



COMILLAS
UNIVERSIDAD PONTIFICIA

ICAI

MÁSTER EN INGENIERÍA INDUSTRIAL

TRABAJO FIN DE MÁSTER

DESARROLLO Y DIMENSIONAMIENTO DE UN DISPOSITIVO DE APROVECHAMIENTO DE LA ENERGÍA UNDIMOTRIZ PARA EL ABASTECIMIENTO ENERGÉTICO DE UNA POBLACIÓN COSTERA

Autor: Clara Castillo Arróspide

Director: María del Mar Cledera Castro

Madrid

Declaro, bajo mi responsabilidad, que el Proyecto presentado con el título
Desarrollo y dimensionamiento de un dispositivo de aprovechamiento de la energía
undimotriz para el abastecimiento energético de una población costera
en la ETS de Ingeniería - ICAI de la Universidad Pontificia Comillas en el
curso académico 2023/24 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.: Clara Castillo Arróspide

Fecha: 14 / 07 / 2024



Autorizada la entrega del proyecto

EL DIRECTOR DEL PROYECTO



Fdo.: María del Mar Cledera Castro

Fecha: 15 / 07 / 2024



MÁSTER EN INGENIERÍA INDUSTRIAL

TRABAJO FIN DE MÁSTER

DESARROLLO Y DIMENSIONAMIENTO DE UN DISPOSITIVO DE APROVECHAMIENTO DE LA ENERGÍA UNDIMOTRIZ PARA EL ABASTECIMIENTO ENERGÉTICO DE UNA POBLACIÓN COSTERA

Autor: Clara Castillo Arróspide

Director: María del Mar Cledera Castro

Madrid

Desarrollo y dimensionamiento de un dispositivo de aprovechamiento de la energía undimotriz para el abastecimiento energético de una población costera

Autor: Castillo Arróspide, Clara.

Director: Cledera Castro, María del Mar.

Entidad Colaboradora: ICAI - Universidad Pontificia Comillas

RESUMEN DEL PROYECTO

En este proyecto se ha desarrollado y dimensionado un dispositivo de aprovechamiento de energía undimotriz para el abastecimiento energético de una población costera en el norte de España. Se utilizó una columna de agua oscilante (OWC) para transformar la energía de las olas en electricidad. El objetivo es buscar una manera sostenible de generar energía.

Palabras clave: Energía undimotriz, Potencial undimotriz, OWC

1. Introducción

El cambio climático, la contaminación y la creciente demanda energética presentan grandes desafíos para el mundo actual. Actualmente, se utiliza los combustibles fósiles para generar energía y estos contribuyen a las emisiones de gases de efecto invernadero y al cambio climático. Es por este motivo, que las energías renovables surgen como una solución a estos problemas y por la necesidad de desarrollar fuentes de energía no contaminantes y sostenibles. Dentro de las energías renovables, las mas comunes son las solar y la eólica. Sin embargo, existe la energía undimotriz que presenta un gran potencial.

La energía undimotriz consiste en aprovechar el movimiento ondulatorio de las olas del mar para generar energía. Además, la superficie terrestre está formada por un 70% de océanos, lo que asegura que es una fuente inagotable y presenta un potencial muy elevado. Con el uso de esta energía se podría reducir la dependencia de combustibles fósiles.

En este proyecto se va a realizar el desarrollo y dimensionamiento de un dispositivo undimotriz para abastecer de energía a una población costera en Asturias.

2. Definición del proyecto

El proyecto tiene como objetivo principal desarrollar un dispositivo que aproveche la energía de las olas para generar electricidad, ofreciendo una solución sostenible y eficiente para el abastecimiento energético de una población costera. El Puerto de Tazones, en Asturias, fue seleccionado como emplazamiento debido a su potencial energético undimotriz y la existencia de un dique adecuado para la instalación del dispositivo.

3. Metodología

En primer lugar, se realizará un estudio de las energías renovables marinas. Dentro de estas energías, se incluyen la energía mareomotriz y la energía de gradiente salino, entre otras. Sin embargo, este estudio centrará en la energía undimotriz, es decir la energía

generada por las olas. Se analizarán los diferentes tipos de dispositivos disponibles actualmente, junto con sus ventajas y desventajas.

Una vez seleccionado el dispositivo adecuado según sus características, se procederá a estudiar el emplazamiento que cumpla con todas las condiciones necesarias. Para la elección del emplazamiento es fundamental que sea una de las zonas con mayor potencial para la energía undimotriz, lo cual se determina basándose en distintos parámetros de las olas como puede ser su altura significativa y el periodo.

Tras el análisis, se ha decidido que el emplazamiento sea Tazones en Asturias y se utilizará una columna de agua oscilante (OWC) con turbina de Wells. En estos sistemas OWC, hay una cámara de aire situada sobre el nivel del mar que permite el paso de las olas y una turbina ubicada en la parte superior de la cámara. El flujo de las olas produce un cambio del nivel de agua, generando una variación en la presión del aire dentro de la cámara. La turbina aprovecha esta variación de presión para generar energía, transformando así la fuerza de las olas en electricidad. Como se puede comprobar, la turbina tiene que poder generar energía independientemente del sentido del flujo, es por este motivo, que se selecciona la turbina de Wells.

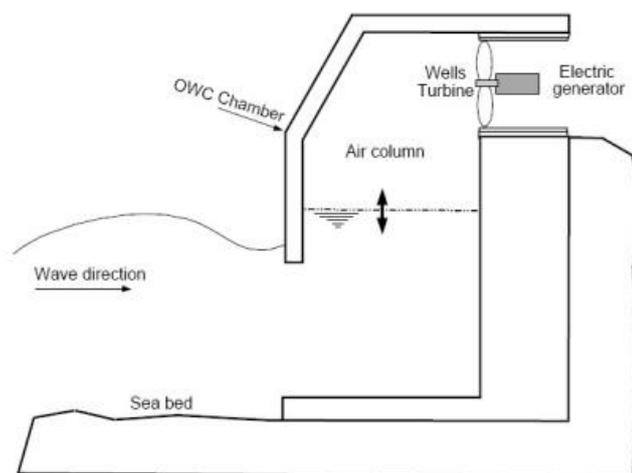


Ilustración 1. Principio de funcionamiento de OWC [1]

Con los datos de Puertos de Estado [2] sobre la altura y el periodo de las olas, se calcula el potencial energético undimotriz que existe en Tazones.

Finalmente, se procederá con los cálculos para el diseño de la turbina de Wells, teniendo en cuenta sus principales características de funcionamiento. En función del potencial energético undimotriz del emplazamiento seleccionado, se calculará la potencia generada por cada turbina, y por último se estimará la demanda energética que se puede cubrir.

4. Resultados

Se llevaron a cabo los cálculos del potencial undimotriz en el Puerto de Tazones utilizando los datos de las olas de los años más recientes (2022 y 2023) proporcionados

por Puertos del Estado. Los resultados muestran que la potencia varía en función de la estación del año, siendo el invierno la estación con mayor capacidad de generación. A continuación, se muestra el potencial undimotriz:

Estación	Altura oleaje (m)	Periodo (s)	Gravedad (m/s ²)	Densidad (kg/m ³)	Potencial (kW/m)
Invierno	2,20	8,40	9,81	1025	39989,24
Primavera	1,53	6,55	9,81	1025	14971,69
Verano	1,12	5,50	9,81	1025	6731,37
Otoño	1,90	7,48	9,81	1025	26356,16

Tabla 1. Potencial Undimotriz por estaciones

Con el potencial calculado, el siguiente paso fue diseñar la turbina de Wells. El diseño de la turbina se basó en los resultados obtenidos por Curran y Gato [3]. Se optó por un perfil simétrico NACA 0018, con 6 aspas y un diámetro de 1 metro. Una vez determinadas las dimensiones de la turbina y de la cámara, y conociendo el potencial undimotriz de cada estación, se calculó la potencia que podía generar cada turbina.

Periodo del año	Potencia Útil (kW)
Invierno	29,71
Primavera	19,92
Verano	12,96
Otoño	25,68

Tabla 2. Potencia útil según las condiciones reales de cada estación

5. Conclusiones

Después de analizar los resultados de la producción de energía de la central undimotriz, se confirma que el principal objetivo del proyecto se ha cumplido: suministrar electricidad al municipio de Tazones utilizando la energía de las olas del mar. Inicialmente, se pretendía satisfacer toda la demanda pública, incluyendo tanto el alumbrado como los edificios municipales. Sin embargo, considerando que la central funciona al 50% de su capacidad, debido a posibles problemas de mantenimiento, se ha logrado cubrir completamente el alumbrado público y parcialmente los edificios municipales.

Un análisis económico demuestra que, a pesar de la gran inversión inicial requerida por la central undimotriz, el capital invertido se recupera y se obtiene un valor actual neto positivo. El desarrollo y dimensionamiento del dispositivo undimotriz OWC en el Puerto de Tazones demuestra la viabilidad de aprovechar la energía de las olas para el suministro energético de una población costera.

Este proyecto no solo reduce las emisiones de gases de efecto invernadero y la contaminación, sino que también fomenta el uso de energías renovables, alineándose con los Objetivos de Desarrollo Sostenible (ODS) de la ONU. En concreto, contribuye a los objetivos de energía asequible y no contaminante, innovación e infraestructura, producción y consumo responsable y acción por el clima.

6. Referencias

- [1] Disponible en:
https://biblus.us.es/bibing/proyectos/abreproy/70175/fichero/1_CapituloI.pdf
- [2] Página Inicio | puertos.es. Disponible en: <https://www.puertos.es/es-es>
- [3] Santa A, Lozano M, Pinilla AE. Generación de energía eléctrica con turbinas wells. Revista de Ingeniería.

Development and sizing of a wave energy device for the energy supply of a coastal population

Author: Castillo Arróspide, Clara.

Supervisor: Cledera Castro, María del Mar.

Collaborating Entity: ICAI – Universidad Pontificia Comillas

ABSTRACT

In this project, a wave energy device has been developed and dimensioned for the energy supply of a coastal town in northern Spain. An oscillating water column (OWC) has been used to transform wave energy into electricity. The objective is to find a sustainable way to generate energy.

Keywords: Wave energy, Wave power, Wave potential, OWC

1. Introduction

Climate change, pollution and growing energy demand present major challenges for today's world. Currently, fossil fuels are used to generate energy and contribute to greenhouse gas emissions and climate change. For this reason, renewable energies are emerging as a solution to these problems and the need to develop non-polluting and sustainable energy sources. Among renewable energies, the most common are solar and wind. However, wave energy has great potential.

Wave energy consists of harnessing the wave motion of ocean waves to generate energy. In addition, 70% of the earth's surface is made up of oceans, which ensures that it is an inexhaustible source and has a very high potential. The use of this energy could reduce dependence on fossil fuels.

In this project the development and sizing of a wave power device to supply energy to a coastal population in Asturias will be carried out.

2. Project definition

The main objective of the project is to develop a device that harnesses wave energy to generate electricity, offering a sustainable and efficient solution for the energy supply of a coastal population. The Port of Tazones, in Asturias, was selected as the site due to its wave energy potential and the existence of a suitable dock for the installation of the device.

3. Methodology

First, a study of marine renewable energies will be carried out. Within these energies, tidal energy and saline gradient energy, among others, are included. However, this study will focus on wave energy, i.e. the energy generated by waves. The different types of devices currently available will be analyzed, along with their advantages and disadvantages.

Once the appropriate device has been selected according to its characteristics, we will proceed to study the site that meets all the necessary conditions. For the choice of the site, it is essential that it is one of the areas with the greatest potential for wave energy, which is determined based on different parameters of the waves such as their significant height and period.

After analysis, it has been decided that the location will be Tazones in Asturias and an oscillating water column (OWC) with a Wells turbine will be used. In these OWC systems, there is an air chamber located above sea level that allows the passage of waves and a turbine located at the top of the chamber. The flow of the waves produces a change in the water level, generating a variation in the air pressure inside the chamber. The turbine takes advantage of this pressure variation to generate energy, thus transforming the force of the waves into electricity. As can be seen, the turbine must be able to generate energy independently of the direction of flow, which is why the Wells turbine was selected.

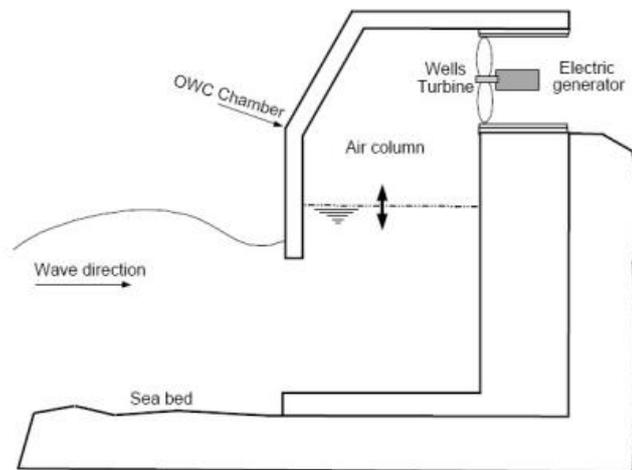


Ilustración 1. Operating Principle OWC [1]

With data from Puertos de Estado [2] on wave height and period, the wave energy potential in Tazones is calculated.

Finally, we will proceed with the calculations for the design of the Wells turbine, taking into account its main operating characteristics. Depending on the wave energy potential of the selected site, the power generated by each turbine will be calculated, and finally the energy demand that can be covered will be estimated

4. Results

Calculations of wave power potential in the Port of Tazones were carried out using wave data for the most recent years (2022 and 2023) provided by Puertos del Estado. The results show that the power varies according to the season of the year, being winter the season with the highest generation capacity. The wave potential is shown below:

Season	Wave height (m)	Period (s)	Gravity (m/s ²)	Density (kg/m ³)	Potential (kW/m)
Invierno	2,20	8,40	9,81	1025	39989,24
Primavera	1,53	6,55	9,81	1025	14971,69
Verano	1,12	5,50	9,81	1025	6731,37
Otoño	1,90	7,48	9,81	1025	26356,16

Tabla 1. Wave potential by season

With the potential calculated, the next step was to design the Wells turbine. The turbine design was based on the results obtained by Curran and Gato [3]. A symmetrical NACA 0018 airfoil was chosen, with 6 blades and a diameter of 1 meter. Once the dimensions of the turbine and the chamber were determined, and knowing the wave potential of each station, the power that could be generated by each turbine was calculated.

Season	Power (kW)
Invierno	29,71
Primavera	19,92
Verano	12,96
Otoño	25,68

Tabla 2. Power output according to the actual conditions

5. Conclusions

After analyzing the results of the wave power plant's energy production, it is confirmed that the main objective of the project has been achieved: to supply electricity to the municipality of Tazones using the energy of the sea waves. Initially, it was intended to satisfy all public demand, including both lighting and municipal buildings. However, considering that the plant is operating at 50% of its capacity, due to possible maintenance problems, it has been possible to completely cover the public lighting and partially cover the municipal buildings.

An economic analysis shows that, despite the large initial investment required for the wave power plant, the invested capital is recovered, and a positive net present value is obtained. The development and sizing of the OWC wave power device in the Port of Tazones demonstrates the feasibility of harnessing wave energy for the power supply of a coastal town.

This project not only reduces greenhouse gas emissions and pollution, but also promotes the use of renewable energy, aligning with the UN Sustainable Development Goals (SDGs). Specifically, it contributes to the goals of affordable and clean energy,

innovation and infrastructure, responsible production and consumption, and climate action.

6. References

- [1] Disponible en:
https://biblus.us.es/bibing/proyectos/abreproy/70175/fichero/1_CapituloI.pdf
- [2] Página Inicio | puertos.es. Disponible en: <https://www.puertos.es/es-es>
- [3] Santa A, Lozano M, Pinilla AE. Generación de energía eléctrica con turbinas wells. Revista de Ingeniería.

Índice de la memoria

Capítulo 1. Introducción	7
1.1 Introducción.....	7
1.2 Estado de la cuestión	8
1.3 Motivación	10
1.4 Objetivos	12
Capítulo 2. Descripción de las energías del mar	14
2.1 Energía de las corrientes.....	14
2.2 Energía de las mareas	15
2.3 Energía maremotérmica	16
2.4 Energía del gradiente salino	17
2.5 energía de las olas.....	18
Capítulo 3. Teoría de la energía undimotriz.....	19
3.1 Historia	19
3.2 Las olas.....	20
3.2.1 Parámetros de las olas	21
3.2.2 Tipos de olas.....	22
3.2.3 Olas de viento.....	22
3.3 Potencial Undimotriz.....	24
3.4 Clasificación Dispositivos	26
3.4.1 Según distancia.....	26
3.4.2 Según tamaño y orientación	29
3.4.3 Según principio captación.....	30
3.5 Ventajas y desventajas.....	34
3.5.1 Desventajas.....	35
3.5.2 Ventajas.....	35
Capítulo 4. Dispositivo y Emplazamiento	37
4.1 Tecnología.....	37
4.1.1 Justificación.....	37
4.1.2 Dispositivos OWC en España.....	37

4.2 Emplazamiento.....	38
Capítulo 5. Cálculos	41
5.1 Potencial undimotriz.....	41
5.2 Demanda energética	46
5.3 Puerto	48
Capítulo 6. Turbina Wells	50
6.1 Introducción.....	50
6.2 Notación	52
6.3 Principio de funcionamiento	53
6.3.1 Estudio aerodinámico.....	53
6.3.2 Análisis dimensional.....	56
6.3.3 Diseño de la turbina.....	58
6.3.4 Resumen de las medidas.....	66
6.3.5 Demanda cubierta	67
Capítulo 7. Objetivos de Desarrollo Sostenible	69
Capítulo 8. Análisis del Impacto y Financiero	71
8.1 Análisis de impacto	71
8.1.1 Impacto medio ambiente.....	71
8.1.2 Impacto social	73
8.1.3 Impacto financiero.....	74
8.1.4 Efectos positivos.....	83
8.1.5 Medidas correctoras.....	83
Capítulo 9. Análisis de Resultados y Conclusiones	85
Capítulo 10. Bibliografía.....	88
10.1 Capítulo 1	88
10.2 Capítulo 2	88
10.3 Capítulo 3	89
10.4 Capítulo 4	90
10.5 Capítulo 5	90
10.6 Capítulo 6	91

10.7 Capítulo 7	91
10.8 Capítulo 8	92

ANEXO I 93

Índice de ilustraciones

Ilustración 1. Potencia instalada en España según APPA [3].....	9
Ilustración 2. Funcionamiento de Columna de Agua Oscilante [4]	10
Ilustración 3. Instalaciones para el aprovechamiento de la energía de las corrientes [3]....	15
Ilustración 4. Funcionamiento energía mareomotriz [4]	15
Ilustración 5. Esquema conceptual de una planta de energía maremotérmica [5]	17
Ilustración 6. Funcionamiento de una planta de energía de gradiente salino [6]	17
Ilustración 7. Máquina Marmotor inventada por José Barrufet [1].....	20
Ilustración 8. Parámetros de una ola [3]	21
Ilustración 9. Olas generadas por la acción del viento [4].....	23
Ilustración 10. Esquema energía de las olas [5]	24
Ilustración 12. Distribución del potencial undimotriz en el mundo [7].....	25
Ilustración 13. Distribución del potencial undimotriz en Europa [7]	26
Ilustración 14. Dispositivos según distancia a la costa [8]	26
Ilustración 15. Dispositivo onshore [8]	27
Ilustración 16. Dispositivo nearshore [8]	28
Ilustración 17. Dispositivos offshore [8]	28
Ilustración 18. Dispositivos según su orientación y tamaño [9].....	29
Ilustración 19. Dispositivos en función del principio de captación [10].....	30
Ilustración 20. Principio de funcionamiento de OWC [7].....	32
Ilustración 21. Principio de funcionamiento efecto Arquímedes [7].....	33
Ilustración 22. Dispositivo cuerpo flotante: Pelamis [11]	34
Ilustración 23. Central undimotriz de Mutriku [2]	38
Ilustración 24. Mapa de Áreas Marinas Protegidas de España [3].....	39
Ilustración 25. Media 2022/2023 de la altura significativa de la ola en metros	42
Ilustración 26. Media 2022/2023 del periodo medio de la ola en segundos	42
Ilustración 27. Potencial Undimotriz en función de los meses de 2022 y 2023.....	45
Ilustración 28. Potencial undimotriz por estaciones.....	46
Ilustración 29. Disposición de turbina de Wells y columna de agua oscilante [1].....	51

Ilustración 30. Esquema de una turbina de Wells [1].....	51
Ilustración 31. Diagrama de velocidades ideal y real en la turbina Wells [2].....	53
Ilustración 32. Relación de ángulos [2]	54
Ilustración 33. Diagrama de fuerzas y velocidades sobre el perfil [2]	54
Ilustración 34. Relación sustentación/arrastre en función del número de Reynolds [3]	57
Ilustración 35. C_l Vs Reynolds para ángulo de ataque $6,36^\circ$	62
Ilustración 36. C_d Vs Reynolds para ángulo de ataque $6,36^\circ$	62
Ilustración 37. Potencia útil media y por estaciones	65
Ilustración 38. Precio medio del 2023 de venta de la electricidad según el OMIE [6]	76
Ilustración 39. Amortización en función del tipo de elemento. BOE [7].....	78
Ilustración 40. Diagrama de flujos de caja	79
Ilustración 41. Recuperación de la inversión.....	81
Ilustración 42. VAN en función de la tasa de descuento.....	82

Índice de tablas

Tabla 1. Potencial Undimotriz en función de los meses de 2022 y 2023.....	44
Tabla 2. Potencial Undimotriz por estaciones	45
Tabla 3. Alumbrado en función del número de habitantes. IDAE [3]	47
Tabla 4. Dimensiones perfil NACA 0015 [4].....	58
Tabla 5. Resultados obtenidos por Curran y Gato en el punto máximo de eficiencia [4]...	58
Tabla 6. Datos de la turbina.....	59
Tabla 7. Resultados obtenidos con los números adimensionales y los datos de la turbina.	59
Tabla 8. Resultado del triángulo de velocidades	60
Tabla 9. Resultado del número de Reynolds y el ángulo de ataque	61
Tabla 10. Coeficientes de sustentación y arrastre para ángulo de ataque 6,36° en función del Reynolds [5]	61
Tabla 11. Parámetros de la cámara y la turbina.....	63
Tabla 12. Velocidad de entrada del flujo en función de las estaciones	64
Tabla 13. Resultados en función de las estaciones	64
Tabla 14. Resultado en función de las estaciones	64
Tabla 15. Resultado en función de las estaciones	65
Tabla 16. Potencia útil según las condiciones reales de cada estación.....	65
Tabla 17. Medidas de la turbina Wells	66
Tabla 18. Medidas de la cámara	67
Tabla 19. Flujos de caja.....	80

Capítulo 1. INTRODUCCIÓN

1.1 INTRODUCCIÓN

El mundo actual en el que vivimos, está caracterizado por la creciente demanda energética, el cambio climático y los gases contaminantes. Por tanto, surge la necesidad de encontrar otras fuentes de energía más sostenibles y que sean renovables. Estas energías presentan un potencial significativo para reducir los desafíos y problemáticas asociadas al cambio climático y al uso desmesurado de combustibles fósiles que generan gases contaminantes.

En el ámbito de las energías renovables, se está empezando a desarrollar y presenta una gran oportunidad la energía undimotriz. Esta energía tiene la capacidad de aprovechar la energía de las olas para generar electricidad y poder abastecer a una zona costera. A pesar de que este tipo de energía no esté muy desarrollada y expandida, presenta un gran potencial debido a que es un recurso inagotable del que se puede extraer electricidad. Además, el 70% del mundo está formado por océanos, que permanecen en continuo movimiento gracias a la fuerza del viento y las mareas y no cesan de transportar energía. En Europa, toda la fachada atlántica tiene un buen recurso, mejor cuanto más al norte nos encontremos. En España la mejor zona es la costa noroeste, seguida de la cantábrica, el Golfo de Cádiz y la zona norte de las Islas Canarias. En la costa mediterránea, el recurso se reduce de manera importante, pero también está presente. [4]

El objetivo del proyecto es el diseño de un dispositivo de aprovechamiento del movimiento de las olas, es decir, de la energía undimotriz para abastecer una población costera. El emplazamiento escogido ha sido un pueblo del norte de España situado en Asturias, debido a su potencial energético. Asturias cuenta con un oleaje considerable lo que facilita el aprovechamiento de la energía de las olas. Además, el presidente nacional de la sección marina de la Asociación de Productores de Energías Renovables (APA) ha anunciado que Asturias tiene un gran potencial para poder captar energía undimotriz [5]

El proyecto se va a desarrollar con un dispositivo llamado columna de agua oscilante. Este dispositivo genera electricidad en dos pasos distintos. Primero la entrada de una ola fuerza el aire a través de una turbina, aumentando la presión, y luego al retirarse la ola, el aire vuelve a pasar por la turbina, aprovechando la disminución de la presión para generar electricidad de manera constante.

1.2 ESTADO DE LA CUESTIÓN

Como se ha comentado anteriormente, es necesario adoptar soluciones para frenar el cambio climático, el uso de combustibles fósiles y la creciente demanda energética. Por tanto, una de las soluciones que mejor se adaptan al problema, son las energías renovables, ya que estas son inagotables además de no ser contaminantes.

En cuanto a las energías renovables, existe una gran variedad. Se pueden clasificar en función de su fuente de origen, en la forma de conversión de energía o en función del grado de implementación que exista actualmente. Sin embargo, todas ellas presentan una gran solución al problema presentado y ya están siendo utilizadas en todo el mundo. En España, durante el año 2022, las tecnologías renovables generaron el 42,2% de la electricidad en España. Siendo la mayor parte proveniente de la eólica, seguido de ciclos combinados y de la energía hidráulica. [6]

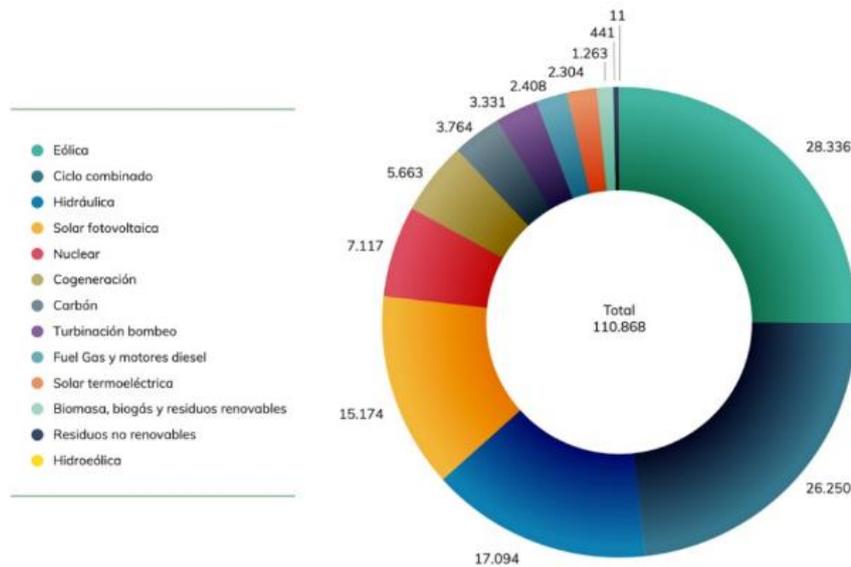


Ilustración 1. Potencia instalada en España según APPA [6]

Este proyecto se va a centrar en la energía undimotriz, una energía renovable actualmente en investigación y desarrollo. Como se puede ver en el gráfico anterior, la energía undimotriz no es la más utilizada, sin embargo, es una energía que se puede investigar y puede llegar a presentar un gran potencial. La energía undimotriz es la energía que aprovecha el movimiento de las olas. Como se ha mencionado, no es la energía más utilizada, pero puede llegar a ser muy beneficioso investigar acerca de ella debido a la abundancia, continuidad, potencial de generación, bajo impacto ambiental y desarrollo tecnológico. Las olas son una fuente continua y abundante de energía ya que son impulsadas por el viento y por tanto ofrecen constancia en su generación a diferencia de las energías renovables intermitentes como la solar. Además, tiene un impacto ambiental menor en comparación con otras energías y con el avance tecnológico se están desarrollando nuevos dispositivos que puedan aprovechar la energía de las olas más eficiente.

Actualmente, existen muchos dispositivos diferentes para poder extraer la energía proveniente de las olas. Entre ellos destacan, los aerogeneradores de onda, las columnas de agua oscilante, los dispositivos de caudal oscilante, las bombas de presión o los dispositivos de flotación punto a punto. En este proyecto se opta por utilizar las columnas de agua oscilante (OWC). El mecanismo principal de OWC es aprovechar el movimiento ascendente

y descendente del nivel de agua causado por las olas. Las olas entran en una columna cerrada y fuerzan el aire de dentro creando cambios de presión. Estos cambios de presión se utilizan para activar una turbina conectada a un generador eléctrico.

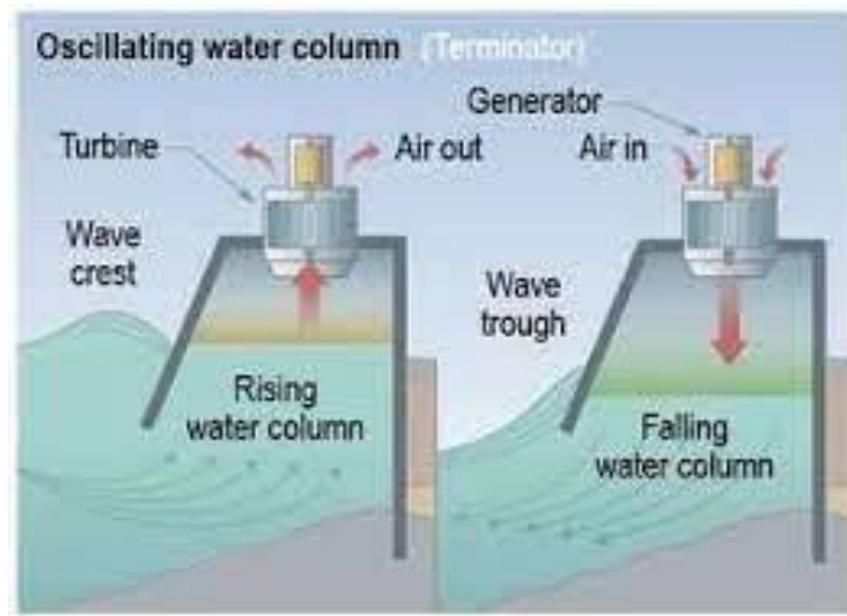


Ilustración 2. Funcionamiento de Columna de Agua Oscilante [7]

1.3 MOTIVACIÓN

Como se ha comentado anteriormente, el uso de la energía y de los combustibles fósiles es uno de los problemas principales en cuanto a la contaminación ambiental. Sin embargo, también conlleva otras consecuencias mucho más graves para la salud como pueden ser problemas respiratorios.

Según los resultados de un informe de la Organización Mundial de la Salud (OMS), la contaminación se ha convertido en una de las principales causas de la muerte prematura. Las últimas cifras publicadas por la OMS indican 4,2 millones de muertes prematuras, un 37% han sido relacionadas con problemas cardíacos y cerebrales y el 52% del 63% restante corresponden en afecciones respiratorias. Además, a pesar de llevar trabajando en combatir

la contaminación desde hace años, la contaminación sigue siendo, desde 2013, uno de los factores cancerígenos. [8]

Por otro lado, concretamente en España, según la Agencia Europea de Medio Ambiente (AEMA), en 2020 se produjeron 17.000 muertes prematuras debido a la exposición a partículas moleculares finas, 4.800 debidas a NO_2 y 2.400 debidas a O_3 .

Entre los sectores más contaminantes, encontramos las fuentes de energía primaria no renovable. Dentro de estas, las más contaminantes son el petróleo, el carbón y el gas natural., debido a las elevadas cantidades de dióxido de carbono que emiten. Además de las emisiones de CO_2 y gases de efecto invernadero, estas fuentes de energía también contribuyen a la contaminación troposférica. Esta contaminación afecta directamente a la calidad del aire en nuestras comunidades y puede causar graves problemas de salud pública. El consumo de estas energías resulta anualmente, en la emisión de miles de toneladas de gases de efecto invernadero, lo cual tiene un grave impacto ambiental.

Concretamente, el carbón contribuye con un 44% de las emisiones de CO_2 , mientras que el uso del petróleo representa aproximadamente un tercio del total a nivel mundial, y alrededor de la mitad en los Estados Unidos. Aunque el gas natural se considera más limpio en comparación con estas fuentes, aún emite una quinta parte de estas emisiones [9].

Por estos motivos, surge la necesidad de hacer uso de las fuentes de energía renovable, recursos limpios e inagotables que se oponen al cambio climático. A pesar de que las energías más utilizadas son la eólica (19,2%) e hidráulica (14,1%) [7], la energía undimotriz en España tiene un gran potencial ya que la mayor parte de nuestro país está rodeado por mar.

La motivación principal de este proyecto es el compromiso con el medio ambiente para combatir los desafíos que actualmente presenta el mundo desarrollando una de las tecnologías menos desarrolladas, pero con mayor potencial en nuestro país.

1.4 OBJETIVOS

El objetivo principal de este proyecto es, como su título indica, el desarrollo y dimensionamiento de un dispositivo de aprovechamiento de la energía undimotriz para el abastecimiento energético de una población costera. Se ha optado por desarrollar columnas de agua oscilantes por su capacidad para generar electricidad de manera eficiente y sostenible. Este dispositivo se diseñará para cumplir con todos los requisitos técnicos y las expectativas del proyecto, garantizando su viabilidad económica y operativa a largo plazo. La selección de este dispositivo se basa en su potencial para convertir energía de manera constante.

Otro de los objetivos principales y una de las razones por las que ha surgido la motivación y necesidad del proyecto es la reducción de la contaminación, la disminución de la dependencia de los combustibles fósiles y la mitigación del cambio climático. El sistema que se va a implantar en el proyecto está diseñado para reducir estos niveles de contaminación atmosférica tan elevados y por tanto conseguir una alternativa sostenible para la generación de energía.

Por último, este proyecto no solo busca abordar el problema de la contaminación o la demanda energética de una población costera, sino que también pretende contribuir y fomentar el desarrollo y la investigación en el campo de la energía undimotriz. La inversión en investigación y desarrollo es fundamental para poder mejorar la eficiencia de estas tecnologías y a su vez reducir los costes asociados. La intención es implantar un modelo viable para que pueda ser replicado en otras localidades y así aumentar el impacto positivo del proyecto.

Además, en el Capítulo 7 de este proyecto se abordará la relación del trabajo con los Objetivos de Desarrollo Sostenible (ODS) de la ONU. En particular, se analizará como la implementación de tecnologías OWC de energía undimotriz puede ayudar a los siguientes objetivos:

- Objetivo 7: energía asequible y no contaminante

- Objetivo 9: industria, innovación e infraestructura
- Objetivo 12: producción y consumos responsables
- Objetivo 13: acción por el clima

Capítulo 2. DESCRIPCIÓN DE LAS ENERGÍAS DEL

MAR

Las energías del mar hacen referencia al aprovechamiento de la energía contenida en los océanos mediante distintas tecnologías. Gracias al uso de las tecnologías, se puede transformar la energía cinética, térmica, etc. en energía eléctrica y conseguir alternativas renovables y energías más limpias con el medio ambiente.

Además, el 70% del planeta está ocupado por agua así que la mayoría de los países del mundo disponen de costas para empezar a aprovechar el agua de los mares para poder obtener energía. [1] Por lo que las energías del mar pueden tener un gran potencial.

Como se ha mencionado anteriormente, existen distintas tecnologías diferentes, en función del aprovechamiento energético. A continuación, se detallan las distintas tecnologías de energía marina.

2.1 ENERGÍA DE LAS CORRIENTES

La energía de las corrientes se basa en aprovechar la energía cinética de las corrientes marinas. Las corrientes marinas son un movimiento del agua de los océanos y los mares y son causadas a distintos factores, entre los que destaca la rotación terrestre, los vientos, las diferencias de temperatura y la salinidad.

El proceso de captación de la energía se basa en convertidores de energía cinética similares a los aerogeneradores empleando en este caso instalaciones submarinas [2]. Además, se estima que en torno al 80 % de la energía de las corrientes está en zonas profundas. [3]



Ilustración 3. Instalaciones para el aprovechamiento de la energía de las corrientes [3]

2.2 ENERGÍA DE LAS MAREAS

Esta energía también se conoce por el nombre de energía mareomotriz. Consiste en aprovechar el cambio de nivel del agua del mar, es decir el ascenso (pleamar) y descenso (bajamar), causado por la acción gravitatoria del Sol y la Luna.

Para generar energía mareomotriz, se construye una presa con compuertas en una bahía, un arroyo, un río o un estuario para almacenar agua en un embalse y permitir que fluya y entre en la turbina.

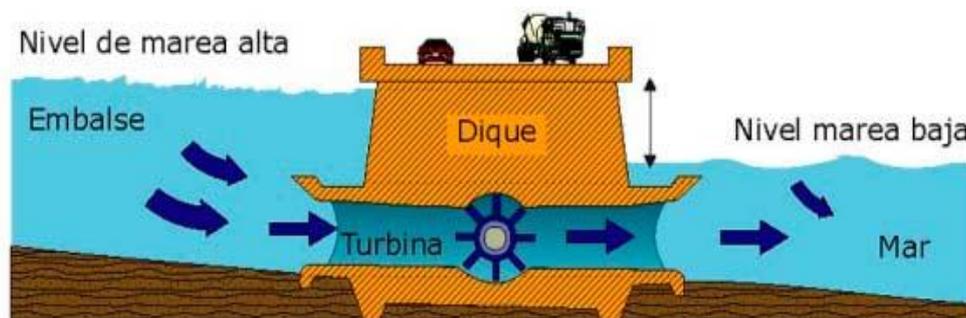


Ilustración 4. Funcionamiento energía mareomotriz [4]

Actualmente, hay distintos tipos de energía mareomotriz que se pueden clasificar de la siguiente manera:

- Generador de la corriente de marea: estas instalaciones aprovechan la energía cinética del movimiento del agua. Funciona de manera similar a las turbinas eólicas con el viento.
- Presas de marea: al contrario que las instalaciones anteriores, las presas de marea aprovechan la energía potencial. Utilizan la diferencia de altura entre las mareas bajas y altas.
- Energía mareomotriz dinámica: esta tecnología utiliza la energía de las corrientes al aprovechar tanto su energía cinética como potencial.

2.3 ENERGÍA MAREMOTÉRMICA

Esta energía como su nombre indica, se basa en aprovechar la energía térmica del mar. Para poder utilizar esta energía es necesario que la diferencia de temperaturas entre la superficie del mar y las aguas profundas sea de al menos 20°C. Se necesita esta diferencia de temperatura porque para generar energía, es fundamental que exista un gradiente de temperatura.

Para conseguir transformar la energía de térmica en energía eléctrica, es necesario utilizar un ciclo termodinámico, en concreto, se utiliza el ciclo de Rankine. En este caso, el fondo marino es el foco frío y el agua de la superficie es el foco caliente.

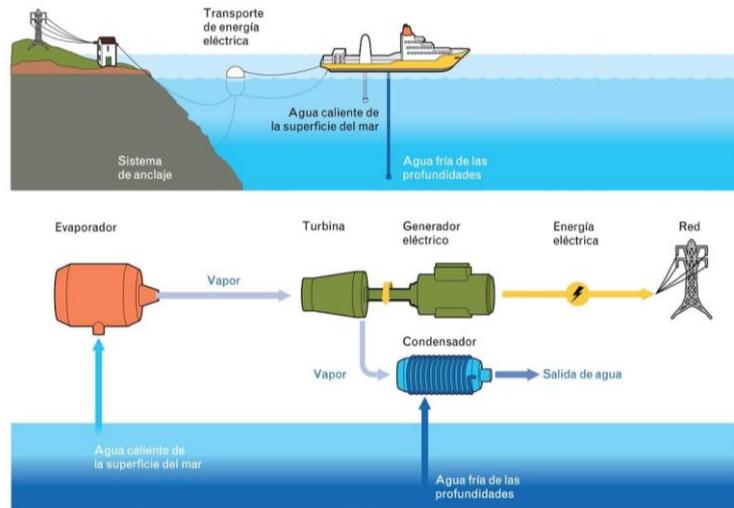


Ilustración 5. Esquema conceptual de una planta de energía maremotérmica [5]

2.4 ENERGÍA DEL GRADIENTE SALINO

Esta energía también es conocida como energía azul o energía osmótica y se fundamenta en la diferencia de concentración de sal. La diferencia de salinidad se encuentra entre el agua dulce y el agua salada, lo que crea una presión osmótica. Esta presión puede ser utilizada para generar energía mediante procesos específicos. A continuación, se puede ver el funcionamiento de esta energía.

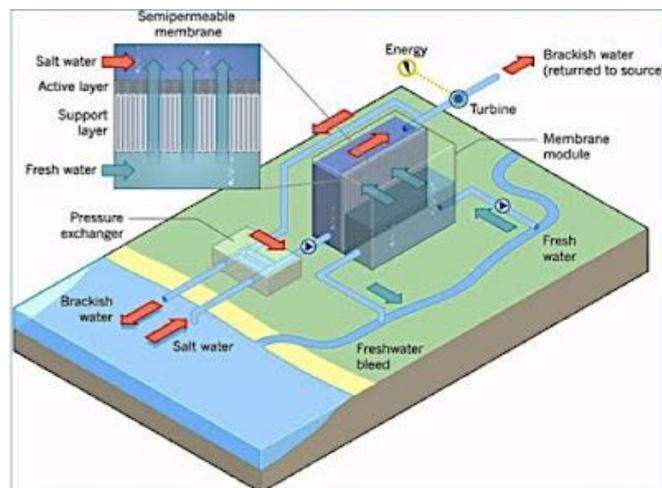


Ilustración 6. Funcionamiento de una planta de energía de gradiente salino [6]

2.5 *ENERGÍA DE LAS OLAS*

Esta tecnología, llamada energía undimotriz, consiste en aprovechar la energía producida por el movimiento ondulatorio de la superficie del agua del mar [2]. Se basa en la captura de la energía potencial y cinética generada por las olas, causadas por el viento.

Esta tecnología es la que se empleará en este trabajo y se detallará en el proyecto, abordando cada componente, el principio de funcionamiento, sus ventajas y desventajas y el proceso de diseño e implementación.

Capítulo 3. TEORÍA DE LA ENERGÍA UNDIMOTRIZ

Como se ha mencionado en el capítulo anterior, de todas las tecnologías existentes posibles, se va a utilizar la energía undimotriz. Por ello, en este capítulo se va a estudiar más en detalle, desde sus inicios hasta sus avances más recientes.

3.1 HISTORIA

La energía undimotriz, también llamada energía de las olas, utiliza la fuerza del oleaje del mar para generar electricidad a partir de la captura de la energía cinética de las olas. Es una de las fuentes renovables más recientes, que hoy en día se sigue estudiando. Sin embargo, desde el siglo XIX se lleva realizando diversos estudios.

La historia de esta energía renovable y limpia se remontan al siglo XIX con el inventor español José Barrufet, quien patentó una máquina llamada el “Marmotor”. Esta máquina tenía como objetivo generar electricidad a partir del movimiento vertical de las olas. El dispositivo consistía en un sistema de boyas articuladas y un mecanismo de trinquetes y volantes de inercia [7]. La energía se generaba a través de un eje giratorio que se movía en función del oleaje.

A continuación, se muestra un esquema del dispositivo diseñado por Barrufet.

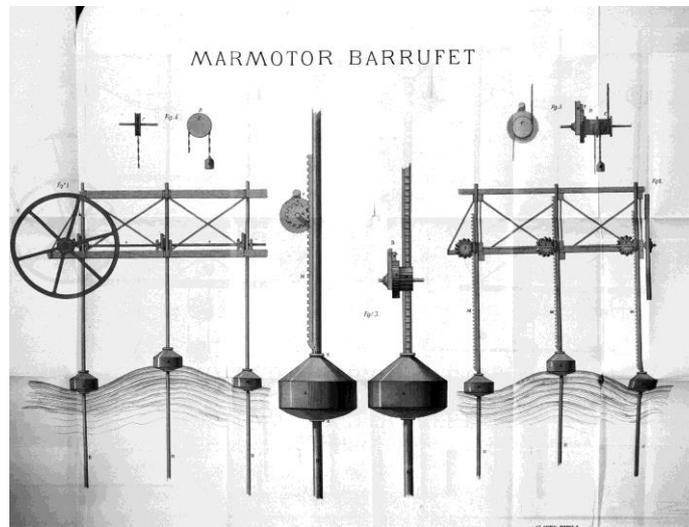


Ilustración 7. Máquina Marmotor inventada por José Barrufet [7]

Sin embargo, su estudio se desarrolló durante el siglo XX y actualmente existen más de 600 patentes para aprovechar la fuerza del movimiento de las olas, y así poder producir energía eléctrica. [8]

3.2 LAS OLAS

Una ola según la Real Academia Española es una onda de gran amplitud que se forma en la superficie de las aguas. Es decir, es una perturbación en la superficie de un cuerpo de agua que se propaga a través de ella, esto puede ser de un océano, un río o un lago.

Como se comentará en el apartado 3.2.2. las olas pueden ser generadas por distintos factores, aunque el factor más común es el viento. Cuando sopla el viento sobre el nivel del mar, transfiere energía a esta superficie y de este modo se va creando pequeñas ondulaciones. Estas ondas se van propagando en la dirección del viento y las olas van adquiriendo una energía propia, sin necesidad de que el viento siga presente.

Las olas más grandes suelen formarse en las zonas más profundas ya que hay más espacio para que estas ondulaciones se acumulen.

3.2.1 PARÁMETROS DE LAS OLAS

En este apartado se va a detallar los parámetros más importantes de una ola para comprender como afecta cada parámetro a la energía de las olas.

- Cresta: Parte más alta de una ola
- Valle: Zona más baja que se encuentra entre dos olas seguidas
- Longitud de onda (λ): Distancia horizontal entre dos crestas consecutivas.
 - La longitud de onda sigue la siguiente expresión: $\lambda = \frac{gT^2}{2\pi}$
- Altura (H): Distancia vertical entre el valle y la cresta
- Amplitud (A): Diferencia de altura entre una cresta y el nivel medio del mar
- Periodo (T): Tiempo medio transcurrido entre el paso de dos crestas.
 - El periodo sigue la siguiente expresión: $T = \frac{2\pi}{\omega}$
 - Si hay suficiente profundidad ($h > \frac{\lambda}{2}$) la expresión: $T = \frac{\lambda}{c}$
- Pendiente (δ): Es la inversa de la tangente entre la altura de una ola y su longitud de onda
 - Sigue la siguiente expresión: $\delta = \arctg\left(\frac{H}{\lambda}\right)$
- Velocidad de onda: Es la velocidad de propagación
 - La velocidad de onda se calcula: $c = \frac{\lambda}{T}$

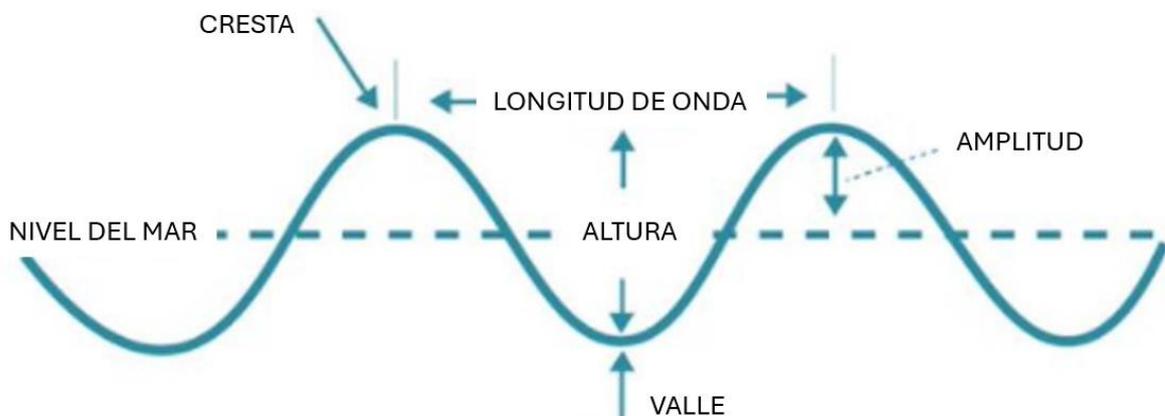


Ilustración 8. Parámetros de una ola [9]

3.2.2 TIPOS DE OLAS

Las olas se pueden clasificar en los distintos grupos según su comportamiento y como se generan:

- **Olas estacionarias:** en este tipo de olas, existen uno o varios puntos donde el movimiento es nulo y otros puntos donde el desplazamiento es máximo. Los puntos donde el movimiento es nulo son llamados puntos nodales y los puntos donde el desplazamiento es máximo son llamados puntos ventrales. Estas olas se conocen como olas de resonancia y su característica principal es que no se desplazan horizontalmente.
- **Olas transitorias:** conocidas como olas progresivas y su característica principal es que varían en el tiempo y el espacio. Estas olas se pueden formar tanto en la superficie del agua (debido al viento) como en el seno de la masa oceánica (debido a discontinuidades de salinidad y temperatura). Estas olas se propagan horizontalmente generadas por fuerzas temporales y llevan energía a lo largo de su recorrido.
 - Olas libres: estas olas se generan por una perturbación instantánea y luego la ola se propaga libremente sin que intervengan otras fuerzas adicionales.
 - Olas forzadas: en cambio en estas olas la perturbación (por ejemplo, el viento) se aplica de manera continua, proporcionando energía a las olas. Las olas continúan mientras dure la acción externa.

3.2.3 OLAS DE VIENTO

Las olas de viento como su nombre indica son aquellas que se forman cuando el viento sopla sobre la superficie de agua. La acción del viento genera olas sin una dirección definida y olas confusas, sin embargo, si hay una dirección predominante.

Cuando las olas se van propagando y se alejan de la zona donde sopla el viento, llevan una velocidad de ola que es función de la longitud de onda. Estas olas se agrupan en función de su longitud de onda, y de esta manera se suele formar olas casi regulares, que también se

conoce como mar tendida. Estas ondas casi regulares son aprovechadas para la obtención de energía [4].

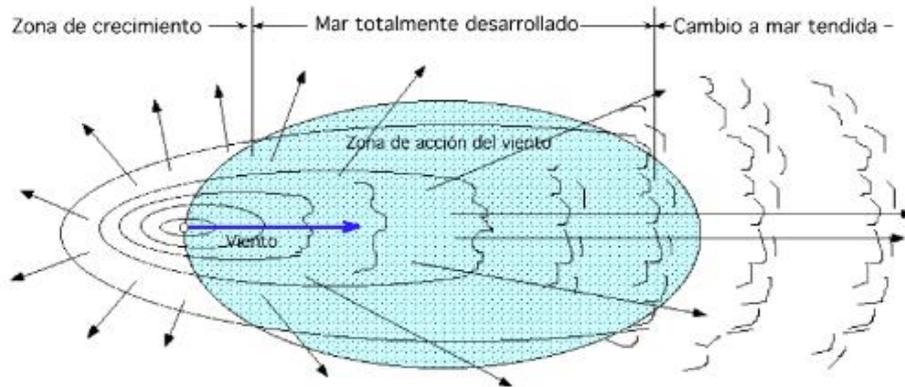


Ilustración 9. Olas generadas por la acción del viento [10]

A pesar de que no exista una regularidad perfecta debido a que la amplitud, energía y dirección pueden variar un poco, se consideran casi regulares. En estas olas regulares, la longitud de onda y el periodo de la ola suelen mantenerse constantes.

Cada partícula de una ola tiene su propia energía potencial y cinética. La energía cinética es la asociada a su movimiento y la energía potencial es la energía almacenada debido a su diferencia de alturas. Por tanto, la energía total es la suma de la potencial y la cinética.

$$E = E_p + E_c = \frac{\rho g \lambda b H^2}{8}$$

Siendo:

- ρ : densidad del mar
- H : altura de la ola
- b : anchura de la cresta

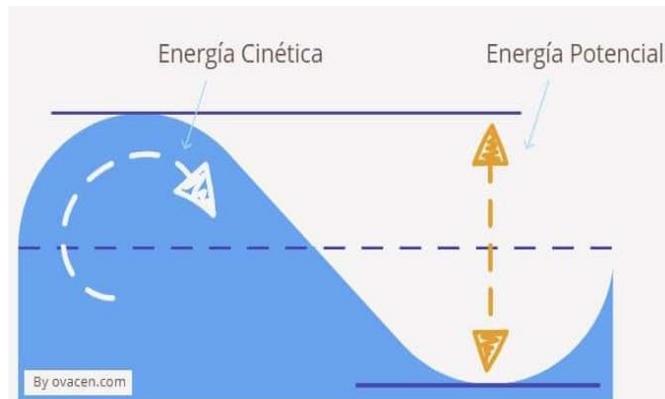


Ilustración 10. Esquema energía de las olas [11]

3.3 POTENCIAL UNDIMOTRIZ

Se estima que la energía undimotriz puede cubrir por sí sola el 100% de la demanda de electricidad actual de todo el mundo. El 70% de nuestro planeta está cubierto por agua que está en continuo movimiento gracias a la fuerza del viento. Su potencial teórico es muy elevado, según el informe “Ocean Energy Technologies” puede generar 29500 TWh al año, y podría satisfacer toda la demanda. [12]

Sin embargo, al igual que en otras energías renovables, el potencial no está distribuido uniformemente. No es uniforme a lo largo de todo el planeta, ni si quiera es uniforme en España. El potencial undimotriz varía en función de la latitud y del clima.

A continuación, se muestra el potencial de las olas en función de la ubicación:

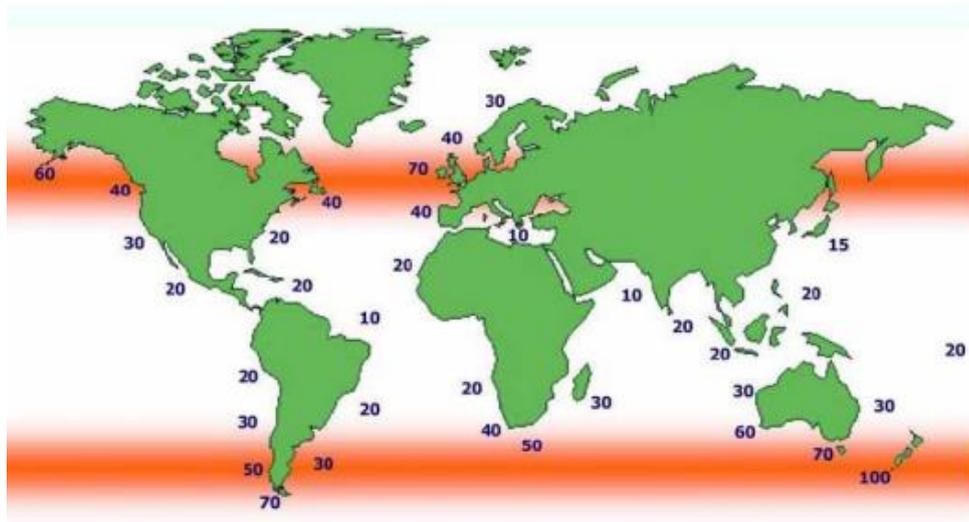


Ilustración 11. Distribución del potencial undimotriz en el mundo [13]

Como se puede observar en la ilustración 11, la distribución no es uniforme. Presenta un mayor potencial entre los 30 grados y los 60 grados de latitud en ambos hemisferios. [13] En concreto, donde más potencial hay, es en la zona de costa occidental de Europa y en la costa sur tanto de Australia como de América del sur.

En particular, en Europa, la costa occidental presenta muy buenos valores de potencial. Este potencial llega a un promedio de unos 50 kW por cada metro de ola incidente y los recursos totales son en torno a 2TW [13]

Para el caso particular de España, se puede observar en la ilustración 12, como el máximo potencial se encuentra en la zona Noreste del país, es decir, en Galicia y en la zona del mar Cantábrico.



Ilustración 12. Distribución del potencial undimotriz en Europa [13]

3.4 CLASIFICACIÓN DISPOSITIVOS

Existen varios dispositivos diseñados para aprovechar la energía de las olas. Cada dispositivo tiene sus propias características y se pueden clasificar según la distancia a la costa, según su tamaño y orientación o según el proceso de captación.

3.4.1 SEGÚN DISTANCIA

Los dispositivos según distancia se pueden clasificar en 3 tipos. Los dispositivos ubicados en la costa (1º generación), los cercanos a la costa (2º generación) y los más alejados de la costa (3º generación).



Ilustración 13. Dispositivos según distancia a la costa [14]

3.4.1.1 Onshore

Estos dispositivos se conocen como dispositivos de primera generación. Como su nombre indica son dispositivos en tierra, esto quiere decir que son dispositivos colocados sobre acantilados rocosos, colocados en estructuras fijas o sobre el fondo marino a muy poca profundidad.

Estos dispositivos presentan muchas ventajas, ya que, al estar en la costa, presentan menos costes de mantenimiento y mayor facilidad de instalación. Sin embargo, es necesario contar con una ubicación apta y además el nivel energético es menor.



Ilustración 14. Dispositivo onshore [14]

3.4.1.2 Nearshore

Estos dispositivos son conocidos como dispositivos de segunda generación. Se encuentran cerca de la costa (a unos cientos de metros) y sobre aguas escasas (entre 10 y 40 metros). Son dispositivos de gran tamaño tanto flotantes como apoyados sobre el fondo del mar.

Estos dispositivos presentan diversas ventajas. Con estos dispositivos se puede evitar los sistemas de fondeo costosos y además evita problemas asociados a los dispositivos en costa.



Ilustración 15. Dispositivo nearshore [14]

3.4.1.3 Offrshore

Son los dispositivos de tercera generación que se encuentran ubicados lejos de la costa, son dispositivos flotantes o sumergidos a gran profundidad (entre 50 y 100 metros).

Estos dispositivos aprovechan el máximo del potencial energético undimotriz. Sin embargo, requieren de mucha tecnología, muy fiable y costosa y por tanto no se han desarrollado tanto como los otros.



Ilustración 16. Dispositivos offshore [14]

3.4.2 SEGÚN TAMAÑO Y ORIENTACIÓN

Al igual que según la distancia a la costa, si se divide los dispositivos en función de la orientación y el tamaño se encuentran tres grupos distintos.

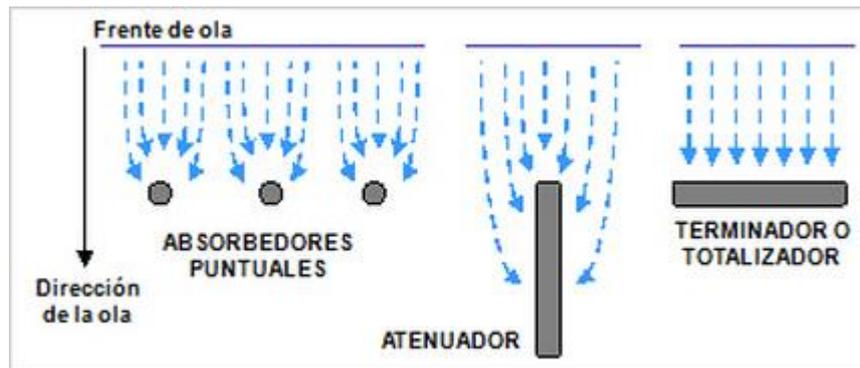


Ilustración 17. Dispositivos según su orientación y tamaño [15]

3.4.2.1 Absorbedores puntuales

Como se puede ver en la ilustración 17, estos dispositivos son pequeñas estructuras cilíndricas con simetría axial. Dada su forma, estos dispositivos no se ven afectados por el oleaje. Estos dispositivos suelen formar una unión de varios a lo largo de una línea.

3.4.2.2 Atenuadores

Estos dispositivos también son llamados absorbedores lineales. Son dispositivos alargados colocados en paralelo a la dirección del viento. Al estar colocados en la dirección del viento, estos dispositivos extraen energía de forma progresiva y direccional.

3.4.2.3 Totalizadores o terminadores

Estos dispositivos también son alargados, pero están colocados de forma perpendicular a la dirección del viento. Con esta colocación se consigue captar toda la energía de una sola vez y en caso de que fuese un dispositivo ideal se conseguiría obtener el 100% de la energía.

3.4.3 SEGÚN PRINCIPIO CAPTACIÓN

La última clasificación de los dispositivos es en función de su sistema de captación. Estos dispositivos se pueden clasificar en tres grupos diferenciados que son dispositivos por diferencia de presión, por cuerpos flotantes o por sistemas de rebosamiento e impacto.

A continuación, se muestra una ilustración donde la primera fila corresponde a diferencia de presión, la segunda fila a cuerpos flotantes y la última a dispositivos de rebosamiento e impacto.

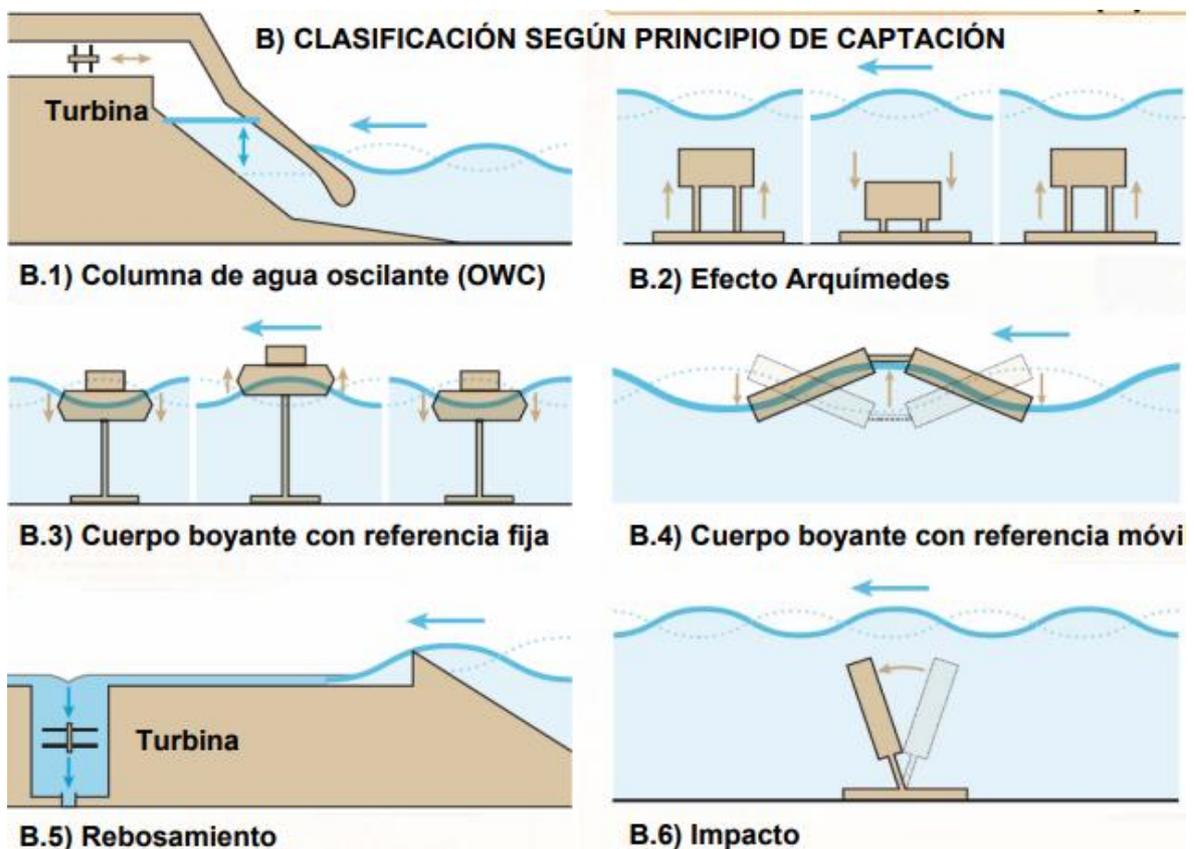


Ilustración 18. Dispositivos en función del principio de captación [16]

3.4.3.1 Diferencia de presión

Estos dispositivos consiguen extraer la energía de la diferencia de presión que causa el oleaje, ya sea de fluido o de aire. Destacan dos tipos de obtención:

Columna de Agua Oscilante

Estos dispositivos como su nombre indica, obtienen la energía mediante el movimiento oscilatorio de las olas del mar. También son conocidos por sus siglas inglesas OWC (Oscillating Water Column).

Este sistema de captación fue inventado por el Profesor Yoshio Masuda [13]. Sin embargo, el primer sistema de columna oscilante se empezó a trabajar a mediados de la década de 1980. En el año 2000 se construyó en la isla escocesa de Islay. Esta planta conocida como Islay LIMPET fue estudiada y desarrollada por University of Queen, Belfast en cooperación con una empresa de energía Wavegen. Este sistema consigue una producción máxima de 500 kW.

Los dispositivos de columna de agua oscilante son dispositivos fijos de generación de energía que se encuentran en la costa. Son dispositivos con una estructura abierta a la superficie marina. El principio de funcionamiento de estos dispositivos consiste en cambiar la diferencia de presión de una columna y de esta forma impulsar una turbina. Se puede dividir en dos pasos.

1. Al llegar una ola, comprime el aire que hay dentro de la columna y lo fuerza a pasar por la turbina. En este paso incrementa la presión que hay dentro de la columna
2. Cuando la ola se va, el aire vuelve a pasar por la turbina y se produce una disminución de la presión dentro de la columna.

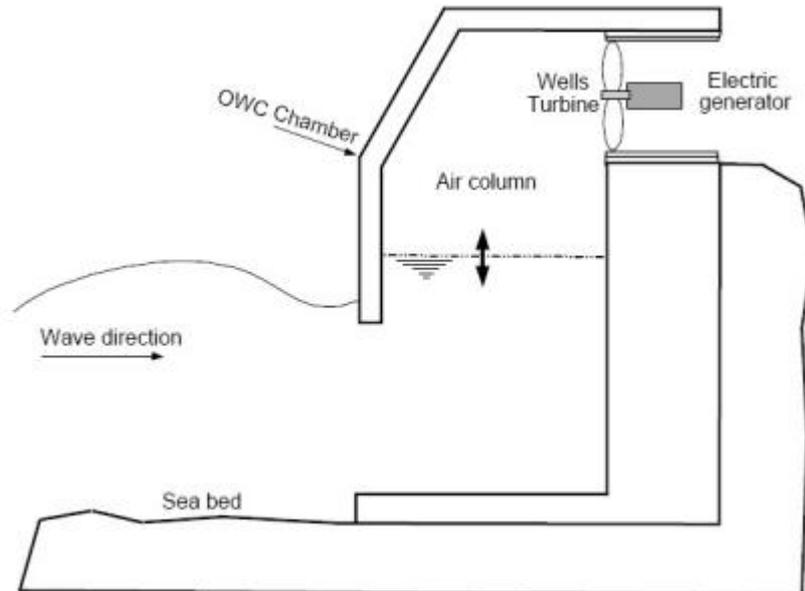


Ilustración 19. Principio de funcionamiento de OWC [13]

En estos dispositivos, no importa la dirección del flujo del aire, es decir, no importa si la ola entra o sale. En ambas situaciones, esta turbina puede generar energía.

Efecto Arquímedes

Estos dispositivos consisten en aprovechar la presión estática generada por el cambio del nivel del mar al pasar una ola. Estos dispositivos son cilindros semisumergidos que están anclados a la superficie. El principio de funcionamiento se basa en que un cuerpo flotante experimenta un movimiento vertical (ascendente o descendente) a medida que las olas pasan por él. De esta forma, mediante el movimiento vertical, se mueve un generador eléctrico.

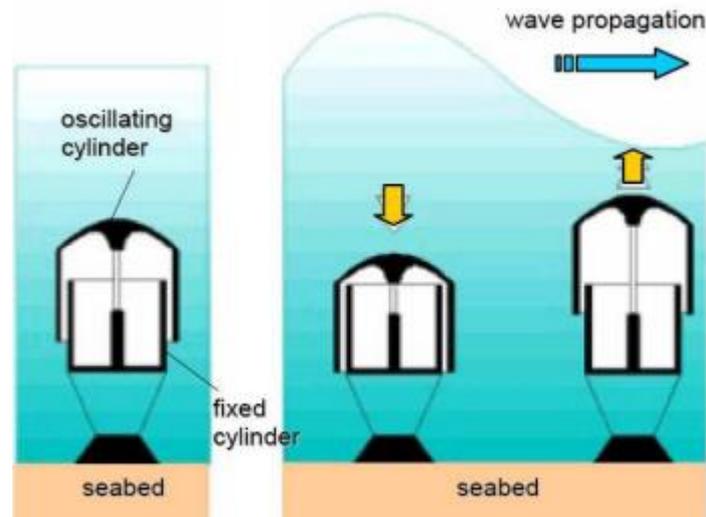


Ilustración 20. Principio de funcionamiento efecto Arquímedes [13]

3.4.3.2 Cuerpos flotantes

Los dispositivos de cuerpos flotantes son movidos por las olas de una forma oscilante. Se pueden mover tanto en vertical, como en horizontal o una combinación de los dos. Estos dispositivos pueden ser de movimiento oscilatorio relativo o pueden tener una parte fijada y entonces el movimiento es en referencia a ese punto fijo. Además, pueden estar puestos en grupos, unidos unos a otros.

El ejemplo más importante de estos dispositivos de cuerpos flotantes es conocido como Pelamis. Este dispositivo está compuesto por secciones tubulares articuladas que flotan sobre la superficie. Con el movimiento de las olas, se accionan bombas hidráulicas que generan energía.



Ilustración 21. Dispositivo cuerpo flotante: Pelamis [17]

3.4.3.3 Sistemas de rebosamiento e impacto

Se trata de dispositivos en los cuales las olas inciden en una estructura de forma que se aumenta la energía potencial, la cinética o incluso ambas a la vez. [15]

Los dispositivos de rebosamiento suelen ser estructuras fijas diseñadas para capturar la energía cinética de las olas que impactan contra ellas. En estos sistemas las olas pasan por encima de las estructuras. El principio de funcionamiento consiste en cambiar la energía cinética de las olas a potencial cuando se eleva el nivel del mar. En los dispositivos de impacto, las olas inciden sobre la propia estructura. Estos dispositivos se pueden colocar en la costa y en mar abierto.

3.5 VENTAJAS Y DESVENTAJAS

Como se ha comentado anteriormente, la energía undimotriz se está desarrollando cada vez más y en este capítulo se va a estudiar las ventajas y desventaja que existen hoy en día más importantes.

3.5.1 DESVENTAJAS

Dentro de las principales desventajas, se encuentran las siguientes:

- Es una tecnología que todavía se encuentra en fase de desarrollo. Esto quiere decir que está en etapas de experimentación, de mejoras continua, de pruebas y error. Por este motivo, es una energía que necesita una gran inversión.
- Otra desventaja es el gran impacto ambiental que tiene la instalación de estos dispositivos. Además, se puede alterar hábitats marinos y ecosistemas costeros y por tanto generar daños medioambientales.
- Como se ha comentado, requiere una gran inversión y por tanto tiene costes iniciales y tecnológicos muy elevados. Esto genera que se elija otras energías renovables antes que la energía undimotriz.
- Al ser dispositivos que se encuentran situados en el mar, el mantenimiento es muy complicado. Además, al ser instalaciones sumergidas, el deterioro de las instalaciones puede llegar a ser mucho mayor.
- Por último, otra desventaja fundamental es la dependencia del clima y la ubicación. La energía undimotriz solo depende de las olas y por tanto no es viable en cualquier área costera, sino que se necesita un gran oleaje.

3.5.2 VENTAJAS

Sin embargo, esta tecnología también presenta muchas ventajas:

- La principal ventaja de esta tecnología es que es una fuente de energía renovable. Esta energía es limpia, segura y sostenible a largo plazo, que hace uso de recursos naturales. No produce emisiones directas de gases de efecto invernadero. Al ser una energía limpia ayuda a reducir la contaminación atmosférica y a la mitigación del cambio climático
- La energía undimotriz es una energía predecible. A diferencia de otras tecnologías como la solar (que depende de la luz solar de cada día y varía) o la eólica, las olas tienden a seguir unos patrones más predecibles. De esta forma, esta energía se puede

predecir más fácilmente la cantidad de energía que se puede extraer y gestionar esta energía mejor.

- Las olas están disponibles día y noche, proporcionando una fuente de energía más consistente y confiable. Además, la energía contenida en las olas es mucho mayor que la de otras fuentes renovables, lo que permite generar una mayor cantidad de energía en un área relativamente pequeña.
- En algunos casos, se puede reutilizar infraestructuras existentes. Es posible integrara sistemas de energía undimotriz en infraestructuras marítimas como rompeolas, diques y muelles. De esta forma se optimiza el uso del espacio y se reducen costes adicionales.
- La implementación y desarrollo de tecnología undimotriz pueden impulsar la innovación tecnológica y crear nuevas oportunidades de empleo en el sector de energías renovables.

Capítulo 4. DISPOSITIVO Y EMPLAZAMIENTO

4.1 TECNOLOGÍA

4.1.1 JUSTIFICACIÓN

La elección de dispositivo OWC se ha seleccionado por distintos motivos:

- Este tipo de dispositivos es de lo más desarrollados dentro de la península en comparación a otros. Es una tecnología previamente probada y estudiada lo que implica un mayor conocimiento y producción de energía en comparación con otros dispositivos.
- Además, como se ha comentado en el capítulo 3, se puede construir directamente en la costa. Esta cualidad presenta muchas ventajas como puede ser menores costes de mantenimiento que contribuye a una mayor rentabilidad a largo plazo.
- Este tipo de dispositivos se pueden situar sobre superficies ya existentes que cumplan los requisitos. Por ejemplo, se pueden colocar en los contradiques que hay en España.
- Los dispositivos OWC tiene un impacto medioambiental más bajo comparado con otros dispositivos para la obtención de energía undimotriz. Además, al ser un dispositivo en la costa, reducen el riesgo de dañar los hábitats marinos.

4.1.2 DISPOSITIVOS OWC EN ESPAÑA

En España solo existe una planta que utilice dispositivos OWC. Esta planta está situada en el País Vasco y se conoce como central undimotriz de Mutriku. Esta planta se inauguró el 8 de julio de 2011 y lleva más de 10 años operativa. Además, es la primera planta en Europa que comercializa la energía que genera [1]

La central undimotriz de Mutriku utiliza dispositivos de OWC para extraer la energía y cuenta con 16 turbinas que pueden llegar a producir una potencia total de 296 kW, siendo capaz de llegar a 970 MWh al año.



Ilustración 22. Central undimotriz de Mutriku [2]

4.2 EMPLAZAMIENTO

Como se ha comentado en el punto 4.1 se va a utilizar un dispositivo de columna de agua oscilante (OWC) y es necesario cumplir con una serie de requisitos para garantizar la viabilidad del proyecto. A continuación, se detallan las distintas condiciones que se han tenido en cuenta:

- Potencial Undimotriz Adecuado: El potencial energético de las olas debe ser suficientemente alto como para poder aprovechar eficientemente la energía undimotriz y que el proyecto sea viable. Como se ha mencionado anteriormente, las zonas con mayor potencial undimotriz en España son Galicia, el mar Cantábrico y las Islas Canarias.
- Presencia de un dique: Para la instalación de dispositivos OWC es necesario contar con la presencia de un dique, ya que este proporciona el emplazamiento adecuado para la central undimotriz, permitiendo una mayor utilización de la energía de las olas.
- Ubicación fuera de áreas protegidas: La zona donde se vaya a instalar es necesario que no se encuentre dentro de la Red de Áreas Marinas Protegidas de España (RAMPE). Esto es esencial para cumplir con las normativas ambientales y proteger

ecosistemas marinos, asegurando que no cause un impacto negativo en estas áreas protegidas.

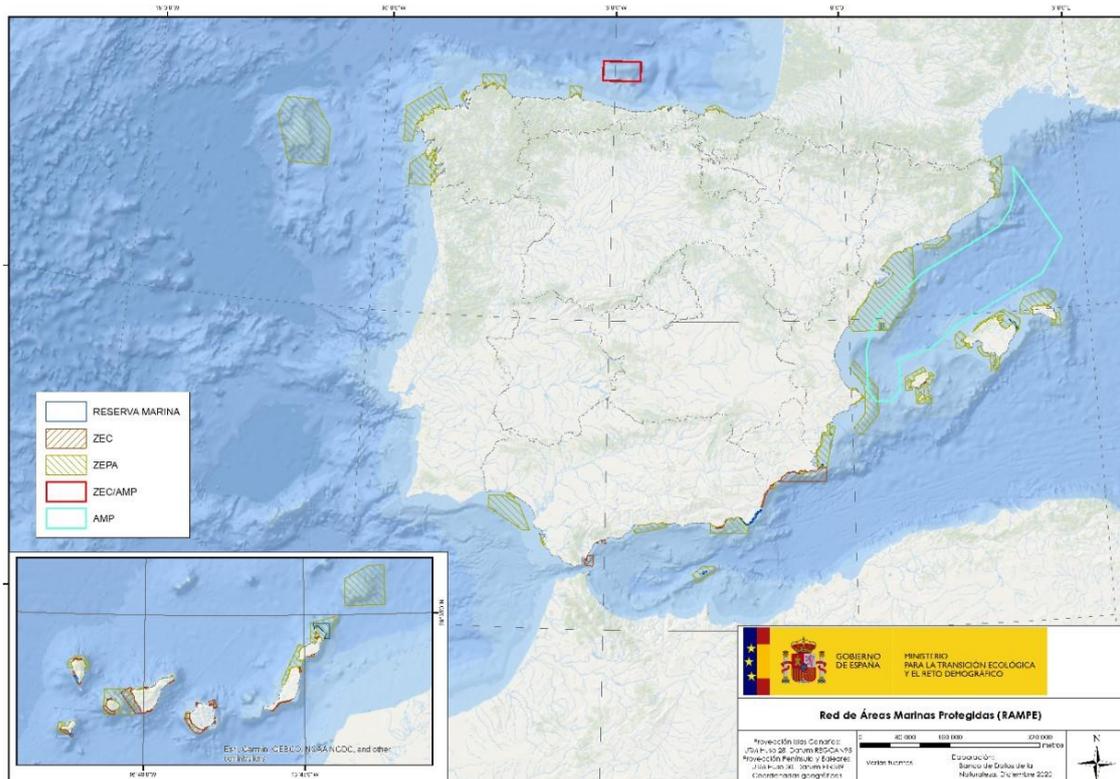


Ilustración 23. Mapa de Áreas Marinas Protegidas de España [3]

En función de los requisitos comentados anteriormente, en primer lugar, se seleccionó la provincia de Cantabria específicamente el municipio de Castro Urdiales. Este municipio se encuentra en una de las zonas con gran potencial undimotriz, presenta un dique de abrigo y no está dentro de la zona de la Red de Áreas Marinas Protegidas de España (RAMPE). Sin embargo, durante la fase de cálculo del potencial energético, se determinó que el sitio no presentaba el potencial necesario para que la central undimotriz fuese viable.

Finalmente, se escogió el Puerto de Tazones, Villaviciosa dentro de la provincia de Asturias. Este emplazamiento no solo cumple con todos los requisitos necesarios, sino que también presenta un potencial energético adecuado para asegurar la viabilidad de la central undimotriz. Estas características hacen de Tazones el emplazamiento ideal para la

implementación de la central, garantizando la eficiencia energética y el cumplimiento de las normativas ambientales.

Capítulo 5. CÁLCULOS

En este capítulo se van a realizar todos los cálculos necesarios tanto del potencial undimotriz como de la demanda energética de la población costera.

En primer lugar, se analizará el potencial energético de las olas, teniendo en cuenta factores como la altura y el periodo de las olas específicas del emplazamiento escogido. Estos cálculos permitirán estimar la cantidad de energía que se puede generar.

Posteriormente, se estudiará la demanda energética de la población costera de Tazones para satisfacer las necesidades energéticas con la central undimotriz.

5.1 POTENCIAL UNDIMOTRIZ

Para poder calcular el potencial undimotriz, es necesario saber los datos de la altura y el periodo de las olas. Estos datos se obtienen de la base de datos de Puertos del Estado.

El Puerto del Estado ha desarrollado y cito textualmente, un sistema que consta de redes de medida (boyas, mareógrafos y radares de alta frecuencia), servicios de predicción (oleaje, nivel del mar, corrientes y temperatura del agua) y de conjuntos climáticos, que describen tanto el clima marítimo en la actualidad [1].

Los datos se han obtenido exactamente de las boyas más cercanas al puerto. En concreto, se han tomados las medidas mediante distintos puntos SIMAR. Los datos obtenidos pertenecen al año 2022 y 2023. A continuación, se muestra una media de los años de 2022 y 2023 tanto de la altura media significativa de la ola y el periodo medio de la ola.

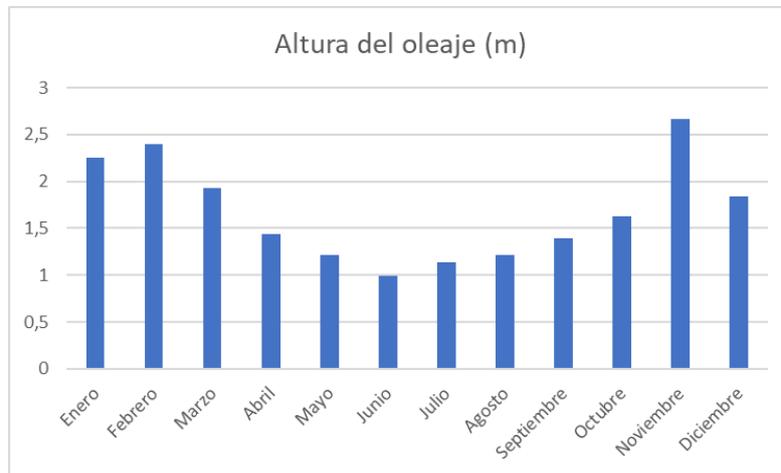


Ilustración 24. Media 2022/2023 de la altura significativa de la ola en metros

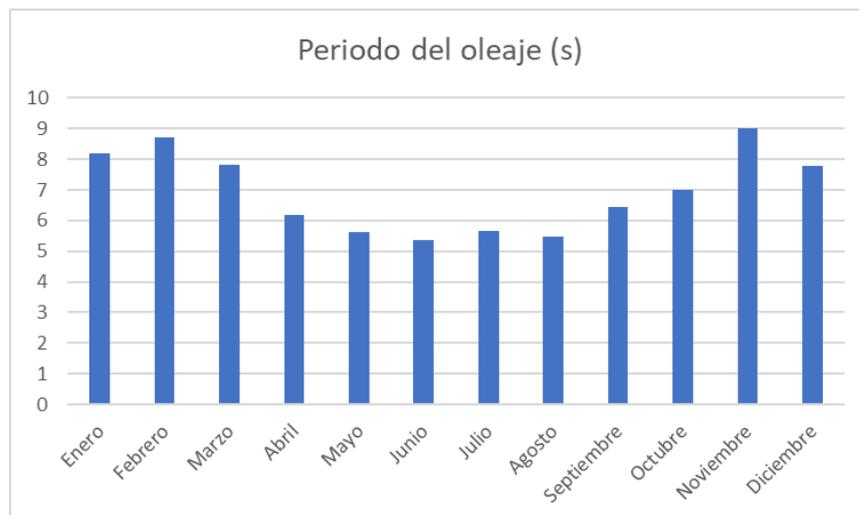


Ilustración 25. Media 2022/2023 del periodo medio de la ola en segundos

Una vez se tienen estos datos de Puertos del Estado se puede calcular el potencial undimotriz en el puerto de Tazones, Villaviciosa. Este potencial se calcula con la siguiente fórmula que se muestra a continuación:

$$Potencial = \frac{1}{32\pi} \rho H^2 g^2 T \quad (1)$$

Donde:

- ρ : densidad del mar

- H : altura significativa de la ola
- g : gravedad
- T : periodo de la ola

Para realizar los cálculos se han utilizado los datos de Puerto del Estado del punto SIMAR 3098038. Para la densidad del agua del mar se ha utilizado el dato medido en la zona del cantábrico que es 1025 kg/m^3 y una gravedad de $9,81 \text{ m/s}^2$

En la siguiente página se muestra el potencial undimotriz, utilizando la ecuación 1.

Mes	Altura significativa del oleaje (m)	Periodo medio (s)	Gravedad (m/s^2)	Densidad (kg/m^3)	Potencial Undimotriz (kW/m)
ene-22	1,99	7,74	9,81	1025	30075,24
feb-22	3,01	10,37	9,81	1025	92187,87
mar-22	2,02	7,99	9,81	1025	31989,80
abr-22	1,37	6,05	9,81	1025	11141,88
may-22	1,16	5,38	9,81	1025	7103,30
jun-22	1,30	6,38	9,81	1025	10579,60
jul-22	1,11	5,21	9,81	1025	6298,62
ago-22	1,19	5,45	9,81	1025	7572,73
sep-22	1,31	5,70	9,81	1025	9597,97
oct-22	1,45	6,95	9,81	1025	14337,81
nov-22	2,79	9,58	9,81	1025	73170,49
dic-22	1,49	7,01	9,81	1025	15270,48
ene-23	2,52	8,63	9,81	1025	53774,19
feb-23	1,78	7,07	9,81	1025	21979,68
mar-23	1,84	7,67	9,81	1025	25479,63
abr-23	1,51	6,30	9,81	1025	14094,72
may-23	1,26	5,89	9,81	1025	9175,26
jun-23	0,69	4,37	9,81	1025	2041,46
jul-23	1,17	6,09	9,81	1025	8179,96
ago-23	1,24	5,51	9,81	1025	8312,99
sep-23	1,47	7,18	9,81	1025	15223,73
oct-23	1,81	7,06	9,81	1025	22694,67
nov-23	2,54	8,41	9,81	1025	53238,46
dic-23	2,18	8,56	9,81	1025	39916,16

Tabla 1. Potencial Undimotriz en función de los meses de 2022 y 2023

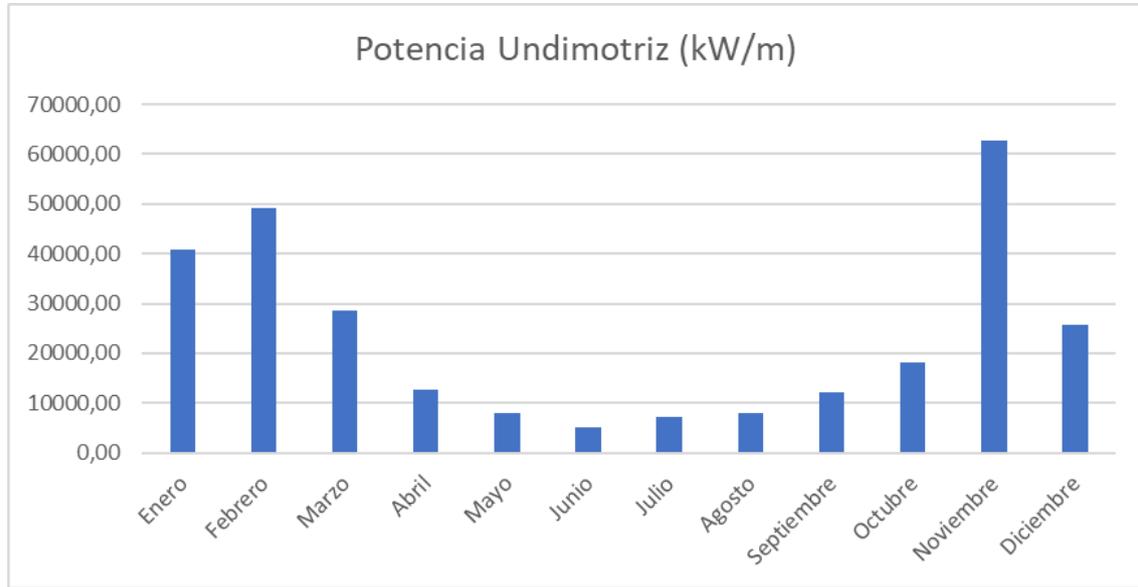


Ilustración 26. Potencial Undimotriz en función de los meses de 2022 y 2023

Para poder analizar mejor los resultados obtenidos, se va a distinguir entre los meses en función de las estaciones:

- Invierno: diciembre, enero y febrero
- Primavera: marzo, abril y mayo
- Verano: junio, julio y agosto
- Otoño: septiembre, octubre y noviembre

Estación	Altura oleaje (m)	Periodo (s)	Gravedad (m/s^2)	Densidad (kg/m^3)	Potencial (kW/m)
Invierno	2,20	8,40	9,81	1025	39989,24
Primavera	1,53	6,55	9,81	1025	14971,69
Verano	1,12	5,50	9,81	1025	6731,37
Otoño	1,90	7,48	9,81	1025	26356,16

Tabla 2. Potencial Undimotriz por estaciones

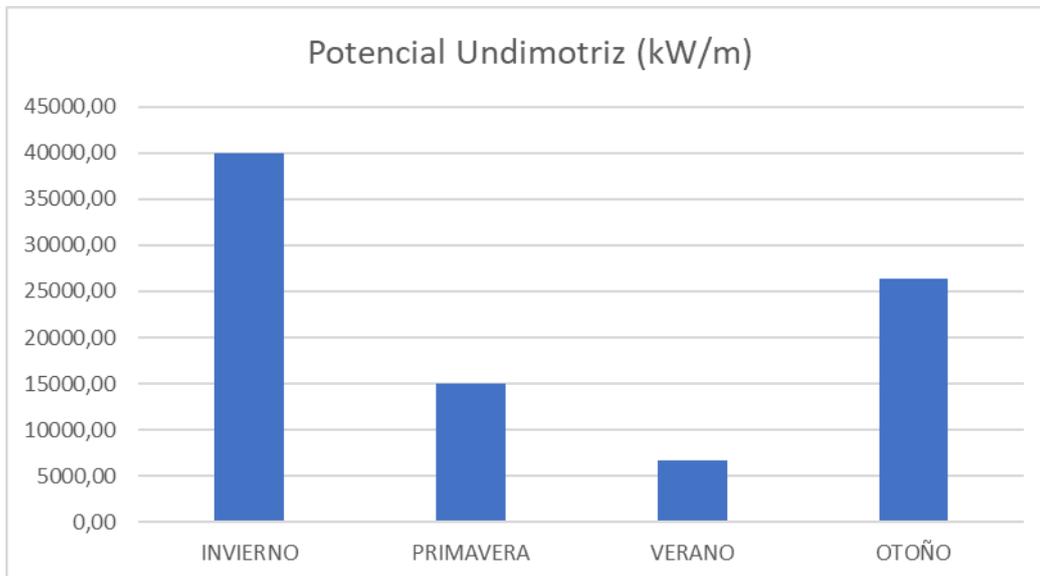


Ilustración 27. Potencial undimotriz por estaciones

Como se puede ver en la ilustración 27, el potencial undimotriz cambia bastante en función de la estación del año. El máximo potencial que se obtiene en las estaciones se genera en invierno, sin embargo, primavera y verano son las estaciones con menos potencial.

A pesar de esta irregularidad de potencial, la media que se obtienen en el puerto de Tazones es de 24.300 kW/m. Basándonos en la central de Mutriku, el potencial se va reduciendo conforme va llegando a la costa. Esta reducción es aproximadamente del 50%. Por tanto, el potencial aproximado disponible que se puede obtener es 12.150 kW/m

5.2 DEMANDA ENERGÉTICA

Como se ha mencionado anteriormente, el emplazamiento seleccionado es el Puerto de Tazones, Villaviciosa situado en Asturias. El objetivo es maximizar el suministro de electricidad en esta área, aprovechando el potencial energético.

En este apartado se va a calcular la demanda energética de Villaviciosa, estudiando tanto la demanda pública como la privada. Para calcular ambas demandas, es necesario saber que el número de habitantes de Villaviciosa en el 2023 son 15.613 vecinos. [2]

En cuanto al sector público, es necesario calcular cuánto se consume en el alumbrado. Para ello, vamos a estimar el alumbrado según los parámetros establecidos por el Instituto para la Diversificación y Ahorro de la Energía (IDAE), como se detallan en la Tabla 2.

Tamaño municipio	Ratios IDAE			Censo de España		Resultados	
	kWh/hab/a	W/PL	PL/1000 hab	Municipios	Población	Gwh/a	PL
>75.000 habitantes	81	182	108	88	20.399.147	1.653	2.209.135
40.001 a 75.000 hab	118	176	156	76	4.239.453	501	663.381
10.000 a 40.000 hab	133	163	209	557	10.702.913	1.429	2.237.499
<10.000 hab	169	140	298	7.391	9.859.224	1.665	2.934.665
Conjunto España	116,1	161,1	178,0	8.112	45.200.737	5.247	8.044.680

Tabla 3. Alumbrado en función del número de habitantes. IDAE [3]

Como el municipio de Villaviciosa tiene en torno a unos 15.000 habitantes, se establece que el alumbrado en kWh al año es de 133 por habitante. Por tanto:

$$Potencia Alumbrado = 133 \frac{kWh}{hab * año} * 15.613 hab = 2,076 GWh/año$$

Para realizar el análisis del consumo de los edificios públicos en Villaviciosa, se realiza lo siguiente. Se hace una aproximación del área que ocupa cada tipo de edificios públicos y se consulta en fuentes como el IDAE el consumo por cada tipo de edificio.

Edificios Municipales:

- Área total: 1500 m²
- Consumo promedio: 150 kWh/m²/año
- Consumo anual = $150 \frac{kWh}{m^2 * año} * 1.500 m^2 = 225.000 kWh/año$

Instalaciones Deportivas:

- Área total: 4300 m²

- Consumo promedio: 250 kWh/m²/año
- Consumo anual = $250 \frac{\text{kWh}}{\text{m}^2 \cdot \text{año}} * 4.300 \text{ m}^2 = 1.075.000 \text{ kWh/año}$

Centros Educativos:

- Área total: 6500 m²
- Consumo promedio: 100 kWh/m²/año
- Consumo anual = $100 \frac{\text{kWh}}{\text{m}^2 \cdot \text{año}} * 6.500 \text{ m}^2 = 650.000 \text{ kWh/año}$

Total:

- Consumo anual = 225.000 + 1.075.000 + 650.000 = 1.950.000 kWh/año

En cuanto a el consumo de los edificios privados, el consumo medio de los hogares emplazados en la zona Atlántico Norte es de 10.331 kWh al año [4]. Sabiendo que en Villaviciosa hay en torno a 11.075 viviendas según el Instituto Nacional de Estadística (INE).

$$\begin{aligned} \text{Consumo hogar} &= 10.331 \frac{\text{kWh}}{\text{vivienda} * \text{año}} * 11.075 \text{ viviendas} \\ &= 114.415.825 \text{ kWh/año} \end{aligned}$$

Dado que el desarrollo actual de la energía undimotriz no es suficiente para cubrir todo el consumo calculado de Villaviciosa, el proyecto se va a centrar en abastecer el sector público. Esto incluye tanto los edificios municipales como el alumbrado, con un consumo total de 4,026 GWh al año.

5.3 PUERTO

Como se ha comentado en el capítulo 4, el emplazamiento escogido para este proyecto es el puerto de Tazones, en Villaviciosa. El puerto cuenta con un dique que presenta una longitud de aproximadamente 120 metros.

Como punto de referencia tomamos la central undimotriz de Mutriku, donde se han instalado 16 cámaras con unas dimensiones de 4,5 metros de ancho y 9,4 metros de alto. Basándonos en esto, el proyecto propone el diseño de 30 cámaras, cada una de ellas con 5 metros de ancho. Gracias a la longitud adecuada del dique existente, no es necesario realizar ninguna extensión del puerto, lo que supone una ventaja en términos de operación y precio.

Estas cámaras estarán equipadas con turbinas de Wells de 1 metro de diámetro. Las turbinas de Wells son una opción ideal debido a su capacidad de generar energía en ambas direcciones de flujo de aire generado por las olas. En el siguiente capítulo se proporcionará información más detallada sobre las características y ventajas de este tipo de turbinas.

Esta implementación mejora la capacidad y eficiencia de la central undimotriz, aprovechando al máximo la estructura existente del dique lo que supone no tener que realizar costosas ampliaciones. De esta forma, se optimiza los recursos disponibles y se facilita el mantenimiento y operatividad de la central a largo plazo.

Capítulo 6. TURBINA WELLS

En este capítulo se detallará el funcionamiento y diseño de la turbina que se empleará para el aprovechamiento energético undimotriz.

6.1 INTRODUCCIÓN

La turbina Wells fue creada por un profesor de Queen's University llamado Alan Wells en 1976. Fue diseñada para convertir la energía de las olas en energía mecánica y es una de las tecnologías más prometedoras en el campo de la energía undimotriz ya que es de las más utilizadas en los dispositivos OWC (Columna de Agua Oscilante).

Como se ha explicado anteriormente, los dispositivos de Columna de Agua Oscilante funcionan de una manera similar a las turbinas eólicas, es decir, utilizan la presurización del aire. Sin embargo, en el caso de OWC, esta presurización es generada por las olas del mar. En estos sistemas, hay una cámara de aire situada sobre el nivel del mar que permite el paso de las olas y una turbina ubicada en la parte superior de la cámara. Con el flujo de las olas, se produce un cambio del nivel de agua que genera una variación en la presión del aire que hay dentro de la cámara. La turbina aprovecha esta variación de presión para generar energía, transformando así la fuerza de las olas en electricidad aprovechable.

El propósito de crear esta turbina era conseguir un dispositivo que fuese capaz de poder girar en el mismo sentido independientemente de la dirección del flujo de aire. Esta característica, es indispensable para el funcionamiento eficiente de las tecnologías de agua de columna oscilante. En estos dispositivos el aire cambia constantemente por el movimiento del agua dentro de la cámara. Por tanto, para maximizar la generación de energía y garantizar una operación continua, es fundamental conseguir una turbina que pueda adaptarse a las variaciones del flujo de aire sin tener que detenerse o perder eficiencia.

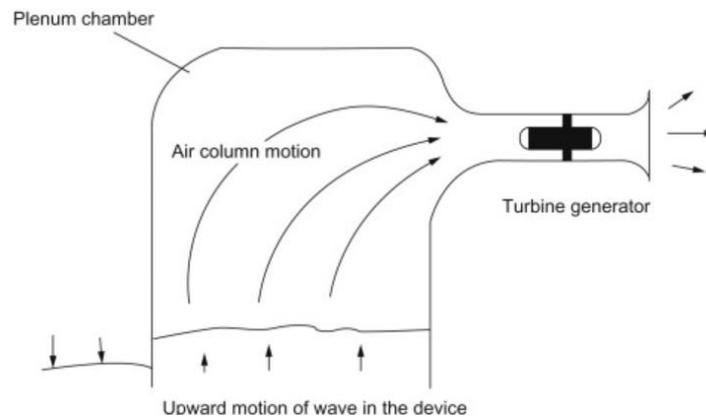


Ilustración 28. Disposición de turbina de Wells y columna de agua oscilante [1]

A continuación, se detalla los elementos de la turbina:

- Generador eléctrico: está conectado al eje de la turbina y es el componente encargado de convertir la energía mecánica en energía eléctrica.
- Eje: transmite el movimiento de rotación desde la turbina hasta el generador eléctrico.
- Rotor: es el componente central de la turbina. Se caracteriza por poder girar en la misma dirección independientemente del sentido del flujo de aire entrante.
- Álabes: están situados de forma simétrica a ambos lados del rotor.

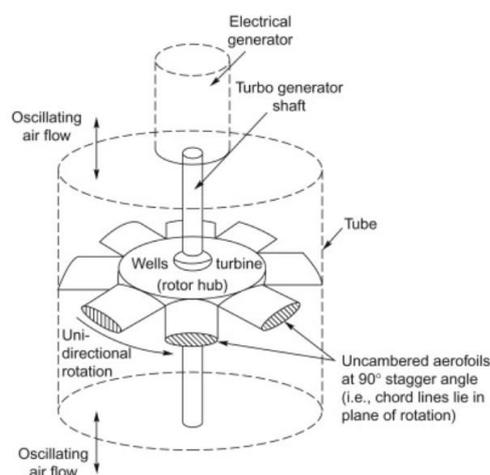


Ilustración 29. Esquema de una turbina de Wells [1]

6.2 NOTACIÓN

Para la simplificación del principio de funcionamiento, se detalla a continuación todos los parámetros empleados para su cálculo

- B : número de álabes
- c : longitud de la cuerda
- C_D : coeficiente de arrastre
- C_L : coeficiente de sustentación
- D : Fuerza de arrastre
- D_t : Diámetro del disco de la turbina
- h : relación diámetros del cubo y del disco
- L : fuerza de sustentación
- P : presión estática
- Q : caudal de aire a la entrada
- R : radio de la turbina
- Re : número de Reynolds
- T : par de giro
- U_t : velocidad rotacional inducida
- U : velocidad de corriente de aire
- V_{effect} : velocidad efectiva
- V_{geom} : velocidad geométrica.
- W : potencia
- ΔP : caída de presión a través de la turbina
- α : ángulo de ataque.
- φ : ángulo de velocidad efectiva
- η : eficiencia de la turbina
- ρ : densidad del aire
- σ : solidez de la turbina
- Ω : velocidad angular de rotación

6.3 PRINCIPIO DE FUNCIONAMIENTO

6.3.1 ESTUDIO AERODINÁMICO

Como ya se ha mencionado, la turbina de Wells es un dispositivo neumático diseñado específicamente para la conversión de energía de las olas en energía eléctrica. Este dispositivo emplea álabes simétricos. Estos álabes suelen ser del tipo NACA 00xx y se colocan de manera perpendicular al flujo de aire entrante alrededor de un rotor circular.

La ventaja que presenta los álabes simétricos es que mantienen el sentido de giro de la turbina sin tener en cuenta cual es el sentido del flujo de aire de entrada. Gracias a esta ventaja, se consigue una generación de electricidad constante.

Para poder calcular el momento y la variación de presión en función de la velocidad incidente, se utiliza el estudio aerodinámico. Debido a la generación de un momento en el rotor, se genera un cambio en la dirección de la corriente de aire que ocurre en el espesor del disco. Este cambio produce una componente de energía cinética rotacional (U_t) que tiene un efecto directo en el triángulo de velocidades. **¡Error! No se encuentra el origen de la referencia.**

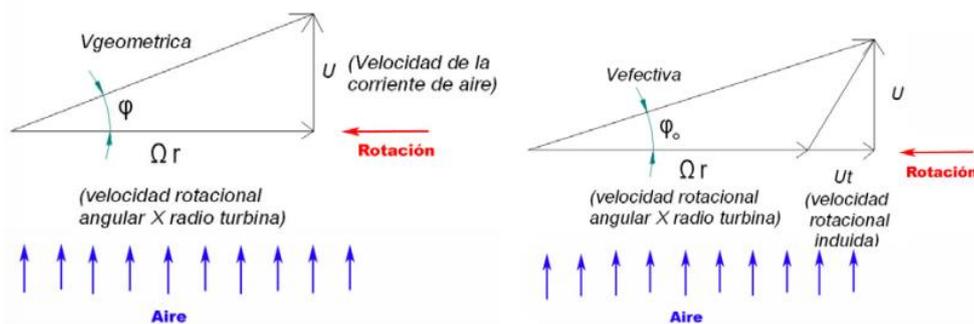


Ilustración 30. Diagrama de velocidades ideal y real en la turbina Wells **¡Error! No se encuentra el origen de la referencia.**

Además, existe una relación de ángulos entre el diagrama de velocidades y el diagrama de fuerzas sobre el perfil de un álabes. Como se puede ver en la siguiente ilustración, el ángulo de ataque α , es el mismo ángulo que forma la bisectriz del ángulo de la velocidad efectiva y

la geométrica. El ángulo de ataque es el formado entre la dirección de la velocidad de la corriente de aire y la cuerda del ala.

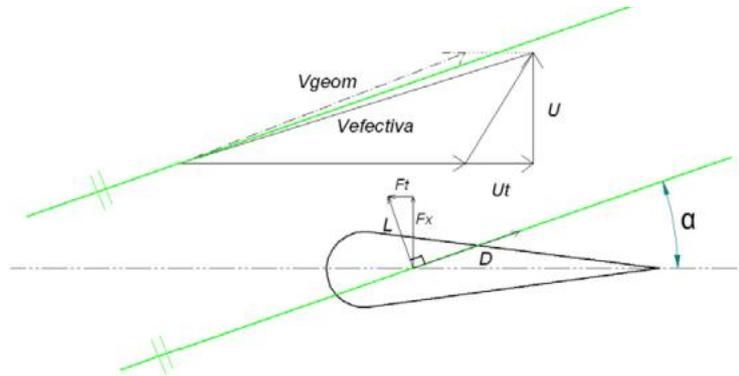


Ilustración 31. Relación de ángulos *¡Error! No se encuentra el origen de la referencia.*

A continuación, se va a realizar el estudio del diseño aerodinámico. Para este estudio es necesario conocer tanto el análisis del elemento del aspa como el principio de conservación del momento angular con el equilibrio de fuerzas que actúan sobre el perfil. Si se sabe la velocidad angular del rotor, se puede calcular la velocidad relativa que experimenta el perfil aerodinámico en cualquier aspa de la turbina. Esta velocidad genera las fuerzas sobre el perfil. **¡Error! No se encuentra el origen de la referencia.**

En la siguiente figura, se puede observar tanto la velocidad como las fuerzas sobre el perfil aerodinámico. Utilizando esta relación, es posible relacionar el resto de los parámetros.

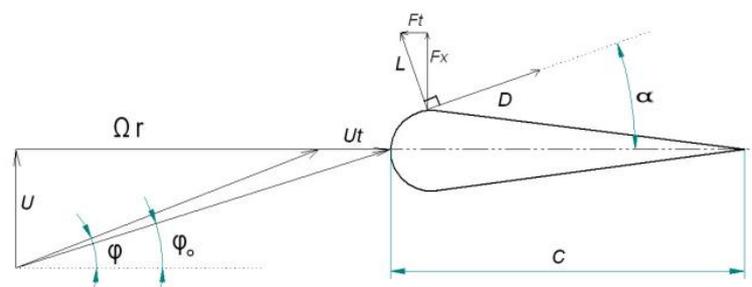


Ilustración 32. Diagrama de fuerzas y velocidades sobre el perfil *¡Error! No se encuentra el origen de la referencia.*

Donde:

$$L = \frac{1}{2} * C_L * \rho * V_{efect}^2 * c \quad (2)$$

$$D = \frac{1}{2} * C_D * \rho * V_{efect}^2 * c \quad (3)$$

Estas dos fuerzas son la fuerza de sustentación (L) y la fuerza de arrastre (D). Ambas fuerzas aerodinámicas dependen de los coeficientes de sustentación y arrastre, que a su vez dependen del perfil del álabe y del número de Reynolds.

Estas fuerzas se pueden descomponer en una fuerza axial (F_x) y una fuerza tangencial (F_t). Al utilizarse perfiles simétricos (NACA 00XX), solo se produce giro en una única dirección debido a que el sentido de la fuerza en la dirección del movimiento F_t es el mismo para los valores tanto positivos como negativos del ángulo de ataque. Sin embargo, la fuerza axial cambia de sentido en función del flujo de aire que circule y se utiliza para el diseño estructural de la turbina **¡Error! No se encuentra el origen de la referencia.**

$$F_t = L \sin(\alpha) - D \cos(\alpha) \quad (4)$$

$$F_x = L \cos(\alpha) + D \sin(\alpha) \quad (5)$$

Una vez conocidas las fuerzas de arrastre y sustentación, se puede calcular el momento en el rotor de la turbina y el rendimiento de esta. El par que se genera depende de las distintas fuerzas, del ángulo de entrada y del radio de los álabes.

El radio de los álabes influye directamente en la magnitud del par, ya que a mayor radio, mayor momento generado.

$$T = (L \sin(\alpha) - D \cos(\alpha)) * r \quad (6)$$

$$\eta = \frac{\Omega * T}{Q * \Delta P} \quad (7)$$

6.3.2 ANÁLISIS DIMENSIONAL

En este apartado se va a realizar un estudio adimensional con el objetivo de determinar las dimensiones preliminares de un prototipo a pequeña escala de una turbina de Wells. Este prototipo servirá como base para extrapolar los resultados y los datos obtenidos a las dimensiones reales de la turbina.

Los números adimensionales que se van a calcular dependen de la densidad (ρ) y la viscosidad del fluido (ν), la velocidad axial del aire (U), el radio de la turbina (R), la caída de presión (ΔP_0), la velocidad angular (Ω) y el momento (T). **¡Error! No se encuentra el origen de la referencia.**

Estos números adimensionales son los siguientes:

$$\text{Coeficiente de flujo} \rightarrow U^* = \frac{U}{\Omega R} \quad (8)$$

$$\text{Coeficiente de presión} \rightarrow \Delta P_0^* = \frac{\Delta P_0}{\rho \Omega^2 R^2} \quad (9)$$

$$\text{Coeficiente de par} \rightarrow T^* = \frac{T}{\rho \Omega^2 R^5} \quad (10)$$

$$\text{Número de Reynolds} \rightarrow Re = \frac{\sqrt{(\Omega R)^2 + U^2} * c}{\nu} \quad (11)$$

El número de Reynolds es un parámetro fundamental ya que está muy relacionado con la eficiencia de la turbina. Este parámetro mide la relación entre las fuerzas inerciales y viscosas y su variación influye en factores como el arrastre y el desprendimiento de la capa límite.

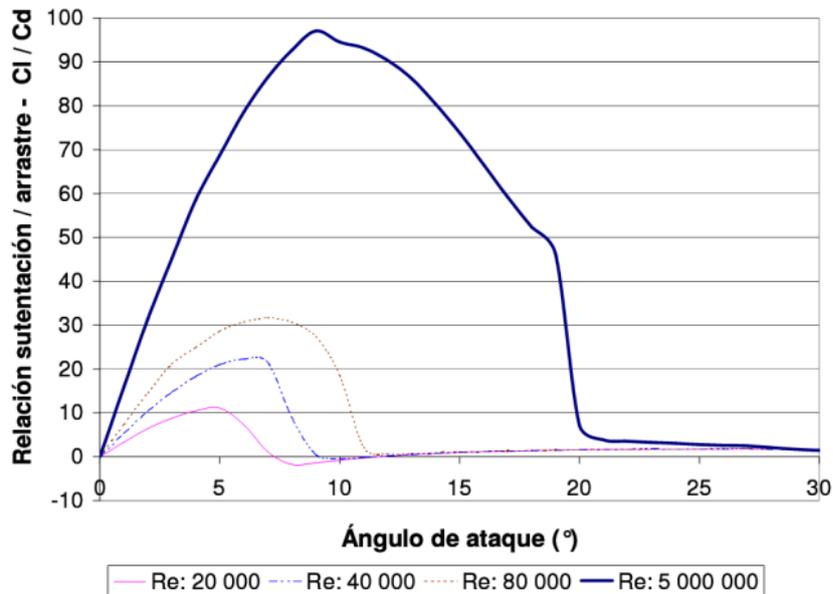


Ilustración 33. Relación sustentación/arrastre en función del número de Reynolds [3]

Como se muestra en la ilustración 33, la relación sustentación/arrastre disminuye significativamente a medida que el número de Reynolds disminuye. Esto implica una menor eficiencia de la turbina, ya que es importante que la relación sustentación/arrastre sea lo más alta posible. Una alta relación sustentación/arrastre reduce las pérdidas por arrastre y mejora la eficiencia en la conversión de la energía del flujo de aire en energía mecánica.

Además, es importante conocer el concepto de solidez, que es un parámetro fundamental en el diseño y funcionamiento de las turbinas de Wells. La solidez viene determinada por la relación entre el área ocupada por las aspas y el área total descrita por el disco que describen estas aspas mientras giran. Este valor proporciona una medida de cuánta del área total del disco está efectivamente siendo utilizada por las aspas para interceptar y convertir la energía del flujo de aire.

En el caso de la turbina Wells es recomendable que este valor sea mayor que 0,6 para asegurar que la turbina tenga suficiente área de aspa para generar la fuerza necesaria y poder

arrancar desde el reposo. Sin embargo, debe ser menor de 1 ya que si no disminuye la eficiencia. La solidez se calcula de la siguiente manera:

$$\sigma = \frac{B \cdot c}{\pi \cdot R \cdot (1+h)} \quad (12)$$

6.3.3 DISEÑO DE LA TURBINA

Como se ha mencionado en el apartado anterior, para el diseño de la turbina es necesario contar con unos números adimensionales que son el coeficiente del flujo, el coeficiente del par, coeficiente de presión, número de Reynolds y rendimiento.

En este caso, el diseño se va a basar en unos resultados obtenidos por Curran y Gato, 1997. El estudio de Curran y Gato se realizó con varios tipos de rotores de 8 aspas con un perfil NACA 0015 y con la siguiente geometría [4]:

Curran y Gato 1997	
Diámetro exterior (mm)	590
Diámetro del cubo (mm)	400
Cuerda (mm)	125
Solidez (σ)	0,64
Velocidad de rotación (rpm)	2000

Tabla 4. Dimensiones perfil NACA 0015 [4]

Los valores obtenidos en el experimento para los parámetros adimensionales en estudio son determinados en el punto máximo de eficiencia obtenida para la turbina [4]. Estos valores son los siguientes:

Punto máximo de eficiencia	
ΔP_o^*	0,33
T^*	0,04
U^*	0,12
η_{MAX}	59,5%

Tabla 5. Resultados obtenidos por Curran y Gato en el punto máximo de eficiencia [4]

A continuación, se muestran los datos de la turbina que se empleará para realizar los cálculos posteriores. Para el cálculo se ha establecido un perfil NACA 0018 con 6 aspas, con un diámetro de turbina de 1 metro y velocidad de rotación de 3000 rpm. Además, como se ha comentado anteriormente, la solidez debe ser mayor de 0,6 para que pueda arrancar desde el reposo, pero no mucho mayor para que no pierda eficiencia.

NACA 0018	
Diámetro exterior (m)	1
Radio exterior (m)	0,5
Diámetro cubo (m)	0,68
Solidez (σ)	0,65
Velocidad de rotación (rpm)	3000
Ω (rad/s)	314,16
Viscosidad cinemática (m ² /s)	1,52E-05
Densidad (kg/m ³)	1,2
Número de aspas	6

Tabla 6. Datos de la turbina

Una vez conocido el radio de la turbina, la densidad, la velocidad de rotación y los números adimensionales se puede obtener los valores de velocidad, par y caída de presión con las ecuaciones 8, 9 y 10.

U (m/s)	18,85
ΔP (Pa)	9770,91
T (Nm)	148,04

Tabla 7. Resultados obtenidos con los números adimensionales y los datos de la turbina

El siguiente paso es conocer los coeficientes de sustentación y de arrastre. Sin embargo, para poder calcularlos es necesario saber tanto el ángulo de ataque como el número de Reynolds. Para obtener el número de Reynolds y el ángulo de ataque se necesita resolver el triángulo ideal y el real de velocidades.

Primero se realizan los cálculos del triángulo ideal de velocidades, donde se va a resolver la velocidad geométrica y el ángulo de entrada ideal. Estos valores dependen de la velocidad de entrada, la velocidad de rotación y el radio de la turbina.

$$V_{GEO} = \sqrt{(\Omega R)^2 + U^2} \quad (13)$$

$$\varphi = \tan^{-1}\left(\frac{U}{\Omega R}\right) \quad (4)$$

$$F_x = L \cos(\alpha) + D \cos(\alpha) \quad (5)(14)$$

En cuanto al triángulo real de velocidades, primero se va a calcular la velocidad inducida, ya que es necesario para poder resolver la velocidad efectiva y el ángulo de entrada. La velocidad inducida depende de la diferencia de presión, la densidad, la velocidad de rotación y el radio de la turbina.

$$U_t = \frac{\Delta P}{2 * \rho * \Omega * R} \quad (15)$$

$$V_{EFFECT} = \sqrt{(\Omega R + U_t)^2 + U^2} \quad (16)$$

$$\varphi_0 = \tan^{-1}\left(\frac{U}{\Omega R + U_t}\right) \quad (17)$$

Aplicando todas estas ecuaciones, se resuelve el triángulo de velocidades ideal y real y se obtiene los siguientes resultados.

Triangulo de velocidades	
φ (rad)	0,12
Vgeo (m/s)	20,83
Ut (m/s)	25,92
φ_0 (rad)	0,10
Vefect (m/s)	183,97

Tabla 8. Resultado del triángulo de velocidades

Una vez conocido el triángulo de velocidades ideal y real, se puede calcular el número de Reynolds y el ángulo de ataque. El ángulo de ataque se calcula como la bisectriz del ángulo de entrada ideal y real y el número de Reynolds se resuelve con la ecuación 11.

$$\alpha = \frac{\varphi + \varphi_0}{2} \quad (18)$$

Re	392789,30
α (rad)	0,111
α (deg)	6,362

Tabla 9. Resultado del número de Reynolds y el ángulo de ataque

Por último, para calcular los coeficientes de sustentación y de arrastre necesitamos estudiar la relación que tiene con el número de Reynolds en función del ángulo de ataque. dado que se está utilizando el perfil simétrico NACA 0018, se consulta las tablas correspondientes del perfil para poder determinar los coeficientes en función del Reynolds.

Número de Reynolds	Cl	Cd
50000	0,800	0,037
100000	0,865	0,023
200000	0,820	0,017
500000	0,673	0,011
1000000	0,671	0,009

Tabla 10. Coeficientes de sustentación y arrastre para ángulo de ataque 6,36° en función del Reynolds [5]

Para poder analizar mejor los coeficientes, se representa ambos coeficientes en función del número de Reynolds.

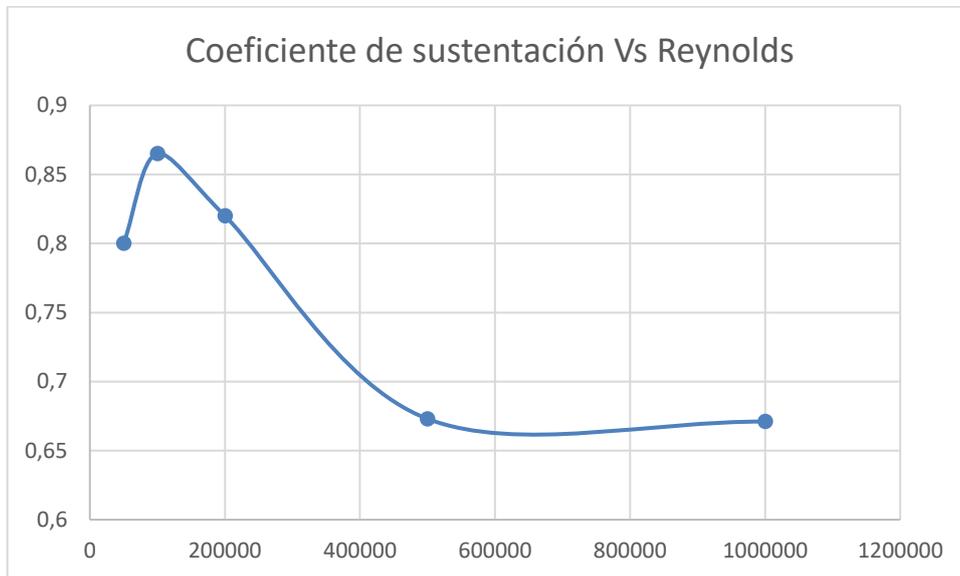


Ilustración 34. C_L Vs Reynolds para ángulo de ataque $6,36^\circ$

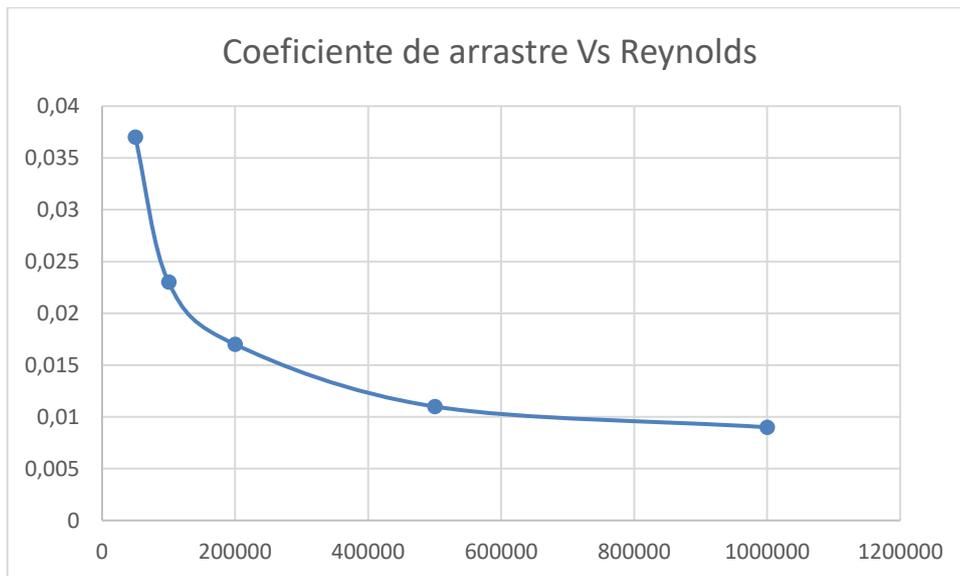


Ilustración 35. C_D Vs Reynolds para ángulo de ataque $6,36^\circ$

Como se puede analizar en los gráficos recién mostrados, y para el número de Reynolds calculado anteriormente, se obtiene los siguientes coeficientes:

$$C_L = 0,705$$

$$C_D = 0,012$$

Finalmente, se puede calcular la velocidad real del flujo de aire conociendo tanto los parámetros geométricos (de la turbina y la cámara) como algunos parámetros de las olas (la altura y el periodo). La velocidad de entrada se calcula de la siguiente manera.

$$U = \frac{8 \cdot a \cdot w \cdot c}{\pi \cdot D^2} * \text{sen} \frac{\pi \cdot l}{c \cdot T} \quad (19)$$

Siendo:

a: la amplitud de la ola

T: periodo de la ola

c: velocidad de propagación de la ola

D: diámetro de la turbina

w: ancho de la cámara

l: largo de la cámara

A continuación, se muestran tanto los parámetros de la cámara OWC como los datos de las dimensiones de la turbina.

Ancho cámara (m)	5
Largo Cámara (m)	3,5
Diámetro turbina (m)	1
Ángulo de ataque (deg)	6,36

Tabla 11. Parámetros de la cámara y la turbina

Con esta información y con la ecuación 19, se calcula la velocidad de entrada en función de la estación del año.

Periodo del año	Altura Ola (m)	Amplitud ola (m)	Periodo (s)	U (m/s)
Invierno	2,20	1,10	8,28	18,57
Primavera	1,53	0,76	6,55	16,25
Verano	1,12	0,56	5,50	14,08
Otoño	1,90	0,95	7,48	17,69

Tabla 12. Velocidad de entrada del flujo en función de las estaciones

Con todas las ecuaciones mencionadas anteriormente, vamos resolviendo el triángulo de velocidades, la fuerza de sustentación y de arrastre y el torque para cada estación.

Además, se fija una relación entre el coeficiente del flujo y la velocidad de rotación constante. Esta condición se establece porque maximiza la eficiencia aerodinámica y permite que la turbina se adapte al flujo, asegurando un rendimiento óptimo.

Periodo del año	U (m/s)	U/Ω	Ω (rad/s)	α	α (rad)
Invierno	18,57	0,075	247,55	6,36	0,11
Primavera	16,25	0,075	216,67	6,36	0,11
Verano	14,08	0,075	187,73	6,36	0,11
Otoño	17,69	0,075	235,83	6,36	0,11

Tabla 13. Resultados en función de las estaciones

Periodo del año	V_{GEO} (m/s)	U_t (m/s)	φ (rad)	φ_0 (rad)	V_{EFECT} (m/s)
Invierno	20,16	20,42	0,15	0,13	145,39
Primavera	17,84	17,88	0,15	0,13	127,25
Verano	15,66	15,49	0,15	0,13	110,26
Otoño	19,28	19,46	0,15	0,13	138,50

Tabla 14. Resultado en función de las estaciones

Periodo del año	ΔP (Pa)	RPM	L (N)	D (N)	Torque (Nm)
Invierno	6066,88	2363,94	2556,20	43,51	120,01
Primavera	4647,77	2069,07	1958,27	33,33	91,93
Verano	3489,12	1792,72	1470,09	25,02	69,01
Otoño	5505,91	2252,00	2319,84	39,49	108,91

Tabla 15. Resultado en función de las estaciones

Finalmente, una vez realizados estos cálculos se puede resolver la potencia útil y el rendimiento.

Periodo del año	Potencia Útil (kW)	Rendimiento
Invierno	29,71	33,29%
Primavera	19,92	33,29%
Verano	12,96	33,29%
Otoño	25,68	33,29%

Tabla 16. Potencia útil según las condiciones reales de cada estación

Como se puede apreciar, en invierno es cuando más potencial tiene la turbina, por tanto, para que las turbinas sean capaces de llegar al máximo de potencia, deben tener una potencia nominal de 30 kW.

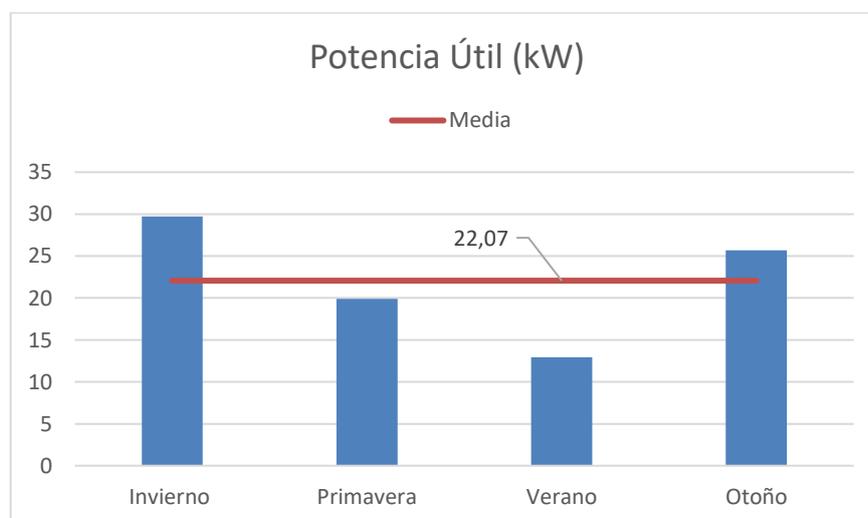


Ilustración 36. Potencia útil media y por estaciones

Finalmente, es necesario elegir el material de la turbina. Esta elección es muy importante ya que afecta directamente al rendimiento, la durabilidad y la eficiencia de la turbina y hay que tener en cuenta distintos factores que deben cumplir los materiales.

Las principales condiciones que deben cumplir el material es que tenga una alta resistencia a la corrosión ya que están expuestos a ambientes marinos. Este es un factor fundamental ya que la actividad corrosiva en agua de mar puede provocar daños muy graves en las estructuras metálicas y acortar su vida útil [6]. Además, es importante tener una alta resistencia mecánica y un coste del material aceptable.

Los materiales más recomendados son aleaciones de aluminio por su buena resistencia a la corrosión y ligereza. Acero inoxidable y titanio por su excelente resistencia a la corrosión y resistencia mecánica.

Haciendo un balance de todos los factores importantes y poniendo principal foco en la resistencia a la corrosión el material elegido es el acero inoxidable. En concreto se escoge el acero inoxidable 316 (también conocido como acero inoxidable de calidad marina) ya que tiene molibdeno que mejora su resistencia a los efectos corrosivos de la sal [7].

6.3.4 RESUMEN DE LAS MEDIDAS

Turbina:

Diámetro exterior (m)	1
Diámetro cubo (m)	0,68
Ángulo de ataque (deg)	6,36
Tipo de álabes	NACA 0018
Número de alabes	6
Potencia (kW)	30
Material	AISI 316

Tabla 17. Medidas de la turbina Wells

Cámara:

Número de cámaras	20
Ancho (m)	5
Largo (m)	3,5
Alto (m)	8

Tabla 18. Medidas de la cámara

6.3.5 DEMANDA CUBIERTA

En este subapartado se calculará la demanda que se puede cubrir con el número de turbinas que se van a construir y la potencia de las mismas. Teniendo en cuenta que tenemos 20 turbinas, cada una de ellas con una potencia nominal de 30 kW, se consigue un total de potencia instalada de 600 kW.

Suponiendo que las turbinas funcionen las 24 horas del día durante todo el año, lo que equivale a un total de 8760 horas anuales, la potencia generada que se obtiene en anualmente es:

$$Potencia\ Anual = 600\ kW * 8760\ horas = 5,256\ GWh$$

En el capítulo 5.2 “Demanda energética”, se calculó que toda la demanda pública de Villaviciosa (incluyendo edificios municipales y alumbrado público) era 4,026 GWh. De esta forma se puede suministrar toda la demanda del sector público, quedando un excedente de 1,23 GWh.

Estos 1,23 GWh restantes se pueden destinar a viviendas sociales. Teniendo en cuenta que el consumo medio por hogar es 10.331 kWh, se consigue abastecer a 119 viviendas sociales. Por lo que este proyecto cumple con varios de los objetivos de desarrollo sostenible.

Sin embargo, aunque la central está pensada para trabajar durante las 24 horas del día, puede haber momentos en los que no funcioné al 100% de su capacidad. Por tanto, para tener una visión más realista de la potencia que se puede cubrir se va a suponer que la central tiene un factor de capacidad del 50%. De esta manera la potencia anual generada es:

$$Potencia Anual = 600 \text{ kW} * 8760 \text{ horas} * 50\% = 2,628 \text{ GWh}$$

Con esta cantidad de energía, solo se puede cubrir el alumbrado público completamente y algunos de los edificios municipales de Villaviciosa. Por lo tanto, aunque la central bajo condiciones ideales puede cumplir con el total de la demanda pública, es importante tener en cuenta factores que pueden reducir el rendimiento para tener una planificación de la demanda cubierta más precisa.

Capítulo 7. OBJETIVOS DE DESARROLLO

SOSTENIBLE

Este proyecto también pretende conseguir otros objetivos alineados con el desarrollo sostenible. Los Objetivos de Desarrollo Sostenible de la Organización (ODS) de la Organización de Naciones Unidas son un conjunto de 17 objetivos globales que persiguen erradicar la pobreza, proteger el planeta y asegurar la prosperidad para todos.

En concreto, con la implementación de la tecnología OWC para la extracción de energía de las olas a través de las turbinas de Wells se enfoca en contribuir a los siguientes objetivos:

Objetivo 3, Salud y Bienestar: Este objetivo persigue garantizar una vida sana y promover el bienestar. Con el uso de esta tecnología se consigue reducir el uso de combustibles fósiles y las emisiones de gases de efecto invernadero. De esta forma ayuda a la calidad del aire que respiramos y por tanto a la salud de las personas.

Objetivo 7, Energía asequible y no contaminante: la persecución de este objetivo es fundamental ya que el consumo de energía es la principal causa del cambio climático y representa en torno al 60% de las emisiones mundiales de gases de efecto invernadero [1]. Para cumplir con este objetivo de desarrollo sostenible, es necesario aumentar las inversiones en energías renovables.

Objetivo 9, Industria, innovación e infraestructuras: En relación con este objetivo se busca impulsar proyectos de forma sostenible. La idea de este proyecto es generar energía de la forma más sostenible posible y por tanto ayudar a mejorar la innovación y la infraestructura.

Objetivo 12, Producción y consumos responsables: Como se ha mencionado anteriormente, uno de los principales objetivos es ahorrar en combustibles fósiles con la utilización de la energía undimotriz. De esta forma, se intenta conseguir un consumo responsable de los

combustibles, además de garantizar producciones sostenibles para las generaciones futuras. Para disminuir el consumo, se debe cambiar los hábitos de consumo y una de las principales medidas que se debe adoptar es sustituir los sistemas de suministros energético por otros más disponibles [2].

Objetivo 13, Acción por el clima: Según las Naciones Unidas, el 2019 fue el segundo año más caluroso de todos los tiempos y además los niveles de dióxido de carbono y otros gases de efecto invernadero aumentaron hasta niveles récord [3]. Por este motivo es necesario reducir los niveles y por tanto favorecer el clima.

Capítulo 8. ANÁLISIS DEL IMPACTO Y FINANCIERO

8.1 ANÁLISIS DE IMPACTO

Como se ha comentado en apartados anteriores, la energía undimotriz presenta muchas ventajas. Sin embargo, la instalación y operación de una central undimotriz implica distintos desafíos y consideraciones que deben ser evaluados a través de un Análisis de Impacto Ambiental.

Este capítulo se va a centrar en identificar, predecir y evaluar los impactos potenciales del proyecto sobre el medio ambiente, la sociedad y la economía. Este análisis se lleva a cabo antes de la implementación del proyecto con el objetivo de desarrollar medidas correctoras que minimicen los efectos negativos y potencien los beneficios. Se abordarán tres dimensiones clave: ambiental, social y económica. Cada una de estas dimensiones será examinada en detalle.

8.1.1 IMPACTO MEDIO AMBIENTE

La dimensión ambiental se centra en identificar, prever y mitigar los posibles efectos negativos sobre el entorno natural. Este enfoque estudia cómo la instalación y operación de una infraestructura pueden alterar los ecosistemas marinos y terrestres y los recursos naturales. En el caso del proyecto, es necesario comprender las interacciones entre la tecnología de la central undimotriz y el medio ambiente, protegiendo la biodiversidad, la calidad del agua, el paisaje y otros elementos del entorno natural.

Geología:

El puerto de Tazones, situado en el municipio de Villaviciosa con una geología predominantemente sedimentaria, caracterizada por la presencia de formaciones areniscas y lutitas del Cretácico. Presenta acantilados y zonas rocosas y depósitos de sedimentos marinos, que es necesario tener en cuenta a la hora de la construcción de la central

undimotriz. Además, sus acantilados contienen vestigios de huellas jurásicas [4]. La construcción puede implicar movimientos de tierra y alteraciones por lo que hay que realizar estudios geotécnicos para asegurar la viabilidad.

Biodiversidad:

En la biodiversidad, se debe tener en cuenta tanto la fauna como la flora y por tanto las especies y hábitats protegidos. En cuanto a la fauna, el grupo mayoritario es el de las aves acuáticas, casi todas de ellas migratorias, entre las más comunes las limícolas, garzas y nadadoras [5]. Su presencia es muy numerosa debido a que pueden encontrar abundante comida desde peces, crustáceos, moluscos, etc. Por tanto, Tazones es un hábitat para aves marinas y otras especies costeras.

Con respecto a la flora, la vegetación de Tazones destaca por tener especies adaptadas a las condiciones de humedad y salinidad. En la zona inundada por las mareas se localizan las praderas de *Zostera noltii* y rodales de *Spartina Marítima*. [6] Además crecen matorrales halófilos y vegetación de acantilados.

Calidad del agua

La calidad del agua es un aspecto fundamental que hay que tener en cuenta ya que puede afectar tanto a la fauna como la flora. Durante la implementación del proyecto, se produce un riesgo elevado por contaminación del agua y por tanto el agua pierda claridad. Es importante controlar tanto la contaminación al realizar la construcción y durante todos los mantenimientos que requiera.

Paisaje

El paisaje del puerto de Tazones destaca por las colinas y sus acantilados. Es un puerto asturiano con carácter imperial y pintoresco [7]. Es importante reducir el impacto negativo en el paisaje durante la construcción de la central para preservar el atractivo turístico de la zona.

Ruido

Tanto en la fase de construcción de la central como en el funcionamiento de esta. En la fase de construcción debido a la maquinaria y transporte de materiales se generará ruido. Hay que tenerlo en cuenta, ya que el ruido puede afectar a la fauna marina y a la comunidad de habitantes de tazones.

8.1.2 IMPACTO SOCIAL

El análisis del impacto social se enfoca en entender cómo un proyecto afecta a la comunidad y su calidad de vida. Evaluar el impacto social es fundamental para garantizar que el proyecto no solo sea aceptado por la comunidad, sino que también contribuya positivamente a su bienestar. En esta dimensión, se consideran factores como el empleo, la economía local, las actividades diarias de los residentes, y las implicaciones culturales y el turismo.

Actividad pesquera

El puerto de tazones destaca actualmente por su actividad pesquera y turística [8]. La pesca es una actividad tradicional, con una flota de barcos que se dedican principalmente a la pesca tradicional.

La actividad pesquera puede verse muy impactada por la construcción de la central undimotriz, ya que puede haber restricciones de acceso. Sin embargo, una vez la central esté en funcionamiento no habrá problemas de acceso, aunque si puede ocasionar algún problema debido a la migración de los peces.

Turismo

Como se ha mencionado en la actividad pesquera, Tazones destaca por su actividad turística, siendo una gran fuente de ingresos. Está catalogado como uno de los pueblos más bonitos de España por la asociación debido a su encanto histórico y su gastronomía.

El impacto visual, la alteración del entorno natural y el paisaje puede influir en la atracción turística y disminuir esta fuente de ingresos. Sin embargo, también puede suceder todo lo

contrario, ya que al ser una tecnología nueva puede atraer a personas o científicos que quieran observar el funcionamiento de la central.

8.1.3 IMPACTO FINANCIERO

En la dimensión económica se evalúa la viabilidad financiera del proyecto y sus repercusiones económicas a corto y largo plazo. Este análisis considera los costos asociados con la construcción y operación, y los beneficios económicos que se pueden obtener, tanto la generación de energía limpia como la reducción de emisiones de carbono.

8.1.3.1 Análisis económico

En este subapartado se va a realizar un análisis económico para ver la rentabilidad que puede tener el proyecto. A pesar de que el proyecto surja por la necesidad de cuidar el medio ambiente, disminuir el uso de combustibles fósiles y la contaminación, es muy importante que este proyecto sea viable.

Para realizar el análisis económico se va a determinar la cuenta de perdidas y ganancias de la central undimotriz, donde se va a estudiar la inversión inicial, los ingresos y costes de cada año y la amortización.

En la parte de Anexos, se va a dejar el cálculo detallado y el Excel utilizado.

8.1.3.1.1 Inversión inicial

Como es conocido, la inversión inicial de este tipo de proyectos suele ser muy elevada. En la inversión inicial, es necesario tener en cuenta tanto los costes de las turbinas como todos los otros costes que pueden ser preoperativos.

Para el cálculo de la inversión inicial, se ha basado en otros tipos de turbina y en la central de Mutriku. La central de Mutriku tuvo un coste de 2,7 millones de euros solo de la central y el precio unitario de las turbinas de Wells varían en función de distintos factores, como los materiales utilizados, la capacidad nominal y el tamaño de las turbinas. Sin embargo, el valor de las turbinas se puede estimar en entre 75.000€ y 100.000€. para el análisis de inversión

inicial se ha establecido un valor de 100.000€ por cada turbina de Wells de potencia nominal de 30 kW. Por tanto, como la central cuenta con 20 turbinas, el coste total de las turbinas asciende a 2 millones de euros.

En la inversión inicial, también es necesario tener en cuenta otro tipo de costes. Estos son los llamados costes preoperativos que se han estimado en un 25% del coste de las turbinas, siendo un total de 500.000€

Finalmente, la inversión inicial de la central undimotriz ubicada en Tazones asciende a 2,5 millones de euros.

8.1.3.1.2 Ingresos

Para calcular los ingresos de cada año, se tiene que estudiar el precio de venta de la energía y como puede ir variando a lo largo de los años para conseguir un análisis lo más realista posible.

Lo primero es conocer la producción de energía que genera la central. Este valor corresponde a 5256 MWh anualmente. Este valor se ha calculado en el apartado 6.3. 5 “Demanda cubierta” teniendo en cuenta que la central está formada por 20 turbinas con una potencia nominal de 30 kW y trabajando las 24 horas del día.

El precio de venta de la energía significa la tarifa a la que se va a vender la energía producida. Para tener un valor exacto, se ha tomado el precio de la electricidad del 2023 proporcionado por el OMIE, que es operador de mercado eléctrico designado. A continuación, se detalla el precio de la energía en €/MWh en función de los meses, siendo el precio anual de 87,1€/MWh.

Año de estudio	Mes de estudio	Precio medio aritmético	Precio máximo
2023	enero	69,55	220,00
	febrero	133,47	189,74
	marzo	89,61	190,00
	abril	73,73	166,06
	mayo	74,21	148,16
	junio	93,02	156,13
	julio	90,47	151,65
	agosto	96,05	180,34
	septiembre	103,34	170,00
	octubre	90,14	220,00
	noviembre	63,45	161,99
	diciembre	72,17	174,00
Resultados interanual		87,10	220,00

Ilustración 37. Precio medio del 2023 de venta de la electricidad según el OMIE ;Error! No se encuentra el origen de la referencia.

Es importante mencionar, la volatilidad del precio de la electricidad. Para tener una visión más realista se va a estimar la variación que puede tener en los próximos años. Basándonos en los datos proporcionados por OMIE, en 2020 el precio fue de 33,14 €/MWh. Como se puede analizar, el precio de la electricidad del 2020 al 2023 ha sufrido un gran aumento, y su variación ha sido del 156%.

Sin embargo, el precio actual de la electricidad en 2024 según OMIE es de 87,72 €/MWh.

$$\Delta (\%) = \frac{\text{Precio 2024} - \text{Precio 2023}}{\text{Precio 2023}} = \frac{87,72 - 87,1}{87,1} = 1\%$$

Como se puede analizar, el precio sigue subiendo, aunque no con la misma tendencia que desde 2020. Esta variación se va a tener en cuenta a lo largo de los años para los ingresos generados por la electricidad.

8.1.3.1.3 Costes

En cuanto a los costes de la central undimotriz, se tiene que analizar los costes preoperativos que van con la parte de inversión inicial y los costes de mantenimiento. Aunque ya se han tenido en cuenta todos los costes preoperativos, estos costes se estimaron en torno al 25% y son necesarios para hacer funcionar la central.

En este subapartado se va a estudiar los costes de operación y mantenimiento que tiene la central undimotriz. Se ha estimado que los costes de operación y mantenimiento de la central comenzaran el primer año con un 15% de los ingresos generados. De esta manera, se consigue tener un gasto proporcional a la capacidad de producción y por tanto tener en cuenta el rendimiento real del proyecto.

Cada 5 años, estos costes de operación y mantenimiento se incrementan en un 1%, llegando en el año 25 a un 22% de los ingresos generados. Este aumento es debido al desgaste que pueden tener los equipos y la necesidad de un mantenimiento más intensivo a medida que pasa el tiempo y se va desgastando los equipos.

8.1.3.1.4 Amortización

En este subapartado se va a calcular el plan de amortización de la inversión inicial de la central undimotriz. En este análisis se ha tenido en cuenta la depreciación anual de los activos y el método de amortización.

Se ha realizado una amortización lineal, teniendo en cuenta el coeficiente lineal máximo y el periodo de años máximo en función del tipo de elemento que sea. Estos coeficientes se muestran a continuación y son sacados del Impuesto de sociedades del BOE.

Tipo de elemento	Coefficiente lineal máximo	Periodo de años máximo
Obra civil		
Obra civil general	2%	100
Pavimentos	6%	34
Infraestructuras y obras mineras	7%	30
Centrales		
Centrales hidráulicas	2%	100
Centrales nucleares	3%	60
Centrales de carbón	4%	50
Centrales renovables	7%	30
Otras centrales	5%	40
Edificios		
Edificios industriales	3%	68
Terrenos dedicados exclusivamente a escombreras	4%	50
Almacenes y depósitos (gaseosos, líquidos y sólidos)	7%	30
Edificios comerciales, administrativos, de servicios y viviendas	2%	100

Ilustración 38. Amortización en función del tipo de elemento. BOE [10]

Como se puede ver en la ilustración 38, para una central renovable el coeficiente lineal máximo es del 7% y el periodo de años máximo son 30 años. El periodo mínimo de amortización es la inversa del coeficiente lineal máximo y se calcula de la siguiente manera:

$$\text{Periodo mínimo (años)} = \frac{1}{\text{coeficiente lineal máximo}} = \frac{1}{7\%} = 14,28 \text{ años}$$

Por tanto, la central undimotriz se debe amortizar entre los 14 y los 30 años para cumplir con la normativa. En este proyecto se ha establecido una amortización lineal de la inversión inicial en 20 años, por tanto, la cantidad anual de amortización corresponde a 100.000€ anuales.

8.1.3.1.5 Intereses

Para el cálculo de los intereses para la central, se va a utilizar el método francés. Este método se caracteriza por tener pagos periódicos a lo largo del tiempo, de esta forma se facilita la planificación financiera.

Para su cálculo se utilizan las siguientes expresiones:

$$\text{Anualidad} \rightarrow a = C_0 * \left(\frac{i}{1 - (1 + i)^{-n}} \right)$$

$$\text{Cuota de amortización} \rightarrow \Delta r = (a - C_0 * i) * (1 + i)^{r-1}$$

$$\text{Cuota de interés} \rightarrow Ir = a - \Delta r$$

Siendo:

- C_0 = capital inicial
- i = interés nominal
- n = número total de periodos
- r = año actual

8.1.3.1.6 Resultados

Teniendo en cuenta todo lo mencionado anteriormente, los ingresos y los costes, el diagrama de flujos de caja teórico queda de la siguiente manera:



Ilustración 39. Diagrama de flujos de caja

Como se puede analizar del diagrama, la instalación de la central undimotriz supone una gran inversión inicial. Sin embargo, luego cada año se va teniendo un beneficio en torno a los 300 mil euros.

A continuación, se va a mostrar en una tabla el balance cada año:

Año	Inversión	Beneficio	F.C Neto	Balance
0	-2500,00	0	-2500,0	-2500,0
1	0	318,4	318,4	-2181,6
2	0	323,1	323,1	-1858,5
3	0	327,8	327,8	-1530,7
4	0	332,6	332,6	-1198,1
5	0	337,5	337,5	-860,5
6	0	336,9	336,9	-523,6
7	0	341,9	341,9	-181,8
8	0	346,9	346,9	165,1
9	0	352,0	352,0	517,1
10	0	357,2	357,2	874,3
11	0	355,8	355,8	1230,1
12	0	361,1	361,1	1591,2
13	0	366,4	366,4	1957,6
14	0	371,8	371,8	2329,4
15	0	377,4	377,4	2706,8
16	0	375,0	375,0	3081,8
17	0	380,6	380,6	3462,4
18	0	386,2	386,2	3848,6
19	0	392,0	392,0	4240,6
20	0	397,8	397,8	4638,4
21	0	369,3	369,3	5007,7
22	0	375,2	375,2	5382,9
23	0	381,1	381,1	5764,0
24	0	387,2	387,2	6151,1
25	0	393,3	393,3	6544,4

Tabla 19. Flujos de caja

Como se puede ver en la tabla 19, la inversión inicial se recuperaría a partir del octavo año. Este análisis es teniendo en cuenta solo los flujos de caja, sin estudiar el valor del dinero a lo largo de los años. En la siguiente ilustración se puede ver cómo se va recuperando todo el dinero.

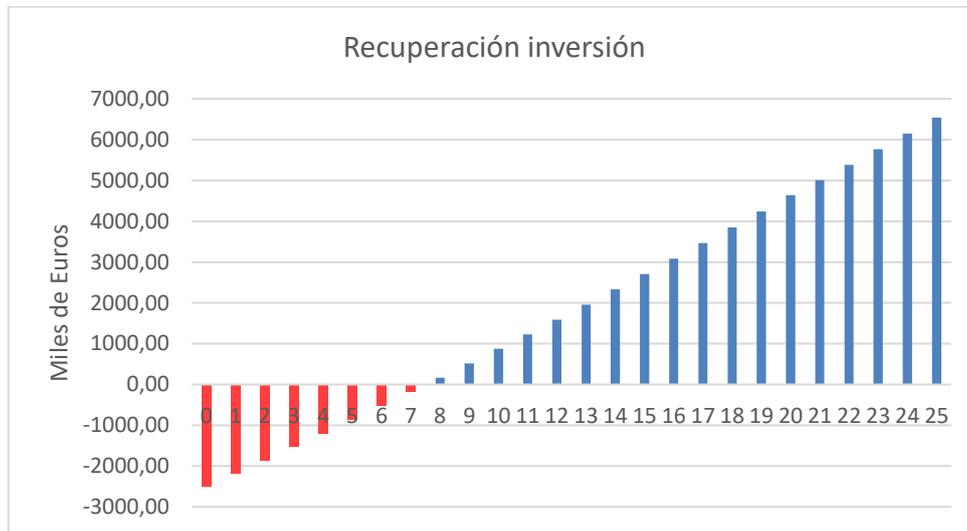


Ilustración 40. Recuperación de la inversión

Para tener una visión más realista, se va a realizar el análisis económico a través del valor actual neto (VAN). Este método es fundamental para estudiar la viabilidad económica del proyecto y mide la rentabilidad trayendo sus ingresos y costes futuros al presente. Es decir, este método tiene en cuenta el paso del tiempo y la variabilidad del valor del dinero a lo largo del tiempo. Este cálculo se va a calcular suponiendo una tasa de descuento anual igual al 10%.

El cálculo se realiza de la siguiente manera:

$$VAN = \frac{FC_1}{(1+d)^1} + \frac{FC_2}{(1+d)^2} + \dots + \frac{FC_N}{(1+d)^N} - INV$$

Siendo:

FC : flujo de caja de cada año del proyecto

INV : la inversión inicial del proyecto

d : la tasa de descuento anual

N : el número de años

Realizando este cálculo se obtiene un VAN: + 651.860,55€

Como era de suponer y se puede comprobar el valor del VAN es menor que haciendo el balance de los flujos de caja de cada año. Esto es debido a que el VAN tiene en cuenta el paso del tiempo. De todos modos, con este cálculo se demuestra que la inversión de la central undimotriz es viable.

A continuación, se calcula la TIR (tasa interna de retorno). Como sus siglas indica, es el porcentaje en el que su valor actual neto es igual a cero. En este proyecto el valor de la TIR es 13,11%.

Para que un proyecto sea viable, la tasa interna de retorno debe ser mayor que la tasa de descuento anual del proyecto. A continuación, se puede ver la influencia de la tasa de descuento en el valor actual neto.

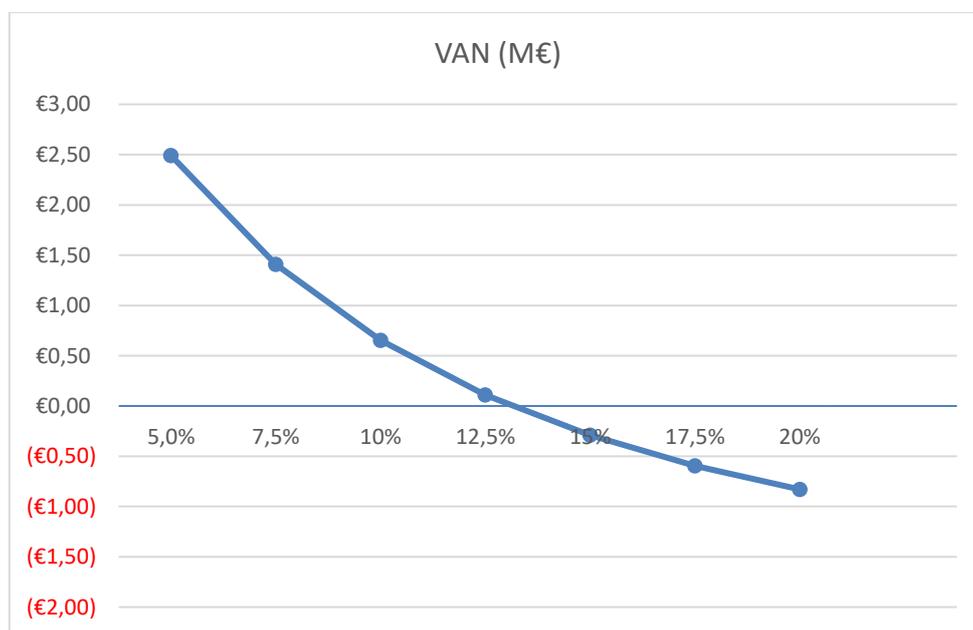


Ilustración 41. VAN en función de la tasa de descuento

Con esta ilustración, se puede analizar claramente que el proyecto es viable siempre que la tasa de descuento anual sea menor del 13% aproximadamente.

8.1.4 EFECTOS POSITIVOS

La central undimotriz presenta una infinidad de efectos positivos sin contar con la generación de energía renovable y sostenible. Obviamente, uno de los principales beneficios es desde el punto de vista ambiental ya que se reducirá la huella de carbono, se disminuirá las emisiones y por tanto se combatirá el cambio climático. Otros efectos positivos son los siguientes:

Turismo

Desde el punto de vista del turismo, la central se puede convertir en un gran punto de interés tanto para visitantes interesados como para investigadores. De esta forma también se puede conseguir que aumente la gente interesada en tecnologías renovables y colaborar en proyectos relacionados, y de esta forma, aumentar la preocupación por el medio ambiente y su cuidado.

Empleo

A su vez, la implantación de la central repercutirá directamente sobre la comunidad local y generará un gran número de empleos nuevos. No solo se mejorará en términos de ingresos y oportunidades laborales, sino que gracias al incremento de empleos se impulsará el desarrollo económico local y se podrán mejorar servicios e infraestructuras locales.

Conservación y restauración de hábitats

Gracias a su construcción, se puede participar en programas de recolección de desechos marinos y proyectos de reforestación marina. De esta manera, se contribuye a la limpieza del mar, mejorando la calidad del agua y proporcionando buenos hábitats para la fauna y la flora marina.

8.1.5 MEDIDAS CORRECTORAS

A pesar de todos los efectos positivos que puede tener, es necesario establecer algunas medidas correctoras para intentar que el impacto negativo que puede tener en otros ámbitos sea el menor posible. A continuación, se detallan algunas de las posibles medidas:

Diseño ambientalmente sostenible:

Esta medida consiste en utilizar tecnologías de construcción que sus niveles de emisión de ruidos sean mínimas al igual que la resuspensión de sedimentos. Este diseño ambiental también intentará emplear materiales no tóxicos y para prevenir derramos se utilizarán sistemas de contención.

Monitoreo continuo:

Aplicar un monitoreo continuo para ir evaluando el impacto tanto en los hábitats marinos, la fauna y la flora como en la calidad del agua. De esta manera se podrá ir ajustando las operaciones según vaya siendo necesario para cuidar el impacto ambiental.

Compensación ecológica:

Como el proyecto puede dañar la vida marina, se puede implementar proyectos de restauración en las áreas afectadas. Con esta iniciativa se puede mejorar la conservación de los hábitats marinos.

Medidas de mitigación durante la construcción

En primer lugar, realizar una planificación para la construcción. En esta planificación se deberá tener en cuenta lo siguiente:

- Evitar periodos de reproducción y migración de especies: de esta manera se sigue cuidando la fauna
- Evitar periodos de máximo turismo
- Restringir las horas de trabajo para molestar lo menos posible

Además, para la mitigación del ruido, se empleará maquinaria con silenciadores y barreras acústicas.

Capítulo 9. ANÁLISIS DE RESULTADOS Y

CONCLUSIONES

En esta capítulo se realizará una recapitulación detallada de los aspectos más importantes de todo el proyecto y se analizará si se han cumplido con los objetivos propuestos y la viabilidad económica del proyecto.

A lo largo del proyecto, se ha llevado a cabo el desarrollo y dimensionamiento de un dispositivo de aprovechamiento de la energía undimotriz para el abastecimiento de una población costera. El principal objetivo del proyecto era contribuir a la mitigación del cambio climático, para así reducir las emisiones de gases de efecto invernadero y poder contribuir a mejorar el medio ambiente.

Durante el proyecto, se han investigado diversas tecnologías marinas, así como todos dispositivos que mejor cumplierse con las expectativas del trabajo. Además, se han evaluado los posibles emplazamientos para la instalación del dispositivo seleccionado. En este estudio, se ha visto que la zona del mar Cantábrico presenta un gran potencial y que la utilización de la energía undimotriz presenta muchas ventajas.

Una vez realizado todo el estudio, se decide que el dispositivo más adecuado sea una columna de agua oscilante para aprovechar la energía undimotriz y la ubicación sea en el puerto de Tazones, por la presencia de un dique y su gran potencial.

Se realizaron los cálculos necesarios tanto para el potencial de la zona como para toda la demanda energética que se debe cubrir del emplazamiento elegido. Finalmente, se diseñó una turbina Wells, debido a su capacidad de giro independientemente del sentido del flujo, una condición fundamental para este tipo de aplicación. Esta turbina presenta un perfil simétrico NACA 0018 con 6 aspas. Se instalarán 20 turbinas a lo largo del dique, con una potencia

nominal de 30 kW cada una de ellas, lo que suma un total 600 kW de potencia total en la instalación.

Tras el análisis de los resultados, se puede afirmar que se ha cumplido con otro de los objetivos principales del proyecto, que es suministrar electricidad al municipio de Villaviciosa. En condiciones ideales de funcionamiento de la turbina, se puede administrar electricidad a toda la demanda pública (incluyendo edificios municipales y alumbrado público) y también proporcionar electricidad a 119 viviendas sociales. Sin embargo, dadas las condiciones de operación actuales de las turbinas, solo se puede abastecer el alumbrado público y algunos de los edificios del municipio.

En cuanto al análisis de impacto, se ha realizado un estudio completo sobre todos los impactos que puede tener la instalación de la central. Este análisis se ha centrado en los aspectos medioambientales, sociales y económicos. A pesar de identificar algunos impactos negativos, la instalación de la central presenta numerosos efectos positivos como puede ser, la promoción del turismo, la creación de empleo y la conservación y restauración de hábitats. Sobre los impactos negativos, se han establecido distintas medidas correctoras para minimizar el daño que puede causar la central.

En el análisis económico, se ha evaluado todos los ingresos y los costes asociados con la central, al igual que la inversión inicial. Se ha comprobado que el proyecto es rentable en términos económicos. A pesar de que la instalación tenga una gran inversión inicial, se ha demostrado que se recupera el dinero del capital invertido y se obtiene un valor actual neto positivo.

Además, este proyecto también ha cumplido con los objetivos de desarrollo sostenible, ya que ha sido capaz de generar energía limpia y no contaminante, se ha enfocado en mejorar el clima y en la salud y bienestar del municipio de Villaviciosa, Asturias.

En conclusión, la instalación de los dispositivos de columna de agua oscilante para aprovechar la energía undimotriz en el puerto de Tazones cumple con todos los objetivos establecidos y tiene unos resultados satisfactorios en varias dimensiones. Desde el punto de

vista ambiental, se ha reducido las emisiones de gases de efecto invernadero, promoviendo una energía más limpia y sostenible. Socialmente, el proyecto promueve el turismo y la creación de empleo, fomentando el desarrollo económico de Tazones y mejorando la calidad de vida. Económicamente, el análisis ha demostrado que se recupera la inversión inicial. En resumen, es necesario seguir estudiando este tipo de energía no contaminante, ya que ofrece muchos beneficios.

Capítulo 10. BIBLIOGRAFÍA

10.1 CAPÍTULO 1

- [4] ¿Y si aprovechamos la fuerza de las olas? PierNext. 2023. Disponible en: <https://piernext.portdebarcelona.cat/entorno/presente-y-futuro-de-la-energia-undimotriz/>
- [5] PRESS E. El Comercio: Diario de Asturias. Gijón, potencial productor de energía undimotriz. Disponible en: <https://www.elcomercio.es/20110811/asturias/asturias-productores-renovables-potencial-201108111831.html>
- [6] La energía en España. APPA Renovables. Disponible en: <https://www.appa.es/la-energia-en-espana/>
- [7] Evaluación de la calidad del aire en España. Disponible en: https://www.miteco.gob.es/content/dam/mitesco/es/calidad-y-evaluacion-ambiental/sgalsi/atm%20c3%b3sfera-y-calidad-del-aire/evaluaci%20c3%b3n-2022/Informe%20evaluacion%20calidad%20aire%20Espa%20c3%b1a%202022_02112023.pdf
- [8] NatGeoES. National Geographic. 2022. Explicación de qué son los combustibles fósiles. Disponible en: <https://www.nationalgeographic.es/medio-ambiente/explicacion-que-son-combustibles-fosiles>
- [9] Cambio climático. Desarrollo Sostenible. Disponible en: <https://www.un.org/sustainabledevelopment/es/climate-change-2/>

10.2 CAPÍTULO 2

- [1] Energía marina: Qué es, tipos, ventajas y desventajas | OVACEN. Disponible en: <https://ovacen.com/energia-marina/>
- [2] Energías del mar | Idae. Disponible en: <https://www.idae.es/tecnologias/energias-renovables/uso-electrico/energias-del-mar>

- [3] Energía verde gracias a las corrientes marinas a gran profundidad. 2018. Disponible en: https://www.ecoticias.com/energias-renovables/181715_energia-verde-gracias-corrientes-marinas-gran-profundidad
- [4] Nelson SI. Eadic. 2017 ¿Qué es la energía maremotriz? Disponible en: <https://eadic.com/blog/entrada/que-es-la-energia-maremotriz/>
- [5] Portillo G. Energía maremotérmica: qué es, características y funcionamiento. Renovables Verdes. 2021. Disponible en: <https://www.renovablesverdes.com/energia-maremotermica/>
- [6] Energías Renovables Marinas: Energía de gradiente salino. Energías Renovables Marinas. 2017. Disponible en: <https://energiasrenovablesmarinas.blogspot.com/2017/12/energia-de-gradiente-salino.html>

10.3 CAPÍTULO 3

- [7] Los pioneros de la energía de las olas en España – Proyecto Undimotriz. 2019. Disponible en: <https://undimotriz.frba.utn.edu.ar/los-pioneros-de-la-energia-de-las-olas-en-espana/>
- [8] La energía undimotriz. Planeta Eco. 2022. Disponible en: <https://planeta-eco.es/historia-de-las-energias-renovables-12-la-energia-undimotriz/>
- [9] Tema 2. Meteorología. Slide & Fun. 2020. Disponible en: <https://sf-nautica.com/tema-2-meteorologia/>
- [10] LAS OLAS CAP. Disponible en: https://files.redsauce.net/js/pdfjs/web/viewer.html?file=https%3A%2F%2Fsm1.redsauce.net%2FAppController%2Fcommands_RSM%2Fapi%2Fapi_getFile.php%3FitemID%3D74%26propertyID%3D20%26RStoken%3D59e8ac1045d03e2ff6564c0638315f38
- [11] Energía undimotriz: qué es, cómo funciona y tipos | OVACEN. Disponible en: <https://ovacen.com/energias-renovables/undimotriz-olamotriz/>
- [12] ¿Y si aprovechamos la fuerza de las olas? PierNext. 2023. Disponible en: <https://piernext.portdebarcelona.cat/entorno/presente-y-futuro-de-la-energia-undimotriz/>

- [13] Disponible en:
https://biblus.us.es/bibing/proyectos/abreproy/70175/fichero/1_CapituloI.pdf
- [14] De Alta a Baja tensión: Energía Undimotriz. Disponible en:
<https://altaabaja.blogspot.com/p/energia-undimotriz-u-olamotriz.html>
- [15] Energías Renovables. Energía Undimotriz. Disponible en:
<http://energiasrenovablesunig9.weebly.com/energiacutea-undimotriz.html>
- [16] Ibañez Ereño. Energías de las olas: Situación y futuro. En: La energía que viene del mar 2009. Disponible en:
<http://www.netbiblo.com/openurl.asp?genre=article&id=doi:10.4272/978-84-9745-265-6.ch3>
- [17] Energía undimotriz: «pelamis» y «penguin» - Dínamo Técnica. Disponible en:
<https://dinamotecnica.es/2021/12/energia-undimotriz-pelamis-y-penguin.html>

10.4 CAPÍTULO 4

- [1] Mutrikuko Udala. Planta undimotriz de Mutriku. Disponible en:
<https://www.mutriku.eus/es/turismo/mutriku/planta-olas>
- [2] Munguía SF. Analizamos los datos de la Central Undimotriz de Mutriku. DiarioRenovables | Disponible en:
<https://www.diariorenovables.com/2017/12/central-undimotriz-de-mutriku-analisis-datos-produccion-problemas.html>
- [3] Ministerio para la Transición Ecológica y el Reto Demográfico. Red de Áreas Marinas Protegidas de España (RAMPE). Disponible en:
<https://www.miteco.gob.es/es/cartografia-y-sig/ide/descargas/biodiversidad/rampe.html>

10.5 CAPÍTULO 5

- [1] Página Inicio | puertos.es. Disponible en: <https://www.puertos.es/es-es>
- [2] La Nueva España de Villaviciosa. Disponible en: https://buy-eu.piano.io/checkout/template/cacheableShow?aid=fOsT2rF5pe&templateId=OTDP4ESVZSKZ&templateVariantId=OTV1NN8R9U5NX&offerId=fakeOfferId&experienceId=EX3KVEEN8008&iframeId=offer_40e1658969944dde5114-

[0&displayMode=inline&pianoIdUrl=https%3A%2F%2Fid-
eu.piano.io%2Fid%2F&widget=template&url=https%3A%2F%2Fwww.lne.es](https://www.piano.io/widget=template&url=https%3A%2F%2Fwww.lne.es)

- [3] IDAE, Alumbrado en función del número de habitantes
- [4] IDAE; Consumos del Sector Residencial en España.

10.6 CAPÍTULO 6

- [1] Turbina de Wells: descripción general | Temas ScienceDirect. Disponible en: <https://www.sciencedirect.com/topics/engineering/wells-turbine>
- [2] Diseño y fabricación de un prototipo a pequeña escala de una turbina de aire, para el aprovechamiento de la energía marina, a bajo coste mediante técnicas de prototipado rápido
- [3] Henao R, Andrés D. Estudio de una turbina wells de bajo número de Reynolds. Disponible en: <http://hdl.handle.net/1992/9779>
- [4] Santa A, Lozano M, Pinilla AE. Generación de energía eléctrica con turbinas wells. Revista de Ingeniería.
- [5] NACA 0018 (naca0018-il). Disponible en: <http://airfoiltools.com/airfoil/details?airfoil=naca0018-il>
- [6] Marino I. Los Retos del Agua Salada: Elección de Materiales. Ingeniero Marino. 2021. Disponible en: <https://ingenieromarino.com/los-retos-del-agua-salada-eleccion-de-materiales/>
- [7] Materiales Resistentes al Agua Salada. Disponible en: <https://tameson.es/pages/materiales-resistentes-al-agua-salada>

10.7 CAPÍTULO 7

- [1] Moran M. Energía. Desarrollo Sostenible. Disponible en: <https://www.un.org/sustainabledevelopment/es/energy/>
- [2] Moran M. Consumo y producción sostenibles. Desarrollo Sostenible. Disponible en: <https://www.un.org/sustainabledevelopment/es/sustainable-consumption-production/>

- [3] Cambio climático. Desarrollo Sostenible. Disponible en:
<https://www.un.org/sustainabledevelopment/es/climate-change-2/>

10.8 CAPÍTULO 8

- [4] PLAYA Y PUERTO DE TAZONES 2020. Disponible en:
<https://www.surfcastingasturias.es/2020/10/11/playa-y-puerto-de-tazonas/>
- [5] La ría de Villaviciosa Asturias.com - guía turística del Principado. Disponible en:
<https://asturias.com/la-ria-de-villaviciosa/>
- [6] Turismo Asturias. Reserva Natural Parcial Ría de Villaviciosa. Disponible en:
<https://www.turismoasturias.es/descubre/naturaleza/espacios-protegidos/ria-de-villaviciosa>
- [7] Turismo Asturias. Tazonas. Disponible en:
<https://www.turismoasturias.es/descubre/costa/villas-marineras/marinera-tazonas>
- [8] Spain Film Commission. Localizaciones. Disponible en:
[//www.shootinginspain.info/es/localizaciones](http://www.shootinginspain.info/es/localizaciones)
- [9] OMIE [Internet]. [citado 10 de julio de 2024]. Disponible en: <https://www.omie.es/>
- [10] Ley 27/2014, de 27 de noviembre, del Impuesto sobre Sociedades.

ANEXO I

Anexo 1. Cálculo Potencial	94
Anexo 2. Cálculo Turbina	96
Anexo 3. Análisis Económico	99

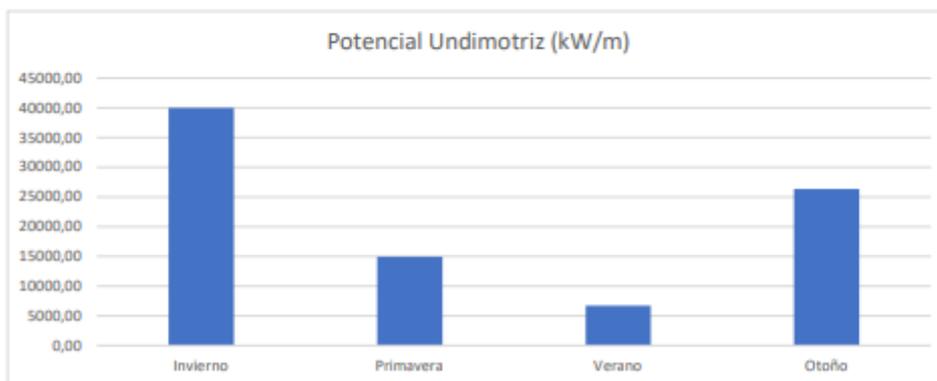
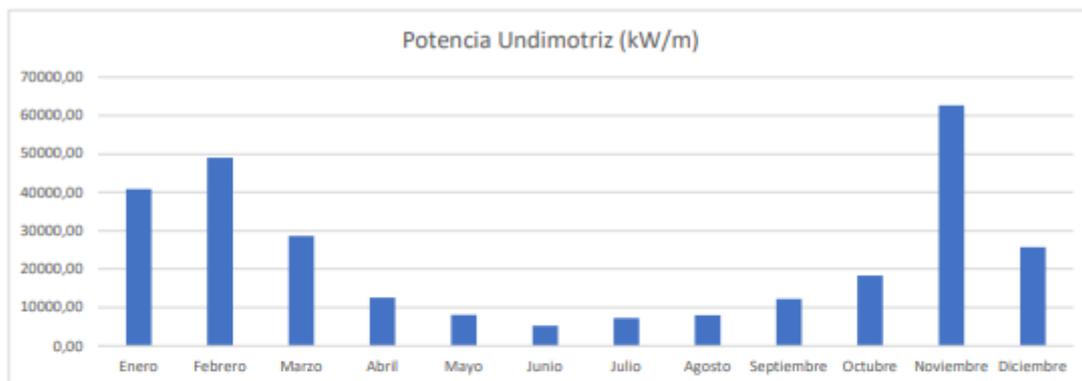
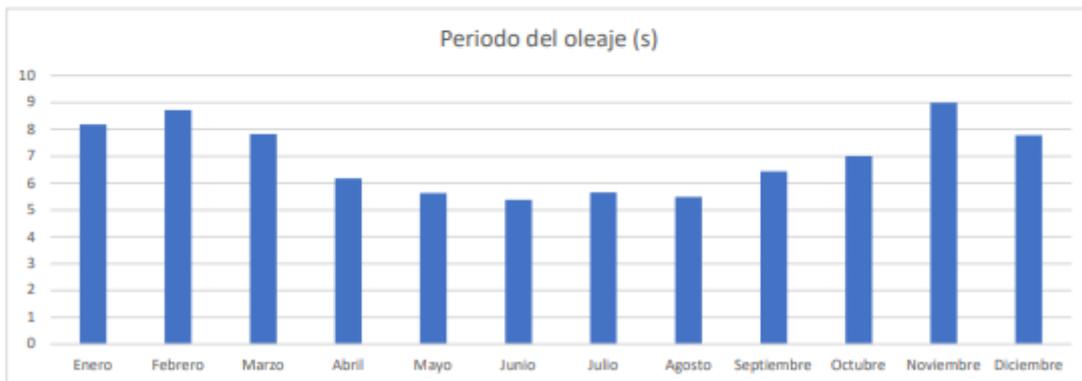
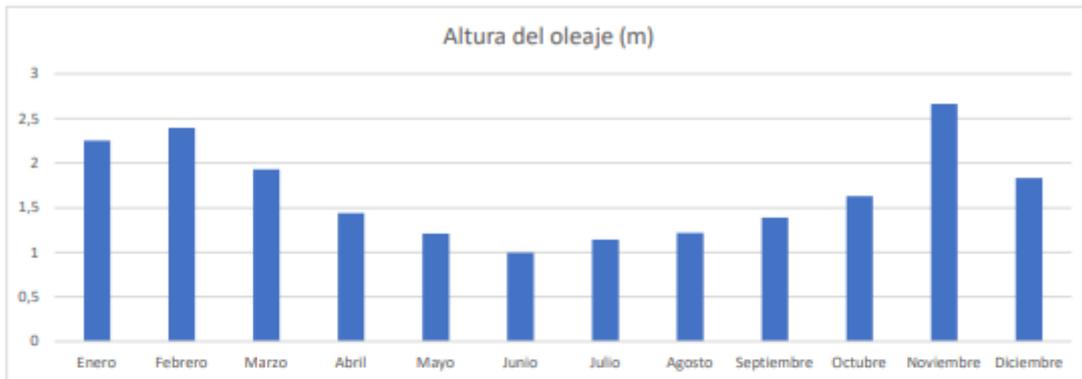
Anexo 1. Cálculo Potencial

Datos históricos para Oleaje | Punto SIMAR 3098038 | Series temporales

	Altura del oleaje	Periodo medio	Gravedad	Densidad	Potencial Undimotriz
ene-22	1,99	7,74	9,81	1025	30075,24
feb-22	3,01	10,37	9,81	1025	92187,87
mar-22	2,02	7,99	9,81	1025	31989,80
abr-22	1,37	6,05	9,81	1025	11141,88
may-22	1,16	5,38	9,81	1025	7103,30
jun-22	1,30	6,38	9,81	1025	10579,60
jul-22	1,11	5,21	9,81	1025	6298,62
ago-22	1,19	5,45	9,81	1025	7572,73
sep-22	1,31	5,70	9,81	1025	9597,97
oct-22	1,45	6,95	9,81	1025	14337,81
nov-22	2,79	9,58	9,81	1025	73170,49
dic-22	1,49	7,01	9,81	1025	15270,48
ene-23	2,52	8,63	9,81	1025	53774,19
feb-23	1,78	7,07	9,81	1025	21979,68
mar-23	1,84	7,67	9,81	1025	25479,63
abr-23	1,51	6,30	9,81	1025	14094,72
may-23	1,26	5,89	9,81	1025	9175,26
jun-23	0,69	4,37	9,81	1025	2041,46
jul-23	1,17	6,09	9,81	1025	8179,96
ago-23	1,24	5,51	9,81	1025	8312,99
sep-23	1,47	7,18	9,81	1025	15223,73
oct-23	1,81	7,06	9,81	1025	22694,67
nov-23	2,54	8,41	9,81	1025	53238,46
dic-23	2,18	8,56	9,81	1025	39916,16
2022	1,68	6,98	9,81	1025	25777,15
2023	1,67	6,90	9,81	1025	22842,58
total	1,68	6,94	9,81	1025	24309,86

Estaciones	Altura del oleaje	Periodo medio	Gravedad	Densidad	Potencial Undimotriz
Invierno	2,20	8,40	9,81	1025	39989,24
Primavera	1,53	6,55	9,81	1025	14971,69
Verano	1,12	5,50	9,81	1025	6731,37
Otoño	1,90	7,48	9,81	1025	26356,16

Media Meses	Altura del oleaje	Periodo medio	Gravedad	Densidad	Potencial Undimotriz
Enero	2,255	8,185	9,81	1025	40838,88
Febrero	2,395	8,72	9,81	1025	49078,30
Marzo	1,93	7,83	9,81	1025	28617,94
Abril	1,44	6,175	9,81	1025	12563,89
Mayo	1,21	5,635	9,81	1025	8095,18
Junio	0,995	5,375	9,81	1025	5221,40
Julio	1,14	5,65	9,81	1025	7204,77
Agosto	1,215	5,48	9,81	1025	7937,71
Septiembre	1,39	6,44	9,81	1025	12208,93
Octubre	1,63	7,005	9,81	1025	18261,88
Noviembre	2,665	8,995	9,81	1025	62684,13
Diciembre	1,835	7,785	9,81	1025	25721,29



Anexo 2. Cálculo Turbina

8 aspas radiales NACA 0015	
Curran y Gato 1997	
Diámetro exterior (mm)	590
Diámetro del cubo (mm)	400
Cuerda (mm)	125
Solidez (σ)	0,64
Velocidad de rotación (rpm)	2000

Punto máximo de eficiencia (Curran y Gato)	
ΔP_o^*	0,33
T^*	0,04
U^*	0,12
η_{max}	59,50%

NACA 0018 6 aspas	
Diametro exterior (m)	1
Radio exterior (m)	0,5
Diametro cubo (m)	0,68
h	0,68
Solidez (σ)	0,65
Velocidad de rotacion (rpm)	3000
Ω (rad/s)	314,16
Viscosidad cinematica	1,52E-05
Densidad	1,2
Número de aspas	6

Resultados	
U (m/s)	18,84955592
Q (m ³ /s)	14,42420869
ΔP (Pa)	9770,908357
T (Nm)	148,044066

Triangulo de velocidades	
Φ (rad)	0,119428926
Vgeo (m/s)	20,82896
Ut (m/s)	25,91813939
Φ_o (rad)	0,102642306
Vefect (m/s)	183,9660032
Re	392789,30
α (rad)	0,111035616
α (deg)	6,361872161
Cuerda (m)	0,285884931

Nº Reynolds	Cl	Cd
50000	0,8	0,037
100000	0,865	0,023
200000	0,82	0,017
500000	0,673	0,011
1000000	0,671	0,009

Periodo del año	Altura Ola	Amplitud ola	Periodo	U (m/s)	U/ Ω	Ω (rad/s)
Invierno	2,20	1,10	8,28	18,57	0,075	247,551
Primavera	1,53	0,76	6,55	16,25	0,075	216,673
Verano	1,12	0,56	5,50	14,08	0,075	187,733
Otoño	1,90	0,95	7,48	17,69	0,075	235,829

Periodo del año	Alpha	Alpha (deg)	Vgeo	Φ (rad)	Ut	Φ_o (rad)
Invierno	6,362	0,111	20,164	0,149	20,423	0,128
Primavera	6,362	0,111	17,839	0,149	17,876	0,128
Verano	6,362	0,111	15,658	0,149	15,488	0,128
Otoño	6,362	0,111	19,282	0,149	19,456	0,128

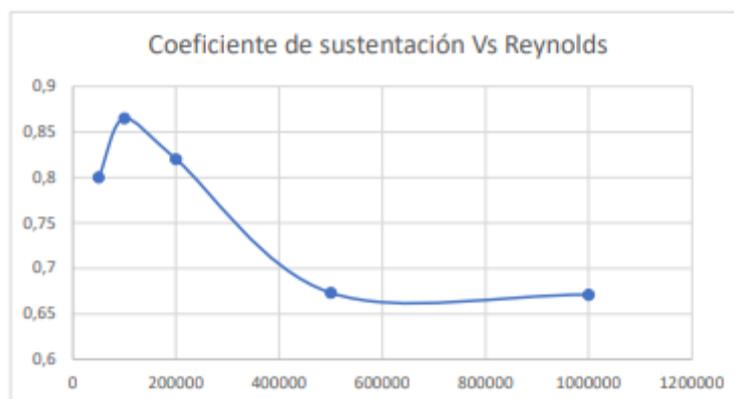
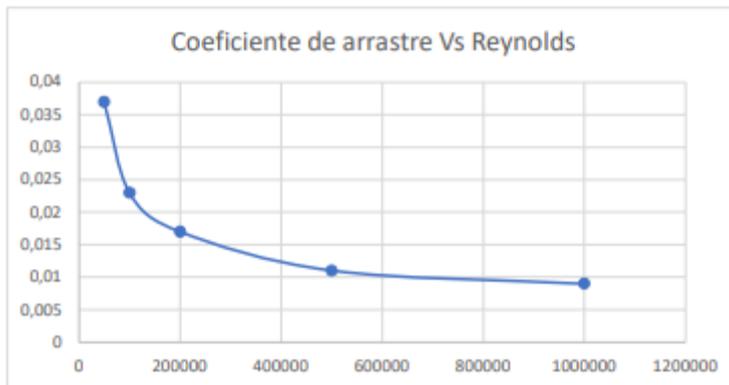
Periodo del año	Vefect	ΔP	RPM	L	D	Torque
Invierno	145,389	6066,879	2363,940	2556,197	43,510	120,002
Primavera	127,254	4647,768	2069,074	1958,274	33,332	91,932
Verano	110,257	3489,123	1792,718	1470,094	25,023	69,014
Otoño	138,504	5505,911	2252,000	2319,841	39,487	108,906

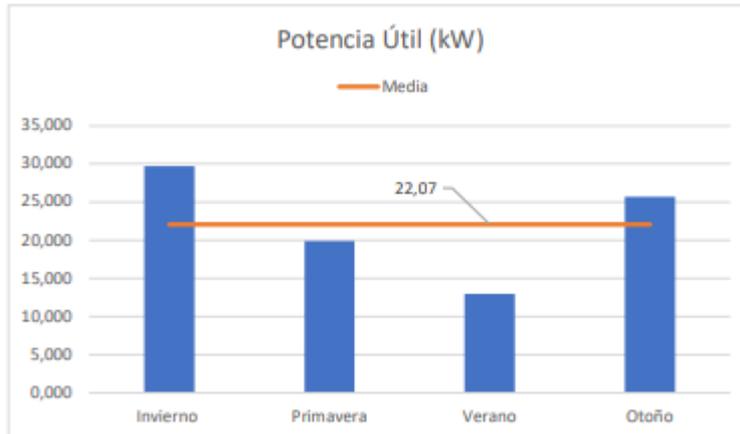
Periodo del año	Potencia Util (kW)
Invierno	29,71
Primavera	19,92
Verano	12,96
Otoño	25,68

Ancho cámara, w	5,00
Largo Cámara, l	3,50
Diametro turbina	1,00
Velocidad propagacion, c	
Invierno	12,93
Primavera	10,22
Verano	8,59
Otoño	11,68

Coeficientes	
Cl	0,705
Cd	0,012

Demanda Cubierta	
nº turbinas	20
Potencia (kW)	30
Potencia tota (kW)	600
Horas/año	8760
Potencia año (GWh)	5,256





Anexo 3. Análisis Económico

	0	15%	15%	15%	15%	15%	17%	17%	17%	17%	18%	18%		
	Año 0	Año 1	Año 2	Año 3	Año 4	Año 5	Año 6	Año 7	Año 8	Año 9	Año 10	Año 11	Año 12	
INVERSIÓN	2,50													
[+] Ingresos		0,4578	0,4652	0,4727	0,4803	0,4880	0,4959	0,5039	0,5120	0,5203	0,5287	0,5372	0,5458	
[-] Costes		0,0687	0,0698	0,0709	0,0720	0,0732	0,0818	0,0831	0,0845	0,0858	0,0872	0,0975	0,0991	
[=] EBITDA		0,3891	0,3954	0,4018	0,4083	0,4148	0,4141	0,4208	0,4275	0,4344	0,4414	0,4397	0,4468	
[-] Amortización		0,1000	0,1000	0,1000	0,1000	0,1000	0,1000	0,1000	0,1000	0,1000	0,1000	0,1000	0,1000	
[=] EBIT		0,2891	0,2954	0,3018	0,3083	0,3148	0,3141	0,3208	0,3275	0,3344	0,3414	0,3397	0,3468	
[-] Intereses		0,006299219	0,006120411	0,00593598	0,005745751	0,00554954	0,00534716	0,00513841	0,0049231	0,00470103	0,00447196	0,0042357	0,00399201	
[=] EBT		0,2828	0,2893	0,2958	0,3025	0,3093	0,3087	0,3156	0,3226	0,3297	0,3370	0,3355	0,3428	
[-] Impuestos (25%)		0,070707185	0,072320094	0,07395969	0,07562642	0,07732075	0,0771835	0,07890445	0,08065395	0,08243247	0,08424052	0,0838627	0,08569558	
[=] Beneficio neto		0,2121	0,2170	0,2219	0,2269	0,2320	0,2316	0,2367	0,2420	0,2473	0,2527	0,2516	0,2571	
CASH FLOWS														
Cash flow from operations		0,3184	0,3231	0,3278	0,3326	0,3375	0,3369	0,3419	0,3469	0,3520	0,3572	0,3558	0,3611	
FFFA (MC)	-2,50	0,3184	0,3231	0,3278	0,3326	0,3375	0,3369	0,3419	0,3469	0,3520	0,3572	0,3558	0,3611	
Miles de euros	-2500	318,42	323,08	327,82	332,63	337,51	336,90	341,85	346,88	352,00	357,19	355,82	361,08	
		18%	18%	18%	20%	20%	20%	20%	22%	22%	22%	22%	22%	
		Año 13	Año 14	Año 15	Año 16	Año 17	Año 18	Año 19	Año 20	Año 21	Año 22	Año 23	Año 24	Año 25
INVERSIÓN														
[+] Ingresos		0,5546	0,5636	0,5727	0,5819	0,5913	0,6008	0,6105	0,6203	0,6303	0,6405	0,6508	0,6613	0,6720
[-] Costes		0,1007	0,1023	0,1039	0,1162	0,1180	0,1200	0,1219	0,1239	0,1384	0,1407	0,1429	0,1452	0,1476
[=] EBITDA		0,4540	0,4613	0,4687	0,4657	0,4732	0,4809	0,4886	0,4965	0,4919	0,4998	0,5079	0,5161	0,5244
[-] Amortización		0,1000	0,1000	0,1000	0,1000	0,1000	0,1000	0,1000	0,1000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000
[=] EBIT		0,3540	0,3613	0,3687	0,3657	0,3732	0,3809	0,3886	0,3965	0,4919	0,4998	0,5079	0,5161	0,5244
[-] Intereses		0,003740649	0,003481389	0,003213976	0,00293816	0,002653661	0,00236022	0,00205755	0,00174537	0,00142337	0,00109124	0,00074868	0,00039533	3,0883E-05
[=] EBT		0,3502	0,3578	0,3655	0,3628	0,3706	0,3785	0,3866	0,3947	0,4905	0,4987	0,5071	0,5157	0,5244
[-] Impuestos (25%)		0,087558947	0,089453312	0,091379207	0,09069679	0,092644815	0,09462533	0,09663889	0,09868608	0,12262127	0,12468672	0,12678674	0,12892192	0,13109287
[=] Beneficio neto		0,2627	0,2684	0,2741	0,2721	0,2779	0,2839	0,2899	0,2961	0,3679	0,3741	0,3804	0,3868	0,3933
CASH FLOWS														
Cash flow from operations		0,3664	0,3718	0,3774	0,3750	0,3806	0,3862	0,3920	0,3978	0,3693	0,3752	0,3811	0,3872	0,3933
FFFA (MC)		0,3664	0,3718	0,3774	0,3750	0,3806	0,3862	0,3920	0,3978	0,3693	0,3752	0,3811	0,3872	0,3933
Miles de euros		366,42	371,84	377,35	375,03	380,59	386,24	391,97	397,80	369,29	375,15	381,11	387,16	393,31
VAN	0,65186 €	651.860,55 €												
TIR	13,11563%													

Año	Inversión	Beneficio	F.C Neto	Balance
0	-2500,00	0	-2500,0	-2500,0
1	0	318,4	318,4	-2181,6
2	0	323,1	323,1	-1858,5
3	0	327,8	327,8	-1530,7
4	0	332,6	332,6	-1198,1
5	0	337,5	337,5	-860,5
6	0	336,9	336,9	-523,6
7	0	341,9	341,9	-181,8
8	0	346,9	346,9	165,1
9	0	352,0	352,0	517,1
10	0	357,2	357,2	874,3
11	0	355,8	355,8	1230,1
12	0	361,1	361,1	1591,2
13	0	366,4	366,4	1957,6
14	0	371,8	371,8	2329,4
15	0	377,4	377,4	2706,8
16	0	375,0	375,0	3081,8
17	0	380,6	380,6	3462,4
18	0	386,2	386,2	3848,6
19	0	392,0	392,0	4240,6
20	0	397,8	397,8	4638,4
21	0	369,3	369,3	5007,7
22	0	375,2	375,2	5382,9
23	0	381,1	381,1	5764,0
24	0	387,2	387,2	6151,1
25	0	393,3	393,3	6544,4

