



COMILLAS

UNIVERSIDAD PONTIFICIA

ICAI

GRADO EN INGENIERÍA EN TECNOLOGÍAS INDUSTRIALES

TRABAJO FIN DE GRADO

ESTUDIO DE LA VIABILIDAD DE UN PROYECTO DE ENERGÍA MAREOMOTRIZ Y UNDIMOTRIZ EN LA COSTA ESPAÑOLA

Autor: Alejandro Algora Tussy

Director: Iñigo Sanz Fernández

Madrid

Declaro, bajo mi responsabilidad, que el Proyecto presentado con el título
Estudio de la Viabilidad de un Proyecto de Energía Mareomotriz y Undimotriz en la Costa
Española

en la ETS de Ingeniería - ICAI de la Universidad Pontificia Comillas en el

curso académico 2022/23 es de mi autoría, original e inédito y

no ha sido presentado con anterioridad a otros efectos.

El Proyecto no es plagio de otro, ni total ni parcialmente y la información que ha sido

tomada de otros documentos está debidamente referenciada.

Fdo.: Alejandro Algora Tussy

Fecha:28/06/2023



Autorizada la entrega del proyecto

EL DIRECTOR DEL PROYECTO

Fdo.: Iñigo Sanz Fernández

Fecha:28/06/2023



COMILLAS
UNIVERSIDAD PONTIFICIA

ICAI

GRADO EN INGENIERÍA EN TECNOLOGÍAS
INDUSTRIALES

TRABAJO FIN DE GRADO

ESTUDIO DE LA VIABILIDAD DE UN PROYECTO DE
ENERGÍA MAREOMOTRIZ Y UNDIMOTRIZ EN LA
COSTA ESPAÑOLA

Autor: Alejandro Algora Tussy

Director: Iñigo Sanz Fernández

Madrid

ESTUDIO DE LA VIABILIDAD DE UN PROYECTO DE ENERGÍA MAREOMOTRIZ Y UNDIMOTRIZ EN ESPAÑA

Autor: Algora Tussy, Alejandro.

Director: Sanz Fernández, Iñigo.

Entidad Colaboradora: ICAI- Universidad pontificia de Comillas

RESUMEN DEL PROYECTO

Las energías mareomotriz y undimotriz representan un gran potencial en la costa española, para la reducción de los gases de efecto invernadero. Actualmente, el desarrollo no está muy avanzado, aun así, en este proyecto se describen las características necesarias para desarrollar un proyecto así, como son la elección de la ubicación, de los materiales y de las tecnologías más prometedoras. Las tecnologías elegidas para cada proyecto son el Pelamis WEC y la turbina VATT. En el trabajo se analizan la potencia teórica que podrían generar, y los distintos costes que afectan a cada sistema. Además, se comparan estas energías con las energías renovables más desarrolladas. Las conclusiones son que actualmente los costes son muy elevados por cada megavatio instalado, lo que limita las opciones de inversión. El Pelamis WEC no es viable, mientras que el proyecto mareomotriz con la turbina VATT podría ser analizado con mayor precisión, con el objetivo de determinar su viabilidad real en España.

Palabras clave:

Pelamis WEC- Turbina VATT- Mareomotriz- Undimotriz

1. Introducción

Los objetivos de reducción de los gases de efecto invernadero mundiales, conllevan desarrollar e implementar procesos verdes que no emitan estos gases. Uno de los sectores con mayor emisión, es el energético. Las energías renovables no emiten estos gases, por lo que aumentar los tipos de tecnología y de energía es esencial para aprovechar todos los recursos naturales.

Las energías marinas son un tipo de energía muy prometedora que no están muy desarrolladas. El objetivo es analizar si actualmente, es viable realizar uno de estos proyectos, tanto energéticamente como económicamente. El entorno marino tiene unas características únicas, como la alta densidad del agua o la predicción de las mareas, que convierte a estas energías en las posibles energías del futuro.

2. Definición del Proyecto

En primer lugar, antes de diseñar las tecnologías, se estudiarán los distintos tipos de proyectos y tecnologías existentes, tanto en España como en el mundo. La casi inexistencia de proyectos comerciales les convierte en únicos. Las plantas más eficientes y conocidas son la central mareomotriz del Rance, en Francia y la central undimotriz de Mutriku. Estas instalaciones tienen como característica principal que están en ubicaciones idóneas. Sin embargo, el objetivo del proyecto es analizar tecnologías que sean universales, y se puedan desarrollar en una mayor cantidad de lugares.

La metodología de estudio implicará el análisis de los siguientes puntos: análisis de las tecnologías, elección de la ubicación ideal, elección de los materiales del sistema y comparación entre los proyectos finales.

Los resultados de los primeros puntos son que la ubicación ideal para un proyecto de energía undimotriz depende del nivel de fuerza de las olas, y el punto escogido es la Costa da Morte (Galicia), mientras que, en el proyecto mareomotriz, la ubicación depende de la diferencia de altura entre mareas, y el punto escogido es Zarautz (País Vasco).

La elección de materiales se ha basado en analizar la relación entre el precio y la resistencia a la corrosión, medida con el indicador PREN. El resultado final es que se usará acero al carbono con ánodos de sacrificio de Zinc.

3. Descripción del sistema

En el trabajo realizado se han estudiado 2 sistemas, como son el Pelamis WEC, para el proyecto undimotriz, y la turbina VATT, para el proyecto mareomotriz. El Pelamis WEC está formado por una serie de cilindros de 120 metros de largo. En el interior de estos, hay un sistema hidráulico que con el movimiento de las olas comprime el agua del sistema y activa un generador que produce energía

En el caso de las turbinas VATT, existen diferentes tipos de configuraciones. Para el proyecto, la elección es la turbina Savonius debido a su eficiencia en flujos de agua bajos. Esta turbina está compuesta por un rotor conectado a un generador y por dos aspas con forma semicilíndrica. El movimiento de las mareas acciona estas aspas, al igual que una turbina eólica, y generan electricidad.

4. Resultados

El análisis de los tipos de energía se ha basado en el apartado de generación teórico de energía y en el análisis de los costes. En la Tabla I, se presenta la potencia que son capaces de generar las tecnologías, en las distintas condiciones del entorno. Como se puede observar, en el proyecto mareomotriz, los valores son más elevados, siendo el valor máximo medio del Pelamis inferior al valor medio mínimo de la turbina.

	Pelamis WEC	Turbina VATT
Mínimo	27	40,3
Máximo	744	1304,2
Media	171-320	322-386,4

Tabla I: Potencia teórica generada

En segundo lugar, se analizarán los costes de cada instalación. Los costes que se consideran en el ciclo de vida son los costes de compra, instalación, energéticos, de operación y mantenimiento, de avería, medioambientales y de retirada. Sin embargo, el análisis cuantitativo es únicamente del precio inicial y del mantenimiento, como se puede apreciar en la Tabla II.

	Pelamis WEC	Turbina VATT
Precio inicial	14.101.717,77 €	9.036.239,92 €
Mantenimiento anual	- €	1.724.183,02 €

Tabla II: Costes de cada proyecto

La inversión inicial en el caso del Pelamis es más elevada, sin embargo, los costes de mantenimiento son inferiores debido a los ánodos de sacrificio de la turbina.

5. Conclusiones

El poco desarrollo de estas tecnologías, y el alto coste asociado al nivel de desarrollo, convierte a estas energías en una difícil elección a la hora de elegir un tipo de energía renovable para un nuevo proyecto. Estas energías van a sufrir una mejora exponencial, dejando obsoletas a las tecnologías actuales en pocos años. Por ello, el Pelamis queda descartado debido a su alto coste inicial.

Sin embargo, en el caso de la turbina VATT, podría ser analizada con más detalle, ya que tiene mayor potencia para una inversión inicial inferior. La ventaja de este proyecto sería que no habría que cambiar el sistema, y si podrían implementar mejoras, que redujeran el

coste de la generación. Además, si se realiza una mejora en los materiales, se podría reducir el alto coste de mantenimiento asociado.

Finalmente, estas energías tienen un gran potencial, y se deben seguir desarrollando, con el objetivo de optimizarlas y reducir el coste total. Según diversas fuentes como el Global CCS Institute, la proyección en 2050 del precio del kWh de estas energías será similar al de otras energías, como la nuclear o la eólica offshore y el valor será de entorno 5 a 10 euros el kWh.

STUDY OF THE VIABILITY OF A TIDAL AND WAVE ENERGY PROJECT IN SPAIN

Author: Algora Tussy, Alejandro.

Supervisor: Sanz Fernández, Iñigo.

Collaborating Entity: ICAI- Universidad pontificia de Comillas

ABSTRACT

Wave and Tidal energies represent a great potential along the Spanish coast to reduce greenhouse gas emissions. Currently, the development is not advanced. However, this project describes the necessary characteristics to develop such a project, like the choice of location, materials, and the most promising technologies. The selected technologies are the Pelamis WEC and the VATT turbine. In the study, the theoretical power and the different costs affecting each system are analyzed and compared between them, and with the more developed renewable energies. The conclusions are that currently the costs are very high per installed MW which limits the investment options. The Pelamis WEC is not feasible, while the tidal project with the VATT turbine could be further analyzed to determine its real viability in the country.

Keywords:

Pelamis WEC- VATT Turbine- Tidal and wave energies

1. Introduction

The goals of global greenhouse gas emissions reduction require the development and implementation of green processes that don't have emissions. The energy sector is one of the sectors with highest emissions. Renewable energies don't emit these gases, so increasing the types of technology and sources is essential to harnessing all natural resources.

Marine energies are a highly promising type of energy that is not developed. The objective is to analyze whether it is currently feasible to undertake these projects, both in terms of energy and economics. The marine environment has unique characteristics, such as high-water density and predictable tides, which make these energies potential sources of the future.

2. Project Definition

First, before designing the technology, the different types of technologies and existing projects will be studied, in Spain and worldwide. The non-existence of commercial projects makes them unique. The most efficient and famous plants are the tidal power plant in Rance,

France, and the wave power plant in Mutriku, Spain. These installations are characterized by their ideal locations. However, the objective of the project is to study universal technologies that can be developed in a greater number of locations.

The methodology will involve the analysis of the following points: analysis of the technologies, selection of the location, system materials' choice, and comparison between the final projects.

The results are that the ideal location for a wave energy project depends on the wave strength, and the chosen location is Costa da Morte (Galicia). For the tidal power project, the choice depends on the tidal height difference, and the election is Zarautz (Basque Country).

The choice of materials has been based on the price and corrosion resistance, measured by the PREN indicator. The result is that carbon steel will be used with sacrificial zinc anodes.

3. Description of the system

In the project, two systems have been studied, namely the Pelamis WEC for the wave energy project, and the VATT turbine for the tidal power project. The Pelamis WEC consists of a series of 120-meter-long cylinders. Inside these cylinders, there is a hydraulic system that compresses the water in the system with the motion of the waves, activating a generator that produces energy.

As for the VATT turbine, there are different types of configurations. For the project, the choice is the Savonius turbine due to its efficiency in low water flows. This turbine is composed of a rotor connected to a generator and two semi-cylindrical-shaped blades. The movement of the tides drives these blades, like a wind turbine, and generates electricity.

4. Results

The analysis has been based on the theoretical power generation and cost analysis of each energy. Table I presents the power that the technologies can generate under different environmental conditions. As can be observed, in the tidal power project, the values are higher, with the average maximum value of the Pelamis being lower than the minimum average value of the turbine.

	Pelamis WEC	Turbina VATT
Minimum	27	40,3
Maximum	744	1304,2
Average	171-320	322-386,4

Table I: Theoretical Power Generated

In addition, the costs of each system will be analyzed. The costs considered throughout the life cycle include purchase, installation, energy, operation and maintenance, breakdown, environmental, and decommissioning costs. However, the quantitative analysis only includes the initial price and maintenance costs, as shown in Table II.

	Pelamis WEC	VATT turbine
Initial Price	14.101.717,77 €	9.036.239,92 €
Annual maintenance	- €	1.724.183,02 €

Table II: Projects' costs

The Pelamis initial investment is higher, while turbine's maintenance is higher due to the use of sacrificial anodes.

5. Conclusions

The limited development of these technologies and the high associated cost at the current level of development make them a challenging choice when selecting a renewable energy type for a new project. These sources are expected to undergo a potential improvement, rendering current technologies obsolete within a few years. Therefore, Pelamis WEC is ruled out due to its high initial cost.

On the other hand, in the case of the VATT turbine, it should be further analyzed as it offers greater power with a lower initial investment. The advantage would be that the system would not need to be replaced. Improvements could be implemented to reduce generation costs. Additionally, if material enhancements are made, the high maintenance costs could be reduced.

Finally, these energy sources have significant potential and should continue to be developed with the aim of optimizing them and reducing the overall cost. According to different sources, like the Global CCS Institute, in 2050, the projected price of these sources will be like other sources like nuclear or offshore wind, ranging between 5 and 10 euros per kWh.

Índice de la memoria

Capítulo 1. Introducción	7
1.1 Justificación y metodología de la temática.....	7
1.2 Motivación del proyecto.....	8
1.3 Objetivos del estudio y estructura del trabajo	8
Capítulo 2. Descripción de las Tecnologías.....	11
2.1 Mercado actual	11
2.2 Tipos de tecnología	12
2.2.1 Tecnologías mareomotrices.....	13
2.2.2 Tecnologías undimotrices.....	14
2.3 Estado de la cuestión	15
2.3.1 Instalaciones y proyectos extranjeros	16
2.3.2 Instalaciones y proyectos nacionales	18
Capítulo 3. Ubicación ideal.....	21
3.1 Salinidad.....	21
3.2 Nivel de fuerza de las olas.....	22
3.3 Diferencia de altura entre mareas	23
Capítulo 4. Elección de Materiales	27
4.1 Introducción de las opciones	27
4.2 Aceros inoxidables dúplex y super dúplex	27
4.3 ánodos de sacrificio	29
4.4 Decisión final	31
Capítulo 5. Desarrollo del sistema	35
5.1 Elección tecnologías.....	35
5.1.1 Tecnología mareomotriz.....	35
5.1.2 Tecnologías undimotrices.....	41
5.1.3 Decisión final.....	43
5.2 Potencia Generada.....	44
5.3 Análisis económico	50

5.3.1 Coste Del Ciclo de Vida	50
5.3.2 Análisis del Coste Total del Proyecto de Energía Undimotriz.....	54
5.3.3 Análisis del Coste Total del Proyecto de Energía Mareomotriz.....	57
Capítulo 6. Análisis de Resultados.....	61
6.1 Comparación energética	61
6.2 Comparación económica	62
6.3 Impacto Medioambiental.....	63
6.4 Comparación con otras Energías	65
6.4.1 Energía Eólica.....	65
6.4.2 Energía Solar.....	66
Capítulo 7. Conclusiones y Trabajos Futuros.....	67
7.1 Decisiones finales.....	67
7.2 Potencial	68
7.3 Trabajos Futuros.....	69
Capítulo 8. Bibliografía.....	71
ANEXO I: Alineación con los Objetivos de Desarrollo Sostenible (ODS).....	75
ANEXO II: Diferencia de Altura De Mareas Diaria	77

Índice de figuras

Figure 1: Generación de energía en España por tecnologías.....	12
Figure 2: Generador de corriente de marea	13
Figure 3 Central mareomotriz de Rance.....	16
Figure 4: Tecnología CETO en Australia.....	17
Figure 5: Prototipo WaveRoller	18
Figure 6: Central undimotriz de Mutriku	19
Figure 7: Tecnología del Wave Energy Basque Country	20
Figure 8: Mapa de salinidad de la superficie oceánica mundial.....	21
Figure 9: Mapa de salinidad de la superficie oceánica española.....	22
Figure 10: Mapa del nivel medio de la fuerza de las olas en Europa	23
Figure 11: Grado de PREN de distintos materiales.....	28
Figure 12: Serie electroquímica en agua de mar	30
Figure 13: Esquema TSG	36
Figure 14: Tipos de configuración VATT.....	38
Figure 15: Límite de Betz en función de la velocidad del fluido	39
Figure 16: Esquema tipos de configuraciones HATT	40
Figure 17: Pelamis Wave Energy Converter	42
Figure 18: Esquema turbina Savonius	45
Figure 19: Variación de la densidad del agua (kg/m^3).....	46
Figure 20: Potencia generada por un Pelamis WEC (kW)	49
Figure 21: Proyección del precio de los principales tipos de energía (€/kWh).....	69

Índice de tablas

Tabla 1: Diferencia de alturas en Zarautz.....	24
Tabla 2: Diferencia de alturas en Llanes	24
Tabla 3: Diferencia de alturas en Burela de Cabo	25
Tabla 4: Comparación de precio entre las distintas opciones.....	32
Tabla 5: Potencia teórica generada por una turbina VAT (kW).....	47
Tabla 6: Potencia generada en Zarautz (kW)	49
Tabla 7: Precio de materiales del Pelamis	54
Tabla 8: Precio materiales de la turbina VATT.....	58
Tabla 9: Comparación de potencia (kW).....	61
Tabla 10: Comparación económica	62
Tabla 11: Diferencia de alturas diaria en Zarautz.....	78
Tabla 12: Diferencia de alturas diarias en Llanes.....	79
Tabla 13: Diferencia de alturas diaria en Burela de Cabo.....	80

Índice de ecuaciones

Ecuación 1: Cálculo del PREN de un material.....	28
Ecuación 2: Potencia de la energía de las olas	44
Ecuación 3:Área externa de un semicilindro	44
Ecuación 4: Potencia de la energía cinética de las olas	47
Ecuación 5: Potencia generada por un WEC.....	48
Ecuación 6: Coste del Ciclo de Vida	50
Ecuación 7: Volumen cilindro hueco	57
Ecuación 8: Masa de la turbina.....	57

Acrónimos

EVE -Ente Vasco de Energía

HATT- Horizontal Axis Tidal Turbine

ODS - Objetivos de desarrollo sostenible

OWC -Oscillating Water Column

PREN -Pitting resistance number´

TSG – Tidal Stream Generator

UE – Unión Europea

VATT- Vertical Axis Tidal Turbine

WEC -Wave Energy Converter

Capítulo 1. INTRODUCCIÓN

1.1 JUSTIFICACIÓN Y METODOLOGÍA DE LA TEMÁTICA

Las energías renovables son el tipo de energía más prometedora y que van a experimentar un mayor avance en el nivel de desarrollo. Numerosos tipos de energía renovable se están desarrollando en España y en el mundo, con el objetivo de reducir las emisiones de gases de efecto invernadero. Los tipos más desarrollados en España son la eólica y la solar. Sin embargo, España tiene una ventaja comparada al resto de países y son sus 8000 kilómetros de costa, permitiendo que se puedan plantear otro tipo de energías, como son la mareomotriz y la undimotriz.

Aunque estas energías no estén muy avanzadas y la mayoría de las personas desconozca su funcionamiento, estas tecnologías se llevan explotando desde hace varios siglos. En el siglo XIII, se creó el molino de agua de Jado en la costa cantábrica. Este junto a otros molinos permitía obtener energía de la diferencia de altura entre las mareas, pero no fue hasta el siglo XVII que, con la introducción del cultivo de maíz, se empezaron a utilizar estos molinos. Hoy en día, estos molinos están muy deteriorados o son puntos turísticos. Estos molinos fueron las primeras centrales de energía mareomotriz, que actualmente aprovechan las mareas para crear energía, y luego transformarla en electricidad.

Pese a ser un tipo de energía renovable y antigua, la energía mareomotriz no está tan desarrollada como otras energías, al igual que la energía undimotriz. Esta última aprovecha las olas para producir energía, ya que estas accionan turbinas. Este tipo de energía podría ser muy eficiente, debido a la densidad del agua que, por ejemplo, es mayor que la del aire. Aun siendo una energía poco desarrollada, es interesante saber cómo se puede aprovechar el agua como posible fuente de energía adicional.

1.2 MOTIVACIÓN DEL PROYECTO

España junto a otros países tiene como objetivo reducir los gases de efecto invernadero y la generación de electricidad es uno de los mayores emisores. Por lo tanto, es necesario aprovechar todos los tipos de energía disponibles, por ello es importante que se desarrollen las energías mareomotriz y undimotriz, ya que la densidad del agua permite que esta energía sea más eficiente que otras, como la eólica.

Gracias a los molinos de agua existentes en Cantabria, sabemos que este tipo de energía es antigua, por lo que debería estar más desarrollada si se quieren aprovechar todos los recursos naturales posibles. La práctica inexistencia de centrales hizo que el autor del proyecto se planteara la posibilidad de crear una de estas centrales en nuestra costa y estudiar las distintas opciones de tecnologías existentes.

España tiene como objetivo reducir los gases de efecto invernadero y reducirlos en gran cantidad en 2050, siguiendo con la Ley del Clima aprobada en la UE. Por lo tanto, los proyectos de energía deben alinearse con los ODS. Este proyecto trabaja en diferentes objetivos, como son: Energía asequible y no contaminante, vida de ecosistemas terrestres, ciudades y comunidades sostenibles y acción por el clima. En el ANEXO I: Alineación con los Objetivos de Desarrollo Sostenible (ODS), se detalla en mayor profundidad como el trabajo se alinea con los ODS. La gran cantidad de objetivos tratados motivó al autor a interesarse en este tipo de energías.

1.3 OBJETIVOS DEL ESTUDIO Y ESTRUCTURA DEL TRABAJO

El objetivo principal del proyecto es conocer este tipo de energías y las condiciones en las que su funcionamiento es óptimo, con el objetivo de analizar si un proyecto de este calibre es realista en España, teniendo en cuenta el nivel de desarrollo de estas tecnologías.

La estructura del trabajo consistirá en analizar los distintos puntos clave en un proyecto de energía mareomotriz. En primer lugar, se empezará con un análisis de las distintas tecnologías existentes y los proyectos en desarrollo. Con el estado de la cuestión ya

estudiado, el siguiente paso será el de la elección de la ubicación ideal. Además, se estudiarán detalladamente, algunas de las tecnologías presentadas y que son las que se plantearán. En paralelo, se estudiarán los tipos de materiales necesarios, teniendo en cuenta las condiciones del entorno en el que se desarrolla el proyecto. Finalmente, se realizará una comparación energética y económica entre las opciones y las distintas energías ya existentes. En este apartado, se presentará también el impacto que tendrán.

Capítulo 2. DESCRIPCIÓN DE LAS TECNOLOGÍAS

En este apartado, se presentarán los tipos de tecnología existentes por tecnologías, y los proyectos actuales en el mundo. Además, se presentará de manera superficial el mercado de las energías renovables, y por qué es necesario el desarrollo de estas tecnologías.

2.1 *MERCADO ACTUAL*

El consumo energético mundial y nacional se encuentra en un aumento constante, siendo imprescindible el aumento de generación eléctrica. Numerosos proyectos se presentan cada año, con el objetivo proporcionar la energía suficiente para la demanda existente. Como ya se detalló anteriormente, el objetivo del país es que las emisiones de gases de efecto invernadero sea nula en 2030. Para ello, las empresas energéticas están desarrollando una gran cantidad de proyectos de energía renovable.

Las energías mareomotriz y undimotriz representan un porcentaje casi nulo en la generación de energía en España. Como se puede observar en la , no se puede observar ningún tipo de estas energías, estando en el apartado de Otras energías renovables. En esta figura se puede observar la tendencia ascendente de la generación de energía entre 2021 y 2022. En España, un gran porcentaje de la generación de energía es energía renovable, lo que permite al país ser uno de los líderes en la transición a las energías renovables. Por ello, es necesario el desarrollo de las energías del mar, para aumentar el porcentaje de energías renovables.

ESTRUCTURA DE LA GENERACIÓN POR TECNOLOGÍAS (GWh) | SISTEMA ELÉCTRICO: Nacional

Del 2021 al 2022

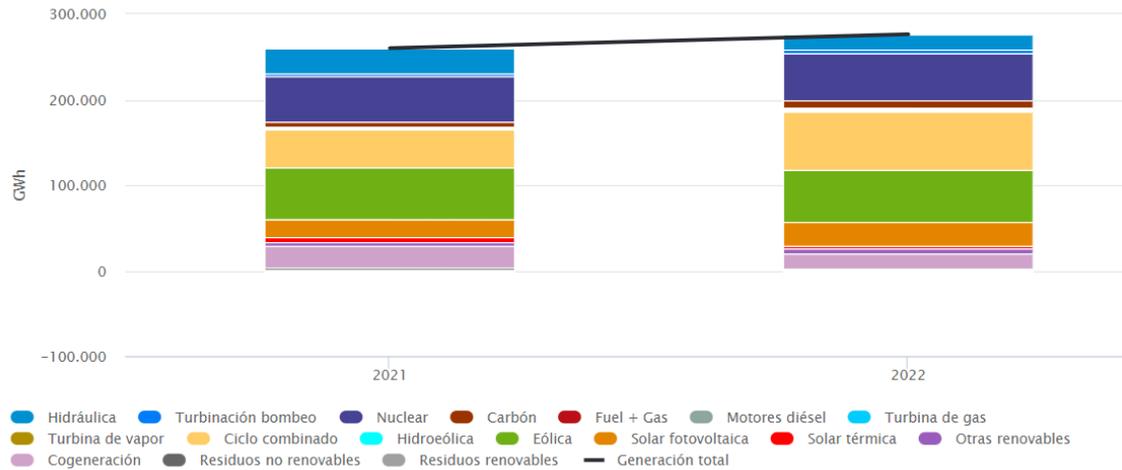


Figure 1: Generación de energía en España por tecnologías

Actualmente, el tipo de tecnologías existentes están en desarrollo o en fase pre-comercial. Sin embargo, existen numerosos proyectos en el mundo que aprovechan estas prometedoras energías. Cada uno de estos proyectos utiliza distintos tipos de tecnología. A continuación, se presentarán los distintos tipos de tecnología más desarrollados y los proyectos ya existentes o prometedores del mundo y de España.

2.2 TIPOS DE TECNOLOGÍA

Los dos tipos de energía pueden ser aprovechados con distintos métodos de generación, lo que permite que se puedan adaptar a distintas zonas y condiciones. Además, se podrían llegar a combinar, es decir, en algunos puntos del país será desarrollable un proyecto de energía de las mareas y en otro de las olas. En zonas con grandes mareas, sería mejor optar por un proyecto de energía mareomotriz. Sin embargo, en zonas con menor diferencia de altura entre mareas, se podría instalar un generador undimotriz que aprovecharse el oleaje.

2.2.1 TECNOLOGÍAS MAREOMOTRICES

- Generador de corriente de marea o Tidal Stream Generator (TSG)

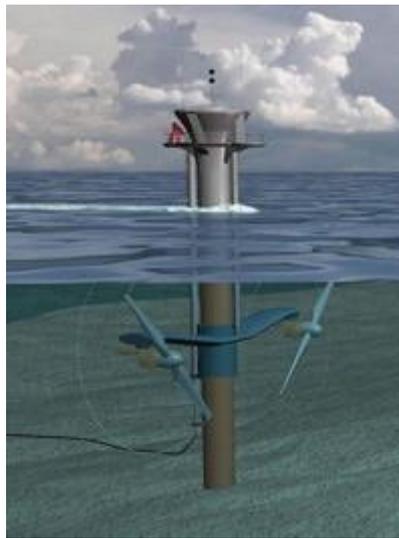


Figure 2: Generador de corriente de marea

El TSG es un tipo de tecnología, que tiene un funcionamiento similar al de las turbinas eólicas. En la Figure 2, se muestra uno de los tipos de TSG, que está compuesto por una estructura que incluye las turbinas y un generador. Todos los tipos de este generador tienen los mismos elementos, aunque entre ellos cambia la disposición y el tipo de turbina, para aprovechar las condiciones del entorno en el que esté. El generador tiene como objetivo aprovechar la energía cinética del agua en movimiento, y la mayor ventaja es que tiene el menor coste entre las distintas opciones de tecnologías de energía mareomotriz.

- Presas de marea

Las presas de marea, al contrario que el TSG, aprovechan la energía potencial que existe entre la diferencia de alturas entre las mareas. Estas presas son la evolución de los molinos de agua, que se presentaron anteriormente. Este tipo de tecnología necesita la existencia de una infraestructura previa, como una bahía o un estuario. Las centrales de energía mareomotriz en funcionamiento actualmente funcionan con este tipo de tecnología. Sin

embargo, presenta diversos problemas como son el coste y la escasez de zonas que albergan las condiciones necesarias para desarrollar esta energía.

- Energía mareomotriz dinámica

Este tipo de tecnología se encuentra todavía en fase de desarrollo, y es una mezcla entre la presa de marea y el TSG. El objetivo de esta tecnología es beneficiarse de la energía potencial y cinética de las corrientes de las mareas.

2.2.2 TECNOLOGÍAS UNDIMOTRICES

En el caso de la energía undimotriz, existe un mayor tipo de tecnologías, aunque no hay tantos proyectos en funcionamiento como en el caso de la energía mareomotriz. Estas tecnologías se encuentran en su mayoría en fases pre-comerciales, o alguna ya está empezando a comercializarse. Las principales tecnologías son:

- Columna de agua oscilante

Este sistema utiliza el oleaje para presionar el aire comprimido de las cámaras, este movimiento del aire provoca un flujo que activa las turbinas que componen el sistema. En el momento de la retirada de la ola, el aire baja de nuevo, provocando que la turbina vuelva a ser activada. Esta tecnología es más eficiente en lugares con oleajes muy fuertes, ya que cuanto mayor sea la fuerza, más velocidad tendrá el aire a presión, y consecuentemente la turbina generará más energía.

- Dispositivos móviles articulados

Esta tecnología está compuesta por un sistema hidráulico que con el movimiento de las olas comprime el agua del sistema y activa un generador que produce energía. Hay distintas formas de poner en práctica esta tecnología, ya sea con boyas ancladas al fondo marino o atenuadores de superficie, que están interconectados perpendicularmente al flujo de las olas que llega.

- Dispositivos oscilantes

Existen varios tipos de dispositivos oscilantes, sin embargo, su funcionamiento es muy similar. El sistema consiste en 2 partes, la primera un módulo que se encuentra anclado en el fondo marino, para mantener un punto fijo. La otra parte se encuentra en la superficie, y mediante las oscilaciones del oleaje, se activa un sistema de pistones que permite una transformación hidroeléctrica.

España está trabajando en desarrollar este tipo de energías, debido al gran potencial que tienen. La cantidad de proyectos está aumentando mundialmente y España, es uno de los países que está trabajando en ello. A continuación, se presentarán los mayores proyectos e instalaciones internacionales y nacionales.

2.3 ESTADO DE LA CUESTIÓN

En este apartado se procede a presentar proyectos ya existentes y cuáles son sus principales características y su actual nivel de desarrollo, la mayoría de las instalaciones en funcionamiento se encuentran en países como Corea del Sur, Francia, Canadá, Reino Unido y Noruega. Estos países son los líderes en la generación y desarrollo de estas energías, debido a las condiciones que presentan sus costas. Como el trabajo consiste en analizar la viabilidad de un proyecto de energía mareomotriz y undimotriz en España, se presentarán algunas instalaciones extranjeras, pero se presentarán varios de los proyectos más prometedores en España.

2.3.1 INSTALACIONES Y PROYECTOS EXTRANJEROS

- Central mareomotriz del Rance



Figure 3 Central mareomotriz de Rance

Esta central de energía mareomotriz se encuentra en el estuario del río Rance en Bretaña, en el norte de Francia. Esta planta se creó en 1966, y fue la primera central de energía mareomotriz del mundo, y hoy en día sigue en funcionamiento. Las principales características son que crea suficiente energía para 130 000 viviendas al año, lo que representó un 12% de la energía producida en la región en 2015. Además, la central genera 25 millones de euros de beneficio para la zona de Bretaña. La central aprovecha la energía cinética del flujo de agua que entra y sale del estuario. En esta zona, la diferencia de altura de mareas es de casi 13 metros, lo que hace de la ubicación un lugar privilegiado para desarrollar esta energía.

Las consecuencias de la creación de esta instalación fue una gran reducción de la emisión de gases de efecto invernadero en la zona. Además, el precio de la energía no es elevado. Sin embargo, hubo consecuencias negativas para el medioambiente y la fauna del estuario. Uno de los efectos negativos ha sido la sedimentación del estuario. Como se puede observar en la Figure 3, la central corta el flujo natural del estuario, lo que provocó estos efectos negativos en la fauna de la zona.

- Proyecto CETO



Figure 4: Tecnología CETO en Australia

Este proyecto está en fase pre-comercial y desde 2018 se están realizando pruebas en la costa poniente en Australia. Esta tecnología desarrollada por la compañía Carnegie Clean Energy tiene un gran potencial debido a las numerosas ventajas que tiene con otro tipo de instalaciones. La instalación consiste en una boya completamente sumergida conectada a una bomba con un punto de anclaje en el fondo marino. Con el movimiento de la boya, se activa la bomba hidráulica que impulsa agua a través de una tubería hacia una central eléctrica en la costa.

Las principales ventajas es que se puede usar esta tecnología en condiciones de oleaje suave, lo que permitiría que se aprovechara esta energía en un mayor número de zonas. Además, se puede usar para desalinizar y producir agua dulce como subproducto.

- WaveRoller

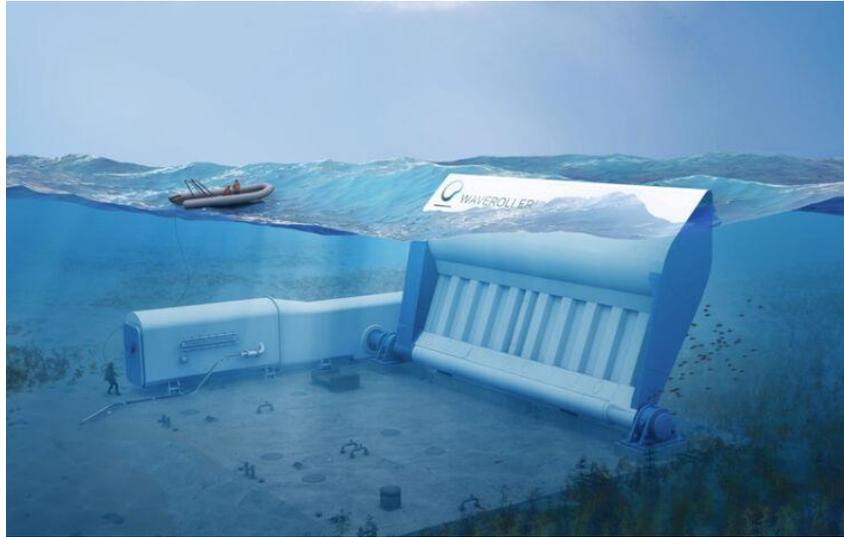


Figure 5: Prototipo WaveRoller

El proyecto diseñado por la empresa finlandesa WaveRoller desarrolló un dispositivo a escala comercial en la costa de Peniche (Portugal), en 2019. La Unión europea invirtió cerca de 10 millones de euros para este proyecto. Como se puede observar en la Figure 5, prácticamente toda la instalación está sumergida, excepto la parte superior que puede estarlo o no, en función del oleaje. La instalación está compuesta por un marco de acero con panel que se mueve con el movimiento de las olas. Con este movimiento, se impulsa un pistón hidráulico que bombea agua a alta presión hacia un motor que impulsa a su vez el generador. La energía generada se transmite finalmente a la costa a través de un cable submarino.

Esta tecnología se podría juntar en matrices para crear parques energéticos más grandes. Cabe destacar que este tipo de tecnología funciona en profundidades ente 8 y 20 metros, lo que permitiría que se pudiese instalar cerca de la costa, lo que reduciría los costes de instalación y mantenimiento.

2.3.2 INSTALACIONES Y PROYECTOS NACIONALES

Como ya se ha explicado anteriormente, en España no existen proyectos en fases tan avanzadas de desarrollo, sin embargo, se están estudiando diferentes tecnologías. Además,

España cuenta con una de las principales plantas undimotrices del mundo. Las principales instalaciones o proyectos son:

- Central undimotriz de Mutriku



Figure 6: Central undimotriz de Mutriku

Esta central fue puesta en funcionamiento en julio de 2011, siendo la primera central undimotriz del mundo. La tecnología usada en esta central es la de columna de agua oscilante u OWC, y está compuesta por 16 unidades de OWC. La inversión necesaria fue de 2,3 millones y tiene una potencia instalada de 296 kW.

A parte de ser la primera central undimotriz del mundo, actualmente, el gobierno vasco permite a instituciones realizar pruebas con nuevos tipos de turbina, con el objetivo de analizar la eficiencia y rentabilidad de estas turbinas para futuras instalaciones. El EVE, en enero de 2023, lanzó el programa de Compras Públicas Precomerciales de TurboWave. Este programa tiene como objetivo recibir el mayor número de propuestas de turbinas para desarrollar en la central. Estas turbinas tendrán que ser específicas para centrales undimotrices, en especial la de Mutriku, aunque servirá de referencia para futuros avances en el diseño de este tipo de turbinas e instalaciones.

- Wave Energy Basque Country



Figure 7: Tecnología del Wave Energy Basque Country

Este Proyecto está en fase de desarrollo por la empresa Oceantec Energías Marinas, y la tecnología que se está desarrollando es la de dispositivo flotante. El objetivo de este proyecto es testear diferentes tipos de tecnología que aprovechen la energía del océano en la costa vasca. Los objetivos son de conseguir una producción de 60 MW en 2030, lo que representaría un 4,4% de la producción de energía renovable.

En España, se están desarrollando más proyectos en distintos puntos del país, por ejemplo, en Galicia y las Islas Canarias se están estudiando proyectos de energía undimotriz que usan la tecnología de dispositivos flotantes. Como ya se explicó anteriormente, estas energías no representan un porcentaje elevado de la generación de energía. Sin embargo, se está trabajando para que, en unos años, estas energías sean un porcentaje significativo en la producción de energía renovable del país.

Capítulo 3. UBICACIÓN IDEAL

Este proyecto consiste en la elección del sistema óptimo en la costa española, por lo tanto, se deberán tener en cuenta diferentes condiciones de esta misma. El objetivo es analizar si es viable unos de estos proyectos actualmente, por lo tanto, las elecciones que se tengan en cuenta deberán tener como objetivo que el proyecto sea lo más eficiente posible, tanto energéticamente como económicamente. Por todo lo anterior, la ubicación tendrá que cumplir con unos requisitos mínimos, para ser óptimos para el proyecto. Para determinar esta ubicación será necesario estudiar la salinidad de los distintos mares y océanos españoles, la fuerza de las olas y la diferencia de altura entre mareas.

3.1 SALINIDAD

El entorno marítimo es hostil y conlleva una gran cantidad de dificultades a la hora de desarrollar un proyecto energético en estas zonas. Uno de los mayores inconvenientes de este lugar, es la corrosión, ya que la mayoría de estas tecnologías están diseñadas con materiales que son susceptibles a esta, como el acero. Por lo tanto, la primera condición a tener en cuenta es que el nivel de salinidad sea el menor posible, ya que el objetivo de la elección de esta ubicación ideal es que las desventajas sean minimizadas.

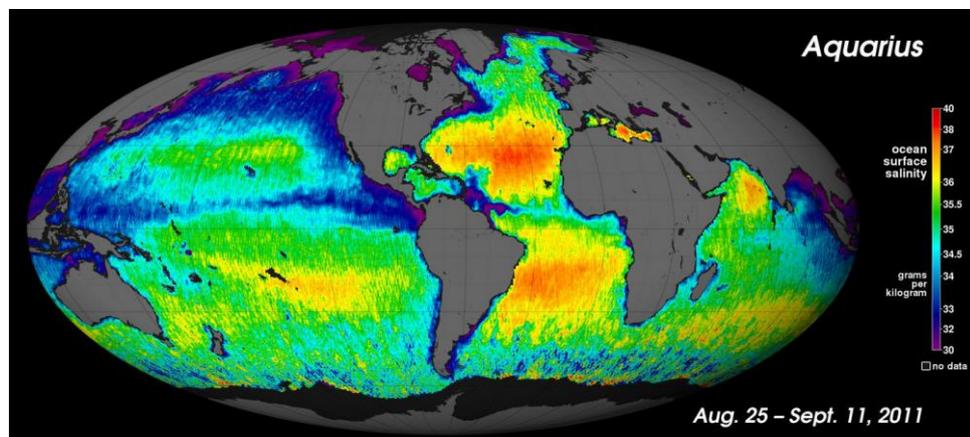


Figure 8: Mapa de salinidad de la superficie oceánica mundial

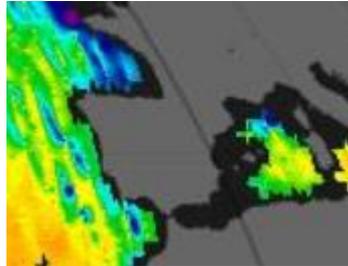


Figure 9: Mapa de salinidad de la superficie oceánica española

Para determinar los niveles de salinidad, se utilizará la Figure 8 que representa el mapa de salinidad de la superficie oceánica mundial realizado por el satélite de la NASA, new Aquarius (NASA Jet Propulsion Laboratory (JPL), 2011). La salinidad se mide en gramos por kilogramo, y en la Figure 9 se puede observar con más detalle el valor de la salinidad en la costa española. Las zonas con mayor nivel son las del océano atlántico con niveles de alrededor de 35 gramos por kilogramo. De la zona mediterránea, no hay datos, sin embargo, en los siguientes puntos será descartada. Por lo tanto, la zona del norte de España, en particular la del mar Cantábrico será la que mejor cumpla este requisito, con niveles de salinidad de entorno 33 gramos por kilogramo. Las zonas en las que se continuará el estudio serán Galicia, Asturias, Cantabria y el País Vasco.

Finalmente, con la zona delimitada al norte de España, es necesario definir una zona más específica en la que desarrollar el proyecto. Por lo tanto, en los siguientes puntos se analizarán la diferencia de alturas de las mareas y la fuerza de las olas.

3.2 NIVEL DE FUERZA DE LAS OLAS

En el caso de una tecnología mareomotriz, la fuerza de las olas permite que se accione el mecanismo con el movimiento de estas. Por lo tanto, cuanto mayor sea la fuerza, mayor será la energía generada. Como se puede observar en la Figure 10, las zonas con mayor media de fuerza son Galicia y la zona asturiana y cantábrica, con niveles medio de 55 kW/m y 50 kW/m, respectivamente. Estas zonas son las más viables para este tipo de proyecto.



Figure 10: Mapa del nivel medio de la fuerza de las olas en Europa

Además, en el caso de desarrollar un proyecto mareomotriz, será necesario plantear una fuerza mínima para que la tecnología usada sea eficiente, y no se desaproveche la instalación. En este apartado, no se ha realizado ningún descarte, ya que habrá que analizar esa fuerza mínima, que podría ser inferior a 44 kW/m, y se podría plantear entonces también en la zona del País Vasco.

Finalmente, el nivel de fuerza de las olas también se relaciona con la velocidad del flujo de agua, que será importante a la hora de determinar la potencia que podría generar la instalación. El nivel de fuerza de las olas permite ubicar de manera más precisa cual es la zona más prometedora. Sin embargo, más adelante se verá que la velocidad del agua será la que determine la potencia teórica o máxima que podría generar la instalación.

3.3 DIFERENCIA DE ALTURA ENTRE MAREAS

La diferencia de altura entre mareas será importante en el caso de desarrollar un proyecto de energía mareomotriz, ya que las tecnologías existentes aprovechan la energía

potencial de la diferencia de alturas entre alta y baja mar. Para poder comparar entre distintas zonas, se escogerán distintos puntos específicos en la costa del norte de Galicia, de Cantabria, de Asturias y finalmente del País Vasco. Para ello se supondrá que la diferencia de alturas es similar en las distintas zonas escogidas. Además, se usarán las predicciones del calendario de mareas, para realizar una media mensual de la diferencia de alturas. Los puntos escogidos serán: Zarautz (Guipúzcoa), Llanes (Asturias) y Burela de Cabo (Galicia).

Para realizar la elección, se usarán los rangos de marea del año 2023, de junio a septiembre. Para cada mes se realizará la media de la diferencia de mareas de cada ciclo diario, la mediana y las diferencias mínima y máxima. Con toda la información ya recopilada, se compararán estos resultados y se determinará la ubicación ideal para un proyecto de energía mareomotriz. En las siguientes tablas se muestran los resultados ya resumidos para cada zona escogida, incluyendo también el valor total o resumido del periodo escogido. En el ANEXO II: Diferencia de Altura De Mareas Diaria, se muestra el valor diario de la diferencia de altura para cada día de los meses escogidos.

	Junio	Julio	Agosto	Septiembre	Total
Valor min	0,8	1,7	1,4	1,2	0,8
Valor max	3,6	3,8	4,5	4,5	4,5
Media	2,62	2,68	3,3	2,78	2,85
Mediana	2,7	2,65	2,75	2,7	2,70

Tabla 1: Diferencia de alturas en Zarautz

	Junio	Julio	Agosto	Septiembre	Total
Valor min	1,6	1,7	1,5	1,2	1,2
Valor max	3,6	3,8	4,4	4,4	4,4
Media	2,56	2,63	3,33	2,76	2,82
Mediana	2,65	2,6	2,75	2,9	2,73

Tabla 2: Diferencia de alturas en Llanes

	Junio	Julio	Agosto	Septiembre	Total
Valor min	1,6	1,7	1,5	1,2	1,2
Valor max	3,4	3,6	4,3	4,3	4,3
Media	2,5	2,54	3,21	2,66	2,73
Mediana	2,55	2,5	2,65	2,7	2,60

Tabla 3: Diferencia de alturas en Burela de Cabo

Finalmente, analizando los resultados se puede descartar la ubicación de Burela de Cabo ya que, comparado con los otros dos puntos, los valores son menores, lo que supondría un problema en el caso de desarrollar un proyecto de energía mareomotriz. Esto implica que las dos ubicaciones idóneas serían Zarautz y Llanes, que tiene unos valores muy similares. Sin embargo, en la zona de Zarautz la diferencia de alturas es ligeramente superior, por lo tanto, se estudiará Zarautz como ubicación ideal para esta energía.

Capítulo 4. ELECCIÓN DE MATERIALES

4.1 INTRODUCCIÓN DE LAS OPCIONES

La elección de los materiales es un punto indispensable a la hora de realizar este proyecto, debido al entorno en el que se va a realizar. A la hora de elegir la ubicación ideal, se tuvo en cuenta el nivel de salinidad del agua, ya que crea corrosión. La resistencia a la corrosión será la que determine el tipo de material que se usará. Las posibles instalaciones del proyecto se componen principalmente de un sistema de turbinas, normalmente de acero.

El acero es un tipo de metal ferroso y pesado, sus principales características son que es muy resistente y duradero, pero con una baja resistencia a la corrosión, por lo tanto, el uso de acero únicamente no es una solución. El objetivo es mantener las ventajas de este metal, pero aumentando la resistencia a la corrosión. Para ello, existen distintos métodos altamente efectivos. En primer lugar, se puede incluir un revestimiento protector como el que tiene el hierro forjado. Además, se puede incluir otros materiales de protección como el acero inoxidable que contiene cromo. Finalmente, se puede usar el acero y protegerlo con ánodos de sacrificio.

Las opciones que se plantearán serán las de usar un acero inoxidable en toda la instalación o la de usar acero con ánodos de sacrificio.

4.2 ACEROS INOXIDABLES DÚPLEX Y SUPER DÚPLEX

Las aleaciones de los aceros inoxidables dúplex y super dúplex son aleaciones compuestas principalmente por hierro con cromo o molibdeno juntos con estabilizadores de la austenita como el níquel o el nitrógeno (Castinox). El porcentaje de estos elementos en el acero, son los que determinan el nivel de resistencia a la corrosión. Aunque existen distintos métodos para medir la resistencia a la corrosión, en este proyecto se usará el PREN.

El PREN es un índice utilizado para evaluar el nivel de resistencia a la corrosión por picaduras de un material. Un nivel más elevado de este índice, indica un mayor grado de resistencia. El nivel de resistencia se calcula mediante la composición química del material, que incluye el contenido en molibdeno, nitrógeno y cromo del material. La fórmula utilizada para calcular el PREN se presenta en la Ecuación 1.

$$PREN = \%Cr + 3.3 * \%Mo + 16 * \%N$$

Ecuación 1: Cálculo del PREN de un material

En la Figure 11 , se muestra el PREN de distintos materiales o aleaciones:

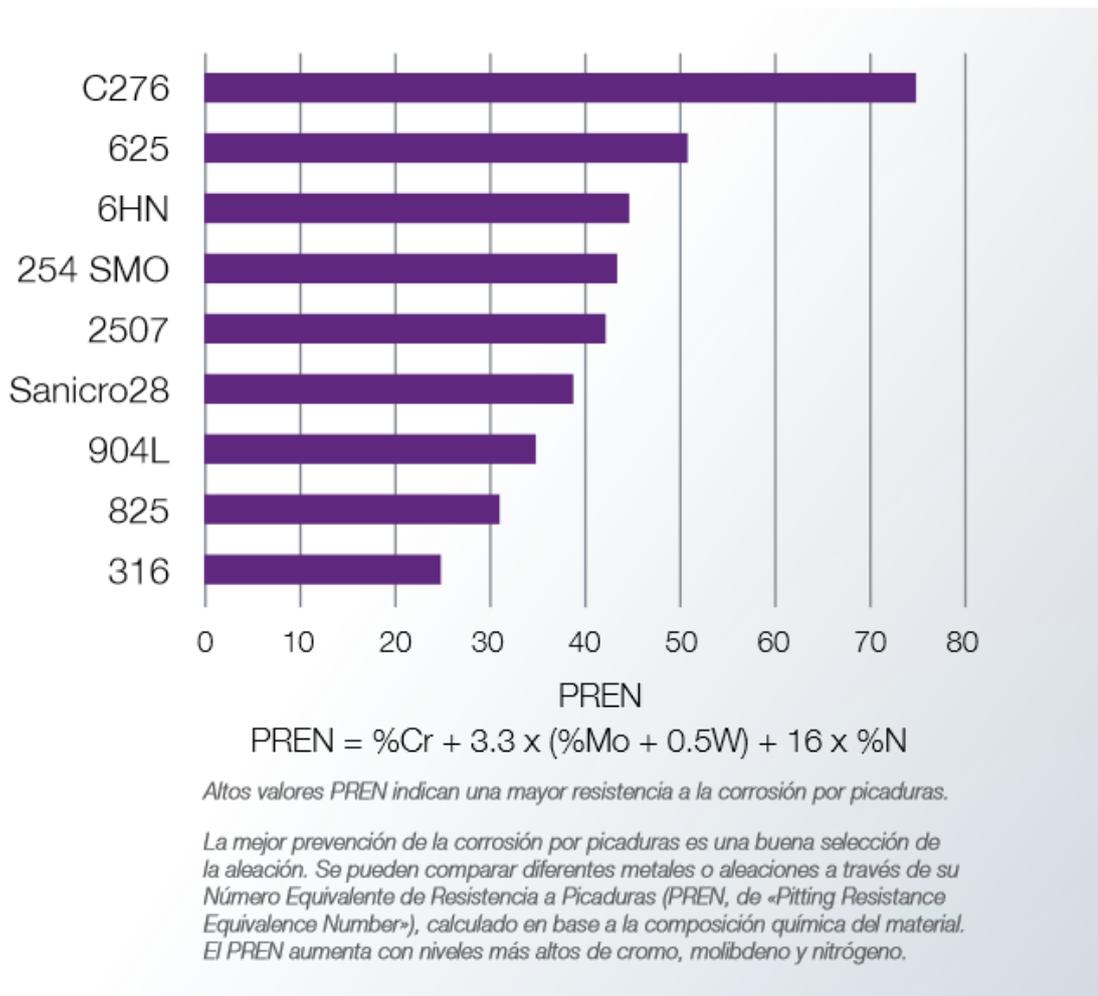


Figure 11: Grado de PREN de distintos materiales

Para determinar que materiales pueden ser una elección óptima para el proyecto, se determinará que el nivel mínimo de PREN que deben tener es de 42. Con este nivel, el grado de protección será suficiente para el proyecto que se realizará. Analizando los distintos materiales, los únicos que cumplen esta condición son:

- Aleaciones 6-Moly: Este tipo de aleaciones son aceros inoxidables superausteníticos con un porcentaje de molibdeno superior al 6%, en este caso existen 2 tipos: la aleación 6HN y la 254 SMO. La primera tiene un nivel de PREN superior ya que contiene un porcentaje superior de níquel.
- Aleación de acero inoxidable 2507 Super Dúplex
- Aleación de Níquel 625
- Aleación de Níquel C-276

Con las distintas opciones ya planteadas, quedará decidir cuál es la óptima para el proyecto. Con la parte técnica ya especificada, el siguiente factor diferencial será el precio de las aleaciones. Esto se planteará más adelante, cuando estén todas las opciones ya descritas.

4.3 ÁNODOS DE SACRIFICIO

La otra opción que se planteará será la del uso de ánodos de sacrificio, junto con acero. El objetivo de este método es crear una protección catódica. El método consiste en colocar un metal activo, que será el ánodo de sacrificio en contacto eléctrico con el otro metal que se quiere proteger. El metal activo se convierte en el ánodo de la estructura y es el que sufre la corrosión, mientras que el elemento compuesto por el otro metal queda protegido al ser el cátodo.

A la hora de elegir los dos materiales que se usarán, será necesario estudiar la serie electroquímica o galvánica en agua de mar, que presenta el valor de potencial de electrodo de distintos elementos. En la Figure 12, se muestra esta serie.

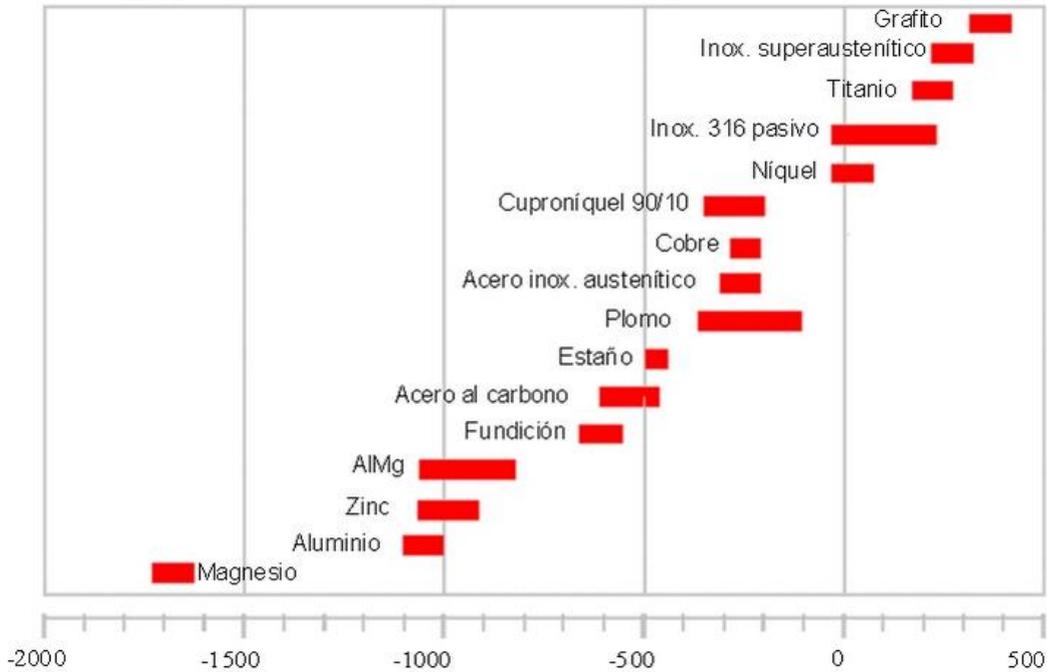


Figure 12: Serie electroquímica en agua de mar

El metal activo o ánodo, deberá tener un potencial inferior al material de la estructura. Los elementos que menor potencial tienen son:

- Magnesio: Es el elemento con menor potencial, sin embargo, presenta varios inconvenientes, como son su alto potencial de trabajo que suele ser un problema en agua de mar y la auto corrosión.
- Aluminio: El aluminio tiende a pasivarse en variados electrolitos.
- Zinc: El Zinc es el elemento con mayor potencial de los tres. Sin embargo, es el más usado en agua de mar, debido a sus numerosos beneficios. Debido a que es el más estudiado y tiene un potencial inferior al resto de elementos, será el elegido en el caso de que se planteará esta solución. Se deberá tener cuidado con el desarrollo del ánodo de este proyecto, ya que el zinc no debe tener imperfecciones.

Con la elección del elemento que será el ánodo de sacrificio, lo siguiente será decidir el metal que se usará como cátodo en la estructura, y que será el material de las turbinas. A mayor potencial, mayor será el precio del elemento. Por lo tanto, en el caso de estudio, la mejor opción será la de un elemento que tenga un potencial de corrosión inmediatamente superior al Zinc. Las posibles soluciones serán la fundición de acero o el acero al carbono.

Al igual que en la elección del ánodo, en la industria marítima, el tipo más usado es el acero al carbono, debido a su gran número de beneficios. Por ejemplo, con este material se suelen fabricar tuberías, cascos de buque, entre otros usos existentes. El acero al carbono se divide en tres tipos. Estos son:

- Bajos en Carbono ($C < 0,25$): Este acero presenta una mayor resistencia y dureza que el acero, por lo que disminuye la posibilidad de que se deformen. Son usados en general para fabricar perfiles estructurales, alambres, clavos, tornillos, barras, etc.
- Medios en Carbono ($0,25 < C < 0,55$): Este tipo necesita tratamiento térmico, y el mayor uso que tienen es en la fabricación de ejes de vehículos, elementos de máquinas, resortes, engranajes, herramientas de agricultura, cables y alambres.
- Altos en Carbono ($C > 0,55$): Presentan la mayor resistencia ante fatiga y fractura. Se utilizan para fabricar herramientas de corte y arranque de viruta como brocas, cintas de sierra, muelles, discos de arado

En este proyecto, y comparando las distintas aplicaciones que tiene cada tipo de acero al carbono, la mejor opción es la de aceros de alto carbono, ya que el material se utilizará para la turbina que estará sometida a un entorno hostil, y por lo tanto deberá tener la mayor resistencia posible.

4.4 DECISIÓN FINAL

Con todas las soluciones ya estudiadas, queda por determinar que método o material se usará. Con la parte de seguridad ya cubierta, el siguiente paso es la elección del material más

económico posible. Como se sabe, estos proyectos requieren una inversión muy elevada, por lo que cuanto más se puede ahorrar, más viable será.

Este tipo de materiales y aleaciones están limitados en el mercado, por lo que existe una volatilidad de precios muy elevada que varía en gran cantidad durante el año y entre países. Para la comparación entre precios se usarán los datos proporcionados por las compañías Flowserve y Fulzer, el 27 de febrero de 2023 en España. Los distintos precios se presentan en la Tabla 4.

Materiales	Cantidad (kg)	Precio (€)
Aleación 2507	100 kg	6585
Aleación 6-Moly 6HN	100 kg	18707
Aleación 6-Moly 254 SMO	100 kg	8910
Aleación níquel 625	100 kg	23470
Aleación níquel C-276	100 kg	43000
Acero al carbono	100 kg	2500
Zinc	1 kg	58,95

Tabla 4: Comparación de precio entre las distintas opciones

Como la turbina será la misma, en cualquier caso, se compara el precio entre los distintos materiales. Con esta información, se pueden descartar todas las aleaciones excepto la aleación 2507, que tiene un precio de un orden de magnitud semejante al acero al carbono. Para comparar estas dos últimas opciones será necesario añadirle el precio del ánodo de sacrificio.

El siguiente paso será el de comparar entre la aleación 2507 y la combinación de acero al carbono con zinc como ánodo de sacrificio. Para determinar la cantidad de zinc necesaria se usará la relación 1:10 de los ánodos de sacrificio. Al no ser un trabajo de diseño de la estructura, se usará esta simplificación para poder comparar los distintos precios. El diseño de un ánodo de sacrificio depende de muchos factores, como son el tipo de estructura que se esté diseñando y de la resistencia que se necesite. El proceso es mucho más detallado y los pasos a seguir, ya están determinados.

Si se quiere diseñar un ánodo de sacrificio acorde a la estructura que se está diseñando, los pasos a seguir serían: el cálculo de la resistencia, el cálculo de la corriente de salida, el cálculo del número de ánodos y su duración, el radio de acción del ánodo y los métodos de fijación (Rosario Francia, 2004).

Para determinar la cantidad necesaria para el proyecto, se empezará con 100 kg del material de la estructura y en el caso de los ánodos de sacrificio, será de 10 kg, siguiendo la regla planteada anteriormente. Esto implica que el primer pago sería de 6585€ en el caso de la aleación 2507 y de 3089,5€, en el caso del acero al carbono con ánodos de sacrificio de zinc. El siguiente paso será determinar la vida útil de cada material y estudiar el coste del mantenimiento de los materiales. Supondremos que los dos metales de la estructura tienen una vida útil similar, aunque la de la aleación 2507, normalmente debería ser superior. Por lo tanto, la vida útil será en torno a los 5 años. El último paso, será calcular el precio extra por el mantenimiento y reemplazo de los ánodos de sacrificio. Esto implica una inspección visual cada 3 meses, que se llevaría a cabo también en el caso de la aleación de acero super dúplex, por lo que no aumenta el precio respecto a la otra alternativa. Los expertos aconsejan el reemplazo de los ánodos cuando estén desgastados entre el 50% y el 75%, o al año de vida útil. Esto implica que durante la vida útil de la estructura se realizarán tres cambios, que aumentarán el coste de materiales a 4058€.

En conclusión, la mejor opción será la de usar acero al carbono con ánodos de sacrificio de zinc. Esto permitirá un ahorro en los costes del sistema. Además, en el caso de un problema del metal de la estructura, será menos perjudicial ya que el problema será en los ánodos mayoritariamente y no en la estructura. Esto limitaría problemas en casos de extrema gravedad. Sin embargo, este problema no será grave, si se lleva a cabo una inspección periódica visual, ya que se podrá evaluar el estado de la estructura y analizar si necesita una intervención prematura.

Capítulo 5. DESARROLLO DEL SISTEMA

5.1 ELECCIÓN TECNOLOGÍAS

El objetivo de este proyecto es analizar qué tipo de proyecto es más eficiente para la costa española, aunque podrían ser los dos. Esto depende de la ubicación, y la energía que las instalaciones sean capaces de generar. Por ello es importante plantear las diferentes tecnologías existentes para cada tipo de energía, como ya se ha explicado anteriormente, aunque con menos detalle, existen varios tipos de instalaciones para cada energía, algunas más desarrolladas que otras.

En este apartado del proyecto, se trabajará en el tipo de tecnología “ideal” o que el autor piensa que es la más interesante o prospera, debido a sus ventajas o desventajas. En anteriores puntos, se han presentado los distintos tipos de tecnología existentes. En este apartado se estudiarán únicamente dos tipos de tecnología, una para cada tipo de proyecto.

5.1.1 TECNOLOGÍA MAREOMOTRIZ

Para el proyecto de energía mareomotriz se planteará como tecnología el TSG, debido a sus numerosas ventajas y potencial. El sistema será similar al de la Figure 13, aunque habrá alguna modificación en función del tipo de turbina elegida.

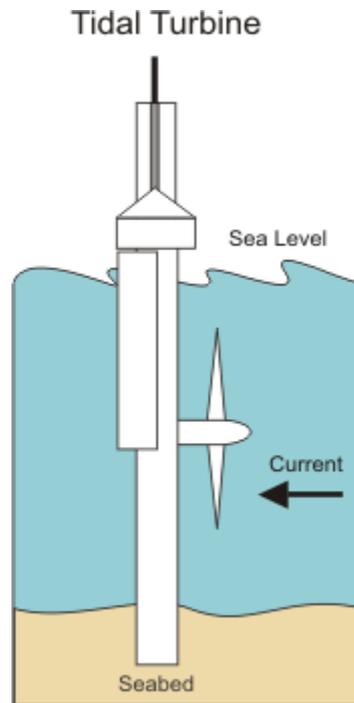


Figure 13: Esquema TSG

Este sistema tiene numerosas ventajas al estar la turbina totalmente sumergida. Con ello se evita que este inter sumergida, lo que provocaría que la corrosión fuese mucho más dura. Otra ventaja sería a la hora de ubicarla, ya que, al estar prácticamente sumergida, se podría ubicar en cualquier zona, evitando posibles problemas por contaminación visual. Además, la mayor ventaja de este sistema es que se puede aprovechar el oleaje cuando sube y baja la marea, esto sería posible si fuese reversible. Como analizaremos en los siguientes puntos, la elección del tipo de turbina permitirá que el sistema sea reversible o no. Por lo tanto, la mayor elección será la del tipo de turbina.

En el siguiente punto se estudiarán los distintos tipos de turbina existentes, analizando las ventajas y desventajas y comparando entre los distintos tipos. Los tipos de turbina existentes son:

- Turbinas de eje horizontal o HATT
- Crossflow turbines o turbina diagonal Mixta
- Turbinas de eje vertical o VATT

Aunque existan otros tipos de turbina o sistema como los generadores oscilantes, las turbinas presentadas son las más comunes y las que se plantean para el desarrollo del proyecto. En los distintos tipos de instalaciones ya existentes, o en desarrollo, los dos tipos de turbina utilizados son las de eje horizontal y vertical, siendo la primera la más utilizada. Por lo tanto, se plantearán únicamente estos dos tipos de turbina como opciones para el proyecto.

- Turbinas de eje vertical o VATT

Este tipo de turbina se encuentra completamente sumergida, mientras que el sistema estará en superficie. Esto añade una gran ventaja al sistema y al coste total, ya que, al no estar anclada al fondo marino, los servicios de mantenimiento serían más asequibles. Además, este sistema es útil cuando hay bajas corrientes, aunque no está tan desarrollado como otro tipo de turbinas, por ejemplo, la HATT.

Al estar aún en fase de desarrollo, hay que prestar especial atención a las ventajas y desventajas que se pueden presentar al usar estas tecnologías. Aunque existan más características de este tipo de turbina, en el siguiente apartado se exponen las principales ventajas y desventajas de este tipo de turbinas:

Las principales ventajas son:

- Instalación y diseño simple. Al no tener que estar anclado al fondo marino, la instalación puede ser montada y mantenida de una forma mucho más asequible y barata.
- Colocación del generador: Al contrario que las turbinas HATT, el generador puede estar en el exterior del agua, lo que conlleva una reducción de costes, al no tener que estar sellado como modo de protección.
- Cualquier dirección de flujo: aunque se pueden predecir las mareas, los flujos pueden variar en función de las condiciones del mar, por lo tanto, que el sistema sea reversible es necesario, ya que se puede generar energía en cualquier condición de

flujo (ladeado o turbulento). Esto además permite prescindir de un mecanismo de guiñada, que si es necesario en otro tipo de turbinas.

Las principales desventajas o desafíos son:

- Baja eficiencia. Teóricamente, la eficiencia es de 64%, aunque en la práctica sigue siendo inferior a las turbinas HATT. Además, estas turbinas tienen un bajo par de fuerza inicial, lo que podría provocar mayores pérdidas en eficiencia. Una solución sería implementar un mecanismo externo a la turbina que accionara la turbina al inicio. Sin embargo, esto aumentaría el coste y la complejidad del diseño, que son dos ventajas ya citadas.
- Desgaste de la turbina. Este desgaste se debe a numerosos factores, como son la ondulación de par, la carga de fatiga o la vibración del entorno. La ondulación de par consiste en la suma de la fuerza de las distintas olas, creando una fuerza tangencial elevada. La carga de fatiga consiste en la variación de la fuerza radial que puede afectar al eje o cojinete de la instalación. Los mayores problemas son la fricción en el cojinete o la rotura del eje. Finalmente, la vibración provoca una variación de la fuerza radial, pudiendo provocar desgaste y fisuras en la estructura de soporte.

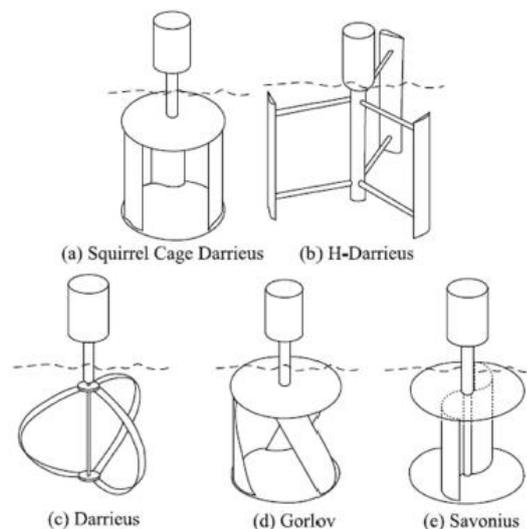


Figure 14: Tipos de configuración VATT

En la Figure 14, se presentan las principales configuraciones de VATT, en la que se pueden observar las diferencias y semejanzas que tienen. En el caso de turbinas, existe un límite natural a la eficiencia que es el coeficiente de Betz, siendo el máximo de 59%. Este límite depende de la velocidad del fluido a la que la turbina está sometida. En la Figure 15, se presenta el límite de Betz de los distintos tipos de turbina en función de la velocidad.

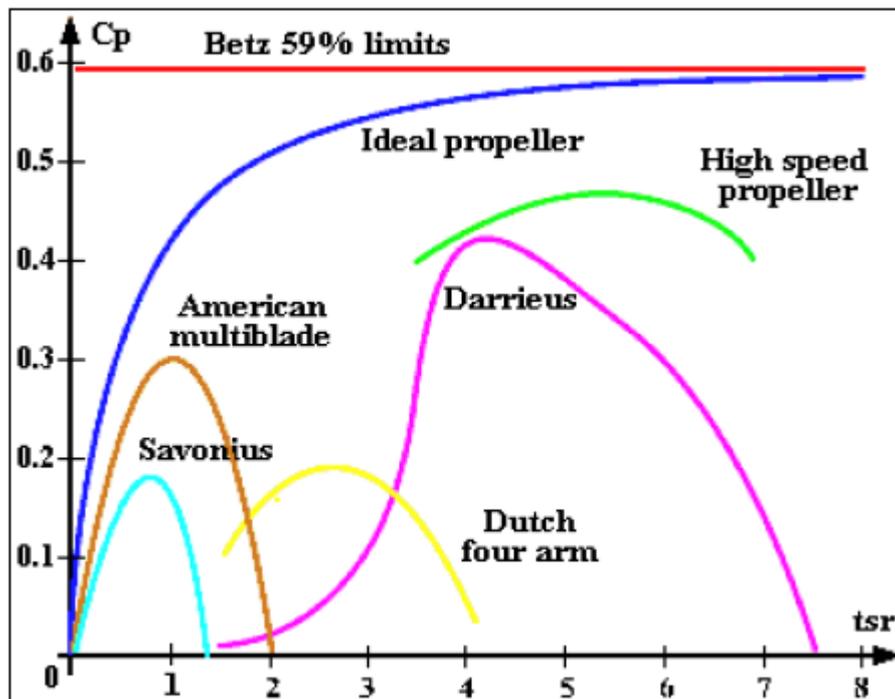


Figure 15: Límite de Betz en función de la velocidad del fluido

Como se podrá comprobar más adelante, la velocidad del flujo del agua en la ubicación elegida varía entre 1 y 3 m/s. Por ello, para el estudio se elegirá la turbina Savonius como la opción óptima.

- Turbina de eje horizontal o HATT

Este tipo de turbina está en una fase de desarrollo más avanzada, por lo que está más estudiada y sus características son más prometedoras. Un gran número de empresas como Marine Current Turbine, VerdantPower o OpenHydro han desarrollado varios tipos de esta turbina y la están testeando, para analizar su eficiencia en la práctica y en la teoría.

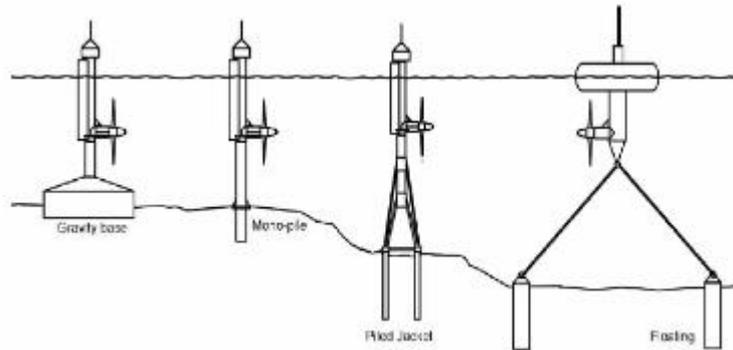


Figure 16: Esquema tipos de configuraciones HATT

Los tipos de configuraciones, como se pueden observar en la Figure 16 dependen de la ubicación en la que se encuentre la turbina. Sin embargo, la parte importante de la turbina, el rotor Blade, es idéntico en todas las configuraciones. Las principales ventajas de este tipo son:

- Mayor desarrollo. Este punto es indispensable ya que se han realizado numerosos ensayos y pruebas del desempeño de este tipo en distintos medios y distintas condiciones. Por ejemplo, se han planteado distintos casos extremos de oleaje, para comprender como reacciona.
- Mayor eficiencia. Una de las ventajas de la energía mareomotriz es que tiene mayor eficiencia que otras energías, ya que la densidad del agua es superior a la de otros medios. Por lo tanto, el aprovechamiento de esta densidad es uno de los objetivos de la turbina.

Las principales desventajas son:

- Alto flujo de marea. Aunque tenga mayor eficiencia que las turbinas VATT, esta se ve reflejada cuando el entorno tiene una velocidad o flujo de marea elevado, superior a 2 m/s. Sin embargo, esto podría suponer un problema en la costa española, ya que los flujos no suelen ser tan elevados.

- Mantenimiento. Como se puede observar en los tipos de configuraciones, en todas, el sistema va anclado al fondo marino. Esto supone un gran problema de mantenimiento y reparación, lo que aumentaría los costes de la instalación.
- Turbina Diagonal Mixta o Turbina Dériaz

Este tipo de turbina tiene como principal característica que es un híbrido entre una turbina Francis y una Kaplan, por lo que se beneficia de las mejores características de cada tipo de turbina. Esto implica que se puede usar en un gran rango de caudales y de altura. Por lo tanto, se podría utilizar en condiciones en las que el caudal y la altura no sean muy elevadas, ya que con pequeños saltos funciona. Además, esto permite que este tipo de turbina tenga una alta eficiencia en distintas condiciones.

La mayor desventaja o problema es el poco desarrollo a nivel comercial, ya que únicamente unas pocas empresas la están desarrollando. Una de ellas es la empresa austríaca Geppert, especializada en el diseño de turbinas. Las principales características que destacan son su alta eficiencia en un amplio rango de operaciones, su ahorro en costes, la insensibilidad a la cavitación y que es innovadora para un máximo de 5 MW de electricidad.

5.1.2 TECNOLOGÍAS UNDIMOTRICES

Para el proyecto de estudio, el autor ha llegado a la conclusión de que los dispositivos móviles articulados o WEC. Esta tecnología está compuesta por un sistema hidráulico que con el movimiento de las olas comprime el agua del sistema y activa un generador que produce energía. Hay distintas formas de poner en práctica esta tecnología, ya sea con boyas ancladas al fondo marino o atenuadores de superficie, que están interconectados perpendicularmente al flujo de las olas que llega.

El primer proyecto que se realizó con este sistema es el Pelamis WEC, que se puede observar en la Figure 17 y se puso en práctica en 2008 en Portugal. Aunque se lleve

desarrollando desde esa fecha, este tipo de tecnología se encuentra todavía en fase pre-comercial, aunque cada vez hay más países trabajando para convertir esta tecnología en una realidad. Al igual que todos los tipos de tecnología en fase de desarrollo, tiene ventajas y desafíos, que tendrán que ser analizados a la hora de elegir el tipo de tecnología.



Figure 17: Pelamis Wave Energy Converter

Las principales ventajas son:

- Eficiencia. Al contrario que otro tipo de tecnologías de energía undimotriz, este sistema tiene la capacidad de ajustar su posición y orientación, lo que permitiría una mayor adaptación a las condiciones del oleaje.
- Diseño. Este sistema podría ser desarrollado en plástico, lo que permitiría reducir los costes debidos a la corrosión.

Las principales desventajas son:

- Diseño. Aunque sea una ventaja, el diseño también presenta varias desventajas. El diseño es complejo y necesita de un proceso de sellado, para que el sistema no se vea afectado por el agua, esto aumentaría los gastos de producción.
- Vulnerabilidad. Debido al diseño y a su construcción, este sistema es vulnerable a condiciones extremas de oleaje y a daños por colisiones.

Con los dos tipos de tecnología ya elegidos, el siguiente paso es analizar la viabilidad de cada tipo de energía en las respectivas ubicaciones ideales. Este análisis será en primer

lugar, de la eficiencia de cada instalación y la potencia real que puede llegar a generar. En segundo lugar, se analizará el posible impacto ecológico que tendrá la instalación y sus ventajas y desventajas. Finalmente, se realizará un estudio económico y se verá si un proyecto de este calibre es viable hoy en día en España. Con todo el estudio ya terminado, se realizará en último lugar, una comparación entre las dos tecnologías y las diferentes energías ya comercializadas.

5.1.3 DECISIÓN FINAL

En el caso del proyecto de energía undimotriz, la única opción planteada ha sido la del Pelamis WEC, por lo tanto, esta será la opción que se estudiará. Sin embargo, en el caso de un proyecto de energía mareomotriz, se han planteado distintos tipos de turbinas que tienen numerosas ventajas y desventajas.

Con los distintos tipos de turbina ya planteados, el siguiente paso es analizar qué tipo de turbina se planteará para el proyecto. Como se verá en los siguientes apartados, en la costa española la velocidad de flujo de marea en la costa española no es lo suficientemente elevado para que sea eficiente una turbina de eje horizontal. Aunque sea la más desarrollada, ya que en otros países la velocidad de flujo es más elevada, en el caso de España, esta turbina queda descartada.

Finalmente, las dos opciones restantes tienen numerosas características que coinciden con las condiciones del entorno en la costa española. Aunque no estén muy desarrolladas, el potencial que tienen las convierte en las mejores opciones para este proyecto. Por lo tanto, en los siguientes apartados se estudiarán los dos tipos de turbina y se decidirá si las dos son opciones realistas a corto o largo plazo. Sin embargo, el estudio será más exhaustivo para la turbina VATT, debido a que existen mayores conocimientos y es más sencillo y realista plantear este tipo de turbina.

5.2 POTENCIA GENERADA

La potencia instalada es la máxima potencia que puede generar la instalación, en las condiciones de funcionamiento, mientras que la potencia generada o real, es la potencia que genera la instalación en un momento particular. Esta depende de las condiciones del mar durante el día. El objetivo de este apartado es determinar los elementos de la instalación, para que la potencia instalada sea la máxima posible, pero tampoco muy alejada de la potencia real. Esto tiene como objetivo, reducir el coste y conseguir la mayor eficiencia posible del sistema.

- Tidal Stream Generator

En un proyecto de energía de las olas, la fórmula de la potencia máxima o instalada es la mostrada en la Ecuación 2.

$$P_{obt} = \frac{1}{2} \rho A v^3$$

Ecuación 2: Potencia de la energía de las olas

La potencia obtenida (P_{obt}) se mide en kW, la densidad del agua (ρ) en kg/m^3 , el área de barrido (A) en m^2 y la velocidad del fluido en m/s. En el caso de la tecnología HATT el área de barrido se calcula como: $A = \pi R^2$, siendo R el radio de la turbina. Sin embargo, para la turbina elegida, el área de acción cambia.

En la Figure 18, se presenta el esquema de la turbina elegida. Para el cálculo del área de barrido de esta turbina se simplificará y se supondrá que son dos semicírculos, unidos en el extremo. Entonces el área será el de dos semicilindros huecos, lo que equivale al área externa de un cilindro. La fórmula se presenta en la Ecuación 3.

$$A = 2 \cdot \pi \cdot r \cdot h$$

Ecuación 3: Área externa de un semicilindro

Siendo r el radio de una aspa y h la altura de la turbina. La altura se fijará en 10 metros y se calcularán distintos radios, para determinar el área de acción final.

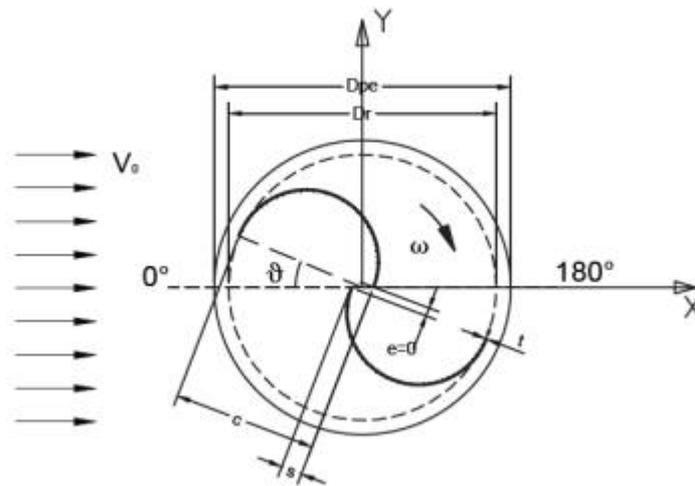


Figure 18: Esquema turbina Savonius

La velocidad de flujo del agua depende de la ubicación ideal, en el caso de España la zona con mayor media anual de flujo del agua se encuentra en Galicia, en la Costa da Morte. En esta zona, la velocidad de flujo suele ser de 1 a 3 m/s, dependiendo del momento del año. Esta zona tiene una mayor salinidad como ya se explicó anteriormente. Sin embargo, tiene una velocidad superior a la del resto de lugares idóneos. Por ello se planteará esta zona, y para determinar la potencia final, se plantearán distintos casos con la velocidad de flujo.

Finalmente, el último elemento por determinar es el de la densidad del agua de mar. Esta difiere de la del agua dulce, y los parámetros que influyen en esta variación son la temperatura y la salinidad del mar. En la Figure 19, se presenta la variación de la densidad del agua en función de estos dos parámetros.

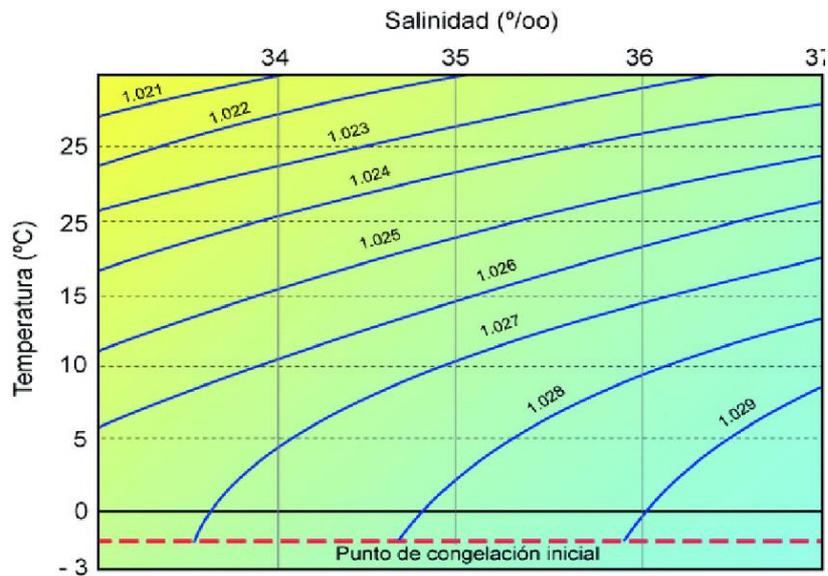


Figure 19: Variación de la densidad del agua (kg/m^3)

En la zona escogida, la temperatura suele ser 16-18 °C (Couto, 2020), por lo tanto, se escogerá 17°C como valor. Además, analizando la Figure 9: Mapa de salinidad de la superficie oceánica española, mostrada anteriormente, la salinidad es de 34,5 gramos por kilogramo. Con estos dos valores, el resultado final es que la densidad es de 1,025 kg/m^3 .

Con los valores del entorno ya determinados, el siguiente paso será determinar el tamaño del radio de la turbina, para que sea lo más eficiente posible en la ubicación determinada. Como se vio en el apartado anterior, las dos opciones son la turbina de eje vertical y la turbina diagonal mixta. En el caso de la primera, deberá tenerse en cuenta que la instalación estará en una zona con profundidades en torno a 20-30 metros, lo que limita el radio de la turbina. Para ello, se pondrá un máximo de 7 metros de radio, pero se planteará un rango mayor de radios y se comparará cual es el óptimo.

En la práctica esta potencia se ve reducida, debido a la eficiencia del sistema y a las condiciones variantes del oleaje. Para determinar un valor cercano a la realidad, se supondrá que la eficiencia del sistema es de 50-60%. Como ya se explicó anteriormente, la eficiencia teórica es del 64%, pero en la práctica es inferior. Por ello, se plantea un rango de eficiencia en el que podría operar la instalación.

En la **¡Error! No se encuentra el origen de la referencia.**, se presenta el valor teórico máximo de potencia generada, en función de los distintos valores del flujo de la ubicación ideal, de los distintos radios y de la eficiencia.

		Radio (m)			
		2,5	3	3,5	4
v (m/s)	1	40,3-48,3	48,3-58	56,4-67,4	64,4-77,3
	2	322,0-386,4	386,4-463,7	450,8-541,0	515,2-618,3
	3	1086,8-1304,2	1304,2-1565,0	1521,5-1825,8	1738,9-2086,6

Tabla 5: Potencia teórica generada por una turbina VAT (kW)

Estos valores representan una estimación de lo que podría generar, y aunque no sean exactos van a permitir realizar una primera comparación entre los sistemas para ver cuál sería mejor en el caso de que se cumplieran las condiciones descritas. Para conocer la verdadera capacidad de estos sistemas se deberían realizar simulaciones precisas, para su posterior estudio en la ubicación elegida.

- Wave Energy Converter

En el caso de un WEC, la potencia a estudiar es la de la energía cinética de las olas. Esta viene determinada por la fórmula indicada en la Ecuación 4.

$$P = \frac{\rho g^2}{64\pi} H_{mo}^2 T_e$$

Ecuación 4: Potencia de la energía cinética de las olas

La potencia resultante se mide en kW/m, siendo potencia por unidad de la cresta de la ola, H_{mo} representa la altura significativa de la ola, T_e el periodo de las olas, g la aceleración debida a la gravedad y ρ la densidad del agua.

Los WEC capturan esta energía y posteriormente la convierten en electricidad. Durante el proceso de captura y conversión, se pierde energía por lo que la potencia real depende de la eficiencia total del sistema. La fórmula genérica de la potencia para estos dispositivos se presenta en la Ecuación 5.

$$P = 0.5\rho g H_{mo}^2 A C_p$$

Ecuación 5: Potencia generada por un WEC

A es el área de captura del dispositivo y C_p es el coeficiente de conversión de energía o eficiencia total del sistema, que incluye la eficiencia del WEC y del sistema de conversión. El valor suele estar comprendido entre 0,1 y 0,5. Sin embargo, en el caso estudiado, el tipo de tecnología es el Pelamis WEC, que suele tener una eficiencia entre 0,3 y 0,4.

Al ser el Pelamis de tamaño fijo y habiéndose realizado distintos ensayos, en la Figure 20, se presenta el valor de potencia que generaría el dispositivo, en función del periodo de las olas en segundos y la altura de las olas en metros. Los ensayos se realizaron en el golfo de México, con el objetivo de analizar la eficiencia de este tipo de energía para suministrar eléctricamente a plataformas petroleras marítimas. Como se explica en el artículo: “Las plataformas petroleras marítimas con sistemas eléctricos independientes que utilizan turbinas de gas para generar su propia electricidad. Sin embargo, las turbinas de gas funcionan de manera muy ineficiente bajo las condiciones variables en alta mar, lo que aumenta los costos de combustible y las emisiones de contaminantes atmosféricos” (Haces-Fernandez, Li, & Ramirez, 2018).

TP (s)	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	20
	Hs: wave height (meter) Tp: wave peak period (second)																
Hs (m)																	
0.125	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
0.5	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
1	0	0	11	27	50	62	64	57	49	41	34	28	23	0	0	0	0
1.5	0	0	26	62	112	141	143	129	110	91	76	63	52	43	36	30	23
2	0	0	66	109	199	219	225	205	195	162	135	112	93	77	64	54	41
2.5	0	7	93	171	279	342	351	320	274	230	210	174	145	120	100	84	65
3	0	91	180	246	402	424	417	369	343	331	275	229	208	173	144	120	93
3.5	0	86	211	326	484	577	568	502	421	394	330	312	260	216	196	164	140
4	105	216	326	394	632	616	583	585	494	454	374	361	339	283	236	197	153
4.5	94	233	371	467	735	744	738	634	626	520	473	390	382	319	299	250	208
5	259	364	469	539	750	750	750	750	644	641	531	482	399	394	330	308	274
5.5	428	497	566	612	750	750	750	750	750	635	642	532	482	400	399	341	322
6	597	630	663	684	750	750	750	750	750	750	616	633	525	476	396	386	329
6.5	750	750	750	750	750	750	750	750	750	750	723	592	617	513	458	430	384
7	750	750	750	750	750	750	750	750	750	750	750	692	566	560	500	474	425
7.5	750	750	750	750	750	750	750	750	750	750	750	748	610	607	542	518	467
8	750	750	750	750	750	750	750	750	750	750	750	750	630	653	584	562	509
8.5	750	750	750	750	750	750	750	750	750	750	750	750	650	699	626	606	551
9	750	750	750	750	750	750	750	750	750	750	750	750	670	746	668	650	592
9.5	750	750	750	750	750	750	750	750	750	750	750	750	691	750	710	694	662
10	750	750	750	750	750	750	750	750	750	750	750	750	711	750	750	738	734

Figure 20: Potencia generada por un Pelamis WEC (kW)

Con el valor de potencia ya determinado en la Figure 20, y los valores de la altura de las mareas de la Tabla 1, solo quedaría por determinar el período de las mareas. Para ello, se determinará que el periodo de media varía entre 6 y 10 segundos en Zarautz. En la Tabla 6, se presentan los valores de potencia que generaría el Pelamis WEC en Zarautz, en función de la altura mínima, máxima, la media y la mediana del periodo calculado.

	Periodo(s)	6	7	8	9	10
Altura (m)	0,8	27	50	62	64	57
	2,7	171	279	342	351	320
	2,85	246	402	424	417	369
	4,5	467	735	744	738	634

Tabla 6: Potencia generada en Zarautz (kW)

Con la potencia ya limitada al rango de acción del sistema, en el análisis de resultados se compararán las potencias en todos los casos planteados, aunque se analizará con mayor precisión el valor medio de potencia generada.

5.3 ANÁLISIS ECONÓMICO

En este apartado, se analizarán los diferentes costes que tendrá cada tipo de proyecto y se comparará cuál de los dos tendrá menores costes. Al no tener datos muy precisos de las instalaciones, en muchos casos se harán suposiciones o simplificaciones de los factores que afectan al coste total de la instalación.

En primer lugar, se llevará a cabo un análisis de todos los componentes del proyecto que incurren en un coste, y cuáles son los distintos factores que pueden variar el coste de cada apartado o componente del sistema.

5.3.1 COSTE DEL CICLO DE VIDA

El Coste del Ciclo de Vida de estos sistemas permite determinar el coste total que tendrá la tecnología durante su vida útil. Esto significa que se consideran todos los gastos o costes desde la compra o construcción hasta la retirada o cambio del sistema. Para analizar los distintos factores se seguirá la Ecuación 6. (Sanz Fernández, 2003):

$$LCC = C_{ic} + C_{in} + C_e + C_o + C_m + C_s + C_{amb} + C_d$$

Ecuación 6: Coste del Ciclo de Vida

C_{ic} = *coste inicial, coste de compra (bomba, sistema, tubería, accesorio)*

C_{in} = *instalación y puesta en marcha*

C_e = *costes energéticos*

C_o = *costes de operación (coste del trabajo de supervisión normal del sistema)*

C_m = *coste de mantenimiento (piezas, horas de mano de obra)*

C_s = *tiempo de avería, pérdida de producción*

C_{amb} = *costes medioambientales*

$C_d = \text{retirada} - \text{cierre definitivo}$

- Coste inicial y coste de compra

Este es el primer factor a tener en cuenta, y en este se incluye el diseño del sistema con los análisis teóricos necesarios. Por ejemplo, un análisis sería la simulación de la instalación para conseguir su optimización. En el caso del Pelamis WEC, diversos grupos han realizado distintas pruebas. Esto implica que se podría reducir el tiempo de diseño e inspirarse en los proyectos existentes.

Además, en este apartado se tendrá en cuenta a su vez el coste de los materiales y de los posibles equipos auxiliares. El análisis del coste de materiales de la instalación se llevó a cabo en otro apartado, en el que solo se estudió la parte principal del sistema, y la que permitía varias opciones. Sin embargo, en estas instalaciones hay una mayor cantidad de materiales, como los de los elementos de anclaje.

Finalmente, el último coste para tener en cuenta serán los costes Admon, que incluyen toda la documentación, burocracia e inspecciones de la instalación.

- Coste de instalación y puesta en marcha

Con el trabajo ya realizado previamente, se han reducido en gran parte estos gastos, ya que, en ninguno de los casos de estudio, el sistema va anclado al fondo marino, por lo que no será necesaria la construcción de una base a la que pueda ir anclada el sistema.

Los gastos más importantes en este apartado serán el transporte del sistema al punto elegido y su posterior puesta en marcha. Además, se deberá instalar un cable sumergido que llegue a la costa y que transporte la energía generada al lugar donde se quiera aprovechar. Por ejemplo, si inicialmente el objetivo es proveer de energía a un faro cercano, el cable deberá llegar hasta ese punto y se deberá realizar un ajuste de la instalación energética del faro para que pueda aprovechar esta nueva fuente.

- Costes energéticos

En este apartado se verá el coste energético asociado al uso de la turbina o del sistema. En el proyecto, las tecnologías elegidas van a estar en funcionamiento la mayor parte del tiempo, ya que el objetivo es generar el máximo de energía. El problema con este tipo de energías es que las tecnologías no están muy desarrolladas, por lo tanto, deben estar en funcionamiento más tiempo para que sea viable su instalación

- Costes de operación

Para determinar los costes de operación se tendrá en cuenta el efecto del funcionamiento del sistema, esto incluye la supervisión del sistema, el sistema de limpieza, asistencia y las inspecciones pertinentes. En este caso será importante tener una planificación detallada y organizada que permita analizar si los sistemas están funcionando correctamente.

Una opción sería la de monitorizar la generación de energía, y analizando las condiciones del entorno, ver si está produciendo lo planificado. Los primeros meses de trabajo se tendría que observar el funcionamiento y ver la capacidad real que tiene de generación. Con la capacidad real conocida, se podrá estimar la generación diaria de energía, y comprobar si la tecnología está funcionando correctamente.

- Costes de mantenimiento

Estos costes ya se han introducido anteriormente, a la hora de elegir los materiales de la instalación. En primer lugar, habrá un mantenimiento rutinario, que se ha especificado en tres meses. Este tipo será visual, observando que la tecnología no esté sufriendo problemas de corrosión. Además, en el mantenimiento rutinario se incluirá un cambio anual de los ánodos de sacrificio, para permitir el buen funcionamiento de estos.

Asimismo, y estando relacionado con el siguiente coste, se tendrán en cuenta los posibles fallos inesperados y la recogida, envío e instalación de los elementos deteriorados. En el balance de presupuesto, será importante plantear los fallos de corrosión, pero también, los debidos a las condiciones extremas del oleaje que podría sufrir la tecnología.

- Costes de avería o pérdida de producción

Estos costes van relacionados con los fallos inesperados descritos anteriormente. Sin embargo, en este coste se considera la pérdida de producción del sistema, durante el tiempo en el que no esté en funcionamiento. A parte de la pérdida de producción, también se considerará como coste por avería los equipos de reserva, el alquiler o los repuestos estratégicos.

Esto implica que en épocas del año en las que la cantidad de energía disponible sea muy elevada, sería interesante el alquiler de otros dispositivos que reemplazasen la tecnología durante su reparación. Sin embargo, en otras épocas en las que el oleaje sea menor, no se plantearía esta opción ya que los gastos por el alquiler serían superiores al beneficio por la energía generada.

- Costes medioambientales

En este apartado, se deberá tener precaución con la eliminación por partes. Esto implica la vigilancia y el uso responsable de los materiales de construcción, la limpieza de la turbina o los distintos líquidos utilizados, como, por ejemplo, el uso de aceites o lubricantes. En estos costes se incluye también las posibles multas por el no cumplimiento de las normativas

Este proyecto tiene como objetivo reducir la emisión de gases de efecto invernadero, al ser un tipo de energía limpia. Sin embargo, este no es el único efecto que tiene en el medioambiente, instalaciones de este tipo tienen un gran impacto en el ecosistema de la zona en la que se instale. En el párrafo anterior se describió un tipo de problema inesperado que podría pasar, como es el que se vierta esos líquidos al mar.

Sin embargo, existen otros tipos de problemas que no son inesperados. Por ejemplo, en el caso de usar una turbina de eje vertical, diversos animales podrían colisionar o incluso morir por culpa de esta tecnología. Esto a largo plazo, podría resultar en un cambio en el tipo de fauna en esa zona.

- Costes de retirada o cierre definitivo

Este es el último coste para tener en cuenta, y en él se incluye la retirada de la instalación o el cambio por un nuevo modelo. Con la retirada de la tecnología, se deberá tener en cuenta la eliminación y el reciclaje de los materiales utilizados, que a su vez implica que se deberán usar vertederos, para su eliminación y así evitar multas medioambientales.

Con los distintos parámetros ya determinados, el siguiente paso será ver que coste tiene cada tipo de proyecto. En algunos de los parámetros, se presentarán resultados numéricos, sin embargo, en la mayoría se hará un análisis cualitativo, que permita entender el impacto que tendrá ese coste, con un orden de magnitud. En muchos casos, se hará un análisis conjunto entre distintos tipos de gasto.

5.3.2 ANÁLISIS DEL COSTE TOTAL DEL PROYECTO DE ENERGÍA UNDIMOTRIZ

- Coste inicial y coste de compra

Esta tecnología tiene la ventaja de que ya ha sido estudiada y puesta en fase pre-comercial, para analizar su eficiencia. Esto permite que existan ya dimensiones y la cantidad de materiales utilizados en el convertidor. El diseño base es de 750 kW de potencia instalada para un sistema de 120 metros de largo y 3,5 metros de diámetro. Aunque existan una gran cantidad de materiales en el sistema, como PVC, Nylon 6, Poliuretano o elementos electrónicos, se estudiará el impacto de los materiales más presentes. En la Tabla 7, se presentan los valores de los materiales en mayor cantidad con sus respectivos precios (Thomson, Chick, & Harrison, 2018).

Materiales	Masa (kg)	Precio (€)
Acero	561954	14.048.850,00 €
Arena	475722	16.650,27 €
Acero inoxidable	550	36.217,50 €

Tabla 7: Precio de materiales del Pelamis

Al ser un sistema ya diseñado de antes, no se utilizarán los ánodos de sacrificio como se planteó anteriormente. Como tipo de acero inoxidable, se usará la aleación de acero inoxidable 2507 Super Dúplex. “El precio de la arena por tonelada fluctúa entre 25 € y 45 € por tonelada entregada” (BricoHogar, 2021). Supondremos un precio de 35 € por tonelada. Como se puede observar el mayor gasto es el acero, por lo que el impacto del resto de materiales no es comparable con el del acero al carbono.

El resto de los costes asociados serían los de montaje, que en su mayoría consistirán en el salario de los empleados y en la infraestructura en la que se diseñe la tecnología. Estos costes no se pueden determinar de una manera detallada, ya que se desconoce el tiempo de construcción. Aunque se puede suponer que el coste final será de varios órdenes de magnitud inferior al del coste de materiales.

- Coste de instalación y puesta en marcha

La ventaja de este sistema es que, al funcionar con un sistema hidráulico dentro de la carcasa, no necesita de un montaje externo para su puesta en marcha. Por lo tanto, los costes para tener en cuenta son los del desplazamiento del dispositivo a la ubicación elegida y la conexión eléctrica entre el sistema y la costa. Esta conexión se realizará mediante un cable sumergido.

En el apartado del desplazamiento será importante tener en cuenta todos los distintos factores. Estos serán principalmente el transporte del dispositivo desde la fábrica hasta la costa y después hasta el punto elegido. En este transporte se incluyen los costes de personal y de combustible, necesarios para que la instalación se realice de una manera segura. Además, se deberá mediante anclas o una infraestructura más cara, mantener el dispositivo en una posición fija. Aunque esta deberá permitir el giro del dispositivo, para que pueda adaptarse a las condiciones cambiantes del oleaje.

Finalmente, el último gasto es el de la conexión entre la red eléctrica y el dispositivo offshore. Los factores a tener en cuenta para la elección del tipo y tamaño de los cables son la distancia, la capacidad de carga y la profundidad del agua. Todos estos factores afectan

al precio final de la instalación, y será necesario un estudio más detallado de las diferentes opciones existentes que cumpla con las especificaciones necesarias.

- Costes de operación y mantenimiento

Este será el coste mayoritario después de la instalación y será recurrente durante el ciclo de vida del dispositivo, supuestamente de 20 años. Se tendrán en cuenta diversos factores, como son el análisis de los datos para la mejora o la detección de problemas del dispositivo. Además, se realizarán revisiones visuales cada 3 meses con el objetivo de reducir los posibles costes por avería.

Aunque no se disponga de datos específicos, se puede estimar que los costes anuales de operación y mantenimiento en dispositivos de energía marina suelen variar entre 3.4 y 5.8% (Energías Renovables Marinas, 2019).

- Resto de costes

El resto de los costes en su mayoría no se pueden prevenir, ya que en muchos de los casos dependen del buen funcionamiento del sistema, como son los gastos por avería o por multas medioambientales. Sin embargo, en el presupuesto del proyecto se debe plantear que un porcentaje de la inversión vaya destinada a estos costes, ya que, en el caso de no plantearse, podría complicar su arreglo, debido a la futura necesidad de fondos para ese arreglo.

- Costes de retirada o cierre definitivo

Finalmente, al final del ciclo de vida, a los 20 años si no hay ninguna adversidad, el último coste es el de retirada o cierre. En este caso, los costes serán los del transporte hasta la costa, de reciclaje y eliminación de toda la infraestructura que pueda afectar al ecosistema. Además, se deberá tener en cuenta la conexión eléctrica y como se debe retirar o reutilizar en el caso de que se decida implementar otro proyecto en la misma ubicación.

Al desarrollarse cada año este tipo de energías, será interesante la opción de reutilizar el sistema eléctrico ya instalado, con el objetivo de ahorrar en costes futuros.

5.3.3 ANÁLISIS DEL COSTE TOTAL DEL PROYECTO DE ENERGÍA MAREOMOTRIZ

- Coste inicial y coste de compra

En este caso, no existen versiones de las que se pueda sacar la cantidad de materiales necesarias. Para ello, será necesario el cálculo del volumen de la turbina, para determinar la cantidad de cada tipo de material.

Como ya se demostró en el cálculo del área de barrido, considerando las simplificaciones pertinentes, el volumen final es similar al de dos semicilindros huecos, lo que equivale al volumen de un cilindro hueco entero. En la Ecuación 7, se muestra la fórmula para calcular este volumen.

$$V = \pi \cdot h \cdot (r^2 - r1^2)$$

Ecuación 7: Volumen cilindro hueco

La altura ya está definida, mientras que todavía queda el radio por definir, se van a plantear los cálculos con todos los radios planteados, y en el análisis de resultados se decidirá el radio final, después de analizar la relación entre potencia generada y coste total. Para determinar el valor del radio interno, se elegirá de espesor un 10% del radio externo

Con el volumen calculado, el siguiente paso será determinar el peso o masa de la turbina, para ello se calculará mediante la fórmula de la Ecuación 8.

$$m = V * \rho$$

Ecuación 8: Masa de la turbina

Siendo ρ la densidad del material elegido, que será acero al carbono. La densidad del acero al carbono es de 7,84 g/cm³. Con la cantidad de acero determinada, el siguiente paso será sacar la cantidad de zinc para los ánodos de sacrificio, para posteriormente determinar el precio de los materiales finales. En la Tabla 8, se presenta la cantidad de material necesaria en función del radio y el precio de cada material.

	Radio externo (m)			
	2,5	3	3,5	4
Cantidad acero (kg)	292482,276	421174,4775	573265,2611	748754,6267
Cantidad anodo (kg)	29248,2276	42117,44775	57326,52611	74875,46267
Precio Acero (€)	7.312.056,90 €	10.529.361,94 €	14.331.631,53 €	18.718.865,67 €
Precio Anodo (€)	1.724.183,02 €	2.482.823,54 €	3.379.398,71 €	4.413.908,52 €
Precio final (€)	9.036.239,92 €	13.012.185,48 €	17.711.030,24 €	23.132.774,19 €

Tabla 8: Precio materiales de la turbina VATT

Al igual que en el proyecto de energía undimotriz, el gasto principal será el de los materiales y faltarán otro tipo de materiales como son los de anclaje o los de la base del rotor que permiten que esté fijado al generador en la superficie. Este será un gasto extra, que se deberá plantear.

- Coste de instalación y puesta en marcha

Al igual que en el otro proyecto, la mayoría de los gastos serán en el desplazamiento del equipo y de la conexión eléctrica a la costa.

- Costes de operación y mantenimiento

En este apartado es en el que existe un mayor número de diferencias entre proyectos. En primer lugar, se mantendrán las revisiones periódicas visuales cada 3 meses. Estas serán indispensables para poder analizar el estado de los ánodos de sacrificio.

Los ánodos deberán ser cambiados cada año o cuando estén desgastados entre un 25 y un 50%. Esto aumentará el coste de mantenimiento por el valor del precio del ánodo de la Tabla 8. A largo plazo, la diferencia de precio entre una estructura construida con la aleación de acero inoxidable 2507 Super Dúplex o con acero al carbono, será prácticamente igual, incluso superior con ánodos de sacrificio. Sin embargo, el uso de ánodos permite reducir los costes por avería, debido a que el mantenimiento a los ánodos es mucho más sencillo y rápido que el mantenimiento a toda la turbina.0

- Resto de costes

Con la elección del tipo de materiales, se ha sido previsor en el caso de una avería por corrosión, lo que reduce en gran parte este apartado de costes. Aunque se deberá seguir dedicando una parte del presupuesto a posibles gastos imprevistos.

Asimismo, en este proyecto, se puede elegir un tamaño de radio distinto, lo que reduzca la inversión inicial. Esto es importante ya que, en un tipo de energía poco desarrollada, el crecimiento suele ser exponencial. Esto permitiría poder cambiar o mejorar la instalación, sin que la pérdida sea tan elevada.

- Costes de retirada o cierre definitivo

Al igual que en el otro tipo de proyecto, la elección de la ubicación es importante, para poder reutilizar la infraestructura utilizado en este proyecto, como son la conexión eléctrica y los anclajes al fondo marino. Además, el resto de los gastos son semejantes entre los dos proyectos.

Capítulo 6. ANÁLISIS DE RESULTADOS

El análisis de los resultados con sus correspondientes comparaciones será el último paso del trabajo. El objetivo será determinar cual de los dos proyectos es más viable actualmente, o cual tiene más posibilidades de desarrollo a largo plazo.

Los pasos para seguir serán, en primer lugar, una comparación entre los dos tipos de energía, analizando la relación entre potencia y costes, las posibles complicaciones y futuras mejoras, que puedan poner en riesgo el desarrollo hoy. En segundo lugar, se procederá a comparar con los principales tipos de energía en España. Finalmente, el último paso será observar las previsiones para este tipo de energías, con su posible precio a largo plazo.

6.1 COMPARACIÓN ENERGÉTICA

En este punto, se procederá a comparar y analizar los puntos descritos anteriormente. En primer lugar, se comparará la potencia generada media y el rango en el que se moverá la generación, durante la vida útil.

Para proceder con esta comparación, se tiene que elegir el radio de la turbina. El radio elegido será 2,5 metros debido al parecido de generación, y a que los costes son comparables entre los proyectos. Aunque esto se verá más adelante.

	Pelamis WEC	Turbina VATT
Mínimo	27	40,3
Máximo	744	1304,2
Media	171-320	322-386,4

Tabla 9: Comparación de potencia (kW)

En la Tabla 9, se pueden observar los resultados finales de la potencia generada. Como se puede observar, en el caso de la turbina VATT, en el menor de los radios

estudiados, sigue generando más potencia teóricamente que el Pelamis WEC. Esto suponiendo que la velocidad de flujo media es de 2 m/s. La generación media mínima de la turbina VATT es superior a la generación media máxima del Pelamis WEC.

El Pelamis WEC tiene como ventaja que ha sido más estudiado, y que los valores son más realistas. Sin embargo, en un primer análisis, se puede concluir que un proyecto de energía mareomotriz tiene mayor potencial de generación que uno de energía undimotriz. Esto teniendo en cuenta que únicamente se han estudiado dos tipos de tecnología en profundidad.

6.2 COMPARACIÓN ECONÓMICA

En este apartado, se analizarán los costes cuantitativos ya calculados anteriormente. Estos son los de la compra de materiales y los costes de mantenimiento. Además, con el resto de los costes se analizará cuál de los proyectos es más probable que tenga minimizados los gastos.

En la Tabla 10, se presentan los costos de compra de los materiales que se incluyen como gastos iniciales, además también se añaden los gastos de mantenimiento asociados a la compra de materiales.

	Pelamis WEC	Turbina VATT
Precio inicial	14.101.717,77 €	9.036.239,92 €
Mantenimiento anual	- €	1.724.183,02 €

Tabla 10: Comparación económica

Como se puede observar, el precio inicial del Pelamis WEC es 5 millones superior al de la turbina VATT, sin embargo, el tiempo de vida útil está estimado en 20 años. Por lo que el precio final de la compra de materiales será superior en la turbina VATT. A partir de los 5 años de vida útil, la suma del precio inicial y del mantenimiento de la turbina será superior que la del Pelamis.

Suponiendo que el proyecto dura 20 años en ambos casos, económicamente, será más viable el proyecto undimotriz. No obstante, este tipo de tecnologías tienen un amplio rango de desarrollo, por lo que en menos años que la vida útil, se podría plantear una nueva tecnología que mejorará los costes y la potencia generada. En ese caso, al ser el precio inicial menor en la turbina, las pérdidas serían inferiores. Además, que durante ese tiempo la potencia generada será superior en el proyecto mareomotriz. Por lo que, estará más amortizado que el proyecto undimotriz.

Otro punto interesante, es el de los costes por avería o pérdida de producción. En el caso del Pelamis, un problema grave afectaría a toda la estructura, obligando a una reparación importante. Esto aumentaría el coste en gran cantidad, ya que podría resultar en otra inversión inicial. Sin embargo, en el caso de la turbina, el mismo problema, tendría en primer lugar un impacto en los ánodos de sacrificio. El cambio de estos aumentaría el coste, pero no sería de la misma magnitud, ya que el cambio se realiza anualmente. Además, el tiempo de mantenimiento sería inferior ya que no habría que cambiar toda la estructura. En el caso de que la avería fuese en la estructura central de la turbina, el coste seguiría siendo inferior, ya que el coste inicial es menor.

Finalmente, al ser la mayoría de los costes de personal y operación, y como el mantenimiento se realizará en los mismos periodos de tiempo, se supondrá que son semejante. Además, a la hora de analizar la viabilidad de los proyectos, se deberán tener en cuenta otro tipo de gastos como pueden ser: licencias para usar la ubicación elegida, análisis del impacto medioambiental, etc.

6.3 IMPACTO MEDIOAMBIENTAL

El objetivo de estos proyectos es en primer lugar, la reducción de los gases de efecto invernadero. Este es el impacto principal, y el motivo por el cual se está buscando desarrollar cualquier tipo de energía renovable. Estas energías junto con el resto de renovables tienen como objetivo reemplazar a las fuentes de energía no renovables.

Sin embargo, existe una mayor cantidad de impactos medioambientales. Estos suelen ser en el entorno, en el que se diseñen, afectando a la fauna y flora del lugar en el que se ubique.

El primer impacto posible sería en la fauna de la zona, y es que estos proyectos pueden afectar a diversos seres vivos, como son las aves, pescados, mariscos, la ecología bentónica o mamíferos marinos. Los posibles efectos que podrían sufrir son:

- Alteración durante la instalación de la tecnología
- Ruido durante la instalación, mantenimiento y operación del sistema
- Riesgo de colisión
- Riesgo debido a la contaminación del agua
- Riesgo de contaminación accidental debido a fallos y colisiones
- Exclusión del hábitat

Estos son algunos de los impactos que tendría en la fauna. Una gran parte de ellos son riesgos, únicamente si ocurre alguna complicación en el sistema. Estos son los mayores riesgos existentes y los que tendrían peores consecuencias si ocurriesen.

En segundo lugar, existe también un impacto en el medioambiente humano, lo que implica cambios en la pesca comercial, navegación, calidad del agua, entre otros. Los posibles efectos podrían ser desplazamientos temporales o permanentes de los tradicionales puntos de pesca. Este cambio se podría deber a que se delimitase la zona cercana a la instalación para asegurar su buen funcionamiento, o porque el sistema desplazase a los animales de la zona. Otros efectos serían la reducción en la seguridad durante la navegación, debido al riesgo de colisión. Una opción para limitar este problema, que podría ser más grave en horario nocturno, sería indicar mediante una señal luminosa la ubicación de la tecnología.

Finalmente, el último impacto sería el visual, sobre todo en el proyecto undimotriz. El emplazamiento de estos proyectos ha sido elegido por las características de la zona. Sin embargo, estas zonas son puntos turísticos del país. Por lo tanto, podrían existir problemas si son muy visibles, ya que podrían reducir la belleza de estos lugares. Esto podría acabar en

una reducción del turismo en la zona, lo que sería una pérdida económica muy fuerte. La solución a esto sería elegir un punto dentro de la ubicación elegida, que no sea muy accesible para los turistas.

6.4 COMPARACIÓN CON OTRAS ENERGÍAS

Para esta comparación se realizará la comparación otro tipo de proyectos de energía renovable, como serían una turbina eólica o una placa solar. Se analizará la generación y el precio de esta.

6.4.1 ENERGÍA EÓLICA

En primer lugar, la energía eólica es la primera fuente de generación eléctrica en España, representando más de 20% del total de la demanda. Existen 21.500 aerogeneradores con un total de 28.139 MW de potencia acumulada (AEE). Esta fuente de energía está muy desarrollada y los costes son muy inferiores a los de las energías marinas, lo que hace que sea imposible competir en el momento actual.

El valor medio de cada aerogenerador es de 1.31 MW, lo que es casi el doble que en el Pelamis WEC. En el caso del proyecto mareomotriz, la potencia instalada con la turbina elegida sería similar o algo inferior al de las eólicas. Sin embargo, al estar más desarrollada, la generación real sería superior. Esto podría cambiar con el desarrollo de la tecnología, ya que la eficiencia de estas turbinas y la densidad del agua son superiores.

El siguiente paso es comparar el precio de la instalación. En general, el coste típico es de 1,3 millones de dólares por MW instalado, o lo que equivale a 1,2 millones de euros. Si usamos el valor medio calculado antes, el precio de instalar un aerogenerador es de 1,57 millones de euros. Aquí, se puede observar la mayor diferencia entre proyectos, siendo el valor 10 veces inferior que en el caso del Pelamis WEC y de 6 veces inferior que en el proyecto mareomotriz.

Asimismo, el precio de mantenimiento anual es de entorno 42.000\$ a 48.000\$, o 39.000€ a 44.500€. En ambos proyectos analizados, no se ha podido determinar el precio exacto de mantenimiento, sin embargo, se puede suponer que este será superior debido a que la ubicación es menos accesible y el entorno es más agresivo, en el caso de que las turbinas eólicas no sean offshore. Todo esto, sin considerar los cambios de ánodos de sacrificio, que aumentan el precio del proyecto mareomotriz.

En conclusión, actualmente no es posible comparar este tipo de energías, debido a que no están en el mismo grado de desarrollo. Con el potencial de las energías marinas, en un futuro, podrán ser comparables, sobre todo cuando el coste de estas nuevas instalaciones disminuya. Aunque esto solo ocurrirá con una mejora de las nuevas tecnologías.

6.4.2 ENERGÍA SOLAR

La siguiente comparación será con la energía solar, que representa un 8,05% del total de energía, estando instalados 15.190 MW. Lo más interesante con este tipo de energía, es su rápido crecimiento en los últimos años. Muchos son los factores que han permitido esta mejora, siendo los más importantes, el aumento de la eficiencia de las placas solares, y del autoconsumo.

En primer lugar, una de las mayores diferencias con los proyectos analizados, es la poca potencia instalada de cada placa, siendo las más comunes de 500W. Esto permite que sea un tipo de energía más versátil, ya que puede ser instalada en tejados. Además, en grandes instalaciones, se juntan una gran cantidad de placas, creando un parque de energía solar. El precio de este tipo de placa es de unos 300€, aunque este precio varía mucho entre los distintos proveedores.

Se comparará con los 750 kW del Pelamis WEC y el MW de la turbina eólica. Para conseguir estas potencias, se necesitan 1500 y 2000 paneles respectivamente, o lo que en euros sería 450.000 y 600.000 respectivamente. Además, los costes de mantenimiento son muy bajos. Los precios de esta energía son nuevamente inferiores a los de las energías marinas.

Capítulo 7. CONCLUSIONES Y TRABAJOS FUTUROS

7.1 DECISIONES FINALES

Actualmente, y como se ha podido comprobar, este tipo de energías no están muy desarrolladas. Solo existen unas pocas tecnologías que están en funcionamiento o están realizándose pruebas a escala. La mayor similitud entre ellas es que están en ubicaciones idóneas, como son el río Rance en Francia o Mutriku en España.

El objetivo de este proyecto era plantear proyectos de estas energías, pero que no necesitaran de una infraestructura dependiente de la ubicación, con el objetivo de reducir esta dependencia. Por ello se plantearon como opciones finales el Pelamis WEC y la central con una turbina VATT. Estos proyectos tienen la ventaja que se pueden diseñar en numerosas ubicaciones, siempre que estas cumplan una serie de requisitos mínimos. Lo que se pudo observar es que había una cantidad aceptable de proyectos y tecnologías en fase pre-comercial.

En el caso del Pelamis WEC, se ha demostrado que, aunque tuviese potencial para aprovechar la energía de las olas, el coste total es muy elevado, impidiendo una inversión elevada. Por ello, la empresa decidió parar las pruebas con este tipo de tecnología. La innovadora tecnología que tenía hizo al autor plantear esta opción. Actualmente, existen otro tipo de convertidores que se están estudiando, con el objetivo de generar al menos la misma cantidad.

Por lo tanto, la primera conclusión es que actualmente, un proyecto de energía undimotriz con convertidores de la energía de las olas no es planteable en España. Sin embargo, más adelante se verá que esta energía sigue teniendo un gran potencial, y que, con el estudio y análisis de modelos equivalentes, se puede conseguir un modelo que sea realmente óptimo.

Al contrario que en el caso del Pelamis, el proyecto de energía mareomotriz planteado no ha tenido ningún tipo de desarrollo ni análisis real. Esto quiere decir que los resultados descritos son simplemente una representación de un caso idóneo. Igualmente, este tipo de turbinas tienen un coste muy elevado comparado con otras energías, sobre todo por los gastos de mantenimiento asociados.

Asimismo, una empresa privada no realizará una inversión tan grande para desarrollar estas tecnologías actualmente. En muchos casos, preferirán esperar a que esté más avanzada y los riesgos de la inversión no sean tan elevados.

Finalmente, si el objetivo de España es reducir los gases de efecto invernadero, deberán aprovechar al máximo todos los tipos de energía existentes. Esto pasa por desarrollar las energías mareomotriz y undimotriz. Para ello, el gobierno español podría crear subvenciones para ayudar a crear proyectos de este tipo.

7.2 POTENCIAL

El potencial que tienen estas energías es lo que las convierte en verdaderamente atractivas, pese a sus numerosas desventajas actuales. Al igual que el resto de las energías, disminuirán las desventajas, si se realizan las suficientes investigaciones y posteriores mejoras. Como se puede observar en la Figure 21, en la proyección realizada (Global CCS Institute, 2013), el precio de los distintos tipos de kWh será similar. Esto implica que las energías mareomotriz y undimotriz tendrán un desarrollo importante, lo que reducirá los costes.

Estos resultados, aunque muestren que los precios sean similares, no implican que en 2050 vaya a haber el mismo número de proyectos por cada tipo de energía. Lo único que significa es que el coste por megavatio será el mismo entre energías, aunque la capacidad instalada sea diferente.

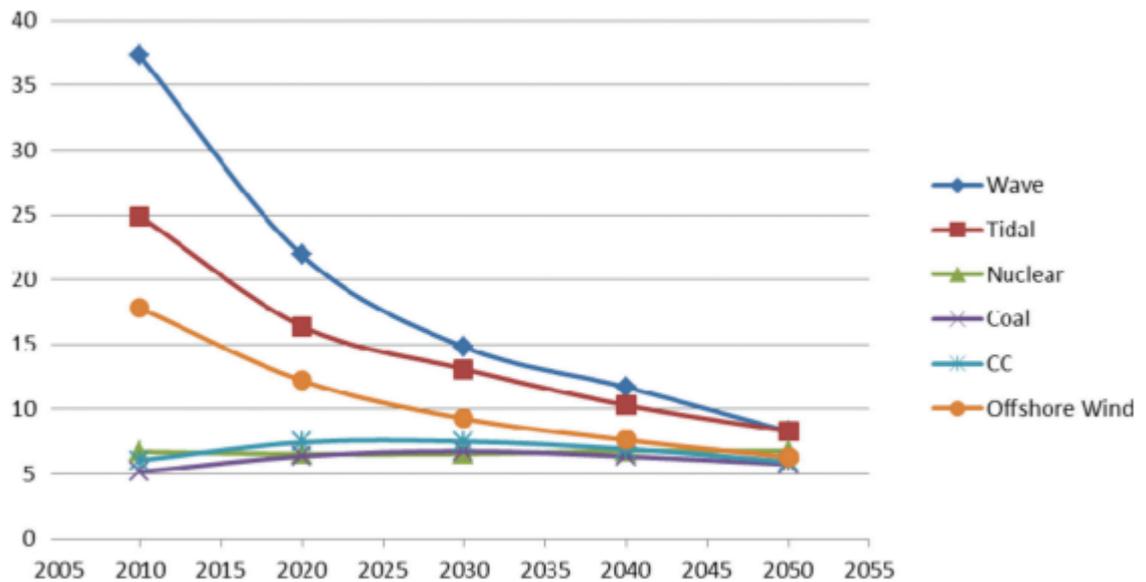


Figure 21: Proyección del precio de los principales tipos de energía (€/kWh)

Finalmente, esto únicamente es una proyección, con los datos actuales y lo que se espera que ocurra con cada tipo de energía. Sin embargo, pueden aparecer complicaciones o efectos adversos de estas tecnologías en el entorno, lo que provoque la suspensión de todos los proyectos.

7.3 TRABAJOS FUTUROS

El trabajo realizado ha sido prácticamente en su totalidad teórico, con el objetivo de entender y comprender estas energías y todo lo que conllevan. Las únicas decisiones que se han tomado, como son la elección de materiales o de tecnologías, han sido a juicio del autor, que con toda la información aprendida ha estimado que esas eran las mejores opciones para el proyecto. Siendo susceptible esto a fallos de interpretación. (Alternative Energy Tutorials)

Por lo tanto, existen numerosas opciones como trabajos futuros. Estas podrían ser, el desarrollo completo de una de las tecnologías. Por ejemplo, en el caso del proyecto de energía mareomotriz, un análisis detallado tendría que cubrir al menos los siguientes puntos:

- Planteamiento de los distintos tipos de turbina, con el análisis de la forma de las aspas y el rendimiento que tendrían
- Simulación teórica de las turbinas
- Análisis de la mecánica de fluidos a la que está sometida la turbina
- Análisis económico detallado, con todas las opciones descritas
- Opcional: simulación con un proyecto a escala

Aunque existan una mayor cantidad de opciones de análisis, estas serían alguna de las opciones que se deberían incluir si se quiere analizar con más detalle la viabilidad de estas energías.

Capítulo 8. BIBLIOGRAFÍA

- Adonay, M. P. (2016). PROTECCIÓN CATÓDICA: Ánodos de Sacrificio.
- AEE. (s.f.). *AEE Spanish Wind Energy Association*. Obtenido de La eólica en España:
<https://aeeolica.org/>
- Alaimo, A., Esposito, A., Milazzo, A., Orlando, C., & Trentacosti, F. (2013). Slotted Blades Savonius Wind Turbine Analysis by CFD. *MDPI energies*.
- Alternative Energy Tutorials*. (s.f.). Obtenido de Tidal Stream Generator:
<https://www.alternative-energy-tutorials.com/>
- Augusto Reyna Moreno, J. (2013). *El Océano Maravilla Terrestre*. Bogotá.
- Blewett, D. (20 de March de 2023). *Weather Guard Lightning Tech*. Obtenido de Wind Turbine Cost: How Much? Are They Worth It In 2023?:
<https://weatherguardwind.com/>
- Bracco, G. (2014). ISWEC: a Gyroscopic Wave Energy Converter.
- BricoHogar. (7 de Diciembre de 2021). Obtenido de <https://www.bricohogar.pro/>
- Castinox. (s.f.). Aceros inoxidables dúplex y súper dúplex.
- Couto, J. (4 de Agosto de 2020). ¿Dónde está el agua más fría de Galicia? Cuando bañarse en el mar es un desafío. *El Español*.
- Dalton, G. (s.f.). Ocean Energy – Wave and Tide.
- David, N. (24 de Febrero de 2023). *La central mareomotriz más grande de España*. Obtenido de Tecpa: <https://www.tecpa.es/>

- Drew, B., Plummer, A., & Sahinkaya, M. (2009). A review of wave energy converter technology.
- eléctrica, R. (s.f.). *Red eléctrica Una empresa de Redeia*. Obtenido de <https://www.ree.es/>
- Energías Renovables Marinas. (24 de Noviembre de 2019). Obtenido de <http://energiasrenovablesmarinas.blogspot.com/>
- FAR. (s.f.). *FAR*. Obtenido de Corrosión galvánica: <https://www.far.bo.it/>
- FIGMMG, R. d. (2004). PROTECCIÓN CATÓDICA-DISEÑO DE ÁNODOS DE SACRIFICIO. *Revista del Instituto de Investigación FIGMMG*, 37-44.
- Flores, J. (09 de Septiembre de 2022). *National geographic España*. Obtenido de España produce el triple de energía solar que hace 3 años: <https://www.nationalgeographic.com.es/>
- GEO enciclopedia. (10 de Enero de 2023). *Geo Enciclopedia*. Obtenido de Mareas: <https://www.geoenciclopedia.com/>
- Geppert. (s.f.). *Geppert: Turbina Diagonal*. Obtenido de <https://www.geppert.at/>
- Global CCS Institute. (2013). *Science for energy: JRC thematic report, JRC European Commission*.
- Haces-Fernandez, F., Li, H., & Ramirez, D. (2018). Assessment of the Potential of Energy Extracted from . *MDPI*.
- Holmberg, P., Andersson, M., Bolund, B., & Strandanger, K. (2011). Wave Power Surveillance study of the development. *Elforsk*.
- Itmguíacantabria. (s.f.). *Itm*. Obtenido de Molino de Jado.
- NASA Jet Propulsion Laboratory (JPL). (22 de Septiembre de 2011). *Aquarius Yields NASA's First Global Map of Ocean Salinity*. Obtenido de <https://www.jpl.nasa.gov/>

- Ouro, P., Dené, P., Patxi, G.-N., Tim, S., Kyojuda, Y., & Stansby, P. (2022). Power density capacity of tidal stream turbine arrays with horizontal. *Journal of Ocean Engineering and Marine Energy*, 203-218.
- Penalba, M., & Ringwood, J. V. (2016). *MDPI*. Obtenido de MDPI: Penalba, M., & Ringwood, J. V. (2016). A Review of Wave-to-Wire Models for Wave Energy Converters. *Energies*, 9(7), 506. <https://doi.org/10.3390/en9070506>
- Pico-Saltos, G., Pico-Saltos, R., & Mendoza, D. (2018). Turbinas Hidrocinéticas de Eje Vertical Helicoidal. *ROCA. Revista científico-educacional de la provincia Granma. Renewable Energy Magazine*. (09 de Enero de 2023). Obtenido de El EVE abre una convocatoria para recibir propuestas de desarrollo de turbinas de aire que se implantarán en la central undimotriz de Mutriku: <https://www.energias-renovables.com/>
- Rosario Francia, S. (2004). Protección Catódica- Diseño de Ánodos de Sacrificio. *Revista del Instituto de Investigación FIGMMG*, 37-44.
- SAE. (s.f.). *Meygen: SAE Renewables*. Obtenido de <https://saerenewables.com/>
- Samadi, M., Ghodsi Hassanabad, M., & Babak, M. (2021). Comparison of Horizontal and Vertical axis tidal turbine with a new design to the renewable energy production of marine currents. *International Journal of Coastal & Offshore Engineering*.
- Sanz Fernández, I. (2003). El coste de ciclo de vida en las bombas. *Anales de mecánica y electricidad*, 16-24.
- Satrio, D., Mukhtasor, M., Utama, A. P., & Ketut, I. (2016). Vertical Axis Tidal Current Turbine: Advantages and Challenges Review. *ResearchGate*.
- Swagelok. (s.f.). Simplificar la Selección de Materiales. *Swagelok*.

Tablas de mareas 2023 de España para la pesca. (s.f.). Obtenido de <https://tablademareas.com/es>

Thomson, R. C., Chick, J. P., & Harrison, G. P. (2018). An LCA of the Pelamis wave energy converter. *The International Journal of Life Cycle Assessment*.

ULMA. (01 de Junio de 2022). *Ulma Forge*. Obtenido de ¿CUÁNTOS TIPOS DE ACERO AL CARBONO EXISTEN?: <https://www.ulmaforge.com/>

Webmaster. (6 de Julio de 2012). *El Blog de la Energía Sostenible*. Obtenido de La central de energía mareomotriz de Rance, la segunda más grande del mundo: <https://www.blogenergiasostenible.com/>

ANEXO I: ALINEACIÓN CON LOS OBJETIVOS DE DESARROLLO SOSTENIBLE (ODS)

Con el objetivo de desarrollar un futuro próspero y equitativo, se han desarrollado los ODS, con la intención de reducir las desigualdades en el mundo como la pobreza. Sin embargo, alguno de estos objetivos está centrado en los efectos medioambientales y sanitarios de las prácticas humanas. Estos pueden ser, la reducción de los gases de efecto invernadero, o la mejora de la calidad de vida humana y animal.

En el proyecto realizado se trabajan y se estudian dos tipos de energía renovables, por lo que los objetivos que sean sobre sostenibilidad y energía limpia van a ser tratados en este trabajo. En la Figure 22, se presentan los 4 tipos de ODS implicados principalmente en el proyecto.



Figure 22: ODS del proyecto

En primer lugar, estas energías tienen el potencial de ser una nueva fuente de energía renovable, que prácticamente es inexistente en la generación mundial y nacional. Por ello, se trabaja en el ODS: Energía Asequible y No Contaminante. Al aumentar el número de opciones de suministro para la población, podría haber una reducción del precio de la energía. El resultado final sería una energía asequible para toda la población. Además, el aumento de energía renovables implica una aceleración en la transición hacia las energías renovables, lo que implica una reducción del uso de las energías no renovables.

En relación, con lo anterior, y con la reducción de los gases de efecto invernadero, se pueden desarrollar ciudades y comunidades sostenibles. Esto se está llevando a cabo con otro tipo de energías como la solar, usada por particulares en sus domicilios. En el caso de las energías marinas, las ciudades que se beneficiarían más serían las costeras, en particular las ciudades de las islas.

En segundo lugar, el desarrollo de estas energías tendría un impacto directo en el clima, siendo el principal la reducción de gases de efecto invernadero. El efecto de esta reducción sería una reducción en el calentamiento global, lo que mejoraría la calidad de vida de muchas especies terrestres. Un factor para tener en cuenta será que el uso de estas tecnologías no afecte en gran cantidad a las distintas especies marinas ya mencionadas anteriormente.

Finalmente, el desarrollo de cualquier tipo de energía renovable tiene como principal objetivo la acción por el clima, tan afectado por las prácticas humanas de los últimos siglos. Al ser un tipo de fuente con unas características tan prometedoras, su desarrollo es indispensable para conseguir todos estos objetivos en el menor tiempo posible.

ANEXO II: DIFERENCIA DE ALTURA DE MAREAS

DIARIA

En este anexo, se presentan las variaciones diarias de altura entre las mareas de los distintos lugares escogidos para los meses de junio, julio, agosto y septiembre del año 2023. Para determinar los valores, se han usado los datos de las predicciones de marea para esas fechas (Tablas de mareas 2023 de España para la pesca, s.f.). Además, se explicará el funcionamiento de las mareas, indicando las principales características de estas.

“Las mareas son aumentos y caídas del nivel del mar de acuerdo a la combinación de las fuerzas gravitacionales de la Luna y el Sol con respecto a la rotación de nuestro planeta. Sin embargo, es la Luna la protagonista de las mareas” (GEO enciclopedia, 2023).

Como se puede observar en las tablas, en la mayoría de los días, hay dos ciclos de marea, siendo a veces uno si la marea empieza un día, y acaba el siguiente día. Esto se debe a la existencia de dos fuerzas que afectan a los océanos y mareas, mientras la Tierra rota sobre su eje. Estas fuerzas son la fuerza gravitacional y la centrífuga.

	Junio		Julio		Agosto		Septiembre	
1	2,7	2,7	2,7	2,9	3,3	3,9	4,2	
2	2,9	3,1	2,9	3,3	3,6		4,3	4,5
3	3,2	3,4	3,3	3,6	3,9	4,2	4,1	4,2
4	3,4	3,6	3,5		3,9	3,9	3,6	3,6
5	3,4		3,6	3,8	3,5	3,5	3,1	2,9
6	3,6	3,5	3,7	3,8	3,1	3	2,5	2,2
7	3,3	3,4	3,5	3,6	2,6	2,4	1,9	1,6
8	3,1	3,1	3,2	3,2	2,1		1,5	
9	2,8	2,8	2,9	2,9	1,8	1,8	1,2	1,6
10	2,5	2,6	2,5	2,5	1,6	1,4	1,4	1,9
11	2,3		2,2		1,6	1,8	1,8	2,3
12	2,6	2,2	2,3	2,1	1,7	2	2,2	2,6
13	2,6	2,4	2,2	2,2	1,9	2,4	2,5	3
14	2,7	2,6	2,2	2,4	2,2	2,7	2,9	3,2
15	2,8	2,8	2,3	2,6	2,5	3	3,1	3,4
16	2,8	3	2,4	2,8	2,7	3,1	3,3	
17	2,9	3,1	2,5	2,9	2,9		3,3	3,4
18	2,8	3,1	2,6		3	3,1	3,2	3,2
19	2,7		2,8	3	3	3,1	3	3
20	2,8	2,9	2,8	2,9	3	3	2,7	2,6
21	2,6	2,7	2,7	2,8	2,8	2,8	2,4	2,2
22	2,4	2,5	2,6	2,7	2,5	2,4	2	1,8
23	2,2	2,3	2,4	2,5	2,2	2,1	1,6	1,5
24	2	2,1	2,2	2,2	1,9	1,8	1,6	
25	1,8	1,9	2	2	1,6	1,6	1,7	2,3
26	1,7	0,8	1,8	1,8	1,6		2,3	3,1
27	1,9	1,7	1,7		1,7	2,2	2,9	2,7
28	1,9	1,7	1,8	1,9	2,3	2,9	2,7	4,2
29	2,1	2,1	2	2,3	2,9	3,5	4	4,5
30	2,3	2,5	2,3	2,8	3,4	4,1	4,3	
31			2,9	3,4	3,9	4,5		

Tabla 11: Diferencia de alturas diaria en Zarautz

	Junio		Julio		Agosto		Septiembre	
1	2,5	2,6	2,5	2,8	3,2	3,8	4,1	
2	2,9	3	2,9	3,2	3,6		4,2	4,3
3	3,1	3,3	3,1	3,6	3,9	4,2	4	4
4	3,3	3,6	3,3		3,9	4,2	3,6	3,5
5	3,3		3,6	3,8	3,8	3,9	3	2,9
6	3,4	3,5	3,5	3,8	3,5	3,5	2,4	2,1
7	3,3	3,3	3,4	3,5	3	2,9	1,8	1,6
8	3	3	3,1	3,2	2,4	2,4	1,4	
9	2,7	2,8	2,8	2,8	2,1		1,2	1,6
10	2,5	2,4	2,5	2,5	1,8	1,8	1,4	1,9
11	2,3		2,2		1,6	1,8	1,8	2,4
12	2,6	2,1	2,2	2	1,7	2	2,1	2,6
13	2,6	2,3	2,2	2,2	1,9	2,4	2,5	3
14	2,6	2,6	2,2	2,4	2,2	2,7	2,8	3,2
15	2,8	2,8	2,3	2,6	2,5	2,9	3,1	3,4
16	2,8	3	2,4	2,8	2,7	3,1	3,1	
17	2,8	3,1	2,5	2,9	2,8		3,2	3,3
18	2,8	3,1	2,5		3	3,1	3,1	3,2
19	2,7		2,6	2,9	3	3,1	2,9	2,9
20	2,7	2,8	2,6	2,9	2,8	2,9	2,7	2,6
21	2,5	2,7	2,6	2,8	2,7	2,8	2,4	2,1
22	2,3	2,5	2,5	2,7	2,5	2,4	2	1,7
23	3,1	2,3	2,4	2,5	2,2	2,1	1,6	1,5
24	2	2	2,2	2,2	1,9	1,8	1,6	
25	1,8	1,9	2	1,9	1,6	1,5	1,7	2,3
26	1,6	1,7	1,8	1,8	1,6		2,2	2,9
27	1,6		1,7		1,7	2,1	2,9	3,6
28	1,8	1,7	1,8	1,8	2,1	2,8	3,5	4,2
29	2	2	1,9	2,2	2,7	3,5	3,9	4,4
30	2,3	2,4	2,6	2,7	3,3	4	4,2	
31			2,7	3,3	3,8	4,4		

Tabla 12: Diferencia de alturas diarias en Llanes

	Junio		Julio		Agosto		Septiembre	
1	2,5	2,5	2,5	2,8	3,1	3,7	4	
2	2,8	2,9	2,9	3,2	3,5		4	4,3
3	3,1	3,2	3,1	3,5	3,8	4	3,9	3,9
4	3,2	3,4	3,3		3,8	4	3,4	3,4
5	3,3		3,4	3,6	3,7	3,8	2,9	2,7
6	3,2	3,4	3,5	3,6	3,3	3,3	2,3	2,1
7	3,1	3,2	3,3	3,4	2,9	2,8	1,8	1,5
8	2,9	3	3	3,1	2,4	2,2	1,4	
9	2,6	2,6	2,7	2,7	1,9		1,2	1,5
10	2,3	2,4	2,4	2,3	1,8	1,6	1,4	1,8
11	2,2		2,2		1,6	1,8	1,7	2,2
12	2,4	2,1	2,2	2	1,6	2	2,1	2,6
13	2,4	2,2	2	2	1,9	2,3	2,5	2,8
14	2,6	2,5	2,1	2,3	2,1	2,6	2,7	3,1
15	2,6	2,7	2,2	2,5	2,3	2,8	2,9	3,2
16	2,8	2,8	2,3	2,7	2,5	3	3,1	
17	2,8	3	2,4	2,8	2,7		3,1	3,2
18	2,7	2,9	2,5		2,8	3	3,1	3
19	2,6		2,6	2,8	2,8	2,9	2,9	2,8
20	2,6	2,8	2,6	2,8	2,8	2,9	2,6	2,5
21	2,4	2,6	2,5	2,7	2,6	2,6	2,3	2,1
22	2,2	2,4	2,4	2,5	2,4	2,4	1,8	1,6
23	2	2,2	2,2	2,3	2,2	2	1,6	1,4
24	1,8	1,9	2	2,1	1,8	1,7	1,5	
25	1,8	1,8	1,9	1,9	1,6	1,5	1,5	2,2
26	1,6	1,7	1,7	1,7	1,6		2,1	2,9
27	1,6		1,7		1,7	2,1	2,8	3,5
28	1,8	1,6	1,7	1,8	2,1	2,7	3,4	4
29	2	2	1,9	2,2	2,7	3	3,8	4,3
30	2,2	2,3	2,3	2,6	3,2	4	4,1	
31			2,7	3,2	3,7	4,3		

Tabla 13: Diferencia de alturas diaria en Burela de Cabo

