por otro lado, los Atenuadores y Dispositivos de Columna Flotante requieren olas grandes y períodos largos, siendo más adecuados para aguas profundas en océano abierto.

En el caso de la cuenca, la cual cuenta con períodos entre 1 a 4 s, la gráfica sugiere que las opciones de dispositivos undimotrices son limitadas. La mayoría de los dispositivos en las gráficas requieren períodos de ola más largos (en general entre 10 y 15 segundos) para funcionar eficientemente. Sin embargo, podemos hacer algunas observaciones relevantes.

Los convertidores de energía de flexión son los únicos en la gráfica que se encuentran en el rango de períodos menores a 8 segundos, con un período cercano entre los 7 y 6 segundos. Además, operan con olas de baja altura (aproximadamente de 1 metro a 2 metros). Los Convertidores de Energía de Flexión serían una de las pocas opciones viables en una zona con períodos de ola menores a 8 segundos. Sin embargo, tienen una potencia generada relativamente baja, por lo que es probable que su eficiencia en términos de generación de energía sea limitada.

Dispositivos como la Columna de Agua Oscilante, los Generadores de Punto y los Generadores de Hidráulica Directa requieren períodos de al menos 10 segundos, y los Atenuadores y Dispositivos de Columna Flotante requieren períodos aún mayores, cercanos a los 11-15 segundos. En condiciones de períodos menores a 8 segundos, estos dispositivos no serían ideales, ya que no alcanzarían su eficiencia óptima de operación. Los períodos cortos generalmente no permiten el tiempo necesario para el desarrollo completo de las ondas de energía que estos dispositivos requieren para generar potencia de manera efectiva.

Por lo que en la cuenca del río Motagua como sitio de implementación el cual tiene predominantemente períodos de ola menores a 8 segundos, el potencial de aprovechamiento de la energía undimotriz se verá restringido a tecnologías que puedan operar en condiciones de baja energía, como los Convertidores de Energía de Flexión. Estos dispositivos pueden ser adecuados para capturar algo de energía en condiciones de olas cortas y de baja altura, pero es probable que la cantidad de energía capturada sea considerablemente menor que en sitios con períodos más largos.

b. Ventajas de la energía undimotriz

- *Fuente predecible de energía*

Una de las principales ventajas de la energía undimotriz es que las olas son más predecibles y constantes en comparación con otras fuentes de energía renovable, como el viento o la radiación solar. Aunque la intensidad del oleaje puede variar, su comportamiento cíclico y regular, particularmente en ciertas regiones geográficas, permite una mayor previsibilidad en la generación de energía. (Chozas, 2008)

A diferencia de la energía solar, que solo está disponible durante las horas de luz y depende de la nubosidad, o de la energía eólica, que suele ser intermitente, el oleaje oceánico está presente la mayor parte del tiempo. Esta constancia se traduce en un mayor factor de capacidad, es decir, un mayor porcentaje de tiempo en el que los dispositivos pueden operar generando energía. (Blanco, 2016)

Gracias a su carácter predecible, la energía undimotriz permite una mejor planificación operativa. Ante la posibilidad de tormentas, las predicciones del estado del mar permiten anticipar condiciones adversas que podrían dañar los dispositivos, facilitando su protección. Asimismo, la capacidad de estimar con antelación las características del oleaje permite programar con precisión actividades como pruebas técnicas o tareas de mantenimiento. Esto incluye aprovechar días con baja producción esperada para realizar intervenciones sin comprometer significativamente el rendimiento general. Además, la previsibilidad del recurso contribuye a una mayor estabilidad en el mercado eléctrico, al facilitar el ajuste entre la oferta y la demanda de energía. (Blanco, 2016)

- *Alta densidad energética y mayor potencia*

El agua posee una densidad mucho mayor que el aire, lo que se traduce en una concentración significativamente superior de energía en el movimiento de las olas en comparación con otras fuentes renovables como el viento. La energía por unidad de área en las olas supera ampliamente a la que pueden generar las turbinas eólicas o los paneles solares. Esto permite que, con una infraestructura más compacta y ocupando una menor superficie, se pueda producir una cantidad considerable de energía. (Chozas, 2008)

En contraste con la energía eólica marina (offshore), que requiere amplias extensiones del océano para alcanzar niveles elevados de generación, los dispositivos undimotrices pueden instalarse en áreas más reducidas, aprovechando de forma más eficiente el espacio marítimo disponible. (Blanco, 2016)

Además, en comparación con la energía eólica y solar, el recurso undimotriz presenta una potencia media significativamente mayor. Se estima que una ola puede contener entre 2 y 3 kW/m², mientras que el viento alcanza solo entre 0.4 y 0.6 kW/m², y la radiación solar entre 0.1 y 0.2 kW/m². Esto significa que las olas pueden ofrecer, en promedio, hasta cinco veces más energía que el viento, evidenciando su alto potencial como fuente renovable. (Blanco, 2016)

- *Proximidad a centros de demanda energética*

Muchas ciudades y regiones industriales están ubicadas cerca de la costa, lo que hace que la energía undimotriz sea una opción atractiva debido a la proximidad de las fuentes de energía a los centros de demanda. (Chozas, 2008)

Al estar más cerca de los centros de consumo, la energía generada a partir de las olas requiere menos infraestructura de transmisión y transporte, lo que puede reducir significativamente los costos asociados a la distribución de electricidad. Con la energía undimotriz cercana a las ciudades costeras, se reduce la pérdida de energía por el efecto de su transmisión, haciendo la distribución más eficiente y económica. (Chozas, 2008)

- *Bajo impacto medioambiental*

La energía undimotriz, al igual que la eólica y la solar, es una fuente renovable, lo que implica un bajo impacto ambiental al no depender de recursos finitos. No obstante, estas tecnologías no están exentas de generar ciertos tipos de contaminación, aunque en una escala significativamente menor que las centrales térmicas o nucleares. (Blanco, 2016)

Uno de los principales impactos es la contaminación visual, que varía según el tipo de dispositivo utilizado. Por ejemplo, los sistemas sumergidos no generan este tipo de impacto, mientras que dispositivos como el LIMPET sí lo hacen. Aun así, los aerogeneradores suelen tener un impacto visual mayor debido a su altura y visibilidad a larga distancia. En términos generales, no hay una diferencia sustancial entre la energía undimotriz y la eólica en este aspecto, aunque depende del diseño y ubicación de los equipos. (Blanco, 2016)

En cuanto al impacto sobre la fauna, la energía undimotriz ofrece una ventaja clara sobre la eólica. Los aerogeneradores afectan gravemente a las aves, especialmente si están ubicados en rutas migratorias, provocando la muerte de numerosos ejemplares cada año. En contraste, los dispositivos undimotrices, al igual que los solares, presentan una interacción mínima con la fauna. Según un estudio citado por la Comisión Europea, basado en investigaciones de la Universidad de Uppsala, los dispositivos undimotrices no solo tienen un impacto limitado en los ecosistemas marinos, sino que en algunos casos incluso fomentan la biodiversidad, al ser colonizados por especies marinas sin interferir con su funcionamiento. No obstante, también se ha observado la posible introducción de especies no autóctonas, lo cual podría alterar el equilibrio ecológico. (Blanco, 2016)

Finalmente, se han identificado posibles impactos asociados al ruido y campos electromagnéticos generados por los dispositivos y los cables de transmisión. Estos podrían afectar a especies marinas sensibles a estos estímulos, aunque todavía no hay estudios concluyentes al respecto. (Blanco, 2016)

En resumen, la energía undimotriz se perfila como una tecnología con bajo impacto ambiental, especialmente en comparación con la eólica, presentando beneficios ecológicos potenciales en el entorno marino y una menor afectación sobre la fauna. (Blanco, 2016)

c. Desventajas de la energía undimotriz

- *Altos costos iniciales y de mantenimiento*

Una de las principales desventajas de la energía undimotriz es el alto costo inicial asociado con la investigación, el desarrollo, la construcción y la instalación de los dispositivos. Además, los costos de mantenimiento también pueden ser elevados debido a las condiciones extremas del entorno marino. (Blanco, 2016)

A pesar de los avances en la tecnología, la energía undimotriz todavía se encuentra en una etapa relativamente temprana de desarrollo en comparación con otras renovables, como la solar o la eólica. Esto significa que los costos de investigación y desarrollo son altos, lo que dificulta su competitividad en términos de precios de la electricidad. (Blanco, 2016)

La construcción y colocación de dispositivos undimotrices es compleja, ya que implica trabajar en ambientes marinos hostiles. Esto requiere infraestructura especializada, como barcos y grúas marinas, además de equipos resistentes a la corrosión, lo que incrementa los costos. (Blanco, 2016)

Los dispositivos de energía undimotriz están expuestos a las duras condiciones del océano, como la corrosión por el agua salada, fuertes corrientes, tormentas y variaciones en el oleaje. Mantener los equipos en condiciones operativas puede ser complicado y costoso, lo que aumenta los costos operativos a lo largo del tiempo. (Blanco, 2016)

La corrosión puede tener un impacto negativo en la vida útil de los dispositivos utilizados en este sector, puede tener altos costos en mantenimiento y remplazo. Este es un fenómeno natural que ocurren en los entornos marinos y puede tener un gran impacto en los equipos utilizados en el ámbito energético. La corrosión puede afectar las estructuras offshore, turbinas eólicas marinas, sistemas energéticos undimotriz y mareomotriz, cables submarinos, entre otros. Esto puede provocar degradación en el rendimiento de los equipos e incluso pueden llegar a fallar por completo. (Blanco, 2016)

- *Variabilidad en la generación de energía*

La energía undimotriz enfrenta una limitación técnica importante debido a la baja frecuencia del oleaje, que oscila entre 6 y 22 segundos por ciclo, lo que equivale a una frecuencia media de 0.1 Hz, muy inferior a los 50 Hz en Europa y 60 Hz en Estados Unidos. Para que esta energía sea compatible con la red eléctrica, debe transformarse para ajustar su voltaje y frecuencia, lo cual es más complejo que con otras energías renovables, como la eólica, que produce movimiento rotativo más fácil de convertir. (Blanco, 2016)

La solución a este desafío son los sistemas de transformación de energía (PTO), que permiten adaptar la energía de las olas, aunque su integración aumenta la complejidad y los costos del diseño. Además, cada etapa de conversión implica pérdidas energéticas que afectan el rendimiento del dispositivo. Aunque el problema de la frecuencia no es insalvable, representa un reto clave en la viabilidad y rentabilidad de los proyectos undimotrices. (Blanco, 2016)

- *Sobredimensionamiento*

Uno de los principales retos técnicos de la energía undimotriz radica en la variabilidad extrema del oleaje durante condiciones climáticas adversas. En situaciones de tormenta, los dispositivos pueden enfrentarse a olas de hasta 100 veces la magnitud del oleaje nominal previsto para la zona de instalación.

Esta condición obliga a sobredimensionar las estructuras para garantizar su resistencia y operatividad, lo cual incrementa significativamente los costos de diseño, construcción e instalación. No obstante, este sobredimensionamiento presenta una ineficiencia operativa, ya que, durante la mayor parte del tiempo, el dispositivo operará bajo condiciones normales que no requieren su capacidad máxima estructural, desaprovechando así su potencial de generación en proporción a su tamaño y costo. (Blanco, 2016)

En contraste, tecnologías como la energía eólica presentan una ventaja en este sentido. Los aerogeneradores están diseñados para detenerse automáticamente cuando las velocidades del viento superan los límites operativos, lo que reduce la necesidad de sobredimensionamiento estructural extremo y prolonga la vida útil de los equipos. Esta capacidad de autogestión ante condiciones extremas representa un factor decisivo que ha contribuido a la mayor adopción y competitividad de las energías solar y eólica frente a la energía undimotriz. (Blanco, 2016)

- *Desafíos técnicos y durabilidad*

Los dispositivos undimotrices deben enfrentar condiciones extremas en el océano, lo que representa un desafío técnico importante para su diseño y durabilidad. El agua salada es extremadamente corrosiva, lo que significa que los materiales utilizados en los dispositivos deben ser resistentes y duraderos para evitar la degradación. Los dispositivos también están sujetos a fuerzas intensas debido a las olas, lo que puede provocar fatiga estructural y fallos en los componentes. (Blanco, 2016)

Debido a su ubicación en alta mar, la reparación y el mantenimiento de los dispositivos son operaciones complejas y costosas. Las condiciones climáticas adversas pueden dificultar o retrasar las intervenciones de mantenimiento, lo que puede reducir la fiabilidad del sistema. (Blanco, 2016)

- *Variación del oleaje*

Uno de los principales desafíos en el diseño de dispositivos undimotrices es la variabilidad del oleaje en altura y período, lo que genera una señal eléctrica irregular en la etapa inicial de conversión. Esta señal debe ser estabilizada y transformada para cumplir con los estándares sinusoidales requeridos por la red eléctrica. (Blanco, 2016)

La solución se encuentra en los sistemas PTO, que permiten obtener energía con valores de frecuencia y voltaje adecuados. Posteriormente, esta energía se rectifica y transforma para su integración a la red. Un enfoque común es convertir la energía generada en corriente continua y luego reconvertirla a corriente alterna, aunque el método específico depende del tipo de dispositivo y su aplicación. (Blanco, 2016)

d. Potencial energía undimotriz

Las olas oceánicas, incluyendo las marejadas generadas por sistemas meteorológicos distantes, son una manifestación de la transferencia de energía solar a través del viento. El aprovechamiento de las olas se centra en las olas superficiales del océano, con periodos de entre 0,5 y 30 segundos. A excepción de las mareas, otros tipos de olas carecen de potencial aprovechable.

A pesar de la estabilidad de las olas en comparación con el viento que las genera, el flujo de energía de las olas exhibe una notable variabilidad temporal y espacial, con niveles de potencia que pueden oscilar desde unos pocos vatios por metro hasta varios megavatios por metro durante una tormenta.

A nivel mundial, se estima un potencial de energía de las olas en torno a los 2,7 teravatios, con un margen de incertidumbre del 70%. La estimación del recurso teórico bruto a nivel mundial se sitúa en torno a los 3,7 TW, mientras que el recurso neto se estima en unos 3 TW, representando una reducción del 20%. En el contexto europeo, los recursos brutos y netos son de 381 GW y 286 GW, respectivamente, con una disminución del 25% debido a la presencia de hielo.

En comparación, el consumo mundial de electricidad en 2008 fue de 142.300 teravatios-hora (TWh), lo que equivale a una potencia media de 16,2 TW, y el consumo eléctrico fue de 20.261 TWh y 2,3 TW, respectivamente. Por lo tanto, el potencial total de energía undimotriz supera significativamente el consumo mundial de electricidad. (Pecher y Kofoed, 2017)

Existen las olas cortas que son producidas por el viento, un grupo de estas olas con distintos valores de altura, periodo y dirección, forman una ola real. Los parámetros que caracterizan este tipo de olas son los siguientes, basado en el análisis de dispositivos de aprovechamiento para las olas para la generación de electricidad (Chozas, 2008):

- **Longitud de onda: distancia que separa dos crestas consecutivas**

$$\lambda_0 = \frac{g * T^2}{2 * \pi} \text{ m} \quad (1)$$

$$g = \text{Gravedad} \left(9.81 \frac{\text{m}}{\text{s}^2}\right)$$

$$T = \text{Período de la ola (s)}$$

$$\lambda_1 = \frac{g * T^2}{2 * \pi} \tanh * \left(\frac{2 * \pi * h}{\lambda_0}\right) \text{ m} \quad (2)$$

$$h = \text{profundidad (m)}$$

Nota. Adaptado de Chozas (2008).

- **Período de la ola: tiempo entre dos crestas consecutivas**

$$T = \frac{2 * \pi}{\omega} \text{ s} \quad (3)$$

$$\omega = \text{Velocidad angular}$$

Nota. Adaptado de Chozas (2008).

- **Celeridad de onda: velocidad de traslación de la ola**

$$C = \frac{\lambda}{T} = \frac{\omega}{k} \frac{\text{m}}{\text{s}} \quad (4) \text{ donde } k = \frac{2 * \pi}{\lambda}$$

$$\lambda = \text{Longitud de onda}$$

$$T = \text{Período de ola}$$

$$\omega = \text{Velocidad angular}$$

Nota. Adaptado de Chozas (2008).

- **Celeridad de grupo**

$$C_g = \frac{C}{2} = \frac{g * T}{4 * \pi} \frac{m}{s} \quad (5)$$

$$g = \text{Gravedad } (9.81 \frac{m}{s^2})$$

$$T = \text{Período de ola}$$

$$C = \text{Celeridad de onda}$$

Nota. Adaptado de Chozas (2008).

- **Peso específico agua de río**

$$\rho = 1000 \frac{kg}{m^3}$$

- **Altura de la ola (*H*): distancia entre cresta y parte más profunda**

La energía de las olas está relacionada con la altura de la ola, así como con la velocidad del viento y el período o frecuencia del movimiento. Las siguientes fórmulas representan la energía, el flujo de energía y la potencia por metro de frente de ola. Es importante señalar que, a mayor velocidad del viento, también aumentan los valores de energía y potencia de las olas. (Chozas, 2008)

- **Densidad de energía**

$$E = \left(\frac{\rho * g * H^2}{8} \right) * \lambda_1 \frac{J}{m} \quad (6)$$

$$\rho = \text{Densidad del agua}$$

$$g = \text{Gravedad } (9.81 \frac{m}{s^2})$$

$$H = \text{profundidad}$$

Nota. Adaptado de Chozas (2008).

- **Flujo de energía**

$$\text{Flujo de energía} = E * C_g \frac{kW}{m} \quad (7)$$

$E = \text{Densidad de energía}$

$C_g = \text{Celeridad de grupo}$

Nota. Adaptado de Chozas (2008).

En áreas propicias, los flujos de energía promedio oscilan entre 35 y 60 kW/m de frente de ola, lo que corresponde a olas con amplitudes alrededor de 2 metros y períodos prolongados, que varían entre 7 y 10 segundos. A nivel mundial, se estima una densidad media de energía de 8 kW/m a lo largo de la costa. La altura promedio de las olas se encuentra entre 1 y 2 metros (45%) y entre 2 y 3 metros (30%). Los períodos generalmente están entre 6 y 8 segundos (40%) y entre 8 y 10 segundos (30%). Se considera que una ola se clasifica como alta cuando tiene una altura de 3.5 metros y un período de 17 segundos. (Chozas, 2008)

En cuanto a la energía promedio en ríos, actualmente no existen dispositivos diseñados exclusivamente para operar en estos entornos. La mayoría de los ríos presentan aguas poco profundas, lo que dificulta la obtención de datos precisos sobre la densidad de energía disponible. Además, las características propias de los ríos, como la menor densidad energética de sus ondas, hacen que los dispositivos undimotrices convencionales no sean eficientes en estos sitios.

Sin embargo, se continúa investigando en adaptaciones y diseños específicos para aguas de baja energía y entornos fluviales, y se espera que el desarrollo de tecnologías híbridas pueda abrir oportunidades para la generación de energía en algunos ríos en el futuro. Más adelante se evaluará el potencial de los dispositivos undimotrices en función de las condiciones específicas de la cuenca. (Chozas, 2008)

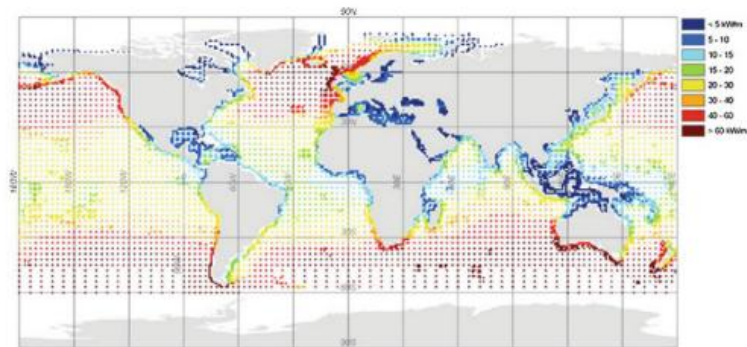


Figura 18: Detalle del potencial mundial de la energía producida por las olas

Nota. Adaptado de OurWorldData (2022).

e. Conceptos físicos

Dinámica de olas

Las olas en los mares y océanos son originadas por la influencia del sol, que provoca un calentamiento irregular de la Tierra, generando movimiento de masas de aire y vientos que producen el oleaje. La interacción entre el viento y la superficie del agua también afecta el oleaje, ya que los vientos transfieren energía al agua, formando las olas. La altura, frecuencia y forma de las olas dependen de factores como la fuerza y dirección del viento, la profundidad del agua y la topografía del fondo marino. Las olas son un reflejo de la compleja relación entre el sol, la atmósfera y los océanos. En alta mar, el viento puede generar olas de diferentes formas y tamaños, algunas peligrosas para las embarcaciones. Cuando las olas se acercan a la costa, pierden velocidad debido al fondo marino, y eventualmente se rompen formando rompientes. (Palomino, 2017)

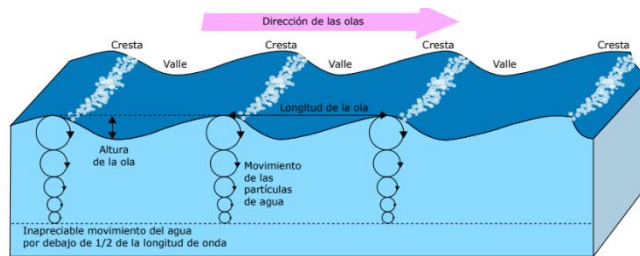


Figura 19: Esquema de movimiento de una ola

Nota. Adaptado de Kimerus (2024).

Conversión de energía mecánica a eléctrica

La energía mecánica se refiere a la energía asociada tanto con la posición como con el movimiento de los objetos, e implica las diversas formas de energía que posee un objeto en movimiento, como la energía cinética y la potencial. Su expresión matemática es:

$$E_m = E_p + E_c$$

Ecuación 1: Donde E_m es la energía mecánica, E_p es la energía potencial y E_c la energía cinética

La energía mecánica puede ser cinética (relacionada con el movimiento) o potencial (relacionada con la posición), mientras que la energía eléctrica se relaciona con el movimiento de los electrones a través de un conductor. La conversión de energía mecánica a eléctrica se logra mediante un generador eléctrico, que transforma la energía mecánica en eléctrica utilizando un campo magnético. En un generador eléctrico, un conductor, como un alambre, se hace girar dentro de un campo magnético, lo que induce una corriente eléctrica en el conductor. Los generadores eléctricos tienen una amplia gama de usos, desde la producción de energía en grandes plantas eléctricas hasta la generación de electricidad en pequeñas turbinas hidráulicas, así como en automóviles para recargar baterías y en dispositivos portátiles como linternas y radios. (Fuentes, 2023)

Mecánica de fluidos

La mecánica de fluido es un área especializada en el estudio del movimiento de estos. Tiene una gran importancia para la ingeniería, ya que permite describir el movimiento de los fluidos a través de tuberías, lo cual es de suma importancia para los sistemas de bombeo y de transporte de fluidos. El estudio de la mecánica de fluidos se basa en dos tipos de fluidos, en reposo, los cuales ejercen una fuerza sobre las paredes de los recipientes que los contengan y sobre cualquier otro objeto que se encuentre sumergido en ellos, y por otra parte el fluido en movimiento, que ejemplos de estos pueden ser las corrientes de aire, el agua en un río o el agua saliendo de una tubería. (AULA21, 2022)

La mecánica de fluidos también se centra en las interacciones de los fluidos y el entorno en el que se encuentran. Esta área se basa en diferentes leyes, de las cuales se puede destacar la primera y segunda ley de la termodinámica, además de la ley de conservación de la masa y cantidad de movimiento. (AULA21, 2022)

f. Condiciones del mar

Oceanografía

La oceanografía es un campo científico interdisciplinario que estudia los mares y océanos, abordando aspectos como fenómenos, interacciones con continentes y atmósfera, composición, estructura, dinámica, límites y aspectos físicos, químicos y biológicos. Pertenece al conjunto de las geociencias, que se enfocan en diversos aspectos de la Tierra. Los estudios oceanográficos se dividen en partes cualitativas y cuantitativas, que identifican condiciones meteorológicas, geológicas, bióticas y relacionan estos aspectos con parámetros fisicoquímicos del medio marino. La oceanografía busca comprender procesos y variabilidad en mares y océanos, especialmente aquellos que impactan la producción biológica y perturban el ecosistema marino. (CSIC, 2024)

Movimiento de las olas

El movimiento de las olas no se limita al mar, ya que también se puede apreciar en otros cuerpos de agua, como lagos y ríos. Las ondas de energía se dispersan sobre la superficie del agua al entrar en contacto con el viento, pero antes de que ocurra todo esto debe existir el estímulo del sol. Cuando la luz calienta la atmósfera, genera el viento el cual a su vez genera el movimiento de las olas. El tamaño de las olas depende de la intensidad del viento, el tiempo que dure y que exista un recorrido lo suficientemente amplio sin interrupciones. En mar abierto las olas pueden moverse a donde quiera, sin ningún tipo de restricción o recorrido. (Watsay, 2023)

Fuerza de las olas

La fuerza del oleaje es capaz de desplazar el agua en grandes distancias perdiendo energía por su recorrido. Por lo que las olas tienen la capacidad de llegar una y otra vez a la costa, con todo su poder, levantando barcos e incluso derribando edificios. Solo en los mares de Europa se tiene registrado que las olas son movidas por el equivalente a 1000 Terawatios/horas anuales. (Antoniolidia, 2023)

Altura de las olas

La Escala de Douglas es un sistema que clasifica y describe el estado del mar según la altura de las olas. Fue desarrollada en 1917 por el almirante inglés Henry Percy Douglas mientras servía en el Servicio Meteorológico de la Armada Británica, convirtiéndose desde entonces en la clasificación más comúnmente utilizada debido a su simplicidad descriptiva para categorizar las condiciones del mar. La escala se fundamenta en la altura relativa de las olas, expresada en metros, lo que constituye el primer código de la escala. Esta altura relativa corresponde a lo que una persona podría observar a simple vista. La Escala de Douglas se divide en nueve grupos que van desde la ausencia de olas hasta olas de mayor altura. (Ochogavia, 2023)

A continuación, se puede observar la clasificación del oleaje según la Escala de Douglas:

- Escala 0 – Olas de 0 metros – Mar liso: Mar totalmente calmado y su superficie apenas tiene movimiento.
- Escala 1 – Olas de 0 a 0.10 metros – Marea rizada: El océano comienza a mostrar signos de agitación en ciertas áreas, dando lugar a pequeñas olas que pueden resultar algo incómodas solo para embarcaciones de menor tamaño.
- Escala 2 – Olas de 0.10 a 0.5 metros – Marejadilla: Durante una marejadilla, se generan olas cortas pero distintivas, las cuales al romperse producen una espuma con un aspecto vidrioso en lugar de blanco.
- Escala 3 – Olas de 0.5 a 1.25 metros – Marejada: Durante una marejada, las olas que se desarrollan son extensas y al romperse generan una espuma blanca. Se percibe claramente la influencia del viento marino, que se diferencia del movimiento general del mar.
- Escala 4 – Olas de 1.25 a 2.5 metros – Fuerte marejada: Se originan olas de mayor longitud, que exhiben crestas cubiertas de espuma en todas direcciones. Al romper, las olas producen un sonido constante y suave.
- Escala 5 – Olas de 2.5 a 4 metros – Marea gruesa: A partir de este punto en la escala, se observan olas de considerable altura que crean extensas áreas de espuma blanca. Cuando estas olas rompen, el mar emite un sonido sordo similar al de objetos siendo arrojados.

- Escala 6 – Olas de 4 a 6 metros – Marea muy gruesa: En esta etapa, el mar está agitado, y la espuma blanca generada por las olas comienza a agruparse en franjas siguiendo la dirección del viento.
- Escala 7 – Olas de 6 a 9 metros – Marea arbolada: La longitud y la altura de las olas experimentan un aumento significativo. La espuma se concentra en franjas estrechas, siguiendo la dirección del viento.
- Escala 8 – Olas de 9 a 14 metros – Marea montañosa: A partir de este punto en la escala, las olas son altas y extensas, con crestas que se desploman como cascadas. En las vastas extensiones cubiertas de espuma, comienzan a aparecer bandas blancas que siguen la dirección del viento, y el área circundante del mar también adquiere un tono blanquecino.
- Escala 9 – Más de 14 metros – Marea enorme: A partir de este punto en la escala, las olas alcanzan alturas tan impresionantes que a veces los barcos quedan ocultos tras ellas. El mar se cubre de espuma blanca, dispuesta en franjas que siguen la dirección del viento, mientras que el estruendo del mar al romper las olas es potente y ensordecedor. El aire está tan saturado de agua pulverizada que la visibilidad de objetos distantes resulta prácticamente imposible.

(Ochogavia, 2023)

g. Ubicaciones con potencial undimotriz

Por medio del estudio de IRENA, hoy en día existen 33 convertidores de energía eléctrica por medio del movimiento de las olas, los cuales tienen una capacidad de 2.3 MW. Estos equipos se encuentran localizados en Hawái, Francia, Gibraltar, Israel, Italia, Portugal y España. Según los datos de Seabasaed, las mejores regiones para desarrollar una empresa con fines de generar electricidad mediante fuentes marinas se encuentran en regiones como las costas pacíficas de Chile, la atlántica de Argentina o el sur Indico. (*IRENA – International Renewable Energy Agency, 2024*)

En todos en todos los lugares costeros hay movimiento ondulatorio de lámina del agua, pero no en todos se tiene un gran potencial para la generación de energía eléctrica. En Europa toda la parte atlántica posee un buen recurso, mejor si se encuentra más al norte. (*IRENA – International Renewable Energy Agency, 2024*)

Las olas, como manifestaciones de energía en la superficie marina, tienen la capacidad de recorrer distancias enormes, llegando incluso a millones de kilómetros. En áreas como el Atlántico Norte, la energía almacenada en estas olas puede ser considerable, alcanzando hasta 10 kilovatios por metro cuadrado de océano. Esta cantidad es significativa si consideramos la vasta extensión de la superficie oceánica.

Las regiones del océano con mayor acumulación de energía en las olas se encuentran típicamente más allá de los 30 grados de latitud, tanto norte como sur, donde los vientos son más intensos. (IRENA – *International Renewable Energy Agency*, 2024)

Es poco probable encontrar una ubicación que cumpla perfectamente todos los criterios mencionados. Sin embargo, el mejor equilibrio entre ellos, que resulte en el menor costo global, debería ser el factor determinante para valorar un proyecto en una ubicación específica. Algunas de las ubicaciones más prometedoras son las siguientes:

- Costas sur y oeste por debajo del trópico de Capricornio (por ejemplo, Australia, Nueva Zelanda, Sudáfrica y Chile): presentan una alta potencia media de las olas, baja variabilidad estacional y reducida relación entre olas de 100 años y olas medias. (Pecher y Kofoed, 2017)
- Costas orientales por debajo del trópico de Capricornio (por ejemplo, Australia, Nueva Zelanda, Sudáfrica, Argentina, Uruguay y el sur de Brasil): cuentan con una potencia media de las olas considerable, con baja variabilidad estacional y una baja relación entre la ola de 100 años y la ola media. (Pecher y Kofoed, 2017)
- Costa oeste de Estados Unidos: exhibe una potencia media de las olas destacable, con baja variabilidad estacional y una baja relación entre la ola de 100 años y la ola media. (Pecher y Kofoed, 2017)
- Atlántico Norte (Europa y costa este de EE. UU.): presenta una elevada potencia media de las olas y olas pronunciadas, pero una alta variabilidad estacional y una relación entre olas de 100 años y olas medias que necesita ser considerada cuidadosamente. (Pecher y Kofoed, 2017)

El rendimiento energético de un convertidor de energía de las olas se ve notablemente mejorado en presencia de olas pronunciadas, ya que estas generan movimientos más frecuentes y/o amplios del dispositivo absorbente de energía. En contraste, en presencia de olas largas (de oleaje), los movimientos de la superficie del agua son menos frecuentes y más lentos, lo que resulta en movimientos más pausados y de menor amplitud del mecanismo activado por las olas. (Pecher y Kofoed, 2017)

Aspectos clave para una ubicación óptima de los Convertidores de Energía de las Olas (CME):

- Alta densidad energética media de las olas, superior a 15 kilovatios por metro (kW/m), dado que esta es la fuente primaria de energía.
- Elevada inclinación media de las olas, superior al 1,5%, ya que se observa un rendimiento de conversión de energía de las olas significativamente mayor en presencia de olas inclinadas.

- La relación entre la altura máxima y la altura media de las olas es baja, dado que el diseño del convertidor de energía de las olas se construye para resistir olas extremas, como una ola de 100 años. Este término se refiere a un evento de ola que se espera que ocurra una vez cada 100 años, es decir, hay un 1% de probabilidad de que se presente en cualquier año determinado. Al considerar esta medida, se asegura que el convertidor pueda soportar condiciones climáticas severas y garantizar su operatividad. Sin embargo, su producción de energía se optimiza en función de las condiciones medias de las olas, que son más frecuentes y reflejan el comportamiento habitual del mar. Así, el sistema está diseñado para ser robusto frente a eventos extremos, mientras que su funcionamiento diario se basa en las olas más comunes
- Escasa variación mensual en la densidad energética de las olas, lo cual facilita una producción estable de energía y mejora el factor de capacidad cuando el clima de olas es constante a lo largo del año.
- Proximidad a la costa, infraestructuras y usuarios finales, lo que reduce significativamente los costos de capital y operativos asociados al proyecto.
- Profundidad del agua razonable, entre 30 y 60 metros, que puede impactar considerablemente en los costos de amarre y tendido de cables.

(Pecher y Kofoed, 2017)

h. Aspectos económicos

Las siguientes características representan los aspectos fundamentales que deben resaltarse en la conversión de energía undimotriz para demostrar su viabilidad económica a largo plazo:

- Supervivencia: El dispositivo de conversión de energía undimotriz demanda un sistema de anclaje confiable y, de ser posible, un mecanismo de seguridad pasivo capaz de mitigar eficazmente cargas extremas. Se entiende por "pasivo" aquel sistema de seguridad que puede activarse automáticamente sin requerir intervención externa, como el suministro eléctrico u otros. (Pecher y Kofoed, 2017)
- Fiabilidad y facilidad de mantenimiento: Es esencial garantizar un acceso sencillo e inspección de las partes críticas del dispositivo de conversión de energía undimotriz. Además, sería altamente ventajoso que la mayoría, o incluso la totalidad, de las tareas de mantenimiento pudieran realizarse *in situ*, sin necesidad de llevar el dispositivo a puerto. (Pecher y Kofoed, 2017)
- Rendimiento energético global: El dispositivo de conversión de energía undimotriz debe incorporar una tecnología eficiente tanto para la captura de la energía de las olas como para su conversión en energía eléctrica. Debe generar una potencia eléctrica uniforme y mantener un alto factor de capacidad para evitar pérdidas significativas a lo largo de la cadena de conversión. (Pecher y Kofoed, 2017)

- Escalabilidad: A fin de ser económicamente viable a gran escala, el dispositivo de conversión de energía undimotriz debe ser capaz de alcanzar capacidades de varios megavatios (MW). Para mejorar continuamente su costo, debe ser adaptable, permitiendo la expansión de sus dimensiones, similar a lo observado en los aerogeneradores marinos. Lamentablemente, muchos dispositivos de conversión de energía undimotriz alcanzan su tamaño óptimo a niveles demasiado bajos, lo que impide su evolución hacia sistemas de múltiples MW (>5 MW). La replicación de los dispositivos de conversión de energía undimotriz no influye significativamente en los costos promedio de infraestructura y tecnología, y, por ende, no mejora considerablemente el costo del dispositivo o el proyecto de energía undimotriz. (Pecher y Kofoed, 2017)
- Beneficios ambientales: Se espera que los dispositivos de conversión de energía undimotriz contribuyan a un sistema energético sostenible, minimizando su impacto ambiental y ofreciendo un beneficio ambiental significativo. Los dispositivos undimotrices, al tener un bajo impacto ambiental en comparación con las fuentes de energía convencionales educen la necesidad de inversiones en medidas de mitigación y restauración ambiental. Esto puede liberar recursos que pueden ser reinvertidos en otras áreas de desarrollo económico. (Pecher y Kofoed, 2017)

La industria de la energía undimotriz promueve la creación de empleos en investigación, desarrollo, instalación y mantenimiento de tecnologías limpias. Esto no solo impulsa la economía local, sino que también genera empleos sostenibles en sectores de alta demanda, aumentando la resiliencia económica de la comunidad. (Pecher y Kofoed, 2017)

D. Dispositivos undimotrices

Los dispositivos de conversión de energía undimotriz aprovechan la energía cinética de las olas marinas para generar electricidad. Aunque se cuenta con un conocimiento teórico sólido sobre las olas del mar, en la práctica resulta complicado caracterizar, reproducir y predecir con precisión las condiciones ambientales específicas en alta mar debido a la complejidad del fenómeno y la influencia de múltiples parámetros ambientales. Entre estos parámetros se encuentran la temperatura, velocidad del viento, presión atmosférica, humedad, temperatura del agua, densidad, salinidad, profundidad, características del oleaje, corrientes de marea y la distancia al dispositivo desde la línea costera. A pesar de operar según principios distintos, la mayoría de los convertidores de energía undimotriz comparten similitudes desde una perspectiva genérica debido a su entorno y objetivos comunes. (Blanco, 2016)

1. Componentes de un generador undimotriz

Transmisión mecánica

Emplea una caja de cambios para convertir la energía mecánica proporcionada por el oleaje en energía cinética de rotación con las revoluciones apropiadas para el funcionamiento del alternador y la generación eléctrica a una frecuencia óptima. Sin embargo, este método no se considera óptimo debido a su complejidad y alto número de componentes mecánicos, lo que aumenta las pérdidas de energía por fricción y complica los procedimientos de mantenimiento. Además, su viabilidad se ve comprometida por la necesidad de relaciones de transmisión extremadamente altas, lo que implica el uso de engranajes de gran tamaño que disminuyen la eficiencia global del sistema. (Blanco, 2016)

Turbina hidráulica

Cada vez que son golpeados por una ola, estos dispositivos acumulan agua a una altura específica para posteriormente liberarla sobre una turbina. Esta técnica aumenta el caudal y, en consecuencia, la potencia transmitida a la turbina, lo que resulta en un incremento del voltaje y la frecuencia generados. (Blanco, 2016)

La "transferencia mediante turbina" se refiere al método en el que un flujo de fluido, como agua de mar o aire, impulsa una turbina que está conectada directamente a un generador.

Este enfoque se utiliza en dispositivos como las columnas de agua oscilante (OWC) y los sistemas de desbordamiento. Los generadores que se emplean en los OWC tienen requisitos similares a los de las turbinas eólicas, como la necesidad de operar con velocidad variable. (Blanco, 2016)

Una de las principales ventajas de utilizar turbinas que emplean agua de mar es que cualquier fuga de fluido no ocasiona problemas ambientales. Sin embargo, el agua de mar es un fluido complicado debido a sus componentes impredecibles. En dispositivos cercanos a la costa, las partículas abrasivas pueden dañar los sellos y válvulas, y la cavitación podría representar un desafío, a menos que la turbina esté en aguas profundas para mantener una presión adecuada. En dispositivos de desbordamiento, donde se experimenta baja presión, se suelen utilizar turbinas de tipo hélice, como las turbinas Kaplan. (Blanco, 2016)

Sistema neumático

Estos dispositivos están equipados con una cámara que cuenta con dos aberturas, una expuesta al oleaje y otra a la atmósfera. Cuando el nivel de agua en la cámara fluctúa debido al movimiento de las olas, la presión del aire varía periódicamente, lo que resulta en la expulsión y absorción de aire de la cámara hacia la atmósfera, generando así un movimiento de rotación en una turbina. La principal ventaja radica en el intercambio de energía entre el agua y el aire, dado que el aire, al ser menos denso, adquiere una velocidad considerablemente mayor. (Blanco, 2016)

Sistema hidráulico

Este sistema aprovecha la energía mecánica obtenida de las olas para presurizar un fluido utilizando un cilindro hidráulico. Una vez que el fluido se encuentra a alta presión, se emplea para generar movimiento rotativo en un motor, que a su vez acciona un alternador. Con el fin de garantizar que la energía generada tenga un voltaje y una frecuencia óptimos, estos sistemas suelen estar equipados con acumuladores que permiten almacenar energía adicional y lograr un funcionamiento más suave del motor hidráulico. (Blanco, 2016)

El uso de un sistema hidráulico es otro enfoque para convertir el movimiento oscilante de baja velocidad de la interfaz principal de un convertidor de energía undimotriz (WEC). Dado que las olas generan grandes fuerzas a bajas velocidades, los sistemas hidráulicos son ideales para absorber energía en estas circunstancias.

Operar a una presión de 400 bares es una ventaja importante para algunos WEC, ya que, cuando el tamaño y el peso son limitaciones, la fuerza producida por estos sistemas supera a la de las máquinas eléctricas convencionales. (Chozas, 2008)

Un circuito hidráulico básico para un sistema de toma de potencia (PTO) de un WEC funciona por medio de un pistón de un cilindro hidráulico el cual es movido por una boya flotante, lo que hace que el fluido pase a través de válvulas de retención hacia un motor hidráulico.

En este caso, el generador puede funcionar a velocidad constante, mientras que el motor hidráulico, con capacidad variable, regula la velocidad para mantener el generador en una velocidad constante, a pesar de la variabilidad del caudal. La capacidad del motor puede ajustarse mediante la medición de las condiciones del mar o del flujo de fluido dentro del sistema. También puede utilizarse una válvula de estrangulamiento para controlar el flujo hacia el motor. (Chozas, 2008)

Los acumuladores en el circuito almacenan energía y mantienen un flujo estable hacia el motor hidráulico. Además, el acumulador de baja presión ayuda a prevenir la cavitación en el lado de baja presión. Si las olas tienen un comportamiento cercano al sinusoidal, el flujo generado se suaviza con el acumulador, mientras el motor de capacidad variable acciona el generador. (Chozas, 2008)

El diseño hidráulico del WEC Pelamis sigue este esquema, donde los acumuladores desacoplan los cilindros hidráulicos de los motores, proporcionando un suministro estable de energía a las bombas. Se emplean válvulas activas tanto para rectificar el flujo como para ajustar el par de reacción. Se señala que las pérdidas en la transmisión primaria pueden mantenerse por debajo del 20% en diversas condiciones operativas. (Chozas, 2008)

Unidad externa

Otra estrategia para garantizar condiciones óptimas en la salida del convertidor es emplear unidades de almacenamiento de energía. Estas unidades permiten almacenar la energía recolectada de varias olas en un dispositivo de almacenamiento. Una vez acumulada una cantidad adecuada de energía, se procede a su procesamiento mediante diversos dispositivos eléctricos para facilitar su conexión a la red eléctrica. (Blanco, 2016)

Conexión directa

Este tipo de sistemas implica la conexión directa de las partes móviles del dispositivo de captura de energía undimotriz con un generador eléctrico. Su principal ventaja radica en la reducción significativa de elementos mecánicos en el dispositivo, lo que disminuye los costos de fabricación y mantenimiento, resultando en un sistema más económico en comparación con la conexión mecánica directa o el sistema hidráulico. (Blanco, 2016)

El generador eléctrico más comúnmente empleado es el generador lineal, que opera mediante imanes potentes que se desplazan de forma lineal y alternativa dentro de un bobinado de cobre, generando corriente eléctrica en dicho bobinado.

Sin embargo, la limitación principal de este tipo de sistema es que su movimiento coincide con el de las olas, lo que resulta en una frecuencia baja. (Blanco, 2016)

2. Subcomponentes de un generador undimotriz

Subsistema hidrodinámico

Constituye el sistema primario de absorción del oleaje para aprovechar su energía. Su diseño varía según la tecnología empleada, como oscilación de cuerpos, columnas de agua o principios de rebose. Está conectado a los subsistemas de reacción y de toma de fuerza, a través de los cuales transfiere activamente fuerzas y movimientos. (Chozas, 2008)

Subsistema de toma de fuerza

Su función es convertir la energía captada del oleaje (por el subsistema hidrodinámico) en electricidad. Puede basarse en distintos principios, entre los más comunes se encuentran la hidráulica, la mecánica de accionamiento directo, los generadores lineales, así como turbinas de aire y agua de baja altura. (Chozas, 2008)

Subsistema de reacción

Este mantiene el convertidor de energía de las olas en posición respecto al fondo marino y ofrece un punto de reacción para la toma de fuerza y/o soporte para los subsistemas hidrodinámicos. (Chozas, 2008)

Subsistema de control e instrumentación

Considerada como la parte inteligente del sistema, se encarga del control del convertidor de energía de las olas y de la toma de medidas. Está compuesto principalmente por procesadores para la automatización, procesos electromecánicos, sensores y adquisición de datos, comunicación y transferencia de información, así como interfaz humana. La configuración y las interconexiones de estos subsistemas pueden variar según el diseño particular del dispositivo. (Chozas, 2008)

3. Dirección del oleaje de los dispositivos

Dispositivos atenuadores

Estos usan los movimientos de flexión de los dispositivos para generar energía a través de bombas hidráulicas. Los atenuadores son dispositivos que se alinean de manera paralela a la dirección del oleaje. Básicamente, "se desplazan" sobre las olas, generando electricidad que luego es transportada por cables. Estos dispositivos suelen tener una longitud considerable y su función principal es amortiguar el impacto de las olas, aprovechando así su energía mecánica. Un ejemplo de este tipo es el dispositivo "Pelamis", que se compone de varias secciones cilíndricas conectadas entre sí.

Estas secciones se mueven de manera relativa entre ellas, lo que permite generar energía al bombear aceite a alta presión mediante brazos hidráulicos que transforman ese movimiento en energía. (Técnica, 2021)

Dispositivos finalizadores

Además, están los finalizadores o terminadores, que funcionan de manera diferente al resto de los dispositivos. En este caso, el oleaje no continúa su trayectoria natural, sino que impacta directamente contra el dispositivo, lo que provoca que las olas "rompan" al chocar con él. Estos dispositivos suelen ser grandes estructuras rígidas y robustas diseñadas específicamente para aprovechar la energía generada por este proceso. Se colocan de forma perpendicular a la dirección del oleaje, lo que les permite ser golpeados con fuerza por las olas. (Técnica, 2021)

Este tipo de dispositivos está diseñado para captar la energía del movimiento del agua de una manera muy efectiva, ya que el impacto constante de las olas genera una considerable cantidad de energía. Al ser sometidos a la violencia del oleaje, estos finalizadores pueden transformar la energía cinética del agua en energía eléctrica, aprovechando cada ola que se rompe en su superficie. (Técnica, 2021)

Además de su función principal de generación de energía, los finalizadores pueden ayudar a proteger la costa al reducir la energía del oleaje que llega a las playas y los ecosistemas cercanos, lo que contribuye a la mitigación de la erosión costera. Su diseño y colocación son críticos para maximizar la captación de energía y minimizar el impacto ambiental, por lo que suelen ser objeto de estudios detallados antes de su instalación. (Técnica, 2021)



Figura 20: Dispositivo finalizador (flotante asimétrico)

Nota. Adaptado de Técnica (2021).

Extractores puntuales

Por último, los extractores puntuales, que son dispositivos que presentan dimensiones horizontales considerablemente más pequeñas que la longitud de onda de las olas que los impactan. Esta característica significa que la dirección en la que reciben las olas no es particularmente relevante para su funcionamiento. Debido a su tamaño reducido en el plano horizontal, los extractores puntuales ofrecen una notable versatilidad, permitiendo la captación de energía eléctrica a través de diferentes métodos. (Técnica, 2021)

Esta adaptabilidad es una de sus principales ventajas, ya que pueden ser implementados en diversas condiciones y configuraciones. Por ejemplo, pueden integrarse fácilmente en instalaciones existentes o utilizarse en entornos donde el espacio es limitado. Además, su diseño permite que puedan operar eficazmente en una variedad de situaciones, capturando la energía de las olas de manera eficiente independientemente de la dirección del oleaje. (Técnica, 2021)

Los extractores puntuales también pueden contribuir a la diversificación de la generación de energía, ya que su capacidad para adaptarse a diferentes entornos y condiciones hace que sean una opción atractiva en proyectos de energía undimotriz. Al maximizar la eficiencia de la captura de energía a partir de las olas, estos dispositivos pueden desempeñar un papel importante en la transición hacia fuentes de energía más sostenibles. (Técnica, 2021)



Figura 21: Dispositivo puntuales (captador en Langosteira, Coruña)

Nota. Adaptado de Caro (2023).

4. Tecnologías de generación undimotriz

Columnas oscilantes

La Columna de Agua Oscilante (Oscillating Water Column) es un dispositivo que genera electricidad mediante un proceso en dos etapas que aprovecha el movimiento de las olas y el aire. Este sistema funciona de la siguiente manera: cuando una ola entra en la columna, el agua empuja el aire atrapado en el interior de la estructura, forzando su paso a través de una turbina. Este aumento en la presión del aire provoca que la turbina gire. Luego, cuando la ola retrocede y sale de la columna, el aire vuelve a pasar por la misma turbina debido a la disminución de la presión que se produce en el lado del océano, haciendo que el aire vuelva a fluir hacia dentro. (Textoscientíficos, 2009)

La turbina Wells, empleada en este sistema, está diseñada para girar en la misma dirección sin importar el sentido del flujo de aire, ya sea que este esté entrando o saliendo de la columna. Gracias a este diseño, la turbina puede mantener un movimiento constante, permitiendo que el generador asociado produzca electricidad de forma continua. (Textoscientíficos, 2009)

Este enfoque tiene varias ventajas. Al aprovechar tanto el movimiento ascendente como descendente de las olas, el OWC maximiza la cantidad de energía que puede extraer del entorno. Además, su diseño relativamente sencillo, con pocas partes móviles, contribuye a una mayor durabilidad en las duras condiciones marinas. La capacidad de generar energía independientemente de la dirección del flujo de aire lo convierte en un sistema eficiente y confiable para la producción de electricidad a partir del movimiento del océano. (Textoscientíficos, 2009)

En términos de aplicaciones, las columnas de agua oscilante se pueden instalar tanto en estructuras costeras como flotantes, lo que las hace versátiles para diferentes tipos de entornos marítimos. También representan una opción viable para complementar la generación de energía renovable en regiones donde el oleaje es constante, contribuyendo a la descarbonización del sistema energético. (Textoscientificos, 2009)

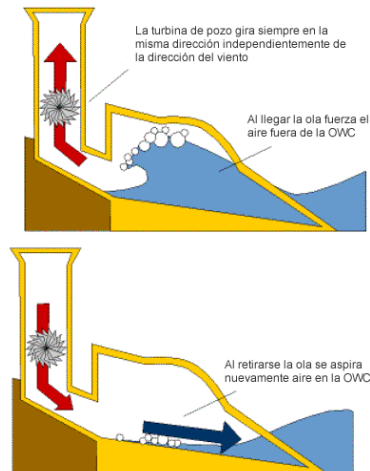


Figura 22: Esquema de funcionamiento de columna oscilante

Nota. Adaptad de Textoscientificos (2009).

Dispositivos de desbordamiento

Los dispositivos de desbordamiento son sistemas de aprovechamiento de energía undimotriz que operan en la superficie del mar mediante un diseño que utiliza rampas cónicas. Estas rampas guían el agua hacia una plataforma elevada por encima del nivel del mar, donde el agua acumulada adquiere energía potencial. Posteriormente, al permitir que esta agua fluya de regreso al océano a través de una turbina, se genera electricidad. Este proceso es similar al de una presa hidroeléctrica, pero en un entorno marino. (Soers, 2019)

Existen dos tipos principales de dispositivos de desbordamiento: los fijos y los flotantes. Ambos utilizan rampas cónicas que se colocan de manera perpendicular a la dirección de las olas para capturar de forma eficiente la energía de estas. A medida que las olas golpean los lados del dispositivo, el agua fluye hacia un depósito elevado por encima del nivel del mar. Este depósito actúa como un reservorio temporal de agua, aprovechando la energía de las olas. (Soers, 2019)

Una vez que el agua se ha almacenado en este depósito, se libera para que fluya a través de una turbina Kaplan, que es capaz de convertir la energía potencial del agua en electricidad mientras esta regresa al mar. Las turbinas Kaplan, que son altamente eficientes para manejar grandes volúmenes de agua a baja presión, permiten que estos dispositivos de desbordamiento generen energía de manera continua y efectiva. (Soers, 2019)

Este tipo de tecnología es muy prometedora, ya que aprovecha tanto el movimiento constante de las olas como la capacidad de almacenar temporalmente agua para regular la producción de energía. Además, al poder diseñarse como estructuras flotantes, los dispositivos de desbordamiento ofrecen una mayor flexibilidad para adaptarse a diferentes profundidades y condiciones marinas, haciéndolos útiles en una variedad de entornos oceánicos. (Soers, 2019)

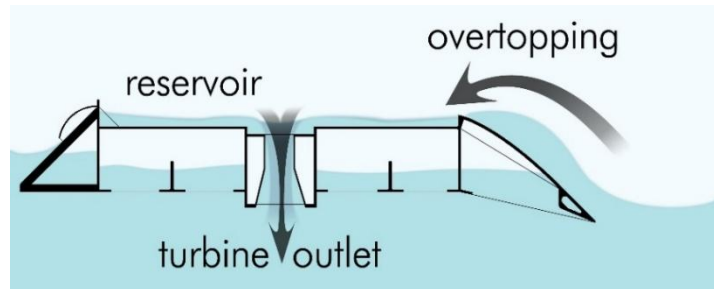


Figura 23: Esquema de funcionamiento de dispositivo de desbordamiento

Nota. Adaptado de Energía Undimotriz (2016).

Dispositivos oscilantes

Proporcionan un movimiento de oscilación vertical y/o de rotación que es convertido por un sistema hidráulico o mecánico en un movimiento lineal o rotativo, que a su vez mueve un generador eléctrico. Dentro de los dispositivos oscilantes podemos distinguir los flotantes y los sumergidos. (Ormaza, 2011)

Entre los dispositivos flotantes, destacan los absorbedores puntuales, como las boyas Power Buoy y la tecnología OPT de Santoña, que aprovechan el movimiento entre el flotador y el mástil para generar electricidad mediante un sistema hidráulico. La energía producida se envía a tierra a través de cables submarinos. Otros ejemplos incluyen el IPS Buoy, el Aqua Buoy y el Wavebob. También existen dispositivos de estructura articulada, como el Pelamis, que genera electricidad al rotar sus segmentos unidos por un sistema hidráulico. Se calcula que 30 de estos sistemas podrían alimentar aproximadamente a 20.000 hogares. (Ormaza, 2011)

Entre los dispositivos sumergidos, se encuentran los sistemas de movimiento lineal, como el AWS (Archimedes Wave Swing), que convierte las variaciones de presión bajo el agua en energía. También están los dispositivos de movimiento rotativo, como el Wave Roller y el Oyster, que utilizan pistones para presurizar agua marina y transformarla en energía hidroeléctrica en tierra. (Ormaza, 2011)



Figura 24: Dispositivo oscilante (Power Buoy)

Nota. Adaptado de boundarycreative.co.uk (2022).

5. Localización de los dispositivos

Shoreline Devices

Estos artefactos se ubican estratégicamente en la zona costera, pudiendo ser sumergidos en aguas superficiales costeras o anclados en tierra firme. Este tipo de dispositivos costa adentro ofrece ventajas significativas en comparación con otras alternativas, gracias a su ubicación en la línea de costa, lo que facilita en gran medida su mantenimiento y reduce considerablemente los costos operativos asociados. Además, al estar integrados al terreno costero, no requieren de largas extensiones de cables para su conexión a la red eléctrica, lo que supone un ahorro sustancial en inversiones. (Blanco, 2016)

No obstante, una desventaja importante radica en que las olas pierden una cantidad considerable de energía al avanzar por el agua superficial antes de alcanzar la costa, lo que resulta en una reducción en la producción de energía. Sin embargo, este efecto puede ser beneficioso durante condiciones meteorológicas adversas al disminuir el riesgo de daños. (Blanco, 2016)

Nearshore Devices

Este tipo de dispositivo se ubica en aguas someras, se sitúan a distancias de la costa que oscilan entre varios cientos de metros y algunos kilómetros, sin un límite establecido. La principal desventaja radica en que, generalmente, para resistir las fuerzas del oleaje y aprovechar al máximo la energía generada, estos dispositivos deben estar anclados al lecho marino, lo que implica costos significativos.

Tanto los dispositivos anclados como los flotantes enfrentan el desafío de la interacción entre las olas y el lecho marino debido a la poca profundidad, lo que resulta en una pérdida de potencial energético al no aprovechar completamente la fuerza de las olas.

Por último, es importante destacar que se requiere la instalación de líneas de cables para transportar la electricidad generada por estos dispositivos hasta la red eléctrica, lo que conlleva costos adicionales. (Blanco, 2016)

Offshore Devices

Los dispositivos offshore son aquellos ubicados en aguas profundas, a más de 40 metros de profundidad y alejados varios kilómetros de la costa para estar expuestos a oleajes de alta energía. Pueden ser fijados al lecho marino o ser dispositivos flotantes. Aunque su ubicación en mar abierto les otorga un mayor potencial de producción eléctrica debido a la intensidad del oleaje, enfrentan desafíos importantes, como altos costos de supervivencia y mantenimiento debido a la exposición a condiciones adversas y la dificultad de acceso en alta mar. A pesar de estos desafíos, se estima que estos dispositivos son más eficientes que otros, ya que están expuestos a oleajes más intensos. Sin embargo, requieren una extensa red de cables para transportar la energía generada hasta la costa, lo que aumenta significativamente los costos en comparación con otros tipos de dispositivos. (Blanco, 2016)

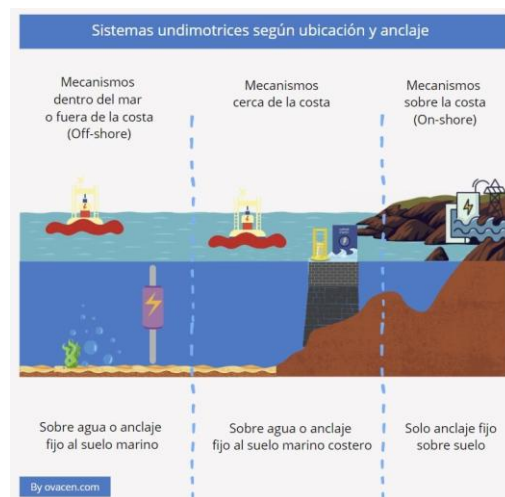


Figura 25: Representación gráfica de la localización de los diferentes tipos de dispositivos

Nota. Adaptado de Segui (2023).

E. Marco legal

El propósito principal de las leyes sobre energías renovables es incentivar el uso y la generación de energías limpias, reduce las dependencias de combustibles fósiles, disminuir emisiones de gases invernadero, y promover una matriz energética más diversificada y sostenible. El gobierno de Guatemala se ha implementado políticas y regulaciones para facilitar las inversiones en proyectos de energías renovables y una mejora en la competitividad del sector eléctrico.

<i>Política</i>	<i>Descripción</i>
Decreto número 52-2003	Ley de incentivos para el Desarrollo de Proyectos de Energía Renovable
Decreto Número 7-2013	Reglamento de la Ley de Incentivos para el Desarrollo de Proyectos de Energía Renovable
Decreto número 96-2000	Ley de la tarifa social para el suministro de energía eléctrica
Decreto número 93-96	Ley general de electricidad
Acuerdo gubernativo 299-98	Reglamento del administrador del mercado mayorista
Acuerdo gubernativo 256-97	Reglamento de la ley general de electricidad República de Guatemala
Acuerdo gubernativo 211-2005	Reglamento de la ley de incentivos para el desarrollo de energía renovable
Decreto número 52-2003	Ley de incentivos para el desarrollo de proyectos de energía renovable
Decreto número 15-2015	Ley de Generación de Energía Distribuida
Resolución CNEE 227-2014	Norma técnica de generación distribuida renovable y usuarios auto productores con excedentes de energía
Política Energética 2019-2050	Política Energética responden a las necesidades de desarrollar el uso los recursos energéticos del país de manera responsable en el marco de la sostenibilidad, pero sobre todo con una visión de largo plazo al año 2050, que permita asegurar la seguridad energética, la competitividad, precios competitivos, la normalización y el bien común de los usuarios de servicios de energía.

Tabla 9: Políticas relacionadas a energía renovables en Guatemala

Nota. Elaboración propia (2024).

VI. METODOLOGÍA

Fase 1: Recopilación de datos

La primera fase del proyecto constó de recopilar datos de diversas fuentes confiables y relevantes para la investigación. El objetivo es poder presentar la información que se encontró previo a la selección del tema sobre la alternativa de la energía undimotriz como fuente de energía eléctrica y la viabilidad de las distintas tecnológicas undimotrices que existen en el contexto guatemalteco. Esta fase muestra los diferentes dispositivos disponibles en el mercado, su modo de operación, sistemas de conversión de energía, y casos de estudio similares a nivel mundial. Datos sobre la geografía, clima, características del oleaje y corrientes en la desembocadura del río y áreas cercanas. Por último, la identificación del sitio con potencial para la instalación de la tecnología undimotriz considerando factores como altura de las olas y consistencia en la corriente.

A través de esta fase se recopiló información mediante el uso de documentos relacionados a las políticas energéticas en el país, informes sobre el potencial de la energía undimotriz en la región e investigaciones previas relacionadas con este tipo de energía en América Latina y regiones costeras similares a las de Guatemala. Además, se abarcará información proporcionada por empresas que trabajan en proyectos undimotrices en América Latina, bases de datos de las Organizaciones internacionales como la Agencia Internacional de Energía Renovable y la Agencia Internacional de Energía sobre el uso y las tendencias globales de la energía undimotriz. También se obtuvo información sobre la biodiversidad marina dentro de la cuenca del Río Motagua en Guatemala y estudios de impacto ambiental relacionados con proyectos de energía undimotriz.

Fase 2: Análisis técnico, económico y ambiental

Para esta fase se seleccionó las tecnologías más adecuadas basadas en su rendimiento, eficiencia energética y capacidad de adaptación a las características de la cuenca. Un análisis de los sistemas según su localización, modos de operación y su capacidad de generación de potencia en función del comportamiento del oleaje. Además, se definió un diseño preliminar de los sistemas seleccionados, detallando componentes clave de los dispositivos, materiales y su logística para la instalación. Mediante las condiciones locales se estimó su rendimiento y se calculó su posible potencial energético basado en la altura de las olas, período y frecuencia.

Por otro lado, se realizó una estimación de costos de inversión inicial que incluya la compra de los equipos, los materiales, la instalación y su transporte, además de incluir costos de operación como lo es su mantenimiento, reparación, entre otros. Una estimación del costo promedio en kW generado, comparado con otro tipo de fuentes de energía renovable y convencionales.

Además, se realizó un análisis de los posibles impactos ambientales en la instalación del sistema, tanto en la biodiversidad como en las zonas costeras. Por medio de normativas ambientales del país, evaluar la compatibilidad de las tecnologías seleccionadas para dichas regulaciones.

Fase 3: Análisis comparativo y selección del sistema óptimo

En esta fase se realizó una evaluación detallada y comparativa de los sistemas undimotrices seleccionados, considerando una serie de criterios técnicos y económicos que permitan identificar el sistema más adecuado para la cuenca del río Motagua. El análisis incluirá aspectos clave como la eficiencia de cada tecnología, los costos de instalación y operación, su viabilidad técnica en relación con las condiciones geográficas y climáticas de la región, y su sostenibilidad a largo plazo.

El análisis se efectuó mediante el cálculo de la potencia energética dentro de la cuenca, evaluando las condiciones específicas del sitio. Con períodos de ola relativamente cortos, entre 1 y 4 segundos, y fluctuaciones en el nivel del agua que varían entre 0.5 y 2 metros, se determinarán las longitudes y velocidades de las olas. Esto permitirá calcular el flujo de energía disponible en la cuenca y establecer una estimación precisa del potencial de generación.

Adicionalmente, se evaluó la viabilidad de instalación de distintos dispositivos undimotrices mediante el uso de sus matrices de potencia, las cuales proporcionarán una referencia clave sobre la capacidad operativa de cada tecnología en función de las condiciones del sitio. A través de este análisis, se determinó si los dispositivos tienen la capacidad de funcionar de manera eficiente en los rangos de período y altura de ola observados. Con base en estos resultados, se seleccionó la tecnología más adecuada, priorizando aquella que optimice la eficiencia y se ajuste mejor a las condiciones locales, para lograr un aprovechamiento máximo del recurso energético disponible. Este enfoque permitió no solo identificar la tecnología ideal para el sitio, sino también proponer un diseño óptimo que integre de manera efectiva la energía undimotriz en la matriz energética local.

La viabilidad técnica de cada sistema se analizó en función de su capacidad de adaptarse a las condiciones específicas de la cuenca del río Motagua. Se consideraron aspectos como la durabilidad de los dispositivos en un entorno marino, su resistencia a las variaciones en la altura de las olas y las corrientes, y la facilidad de instalación y mantenimiento en la región. Este análisis también incluyó un estudio de los materiales empleados, la tecnología de conversión de energía, y las posibles dificultades logísticas que podrían surgir en el proceso de instalación y operación. Se evaluó el impacto ambiental de cada tecnología, analizando posibles efectos en los ecosistemas marinos y costeros, así como en la biodiversidad local. Se consideraron factores como la alteración del hábitat marino, la interferencia con las rutas de navegación, y las emisiones asociadas con la fabricación e instalación de los sistemas.

Además, se analizó la sostenibilidad de los sistemas a largo plazo, tomando en cuenta su capacidad para operar sin degradar significativamente el medio ambiente o agotar recursos naturales.

Fase 4: Presentación de propuestas y conclusiones

La propuesta final para la implementación de tecnología undimotriz en la cuenca del río Motagua incluye los detalles técnicos y logísticos necesarios para su instalación, así como un análisis del impacto del dispositivo en el área de estudio. Se integraron estrategias específicas para mitigar posibles impactos ambientales, priorizando la protección de los ecosistemas marinos y costeros mediante tecnologías sostenibles y planes de contingencia.

Además, se incluyó recomendaciones para investigaciones futuras enfocadas en mejorar la eficiencia de los sistemas y explorar nuevas tecnologías, poniendo énfasis en la optimización de la conversión energética y en la durabilidad de los dispositivos. También se evaluó la viabilidad de expandir el proyecto a otras regiones costeras de Guatemala con características adecuadas, lo que permite diversificar la matriz energética nacional y fomentar el uso de fuentes renovables. Esto contribuye a un desarrollo energético más sostenible y equilibrado en el largo plazo, alineado con los objetivos de sostenibilidad del país.

VII. RESULTADOS

A. ANÁLISIS DE LA CUENCA DEL RÍO MOTAGUA

La cuenca del río Motagua abarca un área total de 17,991 km² y se encuentra en la vertiente del Mar Caribe, al sureste de Guatemala y el noroeste de Honduras. De este total, 15,111 km² están localizados en Guatemala y 2,890 km² en Honduras. La cuenca se extiende desde los 3,296 metros sobre el nivel del mar en el altiplano occidental de Guatemala hasta llegar al nivel del mar, recorriendo el territorio de oeste a este. En Guatemala, este río es un elemento geográfico clave, ya que recibe agua de diversas montañas como el altiplano, la Sierra del Merendón, la Sierra de las Minas y Chuacús. Con más de 500 afluentes, el caudal promedio del Motagua es de 216 metros cúbicos por segundo (m³/s), aportando un volumen de agua estimado en 6,500 millones de m³ anuales en Guatemala y 2,072 millones de m³ en Honduras. El río Motagua, con una longitud de 463.5 km, es el más extenso de Guatemala y está clasificado como un río de sexto orden. (MARN, 2018b)

La cuenca alberga 80 tipos principales de suelos, 20 unidades geológicas y se puede dividir en cuatro regiones fisiográficas distintas: la depresión del Motagua, las tierras altas volcánicas, las tierras altas cristalinas y las tierras altas sedimentarias.

<i>Región fisiográfica</i>	<i>Descripción</i>
Tierras altas cristalinas	La región, ubicada entre dos sistemas de fallas en constante transformación, influye en el drenaje y los cursos de los ríos Cuilco, Chixoy y Motagua. Su sustrato geológico está compuesto principalmente por rocas metamórficas y plutónicas, como esquistos, gneises y granitos, que al avanzar hacia el norte disminuyen, dando lugar a rocas cristalinas y sedimentos plegados. Las Tierras Altas Cristalinas forman parte de una cadena montañosa que se extiende desde Chiapas, México, hasta el Golfo de Honduras.
Depresión del Motagua	La depresión, nombrada en honor al río Motagua que la atraviesa y desemboca en el mar, está compuesta por llanuras aluviales. A lo largo de su curso, el río presenta un perfil estable, con meandros bien definidos y algunos antiguos abandonados en la sección inferior. El río ha creado un delta en el golfo de Honduras, cuyos sedimentos arenosos han formado la punta de Manabique, una barra de arena que separa el delta de la bahía de Amatique.
Tierras altas sedimentarias	Esta región fisiográfica es geológicamente compleja y presenta una gran diversidad de formas del terreno. Al norte de la Sierra de Chamá destacan colinas paralelas y pliegues

Tierras altas sedimentarias	anticlinales y sinclinales, junto con una topografía típica del Karst, formada por plegamientos, fallas y erosión. La región está delimitada al norte por la Planicie Baja Interior de Petén y el Cinturón Plegado del Lacandón, formados por sedimentos, y al sur por las fallas y límites de las Tierras Altas Cristalinas.
Tierras altas volcánicas	En esta zona, los conos volcánicos, compuestos principalmente de andesita, son numerosos y algunos se han formado recientemente. En las tierras altas volcánicas, las laderas pueden tener inclinaciones de hasta un 40%, y algunos valles se han originado a partir de depósitos de ceniza pómez del período cuaternario.

Tabla 10: Regiones fisiográficas en la cuenca del río Motagua

Nota. Adaptado de MadreSelva (2019).

Dentro de la cuenca del río Motagua se encuentran 10 zonas de vida y siete ecorregiones. En las zonas media y alta de la cuenca, la vegetación predominante es el bosque de pino-roble o bosque de pinos. A altitudes de entre 300 y 1200 metros sobre el nivel del mar, se encuentra vegetación tropical de hoja ancha y subtropical, incluyendo bosques secos y xéricos. En la costa caribeña, los manglares son comunes. (MARN, 2018b)

<i>Zonas de vida</i>	<i>Extensión (Km²)</i>	<i>% del total del área de la cuenca hidrográfica</i>
Bosque húmedo subtropical templado	5763.09	32.53
Bosque húmedo subtropical cálido	2550.78	14.45
Bosque seco subtropical	2280.02	12.91
Bosque muy húmedo tropical	2011.34	11.36
Bosque húmedo montano bajo	1895.32	10.74
Bosque húmedo subtropical frío	1311.17	7.42
Monte espinoso subtropical	890.13	5.05
Bosque muy húmedo montano bajo subtropical	350.89	1.99
Bosque pluvial montano bajo subtropical	294.69	1.68
Bosque muy húmedo subtropical	177.14	1.01

Bosque húmedo tropical	118.09	0.68
Bosque muy húmedo montano	27.34	0.16

Tabla 11: Zonas de vida dentro de la cuenca del río Motagua

Nota. Adaptado de MadreSelva (2019).

El clima de la cuenca está influenciado por la circulación atmosférica general, el Mar Caribe y su ubicación geográfica y topográfica, con dos estaciones marcadas: una temporada de lluvias (de mayo a octubre) y una temporada seca (de noviembre a abril). El régimen de la lluvia dentro de la cuenca del Río Motagua es variable, debido a las diferencias de altitud existentes, así como por las corrientes de viento que se presentan. (MARN, 2018b)

<i>Zona de la cuenca</i>	<i>Precipitación media anual (mm/año)</i>
Depresión del Motagua	400 – 600
Altiplano	1000 – 1400
Sierra de las Minas y Montaña de El Gallinero	2000 - 3000
Bahía de Amatique	4000 - 4500

Tabla 12: Rangos de precipitación anual en zonas de la cuenca

Nota. Adaptado de MadreSelva (2019).

En Guatemala, la cuenca del río motagua drena a través de 13 departamentos (Quiché, Totonicapán, Sololá, Chimaltenango, Sacatepéquez, Guatemala, Jalapa, Chiquimula, Zacapa, Izabal, El Progreso, Alta Verapaz y Baja Verapaz) y 84 municipios. Además, la cuenca incluye 55 áreas protegidas con diferentes categorías de manejo. De los aproximadamente 5197255 millones de personas que residen en la cuenca, el 51.81% son mujeres y el 48% hombre. El 30.74% de la población guatemalteca vive en la cuenca se encuentra en áreas rurales y el 69.26% en áreas urbanas. Los pueblos indígenas representan el 46% de la población. En la parte guatemalteca de la cuenca, el 59% de la población vive en la pobreza. (MARN, 2018b)

<i>Parcialmente</i>	<i>Totalmente</i>	<i>País</i>
Quiché, Totonicapán, Sololá, Chimaltenango, Guatemala, Sacatepéquez, Baja Verapaz, El Progreso, Chiquimula, Jalapa, Jutiapa e Izabal	Zacapa	Guatemala
Cortés, Santa Bárbara, Copán y Ocotepeque		Honduras

Tabla 13: Departamento dentro de la cuenca del río Motagua parcial o totalmente

Nota. Adaptado de MadreSelva (2019).

Las actividades económicas dentro de la Cuenca son importantes para las economías local y regional, particularmente en Guatemala. El uso de la tierra se orienta principalmente hacia las actividades agrícolas; en las partes media y alta de la cuenca, se cultivan verduras, frutas y café; en la parte baja de la cuenca, las actividades agroindustriales (caña de azúcar, palma aceitera y banano) son las más comunes, junto con la ganadería. En Guatemala, las actividades mineras e industriales también están presentes en la parte media de la cuenca; la ciudad de Guatemala, con una población de 2.2 millones, está ubicada en esta Porción de la cuenca. A lo largo de toda la cuenca, se practica la agricultura de subsistencia, así como la pesca tradicional en la costa caribeña. (MARN, 2018b)

<i>Estación</i>	<i>Nombre del Río</i>	<i>Caudal Máximo (m³/s)</i>	<i>Caudal Mínimo (m³/s)</i>
Chiché	Tzepelá	6.630	0.319
Petapilla	San José	6.029	1.184
Camotán	Grande de Zacapa	68.974	5.373
Puente Orellana	Motagua	234.438	10.501
Morales	Motagua	498.070	42.908

Tabla 14: Caudales máximos y mínimos al año de la cuenca del río Motagua

Nota. Adaptado de MadreSelva (2019).

En la siguiente figura se muestra un mapa hidrológico de Guatemala, específicamente un Atlas Hidrológico que muestra el caudal específico medio anual. El caudal específico, medido en litros por segundo por kilómetro cuadrado (l/s/km²), es una representación de la cantidad promedio de agua que fluye por una cuenca hidrográfica, relativa al área de la cuenca, en un año.

En el mapa, el Río Motagua atraviesa Guatemala de oeste a este, desembocando en el Mar Caribe. Si observamos la cuenca del Motagua en el mapa:

1. El río se extiende desde el sur de las montañas en la región central de Guatemala y continúa hacia el noreste, cruzando varios departamentos.
2. Las isolíneas que corresponden al área de la cuenca del río Motagua indican un caudal específico medio anual que varía entre 10 a 40 l/s/km², según las regiones por las que atraviesa el río.
 - En las áreas más cercanas a su nacimiento (hacia el centro-oeste), el caudal específico parece ser entre 10 y 20 l/s/km².
 - A medida que el río se acerca al Mar Caribe, los valores tienden a aumentar un poco, alcanzando entre 30 y 40 l/s/km².

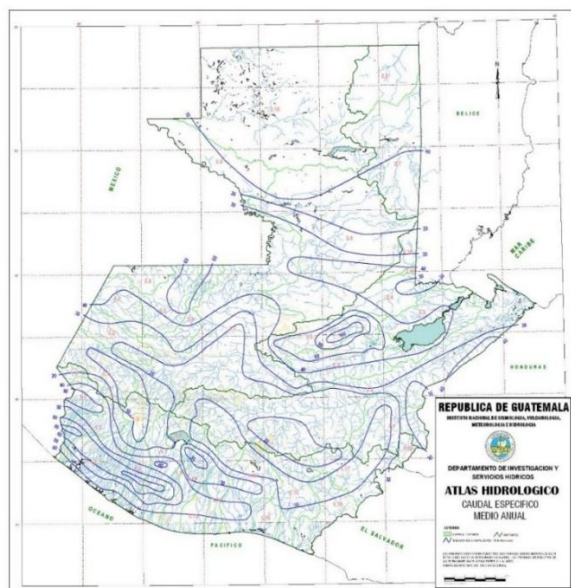


Figura 26: Mapa de caudal específico medio anual

Nota. Adaptado de INSIVUMEH.

La Figura 26 muestra un mapa hidrológico de Guatemala, pero enfocado específicamente en mostrar el caudal hídrico durante un año de condiciones húmedas. Es decir, un año en el que las precipitaciones y el flujo de agua superan los valores promedio. Este mapa permite visualizar cómo varía el caudal de los ríos y las cuencas hidrográficas bajo condiciones de lluvias más intensas o prolongadas, lo que resulta útil para evaluar el comportamiento de los ríos en situaciones extremas o para la planificación de infraestructuras.

Al observar la cuenca del río Motagua en este mapa, los valores de caudal específico medio anual en un año húmedo son notablemente mayores que en el mapa anterior (de años normales). Los valores de las isolíneas en esta cuenca varían:

- Cerca de la parte alta del río (en el centro-oeste de Guatemala), el caudal específico puede estar entre 15 y 40 l/s/km².
- A medida que el río fluye hacia el noreste, el caudal específico sigue aumentando, llegando a un rango de entre 40 y 50 l/s/km² en áreas más cercanas a su desembocadura en el Mar Caribe.

En resumen, este mapa muestra cómo el flujo de agua del río Motagua y otras cuencas aumenta considerablemente en años lluviosos, lo cual es crucial para estimar su impacto en proyectos energéticos y en la gestión de riesgos por inundaciones o crecidas.

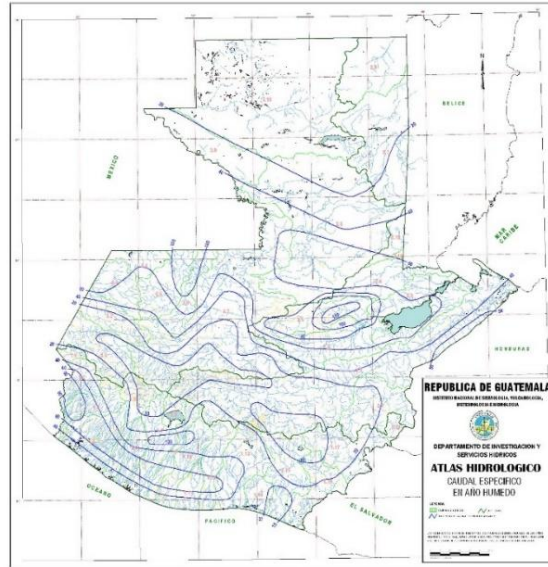


Figura 27: Mapa de caudal específico en año húmedo

Nota. Adaptado de INSIVUMEH.

La Figura 27 del Atlas Hidrológico de Guatemala ilustra el caudal específico durante un año seco, caracterizado por precipitaciones significativamente reducidas y una disminución en el flujo de agua en ríos y cuerpos hídricos. Este mapa proporciona información clave para la planificación de recursos hídricos en condiciones de sequía, facilitando la predicción del comportamiento de los ríos y evaluando el impacto en proyectos dependientes del agua.

En este mapa, el caudal específico del Río Motagua es más bajo debido a las condiciones de sequía. Los valores de caudal específico en la cuenca del Motagua en un año seco son los siguientes:

- En la parte alta del río, los valores varían entre 10 y 20 l/s/km ².
- En la parte media y baja del río, cerca de su desembocadura en el Mar Caribe, los valores están entre 20 y 30 l/s/km ².

Estos valores son significativamente menores que en años húmedos o normales, lo que indica una reducción considerable en la cantidad de agua disponible en la cuenca del Motagua en períodos secos. Esto puede tener implicaciones importantes para la gestión de proyectos hidroenergéticos y otros que dependan del flujo de agua.

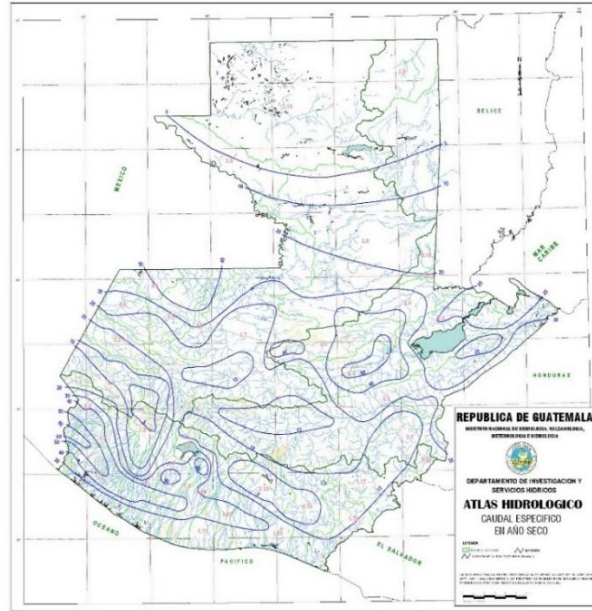


Figura 28: Mapa de caudal específico en año seco

Nota. Adaptado de INSIVUMEH.

La Figura 28 muestra un mapa de Guatemala que presenta las áreas clasificadas según distintos niveles de amenaza de inundación, definidos por la probabilidad de ocurrencia. Este análisis se basa en registros históricos de inundaciones ocurridas entre 1996 y 2000, y fue elaborado por el Ministerio de Agricultura, Ganadería y Alimentación (MAGA).

Las categorías de amenaza son las siguientes:

- Muy Alta (rojo oscuro): Probabilidad de ocurrencia del 59.5% al 100%.
- Alta (rojo): Probabilidad del 48.5% al 59.5%.
- Media Alta (amarillo): Probabilidad del 37.5% al 48.5%.
- Media Baja (verde claro): Probabilidad del 30.9% al 37.5%.
- Baja (verde oscuro): Probabilidad del 28.5% al 30.9%.
- Muy Baja o sin registros (blanco): Zonas sin registros de inundaciones o muy baja probabilidad.

B. SELECCIÓN DE SITIO PARA LA IMPLEMENTACIÓN DEL PROYECTO

Con base en el análisis de la cuenca, los criterios de adaptación tecnológica y las condiciones ambientales del entorno, se determinó que la zona de la desembocadura del río Motagua, donde el río se encuentra en el mar Caribe, representa el sitio más adecuado para la implementación de un sistema undimotriz. Desde el punto de vista morfométrico, esta región presenta las mayores profundidades dentro de la cuenca, alcanzado hasta los 5 metros, lo cual resulta compatible con los requerimientos de alguno de los dispositivos. Adicionalmente, esta zona exhibe oleaje más constante que el resto de la cuenca, con alturas entre los 0.5 y 2 metros y períodos de 1 a 4 segundos, permite un aprovechamiento energético continuo y estable entre los rangos de operación de los dispositivos.

Desde una perspectiva ambiental, la desembocadura se considera un ecosistema sensible debido a la transición entre agua dulce y salada, y a su función como zona de alta biodiversidad. No obstante, el uso de tecnologías con anclajes, diseños pasivos y materiales anticorrosivos, minimizan la alteración del fondo marino y reduce el riesgo de contaminación y colisión con fauna marina. Evitando el uso de infraestructura pesada ni cimentación, no se tiene una intervención significativa del entorno.

En términos de gestión de riesgos, aunque el área presenta una amenaza moderada de inundación fluvial y marejadas según datos del MAGA, la naturaleza flotante y flexible de los dispositivos permite adaptarse a estos eventos con el diseño adecuado del sistema de anclaje y operación. Esta adaptabilidad refuerza su viabilidad como tecnología segura para el entorno costero del Motagua. Finalmente, su cercanía a comunidades rurales con limitado acceso a la red eléctrica posiciona esta región como estratégica para el desarrollo de un modelo descentralizado de generación eléctrica mediante fuentes renovables marinas. En conjunto, estos elementos consolidan la desembocadura del río Motagua como el sitio ideal para la demostración de energía undimotriz en el país. (MAGA, 2022)

C. CÁLCULO DE POTENCIAL ENERGÉTICO

Datos de la cuenca del río Motagua

La profundidad del río, desde Gualán hasta su desembocadura, ha sido estimada entre 2 a 5 metros. El nivel del agua dentro de la cuenca puede subir entre 0.5 m y 2 m de altura.

$$h_1 = 0.5 \text{ m} \quad h_2 = 1 \text{ m} \quad h_3 = 2 \text{ m} \quad h_4 = 3 \text{ m} \quad h_5 = 4 \text{ m} \quad h_6 = 5 \text{ m}$$

Promedio de profundidad en la cuenca:

$$h_{promedio} = \frac{h_1 + h_2 + h_3 + h_4 + h_5 + h_6}{6} = 2.58 \text{ m}$$

Su anchura media es de 60 metros, hasta los 200 metros en su salida al mar.

$$a_1 = 60 \text{ m} \quad a_2 = 200 \text{ m}$$

Promedio de ancho en la cuenca

$$a_{promedio} = \frac{a_1 + a_2}{2} = 130 \text{ m}$$

Al no poder tener un valor exacto de período de ola dentro de la cuenca, se asume un período entre 0 a 4 s, ya que en este intervalo se considera un oleaje pequeño, generado por el viento. (Watsay, 2023)

$$T_1 = 0 \text{ s} \quad T_2 = 0.05 \text{ s} \quad T_3 = 0.1 \text{ s} \quad T_4 = 0.15 \text{ s} \dots \quad T_{80} = 3.95 \text{ s} \quad T_{81} = 4 \text{ s}$$

Celeridad de onda y celeridad de grupo

La celeridad de onda y de grupo es calculada mediante las fórmulas (4) y (5) para cada profundidad, este cálculo se puede ver con más detalle en el Anexo A.

$$C_1 = (9.81 \text{ m/s}^2 * 0.5 \text{ m})^{0.5} = 2.21 \text{ m/s} \dots \quad C_6 = (9.81 \text{ m/s}^2 * 5 \text{ m})^{0.5} = 7 \text{ m/s}$$

$$C_{g1} = \frac{C_1}{2} = 1.11 \frac{\text{m}}{\text{s}} \dots \quad C_{g6} = \frac{C_6}{2} = 3.5 \text{ m/s}$$

Longitud de onda

Para la longitud de onda se separaron en 4 intervalos de período (0 – 1 segundo, 1.05 – 2 segundos, 2.05 – 3 segundos y 3.05 – 4 segundos) utilizando las fórmulas (1) y (2), con el fin de tener un mejor orden en los resultados como se puede observar en el Anexo B.

$$\lambda_0 = \frac{9.81 \text{ m/s}^2 * (0.05 \text{ s})^2}{2\pi} = 0 \text{ m} \dots \lambda_0 = \frac{9.81 \frac{\text{m}}{\text{s}^2} * (2 \text{ s})^2}{2\pi} = 6.25 \text{ m} \dots \lambda_0 = \frac{9.81 \frac{\text{m}}{\text{s}^2} * (4 \text{ s})^2}{2\pi} = 24.98 \text{ m}$$

Luego de haber obtenido cada longitud de onda, se realizó el cálculo de esta misma, pero para cada profundidad igualmente en cada intervalo de período establecido anteriormente.

Período 0 a 1 segundo

$$\lambda_1 = \frac{9.81 \text{ m/s}^2 * (0.05 \text{ s})^2}{2 * \pi} \tanh * \left(\frac{2 * \pi * 0.5 \text{ m}}{0 \text{ m}} \right) = 0.004 \text{ m} \dots \lambda_1 = \frac{9.81 \text{ m/s}^2 * (1 \text{ s})^2}{2 * \pi} \tanh * \left(\frac{2 * \pi * 5 \text{ m}}{1.56 \text{ m}} \right) = 1.56 \text{ m}$$
$$\lambda_{1 \text{ promedio}} = 0.56 \text{ m}$$

Período 1.05 a 2 segundos

$$\lambda_1 = \frac{9.81 \text{ m/s}^2 * (1.05 \text{ s})^2}{2 * \pi} \tanh * \left(\frac{2 * \pi * 0.5 \text{ m}}{1.72 \text{ m}} \right) = 1.63 \text{ m} \dots \lambda_1 = \frac{9.81 \text{ m/s}^2 * (2 \text{ s})^2}{2 * \pi} \tanh * \left(\frac{2 * \pi * 5 \text{ m}}{6.25 \text{ m}} \right) = 6.24 \text{ m}$$
$$\lambda_{1 \text{ promedio}} = 3.61 \text{ m}$$

Período 2.05 a 3 segundos

$$\lambda_1 = \frac{9.81 \text{ m/s}^2 * (2.05 \text{ s})^2}{2 * \pi} \tanh * \left(\frac{2 * \pi * 0.5 \text{ m}}{6.56 \text{ m}} \right) = 2.92 \text{ m} \dots \lambda_1 = \frac{9.81 \text{ m/s}^2 * (3 \text{ s})^2}{2 * \pi} \tanh * \left(\frac{2 * \pi * 5 \text{ m}}{14.05 \text{ m}} \right) = 13.73 \text{ m}$$
$$\lambda_{1 \text{ promedio}} = 7.70 \text{ m}$$

Período 3.05 a 4 segundos

$$\lambda_1 = \frac{9.81 \text{ m/s}^2 * (3.05 \text{ s})^2}{2 * \pi} \tanh * \left(\frac{2 * \pi * 0.5 \text{ m}}{14.52 \text{ m}} \right) = 3.09 \text{ m} \dots \lambda_1 = \frac{9.81 \frac{\text{m}}{\text{s}^2} * (4 \text{ s})^2}{2 * \pi} \tanh * \left(\frac{2 * \pi * 5 \text{ m}}{24.98 \text{ m}} \right) = 21.24 \text{ m}$$
$$\lambda_{1 \text{ promedio}} = 14.96 \text{ m}$$

Densidad de energía total

Con la fórmula (6) se calcula la densidad de energía total para cada profundidad y de igual manera que con la longitud de onda, se separan por los intervalos de períodos ya establecidos (ANEXO C).

Período 0 a 1 segundo

$$E = \frac{1000 \frac{Kg}{m^3} * 9.81 \frac{m}{s^2} * (0.5 m)^2}{8} * 0.004 m = 1.20 J/m \dots E = \frac{1000 \frac{Kg}{m^3} * 9.81 \frac{m}{s^2} * (5 m)^2}{8} * 1.56 m = 7658.23 J/m$$
$$E_{promedio} = 1974.37 J/m$$

Período 1.05 a 2 segundos

$$E = \frac{1000 \frac{Kg}{m^3} * 9.81 \frac{m}{s^2} * (0.5 m)^2}{8} * 1.63 m = 500.97 J/m \dots E = \frac{1000 \frac{Kg}{m^3} * 9.81 \frac{m}{s^2} * (5 m)^2}{8} * 6.4 m = 30630.28 J/m$$
$$E_{promedio} = 13114.19 J/m$$

Período 2.05 a 3 segundos

$$E = \frac{1000 \frac{Kg}{m^3} * 9.81 \frac{m}{s^2} * (0.5 m)^2}{8} * 2.92 m = 895.67 J/m \dots E = \frac{1000 \frac{Kg}{m^3} * 9.81 \frac{m}{s^2} * (5 m)^2}{8} * 13.73 m = 67366.13 J/m$$
$$E_{promedio} = 32088.65 J/m$$

Período 3.05 a 4 segundos

$$E = \frac{1000 \frac{Kg}{m^3} * 9.81 \frac{m}{s^2} * (0.5 m)^2}{8} * 3.09 m = 1.20 J/m \dots E = \frac{1000 \frac{Kg}{m^3} * 9.81 \frac{m}{s^2} * (5 m)^2}{8} * 21.24 m = 104200.84 J/m$$
$$E_{promedio} = 73974.97 J/m$$

Flujo energético

Por último, con la fórmula (7) se calcula el flujo energético dentro de la cuenca, mediante los promedios de energía de cada intervalo como se puede observar en el Anexo D y para cada profundidad.

Profundidad 0.5 metros

$$P = \frac{(1974.37 \frac{J}{m}) * (1.11 \frac{m}{s})}{1000} = 2.19 kW \dots P = \frac{(73974.97 \frac{J}{m}) * (1.11 \frac{m}{s})}{1000} = 81.92 kW$$

Profundidad 1 metro

$$P = \frac{(1974.37 \frac{J}{m}) * (1.57 \frac{m}{s})}{1000} = 3.09 kW \dots P = \frac{(73974.97 \frac{J}{m}) * (1.57 \frac{m}{s})}{1000} = 115.85 kW$$

Profundidad 2 metros

$$P = \frac{\left(1974.37 \frac{J}{m}\right) * \left(2.21 \frac{m}{s}\right)}{1000} = 4.37 \text{ kW} \dots P = \frac{\left(73974.97 \frac{J}{m}\right) * \left(2.21 \frac{m}{s}\right)}{1000} = 163.83 \text{ kW}$$

Profundidad 3 metros

$$P = \frac{\left(1974.37 \frac{J}{m}\right) * \left(2.71 \frac{m}{s}\right)}{1000} = 5.36 \text{ kW} \dots P = \frac{\left(73974.97 \frac{J}{m}\right) * \left(2.71 \frac{m}{s}\right)}{1000} = 200.65 \text{ kW}$$

Profundidad 4 metros

$$P = \frac{\left(1974.37 \frac{J}{m}\right) * \left(3.13 \frac{m}{s}\right)}{1000} = 6.18 \text{ kW} \dots P = \frac{\left(73974.97 \frac{J}{m}\right) * \left(3.13 \frac{m}{s}\right)}{1000} = 231.70 \text{ kW}$$

Profundidad 5 metros

$$P = \frac{\left(1974.37 \frac{J}{m}\right) * \left(3.50 \frac{m}{s}\right)}{1000} = 6.91 \text{ kW} \dots P = \frac{\left(73974.97 \frac{J}{m}\right) * \left(3.50 \frac{m}{s}\right)}{1000} = 259.04 \text{ kW}$$

IX. DISCUSIÓN DE RESULTADOS

En el análisis del potencial energético de la cuenca del río Motagua, los resultados obtenidos se basan en períodos de ola que varían entre 1 y 4 segundos y profundidades que oscilan entre 0.5 y 5 metros. Estos valores fueron seleccionados teniendo en cuenta las características particulares de la cuenca, que se caracteriza por aguas someras, lo que favorece períodos de ola más cortos en el rango considerado. Según el boletín informativo No. 339-2024, el nivel del agua del río puede incrementarse hasta 2 metros, lo que refuerza la hipótesis de que las olas en esta región tienen una mayor variabilidad y una energía relativamente baja. Esta combinación de condiciones es típica de zonas interiores o cercanas a ríos, en comparación con ubicaciones costeras que generalmente presentan olas de mayor energía y características más favorables para la generación de energía undimotriz.

A nivel global, las zonas costeras con mayor potencial energético suelen tener períodos de ola más largos, típicamente entre 7 y 10 segundos, y alturas de ola superiores a 2 metros, como es el caso de regiones en latitudes medias y altas, incluyendo las costas de Europa Occidental, la costa oeste de América del Norte y ciertas áreas de Australia. En estos sitios, la densidad de energía puede alcanzar entre 35 y 60 kW/m, lo que hace viable y económicamente rentable la implementación de tecnologías undimotrices. En contraste, los resultados obtenidos para la cuenca del río Motagua, debido a los períodos de ola más cortos y las profundidades más superficiales, indican un potencial energético relativamente bajo, lo que limita la viabilidad de implementar dispositivos convencionales en esta área.

Los cálculos realizados en el análisis de la cuenca (ver Anexo A) muestran que la celeridad de onda varía entre 2 m/s y 7 m/s, dependiendo de la profundidad. Para cada intervalo de tiempo (de 0 a 4 segundos), se calcularon las longitudes de onda correspondientes, en pasos de 0.05 segundos. Estos valores se agruparon en rangos de período (por ejemplo, de 0 a 1 segundo, de 1.05 a 2 segundos, etc.), y para cada intervalo se determinó la longitud de onda promedio, cuyos resultados se detallan en el Anexo B. Con base en estas longitudes de onda promedio, se calculó la densidad de energía para cada caso, obteniendo los valores promedio para cada intervalo de tiempo (ver Anexo C). Finalmente, utilizando los valores de densidad de energía y la celeridad de grupo, se estimó la potencia potencial en la cuenca, la cual varía entre 2 kW y 260 kW en el mejor de los escenarios, como se muestra en el Anexo D.

Aunque los resultados de potencia obtenidos reflejan un potencial limitado, destacan la importancia de seleccionar tecnologías adaptadas a las características locales para maximizar la eficiencia de la generación energética. A partir de los cálculos, se observa que el rango de períodos de 0 a 1 segundo presenta una potencia generada muy baja, por lo que se descarta como opción viable para la generación de energía. Sin embargo, el dispositivo Oyster se presenta como una excepción, ya que su matriz de potencia permite operar con valores de entre 1 y 3 kW en períodos tan cortos como 0.5 segundos.

Este dispositivo está diseñado para operar en aguas poco profundas, lo que lo hace adecuado para las condiciones de la cuenca del río Motagua. A pesar de sus ventajas, el Oyster requiere una profundidad mínima de 10 a 12 metros para su anclaje y olas de al menos 5 metros de altura, condiciones que no están disponibles en esta región. Por lo tanto, aunque el OYSTER podría adaptarse parcialmente, su implementación en la cuenca no es viable debido a las limitaciones físicas del entorno.

El análisis de otros dispositivos, como el WaveRoller y el Pelamis, resalta los desafíos que enfrentan cuando se exponen a las condiciones específicas de la cuenca. Ambos dispositivos están diseñados para operar en períodos de ola más largos (8-10 segundos para el WaveRoller y 6.5-12 segundos para el PELAMIS), lo que los hace ineficientes en un entorno con períodos tan cortos como los de la cuenca del río Motagua. Además, ambos dispositivos requieren profundidades mayores a las disponibles en la cuenca, lo que limita aún más su viabilidad. En resumen, las características de los períodos de ola cortos y las limitaciones de profundidad hacen que la implementación de estos dispositivos sea poco práctica en la región.

El WaveDragon, que tiene la mayor potencia nominal de todos los dispositivos analizados (hasta 7000 kW), también presenta desafíos significativos. Su potencia mínima operativa de 160 kW requiere un período de ola de 3 a 4 segundos, el rango más alto dentro de las condiciones de la cuenca del río Motagua. Sin embargo, este dispositivo también requiere profundidades superiores a 2 metros y olas de más de 5 metros para alcanzar su potencia mínima, lo que lo hace inviable en la región. Por lo tanto, a pesar de su alto potencial, las características de la cuenca no permiten su implementación efectiva.

Dispositivos como el AquaBuoy y el PowerBuoy podrían ser opciones más viables para la cuenca del río Motagua. El AquaBuoy, que puede generar hasta 250 kW, se ajusta bien a los valores máximos de potencia calculados en la cuenca. Sin embargo, al igual que el Oyster, necesita olas de al menos 6 metros y profundidades mayores a las disponibles para su funcionamiento óptimo. Por otro lado, el PowerBuoy tiene la ventaja de operar con olas de menor altura (1.5 metros), lo que lo hace una opción atractiva para la región. A pesar de su modesta potencia (5-10 kW), este dispositivo podría operar eficientemente en períodos de 1 a 2 segundos y en las profundidades disponibles en la cuenca. No obstante, el requerimiento de una profundidad mínima de 7 a 8 metros sigue siendo un desafío.

Una posible solución es la de adaptar el diseño del PowerBuoy para operar en profundidades de hasta 5 metros, alcanzando una potencia de hasta 45.92 kW en intervalos de período de 1 a 2 segundos. Esta modificación estructural permitiría optimizar su eficiencia en la cuenca, lo que sugiere que, con ajustes en el diseño, el PowerBuoy podría ser una alternativa viable para aprovechar el recurso energético disponible en la región.

La desembocadura del río Motagua presenta características ecológicas particulares que deben ser cuidadosamente consideradas en la evaluación de los dispositivos. La zona se caracteriza por una profundidad promedio de 2 metros, un régimen de oleaje de baja energía, y una biodiversidad acuática influenciada por la interacción entre agua dulce y salada. Dichas condiciones generan un ecosistema altamente dinámico y sensible tanto a alteraciones físicas como químicas.

El dispositivo PowerBuoy se identifica como la opción más adecuada debido a su diseño modular, flotante y compact, que reduce significativamente el impacto sobre el fondo marino. A diferencia de otras tecnologías que requieren cimentaciones o estructuras invasivas, el PowerBuoy utiliza un sistema de anclaje puntual, lo cual minimiza la perturbación de hábitats bentónicos y reduce el riesgo de desplazamiento o afectación a organismos del sustrato.

Desde una perspectiva acústica, el movimiento mecánico del PowerBuoy podría generar vibraciones y ruido submarino, lo cual representa un riesgo moderado para especies sensibles a frecuencias bajas. No obstante, este impacto puede mitigarse mediante la implementación de aislamiento acústico en los componentes móviles del sistema. Otro aspecto relevante es la posible alteración en los patrones del flujo y de sedimentación. Sin embargo, al tratarse de una estructura flotante con perfil hidrodinámico optimizado, el PowerBuoy presenta bajo impacto en el flujo natural del agua, evitando obstrucciones significativas o modificaciones del régimen de las corrientes locales.

En cuanto a su composición, el dispositivo este fabricado de materiales resistentes a la corrosión, lo cual reduce la necesidad de mantenimiento frecuente y prácticamente elimina el riesgo de liberación de sustancias tóxicas o fugas contaminantes en el entorno marino. El riesgo de colisión o interferencia con fauna marina es bajo, ya que el PowerBuoy no representa una barrera física significativa ni realiza movimientos agresivos en la columna de agua. Su operación pasiva y sin partes móviles expuestas reduce notablemente la posibilidad de interacción negativa en peces, mamíferos marinos o aves.

Por último, el impacto visual del dispositivo es mínimo. Aunque es parcialmente visible desde la costa, su estructura compacta y su colocación discreta no generan alteraciones significativas en el paisaje costero. A pesar de las limitaciones energéticas de la cuenca, estas tecnologías podrían contribuir a la sostenibilidad de la región sin comprometer la biodiversidad local.

De los factores claves para viabilidad de proyectos innovadores de generación energética, como los basados en energía undimotriz, es la existencia de un marco institucional y normativo que lo respalde, regule y promueva activamente. Para este caso, si bien los resultados técnicos, ambientales y económicos, con sus debidas modificaciones, demuestra que la tecnología PowerBuoy es viable para su implementación en la cuenca del río Motagua, la ausencia de políticas específicas para el desarrollo de energía marina en Guatemala puede representar una limitación estructural significativa.

Actualmente la matriz energética del país se encuentra dominada por fuentes hidroeléctricas, térmicas, y en menor medida eólicas y solares. La Ley General de Electricidad (Decreto 93-96) y el Acuerdo Gubernativo 145 – 2010 sobre energía renovables no contemplan de forma explícita el desarrollo de energía undimotriz o marina. Esto genera una dificultad tanto para la tramitación de licencias ambientales como la atracción de inversión pública o privada para proyectos de este tipo.

Además, no existe un protocolo técnico para la evaluación del impacto ambiental de tecnologías marinas, lo que podría retrasar la aprobación de proyectos o generar ambigüedades en la fase de implementación. Si bien los resultados sugieren que el PowerBuoy tiene un bajo impacto ambiental, sin una normativa clara, el proceso de evaluación y aprobación dependería del criterio de las autoridades ambientales.

Por otro lado, el país si cuenta con instrumentos como la Política Energética Nacional 2021-2050, que promueve la diversificación energética y el uso de fuentes limpias. No obstante, el potencial de la energía undimotriz no ha sido contemplado explícitamente en dicho documento, lo que representa una oportunidad desaprovechada.

Dado, lo anterior, los resultados obtenidos en este estudio permiten proponer la necesidad de fortalecer el marco regulatorio nacional en materia de energías renovables marinas. Este trabajo puede servir como punto de partida para la inclusión explícita de la energía undimotriz en los planes estratégicos y políticas energéticas del país. Además, lo presentado contribuye al desarrollo de normativas técnicas específicas orientadas a la evaluación ambiental, instalación y operación de tecnologías undimotrices, especialmente en regiones sensible como la cuenca del río Motagua.

El análisis realizado también proporciona argumentos para el diseño de mecanismos fiscales, que faciliten la implementación de dispositivos tecnológicos como el POWERBUOY, cuya compatibilidad con condiciones locales y bajo impacto ambiental han sido comprobados a lo largo del estudio. Finalmente, el trabajo aporta elementos clave para fortalecer la articulación institucional entre el Ministerio de Energía y Minas (MEM), el Ministerio de Ambientes y Recursos Ambientales (MARN) y las autoridades municipales locales, facilitando así un marco operativo coherente para la futura implementación de proyectos de energía marina en el país.

A pesar de que el entorno político actual presenta limitaciones, también ofrece una ventana de oportunidad para sentar las bases regulatorias que viabilicen el uso de tecnologías emergentes como la energía undimotriz. Estas políticas serían claves para promover la soberanía energética, el aprovechamiento del potencial marino y el desarrollo sostenible de las regiones costeras como la cuenca del río Motagua.

La viabilidad de la tecnología undimotriz en la cuenca del río Motagua a largo plazo dependerá de avances tecnológicos que permitan adaptar los dispositivos a las condiciones específicas de baja energía y cortos períodos de ola. Las mejoras en diseño, eficiencia de captación y materiales avanzados presentan un panorama prometedor para superar las limitaciones actuales. Si bien el potencial de generación es modesto en la región, los avances tecnológicos podrían hacer que esta fuente de energía sea más viable y competitiva, contribuyendo a un portafolio energético más diversificado y ecológico.

X. CONCLUSIONES

- El estudio demostró que la energía undimotriz es técnicamente viable en entornos de baja energía como la cuenca del río Motagua, siempre que se utilicen dispositivos adaptados en las condiciones físicas del sitio. A partir del análisis detallado del oleaje y profundidades en la desembocadura del río, se determinó que la aplicación de tecnología convencionales resulta inviable. En cambio, tecnologías como el PowerBuoy, con capacidad operativa en aguas someras y períodos cortos de ola, ofrecen una solución realista y eficaz, lo que representa una oportunidad energética para las necesidades específicas de comunidades rurales cercanas a la cuenca.
- La implementación de un sistema modular permite escalar progresivamente la capacidad de generación energética, ajustándose a las demandas y posibilidades del entorno. A través de un escenario demostrativo con múltiples unidades, se logró estimar una producción anual aproximada con base a las condiciones locales reales. Esto permitió visualizar cómo, incluso en contextos de baja densidad energética, se pueden diseñar esquemas viables que aporten a la cobertura energética de comunidades rurales, promoviendo soluciones autónomas y resilientes.
- La comparación entre diferentes tecnologías evidenció que la adecuación tecnológica es crítica para la eficiencia del sistema. Dispositivos de gran escala como el WaveDragon, pueden presentar una eficiencia operacional inferior al 5% bajos las condiciones que presenta el Motagua, lo que genera una desproporción entre los costos de instalación y los beneficios obtenidos.
- Desde el punto de vista ambiental, la tecnología seleccionada mostró un perfil de bajo impacto y alta compatibilidad con el ecosistema presente en la zona. El PowerBuoy, al no requerir cimentaciones permanentes ni generar residuos, minimiza la alteración del hábitat bentónico. Si bien se identificaron posibles efectos asociados al ruido submarino y a la alteración del flujo, estos fueron clasificados como moderados y mitigables mediante tecnologías de aislamiento y monitoreo. Esta evaluación refuerza la idea de que la energía undimotriz puede coexistir con los sistemas ecológicos marinos si se implementan criterios técnicos y ambientales rigurosos.
- Los resultados aportan elementos fundamentales para la integración de la energía undimotriz en el marco institucional y normativo del país. Actualmente, Guatemala carece de regulaciones específicas para este tipo de tecnologías. Al documentar su factibilidad técnica, económica y ambiental, ofrece una base sólida para que entidades como el MARN y el MEM impulse su incorporación en la Política Energética Nacional y desarrollen normativas técnicas y ambientales pertinentes. Además, es una oportunidad estratégica para fomentar la innovación y diversificación energética mediante fuentes no convencionales.
- La aplicación del análisis realizado puede extenderse a otras zonas costeras y cuncas fluviales del país, donde existan las condiciones adecuadas. De este modo, no solo se generan resultados puntuales para una región, sino que contribuye a construir una estrategia nacional para el aprovechamiento responsable y planificado de las energías marinas.

XI. RECOMENDACIONES

- Considerando que un solo dispositivo no alcanza una potencia significativa, se recomienda adoptar un enfoque modular mediante la instalación de granjas undimotrices en la zona de mayor profundidad de la cuenca del río Motagua. Un sistema compuesto por 10 PowerBuoy podría alcanzar hasta 459 kW de potencia combinada y una producción anual estimada de 4023 MWh, contribuyendo de forma significativa a la demanda energética de las comunidades cercanas. Este modelo permite una expansión progresiva conforme crezcan las necesidades o se amplíen los recursos disponibles.
- Se recomienda promover investigación y diseño de tecnologías específicamente adaptadas a las condiciones particulares de la cuenca, como olas de bajo período y de altura. Soluciones optimizadas para entornos de baja energía no solo aumentaría la eficiencia, si no que fortalecería la industria nacional de energías renovables y reduciría la dependencia de tecnología externa.
- La elección de materiales resistentes, como aceros inoxidable anticorrosivo y polímeros reforzados, debe ser prioritaria para prolongar la vida útil de los dispositivos, reducir costos de mantenimiento y garantizar un funcionamiento seguro y continuo en ambientes marinos.
- La implementación de un monitoreo ambiental continuo que evalúe variable como calidad de agua, dinámica sedimentaria y presencia de fauna marina. Además, se recomienda un enfoque adaptativo, en el cual los parámetros de operación del sistema puedan ajustarse y rediseñarse conforme evolucionen las condiciones ambientales del sitio, asegurando una gestión flexible y responsable del sistema.
- Integración de energía undimotriz con tecnologías como la solar fotovoltaica, mini hidroeléctrica o almacenamiento energético puede fortalecer la continuidad del suministro, reducir costos compartidos y mejorar la eficiencia global de los sistemas híbridos. Esta estrategia permitiría una mejor gestión del recurso en función de variabilidad temporal.
- Se recomienda incluir una línea estratégica dentro del sistema nacional de ciencia y tecnología para el desarrollo de energías marinas. Esta agenda puede abarcar caracterización del recurso, impacto ambiental, diseño de sistemas híbridos, y formación técnica, sentando las bases para una energía renovable a largo plazo.
- La energía undimotriz debe ser contemplada dentro de los programas de electrificación rural para zonas costeras y como estrategia de resiliencia energética descentralizada. Su aplicación en comunidades aisladas con recursos marinos cercanos representa una solución autónoma y sostenible, especialmente para fenómenos extremos o interrupciones del sistema centralizado.

XII. BIBLIOGRAFÍA

Aser. (2011, 14 de octubre). Pelamis la serpiente energética. *Morís Arroes - Instalación de aerotermia, clima, ventilación y fotovoltaica en viviendas*. <https://www.morissarroes.es/pelamis-la-serpiente-energetica/>

Aser. (2012, 22 de enero). PowerBuoy, el pistón marino. *Morís Arroes - Instalación de aerotermia, clima, ventilación y fotovoltaica en viviendas*. <https://www.morissarroes.es/powerbuoy-el-piston-marino/>

Al Conocimiento. (2022, 8 de septiembre). *Las mayores centrales de energías renovables del mundo*. OpenMind. <https://www.bbvaopenmind.com/tecnologia/innovacion/las-mayores-centrales-de-energias-renovables/>

Antoniolidia. (2023, 22 de abril). *Energía de las olas: visión general y aprovechamiento*. Todo Ingenierías. <https://todoingenierias.com/energia-de-las-olas-vision-general-y-aprovechamiento/>

AULA21. *¿Qué es la mecánica de fluidos y dónde se aplica?* (2022, 2 de diciembre). aula21 | Formación para la Industria. <https://www.cursosaula21.com/que-es-mecanica-de-fluidos/>

AW-Energy. (2022, 24 de mayo). *WaveRoller*. <https://aw-energy.com/waveroller/>

BBVA. (2024, 13 de febrero). *Energía Renovable*. BBVA NOTICIAS. <https://www.bbva.com/es/sostenibilidad/energia/energia-renovable/>

Blanco, P. (2016, julio). *Desarrollo de las herramientas para la selección de dispositivos de energía undimotriz*. [Proyecto fin de Grado, Universidad de Cantabria].

Boundarycreative.co.uk. (2022, 15 de marzo). *PB3 PowerBuoy*. Ocean Power Technologies. <https://oceanpowertechnologies.com/platform/opt-pb3-powerbuoy/>

Caro, R. V. (2023, 8 de marzo). *La energía de las olas: del Pelamis al Penguin*. Fundación Exponav En Ferrol. <https://exponav.org/blog/puertos-y-buques/la-energia-de-las-olas-del-pelamis-al-penguin-pasando-por-gelula/>

Charlier, R y Justus, J. (1993). *Ocean Energies. Environmental, economic and technological aspects of alternative power sources*. El servier oceanography series.

Chozas, J. (2008, septiembre). *Una aproximación al aprovechamiento de la energía de las olas para la generación de electricidad*. [Proyecto fin de carrera, Universidad Politécnica de Madrid]

COMISIÓN NACIONAL DE ENERGÍA ELÉCTRICA. (2023, 1 de agosto). *Marco Legal del Sub-Sector Eléctrico de Guatemala, Compendio de Leyes y Reglamentos*. Gob.gt. <https://www.cnee.gob.gt/pdf/marco-legal/LEY%20GENERAL%20DE%20ELECTRICIDAD%20Y%20REGLAMENTOS.pdf>

Communications. (2021, 6 de mayo). *¿Qué tipos de energías renovables existen y qué papel juegan?* BBVA. <https://www.bbva.com/es/sostenibilidad/que-tipos-de-energias-renovables-existen-y-que-papel-juegan/>

Communications. (2021, 7 de junio). *¿Qué es la energía undimotriz? Descubre sus características.* BBVA. <https://www.bbva.com/es/sostenibilidad/que-es-la-energia-undimotriz-descubre-sus-caracteristicas/>

CSIC. (2024). *Área de Medio Marino y Protección Medio Ambiente.* INSTITUTO ESPAÑOL DE OCEANOGRAFÍA CENTRO OCEANOGRÁFICO DE SANTANDER. https://www.ieo.es/es_ES/web/santander/medio-marino-y-proteccion-ambiental#:~:text=La%20Oceanografia%20es%20una%20ciencia,Oceanograf%C3%ADa%20Biol%C3%B3gica%20y%20Oceanograf%C3%ADa%20Geol%C3%B3gica.

CUENCAS HIDROGRAFICAS - sieagro. (2001). <https://apps.maga.gob.gt/sieagro/Normativas?page=2&sortOrder=Descripcion&categoriaId=41&tipoId=1&clasificacionId=6>

D. Falcão, A. & Silva, L. (2010). *"Wave energy utilization: A review of the technologies."* Renewable and Sustainable Energy Reviews.

Endo, S. (1995, 25 de noviembre). *The mighty whale that rules the waves.* New Scientist. <https://www.newscientist.com/article/mg14820054-300-the-mighty-whale-that-rules-the-waves/>

EnelGreenPower. (2021, 12 de mayo). *La energía que viaja sobre las olas del mar.* Enelgreenpower.com. <https://www.enelgreenpower.com/es/medios/news/2021/05/energia-olas-oceano-pacifico>

Escobar, D. (2022, 4 de junio). *Energía undimotriz u olamotriz.* The Free Nature. <https://thefreenature.com/energia-undimotriz-olamotriz/>

Fuentes, G. (2023, 18 de mayo). *Cómo se transforma la energía mecánica en energía eléctrica.* Mundo Sustentable. https://mundosustentable.com.mx/como-se-transforma-la-energia-mecanica-en-energia-electrica/?expand_article=1

Griseldacarreras, P. (2021, 30 de marzo). *Lo más destacado en energía undimotriz.* Uta.ba. <https://undimotriz.frba.utn.edu.ar/lo-mas-destacado-de-la-energia-undimotriz/>

INSIVUMEH. (2020). *ATLAS HIDROLÓGICO.* https://www.insivumeh.gob.gt/hidrologia/ATLAS_HIDROMETEOROLOGICO/Atlas_hidro.htm

IRENA – International Renewable Energy Agency. (2024, 26 de septiembre). <https://www.irena.org/>

Kessler, L. (2008, 1 de noviembre). *Pelamis: Una serpiente marina robótica que genera energía eléctrica – Afinidad Eléctrica.* <https://afinidadelctrica.com/2020/05/22/pelamis-una-serpiente-marina-robotica-que-genera-energia-electrica/>

- Kimerius Aircraft - Olas*. . <https://www.kimerius.com/hidrocin%C3%A1mica/olas/>
- MadreSelva. (2019). *Cuenca del Río Motagua, Situación actual y las causas de su deterioro*. Colectivo MadreSelva. <https://madreselva.org.gt/>
- Makin, T., Vuorinen, M., & Mucha, T. (2014). *WaveRoller – One of the Leading Technologies for Wave Energy Conversion*. En *WaverRoller*. <https://acrobat.adobe.com/id/urn:aaid:sc:VA6C2:2807dc86-468e-4da2-acb6-d1abf9587aaa>
- MARN. (2018, 24 de enero). *Gestión Ambiental Integral de la Cuenca del Río Motagua*. UNDP. <https://www.undp.org/es/guatemala/proyectos/gestion-ambiental-integral-de-la-cuenca-del-rio-motagua>
- Ministerio de Agricultura, Ganadería y Alimentación – MAGA (2022). *Mapa de amenazas por inundaciones en la cuenca del río Motagua*.
- Munguía, S. F. (2017, diciembre 18). *Analizamos los datos de la Central Undimotriz de Mutriku. Producción, factor de capacidad, problemas*. DiarioRenovables | Energías renovables. Eólica, solar, fotovoltaica, baterías, movilidad sostenible. <https://www.diariorenovables.com/2017/12/central-undimotriz-de-mutriku-analisis-datos-produccion-problemas.html>
- Nbenitezgonzalez. (2019, enero 2). *Los pioneros de la energía de las olas en España – Proyecto Undimotriz*. Edu.ar. <https://undimotriz.frba.utn.edu.ar/los-pioneros-de-la-energia-de-las-olas-en-espana/>
- Newsletter European. (2015, 13 de marzo). *A new way for wave and tidal energy* | Newsletter European. <https://www.newslettereuropean.eu/new-way-wave-tidal-energy/>
- Heras, I. (2014, 20 de enero). *La CE quiere potenciar el desarrollo y comercialización de la energía marina*. La Vanguardia. <https://www.lavanguardia.com/economia/20140120/54400300250/la-ce-quiere-potenciar-el-desarrollo-y-comercializacion-de-la-energia-marina.html>
- Endesa. (2022, enero 6). *La energía*. <https://www.fundacionendesa.org/es/educacion/endesa-educa/recursos/que-es-la-energia>
- Ocean Power Technologies. (2022, 15 de marzo). *PB3 PowerBuoy*. <https://oceanpowertechnologies.com/platform/opt-pb3-powerbuoy/>
- Ochogavia, J. (2023, 31 de julio). *¿Conoces la escala Douglas para clasificar y denominar el estado del mar?* Tempestalia By Esports Nautic. <https://tempestalia.com/escala-douglas-para-clasificar-y-denominar-estado-del-mar/>
- Ormaza, M. (2011). *La energía renovable procedente de las olas*. [Archivo PDF]. https://www.ehu.es/ikastorratza/8_alea/energia/energia.pdf
- Palomino, D. (2017, 17 de septiembre). *Energía Undimotriz o energía de las olas*. Renovables Verdes. <https://www.renovablesverdes.com/energia-undimotriz/>

Pecher, A y Kofoed, J. (2017). *Handbook of Ocean Wave Energy*. Ocean Engineering & Oceanography 7.

PowerBuoy, el pistón marino. (2012, 22 de enero). *Morís Arroes - Instalación de aerotermia, clima, ventilación y fotovoltaica en viviendas*. <https://www.morissarroes.es/powerbuoy-el-piston-marino/>

PowerTechnology. (2021, 25 de enero). *Pelamis, world's first commercial wave energy project, Agucadoura*. Power Technology. <https://www.power-technology.com/projects/pelamis/?cf-view>

Power Technology. (2020, 24 de diciembre). *Perth Wave Energy Project*. <https://www.power-technology.com/projects/perth-wave-energy-project/?cf-view>

Prensa Revista ElectroIndustria. (2011, diciembre). *Oyster: El último avance en generación de electricidad con corrientes marinas*. Revista ElectroIndustria. <https://www.emb.cl/electroindustria/articulo.mvc?xid=1752&ni=oyster-el-ultimo-avance-en-generacion-de-electricidad-con-corrientes-marinas>

Rolle, J. L. C. (2013, 25 de marzo). *Energía mareomotriz: perspectiva histórica y estado actual*. TÉCNICA INDUSTRIAL. <https://www.tecnicaindustrial.es/energia-mareomotriz-perspectiva-historica-y-e/>

Ruiz, C. (2018, 20 de noviembre). *Escala Beaufort y escala Douglas*. Náutica Formación. <https://nauticaformacion.es/escalas-de-beaufort-douglas-la-fuerza-del-viento-el-oleaje/>

Santander. (2022, 1 de junio). *Tipos de energía no renovable y su impacto medioambiental*. Santanderopenacademy.com. <https://www.santanderopenacademy.com/es/blog/tipos-de-energia-no-renovable.html>

Sáenz, G., & de Jesús, N. (2014, 22 de julio). *Evaluación del consumo de agua potable en la Ciudad de Guatemala y los efectos del cambio climático*. Laccei.org. <https://www.laccei.org/LACCEI2014-Guayaquil/RefereedPapers/RP052.pdf>

Segui, P. (2023, 20 de octubre). *Energía undimotriz u ola motriz*. OVACEN. <https://ovacen.com/energias-renovables/undimotriz-olamotriz/>

Segui, P. (2022, 14 de septiembre). *Energía undimotriz: qué es, cómo funciona y tipos*. OVACEN. <https://ovacen.com/energias-renovables/undimotriz-olamotriz/>

Silva, D., Rusu, E., & Guedes, C. (2013). *Evaluation of Various Technologies for Wave Energy Conversion in the Portuguese Nearshore*. Energies. <https://acrobat.adobe.com/id/urn:aaid:sc:VA6C2:d4e85315-f614-490c-996f-47e0aa734688>

Soers, S. (2019, 12 de diciembre). *Energía undimotriz*. iAguá. <https://www.iagua.es/blogs/sibylle-soers/energia-undimotriz>

Structuralia. (2018, 30 de abril). *La planta de energía mareomotriz Rance Tidal*. <https://blog.structuralia.com/la-planta-de-energia-mareomotriz-rance-tidal>

Rachel & Jason. (2010). *Tapered channel wave energy*. <https://taperedchannelwaveenergy.weebly.com/>

Técnica, D. (2021, 8 de diciembre). *Energía undimotriz: “pelamis” y “penguin” - Dínamo Técnica*. Dínamo Técnica. <https://dinamotecnica.es/2021/12/energia-undimotriz-pelamis-y-penguin.html>

Textoscientificos. (2009, 24 de enero). *Dispositivos de generación de energía a través de las olas*. Textoscientificos.com. <https://www.textoscientificos.com/energia/dispositivos-generacion-energia-olas>

Twenergy. (2019, 19 de noviembre). *Fuentes de energía: qué son y cuáles son sus tipos*. Twenergy. <https://twenergy.com/energia/fuentes-de-energia/>

Unidas, N. (2022). *Conferencia de las Naciones Unidas sobre Comercio y Desarrollo*. <https://www.un.org/es/climatechange/what-is-renewable-energy>

UNIVERSITY OF STRATHCLYDE. (2014). *Point absorber - analysis of cost reduction opportunities in the wave energy industry*. Strath.ac.uk. https://www.esru.strath.ac.uk/EandE/Web_sites/14-15/Wave_Energy/point-absorber.html

Watsay. (2023, 30 de octubre). *¿Cómo se forman las olas? ¿Qué es el Swell?* Watsay Surf School. <https://www.watsaysurfschool.com/como-se-forman-las-olas-que-es-el-swell/>

Wavedragon.com | *World Class Offshore Wave & Wind Energy for a Renewable Future*. (2024). <https://www.wavedragon.com/>

Webmaster. (2012, 13 de julio). *Las plantas de energía maremotérmica más grandes del mundo*. <https://www.blogenergiasostenible.com/plantas-energia-maremotermica-mas-grandes-mundo/#:~:text=Los%20proyectos%20de%20energ%C3%ADa%20maremot%C3%A9rmica,%20la%20isla%20de%20Guam>.

XIII. ANEXOS

ANEXO A: DATOS DE CUENCA Y CELERIDAD DE OLAS

DATOS DE LA CUENCA											
Profundidad (m)		Período (s)		Período (s)		Período (s)		Período (s)		Gravedad (m/s²)	
h1	0.5	T1	0	T22	1.05	T42	2.05	T62	3.05	g = 9.81	
h2	1	T2	0.05	T23	1.1	T43	2.1	T63	3.1	Densidad agua (kg/m³) ρ = 1000	
h3	2	T3	0.1	T24	1.15	T44	2.15	T64	3.15		
h4	3	T4	0.15	T25	1.2	T45	2.2	T65	3.2		
h5	4	T5	0.2	T26	1.25	T46	2.25	T66	3.25		
h6	5	T6	0.25	T27	1.3	T47	2.3	T67	3.3		
		T7	0.3	T28	1.35	T48	2.35	T68	3.35		
		T8	0.35	T29	1.4	T49	2.4	T69	3.4		
		T9	0.4	T30	1.45	T50	2.45	T70	3.45		
		T10	0.45	T31	1.5	T51	2.5	T71	3.5		
		T11	0.5	T32	1.55	T52	2.55	T72	3.55		
		T12	0.55	T33	1.6	T53	2.6	T73	3.6		
		T13	0.6	T34	1.65	T54	2.65	T74	3.65		
		T14	0.65	T35	1.7	T55	2.7	T75	3.7		
		T15	0.7	T36	1.75	T56	2.75	T76	3.75		
		T16	0.75	T37	1.8	T57	2.8	T77	3.8		
		T17	0.8	T38	1.85	T58	2.85	T78	3.85		
		T18	0.85	T39	1.9	T59	2.9	T79	3.9		
		T19	0.9	T40	1.95	T60	2.95	T80	3.95		
		T20	0.95	T41	2	T61	3	T81	4		
		T21	1								

CELERIDAD DE ONDA Y CELERIDAD DE GRUPO										
C = (g*h)^{0.5}					Cg = C/2					
Profundidad 1	C1	=	2.21	m/s	Cg1	=	1.11	m/s		
Profundidad 2	C2	=	3.13	m/s	Cg2	=	1.57	m/s		
Profundidad 3	C3	=	4.43	m/s	Cg3	=	2.21	m/s		
Profundidad 4	C4	=	5.42	m/s	Cg4	=	2.71	m/s		
Profundidad 5	C5	=	6.28	m/s	Cg5	=	3.13	m/s		
Profundidad 6	C6	=	7.00	m/s	Cg6	=	3.50	m/s		

Las olas dentro de la cuenca del río Motagua se desplazan a una velocidad dentro del rango de 1.11 m/s a 3.5 m/s, a causa de las profundidades que se tienen dentro de la cuenca. Al obtener este rango de celeridad se consideran las aguas someras y de períodos cortos, lo que refleja una propagación de energía más lenta y una menor longitud en las olas.

ANEXO B: CÁLCULO LONGITUD DE ONDA

LONGITUD DE ONDA																			
$\lambda = gT^2 / 2\pi$																			
	PERIODO 0 - 1 SEGUNDO			PERIODO 1.05 - 2 SEGUNDOS			PERIODO 2.05 - 3 SEGUNDOS			PERIODO 3.05 - 4 SEGUNDOS									
T1	3.0	=	0.00	m	T32	3.0	=	1.72	m	T43	3.0	=	6.56	m	T63	3.0	=	14.52	m
T2	3.0	=	0.00	m	T33	3.0	=	1.89	m	T44	3.0	=	6.89	m	T64	3.0	=	15.00	m
T3	3.0	=	0.02	m	T34	3.0	=	2.06	m	T45	3.0	=	7.22	m	T65	3.0	=	15.49	m
T4	3.0	=	0.04	m	T35	3.0	=	2.25	m	T46	3.0	=	7.56	m	T66	3.0	=	15.99	m
T5	3.0	=	0.06	m	T36	3.0	=	2.44	m	T47	3.0	=	7.90	m	T67	3.0	=	16.49	m
T6	3.0	=	0.10	m	T37	3.0	=	2.64	m	T48	3.0	=	8.26	m	T68	3.0	=	17.00	m
T7	3.0	=	0.14	m	T38	3.0	=	2.85	m	T49	3.0	=	8.62	m	T69	3.0	=	17.52	m
T8	3.0	=	0.19	m	T39	3.0	=	3.06	m	T50	3.0	=	8.99	m	T70	3.0	=	18.05	m
T9	3.0	=	0.25	m	T40	3.0	=	3.28	m	T51	3.0	=	9.37	m	T71	3.0	=	18.58	m
T10	3.0	=	0.32	m	T41	3.0	=	3.51	m	T52	3.0	=	9.76	m	T72	3.0	=	19.13	m
T11	3.0	=	0.39	m	T42	3.0	=	3.75	m	T53	3.0	=	10.15	m	T73	3.0	=	19.68	m
T12	3.0	=	0.47	m	T43	3.0	=	4.00	m	T54	3.0	=	10.55	m	T74	3.0	=	20.23	m
T13	3.0	=	0.56	m	T44	3.0	=	4.25	m	T55	3.0	=	10.96	m	T75	3.0	=	20.80	m
T14	3.0	=	0.66	m	T45	3.0	=	4.51	m	T56	3.0	=	11.38	m	T76	3.0	=	21.37	m
T15	3.0	=	0.77	m	T46	3.0	=	4.78	m	T57	3.0	=	11.81	m	T77	3.0	=	21.96	m
T16	3.0	=	0.88	m	T47	3.0	=	5.06	m	T58	3.0	=	12.24	m	T78	3.0	=	22.55	m
T17	3.0	=	1.00	m	T48	3.0	=	5.34	m	T59	3.0	=	12.68	m	T79	3.0	=	23.14	m
T18	3.0	=	1.13	m	T49	3.0	=	5.64	m	T60	3.0	=	13.13	m	T80	3.0	=	23.75	m
T19	3.0	=	1.26	m	T50	3.0	=	5.94	m	T61	3.0	=	13.59	m	T81	3.0	=	24.36	m
T20	3.0	=	1.41	m	T51	3.0	=	6.25	m	T62	3.0	=	14.05	m					
T21	3.0	=	1.56	m															

La distancia entre las dos crestas de olas consecutivas se encuentra entre 0 a 25 metros. Sabiendo que la cuenca posee aguas someras y con períodos cortos, dentro de este rango se tiende a tener menor energía, las olas suelen propagarse más lentamente y transferir menos energía a los dispositivos

LONGITUD DE ONDA CON PERÍODO 0 - 1 SEGUNDOS

$$\lambda_1 = (gT^2/2\pi) \tanh(2\pi h/\lambda_1)$$

	Profundidad 0.5 m					Profundidad 1 m					Profundidad 2m			
	λ_1	=	# ₁ DIV/0'	m		λ_1	=	# ₁ DIV/0'	m		λ_1	=	# ₁ DIV/0'	m
T1					T1					T1				
T2	λ_1	=	0.00	m	T2	λ_1	=	0.00	m	T2	λ_1	=	0.00	m
T3	λ_1	=	0.02	m	T3	λ_1	=	0.02	m	T3	λ_1	=	0.02	m
T4	λ_1	=	0.04	m	T4	λ_1	=	0.04	m	T4	λ_1	=	0.04	m
T5	λ_1	=	0.06	m	T5	λ_1	=	0.06	m	T5	λ_1	=	0.06	m
T6	λ_1	=	0.10	m	T6	λ_1	=	0.10	m	T6	λ_1	=	0.10	m
T7	λ_1	=	0.14	m	T7	λ_1	=	0.14	m	T7	λ_1	=	0.14	m
T8	λ_1	=	0.19	m	T8	λ_1	=	0.19	m	T8	λ_1	=	0.19	m
T9	λ_1	=	0.25	m	T9	λ_1	=	0.25	m	T9	λ_1	=	0.25	m
T10	λ_1	=	0.32	m	T10	λ_1	=	0.32	m	T10	λ_1	=	0.32	m
T11	λ_1	=	0.39	m	T11	λ_1	=	0.39	m	T11	λ_1	=	0.39	m
T12	λ_1	=	0.47	m	T12	λ_1	=	0.47	m	T12	λ_1	=	0.47	m
T13	λ_1	=	0.56	m	T13	λ_1	=	0.56	m	T13	λ_1	=	0.56	m
T14	λ_1	=	0.66	m	T14	λ_1	=	0.66	m	T14	λ_1	=	0.66	m
T15	λ_1	=	0.76	m	T15	λ_1	=	0.77	m	T15	λ_1	=	0.77	m
T16	λ_1	=	0.88	m	T16	λ_1	=	0.88	m	T16	λ_1	=	0.88	m
T17	λ_1	=	1.00	m	T17	λ_1	=	1.00	m	T17	λ_1	=	1.00	m
T18	λ_1	=	1.12	m	T18	λ_1	=	1.13	m	T18	λ_1	=	1.13	m
T19	λ_1	=	1.25	m	T19	λ_1	=	1.26	m	T19	λ_1	=	1.26	m
T20	λ_1	=	1.38	m	T20	λ_1	=	1.41	m	T20	λ_1	=	1.41	m
T21	λ_1	=	1.51	m	T21	λ_1	=	1.56	m	T21	λ_1	=	1.56	m

LONGITUD DE ONDA CON PERÍODO 0 - 1 SEGUNDOS

	Profundidad 3m					Profundidad 4m					Profundidad 5m			
	λ_1	=	# ₁ DIV/0'	m		λ_1	=	# ₁ DIV/0'	m		λ_1	=	# ₁ DIV/0'	m
T1					T1					T1				
T2	λ_1	=	0.00	m	T2	λ_1	=	0.00	m	T2	λ_1	=	0.00	m
T3	λ_1	=	0.02	m	T3	λ_1	=	0.02	m	T3	λ_1	=	0.02	m
T4	λ_1	=	0.04	m	T4	λ_1	=	0.04	m	T4	λ_1	=	0.04	m
T5	λ_1	=	0.06	m	T5	λ_1	=	0.06	m	T5	λ_1	=	0.06	m
T6	λ_1	=	0.10	m	T6	λ_1	=	0.10	m	T6	λ_1	=	0.10	m
T7	λ_1	=	0.14	m	T7	λ_1	=	0.14	m	T7	λ_1	=	0.14	m
T8	λ_1	=	0.19	m	T8	λ_1	=	0.19	m	T8	λ_1	=	0.19	m
T9	λ_1	=	0.25	m	T9	λ_1	=	0.25	m	T9	λ_1	=	0.25	m
T10	λ_1	=	0.32	m	T10	λ_1	=	0.32	m	T10	λ_1	=	0.32	m
T11	λ_1	=	0.39	m	T11	λ_1	=	0.39	m	T11	λ_1	=	0.39	m
T12	λ_1	=	0.47	m	T12	λ_1	=	0.47	m	T12	λ_1	=	0.47	m
T13	λ_1	=	0.56	m	T13	λ_1	=	0.56	m	T13	λ_1	=	0.56	m
T14	λ_1	=	0.66	m	T14	λ_1	=	0.66	m	T14	λ_1	=	0.66	m
T15	λ_1	=	0.77	m	T15	λ_1	=	0.77	m	T15	λ_1	=	0.77	m
T16	λ_1	=	0.88	m	T16	λ_1	=	0.88	m	T16	λ_1	=	0.88	m
T17	λ_1	=	1.00	m	T17	λ_1	=	1.00	m	T17	λ_1	=	1.00	m
T18	λ_1	=	1.13	m	T18	λ_1	=	1.13	m	T18	λ_1	=	1.13	m
T19	λ_1	=	1.26	m	T19	λ_1	=	1.26	m	T19	λ_1	=	1.26	m
T20	λ_1	=	1.41	m	T20	λ_1	=	1.41	m	T20	λ_1	=	1.41	m
T21	λ_1	=	1.56	m	T21	λ_1	=	1.56	m	T21	λ_1	=	1.56	m

PROMEDIO λ (m)
0.56

La longitud de onda en períodos entre 0 a 1 segundo se mantiene constante entre el rango de 0 a 1.56 metros para todas las profundidades. Por lo que para estos períodos se ve que las olas son afectadas, poseen un desplazamiento vertical limitado lo que reduce su densidad energética y capacidad de transferir energía a los dispositivos.

LONGITUD DE ONDA CON PERÍODO 1.05 - 2 SEGUNDOS

$$\lambda_l = (gT^2/2\pi) \tanh(2\pi h/\lambda_l)$$

Profundidad 0.5 m				Profundidad 1 m				Profundidad 2m						
T22	λ_l	=	1.63	m	T22	λ_l	=	1.72	m	T22	λ_l	=	1.72	m
T23	λ_l	=	1.88	m	T23	λ_l	=	1.88	m	T23	λ_l	=	1.89	m
T24	λ_l	=	2.06	m	T24	λ_l	=	2.06	m	T24	λ_l	=	2.06	m
T25	λ_l	=	2.23	m	T25	λ_l	=	2.23	m	T25	λ_l	=	2.25	m
T26	λ_l	=	2.41	m	T26	λ_l	=	2.41	m	T26	λ_l	=	2.44	m
T27	λ_l	=	2.59	m	T27	λ_l	=	2.59	m	T27	λ_l	=	2.64	m
T28	λ_l	=	2.78	m	T28	λ_l	=	2.78	m	T28	λ_l	=	2.84	m
T29	λ_l	=	2.96	m	T29	λ_l	=	2.96	m	T29	λ_l	=	3.06	m
T30	λ_l	=	3.14	m	T30	λ_l	=	3.14	m	T30	λ_l	=	3.28	m
T31	λ_l	=	3.32	m	T31	λ_l	=	3.32	m	T31	λ_l	=	3.51	m
T32	λ_l	=	3.50	m	T32	λ_l	=	3.50	m	T32	λ_l	=	3.74	m
T33	λ_l	=	3.67	m	T33	λ_l	=	3.67	m	T33	λ_l	=	3.98	m
T34	λ_l	=	3.83	m	T34	λ_l	=	3.83	m	T34	λ_l	=	4.23	m
T35	λ_l	=	3.99	m	T35	λ_l	=	3.99	m	T35	λ_l	=	4.48	m
T36	λ_l	=	4.14	m	T36	λ_l	=	4.14	m	T36	λ_l	=	4.73	m
T37	λ_l	=	4.28	m	T37	λ_l	=	4.28	m	T37	λ_l	=	4.99	m
T38	λ_l	=	4.41	m	T38	λ_l	=	4.41	m	T38	λ_l	=	5.25	m
T39	λ_l	=	4.54	m	T39	λ_l	=	4.54	m	T39	λ_l	=	5.51	m
T40	λ_l	=	4.66	m	T40	λ_l	=	4.66	m	T40	λ_l	=	5.77	m
T41	λ_l	=	4.77	m	T41	λ_l	=	4.77	m	T41	λ_l	=	6.03	m

LONGITUD DE ONDA CON PERÍODO 1.05 - 2 SEGUNDOS

Profundidad 3 m				Profundidad 4 m				Profundidad 5 m						
T22	λ_l	=	1.72	m	T22	λ_l	=	1.72	m	T22	λ_l	=	1.72	m
T23	λ_l	=	1.89	m	T23	λ_l	=	1.89	m	T23	λ_l	=	1.89	m
T24	λ_l	=	2.06	m	T24	λ_l	=	2.06	m	T24	λ_l	=	2.06	m
T25	λ_l	=	2.25	m	T25	λ_l	=	2.25	m	T25	λ_l	=	2.25	m
T26	λ_l	=	2.44	m	T26	λ_l	=	2.44	m	T26	λ_l	=	2.44	m
T27	λ_l	=	2.64	m	T27	λ_l	=	2.64	m	T27	λ_l	=	2.64	m
T28	λ_l	=	2.85	m	T28	λ_l	=	2.85	m	T28	λ_l	=	2.85	m
T29	λ_l	=	3.06	m	T29	λ_l	=	3.06	m	T29	λ_l	=	3.06	m
T30	λ_l	=	3.28	m	T30	λ_l	=	3.28	m	T30	λ_l	=	3.28	m
T31	λ_l	=	3.51	m	T31	λ_l	=	3.51	m	T31	λ_l	=	3.51	m
T32	λ_l	=	3.75	m	T32	λ_l	=	3.75	m	T32	λ_l	=	3.75	m
T33	λ_l	=	4.00	m	T33	λ_l	=	4.00	m	T33	λ_l	=	4.00	m
T34	λ_l	=	4.25	m	T34	λ_l	=	4.25	m	T34	λ_l	=	4.25	m
T35	λ_l	=	4.51	m	T35	λ_l	=	4.51	m	T35	λ_l	=	4.51	m
T36	λ_l	=	4.78	m	T36	λ_l	=	4.78	m	T36	λ_l	=	4.78	m
T37	λ_l	=	5.05	m	T37	λ_l	=	5.06	m	T37	λ_l	=	5.06	m
T38	λ_l	=	5.33	m	T38	λ_l	=	5.34	m	T38	λ_l	=	5.34	m
T39	λ_l	=	5.62	m	T39	λ_l	=	5.63	m	T39	λ_l	=	5.64	m
T40	λ_l	=	5.92	m	T40	λ_l	=	5.93	m	T40	λ_l	=	5.94	m
T41	λ_l	=	6.22	m	T41	λ_l	=	6.24	m	T41	λ_l	=	6.24	m

PROMEDIO λ_l (m)
3.61

De igual manera que el intervalo anterior, la longitud de onda se mantiene entre un rango de 1.63 m a 6.24 m para los períodos de 1.05 a 2 segundos. Se puede observar que se tiene un mayor desarrollo en comparación con los períodos cortos (0 a 1 segundo), lo que implica una mejor capacidad para transportar energía, aunque sigue estando dentro de un rango de longitud onda moderado.

LONGITUD DE ONDA CON PERÍODO 2.05 - 3 SEGUNDOS

$$\lambda_1 = (gT^2/2\pi) \tanh(2\pi h/\lambda_1)$$

Profundidad 0.5 m				Profundidad 1 m				Profundidad 2 m						
T42	λ_1	=	2.92	m	T42	λ_1	=	4.88	m	T42	λ_1	=	6.28	m
T43	λ_1	=	2.94	m	T43	λ_1	=	4.97	m	T43	λ_1	=	6.54	m
T44	λ_1	=	2.96	m	T44	λ_1	=	5.06	m	T44	λ_1	=	6.79	m
T45	λ_1	=	2.97	m	T45	λ_1	=	5.15	m	T45	λ_1	=	7.03	m
T46	λ_1	=	2.99	m	T46	λ_1	=	5.23	m	T46	λ_1	=	7.27	m
T47	λ_1	=	3.00	m	T47	λ_1	=	5.30	m	T47	λ_1	=	7.51	m
T48	λ_1	=	3.01	m	T48	λ_1	=	5.37	m	T48	λ_1	=	7.74	m
T49	λ_1	=	3.02	m	T49	λ_1	=	5.43	m	T49	λ_1	=	7.96	m
T50	λ_1	=	3.03	m	T50	λ_1	=	5.48	m	T50	λ_1	=	8.17	m
T51	λ_1	=	3.04	m	T51	λ_1	=	5.54	m	T51	λ_1	=	8.38	m
T52	λ_1	=	3.05	m	T52	λ_1	=	5.59	m	T52	λ_1	=	8.58	m
T53	λ_1	=	3.05	m	T53	λ_1	=	5.63	m	T53	λ_1	=	8.77	m
T54	λ_1	=	3.06	m	T54	λ_1	=	5.68	m	T54	λ_1	=	8.95	m
T55	λ_1	=	3.06	m	T55	λ_1	=	5.71	m	T55	λ_1	=	9.13	m
T56	λ_1	=	3.07	m	T56	λ_1	=	5.75	m	T56	λ_1	=	9.30	m
T57	λ_1	=	3.07	m	T57	λ_1	=	5.78	m	T57	λ_1	=	9.46	m
T58	λ_1	=	3.08	m	T58	λ_1	=	5.81	m	T58	λ_1	=	9.61	m
T59	λ_1	=	3.08	m	T59	λ_1	=	5.84	m	T59	λ_1	=	9.76	m
T60	λ_1	=	3.09	m	T60	λ_1	=	5.87	m	T60	λ_1	=	9.89	m
T61	λ_1	=	3.09	m	T61	λ_1	=	5.90	m	T61	λ_1	=	10.03	m

LONGITUD DE ONDA CON PERÍODO 2.05 - 3 SEGUNDOS

Profundidad 3 m				Profundidad 4 m				Profundidad 5 m						
T42	λ_1	=	6.52	m	T42	λ_1	=	6.56	m	T42	λ_1	=	6.56	m
T43	λ_1	=	6.83	m	T43	λ_1	=	6.88	m	T43	λ_1	=	6.88	m
T44	λ_1	=	7.14	m	T44	λ_1	=	7.20	m	T44	λ_1	=	7.21	m
T45	λ_1	=	7.45	m	T45	λ_1	=	7.54	m	T45	λ_1	=	7.55	m
T46	λ_1	=	7.77	m	T46	λ_1	=	7.88	m	T46	λ_1	=	7.90	m
T47	λ_1	=	8.09	m	T47	λ_1	=	8.22	m	T47	λ_1	=	8.25	m
T48	λ_1	=	8.41	m	T48	λ_1	=	8.57	m	T48	λ_1	=	8.61	m
T49	λ_1	=	8.73	m	T49	λ_1	=	8.93	m	T49	λ_1	=	8.98	m
T50	λ_1	=	9.04	m	T50	λ_1	=	9.28	m	T50	λ_1	=	9.35	m
T51	λ_1	=	9.36	m	T51	λ_1	=	9.65	m	T51	λ_1	=	9.73	m
T52	λ_1	=	9.67	m	T52	λ_1	=	10.01	m	T52	λ_1	=	10.11	m
T53	λ_1	=	9.98	m	T53	λ_1	=	10.38	m	T53	λ_1	=	10.50	m
T54	λ_1	=	10.28	m	T54	λ_1	=	10.74	m	T54	λ_1	=	10.89	m
T55	λ_1	=	10.58	m	T55	λ_1	=	11.11	m	T55	λ_1	=	11.29	m
T56	λ_1	=	10.88	m	T56	λ_1	=	11.48	m	T56	λ_1	=	11.69	m
T57	λ_1	=	11.16	m	T57	λ_1	=	11.84	m	T57	λ_1	=	12.10	m
T58	λ_1	=	11.45	m	T58	λ_1	=	12.21	m	T58	λ_1	=	12.50	m
T59	λ_1	=	11.72	m	T59	λ_1	=	12.57	m	T59	λ_1	=	12.91	m
T60	λ_1	=	11.99	m	T60	λ_1	=	12.93	m	T60	λ_1	=	13.32	m
T61	λ_1	=	12.25	m	T61	λ_1	=	13.29	m	T61	λ_1	=	13.73	m

PROMEDIO λ (m)
7.70

En este caso para el intervalo de 2.05 a 3 segundos, se puede observar de mejor manera la relación directa entre la profundidad y el desarrollo de la onda. En las profundidades pequeñas (0.5 y 1 metro), las longitudes de onda son cortas y tiene un rango estrecho. A medida que la profundidad incrementa, las longitudes de onda se extienden significativamente, alcanzando rangos más amplios y máximos en la profundidad de 5 metros.

LONGITUD DE ONDA CON PERIODO 3.05 - 4 SEGUNDOS

$$\lambda_1 = (gT^2/2\pi) \tanh(2\pi h/\lambda_0)$$

Profundidad 0.5 m				Profundidad 1 m				Profundidad 2 m						
T62	λ_1	=	3.09	m	T62	λ_1	=	5.92	m	T62	λ_1	=	10.15	m
T63	λ_1	=	3.10	m	T63	λ_1	=	5.94	m	T63	λ_1	=	10.27	m
T64	λ_1	=	3.10	m	T64	λ_1	=	5.96	m	T64	λ_1	=	10.38	m
T65	λ_1	=	3.10	m	T65	λ_1	=	5.98	m	T65	λ_1	=	10.49	m
T66	λ_1	=	3.10	m	T66	λ_1	=	6.00	m	T66	λ_1	=	10.59	m
T67	λ_1	=	3.11	m	T67	λ_1	=	6.01	m	T67	λ_1	=	10.69	m
T68	λ_1	=	3.11	m	T68	λ_1	=	6.03	m	T68	λ_1	=	10.78	m
T69	λ_1	=	3.11	m	T69	λ_1	=	6.04	m	T69	λ_1	=	10.86	m
T70	λ_1	=	3.11	m	T70	λ_1	=	6.05	m	T70	λ_1	=	10.95	m
T71	λ_1	=	3.11	m	T71	λ_1	=	6.07	m	T71	λ_1	=	11.02	m
T72	λ_1	=	3.12	m	T72	λ_1	=	6.08	m	T72	λ_1	=	11.10	m
T73	λ_1	=	3.12	m	T73	λ_1	=	6.09	m	T73	λ_1	=	11.17	m
T74	λ_1	=	3.12	m	T74	λ_1	=	6.10	m	T74	λ_1	=	11.23	m
T75	λ_1	=	3.12	m	T75	λ_1	=	6.11	m	T75	λ_1	=	11.29	m
T76	λ_1	=	3.12	m	T76	λ_1	=	6.12	m	T76	λ_1	=	11.35	m
T77	λ_1	=	3.12	m	T77	λ_1	=	6.13	m	T77	λ_1	=	11.41	m
T78	λ_1	=	3.12	m	T78	λ_1	=	6.13	m	T78	λ_1	=	11.46	m
T79	λ_1	=	3.12	m	T79	λ_1	=	6.14	m	T79	λ_1	=	11.51	m
T80	λ_1	=	3.12	m	T80	λ_1	=	6.15	m	T80	λ_1	=	11.56	m
T81	λ_1	=	3.13	m	T81	λ_1	=	6.15	m	T81	λ_1	=	11.60	m

LONGITUD DE ONDA CON PERIODO 3.05 - 4 SEGUNDOS

Profundidad 3 m				Profundidad 4 m				Profundidad 5 m						
T62	λ_1	=	12.51	m	T62	λ_1	=	13.64	m	T62	λ_1	=	14.15	m
T63	λ_1	=	12.75	m	T63	λ_1	=	13.99	m	T63	λ_1	=	14.56	m
T64	λ_1	=	12.99	m	T64	λ_1	=	14.33	m	T64	λ_1	=	14.96	m
T65	λ_1	=	13.22	m	T65	λ_1	=	14.67	m	T65	λ_1	=	15.37	m
T66	λ_1	=	13.45	m	T66	λ_1	=	15.00	m	T66	λ_1	=	15.78	m
T67	λ_1	=	13.66	m	T67	λ_1	=	15.32	m	T67	λ_1	=	16.18	m
T68	λ_1	=	13.87	m	T68	λ_1	=	15.64	m	T68	λ_1	=	16.58	m
T69	λ_1	=	14.07	m	T69	λ_1	=	15.95	m	T69	λ_1	=	16.97	m
T70	λ_1	=	14.26	m	T70	λ_1	=	16.25	m	T70	λ_1	=	17.36	m
T71	λ_1	=	14.45	m	T71	λ_1	=	16.55	m	T71	λ_1	=	17.75	m
T72	λ_1	=	14.63	m	T72	λ_1	=	16.84	m	T72	λ_1	=	18.13	m
T73	λ_1	=	14.80	m	T73	λ_1	=	17.12	m	T73	λ_1	=	18.50	m
T74	λ_1	=	14.96	m	T74	λ_1	=	17.39	m	T74	λ_1	=	18.87	m
T75	λ_1	=	15.12	m	T75	λ_1	=	17.66	m	T75	λ_1	=	19.23	m
T76	λ_1	=	15.27	m	T76	λ_1	=	17.92	m	T76	λ_1	=	19.58	m
T77	λ_1	=	15.41	m	T77	λ_1	=	18.17	m	T77	λ_1	=	19.93	m
T78	λ_1	=	15.55	m	T78	λ_1	=	18.41	m	T78	λ_1	=	20.27	m
T79	λ_1	=	15.69	m	T79	λ_1	=	18.64	m	T79	λ_1	=	20.60	m
T80	λ_1	=	15.81	m	T80	λ_1	=	18.87	m	T80	λ_1	=	20.93	m
T81	λ_1	=	15.93	m	T81	λ_1	=	19.09	m	T81	λ_1	=	21.24	m

PROMEDIO λ (m)
14.96

Para el rango de 3.05 y 4 segundos pasa el mismo caso que en el rango anterior. Para profundidades menores se observa longitudes cortas y rangos estrechos. Cuando la profundidad se incrementa se extienden las longitudes de onda y significa que pueden transportar más energía, además se empiezan a comportar como si fueran aguas profundas. Por lo que bajo estas condiciones es más favorable para la generación de energía en comparación con los otros períodos.

ANEXO C: CÁLCULO DENSIDAD DE ENERGÍA

DENSIDAD DE ENERGÍA TOTAL PERÍODO 0 - 1 SEGUNDOS

$$E = (\rho g h^2/8) \cdot L$$

		Profundidad 0.5 m		
	E	=	#DIV/0!	J/m
T1	E	=	1.20	J/m
T2	E	=	4.79	J/m
T3	E	=	10.77	J/m
T4	E	=	19.15	J/m
T5	E	=	29.91	J/m
T6	E	=	43.08	J/m
T7	E	=	58.63	J/m
T8	E	=	76.58	J/m
T9	E	=	96.92	J/m
T10	E	=	119.66	J/m
T11	E	=	144.79	J/m
T12	E	=	172.31	J/m
T13	E	=	202.20	J/m
T14	E	=	234.41	J/m
T15	E	=	268.81	J/m
T16	E	=	305.19	J/m
T17	E	=	343.19	J/m
T18	E	=	382.34	J/m
T19	E	=	422.09	J/m
T20	E	=	461.83	J/m
T21	E	=		

		Profundidad 1 m		
	E	=	#DIV/0!	J/m
T1	E	=	4.79	J/m
T2	E	=	19.15	J/m
T3	E	=	43.08	J/m
T4	E	=	76.58	J/m
T5	E	=	119.66	J/m
T6	E	=	172.31	J/m
T7	E	=	234.53	J/m
T8	E	=	306.53	J/m
T9	E	=	387.70	J/m
T10	E	=	478.64	J/m
T11	E	=	579.15	J/m
T12	E	=	689.24	J/m
T13	E	=	808.90	J/m
T14	E	=	938.13	J/m
T15	E	=	1076.94	J/m
T16	E	=	1225.31	J/m
T17	E	=	1383.23	J/m
T18	E	=	1550.64	J/m
T19	E	=	1727.42	J/m
T20	E	=	1913.33	J/m
T21	E	=		

		Profundidad 2m		
	E	=	#DIV/0!	J/m
T1	E	=	19.15	J/m
T2	E	=	76.58	J/m
T3	E	=	172.31	J/m
T4	E	=	306.33	J/m
T5	E	=	478.64	J/m
T6	E	=	689.24	J/m
T7	E	=	938.13	J/m
T8	E	=	1225.32	J/m
T9	E	=	1550.79	J/m
T10	E	=	1914.56	J/m
T11	E	=	2316.61	J/m
T12	E	=	2756.96	J/m
T13	E	=	3235.60	J/m
T14	E	=	3752.53	J/m
T15	E	=	4307.75	J/m
T16	E	=	4901.26	J/m
T17	E	=	5533.07	J/m
T18	E	=	6203.16	J/m
T19	E	=	6911.55	J/m
T20	E	=	7658.22	J/m
T21	E	=		

DENSIDAD DE ENERGÍA TOTAL PERÍODO 0 - 1 SEGUNDOS

		Profundidad 3m		
	E	=	#DIV/0!	J/m
T1	E	=	19.15	J/m
T2	E	=	76.58	J/m
T3	E	=	172.31	J/m
T4	E	=	306.33	J/m
T5	E	=	478.64	J/m
T6	E	=	689.24	J/m
T7	E	=	938.13	J/m
T8	E	=	1225.32	J/m
T9	E	=	1550.79	J/m
T10	E	=	1914.56	J/m
T11	E	=	2316.61	J/m
T12	E	=	2756.96	J/m
T13	E	=	3235.60	J/m
T14	E	=	3752.53	J/m
T15	E	=	4307.75	J/m
T16	E	=	4901.26	J/m
T17	E	=	5533.07	J/m
T18	E	=	6203.16	J/m
T19	E	=	6911.55	J/m
T20	E	=	7658.22	J/m
T21	E	=		

		Profundidad 4m		
	E	=	#DIV/0!	J/m
T1	E	=	19.15	J/m
T2	E	=	76.58	J/m
T3	E	=	172.31	J/m
T4	E	=	306.33	J/m
T5	E	=	478.64	J/m
T6	E	=	689.24	J/m
T7	E	=	938.13	J/m
T8	E	=	1225.32	J/m
T9	E	=	1550.79	J/m
T10	E	=	1914.56	J/m
T11	E	=	2316.61	J/m
T12	E	=	2756.96	J/m
T13	E	=	3235.60	J/m
T14	E	=	3752.53	J/m
T15	E	=	4307.75	J/m
T16	E	=	4901.26	J/m
T17	E	=	5533.07	J/m
T18	E	=	6203.16	J/m
T19	E	=	6911.55	J/m
T20	E	=	7658.22	J/m
T21	E	=		

		Profundidad 5m		
	E	=	#DIV/0!	J/m
T1	E	=	19.15	J/m
T2	E	=	76.58	J/m
T3	E	=	172.31	J/m
T4	E	=	306.33	J/m
T5	E	=	478.64	J/m
T6	E	=	689.24	J/m
T7	E	=	938.13	J/m
T8	E	=	1225.32	J/m
T9	E	=	1550.79	J/m
T10	E	=	1914.56	J/m
T11	E	=	2316.61	J/m
T12	E	=	2756.96	J/m
T13	E	=	3235.60	J/m
T14	E	=	3752.53	J/m
T15	E	=	4307.75	J/m
T16	E	=	4901.26	J/m
T17	E	=	5533.07	J/m
T18	E	=	6203.16	J/m
T19	E	=	6911.55	J/m
T20	E	=	7658.22	J/m
T21	E	=		

DENSIDAD DE ENERGÍA PROMEDIO (J/m)
1974.37

Respecto a la densidad de energía promedio se observa que, en el rango de menor período, se puede generar hasta los 7660 J/m, se puede considera muy bajo para los dispositivos que se analizamos.

DENSIDAD DE ENERGÍA TOTAL PERÍODO 1.05 - 2 SEGUNDOS

$E = (\rho gh^2/8)^*$

		Profundidad 0.5 m	
T22	E	=	500.97 J/m
T23	E	=	577.66 J/m
T24	E	=	630.13 J/m
T25	E	=	684.11 J/m
T26	E	=	739.26 J/m
T27	E	=	795.19 J/m
T28	E	=	851.50 J/m
T29	E	=	907.74 J/m
T30	E	=	963.49 J/m
T31	E	=	1018.36 J/m
T32	E	=	1071.98 J/m
T33	E	=	1124.03 J/m
T34	E	=	1174.25 J/m
T35	E	=	1222.42 J/m
T36	E	=	1268.38 J/m
T37	E	=	1312.04 J/m
T38	E	=	1353.33 J/m
T39	E	=	1392.23 J/m
T40	E	=	1428.76 J/m
T41	E	=	1462.98 J/m

		Profundidad 1 m	
T22	E	=	2107.95 J/m
T23	E	=	2310.64 J/m
T24	E	=	2520.51 J/m
T25	E	=	2736.43 J/m
T26	E	=	2957.03 J/m
T27	E	=	3180.78 J/m
T28	E	=	3405.99 J/m
T29	E	=	3630.95 J/m
T30	E	=	3853.97 J/m
T31	E	=	4073.46 J/m
T32	E	=	4287.93 J/m
T33	E	=	4496.14 J/m
T34	E	=	4697.00 J/m
T35	E	=	4889.67 J/m
T36	E	=	5073.53 J/m
T37	E	=	5248.15 J/m
T38	E	=	5413.30 J/m
T39	E	=	5568.91 J/m
T40	E	=	5715.06 J/m
T41	E	=	5851.91 J/m

		Profundidad 2m	
T22	E	=	8443.19 J/m
T23	E	=	9266.42 J/m
T24	E	=	10127.90 J/m
T25	E	=	11027.54 J/m
T26	E	=	11965.17 J/m
T27	E	=	12940.51 J/m
T28	E	=	13953.04 J/m
T29	E	=	15001.98 J/m
T30	E	=	16086.19 J/m
T31	E	=	17204.10 J/m
T32	E	=	18353.66 J/m
T33	E	=	19532.32 J/m
T34	E	=	20737.03 J/m
T35	E	=	21964.24 J/m
T36	E	=	23209.97 J/m
T37	E	=	24469.88 J/m
T38	E	=	25739.36 J/m
T39	E	=	27013.60 J/m
T40	E	=	28287.75 J/m
T41	E	=	29556.96 J/m

DENSIDAD DE ENERGÍA TOTAL PERÍODO 1.05 - 2 SEGUNDOS

		Profundidad 3m	
T22	E	=	8443.19 J/m
T23	E	=	9266.45 J/m
T24	E	=	10128.00 J/m
T25	E	=	11027.84 J/m
T26	E	=	11965.97 J/m
T27	E	=	12942.38 J/m
T28	E	=	13957.07 J/m
T29	E	=	15009.99 J/m
T30	E	=	16101.09 J/m
T31	E	=	17230.25 J/m
T32	E	=	18397.30 J/m
T33	E	=	19601.92 J/m
T34	E	=	20843.65 J/m
T35	E	=	22121.86 J/m
T36	E	=	23435.66 J/m
T37	E	=	24783.88 J/m
T38	E	=	26165.07 J/m
T39	E	=	27577.44 J/m
T40	E	=	29018.85 J/m
T41	E	=	30486.82 J/m

		Profundidad 4m	
T22	E	=	8443.19 J/m
T23	E	=	9266.45 J/m
T24	E	=	10128.00 J/m
T25	E	=	11027.84 J/m
T26	E	=	11965.98 J/m
T27	E	=	12942.40 J/m
T28	E	=	13957.12 J/m
T29	E	=	15010.12 J/m
T30	E	=	16101.41 J/m
T31	E	=	17230.99 J/m
T32	E	=	18398.83 J/m
T33	E	=	19604.92 J/m
T34	E	=	20849.21 J/m
T35	E	=	22131.63 J/m
T36	E	=	23452.04 J/m
T37	E	=	24810.25 J/m
T38	E	=	26205.97 J/m
T39	E	=	27638.79 J/m
T40	E	=	29108.15 J/m
T41	E	=	30613.33 J/m

		Profundidad 5m	
T22	E	=	8443.19 J/m
T23	E	=	9266.45 J/m
T24	E	=	10128.00 J/m
T25	E	=	11027.84 J/m
T26	E	=	11965.98 J/m
T27	E	=	12942.40 J/m
T28	E	=	13957.12 J/m
T29	E	=	15010.12 J/m
T30	E	=	16101.42 J/m
T31	E	=	17231.01 J/m
T32	E	=	18398.88 J/m
T33	E	=	19605.05 J/m
T34	E	=	20849.50 J/m
T35	E	=	22132.23 J/m
T36	E	=	23453.22 J/m
T37	E	=	24812.45 J/m
T38	E	=	26209.87 J/m
T39	E	=	27645.40 J/m
T40	E	=	29118.93 J/m
T41	E	=	30630.28 J/m

DENSIDAD DE ENERGÍA PROMEDIO (J/m)
13114.16

En el rango de los 1.05 a 2 segundos se observa un mayor crecimiento respecto al anterior intervalo, llegando a más de los 30630 J/m para las mayores profundidades, lo cual puede dar lugar al funcionamiento de algunos de los dispositivos.

DENSIDAD DE ENERGÍA TOTAL PERIODO 2.05 - 3 SEGUNDOS

$E = (\rho gh^2/8)^*$

	Profundidad 0.5 m				Profundidad 1 m				Profundidad 2m					
T42	E	=	895.67	J/m	T42	E	=	5979.76	J/m	T42	E	=	30816.52	J/m
T43	E	=	901.39	J/m	T43	E	=	6098.94	J/m	T43	E	=	32061.93	J/m
T44	E	=	906.55	J/m	T44	E	=	6209.84	J/m	T44	E	=	33289.00	J/m
T45	E	=	911.19	J/m	T45	E	=	6312.89	J/m	T45	E	=	34493.87	J/m
T46	E	=	915.39	J/m	T46	E	=	6408.54	J/m	T46	E	=	35673.07	J/m
T47	E	=	919.19	J/m	T47	E	=	6497.23	J/m	T47	E	=	36823.58	J/m
T48	E	=	922.62	J/m	T48	E	=	6579.41	J/m	T48	E	=	37942.78	J/m
T49	E	=	925.74	J/m	T49	E	=	6655.51	J/m	T49	E	=	39028.54	J/m
T50	E	=	928.57	J/m	T50	E	=	6725.97	J/m	T50	E	=	40079.13	J/m
T51	E	=	931.14	J/m	T51	E	=	6791.19	J/m	T51	E	=	41099.24	J/m
T52	E	=	933.49	J/m	T52	E	=	6851.55	J/m	T52	E	=	42069.95	J/m
T53	E	=	935.62	J/m	T53	E	=	6907.42	J/m	T53	E	=	43008.73	J/m
T54	E	=	937.58	J/m	T54	E	=	6959.14	J/m	T54	E	=	43909.32	J/m
T55	E	=	939.36	J/m	T55	E	=	7007.04	J/m	T55	E	=	44771.81	J/m
T56	E	=	940.99	J/m	T56	E	=	7051.40	J/m	T56	E	=	45596.50	J/m
T57	E	=	942.49	J/m	T57	E	=	7092.52	J/m	T57	E	=	46383.94	J/m
T58	E	=	943.87	J/m	T58	E	=	7130.63	J/m	T58	E	=	47134.84	J/m
T59	E	=	945.13	J/m	T59	E	=	7165.98	J/m	T59	E	=	47850.09	J/m
T60	E	=	946.29	J/m	T60	E	=	7198.79	J/m	T60	E	=	48530.68	J/m
T61	E	=	947.36	J/m	T61	E	=	7229.26	J/m	T61	E	=	49177.71	J/m

DENSIDAD DE ENERGÍA TOTAL PERIODO 2.05 - 3 SEGUNDOS

	Profundidad 3m				Profundidad 4m				Profundidad 5m					
T42	E	=	31978.57	J/m	T42	E	=	32153.39	J/m	T42	E	=	32179.23	J/m
T43	E	=	33490.99	J/m	T43	E	=	33727.19	J/m	T43	E	=	33765.42	J/m
T44	E	=	35020.70	J/m	T44	E	=	35333.33	J/m	T44	E	=	35388.42	J/m
T45	E	=	36564.11	J/m	T45	E	=	36970.17	J/m	T45	E	=	37047.66	J/m
T46	E	=	38117.44	J/m	T46	E	=	38635.82	J/m	T46	E	=	38742.41	J/m
T47	E	=	39676.78	J/m	T47	E	=	40328.13	J/m	T47	E	=	40471.78	J/m
T48	E	=	41238.17	J/m	T48	E	=	42044.68	J/m	T48	E	=	42234.71	J/m
T49	E	=	42797.64	J/m	T49	E	=	43782.87	J/m	T49	E	=	44029.92	J/m
T50	E	=	44351.25	J/m	T50	E	=	45539.83	J/m	T50	E	=	45855.96	J/m
T51	E	=	45895.16	J/m	T51	E	=	47312.55	J/m	T51	E	=	47711.16	J/m
T52	E	=	47425.70	J/m	T52	E	=	49097.85	J/m	T52	E	=	49593.64	J/m
T53	E	=	48939.35	J/m	T53	E	=	50892.43	J/m	T53	E	=	51501.33	J/m
T54	E	=	50432.83	J/m	T54	E	=	52692.89	J/m	T54	E	=	53431.97	J/m
T55	E	=	51903.10	J/m	T55	E	=	54495.80	J/m	T55	E	=	55383.10	J/m
T56	E	=	53347.41	J/m	T56	E	=	56297.72	J/m	T56	E	=	57352.14	J/m
T57	E	=	54763.26	J/m	T57	E	=	58095.22	J/m	T57	E	=	59336.33	J/m
T58	E	=	56148.49	J/m	T58	E	=	59884.93	J/m	T58	E	=	61332.82	J/m
T59	E	=	57501.18	J/m	T59	E	=	61663.59	J/m	T59	E	=	63338.64	J/m
T60	E	=	58819.75	J/m	T60	E	=	63428.04	J/m	T60	E	=	65350.76	J/m
T61	E	=	60102.88	J/m	T61	E	=	65175.28	J/m	T61	E	=	67366.13	J/m

DENSIDAD DE ENERGÍA PROMEDIO (J/m)
32088.65

Dentro de este rango ya se puede observar un mejor desarrollo y se logra obtener una densidad de energía mayor a los 67360 J/m, a partir de los 2 metros bajo estas condiciones supera la generación de los periodos anteriores, dando lugar a un mejor rendimiento de los dispositivos.

DENSIDAD DE ENERGÍA TOTAL PERÍODO 3.05 - 4 SEGUNDOS

$$E = (\rho g h^2 / 2) \cdot t$$

Profundidad 0.5 m				Profundidad 1 m				Profundidad 2m						
T62	E	=	948.35	J/m	T62	E	=	7257.56	J/m	T62	E	=	49792.35	J/m
T63	E	=	949.26	J/m	T63	E	=	7283.88	J/m	T63	E	=	50375.82	J/m
T64	E	=	950.11	J/m	T64	E	=	7308.37	J/m	T64	E	=	50929.37	J/m
T65	E	=	950.89	J/m	T65	E	=	7331.16	J/m	T65	E	=	51454.28	J/m
T66	E	=	951.61	J/m	T66	E	=	7352.39	J/m	T66	E	=	51951.81	J/m
T67	E	=	952.28	J/m	T67	E	=	7372.19	J/m	T67	E	=	52423.23	J/m
T68	E	=	952.91	J/m	T68	E	=	7390.65	J/m	T68	E	=	52869.79	J/m
T69	E	=	953.48	J/m	T69	E	=	7407.89	J/m	T69	E	=	53292.72	J/m
T70	E	=	954.02	J/m	T70	E	=	7424.00	J/m	T70	E	=	53695.19	J/m
T71	E	=	954.53	J/m	T71	E	=	7439.05	J/m	T71	E	=	54072.36	J/m
T72	E	=	954.99	J/m	T72	E	=	7453.13	J/m	T72	E	=	54431.35	J/m
T73	E	=	955.43	J/m	T73	E	=	7466.31	J/m	T73	E	=	54771.24	J/m
T74	E	=	955.84	J/m	T74	E	=	7478.66	J/m	T74	E	=	55093.03	J/m
T75	E	=	956.22	J/m	T75	E	=	7490.24	J/m	T75	E	=	55397.73	J/m
T76	E	=	956.58	J/m	T76	E	=	7501.10	J/m	T76	E	=	55686.27	J/m
T77	E	=	956.91	J/m	T77	E	=	7511.29	J/m	T77	E	=	55959.54	J/m
T78	E	=	957.22	J/m	T78	E	=	7520.86	J/m	T78	E	=	56218.40	J/m
T79	E	=	957.52	J/m	T79	E	=	7529.86	J/m	T79	E	=	56463.64	J/m
T80	E	=	957.79	J/m	T80	E	=	7538.33	J/m	T80	E	=	56696.03	J/m
T81	E	=	958.05	J/m	T81	E	=	7546.29	J/m	T81	E	=	56916.30	J/m

DENSIDAD DE ENERGÍA TOTAL PERÍODO 3.05 - 4 SEGUNDOS

Profundidad 3m				Profundidad 4m				Profundidad 5m						
T62	E	=	61349.54	J/m	T62	E	=	66902.47	J/m	T62	E	=	69381.65	J/m
T63	E	=	62558.94	J/m	T63	E	=	68606.95	J/m	T63	E	=	71394.26	J/m
T64	E	=	63730.55	J/m	T64	E	=	70286.27	J/m	T64	E	=	73400.91	J/m
T65	E	=	64864.08	J/m	T65	E	=	71938.19	J/m	T65	E	=	75398.61	J/m
T66	E	=	65959.41	J/m	T66	E	=	73560.69	J/m	T66	E	=	77384.49	J/m
T67	E	=	67016.63	J/m	T67	E	=	75151.97	J/m	T67	E	=	79355.72	J/m
T68	E	=	68036.01	J/m	T68	E	=	76710.45	J/m	T68	E	=	81309.65	J/m
T69	E	=	69017.95	J/m	T69	E	=	78234.75	J/m	T69	E	=	83243.72	J/m
T70	E	=	69962.99	J/m	T70	E	=	79723.75	J/m	T70	E	=	85155.55	J/m
T71	E	=	70871.77	J/m	T71	E	=	81176.49	J/m	T71	E	=	87042.89	J/m
T72	E	=	71745.03	J/m	T72	E	=	82592.24	J/m	T72	E	=	88903.68	J/m
T73	E	=	72583.61	J/m	T73	E	=	83970.44	J/m	T73	E	=	90736.01	J/m
T74	E	=	73388.38	J/m	T74	E	=	85310.72	J/m	T74	E	=	92538.18	J/m
T75	E	=	74160.29	J/m	T75	E	=	86612.86	J/m	T75	E	=	94308.63	J/m
T76	E	=	74900.32	J/m	T76	E	=	87876.80	J/m	T76	E	=	96046.00	J/m
T77	E	=	75609.47	J/m	T77	E	=	89102.63	J/m	T77	E	=	97749.10	J/m
T78	E	=	76288.78	J/m	T78	E	=	90290.55	J/m	T78	E	=	99416.91	J/m
T79	E	=	76939.27	J/m	T79	E	=	91440.89	J/m	T79	E	=	101048.58	J/m
T80	E	=	77561.99	J/m	T80	E	=	92554.06	J/m	T80	E	=	102643.40	J/m
T81	E	=	78157.97	J/m	T81	E	=	93630.58	J/m	T81	E	=	104200.84	J/m

DENSIDAD DE ENERGÍA PROMEDIO (J/m)
73974.97

En el último rango ya se observa una mejoría notable respecto a los períodos anteriores, a partir de los 2 metros se obtiene 56900 J/m llegado a más de 104200 J/m en la profundidad de 5 metros. Con las mayores profundidades se tiene un desarrollo aún mayor y se pueden acercar a su máximo potencial energético bajo estas condiciones.

ANEXO D: CÁLCULO DE POTENCIA GENERADA

$$P = E \cdot Cg$$

Profundidad 0.5 m			
PERÍODO 0 - 1 SEGUNDOS	P	=	2186.34 W
PERÍODO 1.05 - 2 SEGUNDOS	P	=	14522.12 W
PERÍODO 2.05 - 3 SEGUNDOS	P	=	35533.74 W
PERÍODO 3.05 - 4 SEGUNDOS	P	=	81917.05 W

Profundidad 1 m			
PERÍODO 0 - 1 SEGUNDOS	P	=	3091.95 W
PERÍODO 1.05 - 2 SEGUNDOS	P	=	20537.38 W
PERÍODO 2.05 - 3 SEGUNDOS	P	=	50252.30 W
PERÍODO 3.05 - 4 SEGUNDOS	P	=	115848.21 W

Profundidad 2 m			
PERÍODO 0 - 1 SEGUNDOS	P	=	4372.68 W
PERÍODO 1.05 - 2 SEGUNDOS	P	=	29044.25 W
PERÍODO 2.05 - 3 SEGUNDOS	P	=	71067.48 W
PERÍODO 3.05 - 4 SEGUNDOS	P	=	163834.11 W

Profundidad 3 m			
PERÍODO 0 - 1 SEGUNDOS	P	=	5355.41 W
PERÍODO 1.05 - 2 SEGUNDOS	P	=	35571.79 W
PERÍODO 2.05 - 3 SEGUNDOS	P	=	87039.54 W
PERÍODO 3.05 - 4 SEGUNDOS	P	=	200654.98 W

Profundidad 4 m			
PERÍODO 0 - 1 SEGUNDOS	P	=	6183.90 W
PERÍODO 1.05 - 2 SEGUNDOS	P	=	41074.77 W
PERÍODO 2.05 - 3 SEGUNDOS	P	=	100504.60 W
PERÍODO 3.05 - 4 SEGUNDOS	P	=	231696.42 W

Profundidad 5 m			
PERÍODO 0 - 1 SEGUNDOS	P	=	6913.81 W
PERÍODO 1.05 - 2 SEGUNDOS	P	=	45922.98 W
PERÍODO 2.05 - 3 SEGUNDOS	P	=	112367.56 W
PERÍODO 3.05 - 4 SEGUNDOS	P	=	259044.47 W

Profundidad 0.5 m			
P	=	2.19	kW
P	=	14.52	kW
P	=	35.53	kW
P	=	81.92	kW

Profundidad 1 m			
P	=	3.09	kW
P	=	20.54	kW
P	=	50.25	kW
P	=	115.85	kW

Profundidad 2 m			
P	=	4.37	kW
P	=	29.04	kW
P	=	71.07	kW
P	=	163.83	kW

Profundidad 3 m			
P	=	5.36	kW
P	=	35.57	kW
P	=	87.04	kW
P	=	200.65	kW

Profundidad 4 m			
P	=	6.18	kW
P	=	41.07	kW
P	=	100.50	kW
P	=	231.70	kW

Profundidad 5 m			
P	=	6.91	kW
P	=	45.92	kW
P	=	112.37	kW
P	=	259.04	kW

En la profundidad menor ofrece un potencial energético bajo, lo que limita la capacidad de generación de los dispositivos, a 1 metro se observa una mejora, pero sigue siendo limitado en comparación con profundidades mayores. A partir de los 3 metros comienza a acercarse a valores de potencia más viables para los dispositivos, ya para las últimas dos profundidades ofrecen un excelente balance entre energía disponible y facilidad de instalación. Representan el máximo potencial de energía disponible y los dispositivos instalados bajo estas condiciones tendría la mayor eficiencia y producción energética.

ANEXO E: MAPAS GENERADOS EN QGIS 3.34.6 DEL RÍO MOTAGUA

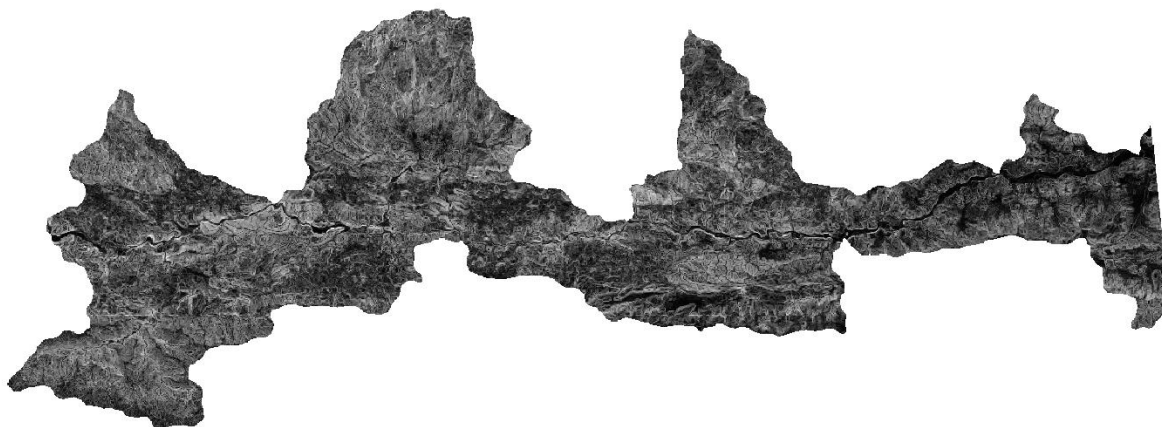


Figura 30: Mapa de pendientes río Motagua

La Figura 30 muestra un mapa de pendientes del río Motagua. En este caso, los tonos más claros indican áreas con pendientes más pronunciadas, alcanzando un 61%, mientras que los tonos más oscuros representan zonas de menor inclinación, llegando hasta pendientes nulas.

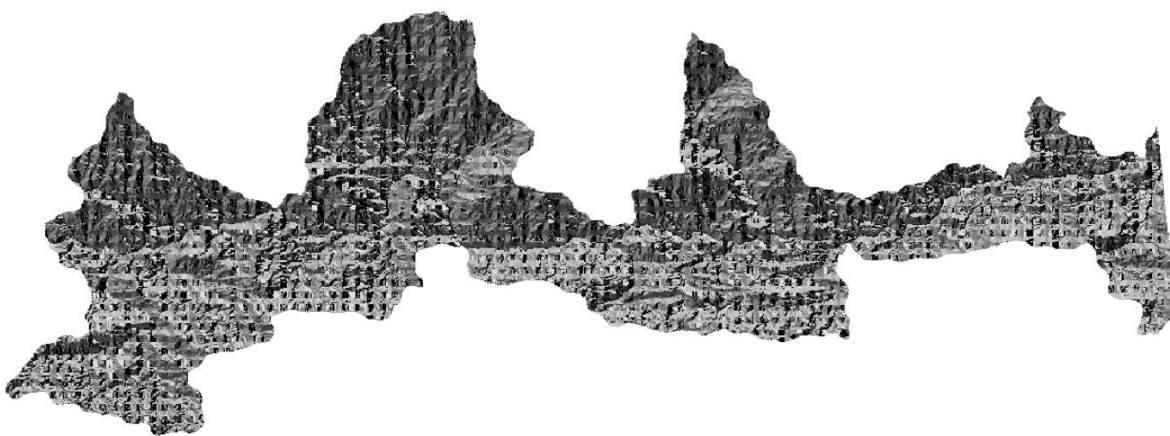


Figura 31: Mapa de corrientes río Motagua

La Figura 31 presenta un mapa de corrientes del río Motagua, en el cual se visualiza la intensidad de las zonas con diferentes velocidades de corriente. Las áreas más oscuras representan regiones con mayor velocidad de flujo, con caudales que alcanzan hasta $255 \text{ m}^3/\text{s}$, mientras que las más claras corresponden a zonas de menor velocidad, con caudales mínimos de $8 \text{ m}^3/\text{s}$. Este mapa permite identificar patrones dinámicos del río y evaluar sus características hidráulicas.

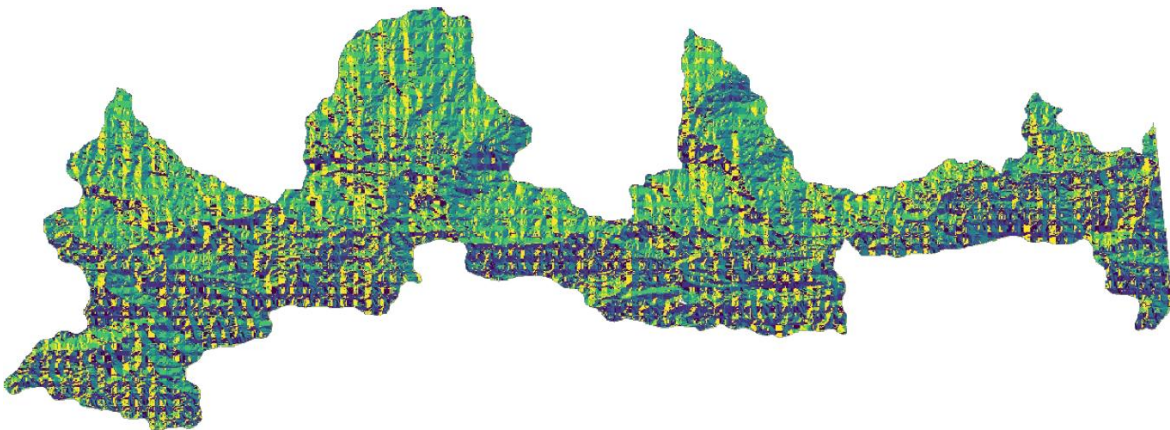


Figura 32: Mapa de flujo río Motagua

La Figura 32 complementa el análisis presentado en la Figura 31, mostrando un mapa de flujos del río Motagua. En este caso, los colores más claros representan áreas con mayor intensidad de flujo, mientras que los tonos más oscuros indican regiones con menor intensidad. Esto facilita una comprensión más integral de las dinámicas hidráulicas del río, permitiendo identificar tanto zonas críticas como patrones relevantes para su evaluación.

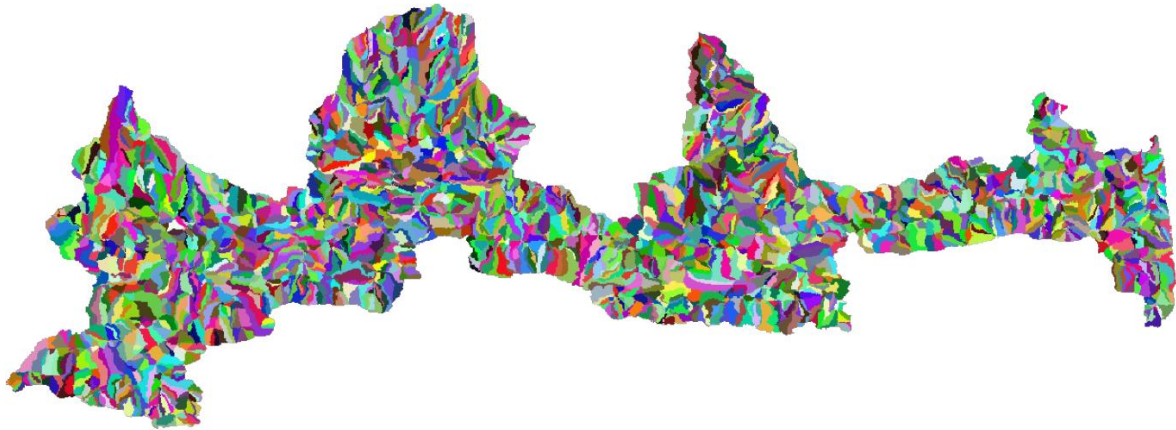


Figura 33: Mapa de microcuencas río Motagua

La Figura 33 corresponde al mapa de las microcuencas dentro de la cuenca del río Motagua. Cada área está representada con colores distintos, lo que permite identificar las divisiones naturales del drenaje y las subcuencas que forman parte de este sistema hidrológico.