



Universidad Pública de Navarra  
Nafarroako Unibertsitate Publikoa

**ESCUELA TÉCNICA SUPERIOR DE INGENIERÍA  
AGRONÓMICA Y BIOCENCIAS**

Trabajo de Fin de Grado

Energía Undimotriz: Estudio del potencial ibérico mediante  
técnicas multivariantes y clasificación no supervisada.

presentado por

Nerea Montoya Moreno

dirigido por

Martín Gastón Romeo

Laura Frías Paredes

GRADO EN CIENCIA DE DATOS

Mayo, 2023



## **Resumen**

Este Trabajo de Fin de Grado tiene como objetivo estudiar el potencial de la Energía Undimotriz en la región ibérica. Se analizan variables clave como la altura y el periodo de las olas para caracterizar el potencial energético y buscar patrones energéticos en diferentes temporadas o niveles de energía. Estos patrones permiten identificar días con diferentes capacidades de aprovechamiento, proporcionando información valiosa para el desarrollo de proyectos de generación de energía undimotriz. Los hallazgos derivados de la representación visual en forma de mapas proporcionan una perspectiva única sobre las diferencias en el potencial energético entre los diferentes sitios de la región. En conclusión, este estudio aporta conocimientos fundamentales para la identificación y aprovechamiento de patrones energéticos en el contexto de la Energía Undimotriz, fomentando así la transición hacia un sistema energético más sostenible y diversificado.

## **Abstract**

This End-Of-Degree Project aims to study the potential of Wave Energy in the Iberian region. Key variables such as wave height and period are analyzed to characterize the energy potential and identify energy patterns during different seasons or energy levels. These patterns allow for the identification of days with varying energy capture capabilities, providing valuable information for the development of wave energy generation projects. The findings derived from visual representation in the form of maps offer a unique perspective on the differences in energy potential among different sites in the region. In conclusion, this study provides essential knowledge for the identification and usage of energy patterns in the context of Wave Energy, fostering the transition towards a more sustainable and diversified energy system.

# Índice

<b>1</b>	<b>Introducción y objetivos</b>	<b>5</b>
<b>2</b>	<b>Estado del arte</b>	<b>7</b>
<b>3</b>	<b>Motivación y conceptos previos</b>	<b>8</b>
3.1	El potencial de la energía del mar como solución al problema energético mundial . . . . .	8
3.2	Energías renovables marinas . . . . .	9
3.3	Energía undimotriz . . . . .	10
3.4	El potencial de la energía undimotriz en Europa . . . . .	12
<b>4</b>	<b>Comprensión de los datos</b>	<b>15</b>
4.1	Variables de interés . . . . .	15
4.2	Adquisición y descripción de los datos . . . . .	18
<b>5</b>	<b>Experimentación y resultados</b>	<b>20</b>
5.1	Análisis descriptivo . . . . .	20
5.2	Análisis de distribuciones . . . . .	26
5.3	Búsqueda de patrones de oleaje . . . . .	31
5.4	Análisis del Potencial de Energía en la Costa Española . . . . .	34
<b>6</b>	<b>Conclusiones y líneas futuras</b>	<b>39</b>
	<b>Bibliografía</b>	<b>41</b>

# Índice de cuadros

1	Porcentaje de energía considerada óptima . . . . .	22
2	Resultados del test de Kolmogorov-Smirnov y parámetros estimados para la distribución Weibull . . . . .	28
3	Resultados del test de Kolmogorov-Smirnov y parámetros estimados para la distribución Gamma . . . . .	28
4	Distribución Weibull . . . . .	30
5	Distribución Gamma . . . . .	30
6	Resultados del test de Kolmogorov-Smirnov y parámetros estimados para ambas distribuciones . . . . .	30
7	Energía promedio de cada muestra del clúster . . . . .	34

# Índice de figuras

1	Mapa mundial del promedio de energía de las olas marinas en kW/m [ <a href="http://www.madrimasd.org">http://www.madrimasd.org</a> ] . . . . .	11
2	Tecnologías relativas a la energía del oleaje [IRENA Offshore Renewables 2020 ES] . . . . .	11
3	Central de Mutriku [ <a href="https://www.energias-renovables.com/energias_del_mar/la-central-de-aprovechamiento-de-energia-de-20210820">https://www.energias-renovables.com/energias_del_mar/la-central-de-aprovechamiento-de-energia-de-20210820</a> ] . . . . .	13

4	Mapa de España con estaciones de recogida de datos de oleaje [15] . . .	19
5	Mapas de calor respecto a meses y días . . . . .	21
6	Mapas de calor respecto a meses y días energía . . . . .	21
7	Gráfico de condición de energía . . . . .	22
8	Rosa de viento para la dirección media de las olas . . . . .	23
9	Generación de olas mediante ondas de diferentes características . . . . .	24
10	Diferentes olas . . . . .	25
11	Energía de las diferentes olas . . . . .	26
12	Gráfico de densidad apilado para altura significativa . . . . .	27
13	Gráfico de densidad apilado para periodo pico . . . . .	29
14	Gráfico de densidad apilado para energía . . . . .	30
15	Gráfico de silueta . . . . .	32
16	Gráficos de olas generadas por diferentes clústeres a lo largo de un día .	33
17	Gráficos de olas generadas por los clústeres 1, 2 y 4 a lo largo de un día	33
18	Mapa de energía . . . . .	35
19	Serie temporal de energía por mes y boyas . . . . .	36
20	Mapa de energías mínima y máxima . . . . .	37

# 1 Introducción y objetivos

La energía oceánica es una fuente de energía renovable y sostenible cuyas tecnologías que se encuentran en constante evolución y crecimiento. Entre las distintas formas de aprovechamiento de esta energía, la energía de las olas se presenta como una de las más prometedoras debido a su abundancia y constancia.

Como su nombre indica, esta se genera a partir del movimiento de las olas del mar, utilizando dispositivos que convierten la energía mecánica del movimiento de las olas en energía eléctrica.

El auge de la energía oceánica de las olas se debe a la preocupación global por la transición hacia una economía baja en carbono y a la necesidad de reducir la dependencia de los combustibles fósiles [1]. Además, esta energía presenta ciertas ventajas, como su disponibilidad constante y previsible, su bajo impacto ambiental y su alta densidad energética en comparación con fuentes de energía intermitentes como la solar o la eólica. Sin embargo, es importante tener en cuenta que aunque se espera que haya energía disponible, su comportamiento es variable y puede requerir el uso de modelos de predicción para integrarse correctamente en la red eléctrica.

Los modelos de predicción son herramientas clave para evaluar y prever la generación de energía de las olas. Estos modelos utilizan datos históricos, mediciones en tiempo real y factores ambientales para estimar la cantidad de energía que puede generar un determinado sistema de energía oceánica de las olas en un período de tiempo dado. Los modelos a corto plazo permiten a los operadores de los sistemas anticipar las variaciones en la generación de energía y planificar en consecuencia, lo que ayuda a optimizar su integración en la red eléctrica. Por otro lado, los modelos de largo plazo se emplean para realizar evaluaciones económicas y diseñar instalaciones.

A pesar de estas ventajas, la energía oceánica de las olas todavía se encuentra en una fase inicial de desarrollo, contando con sistemas de medición como boyas flotantes o dispositivos que se fijan en el fondo del mar y otros sistemas, y presenta ciertos desafíos técnicos, económicos y regulatorios que deben ser superados. Sin embargo, la tecnología y la innovación están avanzando rápidamente, lo que hace que sea una opción cada vez más viable y atractiva [2].

En este Trabajo de Fin de Grado, se llevará a cabo un exhaustivo análisis de la energía undimotriz con el objetivo de comprender en mayor profundidad su potencial aprovechamiento en nuestro país.

Partiendo de una recopilación de datos disponibles, nos enfocaremos en investigar aspectos fundamentales como la altura y el periodo de las olas, con el propósito de determinar qué cantidad de energía puede ser generada y si es factible, realizar una clasificación para identificar diferentes tipos de perfiles energéticos a lo largo del tiempo.

El objetivo principal de este trabajo es profundizar en el conocimiento del potencial que la energía undimotriz puede aportarnos como fuente renovable, con el fin de contribuir a la transición hacia un modelo energético más sostenible y respetuoso con el medio ambiente. Además, se busca explorar y abrir la consecuente línea de investigación asociada al estudio de la variabilidad y evolución espacio-temporal de este recurso.

Al investigar y comprender mejor las características de las olas y su potencial energético, podremos tomar decisiones informadas sobre la viabilidad y rentabilidad de la implementación de dispositivos de captación de energía undimotriz en diferentes ubicaciones costeras de nuestro país. Esto permitirá en un futuro maximizar el rendimiento energético y optimizar la gestión de los recursos disponibles, avanzando así hacia un futuro más sostenible y menos dependiente de fuentes no renovables.

El trabajo se divide en varias secciones con el objetivo de abordar de manera sistemática los principales objetivos del estudio. La sección dos se enfoca en presentar el estado del arte relacionado con el campo de estudio, mientras que en la tercera sección se presenta la motivación del proyecto y se introducen conceptos previos sobre las energías renovables marinas, en particular la energía undimotriz. La sección cuatro describe de forma sucinta las variables de interés en el campo, los datos utilizados en el estudio y su proceso de recopilación. A continuación, en la sección cinco se presenta la exploración realizada, incluyendo gráficos y resultados, divididos en diferentes subsecciones, relacionadas con los análisis planteados. Finalmente, en las conclusiones y líneas futuras, se resumen los hallazgos, se extraen las conclusiones clave y se plantean posibles áreas de investigación futura.

## 2 Estado del arte

La energía undimotriz es un tema de investigación en constante evolución que ha ganado un mayor interés y atención en los últimos años, ya que se reconoce cada vez más como una fuente de energía renovable y sostenible que podría contribuir significativamente a la reducción de las emisiones de gases de efecto invernadero y a la lucha contra el cambio climático.

En la actualidad existen varias tecnologías diferentes para la conversión de energía de las olas, incluyendo dispositivos de absorción, dispositivos de conversión basados en la presión del agua, y dispositivos de conversión basados en el movimiento relativo de las partes de un dispositivo. Cada tecnología tiene sus ventajas y desventajas, y ninguna ha alcanzado todavía la madurez comercial.

En un estudio reciente [3] se analiza el potencial de la energía de las olas en el Mar Mediterráneo, concluyendo que esta energía tiene un gran potencial en esta región, pero aún se necesitan más investigaciones y pruebas a gran escala para determinar la viabilidad económica de estas tecnologías.

Por otro lado, otro estudio examina el estado actual y las perspectivas en Europa, y concluye que existen muchos desafíos que deben ser superados, como la falta de políticas y regulaciones coherentes y la necesidad de reducir los costos de las tecnologías de conversión de energía undimotriz [4].

Además, el potencial global ha sido evaluado en varios estudios [5], donde se concluye que existe una gran cantidad de energía disponible, pero que se requiere una mayor cantidad y calidad de datos para su evaluación y desarrollar tecnologías de conversión de energía de las olas más eficientes.

En resumen, la investigación sobre esta novedosa tecnología se encuentra actualmente en un estado de rápida evolución, y aunque existen muchas opciones diferentes para su conversión, ninguna ha alcanzado todavía la madurez comercial. Sin embargo, se reconoce cada vez más su potencial como fuente de energía renovable y sostenible, y se espera que la investigación y el desarrollo en esta área continúen en el futuro próximo.

## 3 Motivación y conceptos previos

En esta sección se subrayará la importancia fundamental de las energías renovables marinas, centrándonos en particular en la energía undimotriz. En este análisis, se explorará cómo estas fuentes de energía pueden desempeñar un papel crucial en Europa y cómo pueden ayudarnos a abordar el desafío energético actual.

### 3.1 El potencial de la energía del mar como solución al problema energético mundial

La energía es un recurso vital para el desarrollo económico y social de la sociedad moderna. Sin embargo, el modelo energético actual, basado en los combustibles fósiles como el petróleo, el gas y el carbón, presenta una serie de problemas que afectan tanto a nivel local como global. En primer lugar, estos combustibles son finitos y su agotamiento es cada vez más evidente. Además, su extracción y uso tienen un impacto negativo en el medio ambiente y la salud humana, desde la emisión de gases de efecto invernadero hasta la contaminación del aire y el agua. Además, la dependencia de los combustibles fósiles conlleva una vulnerabilidad económica y política para los países que los importan.

Ante esta situación, la transición hacia un modelo energético más sostenible se hace cada vez más necesaria. En este sentido, la energía renovable surge como una alternativa prometedora para abordar los desafíos energéticos y ambientales del mundo. Las energías renovables son aquellas que provienen de fuentes naturales que se regeneran de forma continua, como el sol, el viento, la biomasa, el agua y las mareas. A diferencia de los combustibles fósiles, estas fuentes son abundantes y no generan emisiones de gases de efecto invernadero ni otros contaminantes.

Entre las diversas fuentes de energía renovable, la energía del mar es una de las que presenta mayor potencial. La energía del mar se puede obtener de varias formas, como la energía de las olas, la energía de las mareas, la energía de las corrientes y la energía térmica de los océanos. La energía del mar es abundante, constante y relativamente predecible, lo que la convierte en una opción atractiva para producir energía.

Según el informe de la Agencia Internacional de Energía Renovable (IRENA) sobre el estado de las energías renovables a nivel mundial en 2021 [6], la capacidad de energía renovable instalada a nivel mundial ha aumentado en un 10,3 % en 2020, lo que equivale a 260 GW de energía renovable. Además, la energía renovable representó el 72 % de la capacidad de energía agregada en todo el mundo en 2020. La energía eólica y solar fueron las principales fuentes de energía renovable agregada en 2020, mientras que la energía del mar tuvo un crecimiento más modesto.

En cuanto a la energía renovable marina, creció un 16 % en 2020, alcanzando los 35,5 gigavatios. La energía de las mareas representó la mayor parte de la capacidad instalada (31,9 GW), seguida de la energía de las corrientes (2,6 GW) y la energía de las olas (1 GW).

Sin embargo, el potencial de la energía del mar es enorme. Según el informe del Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático (IPCC) [7], la energía del mar podría proporcionar entre el 10 % y el 15 % de la demanda eléctrica mundial para 2050. Además, se espera que la energía del mar se convierta en una fuente importante de energía renovable en los próximos años debido a la mejora de la tecnología y la reducción de los costos.

Es por ello que la energía del mar representa una oportunidad emocionante y prometedor para resolver el problema energético mundial. A medida que la tecnología continúa avanzando y se vuelve más accesible, las fuentes de energía renovable, como la energía del mar, tienen el potencial de transformar la forma en que generamos y consumimos energía.

## **3.2 Energías renovables marinas**

Junto al interés en la energía de las olas, también llamada undimotriz, encontramos otras 4 formas de generar energía a partir de recursos marinos.[2]

### **1. Energía mareomotriz**

Se aprovecha el movimiento de las mareas para generar energía. Se construyen presas en la costa que capturan el agua de la marea alta y luego la liberan a través de turbinas para generar electricidad. La central eléctrica de la bahía de Fundy, en Canadá, fue uno de los primeros proyectos de energía de las mareas en producir energía a gran escala. Se construyó en 1984 y utilizaba turbinas de tipo "barrage" que aprovechaban la energía cinética de las mareas. Hay varias plantas de energía mareomotriz en funcionamiento en todo el mundo, como la planta de La Rance en Francia y la planta de Sihwa Lake en Corea del Sur. Sin embargo, la energía mareomotriz sigue siendo una fuente de energía relativamente pequeña en comparación con otras fuentes de energía renovable.

### **2. Energía térmica oceánica**

Se aprovecha la diferencia de temperatura entre la superficie del mar y las profundidades para generar energía. Se utilizan dispositivos que aprovechan la energía térmica del agua para producir vapor y, posteriormente, generar electricidad. Esta tecnología se encuentra en una fase muy temprana de desarrollo y aún no se ha demostrado que sea viable a gran escala.

### **3. Energía eólica marina**

Se utiliza la fuerza del viento para generar electricidad a través de turbinas eólicas que se instalan en el mar. Se destaca el parque eólico marino Hornsea 2, ubicado frente a las costas de Inglaterra, es uno de los mayores del mundo, con una capacidad instalada de 1.4 GW y un total de 165 turbinas eólicas. Esta infraestructura es capaz de generar energía limpia para abastecer a más de 1.3 millones de hogares.[8]

#### 4. Energía de corrientes marinas

Se aprovecha el movimiento de las corrientes marinas para generar electricidad. Se utilizan dispositivos que capturan la energía cinética del agua en movimiento. El proyecto Rotech Tidal Turbine, en Irlanda del Norte, fue uno de los primeros proyectos de energía de las corrientes oceánicas en demostrar su viabilidad. Se instaló en 2008 y utilizaba una turbina de eje horizontal que giraba gracias a la corriente del mar. Actualmente, hay varias tecnologías en desarrollo que pueden aprovechar esta energía, como turbinas de eje horizontal y vertical, y dispositivos que se fijan al fondo del mar. Aunque todavía no se ha desarrollado una tecnología comercialmente viable para la energía de las corrientes marinas, se espera que esta fuente de energía tenga un gran potencial en el futuro.

Todos estos tipos de energía se encuentran en una fase de desarrollo temprana o experimental, sin haber alcanzado aún una escala comercial significativa.

Sin embargo, hay un gran potencial para la energía marina en el futuro, y se espera que la tecnología continúe mejorando y madurando en los próximos años.

El potencial de la energía marina es significativo, ya que los océanos cubren aproximadamente el 71 % de la superficie de la Tierra. Según un informe de la Agencia Internacional de Energía Renovable (IRENA) [6], se espera que la capacidad instalada de energía eólica marina en todo el mundo aumente de 30 GW en 2020 a más de 234 GW en 2030. Además, se espera que la energía de las corrientes marinas tenga un potencial teórico de generación de energía de alrededor de 20.000 TWh al año, lo que equivale a aproximadamente el 10 % del consumo mundial de electricidad en 2019. Estas cifras demuestran el gran potencial de las energías renovables marinas para contribuir a la transición energética global hacia un futuro más sostenible.

### 3.3 Energía undimotriz

En este proyecto nos centramos en la energía marina conocida como undimotriz u olamotriz. Esta energía se genera a través de las olas creadas por la interacción del viento con la superficie del mar, las cuales contienen tanto energía cinética como energía potencial que pueden ser transformadas en electricidad mediante diferentes sistemas de captación. La cantidad de energía undimotriz disponible depende de la velocidad del viento, la distancia que recorre y su duración. En general, la mayor concentración de energía se encuentra en las latitudes 40° y 60° en ambos hemisferios, donde el viento sopla más fuerte y puede generar olas de gran altura en los océanos Atlántico y Pacífico. Europa y América occidental son zonas ideales para la extracción de energía undimotriz debido a su ubicación geográfica, como se puede observar en la figura 1.

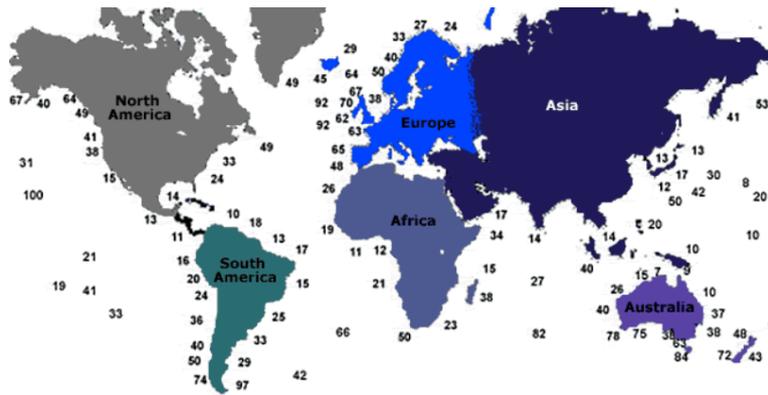


Figura 1: Mapa mundial del promedio de energía de las olas marinas en kW/m  
[\[http://www.madrimasd.org\]](http://www.madrimasd.org)

Además, se ha descubierto un gran potencial para este tipo de energía y, junto con el desarrollo actual de plantas generadoras, se espera que sea una de las fuentes de energía renovable más importantes en el futuro.

Existen varios tipos de tecnologías de extracción de energía undimotriz, como dispositivos colectores de olas, sistemas de columna oscilante de agua, dispositivos móviles articulados y dispositivos oscilantes. Cada uno utiliza diferentes principios de funcionamiento para aprovechar la energía de las olas. Algunos de estos dispositivos se pueden visualizar en la figura 2, donde se ilustra la diversidad de tecnologías empleadas en la captura de energía undimotriz.

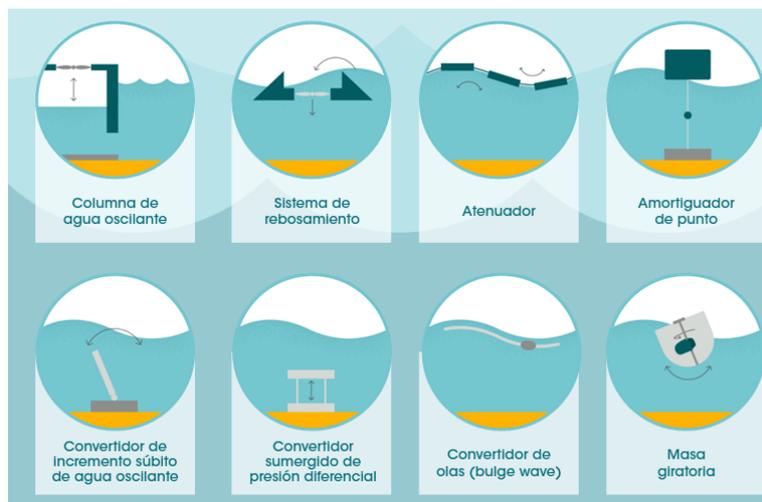


Figura 2: Tecnologías relativas a la energía del oleaje [IRENA Offshore Renewables 2020 ES]

Aunque la construcción de plantas generadoras de energía undimotriz puede modificar el paisaje, el impacto ambiental es mínimo en comparación con otras formas de generación de energía. Además, esta energía es limpia y no representa grandes riesgos para las personas que operan las plantas.

Hay que notar que, a pesar de que la inversión inicial para la construcción de plantas generadoras de energía undimotriz es alta, la tecnología se está desarrollando rápidamente y se espera que compita directamente con otras formas de generación de energía en el futuro.

En términos generales, la energía undimotriz se ha desarrollado en dos formas principales: la primera es la conversión de energía cinética de las olas en electricidad a través de dispositivos de absorción. Estos son sistemas que flotan en el océano cerca de la costa, sobre la superficie o sumergidos, como boyas flotantes, y la segunda es la conversión de la energía de la oscilación de las olas en electricidad a través de dispositivos de oscilación, como columnas de agua oscilantes o dispositivos que utilizan la interacción de las olas con una estructura fija. Se instalan a lo largo de la línea costera o en el lecho marino en aguas poco profundas.[9]

Cabe mencionar que actualmente no hay una tecnología dominante en el campo de la energía undimotriz. Se están desarrollando diferentes enfoques para convertir la energía de las olas en electricidad, cada uno con sus ventajas y desventajas. Algunos dispositivos son más simples y tienen un menor impacto ambiental, mientras que otros son más eficientes en la conversión de energía. En general, la energía undimotriz es limpia, sin emisiones ni residuos, y su evolución avanza rápidamente con nuevas tecnologías.

### **3.4 El potencial de la energía undimotriz en Europa**

Siendo Europa líder en este sector, las opciones de generación de energía a partir de recursos marinos, como la energía undimotriz, tienen un gran potencial. Aunque la energía mareomotriz ha sido la más desarrollada hasta la fecha, se estima que la energía undimotriz, con su alto potencial, podría satisfacer la demanda energética mundial[10]. Sin embargo, es importante tener en cuenta que las principales actividades en este campo todavía se encuentran en desarrollo, y de hecho, la mayoría de las plantas undimotrices instaladas han sido desconectadas después de completar sus programas de prueba.

El sector de la energía undimotriz en Europa ha experimentado un notable crecimiento en capacidad instalada, triplicando su capacidad instalada en 2021, alcanzando los 681 kW. Desde 2010, se han instalado 12,7 MW de capacidad undimotriz en Europa, de los cuales 11,3 MW ya han sido desconectados después de completar sus programas de prueba.

Actualmente, se están realizando pruebas en 1,4 MW en el agua. Se han instalado cinco ingenios undimotrices en Europa en 2021 de cuatro tecnologías diferentes, lo que denota un estado saludable de la I+D en el sector.

Escocia, los Países Bajos y la Península Ibérica son los grandes polos europeos de atracción de tecnología undimotriz, con varias instalaciones ejecutadas en 2021 y otras planificadas para los próximos años, impulsadas por el creciente apoyo político y fondos públicos destinados al desarrollo de estas tecnologías.

Es más, la planta de Islay LIMPET, en Escocia, fue uno de los primeros proyectos de energía de las olas en operar a escala comercial. Se construyó en 2000 y utilizaba un dispositivo de absorción de energía de las olas basado en el principio de columna de agua oscilante.

Más allá de Europa, las empresas americanas también han estado muy activas en 2021, con tres proyectos piloto en Nueva Escocia (Canadá), donde una de ellas ha instalado un dispositivo flotante de aprovechamiento de la energía de las corrientes de 420 kW de potencia. Además, se han instalado cinco dispositivos de aprovechamiento de la energía de las olas en China, Chile, Australia y Estados Unidos.[11]

En España también se están llevando a cabo proyectos de energía undimotriz, uno de las cuales será la mayor central undimotriz del país hasta la fecha en Mallorca. Con solo olas de 0.5 metros, esta central será capaz de generar energía suficiente para abastecer la mitad del consumo del puerto. Además, otra central undimotriz, mostrada en la figura 3, fue instalada en Mutriku, Guipúzcoa, hace 12 años. Sin embargo, a pesar de estos proyectos, aún no hay ninguna planta de gran capacidad que aproveche el potencial que ofrece este recurso inagotable en un país con más de 8000 km de costa.[12]



Figura 3: Central de Mutriku [[https://www.energias-renovables.com/energias\\_del\\_mar/la-central-de-aprovechamiento-de-energia-de-20210820](https://www.energias-renovables.com/energias_del_mar/la-central-de-aprovechamiento-de-energia-de-20210820)]

Actualmente, se están llevando a cabo numerosos estudios y proyectos piloto para mejorar la tecnología de la energía de las olas y aumentar su eficiencia y rentabilidad económica. Algunos de estos estudios incluyen:

- Investigación sobre nuevos diseños de dispositivos de captación de energía de las olas, como el uso de sistemas de flotadores o de palas oscilantes para aumentar la eficiencia de la conversión de energía.
- Estudios sobre la viabilidad técnica y económica de la energía de las olas en diferentes regiones del mundo, incluyendo análisis de la intensidad y dirección de las olas, las características del fondo marino y las condiciones meteorológicas.
- Investigación sobre la integración de la energía de las olas en la red eléctrica, incluyendo la conexión a tierra de los dispositivos y el diseño de sistemas de almacenamiento de energía.
- Estudios sobre los posibles impactos ambientales de los dispositivos de captación de energía de las olas en los ecosistemas marinos y costeros, y la evaluación de medidas de mitigación y compensación.

Estos estudios buscan mejorar la tecnología y la eficiencia de la conversión de energía, evaluar la viabilidad económica y técnica en diferentes regiones, mejorar la integración en la red eléctrica y minimizar los impactos ambientales.

Además, el propio diseño y dimensionalización de las futuras instalaciones pasa por conocer de forma detallada el comportamiento del recurso, su variabilidad y disponibilidad tanto estacional como diaria.

El presente trabajo trata de sentar las bases e iniciar la línea de investigación enfocada en el conocimiento y modelización del potencial undimotriz.

Ahora bien, la implantación de estas tecnologías necesita disponer de estudios detallados del potencial de energía undimotriz para identificar las zonas con mayor potencial de energía de las olas, teniendo en cuenta factores como la altura, la longitud y la frecuencia de las olas, así como la profundidad y la topografía del fondo marino. Estos estudios permiten identificar las áreas más adecuadas para la instalación de dispositivos de conversión de energía de las olas en electricidad, y para planificar de manera efectiva el despliegue de esta tecnología.

## 4 Comprensión de los datos

En la presente sección se abordarán aspectos clave para el análisis de datos y la presentación de los resultados.

Se comenzará discutiendo las características o propiedades de interés comúnmente estudiadas en este campo, sentando así las bases teóricas necesarias para comprender la naturaleza de las variables a investigar. A continuación, se presentarán los datos utilizados, detallando su fuente y características relevantes.

### 4.1 Variables de interés

Es importante definir las variables de decisión que se suelen utilizar en la evaluación del potencial energético de las olas. Estas variables son fundamentales para la toma de decisiones y la planificación de proyectos, ya que su selección adecuada puede tener un gran impacto en la viabilidad técnica y económica de los proyectos.

Entre las variables de decisión más comunes en la evaluación del potencial de la energía de las olas se incluyen la altura y la dirección de las olas, la velocidad y dirección del viento y el período de las olas.

Además, también pueden incluirse variables relacionadas con el diseño y la ubicación de los dispositivos de captación de energía de las olas, como la forma y el tamaño de los dispositivos y la orientación y ubicación de estos.

A continuación, observamos la definición de las variables más importantes y sus respectivas ecuaciones, basándonos en estudios previamente realizados [14] y en la teoría lineal de las olas. Entre estas variables de carácter general, resaltamos que la altura significativa y el periodo medio son la base de nuestro posterior trabajo. Se incluyen:

#### 1. Altura significativa de la ola ( $H_s$ ):

Se define como la media de la tercera parte de las olas más altas en un período de tiempo determinado. Se mide en metros ( $m$ ) y se calcula a partir de los datos de altura de las olas medidos por boyas o modelos de reanálisis.

Es importante tener en cuenta que la  $H_s$  no representa la altura máxima de las olas, ya que las olas más grandes pueden estar presentes en una muestra temporal pero no ser tomadas en cuenta en el cálculo de la  $H_s$ . Puede ser medida utilizando diferentes técnicas, como el uso de boyas o sensores remotos, y es una variable que se utiliza comúnmente en la evaluación de la energía de las olas a nivel mundial.

Para calcular la altura significativa de las olas, se lleva a cabo la siguiente formulación:

$$H_s = 4\sqrt{m_0} \quad (1)$$

Donde  $m_0$  es el momento de la ola de primer orden y se define como:

$$m_0 = \iint S(f, k) df dk \quad (2)$$

Cabe mencionar que  $S(f, k)$  se refiere a la densidad espectral de la energía de las olas, que se utiliza para analizar las características de las olas en el mar. La densidad espectral de la energía de las olas describe cómo se distribuye la energía de las olas en diferentes frecuencias y longitudes de onda. Se calcula a partir de los datos de altura de las olas medidos por boyas o modelos de reanálisis, y se utiliza para estimar la energía que puede ser extraída de las olas en un lugar determinado.

$f$  representa la frecuencia de las olas y  $k$  representa el número de onda. La densidad espectral de la energía de las olas se representa en función de  $f$  y  $k$ , y se puede visualizar en un gráfico bidimensional conocido como espectro de energía de las olas.

Es una medida importante para evaluar la energía de las olas y su potencial de aprovechamiento en un determinado lugar, aunque no es objeto de nuestro análisis.

## 2. Período de pico ( $T_p$ ):

Es el tiempo medio entre dos crestas consecutivas de las olas, y se utiliza para estimar la frecuencia y la energía de las olas.

El  $T_p$  se puede utilizar para evaluar la cantidad de energía que se puede extraer de las olas, ya que las olas con períodos más largos generalmente contienen más energía.

Esta variable puede variar considerablemente en función de la ubicación geográfica y las condiciones meteorológicas. Generalmente, se utilizan técnicas como el uso de boyas oceanográficas o instrumentos de medición remotos para su medición.

El  $T_p$  se mide generalmente en segundos ( $s$ ) y se calcula:

$$T_p = \frac{1}{f_p} \quad (3)$$

Donde  $f_p$  es la frecuencia del pico de energía espectral y se define como:

$$f_p = \operatorname{argmax}(S(f, k)) \quad (4)$$

## 3. Dirección de la ola ( $Dir$ ):

Es la dirección hacia la que se propaga la cresta de la ola.

Esta variable es importante porque los dispositivos de captación de energía de las olas deben ser ubicados de tal manera que estén orientados en la dirección adecuada para capturar la energía de las olas de manera más efectiva.

La dirección de la ola se mide en grados ( $^{\circ}$ ) y se expresa generalmente como una dirección cardinal (N, S, E, O) o una dirección en grados en relación con el norte verdadero. Esta variable se puede medir utilizando diferentes técnicas, como boyas oceanográficas o instrumentos de medición remotos.

Es importante porque influye en la dirección y la forma en que se propagan las olas.

#### **4. Velocidad del viento ( $WS$ ):**

Es una variable importante, ya que es la principal fuente de energía que impulsa la formación de las olas. Se define como la velocidad del viento a una altura determinada sobre la superficie del mar.

El viento sopla sobre la superficie del agua y crea una perturbación que se convierte en una ola a medida que se propaga a través del océano. La velocidad del viento se mide en metros por segundo ( $m/s$ ) y se puede medir utilizando diferentes técnicas, como anemómetros o instrumentos de medición remotos.

#### **5. Densidad del agua ( $\rho$ ):**

Variable importante en el cálculo de la energía de las olas, ya que está relacionada con la cantidad de masa y volumen de agua movidos por las olas.

En este estudio, se considerará una densidad de agua de, aproximadamente,  $1025 \text{ kg/m}^3$ , que corresponde a la densidad promedio del agua en nuestro país. Esta elección se basa en la necesidad de utilizar una densidad realista y representativa para los cálculos.

#### **6. Energía de las olas ( $E$ ):**

Se define como la cantidad total de energía cinética contenida en un volumen de agua debido a la presencia de las olas. Esta energía se origina en la acción del viento sobre la superficie del mar y se transfiere a las olas en forma de energía cinética. Cuanto más fuerte sea el viento, más energía se transferirá a las olas y mayor será su altura y su velocidad. Su cálculo se lleva a cabo del siguiente modo:

$$E = 0,5\rho \cdot g \cdot H_s^2 \quad (5)$$

Donde:

- $\rho$  es la densidad del agua,
- $g$  es la aceleración debido a la gravedad,
- $H_s$  es la altura significativa de las olas.

Además, el periodo de pico se puede incluir en esta fórmula porque puede ser una mejor representación de la energía total de las olas. Además, el periodo de pico también está relacionado con la velocidad de las olas, lo que puede afectar la cantidad de energía cinética que contienen.

La velocidad de una onda se puede calcular como la distancia que viaja la onda dividida por el tiempo que tarda en viajar esa distancia. En el caso de las olas, la distancia que viajan las crestas de las olas es igual a la longitud de onda, y el tiempo que tardan en viajar esa distancia es igual al periodo de la ola.

La relación entre la velocidad de la onda, la longitud de onda y el periodo se puede expresar como:

$$v = \frac{L}{T} \quad (6)$$

Donde:

- $v$  es la velocidad de la onda,
- $L$  es la longitud de onda,
- $T$  es el periodo de la onda.

Por lo tanto, cuanto mayor sea el periodo de las olas, mayor será su longitud de onda y mayor será su velocidad.

Por tanto, la fórmula anterior se puede reescribir del siguiente modo:

$$E = 0,5\rho \cdot g \cdot H_s^2 \cdot T_p \quad (7)$$

En nuestro análisis, utilizaremos esta fórmula de energía de las olas como la medida principal para evaluar la energía de las olas. Esta fórmula nos permitirá cuantificar la energía total contenida en las olas y nos brindará información importante para nuestro estudio.

## 4.2 Adquisición y descripción de los datos

En esta sección se presentarán los datos que son utilizados para el desarrollo de este proyecto, proporcionados por Puertos del Estado [15], que cuenta con una amplia red de estaciones meteorológicas y mareógrafos distribuidos por toda la costa española.

Es importante destacar que, en primer lugar, se ha analizado la disponibilidad de los datos registrados por Puertos del Estado en los diferentes puntos de medición de nuestro país. Una vez identificados los lugares con históricos potencialmente útiles, se ha procedido a realizar una solicitud para descargarlos y dicha solicitud ha sido aceptada. Esta obtención de datos históricos completos nos permitirá llevar a cabo un análisis exhaustivo y detallado.

Concretamente, contamos con 44 archivos, en los que cada uno se corresponde con los datos históricos de una boya ubicada en un punto de nuestro país, como se puede observar en la figura 4.



Figura 4: Mapa de España con estaciones de recogida de datos de oleaje [15]

Estos datos contienen entre 12 y 14 variables, dependiendo de la zona, que permiten caracterizar el comportamiento del oleaje. Las variables incluyen información temporal, como la fecha y hora (en GMT), así como información acerca de la altura y periodo del oleaje, tanto en su valor significativo como en su cruce por cero, y la dirección media de procedencia. Además, se incluyen variables relacionadas con la dispersión angular en toda la banda resuelta y en el pico de energía espectral.

Para la obtención de estos datos, las boyas escalares y direccionales miden una serie de elevaciones instantáneas de la superficie del mar alrededor del nivel medio durante un intervalo de tiempo mínimo. A continuación, se aplican los análisis estándares de cruce por cero y espectral, que permiten obtener los parámetros más representativos del oleaje:  $H_s$ ,  $T_m$ ,  $T_p$ , etc. para un instante determinado.

Cabe mencionar que cada fila de nuestros datos representa el promedio horario de las mediciones de cada variable durante esa hora específica.

## 5 Experimentación y resultados

Se llevará a cabo un análisis descriptivo inicial para obtener una visión general de las variables estudiadas. Se continuará con un análisis de distribuciones, explorando cómo se distribuyen los datos y detectando posibles patrones o sesgos. También se realizará una clasificación no supervisada para identificar grupos o patrones inherentes en los datos. Por último, se emplearán mapas interactivos para visualizar potenciales energéticos de manera intuitiva y dinámica.

### 5.1 Análisis descriptivo

El análisis descriptivo es una etapa fundamental en nuestra investigación, ya que nos permite obtener una comprensión de los datos utilizados en nuestro estudio. En esta sección, presentaremos un análisis descriptivo exhaustivo de las variables de interés, haciendo énfasis en la altura significativa de las olas, el periodo de pico y la dirección media.

En esta etapa, hemos introducido una variable adicional llamada energía, la cual se ha calculado mediante la determinación de la energía cinética de las olas a partir de su altura y periodo, tal como se ha explicado en la ecuación 7.

La inclusión de esta nueva variable resulta fundamental, ya que nos permitirá explorar y evaluar de manera más precisa y detallada el potencial energético de las olas. A pesar de no formar parte del conjunto inicial de datos, esta variable adicional se vuelve también de gran relevancia para nuestro estudio

Mencionamos que para esta exploración, utilizaremos la Boya de Gijón. La Boya Gijón se encuentra en el puerto de Gijón, en las coordenadas geográficas: latitud 43.62 y longitud -5.66, en la costa norte de España, en el Mar Cantábrico. Sus datos llevan siendo recopilados desde el año 2001 hasta la actualidad.

El objetivo de este análisis es extraer información relevante de los datos para poder entender mejor los patrones de las olas en la región, que más adelante puedan extenderse a las demás zonas.

Para ello, en primer lugar, creamos mapas de calor, donde cada celda de la matriz representa un valor numérico en una escala de color. Estos gráficos son útiles para visualizar la relación entre dos variables discretas, como las alturas significativas de las olas en diferentes meses y días durante varios años. Al representar esta información en un mapa de calor, se puede observar fácilmente las tendencias en el patrón de las alturas significativas de las olas en diferentes períodos del tiempo.

Se decide realizar las gráficas tanto para la altura significativa como para el periodo de pico, teniendo en cuenta que nos interesa que este último sea cuánto más bajo, pues a menos periodo mayor frecuencia.

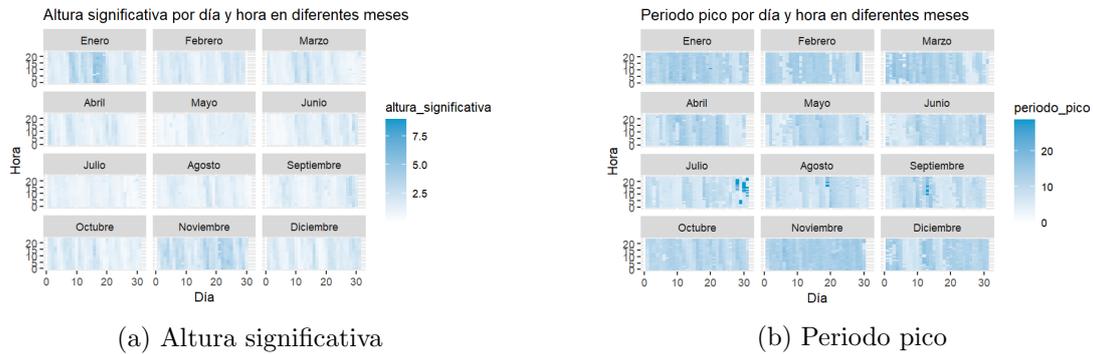


Figura 5: Mapas de calor respecto a meses y días

Después de analizar los gráficos generados a partir de las variables de altura significativa de las olas y periodo de pico por meses y días durante varios años, figura 5, se puede concluir que es posible identificar claramente qué meses presentan olas con mayor altura. Sin embargo, la interpretación de los periodos con olas fuertes es más compleja debido a que la frecuencia puede ser igualmente tardía en periodos de mar tranquilo. A pesar de esto, se pueden identificar en los gráficos las épocas en las que prácticamente no hay olas.

De manera similar, se realiza el mismo procedimiento para la energía.

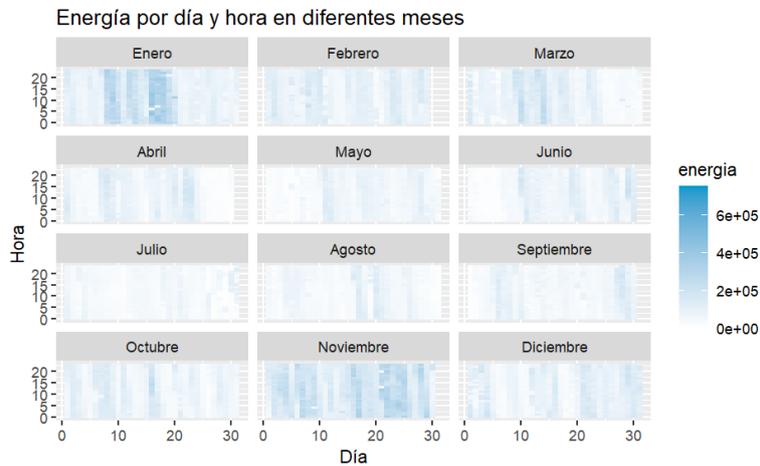


Figura 6: Mapas de calor respecto a meses y días energía

Como podemos ver en la figura 6 destacan los meses de enero y noviembre por tener un elevado potencial energético. Así como, el mes de julio, que sobresalta por su calma y tranquilidad.

Otro enfoque que se le ha dado a esta variable es presentar un gráfico como el de la figura 7, donde, se muestra la cantidad de días en los que la energía de las olas puede considerarse óptima según un criterio establecido. Para este análisis, se ha definido que las olas con una altura superior a 1.5 metros y un período inferior a 15 segundos son las más adecuadas para la generación de energía. Estos valores se han tomado tras analizar los estadísticos de cada variable.

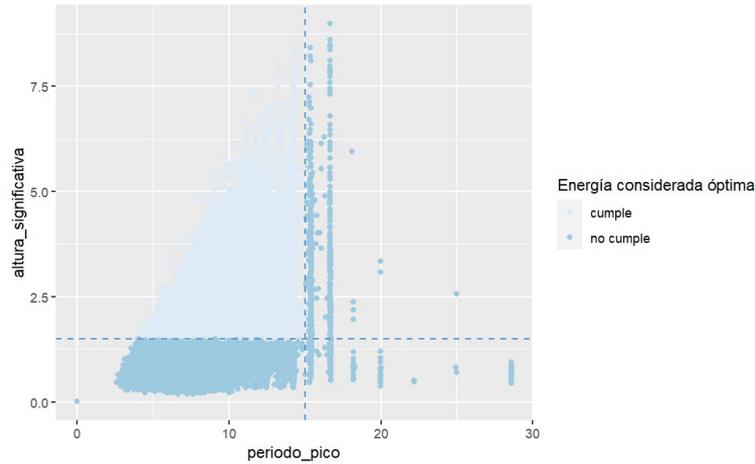


Figura 7: Gráfico de condición de energía

Por ello, se comprueba en el cuadro 1 el porcentaje de puntos que cumplían la generación óptima considerada de energía, obteniendo los consecuentes resultados:

Porcentaje de puntos que cumplen	45.17
Porcentaje de puntos que no cumplen	54.83

Cuadro 1: Porcentaje de energía considerada óptima

Es importante destacar que al elegir estos valores de altura y período nosotros mismos, los resultados obtenidos no son necesariamente representativos de todo el potencial energético de las olas. Estos resultados son limitados por las restricciones que hemos impuesto y reflejan una evaluación inicial. Es necesario profundizar en el análisis y considerar las limitaciones específicas de la ubicación, las características del oleaje y la tecnología. También es válido explorar diferentes rangos menos restrictivos para la altura y el período, ya que esto puede influir considerablemente en los resultados obtenidos.

Para complementar el análisis de las variables meteorológicas en el estudio de las olas, se utiliza una rosa del viento para visualizar la dirección media de las olas en función de su altura significativa.

La rosa del viento es una representación gráfica que muestra la frecuencia de los vientos y las direcciones en las que soplan, y en este caso se utilizó para mostrar la distribución de las direcciones medias de las olas. Se representan los datos mediante barras de colores que indican la frecuencia de las direcciones medias de las olas.

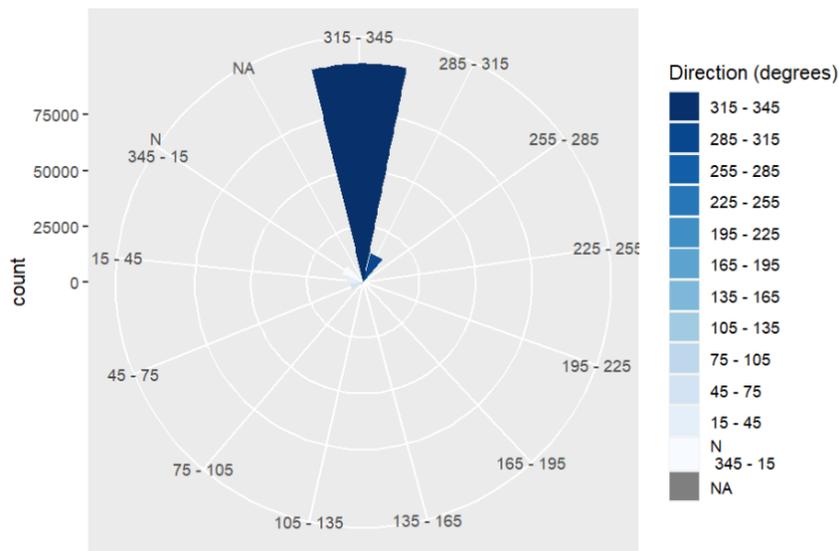


Figura 8: Rosa de viento para la dirección media de las olas

Basándonos en los resultados obtenidos en la figura 8, podemos concluir que la mayoría de las olas se originan en dirección norte, mientras que la presencia de olas provenientes del sur es prácticamente nula, lo cual es lógico. Además, se puede observar un pequeño porcentaje de olas que provienen de las direcciones nordeste y noroeste.

En conclusión, este análisis ha proporcionado información relevante sobre los patrones de las olas en la región estudiada. Los mapas de calor generados han permitido visualizar las tendencias en las alturas significativas y los periodos de pico de las olas a lo largo de diferentes meses y días. Se ha observado que ciertos meses presentan olas con mayor potencial, destacando enero y noviembre, principalmente en términos de altura, mientras que la interpretación de los periodos de olas fuertes es más compleja. Además, la mayoría de las olas se dirigen hacia el norte, con una presencia mínima de olas que van hacia el sur. Estos hallazgos proporcionan una base para una comprensión más profunda del comportamiento de las olas y su potencial energético.

En segundo lugar, vamos a explorar visualmente el significado de las variables altura significativa y periodo mediante la representación de ondas.

Utilizamos estos datos para calcular diferentes características de olas que nos ayudarán a comprender mejor su comportamiento. Estas características incluyen la amplitud, que se define como la mitad de la altura de la ola, y la función seno, que describe la variación de la elevación de la superficie del mar en función del tiempo.

En particular, la función seno se define como  $2\pi ft$ , donde  $f$  es la frecuencia de la onda. La frecuencia, a su vez, se calcula como el inverso del periodo de pico de la ola, ecuación 3.

Al utilizar la amplitud y la función seno, podemos representar gráficamente las diferentes olas generadas a partir de los datos de altura y periodo. La amplitud nos proporciona información sobre la magnitud de la ola, mientras que la función seno nos permite visualizar cómo varía la elevación de la superficie del mar a lo largo del tiempo. Al combinar ambas, podemos obtener una representación visual de las olas en función de su altura y periodo.

Al representar nuestros datos en forma de olas, podemos observar en la figura 9 la forma y el comportamiento de diferentes tipos de olas a raíz de combinaciones de altura y periodo. Hemos seleccionado al azar días con periodos más largos y otros con periodos más cortos, así como días con alturas medias, días muy tranquilos y días con alto oleaje. Esta representación nos permitirá comprender cómo estas características influyen en la generación de las olas y en la energía asociada a ellas.

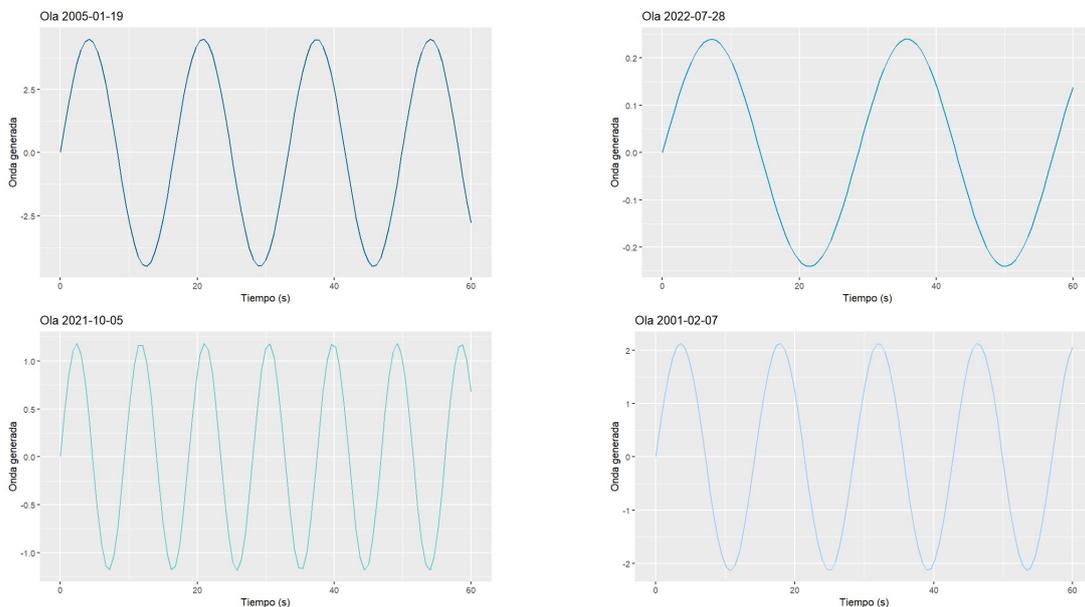


Figura 9: Generación de olas mediante ondas de diferentes características

Para una mejor visualización de las diferencias entre las distintas olas, se presenta una única gráfica que muestra todas las series juntas, (figura 10).

Esto permite comparar de manera más efectiva las características de cada ola.

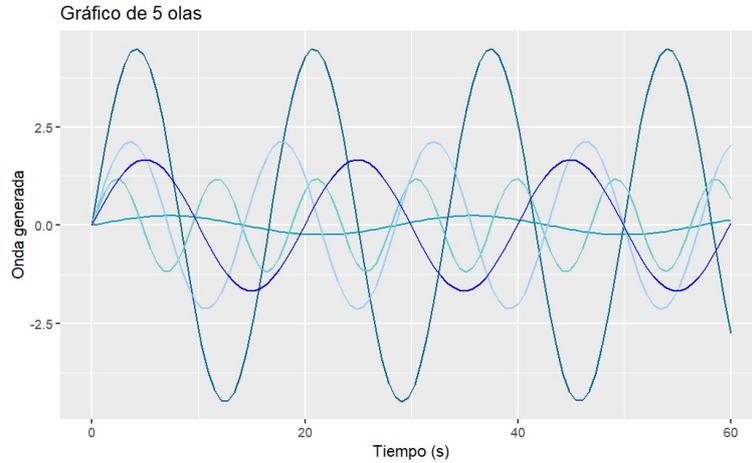


Figura 10: Diferentes olas

La combinación de diferentes alturas y periodos resulta en la formación de un número distinto de olas en un tiempo determinado. Ondas con alturas mayores y periodos más largos tienden a generar menos olas en un intervalo de tiempo, ya que requieren más tiempo para completar un ciclo. Por otro lado, olas con alturas más bajas y periodos más cortos pueden generar un mayor número de olas en el mismo lapso de tiempo.

Además de las olas de mayor amplitud y mayor número, también existen condiciones de oleaje donde se observa un patrón de olas más tranquilo. Estas olas se caracterizan por tener alturas más bajas y periodos más cortos, lo que resulta en un número reducido de olas en un período determinado.

Para continuar, hemos representado la relación entre el periodo de las olas y su altura significativa en la figura 11 que nos permite visualizar cómo estas variables se traducen en energía. Cada punto en el gráfico representa una medición de olas en un momento específico, y su posición está determinada por el valor de altura en el eje y y el valor de periodo en el eje x.

Sin embargo, para obtener una visión más completa del impacto que estas olas pueden tener, hemos añadido una dimensión adicional: el tamaño de cada punto está directamente relacionado con la energía asociada a esa combinación particular de altura y periodo. De esta manera, los puntos de mayor tamaño indican olas más energéticas, capaces de generar un mayor impacto.

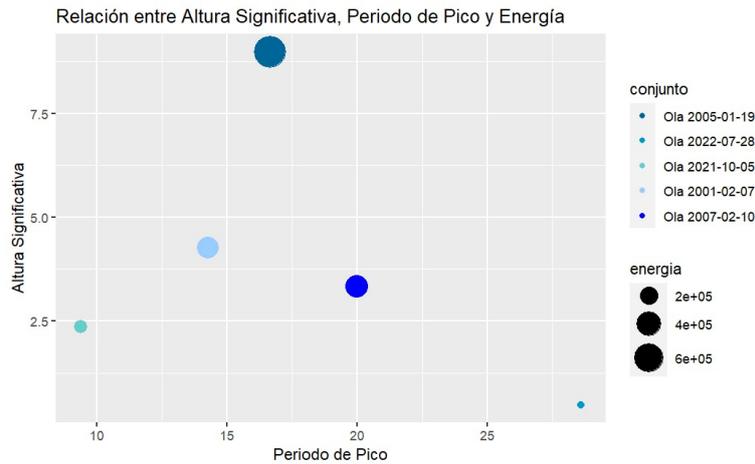


Figura 11: Energía de las diferentes olas

Se puede observar una tendencia clara: las olas con alturas bajas o periodos muy bajos muestran una cantidad de energía escasa. Por otro lado, cuando se combinan alturas y periodos promedio, se obtiene una mayor cantidad de energía asociada a las olas

## 5.2 Análisis de distribuciones

Esta sección se centra en analizar y comprender la distribución de las variables. Para ello se visualizan gráficos de densidad apilados por meses.

Estos gráficos nos permiten identificar posibles distribuciones a las que se pueden asemejar los datos. Conocer la distribución subyacente es de gran utilidad, ya que nos proporciona información sobre los patrones que siguen los hechos meteorológicos estudiados. Esto, a su vez, nos permite tomar decisiones más informadas y realizar predicciones más precisas en el contexto de nuestro análisis. El conocimiento de las distribuciones de probabilidad servirá para realizar simulaciones, y a la postre, diseñar problemas de optimización en la dimensionalización de plantas.

En un primer lugar se visualiza el gráfico de la variable altura significativa.

En particular, al observar el gráfico de la variable altura significativa en la figura 12, podemos notar una forma similar a la distribución de Weibull.

La distribución de Weibull es ampliamente utilizada en meteorología debido a su capacidad para modelar fenómenos con colas largas y extremos, como las distribuciones de vientos [16], precipitaciones y duraciones de eventos climáticos.

La distribución de Weibull se caracteriza por tener dos parámetros: el parámetro de forma y el parámetro de escala. El parámetro de forma determina la forma de la distribución y puede indicar si los datos tienden a ser más sesgados hacia valores más altos o más bajos. El parámetro de escala influye en la amplitud de la distribución y puede indicar la magnitud de los eventos meteorológicos.

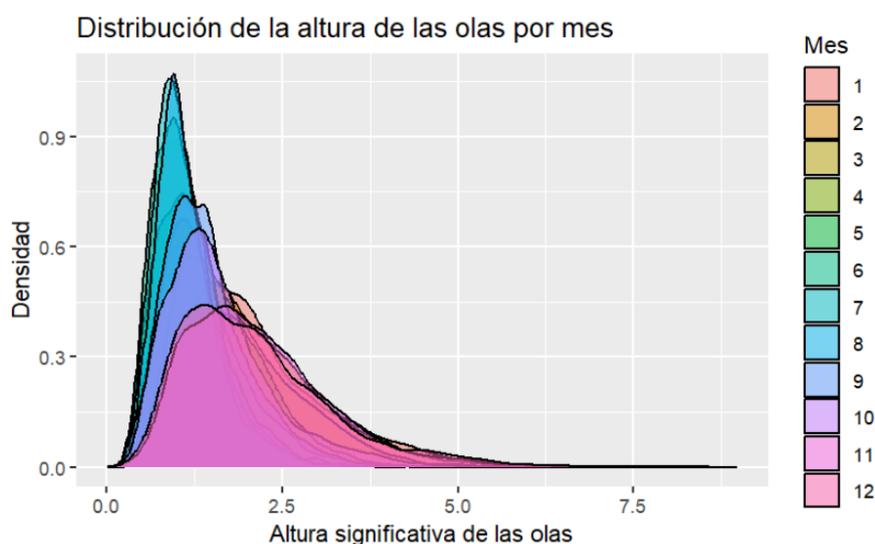


Figura 12: Gráfico de densidad apilado para altura significativa

Tras identificar la posible distribución de Weibull en los datos de altura significativa, realizamos un ajuste para estimar los parámetros de forma y escala correspondientes. A partir de estos parámetros estimados, se lleva a cabo una simulación de una muestra de tamaño 1000 con las mismas características.

Posteriormente, se realiza el test de Kolmogorov-Smirnov para evaluar si ambas muestras, la original y la simulada, siguen la misma distribución.

El test de Kolmogorov-Smirnov es una prueba estadística utilizada para comparar dos distribuciones de datos y determinar si provienen de la misma distribución. Se basa en la comparación de las funciones de distribución acumulada empírica (FDE) de ambas muestras.

La hipótesis nula del test plantea que ambas muestras siguen la misma distribución. Para evaluar esta hipótesis, se calcula el estadístico  $D$ , que representa la distancia máxima entre las dos FDE. Si esta distancia es mayor que un valor crítico correspondiente a un nivel de significancia dado, se rechaza la hipótesis nula y se concluye que las dos muestras no siguen la misma distribución.

En nuestro estudio, al realizar el test de Kolmogorov-Smirnov, se obtiene un resultado que lleva al rechazo de la hipótesis nula, lo que indica que las dos muestras, la original y la simulada, no siguen la misma distribución. Esto sugiere que la variable analizada presenta diferencias significativas en su distribución en comparación con la distribución simulada de Weibull.

Los resultados, tanto de la estimación de parámetros como del test Kolmogorov-Smirnov pueden verse en el cuadro 2.

Altura significativa Weibull	
Parámetros estimados	
Shape	1.970164
Scale	1.837585
Resultados Kolmogorov-Smirnov	
D	0.065754
p-value	0.0003726

Cuadro 2: Resultados del test de Kolmogorov-Smirnov y parámetros estimados para la distribución Weibull

Después de no obtener resultados satisfactorios al ajustar los datos a una distribución Weibull, se exploran otras posibilidades. Una de ellas es evaluar si los datos podrían seguir una distribución Gamma, también utilizada a veces en fenómenos meteorológicos.

La distribución Gamma es una distribución de probabilidad continua que se caracteriza por dos parámetros: la forma y la tasa. La forma determina la forma de la distribución, mientras que la tasa controla la dispersión de los datos alrededor de la forma.

Después de explorar la posibilidad de ajustar los datos a una distribución Gamma, seguimos los mismos pasos que con la distribución Weibull. Estimamos los parámetros de forma y tasa de la distribución Gamma que mejor se ajustaban a los datos de altura significativa.

Una vez obtenidos los parámetros estimados, realizamos una simulación de muestra con las mismas características. Luego, llevamos a cabo el test de Kolmogorov-Smirnov. En esta ocasión, como se puede ver en el cuadro 3 los resultados fueron favorables, ya que no se encontraron evidencias suficientes para rechazar la hipótesis nula.

Altura significativa Gamma	
Parámetros estimados	
Shape	3.940295
Rate	2.430984
Resultados Kolmogorov-Smirnov	
D	0.037696
p-value	0.1189

Cuadro 3: Resultados del test de Kolmogorov-Smirnov y parámetros estimados para la distribución Gamma

Estos resultados respaldan la elección de la distribución Gamma como una aproximación adecuada para modelar la altura significativa de las olas.

Realizamos el mismo proceso para estimar el comportamiento del periodo de pico.

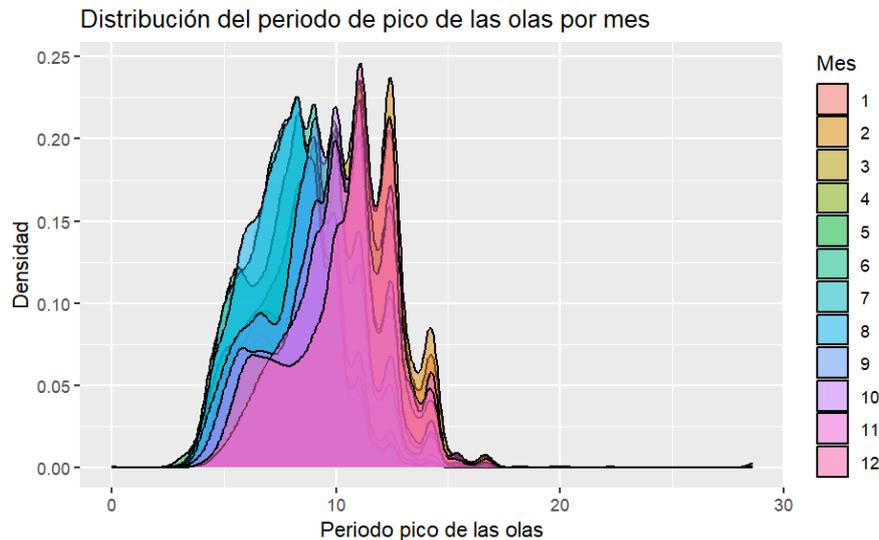


Figura 13: Gráfico de densidad apilado para periodo pico

Al analizar la gráfica de densidad de la figura 13, podemos observar que la segunda variable exhibe un comportamiento trimodal, lo que significa que presenta tres modos o picos distintos en su distribución. Este tipo de comportamiento trimodal sugiere la presencia de diferentes subpoblaciones o fenómenos subyacentes en los datos.

La presencia de múltiples modos en una distribución puede indicar la existencia de diferentes procesos o factores que contribuyen a la variable en estudio. Cada pico en la distribución puede representar un grupo o subconjunto de observaciones con características particulares.

En este caso, al tratarse de un comportamiento trimodal, es importante reconocer que una única distribución paramétrica puede no ser adecuada para describir completamente la variabilidad de la variable. Aunque no se realiza un ajuste específico en este momento, el comportamiento trimodal de la variable se mantiene como un tema de investigación futura para un análisis más detallado.

Por último, se muestra el de la nueva variable energía.

Al observar la figura 14, se detectan similitudes con la distribución encontrada anteriormente para la variable altura significativa (figura 12). Por lo tanto, decidimos seguir los mismos pasos utilizados para el análisis de la altura significativa.

Realizamos una simulación y estimamos los parámetros tanto para la distribución Weibull como para la distribución Gamma de esta variable para finalmente aplicar el test de Kolmogorov-Smirnov.

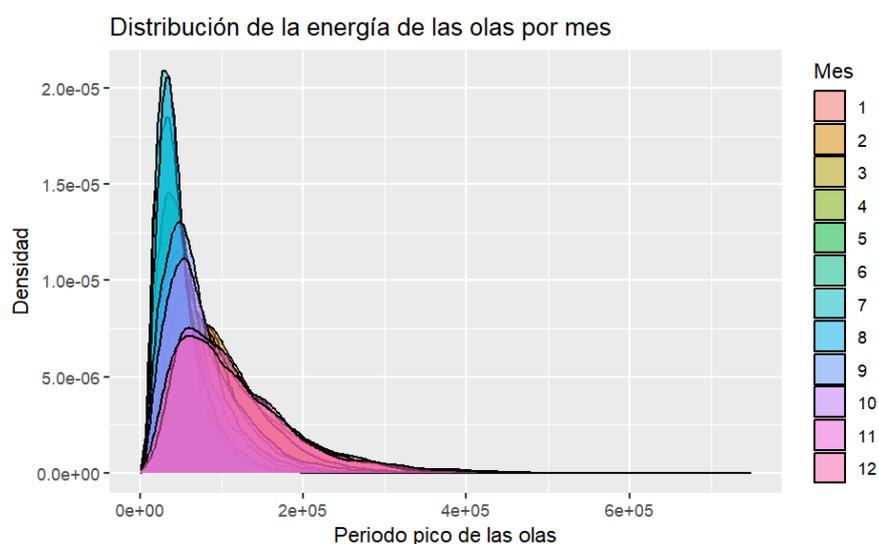


Figura 14: Gráfico de densidad apilado para energía

Los resultados del test de Kolmogorov-Smirnov para ambas distribuciones se presentan en el cuadro 6.

Energía Weibull	
Parámetros estimados	
Shape	1.48603
Scale	89681.56
Resultados Kolmogorov-Smirnov	
D	0.069199
p-value	0.000148

Cuadro 4: Distribución Weibull

Energía Gamma	
Parámetros estimados	
Shape	1.816191
Rate	2.258478e-05
Resultados Kolmogorov-Smirnov	
D	0.039094
p-value	0.09606

Cuadro 5: Distribución Gamma

Cuadro 6: Resultados del test de Kolmogorov-Smirnov y parámetros estimados para ambas distribuciones

En este caso, los resultados del test de Kolmogorov-Smirnov no proporcionan suficientes evidencias para rechazar la hipótesis nula en la distribución Gamma, como se observa en el cuadro 5, lo que indica que la muestra original y la muestra simulada siguen la misma distribución. Por lo tanto, esta distribución también parece ser una aproximación adecuada para modelar la energía de las olas.

### 5.3 Búsqueda de patrones de oleaje

En este estudio, se utiliza la clasificación no supervisada con el objetivo de agrupar los diferentes días de los datos en clústeres que compartan características similares. El propósito principal es determinar si los días con propiedades de oleaje similares tienden a agruparse juntos, lo que podría revelar patrones estacionales o tendencias consistentes a lo largo del tiempo.

Para lograr este objetivo, se consideran dos conjuntos de características diferentes. En primer lugar, se analizan la media y la varianza del periodo de pico y la altura significativa. Estas características están relacionadas con las propiedades de las olas en el océano, y se espera que los días con condiciones de oleaje similares formen clústeres distintos. La agrupación basada en estas características puede ayudar a identificar patrones estacionales o fenómenos recurrentes en la variabilidad del oleaje.

En segundo lugar, se examina la energía promedio diaria. Esta característica proporciona información sobre la cantidad de energía presente en el océano en cada día.

Para realizar este análisis de agrupamiento, se llevaron a cabo múltiples pruebas y se probaron diferentes métodos de clustering, como PAM y K-means, con diferentes números de clústeres y combinaciones de características.

El método PAM es un algoritmo de clustering que se basa en la selección de medoides en lugar de centroides. Los medoides son puntos reales en el conjunto de datos y representan los puntos más representativos de cada clúster. El algoritmo busca iterativamente los medoides que minimizan la suma de las distancias entre los puntos y los medoides dentro de cada clúster.

Por otro lado, el método K-means utiliza centroides, que son puntos ficticios en el espacio de características, para representar cada clúster. El algoritmo K-means se basa en la minimización de la suma de las distancias cuadradas entre los puntos de datos y sus centroides asignados. A través de iteraciones, los centroides se actualizan para encontrar la posición óptima que minimice la distancia total.

Para evaluar la calidad de los clústeres generados, utilizamos una métrica llamada gráfico de la silueta. Esta métrica calcula la similitud de cada punto de datos dentro de su propio clúster en comparación con los puntos de datos de los otros clústeres. Proporciona una medida de como de bien separados están los clústeres y como de bien se agrupan los puntos de datos dentro de cada clúster. Al visualizar el gráfico de la silueta, es posible identificar patrones y evaluar la coherencia de los clústeres generados.

Después de realizar las pruebas y evaluar los resultados, se observa que los clústeres generados utilizando el método K-means y basados en las medias y las varianzas de las alturas y los periodos normalizados ofrecían los mejores resultados, cuyo gráfico de silueta viene proporcionado en la figura 15. Esto significa que estos clústeres son capaces de representar de manera más precisa los diferentes tipos de días en términos de características de las olas.

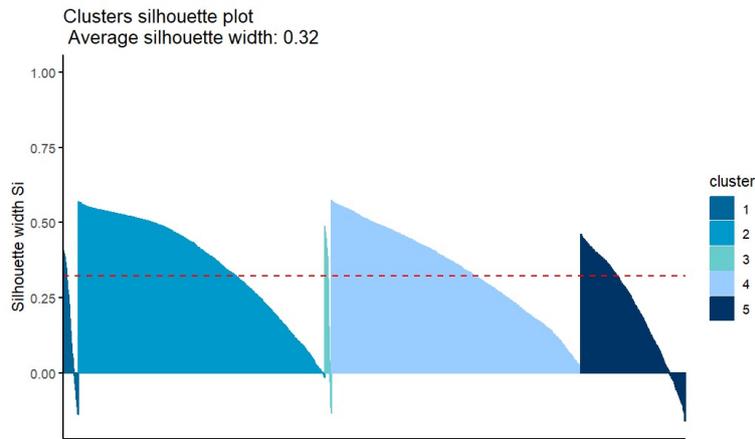


Figura 15: Gráfico de silueta

Al utilizar estas características, normalizadas para asegurar una comparación justa, podemos identificar grupos de días con propiedades de oleaje similares y, por lo tanto, obtener una mejor comprensión de la variabilidad del oleaje y una estimación más precisa de la energía que podrían proporcionar estos diferentes tipos de días.

Para lograr una comprensión más detallada de las características de cada clúster y su representación en términos de características de las olas, hemos seleccionado una muestra de cada clúster. Esta selección se realiza debido a la gran cantidad de datos disponibles. Al reducir la muestra, podemos centrarnos en analizar de manera más exhaustiva las diferencias entre los clústeres y extraer conclusiones significativas. Esto nos permite obtener una visión más clara y precisa de las características de las olas en cada clúster, lo cual sería difícil de lograr si consideráramos todos los días de manera indiscriminada debido a la cantidad masiva de datos.

Para visualizar estas diferencias y comparar los días típicos de cada clúster, hemos creado gráficos individuales de un día representativo de cada clúster mediante la generación de sus olas a lo largo de un día. Luego, hemos combinado estos gráficos en una única visualización para obtener una representación conjunta de los diferentes tipos de días, como se puede observar en la figura 16.

Sin embargo, para resaltar aún más los clústeres que proporcionan olas más pequeñas, también hemos incluido la figura 17 adicional que muestra exclusivamente los clústeres 1, 2 y 4, lo que nos permite obtener una mejor visión y comprensión de sus características distintivas

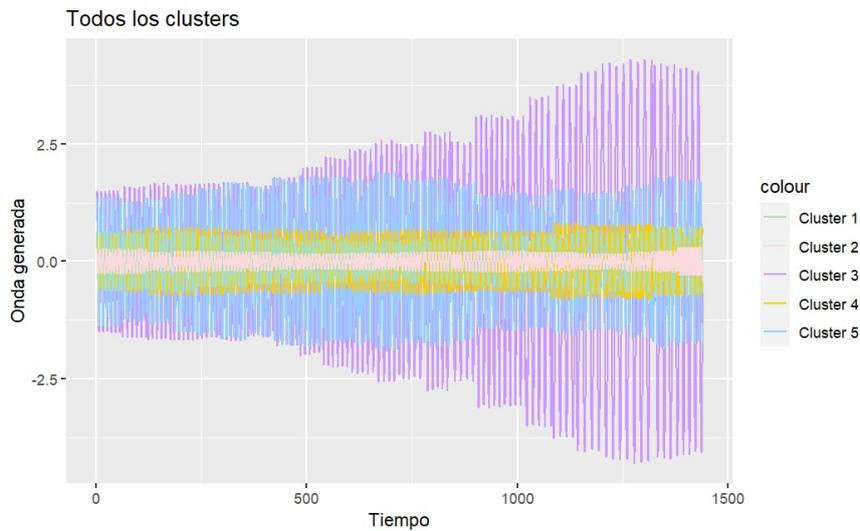


Figura 16: Gráficos de olas generadas por diferentes clústeres a lo largo de un día

En general podemos sacar diferentes conclusiones.

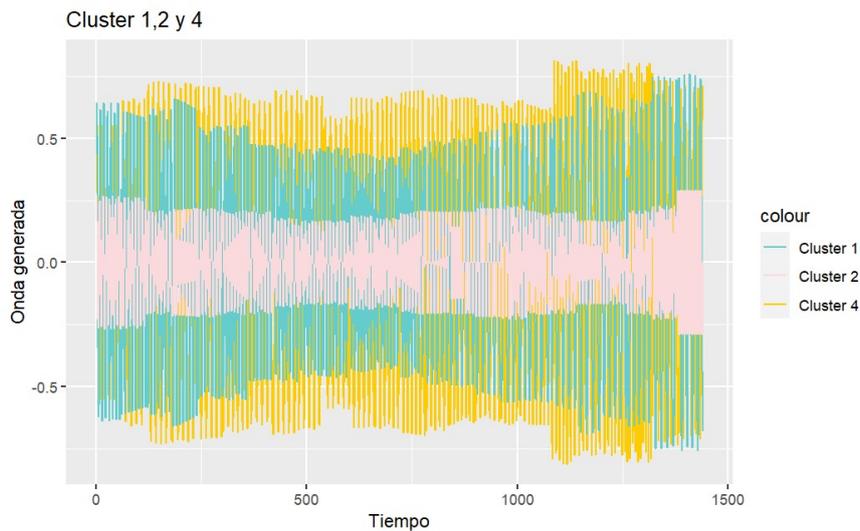


Figura 17: Gráficos de olas generadas por los clústeres 1, 2 y 4 a lo largo de un día

Los resultados de los clústeres revelan diferentes características en los días de oleaje analizados. El clúster 1 y el clúster 3 presentan la menor cantidad de días, lo que indica que son condiciones de oleaje menos frecuentes en comparación con los otros clústeres. Por otro lado, el clúster 2 se distingue por representar olas más bajas con periodos ligeramente más largos en comparación con los demás clústeres.

El clúster 1 se caracteriza por tener olas más altas y periodos más prolongados que las del clúster 2, aunque no alcanzan las características del clúster 4. El clúster 4 lo forman días con oleaje homogéneo a lo largo de las horas, a diferencia de los días del clúster 1 que disminuye en las horas centrales.

El clúster 5 se destaca por presentar olas altas. Por otro lado, el clúster 3 se caracteriza por exhibir olas mucho más altas en días, con una variabilidad significativa y aumentando a lo largo del día. Esto indica que el clúster 3 representa condiciones de oleaje extremo y altamente variables, lo que podría estar asociado a fenómenos meteorológicos oceánicos excepcionales.

Además, para analizar la relación entre los clústeres y la energía de los días, se ha calculado la energía promedio para cada clúster. Estos resultados se muestran en el cuadro 7.

Energía promedio (J)	
Clúster	Energía
1	53242.41
2	34737.39
3	205424.47
4	87232.77
5	173801.49

Cuadro 7: Energía promedio de cada muestra del clúster

Al examinar los valores promedio de energía en cada clúster, se puede observar cómo se relacionan con las características que se han descrito previamente.

En particular, el clúster que presenta la mayor energía promedio es el clúster 3, el cual se caracteriza por tener olas de mayor tamaño. Le sigue en orden de energía promedio el clúster 5, el cual también muestra una tendencia a tener olas de tamaño significativo, aunque en menor medida que el clúster 3. Por otro lado, los otros tres, que se caracterizan por tener olas más pequeñas, también muestran niveles de energía proporcionales a su tamaño.

## 5.4 Análisis del Potencial de Energía en la Costa Española

En esta sección, nos centraremos en el análisis de los potenciales de energía en diferentes partes de la costa española. Para ello, hemos creado un nuevo conjunto de datos, a partir de los 44 disponibles, que contiene información detallada de las boyas que estaban activas durante el año 2021. Estos datos incluyen cálculos de la energía promedio mensual y anual para cada mes y cada una de estas boyas del año 2021.

Utilizaremos la herramienta Leaflet de RStudio para crear mapas interactivos que nos permitirán visualizar y comparar las diferencias de potencial de energía en estas áreas.

Estos mapas nos proporcionarán una representación gráfica y dinámica de la distribución de la energía a lo largo de las costas españolas.

Además, gracias a los cálculos de energía promedio mensual y anual, podremos identificar las áreas con mayor y menor potencial energético en diferentes períodos del año. Esto nos permitirá tener una visión más completa y detallada de la energía disponible en cada lugar y su variación estacional.

Para este análisis se genera un mapa que se puede observar en la figura 18 que representa la contribución de energía de las diferentes boyas a lo largo de un año promedio. Este mapa utiliza una escala de colores que va desde el verde, que indica los valores más altos de energía, hasta el rojo, que representa los valores más bajos.

De esta manera, es posible visualizar de manera intuitiva y rápida las áreas de la costa española que presentan un mayor potencial energético, identificadas por tonos más intensos de verde, así como las áreas con un potencial energético más bajo, representadas por tonos más cercanos al rojo.



Figura 18: Mapa de energía

Al analizar los potenciales de energía en diferentes partes de la costa española, se observa una notable diferencia entre las regiones del Mar Cantábrico y el Atlántico, especialmente la costa gallega, en comparación con otras áreas. Estas zonas muestran un mayor potencial energético, evidenciado por los valores más altos de energía promedio y anual registrados en las boyas ubicadas en esas áreas. La costa gallega destaca como una región con un potencial significativo para la generación de energía a partir de las olas, seguido de la costa vasca y la costa asturiana.

Por otro lado, algunas boyas situadas en las Islas Canarias y las Islas Baleares también contribuyen al potencial energético, aunque en menor medida en comparación con las mencionadas previamente. Estos hallazgos enfatizan la importancia de considerar la ubicación geográfica al evaluar el potencial energético de las diferentes regiones costeras de España.

En el caso del mar Mediterráneo, se observa una tendencia general de menor actividad en cuanto a la energía de las olas. Sin embargo, es interesante destacar que se identifica un punto particularmente destacado en cuanto al potencial energético en la zona de Cabo Begur, en Gerona. Esta área muestra un mayor potencial de energía en comparación con otras partes del Mediterráneo. Aunque en general el Mediterráneo presenta niveles de energía más bajos, el análisis detallado revela que existen variaciones locales que pueden ser relevantes para la generación de energía a partir de las olas en determinadas áreas costeras.

Una vez mostrado el mapa, procederemos a graficar las series temporales. Estas representaciones gráficas nos permitirán analizar la variación de la energía a lo largo del tiempo en cada ubicación específica.

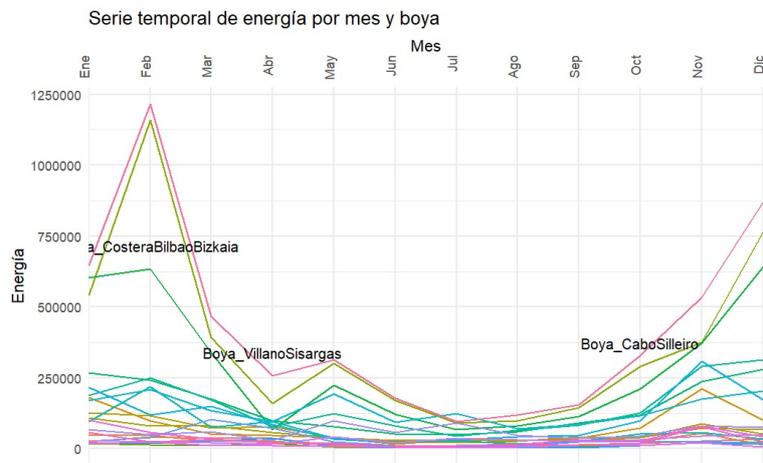


Figura 19: Serie temporal de energía por mes y boyas

Podemos apreciar en la figura 19 la energía registrada en los diferentes meses por las boyas situadas en distintos puntos de nuestro país. Coincidiendo con las observaciones realizadas en el mapa, se destaca que las boyas ubicadas en Galicia y Bilbao presentan los valores más altos de energía promedio anual.

Sin embargo, también se puede apreciar claramente que la mayoría de las líneas en la serie temporal representan ubicaciones con una cantidad notablemente más baja de energía en comparación con otras boyas.

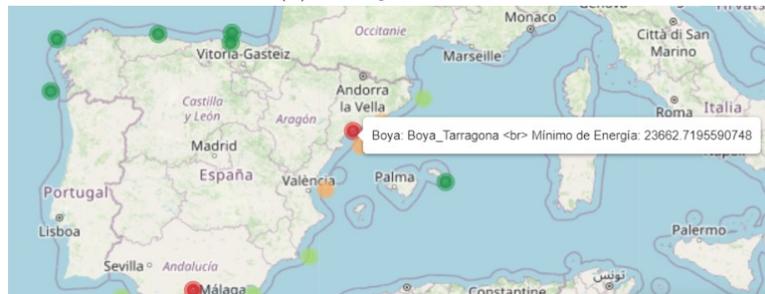
Estas líneas, que se encuentran en niveles más bajos de la serie temporal, indican que la energía transmitida en esas ubicaciones es significativamente menor en comparación con las boyas destacadas previamente. Estos hallazgos respaldan las conclusiones extraídas previamente acerca de las regiones con mayor potencial energético a lo largo de la costa española.

Además, para profundizar en nuestro análisis, generamos dos mapas adicionales que representan la variabilidad de la energía registrada en cada boya a lo largo de un año. Estos mapas se enfocaron en la energía mínima y máxima registrada en cada ubicación.

Un aspecto interesante que hemos analizado es la relación entre la energía mínima de los sitios con mayor energía y la energía máxima de los sitios con menor energía. Esta comparación nos permite evaluar si la energía mínima registrada en ubicaciones destacadas es mayor, menor o similar a la energía máxima registrada en las ubicaciones con menor energía.



(a) Energía Mínima



(b) Energía Máxima

Figura 20: Mapa de energías mínima y máxima

Encontramos en la figura 20 que en la mayoría de los casos, la energía mínima registrada en los sitios con mayor energía, el Cantábrico y el Atlántico, es considerablemente mayor que la energía máxima registrada en los sitios con menor energía, es decir, el Mediterráneo. Este patrón revela una importante variabilidad en los niveles de energía a lo largo de la costa.

Estos descubrimientos tienen implicaciones importantes para la planificación y desarrollo de proyectos de energía renovable en la región costera. Al comprender la relación entre la energía mínima y máxima en diferentes ubicaciones, podemos identificar áreas con un alto potencial energético constante, así como aquellas con una mayor variabilidad en la producción de energía. Esto puede ayudar a orientar la ubicación estratégica de futuros proyectos de energía renovable y optimizar su rendimiento.

En resumen, nuestro análisis revela grandes diferencias en el potencial de energía a lo largo de la costa española. Identificamos áreas destacadas con alto potencial energético, como la costa gallega, la costa vasca y la costa asturiana. También observamos variaciones en el mar Mediterráneo, con un punto destacado en la zona de Cabo Begur en Gerona. Además, encontramos una importante variabilidad en los niveles de energía a lo largo de la costa.

Estos hallazgos son relevantes para la planificación de proyectos de energía renovable y destacan la importancia de considerar la ubicación geográfica al evaluar el potencial energético en diferentes regiones costeras de España.

## 6 Conclusiones y líneas futuras

Para finalizar, recogemos las principales conclusiones obtenidas a partir de los estudios realizados y que hacen referencia a los patrones del oleaje en la región.

Se observó que ciertos meses presentan olas con mayor potencial, debido a su altura significativa, mientras que la interpretación de los periodos con olas fuertes es más compleja debido a la influencia de la frecuencia. Además, se identificaron meses con un elevado potencial energético y otros con un patrón de olas más tranquilo. La mayoría de las olas se dirigen hacia el norte, con una mínima presencia de olas que van hacia el sur.

En el análisis de la distribución de la altura significativa de las olas, se observaron diferencias significativas en comparación con una distribución simulada de Weibull, según los resultados del test de Kolmogorov-Smirnov. Sin embargo, se encontró que tanto la energía como la altura de las olas pueden seguir una distribución gamma. Esto implica que la energía y la altura de las olas tienen un comportamiento similar a una distribución gamma en el contexto de tu estudio.

En cuanto al análisis de la distribución del periodo de las olas, se sugiere dejarlo como línea de investigación futura. Esto implica que aún no se han obtenido resultados concluyentes sobre la distribución del periodo de las olas y puede ser un aspecto interesante para abordar en futuros estudios.

Además, el análisis de clústeres ha desempeñado un papel fundamental en este estudio, revelando información significativa sobre el comportamiento de las olas y su relación con la energía generada. Los resultados destacan la existencia de una agrupación de días basada en los patrones de oleaje, donde los días más tranquilos tienden a agruparse juntos, mientras que los días con un alto oleaje o una alta variabilidad también forman grupos distintos. Se ha observado como existen 5 patrones de oleaje diferentes con implicaciones interesantes en la generación energética.

Esta agrupación de días proporciona una comprensión más profunda de cómo la energía del oleaje varía en función de los diferentes patrones de ondas. Es evidente que los días con una mayor energía o una mayor variabilidad en las olas ofrecen un aporte significativo en términos de energía generada. Por otro lado, los días más tranquilos presentan una energía más moderada.

La distribución de los días en los diferentes clústeres podría ser de gran ayuda en el diseño y dimensionalización de una planta.

Además, los hallazgos derivados de la representación visual en forma de mapas han proporcionado una perspectiva única sobre las diferencias en el potencial entre los diferentes sitios. Los mapas generados en este estudio han revelado claramente las disparidades en el potencial de energía de las olas a lo largo de la región estudiada. Al observar estos mapas, se puede apreciar cómo ciertas áreas presentan una mayor concentración de energía de las olas, mientras que otras muestran una menor intensidad.

Estos hallazgos basados en los mapas generados no solo nos permiten comprender las diferencias en el potencial de energía de las olas a lo largo de la región estudiada, sino que también tienen importantes implicaciones prácticas. La identificación de áreas con una mayor concentración de energía de las olas a través de estos mapas nos brinda información valiosa para determinar ubicaciones estratégicas para la construcción de centrales que aprovechen este potencial. Al identificar las zonas con un mayor potencial de energía undimotriz, se pueden tomar decisiones informadas sobre dónde desarrollar proyectos de energía undimotriz, maximizando así la eficiencia y la rentabilidad de las instalaciones.

En cuanto a las líneas de futuro, este análisis proporciona información valiosa que podría extenderse a otras zonas para comprender mejor los patrones de las olas en diferentes regiones. Sería interesante realizar análisis similares en diferentes áreas geográficas, destacando aquellas con un mayor potencial energético y comparar los resultados para obtener una visión más completa de los patrones de las olas a nivel global.

Además, sería beneficioso investigar otras variables relacionadas, como la velocidad del viento y la temperatura del agua, que también pueden tener un impacto significativo en el potencial de la energía undimotriz. Estos análisis adicionales permitirían una comprensión más completa de los factores que influyen en la generación de energía a partir de las olas, lo que a su vez ayudaría a optimizar el diseño y la eficiencia de los dispositivos de captación de energía undimotriz.

La investigación futura podría centrarse en la integración de datos de múltiples fuentes, como modelos climáticos y mediciones, para mejorar la precisión de las estimaciones del potencial energético y la planificación de proyectos. Además, sería valioso considerar los aspectos económicos y ambientales de la energía undimotriz, evaluando los costos de implementación y los posibles impactos en los ecosistemas marinos. También se podrían explorar combinaciones con otras energías renovables, tanto marinas como no, combinando la energía undimotriz con otras fuentes para maximizar la eficiencia y la estabilidad del suministro energético.

En conclusión, este estudio ha proporcionado conocimientos valiosos sobre los patrones de las olas y su potencial de energía undimotriz. Estos resultados pueden servir como base para la planificación y el desarrollo de proyectos de energía undimotriz en áreas con un alto potencial. La combinación de análisis estadísticos, técnicas de clustering y representación visual a través de mapas ha demostrado ser una metodología efectiva para comprender y visualizar los patrones de las olas. Estas conclusiones brindan información importante para la toma de decisiones en el campo de la energía undimotriz y establecen las bases para investigaciones futuras que puedan mejorar la eficiencia y la viabilidad de esta forma de energía renovable.

## Referencias

- [1] U. Nations, “El océano: Nuestro mayor aliado en la lucha contra el cambio climático — Naciones Unidas.” *United Nations* <https://www.un.org/es/climatechange/science/climate-issues/ocean>.
- [2] “Energía del Mar - Marina - ¿Es renovable?,” Jan. 23, 2023. <https://e-eficiencia.com/energia-marina/>.
- [3] G. Mattiazzo, “State of the Art and Perspectives of Wave Energy in the Mediterranean Sea: Backstage of ISWEC,” *Front. Energy Res.*, vol. 7, 2019, <https://www.frontiersin.org/articles/10.3389/fenrg.2019.00114>.
- [4] A. Clément et al., “Wave energy in Europe: current status and perspectives,” *Renew. Sustain. Energy Rev.*, vol. 6, no. 5, pp. 405–431, Oct. 2002, doi: [https://doi.org/10.1016/S1364-0321\(02\)00009-6](https://doi.org/10.1016/S1364-0321(02)00009-6).
- [5] C. Zheng et al., “An assessment of global ocean wave energy resources over the last 45 a,” *Acta Oceanol. Sin.*, vol. 33, no. 1, pp. 92–101, Jan. 2014, doi: <https://doi.org/10.1007/s13131-014-0418-5>.
- [6] R. Secretariat, “Renewables Global Status Report,” *REN21*, Jun. 14, 2019. <https://www.ren21.net/reports/global-status-report/>.
- [7] “Español — IPCC.” <https://www.ipcc.ch/languages-2/spanish/>.
- [8] C. Prego, “El mayor parque eólico marino del mundo ya está operativo (y 1,4 millones de hogares se lo agradecen),” *Xataka*, Sep. 10, 2022. <https://www.xataka.com/energia/mayor-parque-eolico-marino-mundo-esta-operativo-1-4-millones-hogares-se-agradecen>.
- [9] N. J. Hernández, “Aplicación de los diferentes sistemas de conversión de energía undimotriz, (energía de las olas) y sus ventajas para ser aplicada como energía renovable en Pemex,” vol. 56, no. 2, 2016.
- [10] Viaintermedia.com, “Energías del Mar - Europa lidera las patentes de energía oceánica en el mundo,” *Energías Renovables, el periodismo de las energías limpias.*, Sep. 07, 2020. [https://www.energias-renovables.com/energias\\_del\\_mar/europa-lidera-las-patentes-de-energia-oceanica-20200907](https://www.energias-renovables.com/energias_del_mar/europa-lidera-las-patentes-de-energia-oceanica-20200907).
- [11] Viaintermedia.com, “Energías del Mar - Reino Unido, EEUU y España aceleran en la carrera global de las energías marinas,” *Energías Renovables, el periodismo de las energías limpias.*, Mar. 22, 2022. [https://www.energias-renovables.com/energias\\_del\\_mar/reino-unido-estados-unidos-y-espana-aceleran-20220322](https://www.energias-renovables.com/energias_del_mar/reino-unido-estados-unidos-y-espana-aceleran-20220322)
- [12] “Luz verde a la energía producida por las olas del mar,” *www.nationalgeographic.com.es*, May 11, 2022. [https://www.nationalgeographic.com.es/ciencia/luz-verde-a-energia-producida-por-olas-mar\\_18235](https://www.nationalgeographic.com.es/ciencia/luz-verde-a-energia-producida-por-olas-mar_18235)

- [13] Viaintermedia.com, “Energías del Mar - La central de aprovechamiento de energía de las olas más longeva del mundo es vasca,” *Energías Renovables, el periodismo de las energías limpias.*, Aug. 20, 2021. [https://www.energias-renovables.com/energias\\_del\\_mar/la-central-de-aprovechamiento-de-energia-de-20210820](https://www.energias-renovables.com/energias_del_mar/la-central-de-aprovechamiento-de-energia-de-20210820).
- [14] B. Li, W. Chen, J. Li, J. Liu, P. Shi, and H. Xing, “Wave energy assessment based on reanalysis data calibrated by buoy observations in the southern South China Sea,” *Energy Rep.*, vol. 8, pp. 5067–5079, Nov. 2022, doi: <https://doi.org/10.1016/j.egyr.2022.03.177>.
- [15] “Prediccion de oleaje, nivel del mar; Boyas y mareografos — puertos.es.” <https://www.puertos.es/es-es/oceanografia/Paginas/portus.aspx>
- [16] U. Yancachajlla Tito, O. A. Vilca Huayta, U. Yancachajlla Tito, and O. A. Vilca Huayta, “Caracterización del viento con la función de Weibull para una zona altoandina, Laraqueri - Perú,” *Rev. Investig. Altoandinas*, vol. 24, no. 3, pp. 190–198, Jul. 2022, doi: <https://doi.org/10.18271/ria.2022.439>.