



GRADO EN INGENIERÍA EN TECNOLOGÍAS INDUSTRIALES

TRABAJO FIN DE GRADO

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

Autor: Victoria Vidal Beloso

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 2021/2022 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.: Victoria Vidal Beloso

Fecha: ...14.../ 07...../ ...2022...



Autorizada la entrega del proyecto

EL DIRECTOR DEL PROYECTO

Fdo.: María del Mar Cledera Castro

Fecha://

CLEDERA
CASTRO, MARIA
DEL MAR (FIRMA)

Firmado digitalmente por CLEDERA CASTRO,
MARIA DEL MAR (FIRMA)
Nombre de reconocimiento (DN):
CN=CLEDERA CASTRO, MARIA DEL MAR
(FIRMA), GIVENNAME=MARIA DEL MAR,
SURNAME=CLEDERA,
SERIALNUMBER=33506014M, C=ES
Fecha: Thu Jul 14 19:21:44 GMT+02:00 2022



GRADO EN INGENIERÍA EN TECNOLOGÍAS INDUSTRIALES

TRABAJO FIN DE GRADO

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

Autor: Victoria Vidal Beloso

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: Vidal Beloso, Victoria

Director: Cledera Castro, María del Mar

Entidad Colaboradora: ICAI – Universidad Pontificia Comillas

RESUMEN DEL PROYECTO

1. Introducción

Uno de los principales problemas de la actualidad es la contaminación, así como la disminución de las fuentes comunes de energía como el carbono o el gas. El uso de estos últimos recursos está teniendo grandes consecuencias en el clima, por este motivo surge la necesidad de hacer uso de las energías renovables.

Las energías renovables son fuentes de energía que se oponen al cambio climático al apoyarse en recursos naturales. Son recursos limpios e ilimitados con cero emisiones de dióxido de carbono u otros gases de efecto invernadero, que evitan el calentamiento global. Entre estas energías encontramos las energías del mar, concretamente la energía de las olas o Undimotriz.

El nivel de desarrollo técnico de la energía undimotriz no está muy desarrollado a pesar de existir zonas con gran potencial. Estas zonas son aquellas en las que los vientos del Oeste abundan y tienen prolongadas líneas costeras. Entre estas zonas destacan la costa oeste de Europa y EE. UU., Australia y Sudáfrica. Dentro de la costa oeste de Europa, destacamos tres zonas de España. En primer lugar, Galicia ofrece los valores de potencial energético más altos, de entre 40 y 45 kW/m, en segundo lugar, se encuentra la zona del mar Cantábrico que ofrece un potencial en torno a 30 kW/m y, por último, la zona norte de Canarias con un potencial de 20 kW/m. [1]

El presente proyecto tiene como objetivo el diseño de un dispositivo energético para abastecer a una población costera mediante el aprovechamiento del movimiento de las olas. Debido a que Galicia está considerada la zona con los valores de potencial energético más elevados [2], se ha seleccionado como ubicación Arteixo, un pueblo de A Coruña, lugar que se ha reconocido en la hoja de ruta de un proyecto para el desarrollo de las energías del mar por el Ministerio para la Transición Ecológica y el Reto Demográfico como por la segunda zona experimental del mundo con mayor concentración de energía de las olas [3].

Se ha seleccionado como dispositivo a diseñar una columna de agua oscilante (OWC). En este sistema, el agua de la onda cae a una cámara vacía donde el movimiento de las olas mueve periódicamente el aire hacia arriba y hacia abajo, impulsando turbinas para generar electricidad.

2. Metodología

Para llevar a cabo este proyecto se comenzará realizando un estudio de las distintas energías renovables que existen y de los motivos actuales por los cuales son necesario su uso. Entre estas energías se profundizará en el estudio de la energía de los mares concretamente en la energía undimotriz, la energía de las olas, analizando sus características, ventajas y desventajas.

Durante el estudio de esta energía se hablará de los diferentes métodos que existen actualmente para su aprovechamiento y del que se ha seleccionado para diseñar, con sus razones, ventajas y contras. A continuación, una vez se ha explicado los tipos de tecnología existentes y se ha elegido justificadamente la que se va a llevar a cabo durante el proyecto, se hará un estudio de las zonas de la península ibérica donde hay más potencial para la energía undimotriz y basándonos en ello y en las características de los mares y altura y periodo de las olas en esos lugares se elegirá el emplazamiento donde centrar este proyecto.

En tercer lugar, conociendo el lugar idóneo para realizar la instalación, se conocerá el consumo energético de este y con los datos procedentes de las características del mar en ese punto y de la altura y periodo de las olas, se calculará el potencial undimotriz de la zona y se comprobará si el dispositivo que se va a diseñar es adecuado para ello. Con los datos del flujo energético que es capaz de suministrar el dispositivo OWC en el emplazamiento seleccionado, se comenzará con los cálculos para el diseño de la turbina. Una vez diseñada la turbina se calculará la potencia útil capaz de suministrar por turbina y por último teniendo en cuenta las horas de funcionamiento de la central se estimará el flujo energético capaz de suministrar.

3. Resultados

A partir de los datos de la boya Langosteira II obtenidos por Puertos del Estado [4] de la altura y periodo de las olas, hemos podido obtener el potencial undimotriz a una distancia indefinida de la costa. Según los datos que tenemos de la centrales undimotrices ya existentes vemos como el potencial a medida que se acerca la ola a la costa se reduce en torno a un 50% .

Mes	Potencial Undimotriz (kW/m)
VERANO	13,849
OTOÑO	35,572
INVIERNO	59,16
PRIMAVERA	12,39

Tabla I: Potencial undimotriz en la costa según la estación del año (Datos: Puertos del Estado; Fuente: elaboración propia).

Una vez que tenemos los datos de la altura y del periodo de las olas, así como el potencial undimotriz de la zona que hemos elegido, pasamos a diseñar la turbina. El diseño de la turbina parte de los resultados obtenidos en el estudio de Curran y Gato [5] y se ha establecido como diámetro 1,25 m para que sea ligero y una velocidad de rotación de 3000 rpm. Además, se elige un perfil simétrico NACA0018 y el número de aspas se establece en 6.

Para las dimensiones y número de cámaras de tecnología OWC nos basamos en los datos que tenemos de la central de Mutriku. Al contar en el Puerto Exterior de Arteixo con un dique de abrigo con dimensiones mucho superiores a las de Mutriku se instalarán aproximadamente el doble de cámaras. Las cámaras tendrán una longitud de 5 m, 3,5 metros de ancho y una altura de 10 metros, valores ligeramente superiores a los de las cámaras de la central de Mutriku.

Conocidas las dimensiones de la turbina se empieza su diseño obteniendo como resultados los siguientes.

φ (rad)	0,1194289
V_{geo} (m/s)	26,0362
U_t (m/s)	32,397674
φ_0 (rad)	0,1026423
V_{fec} (m/s)	229,9575
Re	613733,283
α (rad)	0,1110356
α (deg)	6,3618722

Tabla II: Resultados de la turbina Wells tras resolver el triángulo de velocidades (elaboración propia).

Una vez hemos obtenido el ángulo de ataque y conociendo las dimensiones de las cámaras de tecnología OWC comenzamos con el diseño de la turbina con datos reales. A partir de la altura y del periodo de las olas y estableciendo una relación constante entre la velocidad del flujo y la velocidad de rotación con el objetivo de optimizar el rendimiento de la turbina, obtenemos el rendimiento y la potencia útil por estación.

Periodo del año	Potencia útil por turbina (kW)	Rendimiento(%)
Invierno	30,406	32,438
Primavera	12,746	32,438
Verano	15,137	32,438
Otoño	24,650	32,438
Media	20,75	

Tabla III: Potencial útil y rendimiento por turbina (elaboración propia).

Resumen:

- Turbina:

Diámetro Exterior (m)	1,25
Diámetro Cubo (m)	0,85
Número de aspas, B	6
α (deg)	6,362
Potencia (kW)	35
Perfil simétrico	NACA 0018

Tabla IV: Dimensiones de la turbina Wells (elaboración propia).

- Cámara OWC:

Ancho (m)	5
Largo (m)	3,5
Alto (m)	10
Número de camaras	30

Tabla V: Dimensiones de la cámara OWC (elaboración propia).

4. Conclusiones

Después de obtener los resultados del flujo energético que será capaz de suministrar la central undimotriz, se ve que se cumple el objetivo principal del proyecto, suministrar electricidad a la ciudad de Arteixo a partir de las olas del mar.

Se propuso como objetivo cubrir tanto el alumbrado de la ciudad como los edificios públicos, sin embargo, teniendo en cuenta la dificultad de que la central esté en funcionamiento las 24 horas del día por futuros problemas de mantenimiento, se estableció una media de 12 horas al día. Con estas horas de funcionamiento logramos cubrir todo el alumbrado y parte de los edificios. No obstante, el emplazamiento seleccionado cuenta con un dique de abrigo kilométrico por lo que ofrece la posibilidad de futuras ampliaciones de la instalación ya que esta se hará en el extremo más alejado del dique por posibles ruidos.

Además, se ha observado comparando con otras centrales undimotrices ya existentes, que el potencial undimotriz en la zona del Puerto Exterior de A Coruña es mayor que en otras zonas de España como por ejemplo la de Mutriku.

Una de las mayores desventajas de las centrales undimotrices es la gran inversión inicial que supone. Además, al ser un dispositivo situado en la costa se pierde potencial undimotriz debido a que las olas pierden energía por su rozamiento con el fondo

marino. Sin embargo, la turbina Wells es uno de los dispositivos con menor coste además de su ligereza para desplazar debido a su pequeño tamaño.

5. Referencias

- [1] Ingenieros. (Diciembre 2010) *Galicia, Cantabria y Canarias, las mejores zonas para aprovechar energía olas.*
- [2] G. Casco, Javier (2021, diciembre 14) *El otro «tesoro» de la costa: El Gobierno cree que Galicia puede ser líder en producción eléctrica con las olas » Galicia.*
- [3] Villar, M. (2021, diciembre 15). *Punta Langosteira: De aprovechar las olas a realizar ensayos de energía eólica marina.* La Opinión de A Coruña.
- [4] *Predicción de oleaje, nivel del mar ; Boyas y mareógrafos | puertos.es.*
<https://www.puertos.es/es-es/oceanografia/Paginas/portus.aspx>
- [5] *Álvaro E. Pinilla, Generación de energía eléctrica con turbinas wells.*
<https://doi.org/10.16924/revinge.15.8>

DEVELOPMENT AND SIZING OF A WAVE ENERGY DEVICE FOR THE ENERGY SUPPLY OF A COASTAL POPULATION.

Author: Vidal Beloso, Victoria.

Supervisor: Cledera Castro, María del Mar.

Collaborating Entity: ICAI – Universidad Pontificia Comillas

ABSTRACT

1. Introduction

One of the main problems today is pollution, as well as the decrease of common energy sources such as carbon or gas. The use of these last resources is having great consequences on the climate, for this reason the need to make use of renewable energies arises.

Renewable energies are energy sources that oppose climate change by relying on natural resources. They are clean and unlimited resources with zero emissions of carbon dioxide or other greenhouse gases, which prevent global warming. Among these energies we find sea energy, specifically wave energy or Undimotriz.

The level of technical development of wave energy is not very developed despite the existence of areas with great potential. These areas are those with abundant westerly winds and long coastlines. These areas include the west coast of Europe and the USA, Australia and South Africa. Within the west coast of Europe, we highlight three areas in Spain. Firstly, Galicia offers the highest energy potential values of between 40 and 45 kW/m, secondly, the Cantabrian Sea area offers a potential of around 30 kW/m and, finally, the northern Canary Islands with a potential of 20 kW/m. [1]

The aim of this project is the design of an energy device to supply a coastal population through the use of wave motion. Due to the fact that Galicia is considered the area with the highest energy potential values [2], Arteixo, a town in A Coruña, has been selected as the location, a place that has been recognized in the roadmap of a project for the development of sea energies by the Ministry for Ecological Transition and Demographic Challenge as the second experimental area in the world with the highest concentration of wave energy [3].

An oscillating water column (OWC) has been selected as the device to be designed. In this system, wave water falls into an empty chamber where wave motion periodically moves air up and down, driving turbines to generate electricity.

2. Methodology

To carry out this project, we will begin with a study of the different renewable energies that exist and the current reasons why their use is necessary. Among these energies, we will study the energy of the sea, specifically wave energy, analyzing its characteristics, advantages, and disadvantages.

During the study of this energy, we will talk about the different methods that currently exist for its use and the one that has been selected for design, with its reasons, advantages and disadvantages. Then, once the existing types of technology have been

explained and the one to be carried out during the project has been chosen, a study will be made of the areas of the Iberian Peninsula where there is more potential for wave energy and based on this and on the characteristics of the seas and the height and period of the waves in those places, the site where to focus this project will be chosen.

Thirdly, knowing the ideal location for the installation, the energy consumption of this will be known and with the data from the characteristics of the sea at that point and the height and period of the waves, the energy flow capable of supplying the population will be calculated and it will be checked if the device to be designed is suitable for it. With the data of the energy flow that is capable of supplying the OWC device at the selected site, the calculations for the turbine design will begin. Once the calculations of the oscillating water column have been made, we will finish with a study of the environmental situation that the installation of this device has entailed, as well as an indicative budget.

3. Results

From the data of the Langosteira II buoy obtained by Puertos de Estado of the height and period of the waves we have been able to obtain the wave potential at an indefinite distance from the coast. According to the data we have from the Mutriku single-wave power plant, we can see how the potential is reduced by about 50% as the wave approaches the coast.

Mes	Potencial Undimotriz (kW/m)
VERANO	13,849
OTOÑO	35,572
INVIERNO	59,16
PRIMAVERA	12,39

Table 1: Wave potential according to the season of the year (Data: Puertos del Estado; Source: own elaboration).

Once we have the wave height and period data, as well as the wave potential of the area we have chosen, we proceed to design the turbine. The turbine design is based on the results obtained in the Curran and Gato study and has been established as a diameter of 1.25 m to be light and a rotation speed of 3000 rpm. In addition, a symmetrical profile NACA0018 is chosen and the number of blades is set at 6.

The dimensions and number of OWC technology cameras are based on the data we have from the Mutriku plant. Since the outer harbor of Arteixo has a breakwater with much larger dimensions than those of Mutriku, approximately twice the number of cameras will be installed. The chambers will be 5 m long, 3.5 m wide and 10 m high, values slightly higher than those of the chambers at the Mutriku plant.

Once the dimensions of the turbine are known, the design of the chambers is started and the following results are obtained.

φ (rad)	0,1194289
Vgeo (m/s)	26,0362
Ut (m/s)	32,397674
φ_0 (rad)	0,1026423
Vefec (m/s)	229,9575
Re	613733,283
α (rad)	0,1110356
α (deg)	6,3618722

Table 2:Results of the Wells turbine after solving the velocity triangle (own elaboration)

Once we have obtained the angle of attack and knowing the dimensions of the OWC technology chambers, we start with the design of the turbine with real data. From the height and period of the waves and establishing a constant relationship between the flow velocity and the rotation speed in order to optimize the turbine performance, we obtain the efficiency and the useful power per station.

Periodo del año	Potencia útil por turbina (kW)	Rendimiento(%)
Invierno	30,406	32,438
Primavera	12,746	32,438
Verano	15,137	32,438
Otoño	24,650	32,438
Media	20,75	

Table 3:Useful potential and performance per turbine (own elaboration).

Summary:

- Turbine:

Diámetro Exterior (m)	1,25
Diámetro Cubo (m)	0,85
Número de aspas, B	6
α (deg)	6,362
Potencia (kW)	35
Perfil simétrico	NACA 0018

Table 4: Dimensions of the Wells turbine (own elaboration).

- Chamber:

Ancho (m)	5
Largo (m)	3,5
Alto (m)	10
Número de camaras	30

Table 5: Dimensiones de la cámara OWC (elaboración propia).

4. Conclusions

After obtaining the results of the energy flow that the wave power plant will be able to supply, it can be seen that the main objective of the project, to supply electricity to the city of Arteixo from the waves of the sea, is fulfilled.

The objective was to cover both city lighting and public buildings; however, taking into account the difficulty of having the plant in operation 24 hours a day due to future maintenance problems, an average of 12 hours a day was established. With these operating hours we were able to cover all the lighting and part of the buildings. However, the selected site has a kilometer-long seawall, which offers the possibility of future extensions of the installation, since it will be located at the far end of the seawall to avoid possible noise.

In addition, it has been observed that the wave power potential in the area of the outer port of A Coruña is greater than in other areas of Spain, such as Mutriku, when compared to other existing wave power plants.

One of the major disadvantages of wave power plants is the large initial investment involved. In addition, as a device located on the coast, wave potential is lost because the waves lose energy due to friction with the seabed. However, the Wells turbine is one of the devices with the lowest cost in addition to its lightness to move due to its small size.

5. References

- [1] Ingenieros. (Diciembre 2010) *Galicia, Cantabria y Canarias, las mejores zonas para aprovechar energía olas.*
- [2] G. Casco, Javier (2021, diciembre 14) *El otro «tesoro» de la costa: El Gobierno cree que Galicia puede ser líder en producción eléctrica con las olas » Galicia.*
- [3] Villar, M. (2021, diciembre 15). *Punta Langosteira: De aprovechar las olas a realizar ensayos de energía eólica marina.* La Opinión de A Coruña.

- [4] *Predicción de oleaje, nivel del mar ; Boyas y mareografos | puertos.es.*
<https://www.puertos.es/es-es/oceanografia/Paginas/portus.aspx>
- [5] *Álvaro E. Pinilla, Generación de energía eléctrica con turbinas wells.*
<https://doi.org/10.16924/revinge.15.8>

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	11
Capítulo 2. Energías del mar	13
2.1 Tipos de energías del mar.....	13
2.1.1 Energías de las corrientes	13
2.1.2 Energía de las mareas o mareomotriz.....	14
2.1.3 Energía Maremotérmica	16
2.1.4 Energía del gradiente salino o Energía Azul	17
2.1.5 Energía de las olas o undimotriz.....	17
Capítulo 3. Teoría de la energía undimotriz.....	18
3.1 Historia	18
3.2 Las olas.....	19
3.2.1 Parámetros de una ola	19
3.2.2 Tipos de olas.....	20
3.2.3 Olas generadas por el viento.....	22
3.3 Potencial undimotriz.....	23
3.4 Clasificación de dispositivos	25
3.4.1 Según la distancia a la costa.....	25
3.4.2 Según su tamaño y orientación.....	27
3.4.3 Según el principio de captación	29
3.5 Ventajas y desventajas.....	35
3.5.1 Ventajas.....	35
3.5.2 desventajas	35
Capítulo 4. Emplazamiento y dispositivo	36
4.1.1 Elección.....	36
4.1.2 Planta de mutriku	36

4.2 Emplazamiento.....	37
Capítulo 5. Cálculos	40
5.1 Potencial Undimotriz.....	40
5.2 demanda energética	44
5.3 puerto exterior	45
Capítulo 6. Turbina wells	47
6.1 introducción.....	47
6.2 principio de funcionamiento.....	48
6.2.1 Notación	48
6.2.2 Diseño aerodinámico.....	49
6.2.3 Análisis dimensional.....	53
6.2.4 Diseño de la turbina.....	56
6.2.5 Demanda cubierta	65
Capítulo 7. Objetivos de desarrollo sostenible	67
Capítulo 8. Conclusiones.....	69
Capítulo 9. Bibliografía.....	71
9.1 Capítulo 1	71
9.2 Capítulo 2	71
9.3 Capítulo 3	72
9.4 Capítulo 4	74
9.5 Capítulo 5	74
9.6 Capítulo 6	75
9.7 Capítulo 7	76
ANEXO I	78

Índice de ilustraciones

Ilustración 1: Central undimotriz basada en una cámara de agua oscilante [6].....	10
Ilustración 2:Turbinas para el aprovechamiento de la energía a partir de las corrientes marinas [2].....	14
Ilustración 3:Generador Mareomotriz de Presa de Marea [3].	15
Ilustración 4:Generador Mareomotriz de Corriente de marea [3].	15
Ilustración 5:Generador Mareomotriz dinámica [4].....	16
Ilustración 6:Esquema de funcionamiento de una planta de energía maremotérmica de ciclo cerrado [5].....	16
Ilustración 7: Esquema de funcionamiento de una planta de energía del gradiente salino [6].	17
Ilustración 8: Esquema del Marmotor de Barrufet [2].	18
Ilustración 9:Parámetros de una ola [5].....	20
Ilustración 10:Esquema onda estacionaria [6].....	20
Ilustración 11:Esquema onda progresiva [7].	21
Ilustración 12:Acción de un viento constante sobre una zona determinada del mar [3].	22
Ilustración 13: Energía de una ola [8].	23
Ilustración 14: Proceso de creación de una ola [8].....	24
Ilustración 15: Distribución del potencial undimotriz alrededor del planeta [8].....	24
Ilustración 16: Distribución del potencial en Europa [8].	25
Ilustración 17: Instalación de un dispositivo onshore [11].....	26
Ilustración 18: Instalación de un dispositivo nearshore [12].	26
Ilustración 19: Convertidor undimotriz flotante offshore [13].....	27
Ilustración 20: Clasificación de dispositivos según su tamaño y orientación [10].....	28
Ilustración 21: Clasificación de dispositivos según el principio de captación [10].....	29
Ilustración 22: Comportamiento de una turbina [15].	30
Ilustración 23: Convertidores de energía de las olas OWC [16].	31
Ilustración 24: Esquema de funcionamiento [17].....	31
Ilustración 25: El oscilador de la ola de Arquímedes [8].	33

Ilustración 26: Cuerpo flotante; El Pelamis [19].	34
Ilustración 27: Wave Dragon Dinamarca [20].	34
Ilustración 28: Central undimotriz de Mutriku [3].	37
Ilustración 29: Mapa Galicia (modificación propia) [5].	38
Ilustración 30: Red de Áreas marinas Protegidas (modificación propia) [4].	38
Ilustración 31: Red de Áreas Marinas Protegidas [4].	38
Ilustración 32: Altura significativa del oleaje en función del mes del año (elaboración propia).	42
Ilustración 33: Potencial undimotriz en función del mes del año (elaboración propia).	42
Ilustración 34: Periodo del oleaje en función del mes del año (elaboración propia).	43
Ilustración 35: Potencial undimotriz en función de la estación del año (elaboración propia).	43
Ilustración 36: Plano esquemático de faros y balizas.	46
Ilustración 37: Funcionamiento de la tecnología OWC [2].	47
Ilustración 38: Esquema de la turbina Wells[2].	48
Ilustración 39: Diagrama de velocidades ideal y real de una turbina Wells[2].	50
Ilustración 40: Relación de ángulos entre el diagrama de fuerzas sobre el perfil de un álabe y el diagrama de velocidades [2].	51
Ilustración 41: Diagrama de fuerzas y velocidades sobre el perfil de un álabe [2].	51
Ilustración 42: Comportamiento de perfiles simétricos a bajos números de Reynolds. Coeficiente de sustentación [5].	55
Ilustración 43: Comportamiento de perfiles simétricos a bajos números de Reynolds. Relación sustentación/arrastre [5].	55
Ilustración 44: Efecto del número de Reynolds sobre la eficiencia máxima de una turbina Wells [5].	56
Ilustración 45: Coeficiente de sustentación para un ángulo de ataque de $6,36^\circ$ en función del número de Reynolds [6]. (elaboración propia)	60
Ilustración 46: Coeficiente de sustentación para un ángulo de ataque de $6,36^\circ$ en función del número de Reynolds [6]. (elaboración propia)	60

Índice de tablas

Tabla 1: Potencial undimotriz según los meses del año (elaboración propia, datos: Puertos de estado).....	41
Tabla 2: Potencial undimotriz en función de las estaciones del año (elaboración propia, datos: Puertos de Estado).....	41
Tabla 3: Resultados obtenidos por Curran y Gato en el punto máximo de eficiencia. (Datos: Curran y Gato,1997. Elaboración propia).....	57
Tabla 4: Datos de la turbina (elaboración propia).	57
Tabla 5: Resultados obtenidos a partir de los datos de la turbina y los números adimensionales de Curran y Gato. (elaboración propia).	58
Tabla 6: Tabla 6: Resultados obtenidos al resolver el triángulo de velocidades (elaboración propia).....	59
Tabla 7: Coeficientes de sustentación y arrastre para un ángulo de ataque de $6,36^\circ$ en función del número de Reynolds [6]. (elaboración propia).	59
Tabla 8: Dimensiones de la cámara OWC (elaboración propia).	62
Tabla 9: Dimensiones turbina (elaboración propia).	62
Tabla 10: Velocidad de entrada del flujo de aire en función de la altura y el periodo de las olas. (elaboración propia).	62
Tabla 11: Resultados según las cuatro estaciones del año (elaboración propia).	62
Tabla 12: Resultados según las cuatro estaciones del año (elaboración propia).	63
Tabla 13: Resultados según las cuatro estaciones del año (elaboración propia).	63
Tabla 14: Potencia útil y rendimiento de la turbina (elaboración propia)..	64
Tabla 15: Medidas de la turbina Wells (elaboración propia).....	64
Tabla 16: Medidas de la cámara OWC (elaboración propia).	64

CAPÍTULO 1. INTRODUCCIÓN

1.1 INTRODUCCIÓN

La energía es la capacidad que tiene un cuerpo para producir trabajo de distintas formas, por ejemplo, luz o calor. Se puede clasificar en renovable y no renovable. Las fuentes de energía no renovable son aquellas que encontramos en la naturaleza de forma limitada, es decir, no se regeneran, o su regeneración es más lenta que su ritmo de consumo. Sin embargo, las fuentes de energía renovables son aquellas que encontramos de forma ilimitada, se regeneran de manera continua por lo que se las considera inagotables [1].

El problema del uso de las energías no renovables, a parte de su existencia limitada, es que el uso de combustibles fósiles o la energía nuclear lleva consigo la emisión de gases de tipo invernadero que contribuyen al calentamiento global. Por este motivo, se quiere impulsar el uso de este tipo de fuentes de energía que puedan sustituir al uso de energías convencionales.

Además de tener ventajas con el medio ambiente y de ser inagotables, las energías renovables tienen ventajas económicas y sociales. Con su uso se reducirán muchas de las enfermedades causadas por la contaminación ya que según un estudio de Environmental Research el porcentaje actual de fallecimientos por contaminación asciende a uno de cada cinco en el mundo [2]. A su vez, podemos encontrar varios beneficios económicos ya que con su uso se reducirán las facturas de luz, agua y gas, y surgirán una gran cantidad de empleos tanto directos como indirectos. Son energías que se pueden desarrollar en cualquier parte del mundo por lo que puede favorecer el desarrollo de muchas ciudades.

Dentro de las energías renovables encontramos los siguientes tipos [3]:

- Solar: Energía renovable procedente del sol. Mediante el uso de placas fotovoltaicas se absorbe radiación solar y esta es transformada en electricidad. A

partir de la radiación solar se puede conseguir energía para calentar fluidos, esto es a lo que se llama energía solar termoeléctrica.

- Eólica: Energía renovable procedente del viento. Se utiliza aerogeneradores que transforman en energía eléctrica la fuerza del viento que hace que giren las aspas.
- Hidráulica: Energía renovable procedente del agua. Consiste en aprovechar la energía cinética y potencial de las masas de agua.
- Biomasa: Energía renovable procedente de las combustiones de residuos animales o vegetales.
- Geotérmica: Energía renovable procedente de la tierra. Se genera energía eléctrica aprovechando las altas temperaturas que se encuentran bajo la superficie terrestre.
- Energías del mar: Se genera electricidad a partir de la fuerza del mar. Entre estas se encuentra la energía renovable en las que este proyecto está centrado, la energía undimotriz. Esta energía se centra en el movimiento de las olas del mar para generar energía eléctrica.

Con la existencia de estas fuentes de energía se busca el uso de combustibles menos contaminantes. Por esto actualmente estamos viviendo una etapa de cambio energético en el que para reducir las emisiones de dióxido de carbono es necesario cambiar nuestras pautas de consumo. Por esto mismo, se busca el desarrollo de una no muy avanzada energía renovable, la energía undimotriz, y que España cuenta con un alto potencial energético marino.

1.2 ESTADO DE LA CUESTIÓN

Debido al impacto ambiental que tienen los combustibles fósiles, como el carbono y el petróleo, surge la necesidad de hacer uso de las energías renovables ya que son la alternativa más sostenible a este impacto del medio ambiente. Además de ser la mejor solución para este problema, estas energías son limpias e inagotables.

En España, según la Asociación de Empresas de Energía Renovable, los combustibles fósiles suponen el 74% de la energía primaria utilizada y los nucleares un 12.4%. Por otro lado, el 13.9% restante pertenece a las energías renovables. Dentro de la situación eléctrica española, estas energías ocupan un 39.7% de la generación. Dentro de este porcentaje de generación eléctrica por parte de estas energías, destacan la energía eólica, la energía solar fotovoltaica, la minihidráulica principalmente con un 66.8%, 11.2% y 8.2% respectivamente [4].

A pesar de que destaquen las energías mencionadas anteriormente frente a otras renovables como las procedentes del mar, el desarrollo de estas últimas puede llegar a ser clave para frenar el cambio climático. Si bien la energía undimotriz tiene escaso progreso, su estimación, debido a su gran potencial, es muy positiva.

Al contrario que con otras energías renovables, la energía procedente de las olas, al haber una gran extensión oceánica y marina en la tierra y un constante oleaje puede ser extraída en todo momento. Además, al considerarse el agua un fluido con mucha energía hace que la energía undimotriz sea un recurso eficiente del que se puede sacar gran provecho necesitando menos territorio.

Para el desarrollo y extracción de la energía a partir de las olas existen diferentes sistemas. El elegido para diseñar en este proyecto es una columna de agua oscilante OWC (Oscilating Water Column). Este sistema extrae energía de las olas mediante los cambios de presión en el aire que producen las oscilaciones del agua del mar dentro de una cámara semisumergida o hueca abierta al mar con una turbina de aire conectada a un generador [5].

La columna de aire oscilante tiene ciertas ventajas frente a otros dispositivos. Al estar diseñado en la costa utilizando una turbina Wells, la cual es de pequeño tamaño y tiene un diseño sencillo, facilita el acceso y es inmune a las perturbaciones. A su vez, estos dispositivos se han demostrado prometedores como fuentes de energía renovables con bajo impacto medioambiental.

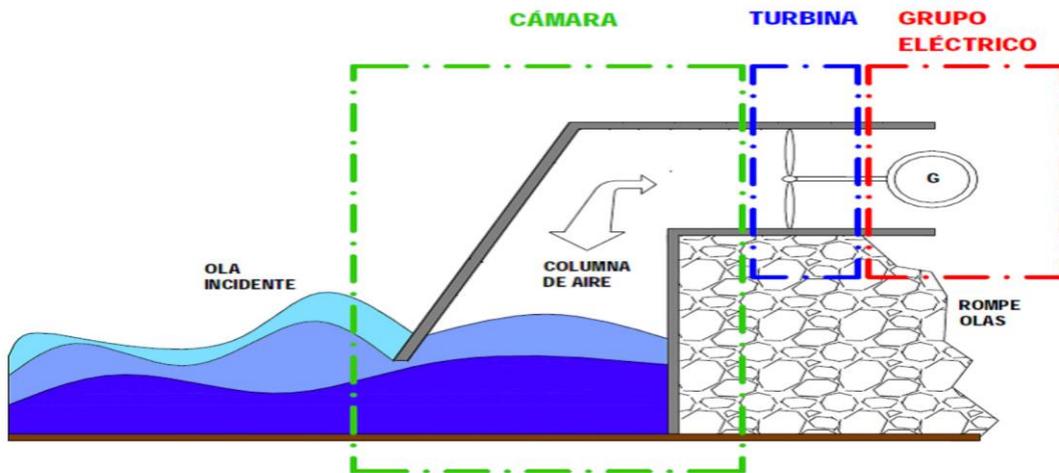


Ilustración 1: Central undimotriz basada en una cámara de agua oscilante [6].

1.3 MOTIVACIÓN

Actualmente, uno de los problemas más significativos de la sociedad es la contaminación. La contaminación no solo perjudica de manera directa al medio ambiente sino también a la salud de los seres humanos. El aire contaminado puede causar problemas respiratorios y empeorar enfermedades ya existentes.

Pese a las medidas que se han ido implementado contra la contaminación a lo largo de los últimos años y que por segundo año consecutivo en 2021 la contaminación en España ha decrecido un 37%, todavía existe un 73% de la población española que ha respirado aire contaminado en este último año. Dentro de la contaminación en España, los sectores más contaminantes son la quema de combustibles como el carbón o el petróleo, que suponen un 44% y un 13.8% respectivamente [4].

Debido a los altos niveles de contaminación y a las graves consecuencias que estos tienen, la alternativa más sostenible a la que podemos recurrir son las energías renovables. Estas

energías son fuentes de energía que se obtienen a partir de recursos naturales. A pesar de que las más comunes son la eólica, la hidráulica y la solar, existen otro tipo de energías renovables con gran potencial como la energía procedente de las olas. Un tipo de fuente de energía muy eficiente de la que se puede sacar un rendimiento por sus grandes ventajas.

Desarrollando las energías renovables seremos capaces de reducir la principal causa del cambio climático y calentamiento global en España y en el mundo, el dióxido de carbono expulsado en el proceso de extracción, producción y utilización de los recursos no renovables que utilizamos como fuentes de energía, como el petróleo y el carbono.

La motivación principal de este proyecto es el compromiso del medio ambiente mediante desarrollo de la energía undimotriz, una de las energías renovables que, pese a que no tiene mucho recorrido, tiene un gran potencial para contribuir a acabar con la contaminación en España. Esto se hará diseñando un proyecto piloto que se basará en el diseño y dimensionamiento una columna de agua oscilante para abastecer energéticamente a una población costera.

1.4 OBJETIVOS

El proyecto presente tiene como objetivo principal el desarrollo y dimensionamiento de un dispositivo para suministrar electricidad a partir de la energía undimotriz a un pueblo de A coruña (Arteixo), una de las zonas con mayor potencial del mundo, después de Gales. Para ello se ha seleccionado una columna de agua oscilante que se diseñará para que se adapte adecuadamente a las condiciones del emplazamiento.

Por otro lado, se busca que el modelo a diseñar sea una alternativa sostenible a las fuentes de energía no renovables para reducir los niveles de contaminación causados por la quema de combustibles fósiles que liberan gases contaminantes al medio. A su vez, se busca la mayor fiabilidad para conseguir que los costes de la instalación sean los menores posibles en cuanto a mantenimiento y funcionamiento.

Además, es necesario situar la columna de agua oscilante en un lugar donde el potencial de la energía undimotriz sea significativo. Para ello, hay que tener en consideración que a pesar de que toda la costa de la península ibérica tiene gran potencial existen zonas como el norte de las Islas Canarias, Galicia, Cantabria o Asturias que destacan frente al resto de costa.

Por último, se persigue contribuir al desarrollo de una no tan conocida energía renovable que tiene gran potencial en España. De este modo habrá una nueva alternativa al uso de combustibles fósiles, que, aparte de contaminar, son recursos limitados que se generan a partir de recursos finitos y tardan mucho en regenerarse.

Capítulo 2. ENERGÍAS DEL MAR

2.1 TIPOS DE ENERGÍAS DEL MAR

Alrededor de un 71% de la superficie terrestre es agua y de este 71% un 97% está constituido por océanos [7]. Los océanos cuentan con un gran potencial energético debido a que toda esta agua está en continuo movimiento, el cual puede ser aprovechado para transformarlo en electricidad. Este tipo de energía puede llegar a ser una fuente de energía crucial para el impulso de la obtención de energía eléctrica a partir de energías renovables y contribuir a satisfacer las necesidades energéticas de la población.

La energía marina se puede clasificar en 5 tipos según el tipo de aprovechamiento energético [1].

2.1.1 ENERGÍAS DE LAS CORRIENTES

Consta del aprovechamiento de la energía cinética que contienen las corrientes marinas. Las corrientes marinas son movimientos de las aguas de los océanos o mares originadas por varios factores como el movimiento rotacional terrestre, los vientos o las diferencias de salinidad o temperaturas.

El proceso de obtención de energía a partir de las corrientes marinas consiste en instalaciones submarinas con convertidores de energía cinética parecidos a los aerogeneradores que se utilizan en la energía eólica.



Ilustración 2: Turbinas para el aprovechamiento de la energía a partir de las corrientes marinas [2].

2.1.2 ENERGÍA DE LAS MAREAS O MAREOMOTRIZ

Consiste en aprovechar las mareas que se producen en los océanos y mares. Es decir, variaciones, ascenso o descenso, en el nivel del mar provocado por la acción gravitatoria del Sol y la Luna sobre la Tierra atrayendo hacia sí mismos el agua de tal manera que se modifica el nivel de esta.

A pesar de que la Luna tenga mucha menor masa que el sol, la atracción de la Luna sobre la tierra es mayor a la que ejerce el sol. Esto es debido a la proximidad de la Luna con la Tierra, por este motivo es la Luna el astro más importante en cuanto a la formación de mareas.

Para transformar la energía producida por las mareas se lleva a cabo las instalaciones de centrales mareomotrices en las que se construyen diques con turbinas en su parte inferior. El paso del agua en el embalse creado al construir el dique activa el funcionamiento de las turbinas.

Según la central mareomotriz las podemos clasificar en tres tipos:

- Presa de marea: Aprovechan la energía potencial existente en la diferencia de altura que se produce en los ascensos y descensos de las mareas. Las

presas son los diques que aprovechan el agua que se embalsa en las construcciones.



Ilustración 3: Generador Mareomotriz de Presa de Marea [3].

- Generador de la corriente de marea: Se basa en el aprovechamiento de la energía cinética del agua de manera similar a las turbinas eólicas.



Ilustración 4: Generador Mareomotriz de Corriente de marea [3].

- Energía mareomotriz dinámica: Consiste en la explotación de la interacción de la energía cinética y potencial en las corrientes de marea.

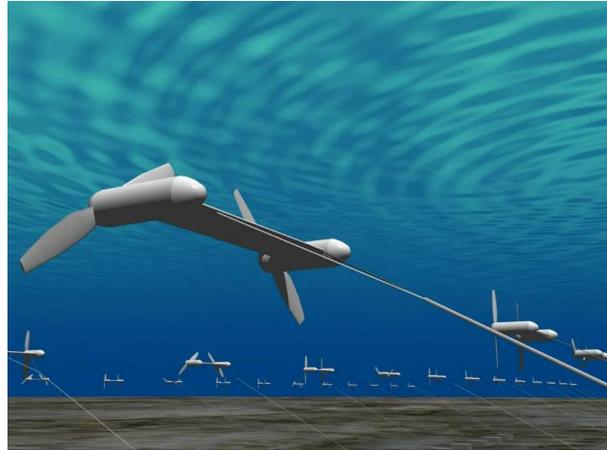


Ilustración 5: Generador Mareomotriz dinámica [4].

2.1.3 ENERGÍA MAREMOTÉRMICA

Se basa en el aprovechamiento de la energía térmica del mar basándose en la diferencia de temperaturas que existe entre los fondos marinos y la superficie del mar. Esta diferencia térmica debe ser de al menos 20°. Para llevar a cabo la transformación de la energía en electricidad se utiliza el ciclo de Rankine, siendo el foco frío el agua del fondo marino y el caliente la superficie.

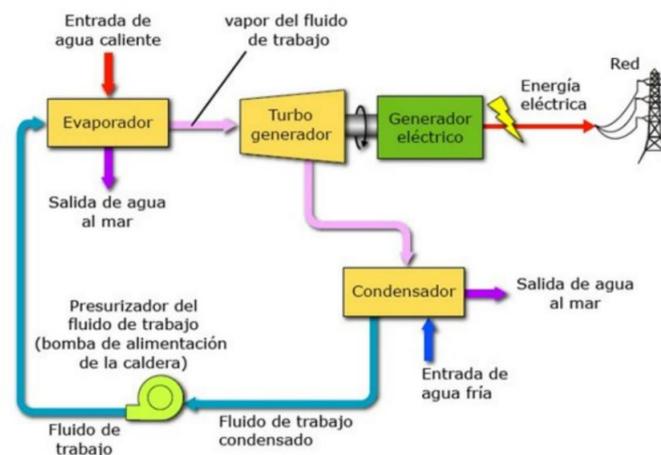


Ilustración 6: Esquema de funcionamiento de una planta de energía maremotérmica de ciclo cerrado [5].

2.1.4 ENERGÍA DEL GRADIENTE SALINO O ENERGÍA AZUL

Consiste en generar energía eléctrica a partir de la diferencia que existe entre la concentración salina entre el agua del mar y el agua de los ríos mediante los procesos de ósmosis.

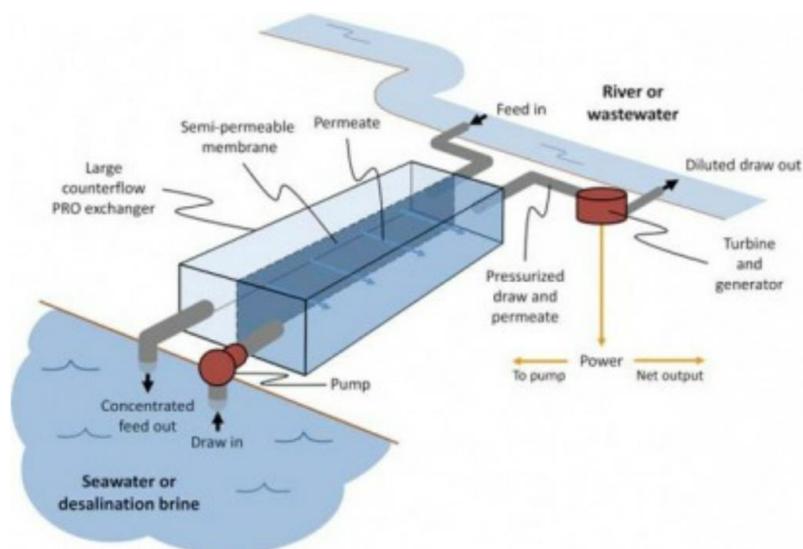


Ilustración 7: Esquema de funcionamiento de una planta de energía del gradiente salino [6].

2.1.5 ENERGÍA DE LAS OLAS O UNDIMOTRIZ

Energía de las olas o energía undimotriz: Se basa en el aprovechamiento energético producido por el constante movimiento ondulatorio de la superficie marina. Este movimiento ondulatorio se produce debido al rozamiento entre el aire y la superficie del mar.

Esta forma de aprovechamiento de la energía marina es en la que se centra el proyecto y será explicada detalladamente a lo largo del trabajo.

Capítulo 3. TEORÍA DE LA ENERGÍA UNDIMOTRIZ

3.1 HISTORIA

La energía undimotriz es una fuente de energía que aprovecha el movimiento de las olas generado por la fricción del viento con la superficie del mar para generar energía eléctrica.

El origen de esta fuente de energía renovable se da a comienzos del siglo XIX, con el invento del “Marmotor” por José Barrufet, un aparato constituido por una serie de boyas consistía en la producción de energía eléctrica a partir de la oscilación vertical del oleaje. A pesar de que sus antecedentes se remontan a este siglo, esta energía no se empezó a desarrollar hasta finales del siglo XX. [1]

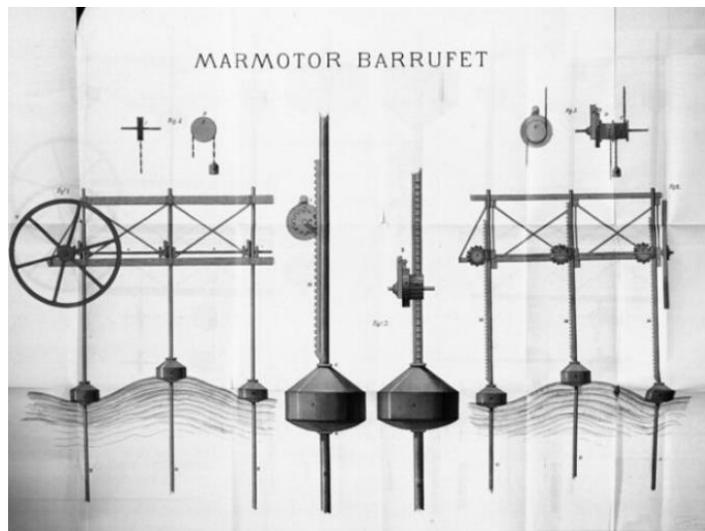


Ilustración 8: Esquema del Marmotor de Barrufet [2].

3.2 LAS OLAS

Las olas son ondas de menor o mayor amplitud que se forman en la superficie marina debido al rozamiento del viento con esta última. El oleaje actúa como un acumulador de energía, almacenándola y transportándola de un lugar a otro. La intensidad del viento, su duración y la longitud sobre la cual se transmite la energía de la ola son los parámetros de lo que depende la fuerza del oleaje [3].

3.2.1 PARÁMETROS DE UNA OLA

- Cresta: Parte más alta de una ola.
- Valle: Parte más profunda de la depresión entre dos olas consecutivas.
- Longitud de onda (λ): Distancia entre dos crestas o dos depresiones consecutivas.
$$\lambda = \frac{gT^2}{2\pi}$$
- Altura (H): Diferencia de altura entre una cresta y el nivel medio del mar.
- Amplitud (A): Distancia entre la cresta y el valle de la ola. Vale la mitad de la altura.
- Pendiente (δ): Inversa de la tangente entre la altura (H) y la longitud de onda (λ).
$$\Delta = \arctg\left(\frac{H}{\lambda}\right)$$
- Periodo (T): Tiempo transcurrido entre el paso de dos crestas consecutivas por el mismo punto. $T = \frac{2\pi}{\omega}$. Si el agua tiene suficiente profundidad $h > \frac{\lambda}{2}$ el periodo es
$$T = \frac{\lambda}{c}$$
- Velocidad de onda: Es la velocidad de propagación de la onda. Según su valor podemos diferenciar las olas cortas de las largas. $c = \frac{\lambda}{T}$
- Desplazamiento vertical de la ola. $y = \frac{H}{2} \cos\left(\frac{2\pi x}{\lambda} - \frac{2\pi t}{T}\right)$ [4].



Ilustración 9: Parámetros de una ola [5].

3.2.2 TIPOS DE OLAS

En el mar podemos diferenciar las olas según los siguientes tipos.

- Ondas estacionarias: Las ondas estacionarias se caracterizan por la existencia de uno o varios puntos en los cuales el movimiento es nulo, puntos nodales, y otros puntos en los que el desplazamiento llega a su máximo, puntos ventrales. Depende de las dimensiones geométricas de la cuenca en la que se producen las ondas hay una distancia entre los nodos y una frecuencia de oscilación u otra [3].

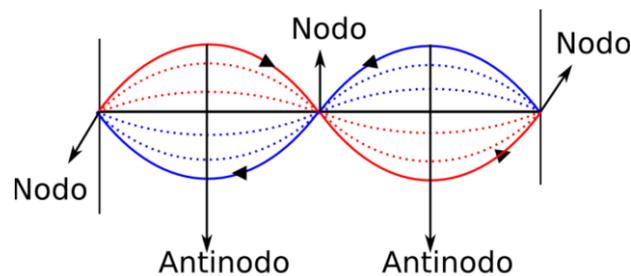


Ilustración 10: Esquema onda estacionaria [6].

- Ondas transitorias o progresivas: Son ondas que varían con el tiempo y en el espacio. Estas olas pueden ser producidas tanto en la superficie marina, provocadas por el viento, o en el seno de la masa oceánica debido a las discontinuidades de salinidad y temperatura existentes.

Dentro de estas, encontramos las ondas largas, las cuales son las ondas solitarias y los tsunamis que son provocadas por terremotos costeros y oceanográficos. Estas olas son propagadas por de una costa a otra o desde el epicentro hacia otras costas.

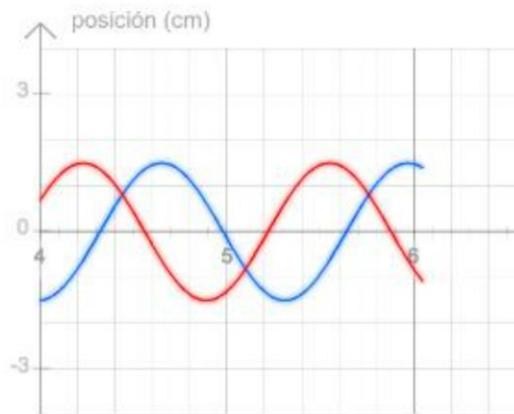


Ilustración 11:Esquema onda progresiva [7].

- Olas libres: Son producidas por la fuerza perturbadora que se produce en un instante determinado.
- Olas forzadas: Se producen por una continua fuerza perturbada, como por ejemplo las olas de marea [3].

3.2.3 OLAS GENERADAS POR EL VIENTO

Son las olas generadas por la fricción del viento con la superficie marina. Cuando el viento entra en contacto con el mar se forman olas con dirección indefinida y una vez que el contacto con el viento es nulo se propagan de acuerdo con su velocidad c [3].

Las olas de viento, las que solemos ver en la superficie marina, son olas cortas. Las olas cortas es un tipo de ola en las que su velocidad no depende de la profundidad del mar, pero sí que depende de la longitud de onda.

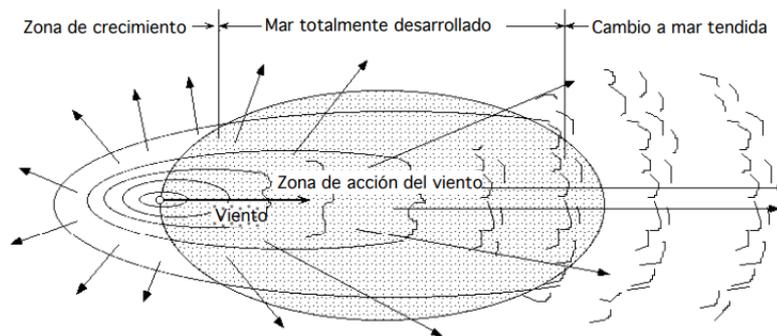


Ilustración 12: Acción de un viento constante sobre una zona determinada del mar [3].

En cuanto a la energía de las olas, por lo general, en las olas regulares los valores de longitud de onda y periodo son constantes. Cada partícula de la ola tiene su propia energía cinética y energía potencial. Por lo que la energía total de cada partícula es la suma de la energía cinética y potencial que tienen.

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

Siendo ρ la densidad, H la altura de la ola y b la anchura de la cresta. Como se observa por la fórmula de la energía, al depender de la altura de la ola al cuadrado [3].

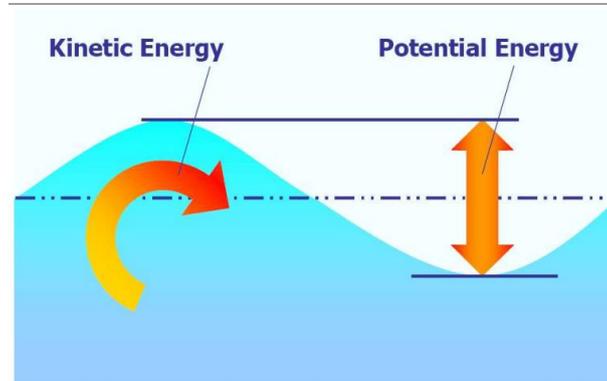


Ilustración 13: Energía de una ola [8].

La energía potencial es directamente proporcional al periodo de las olas y al cuadrado de su altura. La energía potencial de una ola es igual a la energía cinética que se puede llegar a utilizar. Se consideran las olas de mayor tamaño a las olas con 15 metros de altura y un periodo de 15 segundos aproximadamente. Las olas con estas características cuentan con una energía potencial de 1700 kW a pesar de que zonas con mucho potencial undimotriz no cuentan con flujos potenciales tan altos [9].

3.3 POTENCIAL UNDIMOTRIZ

La energía de las olas consiste en el almacenamiento de energía solar. Las diferentes temperaturas que se producen en el planeta debido al sol hacen que existan vientos que son los responsables del oleaje. Estas olas se expanden durante kilómetros perdiendo la mínima energía.

Cuando las olas se acercan a la costa pierden velocidad, longitud de onda y ganan altura. Se pierde una gran parte de la energía con el rozamiento producido con el suelo del mar.

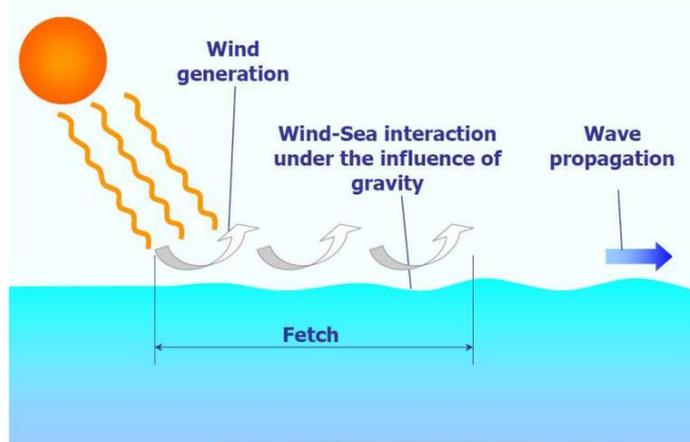


Ilustración 14: Proceso de creación de una ola [8].

El potencial de la energía de las olas no se encuentra de manera uniformemente distribuida en el planeta si no que varía con la latitud y los climas. Las mayores fuentes de energía se encuentran entre los 30 y 60 grados de latitud en ambos hemisferios. Caben destacar entre los grandes recursos, la costa occidental de Europa, fuera de las costas de Canadá y Estados Unidos y en la costa sur de Australia y América del Sur [8].

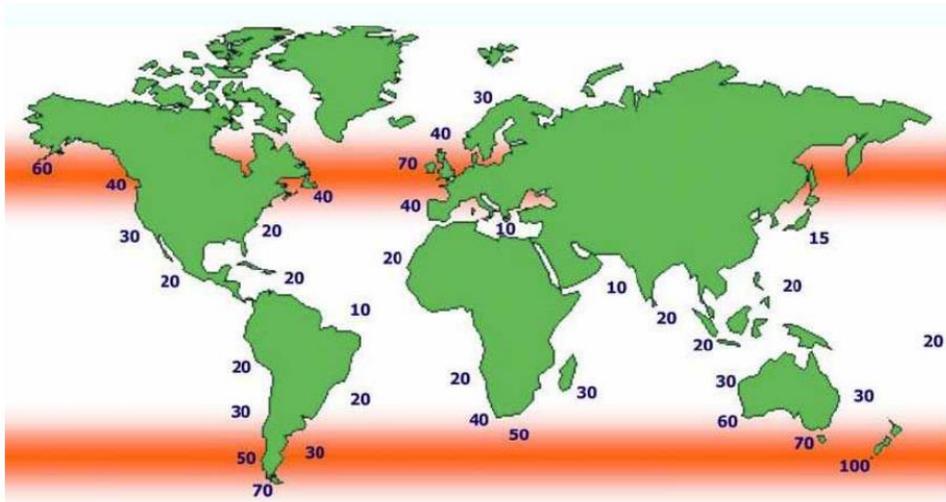


Ilustración 15: Distribución del potencial undimotriz alrededor del planeta [8].

En el caso de la costa oeste de Europa cuenta con una media de 50 kW por cada metro de onda incidente. Los recursos totales se consideran del mismo nivel del consumo eléctrico mundial y son aproximadamente 2 TW [8].

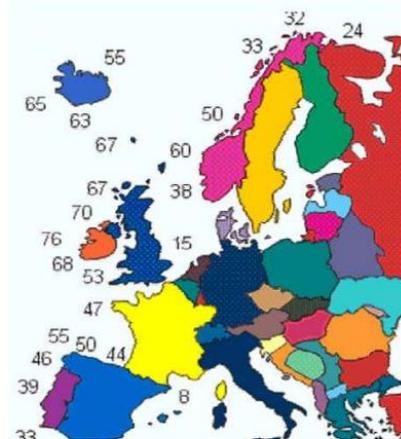


Ilustración 16: Distribución del potencial en Europa [8].

3.4 CLASIFICACIÓN DE DISPOSITIVOS

Los dispositivos de conversión de energía undimotriz en energía eléctrica se pueden clasificar según la distancia a la costa a la que se encuentren, según su tamaño y orientación, según el principio de captación [10].

3.4.1 SEGÚN LA DISTANCIA A LA COSTA

3.4.1.1 Onshore

Consisten en dispositivos instalados en la costa, como en acantilados rocosos, en estructuras fijas como diques con profundidades de hasta 10 metros. Debido a la cercanía de estos a la tierra, los dispositivos onshore son los que presentan menos costes e impedimentos a la hora de su instalación, aunque tienen un recurso energético menor que el resto.



Ilustración 17: Instalación de un dispositivo onshore [11].

3.4.1.2 Nearshore

Estos dispositivos se encuentran en aguas relativamente cerca de la costa con unas profundidades de entre 10 y 30 metros. La elección de estos dispositivos se debe a la necesidad de evitar los problemas que surgen con los dispositivos instalados en costa y evitar los sistemas de fondeo costosos.



Ilustración 18: Instalación de un dispositivo nearshore [12].

3.4.1.3 Offshore

Se localizan lejos de la costa con unas profundidades entre 30 y 100 metros. Estos dispositivos se consideran los más prometedores ya que aprovechan el mayor potencial energético del mar. El desarrollo de estos dispositivos no está muy avanzado debido a los grandes costes que lleva su instalación.



Ilustración 19: Convertidor undimotriz flotante offshore [13].

3.4.2 SEGÚN SU TAMAÑO Y ORIENTACIÓN

3.4.2.1 Absorbedores puntuales

Extraen energía a través del movimiento relativo que existe entre un cuerpo que se mueve a causa del forzamiento de las olas. El cuerpo móvil puede estar sumergido o en la superficie y el fijo puede ser el fondo marino u otra estructura menos afectada por la acción de las olas.

Son dispositivos de pequeño tamaño en comparación con la longitud de ola de la que están absorbiendo la energía. Suelen ser cilíndricos y están colocados en grupo formando una línea.

3.4.2.2 Atenuadores

Dispositivo flotante que funciona en paralelo a la dirección de las olas. Estos dispositivos extraen energía progresivamente mediante el movimiento relativo de los dos brazos cuando la ola los atraviesa.

3.4.2.3 Terminadores

Dispositivo que funciona perpendicularmente a la dirección de las olas. Suelen contener componentes fijos que capturan la energía de las olas. Son instalados en las proximidades de la costa a pesar de la existencia de dispositivos flotantes. Dentro de este tipo encontramos la columna de agua oscilante y los dispositivos de rebase.

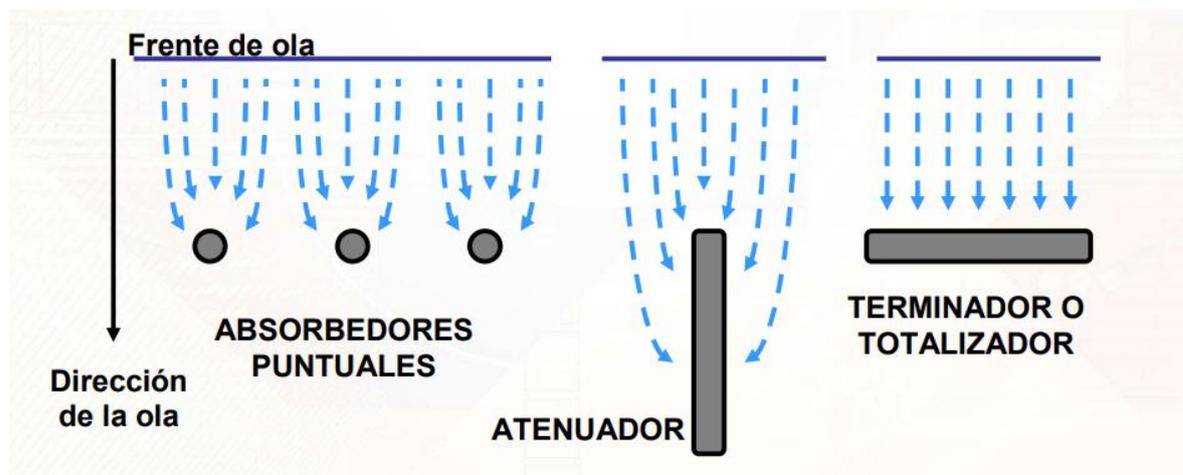


Ilustración 20: Clasificación de dispositivos según su tamaño y orientación [10].

3.4.3 SEGÚN EL PRINCIPIO DE CAPTACIÓN

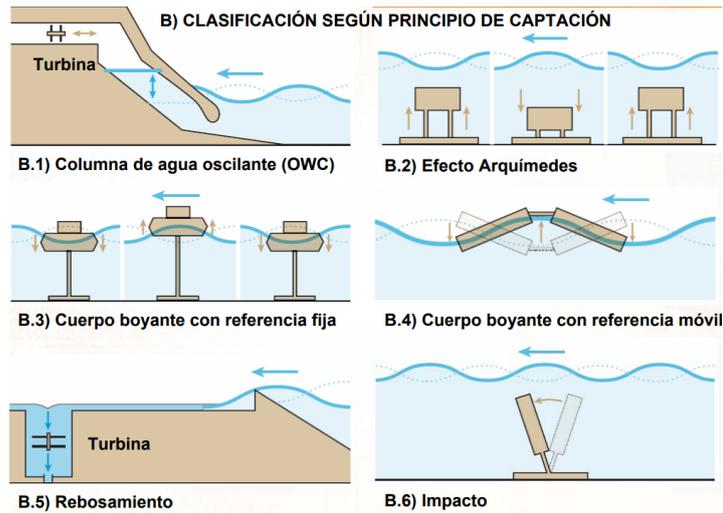


Ilustración 21: Clasificación de dispositivos según el principio de captación [10].

3.4.3.1 *Columna de agua oscilante*

Las plantas undimotrices que cuentan con los dispositivos OWC son las más comunes. La columna oscilante de agua se empezó a desarrollar en 1940 por el Japonés Yoshio Masuda [14].

Los dispositivos OWC consisten principalmente en una estructura hueca fija o flotante, abierta al mar por debajo de la superficie marina, que atrapa el aire en una cámara que se encuentra por encima de la superficie libre interior. La acción de las olas comprime y descomprime el aire atrapado forzando un flujo de aire moviéndolo mediante una turbina que impulsa un generador produciendo electricidad.

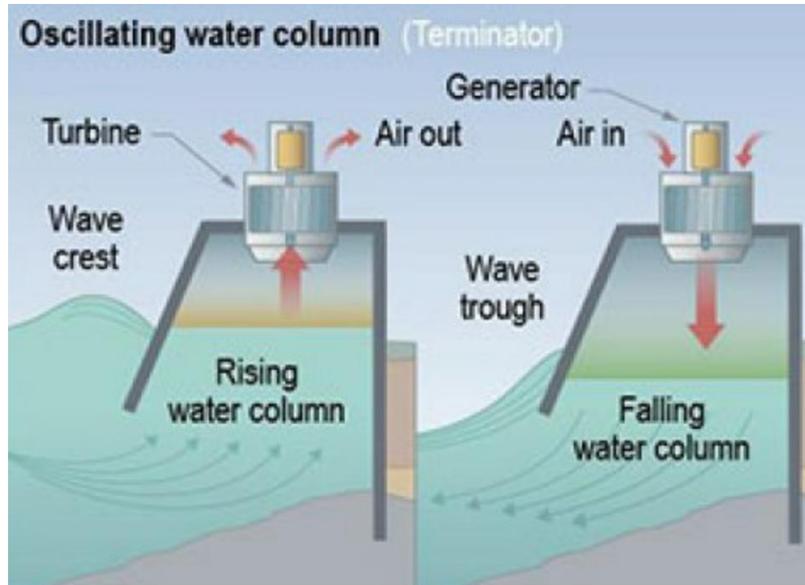


Ilustración 22: Comportamiento de una turbina [15].

Existen primordialmente dos modelos para representar la hidrodinámica de un dispositivo OWC. El primero se basa en la distribución de la presión sobre la superficie interna libre. En el segundo se hace una suposición de que la superficie interna libre se comporta como un pistón rígido sin masa. En este último modelo, puede ser complementado por una serie de modos adicionales para satisfacer la condición de contorno de la superficie interna. Esto no es necesario para dispositivos como los absorbedores puntuales, ya que un único modo de pistón se considera suficiente ya que las dimensiones físicas son generalmente más pequeñas que las de la longitud de onda de la ola incidente [16].

Los dispositivos OWC utilizan la energía de las olas para comprimir el aire en una columna cerrada. El aire comprimido es utilizado para impulsar una turbina de aire que genera electricidad.

Utilizan la energía cinética del aire que provoca las olas del mar. Cada cámara parcialmente sumergida presenta una apertura en la parte inferior, por debajo de la línea de flotación, y una pequeña apertura en la parte superior que contiene la turbina. El movimiento lineal ascendente y descendente de la superficie del mar presuriza y

despresuriza el aire en el interior de las cámaras, lo que genera un flujo de aire recíproco a través de las turbinas, impulsando los generadores para producir electricidad [16].

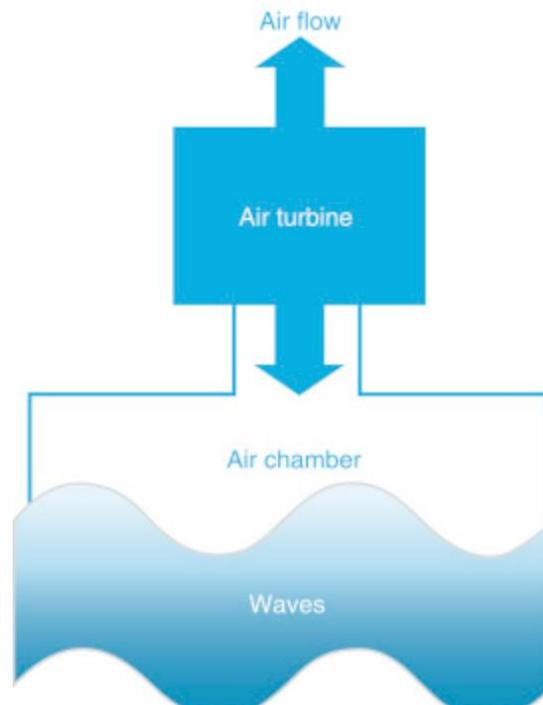


Ilustración 23: Convertidores de energía de las olas OWC [16].

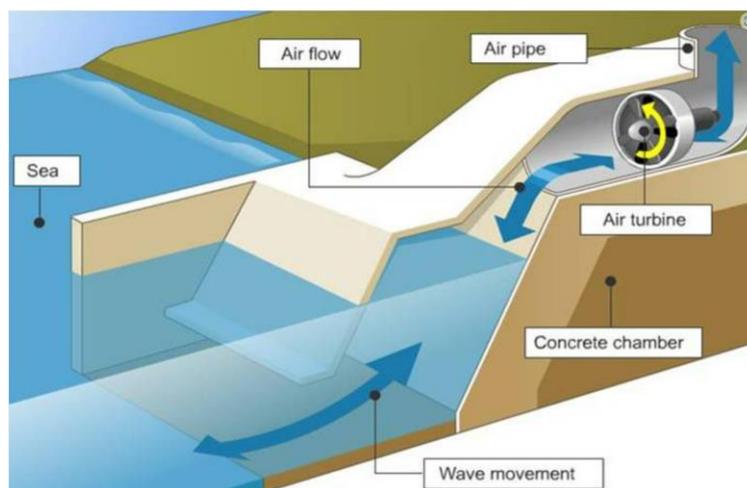


Ilustración 24: Esquema de funcionamiento [17].

La dirección del flujo de aire es insignificante ya que la turbina gira en la misma dirección. Cuenta con un muro que se construye para proteger la costa del oleaje, llamado rompeolas. Este dispositivo puede ser construido tanto cerca de la costa como en alta mar. Para la instalación en tierra es necesaria una profundidad al menos de 10 m mientras que en alta mar es necesaria una profundidad mínima de entre 40-80 metros. Se suelen preferir las costas occidentales para la construcción de estos dispositivos debido a que en esta región las direcciones de las olas son más marcadas.

3.4.3.2 Oscilador de la ola de Arquímedes

Se trata de un dispositivo de forma cilíndrica que se encuentra semisumergido y anclado a una profundidad de 6 metros. La parte superior del dispositivo se encuentra rellena de aire y es movida por el oleaje en dirección contraria a la parte inferior que se encuentra fija al suelo. Este movimiento hace que se mueva un generador de electricidad [8].

Su origen se sitúa en 1993 cuando Hans Van Breugel y Fred Gardner comenzaron junto la empresa Teamwork Technology B.V a diseñarlo. Años después, en 2004, la empresa AWS Ocean Power compro los derechos. Es actualmente quien desarrolla este dispositivo [8].

La extracción de electricidad de este dispositivo se realiza mediante un generador lineal o un generador hidráulico y se ha estimado que se puede llegar a obtener 8,55 GWh al año mediante este tipo de conversor energético [8].

Una de las ventajas de este dispositivo son los valores máximos admisibles que tiene. Existen olas con la suficiente fuerza para que hagan que la velocidad y el desplazamiento del dispositivo sea superior a estos valores máximos que se permiten. Estos inconvenientes hacen que se llegue a un valor energético de 2,7 GWh [8].

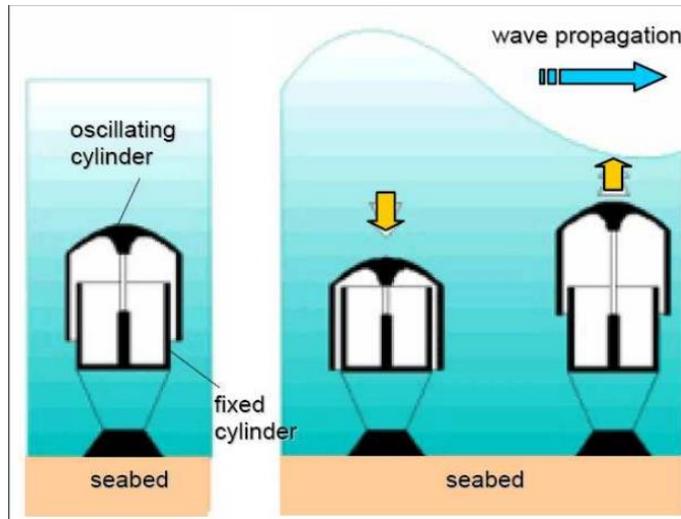


Ilustración 25: El oscilador de la ola de Arquímedes [8].

3.4.3.3 *Cuerpos boyantes*

Se trata de dispositivos flotantes que son movidos por las olas vertical o horizontalmente alrededor de un eje. Este movimiento puede ser relativo entre dos o más cuerpos o un movimiento absoluto en el propio dispositivo y un elemento fijo. Algunos inconvenientes de estos dispositivos son la sensibilidad de estos a las mareas, así como la dificultad que tiene su instalación y mantenimiento [18].

Entre estos dispositivos destacamos el Pelamis. El sistema Pelamis se trata de un conjunto de partes cilíndricas unidas. Estas secciones se mueven por el impacto de la ola y activan un sistema de motores hidráulicos unidos a un generador eléctrico encargado de producir electricidad. La potencia de es transportada mediante un cable a una base situada en el océano. De esta base se traslada la energía producida a través de un cable sumergido hacia la costa [19].



Ilustración 26: Cuerpo flotante; El Pelamis [19].

3.4.3.4 Cuerpos de rebosamiento o impacto

Son dispositivos que aumentan su energía potencial, cinética o ambas ya que contienen estructuras en las que inciden las olas. Los sistemas de rebosamiento provocan que las olas les pasen por encima mientras que los de impacto hacen que las olas incidan en su estructura. Se pueden situar tanto en la costa como en mar abierto [18].



Ilustración 27: Wave Dragon Dinamarca [20].

3.5 VENTAJAS Y DESVENTAJAS

3.5.1 VENTAJAS

- Es una energía limpia, no contaminante y renovable. Esta energía se opone al cambio climático al apoyarse en recursos naturales. Tiene cero emisiones de dióxido de carbono u otros gases de efecto invernadero evitando de este modo el calentamiento global.
- Una gran parte de la tierra es superficie marina y oceánica. Al haber tanto porcentaje de aguas oceánicas y marinas hace que podamos aprovechar su potencial en muchos lugares del planeta. Además, estas aguas están en constante movimiento lo que permite que su potencial pueda ser explotado durante todo el año.
- Es un tipo de energía muy eficiente. A diferencia de otro tipo de energías renovables, con la energía undimotriz requiere un espacio menor para poder generar electricidad.
- No generan contaminación acústica. La extracción de velocidad a partir de las olas utiliza métodos silenciosos.
- Es una energía de alto rendimiento ya que el agua cuenta con mucha energía [21].

3.5.2 DESVENTAJAS

- Tienen un fuerte impacto y daño ambiental. A pesar de que existen muchos dispositivos conversores de energía que no suponen cambios en la costa para su instalación hay otros entre ellos de los más desarrollados como por ejemplo la comuna oscilante de agua que requiere una modificación en el terreno costero.
- Tiene un precio muy alto. Al ser una energía poco desarrollada y que cuenta con algunas dificultades técnicas, las instalaciones para la instalación de dispositivos que generan electricidad a partir de las olas tienen muchos costes.
- Requiere mantenimiento continuo. Al tener que instalar los dispositivos en contacto con el mar, esta agua y la humedad hace que sufran mucho desgaste y como consecuencia necesita cuidados continuos por lo que eleva el precio [21].

Capítulo 4. EMPLAZAMIENTO Y DISPOSITIVO

4.1.1 ELECCIÓN

- La central undimotriz se puede construir directamente en la costa lo que hace que sea más fácil acceder a ella lo que implica menos costes en cuanto al mantenimiento en comparación con las centrales energéticas construidas en alta mar. Además, se puede construir sobre una superficie ya existente, por ejemplo, en un contradique como el del Puerto Exterior de Galicia.
- El generador, como se ha comentado en el apartado 3.4.3.1 al describir el dispositivo OWC, no está en contacto con el agua del mar por lo que el desgaste será menor frente a otros dispositivos como los nearshore u offshore.
- La turbina que se va a utilizar es la turbina Wells la cual tiene un diseño sencillo y es inmune a las perturbaciones.
- Es uno de los dispositivos más desarrollados y una de las tecnologías que se ha utilizado en la península ibérica como dispositivo undimotriz que se comentará en el siguiente apartado.

4.1.2 PLANTA DE MUTRIKU

La central undimotriz de Mutriku se inauguró en julio de 2011 y se trata de la primera central de energía de las olas en Europa que distribuye la energía que produce [1]. Esta central cuenta con 16 turbinas que generan 296 kW [1]. Estas turbinas funcionan con una tecnología OWC creando corrientes de aire mediante el movimiento de las olas que cambian el nivel del agua del mar.

Es la planta undimotriz en la que toda la producción se dirige directamente a la red general de distribución y la que más tiempo lleva funcionando. Puede llegar a abastecer la

demanda eléctrica de aproximadamente 100 familias. Ha establecido un nuevo record produciendo 2 GWh. Se encuentra en el dique de abrigo de Mutriku y se necesitó 2,3 millones de euros como inversión inicial para ponerla en funcionamiento. A parte de su principal función, la producción de energía eléctrica, otra de sus funciones es el ensayo de turbinas y sistemas de control. Esta central acoge ensayos de todo el mundo para poder desarrollar esta tecnología que no está tan avanzada como la eólica o los ciclos combinados [2].



Ilustración 28: Central undimotriz de Mutriku [3].

4.2 EMPLAZAMIENTO

Como se ha descrito en apartados anteriores, el objetivo principal del proyecto es utilizar un dispositivo OWC para aprovechar la energía undimotriz con el fin de abastecer eléctricamente a una población costera. Para decidir el emplazamiento de este proyecto se han tenido en cuenta los siguientes requisitos a cumplir:

- El potencial undimotriz debe ser suficiente como para poder obtener la electricidad suficiente como para llegar al objetivo propuesto. España cuenta con un gran potencial energético en sus mares y océanos y entre ellos cabe destacar Galicia que cuenta con niveles de potencia alrededor de los 45 kW/m [1].
- El puerto exterior de Galicia no está dentro de la Red de Áreas Marinas Protegidas y se puede hacer uso del contradique que contiene este puerto para la instalación del dispositivo.

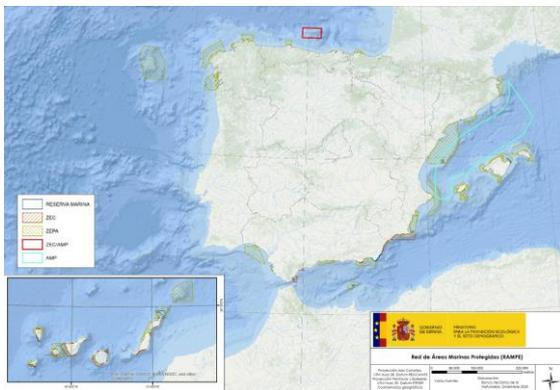


Ilustración 31: Red de Áreas Marinas Protegidas [4]



Ilustración 30: Red de Áreas marinas Protegidas (modificación propia) [4]



Ilustración 29: Mapa Galicia (modificación propia) [5]

- Según el artículo Punta Langosteira en Galicia. Sitio de ensayos para aprovechar las olas y la energía eólica marina se dice que hoy en día el Ministerio para la Transición Ecológica y el Reto Demográfico acaba de publicar el borrador de la Hoja de Ruta para el desarrollo de la Eólica Marina y de las Energías del Mar en España y el documento tiene un apartado dedicado a Langosteira. En esta hoja de ruta del Gobierno se destaca que la del puerto exterior de Arteixo es la segunda zona experimental del mundo con mayor concentración de energía de las olas, por detrás de la costa sur de Gales [6]

Capítulo 5. CÁLCULOS

5.1 POTENCIAL UNDIMOTRIZ

Como se ha comentado en apartados anteriores, en la costa del Mar Cantábrico existe un gran potencial undimotriz. Este potencial no es uniforme a lo largo del año si no que varía según la estación, siendo más alto en invierno.

Podemos calcular el potencial undimotriz a partir de la altura y el periodo de las olas, datos obtenidos de Puertos del Estado a partir de datos medidos y modelados procedentes de boyas, en este caso de la boya Langosteira II y mediante los puntos SIMAR, un conjunto de series temporales de viento y oleaje procedentes de datos simulados [1]

Para calcular el potencial undimotriz se utilizará la siguiente fórmula

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

Siendo,

- ρ densidad del mar
- H altura significativa de la ola
- T periodo de la ola
- g la gravedad

Mes	Altura significativa del oleaje (m)	Periodo medio (s)	Gravedad (kg/m^2)	Densidad (kg/m^3)	Potencial Undimotriz (kW/m)
ENERO	2,225	7,890	9,81	1025	38,319
FEBRERO	3,367	9,492	9,81	1025	105,610
MARZO	2,250	7,836	9,81	1025	38,916
ABRIL	1,597	6,230	9,81	1025	15,594
MAYO	1,345	5,716	9,81	1025	10,140
JUNIO	1,524	6,073	9,81	1025	13,849
JULIO	1,450	6,2	9,81	1025	12,791
AGOSTO	1,380	6,4	9,81	1025	11,959
SEPTIEMBRE	1,366	6,638	9,81	1025	12,161
OCTUBRE	1,680	7,030	9,81	1025	19,478
NOVIEMBRE	2,385	7,484	9,81	1025	41,772
DICIEMBRE	2,57	8,040	9,81	1025	52,005

Tabla 1: Potencial undimotriz según los meses del año (elaboración propia, datos: Puertos de estado).

Para realizar los siguientes cálculos se han utilizado los datos medidos por la Boya Langosteira II en el último año. A pesar de que los cálculos con más años son más precisos solo se ha conseguido obtener los datos de 2022 y se hará la estimación del potencial con estos datos. Como densidad se ha utilizado el dato medio de la densidad del mar en la zona atlántico norte $1025 kg/m^3$

Mes	Altura significativa del oleaje (m)	Periodo medio (s)	Gravedad (kg/m^2)	Densidad(kg/m^3)	Potencial Undimotriz (kW/m)
VERANO	1,524	6,073	9,81	1025	13,849
OTOÑO	2,204	7,465	9,81	1025	35,572
INVIERNO	2,668	8,470	9,81	1025	59,160
PRIMAVERA	1,439	6,096	9,81	1025	12,390

Tabla 2: Potencial undimotriz en función de las estaciones del año (elaboración propia, datos: Puertos de Estado).

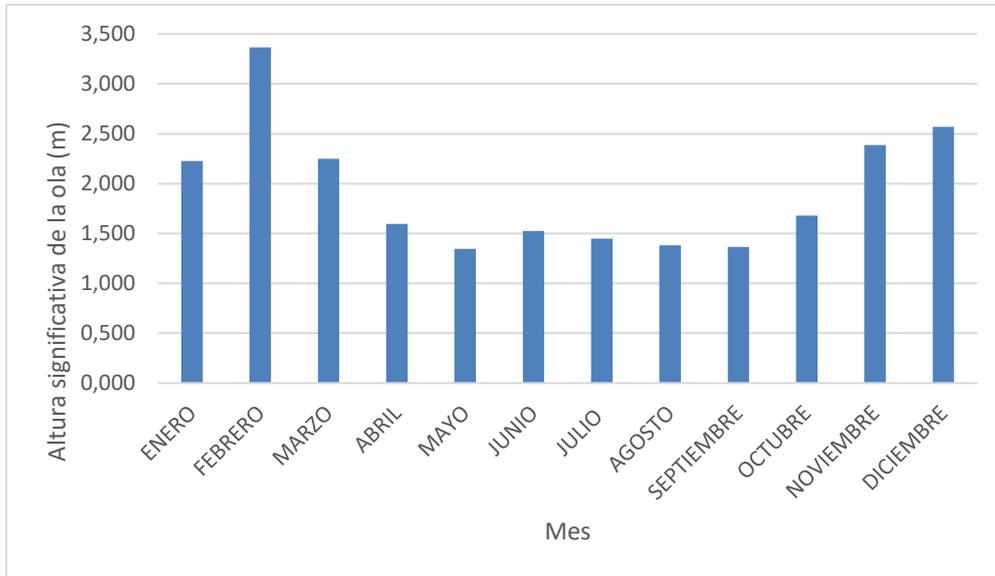


Ilustración 32: Altura significativa del oleaje en función del mes del año (elaboración propia).

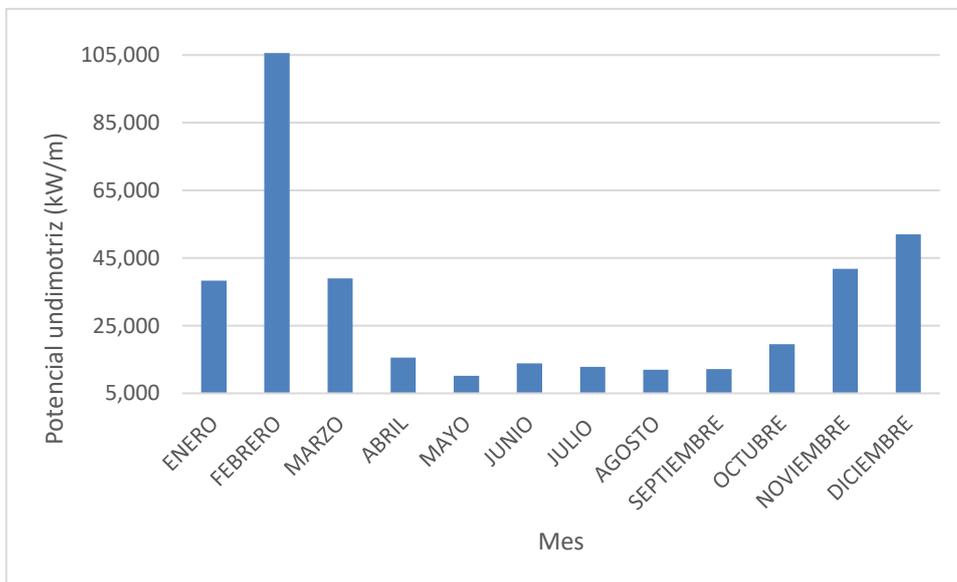


Ilustración 33: Potencial undimotriz en función del mes del año (elaboración propia).

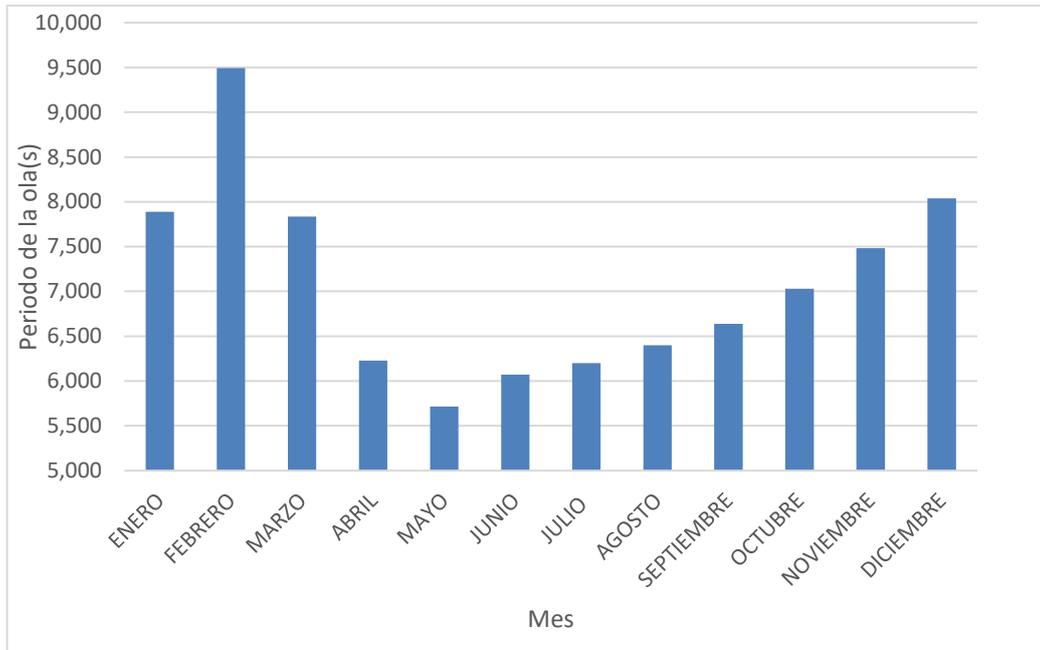


Ilustración 34: Periodo del oleaje en función del mes del año (elaboración propia).

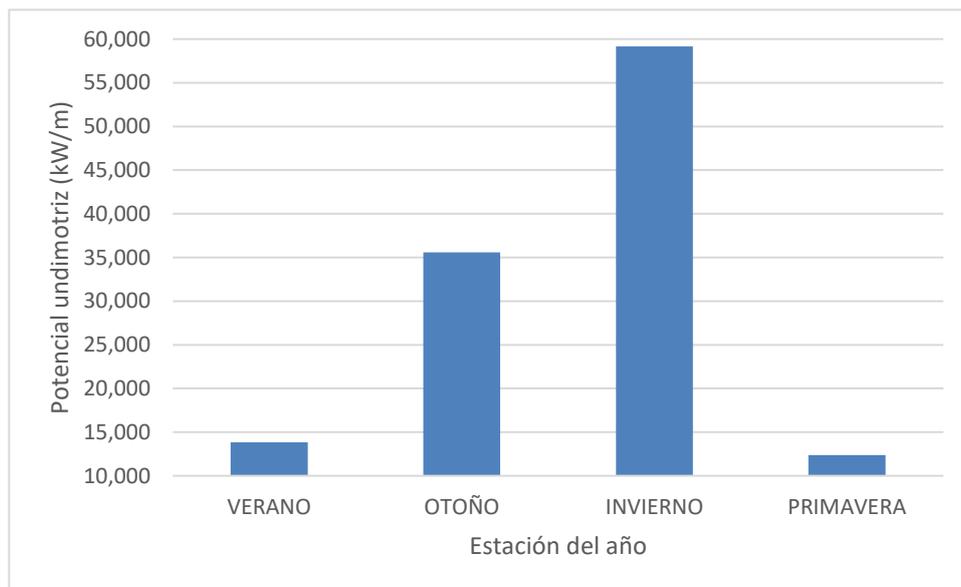


Ilustración 35: Potencial undimotriz en función de la estación del año (elaboración propia).

Como se puede ver en los gráficos el mar en la zona de Arteixo tiene suficiente potencial a pesar de que en los meses de verano y primavera el potencial sea pequeño. En estos meses la central puede llegar a utilizarse como la central undimotriz de Mutriku, acogiendo a empresas internacionales para realizar ensayos.

La media del potencial undimotriz a lo largo del año es de 30,24 kWh, sin embargo, cuando el oleaje llega a la costa el potencial undimotriz se reduce aproximadamente a la mitad de su valor a una profundidad indefinida. En este caso la media sería de un 15,10 kWh.

5.2 DEMANDA ENERGÉTICA

Como se ha comentado en puntos anteriores, el objetivo principal del trabajo es conseguir suministrar electricidad a un pueblo costero de Galicia, Arteixo.

Primero de todo calcularemos la demanda pública y privada y se decidirá abastecer un parte del sector público.

En el sector público contamos con 85 edificios públicos, construidos en los últimos 15 años. El consumo de energía aproximado a lo largo de un año para estos edificios es de 3,27 GWh/año y esto conlleva un coste estimado de 450.000€/año [2]. En cuanto al alumbrado público, el municipio de Arteixo cuenta con 15.000 puntos de luz que se han distribuido a lo largo de 100 km². En el caso del alumbrado público el consumo anual aproximado es de 4,5 GWh/año con un coste de 600.00€/año [2].

En cuanto al sector privado, Arteixo cuenta con 32.894 habitantes y teniendo en cuenta que hay una media aproximadamente de 3 personas por hogar en Galicia, en Arteixo hay que suministrar electricidad a 10964 viviendas [3].

Según el Instituto para la Diversificación y Ahorro de la Energía, el consumo de electricidad medio por hogar es de 3.487 kWh. Este consumo depende del tipo de vivienda,

en el caso de ser un piso es de 0,649 tep y según la zona climática, en este caso la Atlántico norte es de 0,799 tep siendo $1\text{kWh } 0,86 * 10^{-4} \text{ tep}$ [4]. Teniendo en cuenta en que nos situamos en la zona del Atlántico Norte y que en Arteixo contamos que hay aproximadamente 10.964 hogares el consumo medio privado es de 101.863.209 kWh.

$$\text{Consumo hogar} = \left(\frac{0,799}{0,86+10^{-4}} \right) * 10.964 = 101.863.209 \text{ kWh}$$

Al no tener los suficientes recursos como para abastecer todo el consumo de Arteixo ya que el desarrollo que tiene la energía undimotriz no es suficiente nos vamos a centrar en abastecer

el sector público, tanto a los edificios como a la luminaria del municipio. Lo cual sería un total de 8,77 GWh/año.

5.3 PUERTO EXTERIOR

Las características del dique son las siguientes [5]:

- Situación
 - Longitud: 8° 31' W.
 - Latitud: 43° 21' N.
- Dique de abrigo
 - Longitud: 3382 m.
 - Altura: 25 m sobre el nivel de mar; 40 m de profundidad.
 - Anchura: 54,32 m.

- Plano esquemático del puerto exterior.

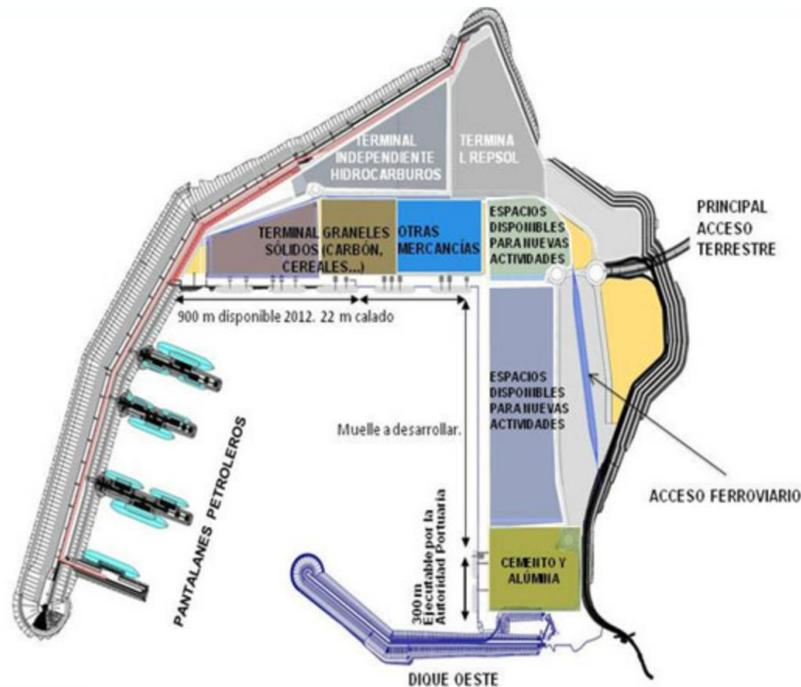


Ilustración 36: Plano esquemático del Puerto Exterior.

Al tener un dique de abrigo con la suficiente longitud y anchura no hace falta realizar ninguna extensión para la construcción de las cámaras. Basándonos en que en la central undimotriz de Mutriku se han instalado 16 cámaras de 4,5 m de anchura y 9,4 de alto y contar con un dique menor al del puerto exterior de Arteixo, se van a diseñar 30 cámaras de un ancho de 5 m y 10 m de alto. Cada cámara contará con una turbina Wells de 1,25 metros de diámetro con el fin de que sea fácil de desplazar.

Capítulo 6. TURBINA WELLS

6.1 INTRODUCCIÓN

La turbina Wells es el dispositivo aerodinámico utilizado en la actualidad para generar electricidad a partir de la energía de las olas o la energía cinética neumática generada por una columna oscilante de agua [1]. Los convertidores de energía OWC generan energía de una manera similar a una turbina eólica mediante el principio de presurización del aire inducido por las olas. Se trata de una cámara de aire que se coloca por encima del agua permitiendo de este modo que el paso de las olas cambie el nivel del agua. Estas subidas y bajadas incrementan y disminuyen la presión del aire. Además, se coloca una turbina en la parte superior de la carcasa por la que pudiera pasar el aire. El aire entra en la carcasa durante la depresión de las olas y sale durante la cresta de las mismas. Debido a este flujo de aire bidireccional, la turbina tiene que diseñarse para girar en una dirección con independencia del flujo de aire [2].

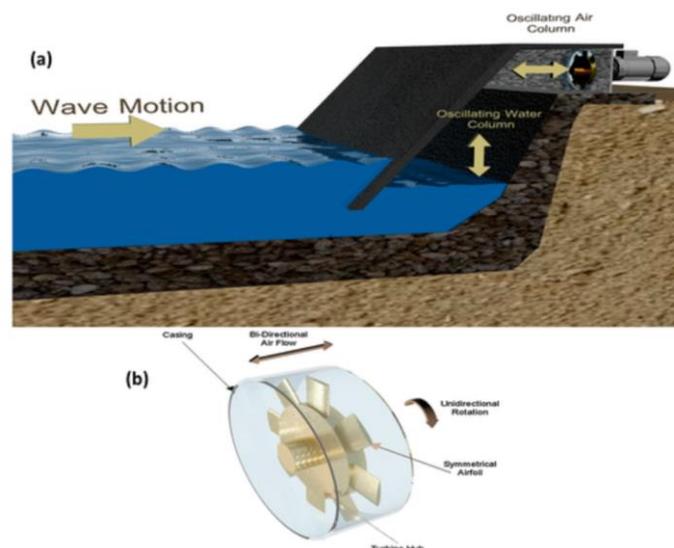


Ilustración 37: Funcionamiento de la tecnología OWC [2].

La turbina Wells funciona de forma muy similar al resto de turbinas convencionales, extrae la energía cinética que se encuentra disponible en el aire, sin alteraciones fuertes en su velocidad que puedan implicar aceleraciones y fuerzas aerodinámicas considerables. Debido a que la turbina debe ser autorrectificante, hay dos filas de álabes simétricamente a ambos lados del rotor, cada una es el reflejo de la otra. Esta turbina se acopla a un generador eléctrico para la generación de electricidad. Esta turbina es de las más sencillas y económicas para la conversión de energía de las olas. No requiere válvulas de rectificación de aire y puede extraer energía con un caudal de aire bajo, cuando otras turbinas serían ineficaces [1].

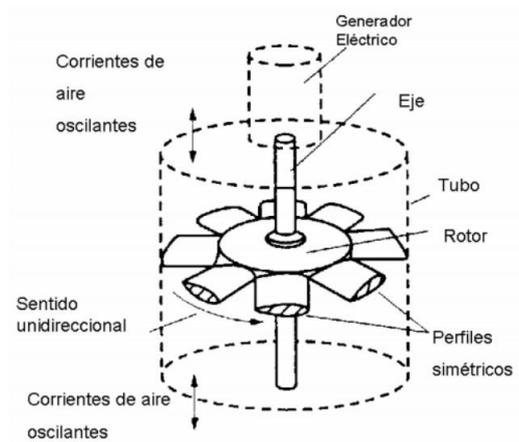


Ilustración 38: Esquema de la turbina Wells[2].

6.2 PRINCIPIO DE FUNCIONAMIENTO

6.2.1 NOTACIÓN

- A: Área proyectada en el disco de la turbina.
- B: Número de aspas.
- c: Longitud de cuerda del perfil.

- C_L : Coeficiente de sustentación.
- C_D : Coeficiente de arrastre.
- 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 : Flujo.
- r : radio de la turbina, elemento variable.
- R : Radio de la turbina.
- T : Torque.
- T^* : Número adimensional de torque.
- U_T : Velocidad rotacional inducida.
- U : Velocidad de corriente de aire.
- V_{EFEC} : Velocidad efectiva.
- V_{geom} : Velocidad geométrica.
- W : Potencia.
- ΔP : Caída de presión a través de la turbina (P_1-P_2).
- α : Ángulo de ataque.
- φ : Ángulo de velocidad efectiva.
- η : Eficiencia aerodinámica de la turbina.
- ρ : Densidad del aire bajo condiciones estándar.
- σ : Solidez de la turbina.
- Ω : Velocidad específica de rotación.

6.2.2 DISEÑO AERODINÁMICO

El estudio aerodinámico del álabe sirve para calcular el momento y la variación de presión en función del flujo de aire incidente. Se produce un cambio en la dirección de la corriente de aire debido la extracción de energía del rotor al producirse la interacción entre los álabes simétricos que constituyen la turbina y el flujo de aire. Este cambio se produce a través del espesor del disco provocando una componente de energía cinética rotacional (U_t). Esta velocidad inducida tiene consecuencia directa en el triángulo ideal de velocidades variando el ángulo de entrada [2].

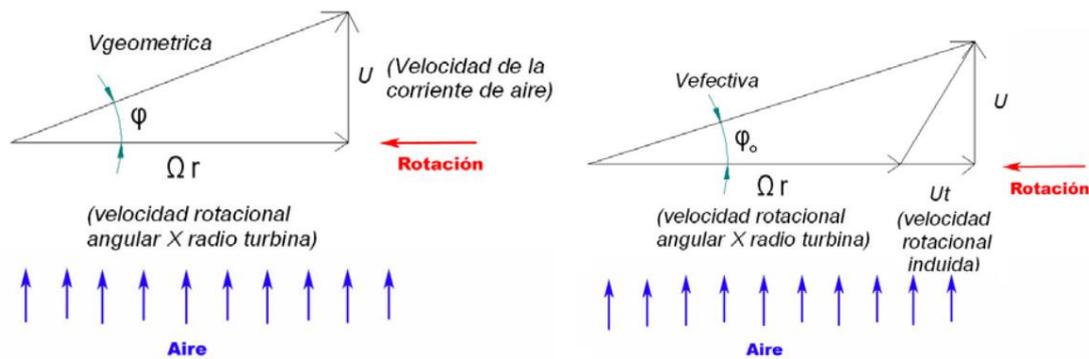


Ilustración 39: Diagrama de velocidades ideal y real de una turbina Wells[2].

El ángulo de ataque α , es el que forma la cuerda geométrica del ala y la dirección de la velocidad de la corriente del aire. A su vez, este ángulo, es el mismo que forma la bisectriz del ángulo de la velocidad efectiva V_{EFEC} y la geométrica V_{geom} .

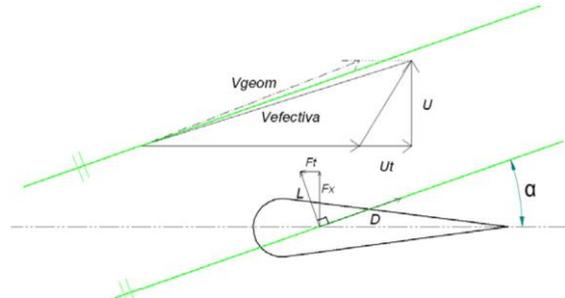


Ilustración 40: Relación de ángulos entre el diagrama de fuerzas sobre el perfil de un álabe y el diagrama de velocidades [2].

Para obtener un diseño óptimo de la turbina se debe conseguir que la energía cinética rotacional o velocidad inducida (U_t) sea lo más pequeña posible ya que, como hemos visto antes, esta tiene una consecuencia directa en el desempeño aerodinámico de la turbina [3].

El diseño aerodinámico de la turbina se sustenta en la correcta combinación del análisis del elemento de aspa y el principio de conservación del momento angular del fluido con el balance de fuerzas que actúan sobre el perfil aerodinámico. Si se conoce la velocidad angular con la que le rotor gira, se puede determinar la velocidad relativa que experimenta el perfil aerodinámico. Esta velocidad es la responsable de producir las fuerzas sobre el perfil. En la siguiente figura se muestra las velocidad y fuerzas sobre el perfil aerodinámico [3].

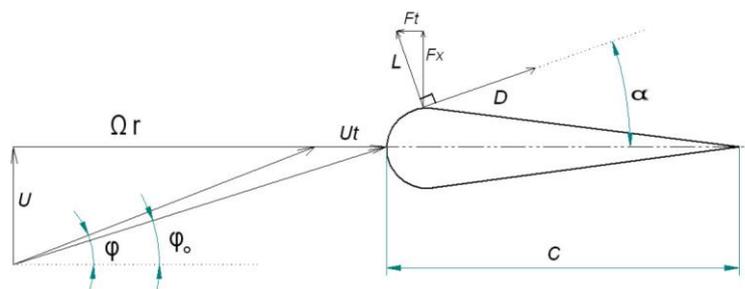


Ilustración 41: Diagrama de fuerzas y velocidades sobre el perfil de un álabe [2].

Siendo,

$$L = \frac{1}{2} c_L(\varphi_o) \rho V_{efect}^2 C \quad (2)$$

$$D = \frac{1}{2} c_D(\varphi_o) \rho V_{efect}^2 C \quad (3)$$

Los coeficientes de arrastre C_D y de sustentación C_L dependen del perfil del álabe y del número de Reynolds, siendo el flujo laminar de baja resistencia aerodinámica.

Estas ecuaciones que definen las fuerzas de sustentación y arrastre se pueden descomponer en una fuerza axial (F_x) y otra tangencial (F_t), que al utilizarse perfiles simétricos (NACA 00XX) esta última fuerza mantiene su dirección con valores positivos y negativos del ángulo de ataque lo que hace que se produzca un giro en una única dirección. Por otro lado, la fuerza axial es la utilizada para el diseño estructural de la turbina y su sentido depende del flujo del aire que circule [2].

$$F_x = L \cos(\varphi_o) + D \sin(\varphi_o) \quad (4)$$

$$F_t = L \sin(\varphi_o) + D \cos(\varphi_o) \quad (5)$$

Una vez conocidas las fuerzas de arrastre y sustentación se calcula el par que genera el rotor en función del radio de los álabes y de esta forma conocer la eficiencia.

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

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

Si se desprecia el efecto que produce el arrastre, representado por las fuerzas viscosas, se obtiene la ecuación de conservación de la energía expresada por la siguiente ecuación.

$$(p1 - p2) = \rho U U_{tcot(\varphi_o)} \quad (8)$$

Combinando las componentes de la fuerza aerodinámica y de la ecuación de la energía se puede determinar el ángulo de ataque respecto al plano horizontal de la turbina. El ángulo

que describe la velocidad efectiva respecto al plano de giro del rotor, ángulo (φ_o) va desde el radio del cubo hasta el radio exterior de la turbina. Se deduce del triángulo de velocidades para cada posición radial. Este es el primer parámetro para determinar la geometría óptima de la turbina y se expresa de la siguiente manera [4].

$$\tan\varphi_o = \frac{U}{\Omega r + U_t} \quad (9)$$

Para obtener un diseño óptimo de la turbina se ha considerado necesario que la caída de presión a través de la turbina sea constante para cada elemento de aspa. Asegurando esta condición se obtiene la expresión para la velocidad inducida para cada posición radial U_t [3].

$$U_t = \frac{p_1 - p_2}{2\Omega\rho r} \quad (10)$$

Con estas condiciones de diseño y combinando las expresiones anteriores obtenemos la ecuación de diseño que determinan la longitud y la distribución óptima de la cuerda en el aspa [3].

$$\frac{BC_{LÓPTIMO}}{4\pi R} = \Delta P_0^* \frac{1}{\sqrt{(1+U^*)^2}} \left(\frac{1}{1 + \frac{\Delta P_0^*}{2} \left(\frac{2+(U^*)^2}{1+(U^*)^2} \right)} \right) \quad (11)$$

6.2.3 ANÁLISIS DIMENSIONAL

Con el fin de determinar los parámetros preliminares del diseño de la turbina se recurre a un análisis dimensional con el objetivo de obtener un prototipo a pequeña escala a partir del cual se puedan obtener los datos de una turbina de dimensiones reales. El funcionamiento de la turbina queda determinado por grupos adimensionales en función del

momento (T), densidad del fluido (ρ), viscosidad cinemática del fluido (ν), la velocidad axial del aire (U), el radio de la turbina (R), la caída de presión (Δp_0) y la velocidad angular (Ω) [2].

$$U^* = \frac{U}{\Omega R} \quad (12)$$

$$\Delta P_0^* = \frac{\Delta P_0}{\rho \Omega^2 R^2} \quad (13)$$

$$T^* = \frac{T}{\rho \Omega^2 R^5} \quad (14)$$

$$Re = \frac{\sqrt{(\Omega R)^2 + U^2}}{\nu} c \quad (15)$$

El número de Reynolds se considera uno de los parámetros más importantes en la mecánica de fluidos que caracteriza el movimiento de un fluido indicando si el flujo es laminar o turbulento.

El rendimiento de los perfiles aerodinámicos simétricos está afectado por el número de Reynolds. A medida que se reduce este parámetro también disminuye el coeficiente de sustentación máximo, la relación de sustentación sobre arrastre máximo y el rango de ángulos de ataque de operación eficiente. Estas reducciones suponen que la eficiencia de la turbina y el rango de caudales de operaciones sean menores. Esta reducción de intervalo debe tenerse en cuenta durante el diseño de la turbina verificando que el ángulo de ataque se encuentre dentro de este rango. En los siguientes gráficos se muestra cómo se comporta un perfil simétrico con números de Reynolds bajos y como varía la eficiencia máxima de la turbina Wells en función del número de Reynolds [5].

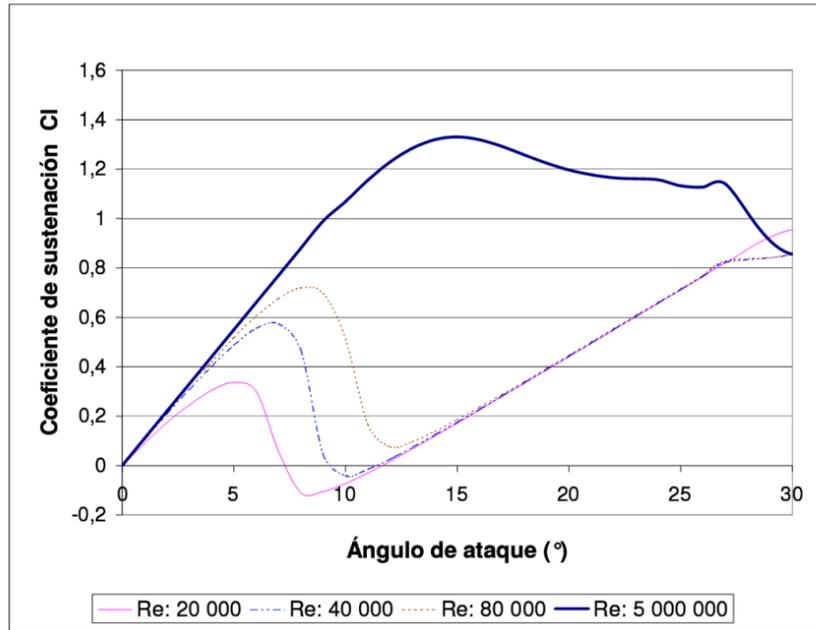


Ilustración 42: Comportamiento de perfiles simétricos a bajos números de Reynolds. Coeficiente de sustentación [5].

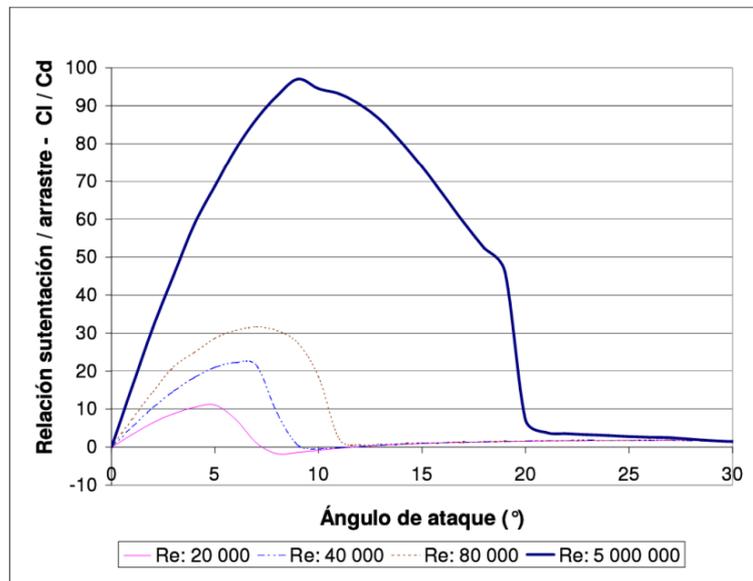


Ilustración 43: Comportamiento de perfiles simétricos a bajos números de Reynolds. Relación sustentación/arrastre [5].

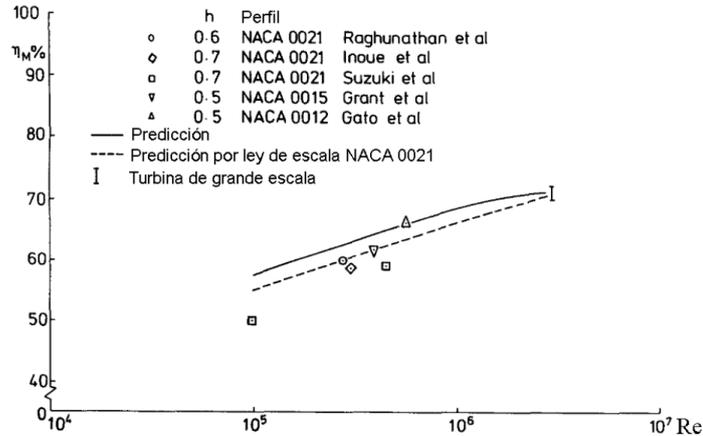


Ilustración 44: Efecto del número de Reynolds sobre la eficiencia máxima de una turbina Wells [5].

A la hora de determinar el funcionamiento de la turbina se considera uno de los factores más importantes la solidez (σ) que describe la relación entre el área ocupada por las aspas y el área total descrita por el disco. A medida que aumenta la solidez disminuye la eficiencia, sin embargo, mejora la capacidad de arrancar en reposo. Para que la turbina puede arrancar desde el reposo el valor mínimo de solidez requerido es de 0,6 y no puede ser mayor a 1 [2].

$$\sigma = \frac{Bc}{\pi R(1+h)} \tag{16}$$

6.2.4 DISEÑO DE LA TURBINA

Para diseñar la turbina se determinarán unas dimensiones preliminares del rotor de la turbina a partir de los resultados obtenidos por Curran y Gato, 1997, en cual se estudiaron varios tipos de rotores de 8 aspas con un perfil NACA 0015 [4].

Los valores obtenidos son determinados en el punto máximo de eficiencia obtenida para la turbina y se muestran en la siguiente tabla.

ΔP_0^*	0,33
T^*	0,04
U^*	0,12
η_{MAX}	59,5%

Tabla 3: Resultados obtenidos por Curran y Gato en el punto máximo de eficiencia. (Datos: Curran y Gato, 1997. Elaboración propia)

Para el dimensionado real del prototipo de la turbina nos basamos en diseños previos [2] y en las dimensiones de las turbinas de la central de Mutriku. El punto de partida del cálculo de la turbina Wells, además de partir de los números adimensionales, será un diámetro de 1,25 m, un perfil del álabe NACA 0018 con 6 aspas, solidez de la turbina de 0,65 y una velocidad rotacional de 3000 rpm.

Diámetro Exterior (m)	1,25
Radio Exterior (m)	0,625
Diámetro Cubo (m)	0,85
h	0,68
solidez, σ	0,65
RPM	3000
Ω (rad/s)	314,1592654
Viscosidad cinemática	0,00001516
Densidad, ρ (kg/m ³)	1,2
Número de aspas, B	6

Tabla 4: Datos de la turbina. (Elaboración propia)

Con las ecuaciones 12,13 y 14 obtenemos los valores de la velocidad y de este modo del par y de la caída de presión. Además, para obtener los coeficientes de sustentación y arrastre es necesario conocer previamente el ángulo de ataque y el número de Reynolds. Para obtener estos valores resolvemos el triángulo ideal y real de velocidades con las siguientes fórmulas y obtenemos los siguientes resultados.

$$U_t = \frac{\Delta P}{2\rho\Omega R} \quad (17)$$

$$V_{GEO} = \sqrt{U^2 + R^2\Omega} \quad (18)$$

$$V_{effect} = \sqrt{U^2 + (\Omega R + U_t)^2} \quad (19)$$

$$\varphi_0 = \tan^{-1}\left(\frac{U}{R\Omega + U_t}\right) \quad (18)$$

$$\varphi_0 = \tan^{-1}\left(\frac{U}{R\Omega}\right) \quad (19)$$

$$\alpha = \frac{\varphi + \varphi_0}{2} \quad (20)$$

U (m/s)	23,561945
Q (m3/s)	27,996983
ΔP (Pa)	15267,044
T (Nm)	451,79464

Tabla 5: Resultados obtenidos a partir de los datos de la turbina y los números adimensionales de Curran y Gato. (elaboración propia)

φ (rad)	0,1194289
V_{geo} (m/s)	26,0362
U_t (m/s)	32,397674
φ_0 (rad)	0,1026423
V_{efec} (m/s)	229,9575
Re	613733,283
α (rad)	0,1110356
α (deg)	6,3618722

Tabla 6: Resultados obtenidos al resolver el triángulo de velocidades (elaboración propia).

Como se ha nombrado anteriormente el perfil elegido para diseñar la turbina es un perfil simétrico NACA 0018. Para obtener los coeficientes de sustentación y de arrastre recurrimos a las tablas de perfil ya que estos dependen de el ángulo de ataque y del número de Reynolds.

Re	CL	CD
50000	0,806	0,037
100000	0,865	0,023
200000	0,824	0,017
500000	0,673	0,011
1000000	0,681	0,009

Tabla 7: Coeficientes de sustentación y arrastre para un ángulo de ataque de $6,36^\circ$ en función del número de Reynolds [6]. (elaboración propia)

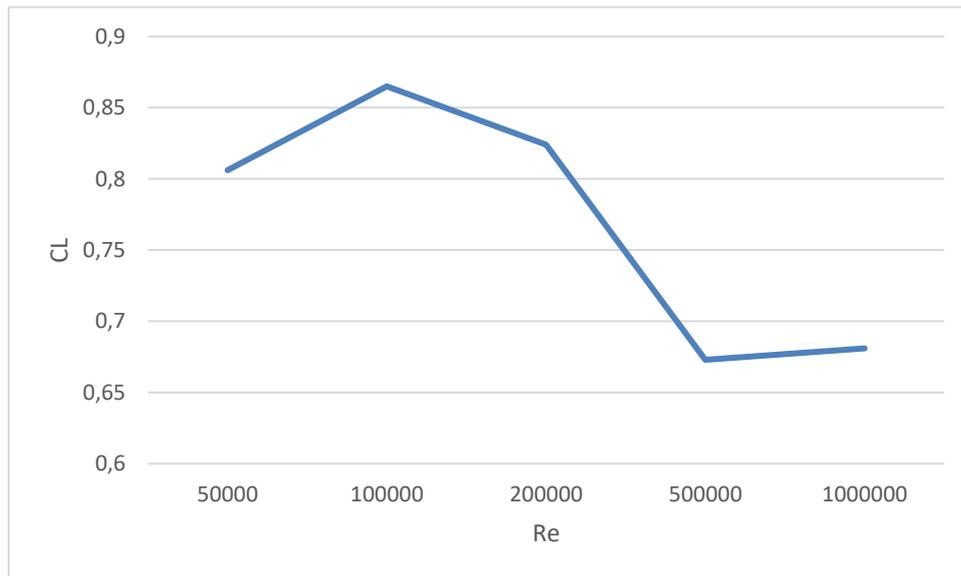


Ilustración 45: Coeficiente de sustentación para un ángulo de ataque de $6,36^\circ$ en función del número de Reynolds [6]. (elaboración propia)

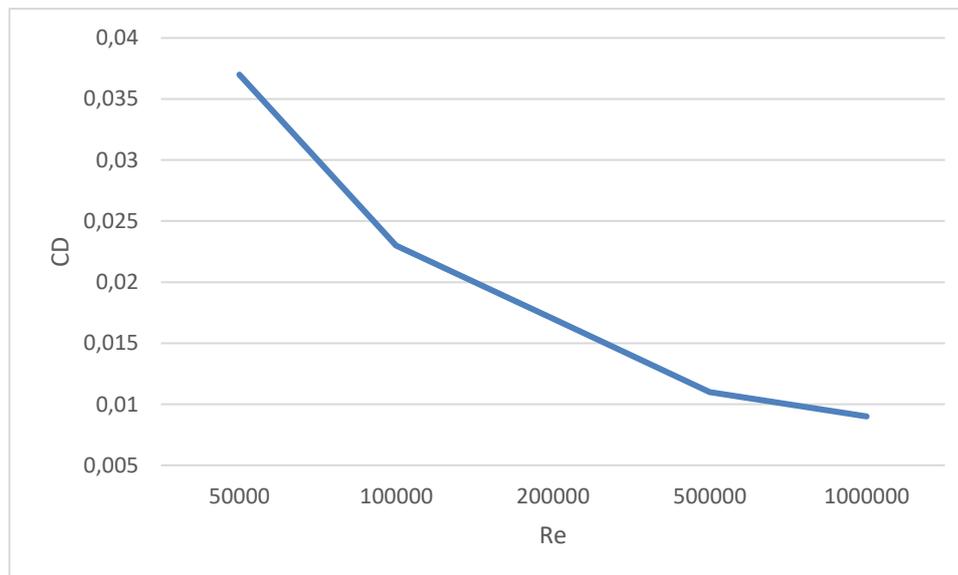


Ilustración 46: Coeficiente de sustentación para un ángulo de ataque de $6,36^\circ$ en función del número de Reynolds [6]. (elaboración propia)

Según el número de Reynolds que hemos obtenido con las dimensiones elegidas para la turbina los coeficientes de sustentación y arrastre son respectivamente $C_D = 0,0154$

$$C_L = 0,675.$$

Una vez que hemos elegido el perfil simétrico a utilizar calculamos la longitud de la cuerda para el diseño geométrico del perfil. Despejando de la ecuación 16 obtenemos el siguiente resultado.

$$c = 0,357 \text{ m}$$

Una vez que tenemos los parámetros geométricos de las cámaras de columna oscilante de agua y de los álabes de la turbina lo aplicamos con datos reales, calculando con la ecuación 21 [7] la velocidad del flujo de aire según los datos de altura y periodo de las olas facilitados por Puertos del Estado en la zona de Arteixo.

$$U = \frac{8awc}{\pi} \text{sen} \frac{\pi L}{cT} \quad (21)$$

Siendo a la amplitud de la ola, w el ancho de la cámara, c la velocidad de propagación de la ola definida en el capítulo 3, D diámetro de la turbina y T el periodo, obtenemos junto a las ecuaciones anteriores los siguientes datos según la estación del año. Mantenemos la relación entre el coeficiente de flujo y la rotación angular constante para obtener el máximo rendimiento de la rutina.

Ancho (m)	5
Largo (m)	3,5
Alto (m)	10

Tabla 8: Dimensiones de la cámara OWC (elaboración propia).

Diámetro Exterior (m)	1,25
Número de aspas, B	6
α (deg)	6,367

Tabla 9: Dimensiones turbina (elaboración propia).

Periodo del año	Altura (m)/2 = a	Periodo (s)	U(m/s)
Invierno	2,67	8,47	14,096
Primavera	1,44	6,10	10,549
Verano	1,52	6,07	11,172
Otoño	2,20	7,47	13,144

Tabla 10: Velocidad de entrada del flujo de aire en función de la altura y el periodo de las olas. (elaboración propia)

Periodo del año	Ω (rad/s)	Alpha	Alpha (rad)	Vgeo (m/s)
Invierno	187,949	6,362	0,111	16,496
Primavera	140,662	6,362	0,111	12,893
Verano	148,960	6,362	0,111	13,528
Otoño	175,251	6,362	0,111	15,531

Tabla 11: Resultados según las cuatro estaciones del año (elaboración propia).

Periodo del año	φ (rad)	φ_0 (rad)	Ut (m/s)	Vefect (m/s)
Invierno	0,119	0,103	19,368	137,471
Primavera	0,119	0,103	14,505	102,962
Verano	0,119	0,103	15,3615	109,036
Otoño	0,119	0,103	18,073	128,280

Tabla 12: Resultados según las cuatro estaciones del año (elaboración propia).

Periodo del año	ΔP	RPM	L (N)	D(N)	Torque (Nm)
Invierno	5456,135	1794,437	2716,428	42,417	161,778
Primavera	3060,378	1343,171	1521,506	23,758	90,614
Verano	3450,478	1422,209	1706,313	26,644	101,620
Otoño	4774,527	1673,679	1673,522	36,879	140,657

Tabla 13: Resultados según las cuatro estaciones del año (elaboración propia).

Con los datos anteriores recogidos en las tablas, una vez hemos resuelto el triángulo de velocidades y teniendo los datos de la turbina, calculamos la potencia útil y el rendimiento.

Periodo del año	Potencia útil por turbina (kW)	Rendimiento(%)
Invierno	30,406	32,438
Primavera	12,746	32,438
Verano	15,137	32,438
Otoño	24,650	32,438
Media	20,75	

Tabla 14: Potencia útil y rendimiento de la turbina (elaboración propia).

Como el valor máximo de potencia ocurre en invierno, para que las turbinas sean capaces de alcanzarlo la potencia nominal de estas será de 35 kW por lo que la instalación al contar con 30 turbinas será de 1050 kW.

En las siguientes tablas se recogen las medidas de las turbinas y de las cámaras OWC.

Diámetro Exterior (m)	1,25
Diámetro Cubo (m)	0,85
Número de aspas, B	6
α (deg)	6,362
Potencia (kW)	35
Perfil simétrico	NACA 0018

Tabla 15: Medidas de la turbina Wells (elaboración propia).

Ancho (m)	5
Largo (m)	3,5
Alto (m)	10
Número de cámaras	30

Tabla 16: Medidas de la cámara OWC (elaboración propia).

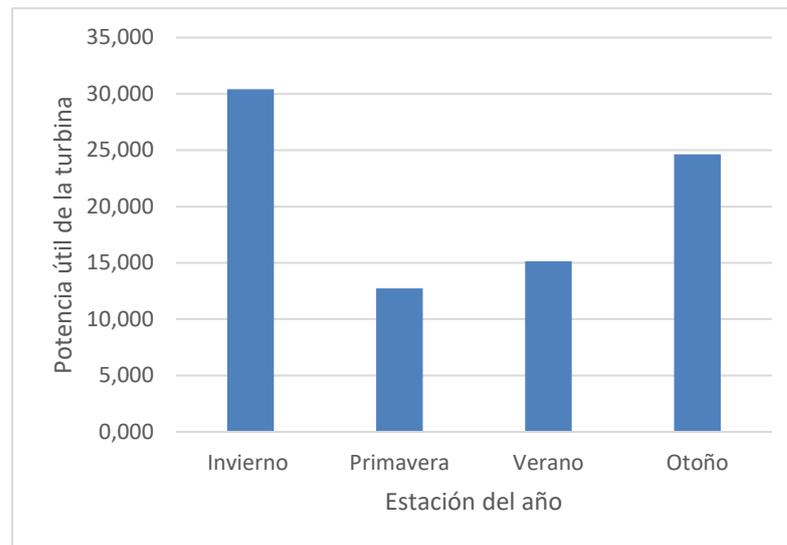


Ilustración 47:Potencia útil de la turbina según las estaciones del año.
(elaboración propia).

Por último para completar el diseño de la turbina hace falta decidir el material de la turbina teniendo en cuenta que va a estar en contacto con el agua salada. A pesar que una de las soluciones más comunes para evitar la corrosión es el uso del titanio por su excelente resistencia a la corrosión, tiene una gran desventaja que es su alto coste de mecanizado y coste del material. Por este motivo para esta turbina se elige como material el AISI316L el cual ofrece una buena resistencia a la corrosión, superior a la del acero inoxidable básico, a un precio bajo [9].

6.2.5 DEMANDA CUBIERTA

El potencial undimotriz calculado en el capítulo 5 en función de la altura y el periodo de las olas en la zona de Arteixo, se ha calculado a partir de los datos proporcionados por Puertos del Estado durante las 24 horas del día a lo largo del último año. De este modo, considerando que la turbina trabajará durante las 24 horas del día, para calcular la energía que proporcionará al año multiplicamos por las horas que hay en un año 8760 horas.

$$\text{Energía durante un año} = 1050 * 8760 = 9,198 \text{ GWh}$$

$$Demanda = 3,57GWh + 4,5GWh = 8,07GWh$$

Con esta producción de energía podemos cubrir los objetivos propuestos de 3,57 GWh correspondiente al alumbrado público y 4,5 GWh de los edificios públicos además de destinar los 1,128 GWh restantes a cubrir una parte de la electricidad de las viviendas sociales de la ciudad.

En España existen al menos una vivienda social por cada 100 habitantes por lo que al tener 32.894 habitantes en Arteixo podemos estimar un número de viviendas sociales aproximado de 3.289 viviendas. Según el IDAE el consumo medio de electricidad por hogar en España es de 3.487 kWh [8] por lo que con esta instalación se podría llegar a cubrir a 323 viviendas sociales cumpliendo a su vez de esta manera uno de los objetivos de desarrollo sostenible de los que se hablarán en los siguientes capítulos.

A pesar de que la central está pensada para funcionar las 24 horas del día, surgirán inconvenientes de funcionamiento y mantenimiento que lo impedirán. Para hacer una estimación más exacta contamos con que funcionará 12 horas al día. En este caso obtendremos 4,599 GWh por lo que podríamos llegar a abastecer el alumbrado público y parte de los edificios públicos.

Capítulo 7. OBJETIVOS DE DESARROLLO SOSTENIBLE

Uno de los propósitos que tiene este proyecto es cumplir con alguno de los 17 objetivos de desarrollo sostenible. Entre los 17 destacamos 5 que cumple este trabajo.

- Objetivo de desarrollo sostenible número 3. Salud y Bienestar. Como se comentó en el primer capítulo del proyecto, el aire contaminado que respiramos las personas en nuestro día a día puede llegar a causar graves problemas de salud. Promoviendo el uso de energías renovables evitaremos usar energías que generen residuos y sustancias contaminantes.
- Objetivo de desarrollo sostenible número 7. Energía asequible y no contaminante. Este objetivo de desarrollo sostenible es el principal que cumple este proyecto. Como se ha comentado a lo largo del trabajo el fin de diseñar este dispositivo es acabar con los gases contaminantes que producen los combustibles fósiles y fomentar el uso de las energías renovables entre ellas las menos conocidas y con gran potencial en nuestro país como la energía undimotriz. Desarrollando este dispositivo evitamos la contaminación y hacemos uso de un tipo de energía ilimitada ya que el mar está en constante movimiento.
- Objetivo de desarrollo sostenible número 9. Industria, Innovación e infraestructuras. España es un país con gran potencial undimotriz, destacando el norte y las islas canarias. Aprovechando el gran potencial undimotriz en la península Ibérica y el continuo movimiento del mar, con la propuesta de este diseño se fomenta la creación de centrales undimotrices para reducir la contaminación.
- Objetivo de desarrollo sostenible número 11. Ciudades y comunidades sostenibles. Aunque el proyecto se haya centrado en un único emplazamiento, la propuesta busca hacer a las ciudades más limpias y sostenibles ayudando a cubrir parte del consumo eléctrico de los ayuntamientos.

- Objetivo de desarrollo sostenible número 13. Acción por el clima. Actualmente uno de los problemas más grandes del mundo es el cambio climático. Una de las mejores alternativas que existen hoy en día para evitarlo es el uso de energías renovables. Se ha buscado durante el trabajo impulsar el uso de energías renovables concretamente las menos conocidas y con más potencial. La energía undimotriz no emite gases de efecto invernadero en la generación de energía por lo que no afectan al cambio climático.

Capítulo 8. CONCLUSIONES

La mejor medida para frenar el cambio climático son las energías renovables. Actualmente, a diferencia de otras energías renovables como la energía solar, la energía undimotriz debido su falta de desarrollo no es una alternativa real. Sin embargo, teniendo en cuenta que más de un 70% de la superficie terrestre es agua y que además está en continuo movimiento, una vez que su desarrollo aumente será vital para evitar el uso de combustibles fósiles.

A lo largo del proyecto se ha estudiado la energía undimotriz para diseñar un dispositivo que lograse suministrar electricidad a una población costera sin emitir gases de efecto invernadero que afectan de manera significativa al calentamiento global. Se ha realizado un profundo estudio sobre los distintos dispositivos y emplazamientos posibles concluyendo con el diseño de una columna oscilante de agua en Arteixo debido al gran potencial del mar en la zona Langosteira como la gran extensión del dique de abrigo con el que cuenta el Puerto Exterior para instalar la central.

Se ha diseñado una Turbina Wells con un perfil simétrico NACA 0018 y 6 aspas. Se colocarán 30 turbinas a lo largo de extremo más alejado del dique de abrigo para evitar la contaminación acústica. Las turbinas tendrán una potencia nominal de 35 kW por lo que la central tendrá una potencia total de 1050 kW.

Tras analizar los resultados obtenidos una vez que hemos diseñado la turbina, concluimos con que se ha cumplido el objetivo principal. Se ha logrado suministrar electricidad a la ciudad de Arteixo. A pesar de no poder cubrir todos los servicios públicos de la ciudad, se ha logrado abastecer todo el alumbrado público, así como parte de los edificios pertenecientes al ayuntamiento.

Una de las grandes ventajas del emplazamiento elegido, primero es la existencia de una superficie ya construida donde instalar la central y segundo la gran extensión de esta. El

dique de abrigo del puerto Exterior de A Coruña mide aproximadamente 3 km de longitud por lo que si se decidiese aprobar la propuesta hay posibilidad de una extensión de la central. A su vez, la turbina Wells diseñada durante el proyecto es uno de los dispositivos de menor coste por lo que a pesar de requerir una gran inversión inicial, dentro de los dispositivos existentes sería uno de los más económicos.

Por último, se ha comprobado el gran potencial que tiene el Mar en España, concretamente en Galicia, y las grandes ventajas que tiene esta energía renovable. Con este proyecto se ha querido fomentar su desarrollo para que en un futuro sea una alternativa como la energía solar actualmente.

Capítulo 9. BIBLIOGRAFÍA

9.1 CAPÍTULO 1

- [1] Merino, L. *2 Las energías renovables*. 20.
- [2] *La contaminación contribuye a una de cada cinco muertes*. (2021, febrero 9). ELMUNDO.
<https://www.elmundo.es/ciencia-y-salud/medio-ambiente/2021/02/09/6022421c21efa06b6c8b45ca.html>
- [3] Energías renovables: Características, tipos y nuevos retos. *Factorenergia* (2018, Agosto 30) <https://www.factorenergia.com/es/blog/noticias/energias-renovables-caracteristicas-tipos-nuevos-retos/>
- [4] *¿Cuáles son las energías renovables más utilizadas en España?* (s. f.). Endesa.
<https://www.endesax.com/es/es/historias/2021/energias-renovables-mas-utilizadas>
- [5] Eceiza, A. I. (2014). *Modelado numérico de sistemas de extracción de energía del oleaje basados en la tecnología de columna de agua oscilante* [Http://purl.org/dc/dcmitype/Text, Universidad de Cantabria]. <https://dialnet.unirioja.es/servlet/tesis?codigo=43818>
- [6] *Investigacion*. Departamento de Ingeniería Eléctrica. Escuela Técnica Superior de Ingenieros Industriales. Universidad Politécnica de Madrid.
<http://www.dinel.upm.es/proyectos.html>
- [7] Gómez-Gómez M, Danglot-Banck C, Vega-Franco L. *Disponibilidad de agua para la salud y la vida. Lo que todos debemos saber*. <https://www.medigraphic.com/cgi-bin/new/resumen.cgi?IDARTICULO=27126>

9.2 CAPÍTULO 2

- [1] *Energías del mar | Idae*. °<https://www.idae.es/tecnologias/energias-renovables/uso-electrico/energias-del-mar>
- [2] *Energía verde gracias a las corrientes marinas a gran profundidad*. (2018, marzo) *Noticias de Ecología y Medio Ambiente*. <https://www.ecoticias.com/energias-renovables/181715-energia-verde-gracias-corrientes-marinas-gran-profundidad>

- [3] *ENERGÍA MAREMOTRIZ*
https://hrudnick.sitios.ing.uc.cl/alumno12/costosernc/D._Mare.html
- [4]
- [5] Portillo, G. (2021, junio 24). Energía mareomotriz dinámica: Qué es, características y usos. *Renovables Verdes*.
- [6] La energía Maremotérmica va más allá que sólo generación de electricidad. (2021, enero 12). *IKERA*. <https://ikera.es/la-energia-maremotermica-va-mas-alla-que-solo-generacion-de-electricidad/>
- [7] González, M. O. (s. f.). *PROFESOR GUÍA: DR. ING. DANILO ESTAY*. 128.
<https://repositorio.usm.cl/bitstream/handle/11673/21309/3560902038433UTFSM.pdf?sequence=1>
- [8] *Red magisterial | Onda progresiva longitudinal periódica muelle*. <https://www.redmagisterial.com/med/8761-onda-progresiva-longitudinal-periodica-muelle/>

9.3 CAPÍTULO 3

- [1] Castro, M. (2019, agosto 8). Energía undimotriz: Historia, cómo funciona, ventajas, desventajas. *Lifeder*. <https://www.lifeder.com/energia-undimotriz/>
- [2] Alpoma. (2013, enero 3). *José Barrufet y el Marmotor*. Tecnología Obsoleta.
<https://alpoma.net/tecob/?p=7659>
- [3] P. Fernández Diez, *Energía de las olas*, Capítulo 1.
- [4] Curso Geografía del mar, El oleaje y sus características
http://www7.uc.cl/sw_educ/geo_mar/html/h621.html
- [5] *Características de las olas. Longitud de onda, altura, amplitud, dirección.* / *Oceanografía / Apuntes Náuticos / Portada—Masmar*. <http://www.masmar.net/index.php/esl/Apuntes-N%C3%A1uticos/Oceanograf%C3%ADa/Caracter%C3%ADsticas-de-las-olas.-Longitud-de-onda.-altura.-amplitud.-direcci%C3%B3n>

- [6] *Ondas estacionarias*. (s. f.). Física de nivel básico, nada complejo.
<http://www.fisic.ch/contenidos/ondas-y-sonido/ondas-estacionarias/>
- [7] *Red Magisterial | Onda progresiva longitudinal periódica muelle*.
<https://www.redmagisterial.com/med/8761-onda-progresiva-longitudinal-periodica-muelle/>
- [8] https://biblus.us.es/bibing/proyectos/abreproy/70175/fichero/1_CapituloI.pdf
- [9] matias. (2009, enero 24). *Generación de energía a través de las olas* [Text].
- [10] P. Ibañez Ereño, Tecnalía. *Energía de las olas: Situación y futuro*.
- [11] *Energía undimotriz*. RJ Consultores. <https://www.rjconsultores.es/energia-undimotriz/>
- [12] *Enel Green Power Chile adquiere primer convertidor a escala completa de energía de las olas para el país—La Tercera*. <https://www.latercera.com/pulso/noticia/enel-green-power-chile-adquiere-primer-convertidor-escala-completa-energia-las-olas-pais/831022/>
- [13] Fondo Europeo de Desarrollo Regional. EVE. *Convertidor undimotriz flotante offshore*.
- [14] *Oscillating-water-column wave energy converters and air turbines: A review | Elsevier Enhanced Reader*. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2015.07.086>
- [15] *Marine and Hydrokinetic Technology Glossary*.
<https://www.energy.gov/eere/water/marine-and-hydrokinetic-technology-glossary>
- [16] *Oscillating Water Column—An overview | ScienceDirect Topics*.
<https://www.sciencedirect.com/topics/engineering/oscillating-water-column>
- [17] *Científicos vallisoletanos y marroquíes colaboran en el aprovechamiento energético de las olas*. Agencia SINC. <https://www.agenciasinc.es/Noticias/Cientificos-vallisoletanos-y-marroquies-colaboran-en-el-aprovechamiento-energetico-de-las-olas>
- [18] Trabajo Fin de Máster de Pelayo Pire Cortés (Julio 2018) *Aprovechamiento de la Energía Undimotriz en la Costa Asturiana*.
- [19] *Leandro Kessler. (2020, Mayo 22). Pelamis: Una serpiente marina robótica que genera energía eléctrica – Afinidad Eléctrica*.
- [20] *Controlar el poder de las olas para obtener energía renovable | WAVE DRAGON MW Project | Results in brief | FP6 | CORDIS | European Commission*.
<https://cordis.europa.eu/article/id/87300-harnessing-wave-power-for-renewable-energy/es>
- [21] Roams. *Energía undimotriz: Ventajas e inconvenientes*. Roams.
<https://energia.roams.es/energia-renovable/energia-undimotriz/ventajas>

9.4 CAPÍTULO 4

- [1] *Planta undimotriz de Mutriku.* (s. f.). Mutrikuko Udala.
<https://www.mutriku.eus/es/turismo/mutriku/planta-olas>
- [2] *La planta de energía de las olas de Mutriku bate un nuevo record de producción al generar 2 GWh—EVE.* <https://www.eve.eus/Jornadas-y-Noticias/Noticias/La-planta-de-energia-de-las-olas-de-Mutriku-bate?lang=es-es>
- [3] *OBAR.INFO PDF Compressor Online Free—COMPRESS-PDF.OBAR.INFO.* Obar.Info.
<https://compress-pdf.obar.info/>
- [4] *Red de Áreas Marinas Protegidas de España (RAMPE).*
- [5] *Google Maps.* Google Maps.
<https://www.google.es/maps/place/Arteijo,+La+Coru%C3%B1a/@43.3087357,-8.5795028,12z/data=!3m1!4b1!4m5!3m4!1s0xd2e886f005f9479:0x404f58273ca50b0!8m2!3d43.303707!4d-8.5102275?hl=es>
- [6] *Punta Langosteira en Galicia. Sitio de ensayos para aprovechar las olas y la energía eólica marina – Proyecto Undimotriz.* <https://undimotriz.frba.utn.edu.ar/punta-langosteira-en-galicia-sitio-de-ensayos-para-aprovechar-las-olas-y-la-energia-eolica-marina/>

9.5 CAPÍTULO 5

- [1] *Prediccion de oleaje, nivel del mar ; Boyas y mareografos | puertos.es.*
<https://www.puertos.es/es-es/oceanografia/Paginas/portus.aspx>
- [2] *Estrategia de Desarrollo Urbano Sostenible e Integrado de Arteixo (A coruña).*
- [3] *Instituto Nacional de Estadística. (Spanish Statistical Institute).*

[https://www.ine.es/nomen2/index.do?accion=busquedaDesdeHome&nombrePoblacion=art
eixo&x=0&y=0](https://www.ine.es/nomen2/index.do?accion=busquedaDesdeHome&nombrePoblacion=art
eixo&x=0&y=0)

- [4] IDAE, Consumos del Sector Residencial en España.

9.6 CAPÍTULO 6

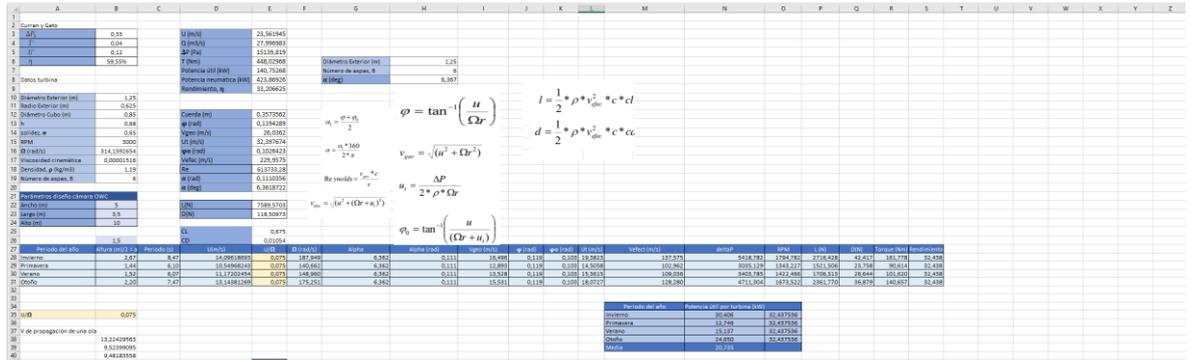
- [1] Shehata, A. S., Xiao, Q., Saqr, K. M., & Alexander, D. (2017). Wells turbine for wave energy conversion: A review. *International Journal of Energy Research*, 41(1), 6-38.
<https://doi.org/10.1002/er.3583>
- [2] Salueña Berna, J., Ortiz Marzo, J. A., & Raso Bautista, A. (2009, July). Diseño y fabricación 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. In *UPC Sostenible 2015*. Centre per a la Sostenibilitat.
- [3] Pablo Andrés Jimenez Tamara, 2004. Diseño y caracterización de una turbina Wells de aspas intercambiables, destinada a un sistema de extracción de energía de las olas.
- [4] Álvaro E. Pinilla, *Generación de energía eléctrica con turbinas wells*.
<https://doi.org/10.16924/revinge.15.8>
- [5] David Andrés Ruiz Henao, 2008. Estudio de una turbina Wells de bajo número de Reynolds.
- [6] NACA 0018 (*naca0018-il*). <http://airfoiltools.com/airfoil/details?airfoil=naca0018-il>
- [7] *Mathematical Modeling of Oscillating Water Columns Wave-Structure Interaction in Ocean Energy Plants*. <https://www.hindawi.com/journals/mpe/2015/727982/>
- [8] IDAE, Consumos del Sector Residencial en España.
- [9] *Los Retos del Agua Salada: Elección de Materiales—Ingeniero Marino*.

9.7 *CAPÍTULO 7*

- [1] IDAE, Consumos del Sector Residencial en España.

ANEXO I

- **EXCEL UTILIZADO**



Handwritten formulas in the spreadsheet:

- $\phi = \tan^{-1} \left(\frac{u}{\Omega r} \right)$
- $l = \frac{1}{2} \rho v_{\text{rel}}^2 c_l$
- $d = \frac{1}{2} \rho v_{\text{rel}}^2 c_d$
- $v_{\text{rel}} = \sqrt{u^2 + (\Omega r)^2}$
- $M_t = \frac{\Delta P}{2 \rho \Omega r}$
- $\phi_0 = \tan^{-1} \left(\frac{u}{(\Omega r + u)} \right)$
- $v_{\text{rel}} = \sqrt{u^2 + (\Omega r + u)^2}$

- **COORDENADAS X E Y PERFIL NACA 0018**

NACA 0018	
1.0000	0.00189
0.9500	0.01210
0.9000	0.02172
0.8000	0.03935
0.7000	0.05496
0.6000	0.06845
0.5000	0.07941
0.4000	0.08705
0.3000	0.09003
0.2500	0.08912
0.2000	0.08606
0.1500	0.08018
0.1000	0.07024
0.0750	0.06300
0.0500	0.05332
0.0250	0.03922
0.0125	0.02841
0.0000	0.00000
0.0125	-0.02841
0.0250	-0.03922

0.0500	-0.05332
0.0750	-0.06300
0.1000	-0.07024
0.1500	-0.08018
0.2000	-0.08606
0.2500	-0.08912
0.3000	-0.09003
0.4000	-0.08705
0.5000	-0.07941
0.6000	-0.06845
0.7000	-0.05496
0.8000	-0.03935
0.9000	-0.02172
0.9500	-0.01210
1.0000	-0.00189



Fecha de Publicación: 20/02/2020

CONJUNTO DE DATOS SIMAR

Procedencia y obtención del conjunto de datos

El conjunto de datos SIMAR está formado por series temporales de parámetros de viento y oleaje procedentes de modelado numérico. Son, por tanto, datos simulados y no proceden de medidas directas de la naturaleza.

Las series SIMAR surgen de la concatenación de los dos grandes conjuntos de datos simulados de oleaje con los que tradicionalmente ha contado Puertos del Estado: SIMAR y WANA. El objetivo es el de poder ofrecer series temporales más extensas en el tiempo y actualizadas diariamente. De este modo, el conjunto SIMAR ofrece información desde el año 1958 hasta la actualidad.

Durante este trabajo de fusión se aprovechó para ampliar también la cobertura espacial, aumentando considerablemente el lote de puntos disponibles tanto en el Mar Mediterráneo como en el Océano Atlántico, en aguas abiertas como en costa, llegando a ofrecer datos a escala portuaria.



Figura 1. Distribución espacial de los Nodos SIMAR año 2020



Contribución 1958-2005: Subconjunto SIMAR-44

El conjunto SIMAR-44 se constituye a partir de simulaciones realizadas por modelado numérico de atmósfera y oleaje que cubren todo el entorno litoral español. La simulación de oleaje fue realizada por Puertos del Estado para lo cual se utilizaron los datos procedentes de la simulación de atmósfera realizada la Agencia Estatal de Meteorología (AEMET, www.aemet.es). El objetivo final de este trabajo fue la reconstrucción del comportamiento de los agentes simulados durante más de 44 años y obtener así series de datos de interés climático.

Seguidamente se da una breve descripción más detallada del modo en que se ha generado cada uno de los agentes simulados.

Viento

Los datos de viento proceden de un downscaling dinámico realizado con el modelo atmosférico regional RCA3.5 a partir de los datos de dos retroanálisis atmosféricos globales: ERA-Interim, que cubría el periodo temporal 1989-2005 y ERA-40, con datos disponibles entre los años 1958 y 2001. Estas simulaciones fueron realizadas por la AEMET con una resolución en la malla de 12' de latitud por 12' de longitud (aproximadamente 20 Km por 20 Km). Los datos de viento facilitados son promedios horarios a 10 metros de altura sobre el nivel del mar.

Los conjuntos de datos resultantes se han unido para construir uno único. El conjunto resultante tiene así una cobertura temporal de 47 años, desde 1958 a 2005, basado en la simulación que utilizó ERA-40 en el periodo 1958-2000 y continuado con los datos obtenidos a partir de ERA-Interim entre los años 2001-2005.

Debido a la resolución de la malla utilizada para integrar el modelo atmosférico RCA3.5 no es posible reproducir el efecto de accidentes orográficos de extensión inferior a 20 Km. Tampoco quedan modelados la influencia en el viento de procesos de convección de escala local. No obstante, el modelo reproduce correctamente los vientos regionales inducidos por la topografía como el Cierzo, Tramontana, Mistral, etc. De modo general es más fiable la reproducción de situaciones con vientos procedentes de mar.

Oleaje

Para generar los campos de oleaje se ha utilizado en modelo numérico WaveWatch III utilizando un esquema de anidamiento de mallas similar al de la predicción operativa del oleaje de Puertos del Estado. Los datos se han generado con una cadencia horaria y cubre el periodo 1958-2005. Se ha realizado descomposición de mar de viento y mar de fondo. Con el fin de describir situaciones con mares de fondo cruzados, se ha considerado la posibilidad de dos contribuciones de mar de fondo.

Para el área mediterránea se ha utilizado una malla de espaciamiento variable con una resolución de 15' de latitud x 15' de longitud (unos 25 Km x 25 Km) para el borde este de la malla y de 7.5' de latitud x 7.5' de longitud (aproximadamente 12.5Km x 12.5Km) para el resto del área modelada.

Por otro lado, para el área atlántica se ha utilizado una malla de espaciamiento variable que cubre todo el Atlántico Norte con una resolución de 30' latitud x 30' longitud para las zonas más alejadas de la Península Ibérica y de Canarias, aumenta a 15' del latitud x 15' de longitud al aproximarse. Para el entorno del Golfo de Cádiz y del Archipiélago Canario se han anidado a la malla principal mallas secundarias con una resolución de 5' de longitud x 5' latitud. Por su parte,



en la costa cantábrica y gallega la malla anidada tiene una resolución de 2.5'. La zona del Estrecho de Gibraltar no queda cubierta por este re

El modelo WaveWatch III usado para generar estos datos incluye efectos de refracción y asomeramiento. No obstante, dada la resolución del modelo, se pueden considerar despreciables los efectos del fondo. Por tanto, para uso práctico los datos de oleaje deben de interpretarse siempre como datos en aguas abiertas a profundidades indefinidas.

Contribución 2006-actualidad: Subconjunto WANA

Las series WANA proceden del sistema de predicción del estado de la mar que Puertos del Estado ha desarrollado en colaboración con la Agencia Estatal de Meteorología (AEMET, www.aemet.es). No obstante, los datos WANA no son datos de predicción sino datos de diagnóstico o análisis. Esto supone que para cada instante el modelo proporciona campos de viento y presión consistentes con la evolución anterior de los parámetros modelado y consistente con las observaciones realizadas.

Es importante tener en cuenta que las series temporales de viento y oleaje del conjunto WANA no son homogéneas pues los modelos de viento y oleaje se van modificando de modo periódico para introducir mejoras. Estas mejoras han permitido, entre otras cosas, aumentar la resolución espacial y temporal de los datos a partir de los cuales se genera la información del conjunto WANA. De todos estos cambios, cabe destacar el cambio de modelo predictivo que realizó Aemet en el año 2018, en el que se sustituyó HIRLAM por el modelo HARMONIE-AROME. Las siguientes tablas muestran la evolución de los cambios en la resolución temporal y espacial de los modelos:

VIENTO	MODELO HIRLAM						MODELO HARMONIE	
	1996-2006		2006-2012		2012-2018		2018-actualidad	
	temporal	espacial	temporal	espacial	temporal	espacial	temporal	espacial
	6h	30 Km	6h	16 Km	1h	5 Km	1h	2.5 Km

Tabla 1. Evolución en la resolución espacial y temporal de los modelos atmosféricos con los que se genera el subconjunto de datos del subconjunto WANA.

OLEAJE								
Dominio	1996-2006		2006-2012		2012-2018		2018-actualidad	
	temporal	espacial	temporal	espacial	temporal	espacial	temporal	espacial
Cantábrico	3h	15 Km	3h	4.2 Km	1h	2.5 Km		
Cádiz	3h	15 Km	3h	8.3 Km	1h	5 Km		
Mediterráneo	3h	7.5 Km	3h	8.3 Km	1h	5 Km		
Canarias	3h	15 Km	3h	8.3 Km	1h	5 Km	1h	2.1 Km
Estrecho Gibraltar	--	--	3h	1.6 Km	1h	1 Km	1h	700 m
Península	--	--	--	--	--	--	1h	2.8 Km
Baleares	--	--	--	--	--	--	1h	1.4 Km

Tabla 2. Evolución en la resolución espacial y temporal del modelo de oleaje con el que se genera el subconjunto de datos del subconjunto WANA.



Seguidamente se da una breve descripción de los modelos numéricos utilizados para generar las series de viento y oleaje.

Viento

El modelo atmosférico utilizado para generar los campos de vientos ha cambiado a lo largo del tiempo. Hasta octubre del año 2018 se utilizó el modelo HIRLAM de AEMET, un modelo atmosférico mesoescalar e hidrostático cuya resolución espacial y temporal varió según se indica en la tabla 1. A partir de ese año Aemet sustituyó HIRLAM por el HARMONIE-AROME, modelo de mesoescala, no hidrostático con mayor resolución espacial que su predecesor. Los datos de viento facilitados son 10 metros del altura sobre el nivel del mar.

Los datos de viento obtenidos no reproducen efectos geográficos ni procesos temporales de escalas inferiores a la resolución con la que se ha integrado el modelo de atmósfera (consultar la Tabla 1 para conocer la resolución y su evolución con el paso del tiempo). No obstante, los modelos reproducen correctamente los vientos regionales inducidos por la topografía como el Cierzo, Tramontana, Mistral, etc.

Oleaje

Para generar los campos de oleaje se han utilizado dos modelos: WAM y WaveWatch, alimentados por los campos de viento del modelo proporcionado por AEMET (HIRLAM hasta el año 2018 y HARMONIE-AROME desde entonces). Los dos primeros son modelos espectrales de tercera generación que resuelven la ecuación de balance de energía sin establecer ninguna hipótesis *a priori* sobre la forma del espectro de oleaje. Adicionalmente se utiliza el modelo SWAN en las aplicaciones SAPO (*Sistema de predicción en las Autoridades Portuarias*) desarrolladas específicamente para los puertos y su entorno más próximo y tiene en cuenta las transformaciones sufridas por el oleaje al aproximarse a la costa.

La resolución espacial de los modelos varía dependiendo de la zona, ya que se han desarrollado aplicaciones específicas para diferentes áreas. El planteamiento de dichas aplicaciones también ha variado en consonancia con los cambios en los forzamientos atmosféricos que realizó AEMET en 2018 (cambio de modelo HIRLAM a HARMONIE-HAROME). Hasta ese momento el sistema contaba con dos mallas de grandes dimensiones, una centrada en el Atlántico y otra en el Mediterráneo, a las que se anidaban mallas de mayor resolución de regiones costeras: Cantábrico, Cádiz y Canarias. El Estrecho de Gibraltar contaba con una aplicación específica que tenía en cuenta los oleajes provenientes tanto del Atlántico como del Mediterráneo. Desde octubre de 2018 el sistema cuenta con una aplicación de gran escala, con una resolución aproximada de 25km, que cubre tanto el Atlántico como el Mediterráneo. Con esta configuración la región atlántica se amplía hacia el sur con el objetivo de mejorar la predicción de los temporales procedentes del sur en las Islas Canarias. A esta se anida una malla de unos 8Km de resolución, que abarca la región atlántica entre Irlanda y las Islas Canarias así como el Mediterráneo occidental. En un segundo nivel de anidamiento existen aplicaciones que resuelven las Islas Canarias a una resolución aproximada de 2km y la Península Ibérica y Baleares, a una resolución de 2.8km. Por último, el área de Islas Baleares y el Estrecho de Gibraltar cuentan con aplicaciones específicas a una resolución de 1.4km y 700m respectivamente. En la Tabla 2 se puede consultar con más detalle la resolución de las diferentes aplicaciones a lo largo del tiempo. En la Figura 2 se puede ver la cobertura del esquema de mallas actual.

En la gran parte de los casos se ha realizado una descomposición de mar de viento y mar de fondo. Con el fin de describir situaciones con mares de fondo cruzados, se han considerado dos contribuciones posibles para el mar de fondo.



Es importante tener en cuenta, que, con independencia de la coordenada asignada a un nodo WANA, los datos de oleaje deben de considerarse, siempre, como datos en aguas abiertas y profundidades indefinidas salvo que procedan de una aplicación SAPO.

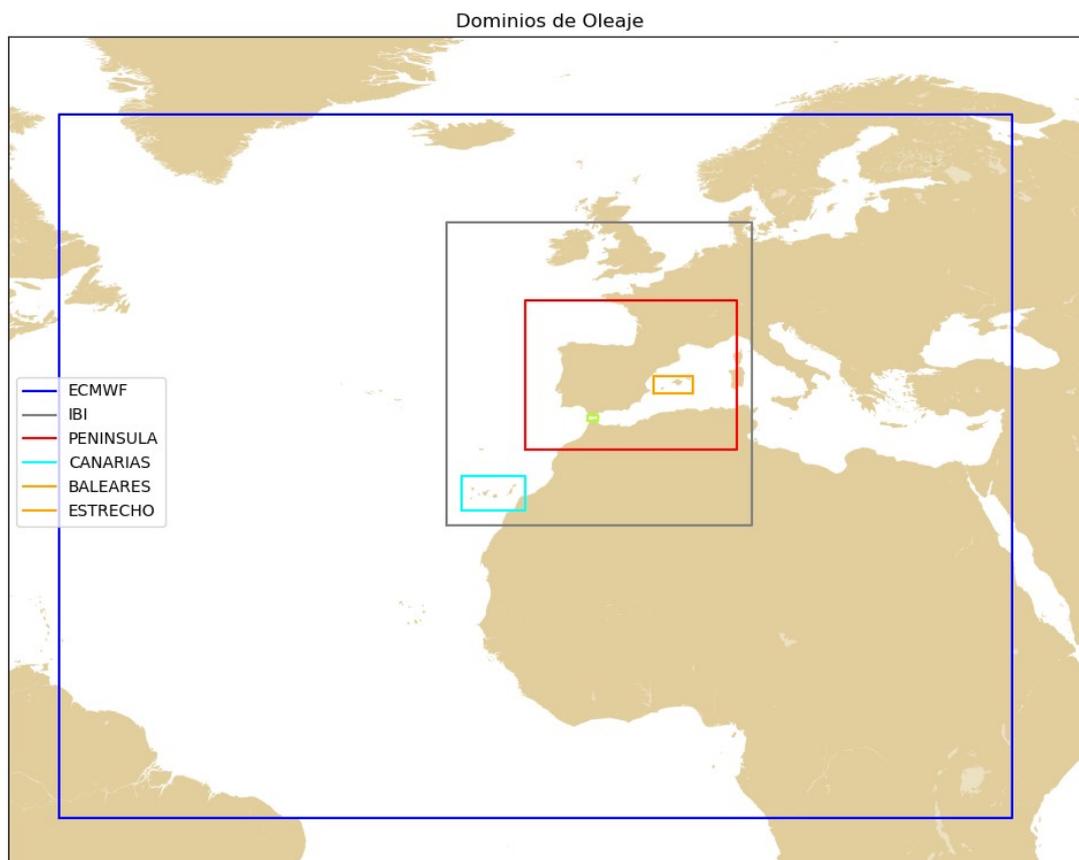


Figura 2. Dominios de predicción de oleaje desde el año 2018

El caso de los puntos procedentes de las aplicaciones SAPO es particular ya que, al estar muy cerca de la costa, éstas sí que tienen en cuenta las transformaciones sufridas por el oleaje al aproximarse a la costa y se obtienen a partir de mallas con resoluciones comprendidas entre los 350m y los 150m, dependiendo del tamaño de la zona costera a estudiar y las complejidades geográficas de la zona de estudio. Por tanto se trata de un oleaje propio de aguas someras, influenciado por la morfología de la costa y la profundidad. De momento son pocos puntos los que se almacenan en el Banco de Datos y la longitud de las series bastante limitada ya que para estos puntos no se realizó el retroanálisis, de modo que la disponibilidad de información se inicia con la puesta en marcha de la aplicación SAPO o incluso posterior.

Precauciones de Uso

El conjunto de datos SIMAR proporciona descripciones del clima de viento y oleaje, que en general, son adecuadas en todo el entorno litoral español. No obstante, es necesario tener cautela en las siguientes zonas:



- De forma general se puede decir que los modelos tienden a subestimar los picos en las velocidades de viento y las alturas de ola en situaciones de temporal muy extremo. Se aconseja pues cotejar la magnitud aproximada del temporal con datos instrumentales de la zona.
- En el Sur del Archipiélago Canario pueden no reproducirse bien condiciones procedentes del Sur Oeste debido a la proximidad del límite del dominio de la malla que utiliza el modelo.

Parámetros Disponibles

- Oleaje
 - Altura significativa espectral
 - Periodo de pico espectral
 - Periodo medio espectral (momentos 0 y 2)
 - Dirección Media de Procedencia del Oleaje
 - Altura, y Dirección de Mar de Viento
 - Altura, Periodo medio y Dirección de Mar de Fondo
- Viento
 - Velocidad media
 - Dirección medida de Procedencia del Viento

Puntos disponibles

De toda la información generada en los procesos de simulación, se ha seleccionado un subconjunto de 3800 puntos, considerado como representativo del clima en el área que abarcan los modelos, cuya información ha sido almacenada en el Banco de Datos de Puertos del Estado. De forma general, las series temporales almacenadas en este Banco de Datos cubren el periodo de más de 50 años, comenzando en el año 1958 y llegando hasta la actualidad ya que éstas se actualizan de manera automática dos veces al día para añadir los nuevos datos de diagnóstico generados por el sistema de predicción.

No obstante, en algunos casos puede darse la circunstancia de que la cobertura temporal sea menor de esos 50 años, por faltar la información de uno de los subconjuntos. Esto se debe a que, a pesar de la carencia, se ha considerado que era importante ofrecer la información disponible por razones de relevancia geo-estratégica.

En el proceso de modelado se generaron campos con una cadencia horaria. La figura 1 muestra la cobertura espacial del conjunto SIMAR. En la Figura 3 muestran dos mapas ampliados en el Atlántico y el Mediterráneo respectivamente que permite percibir la densidad de los nodos SIMAR almacenados en el Banco de Datos Oceanográficos.

Los datos de oleaje del conjunto SIMAR pueden consultarse de modo interactivo en la página Web de Puertos del Estado. Para ello es necesario acceder mediante la ruta:

www.puertos.es > Oceanografía > Previsión, tiempo real y clima



o bien, con el enlace directo:

<http://www.puertos.es/es-es/oceanografia/Paginas/portus.aspx>

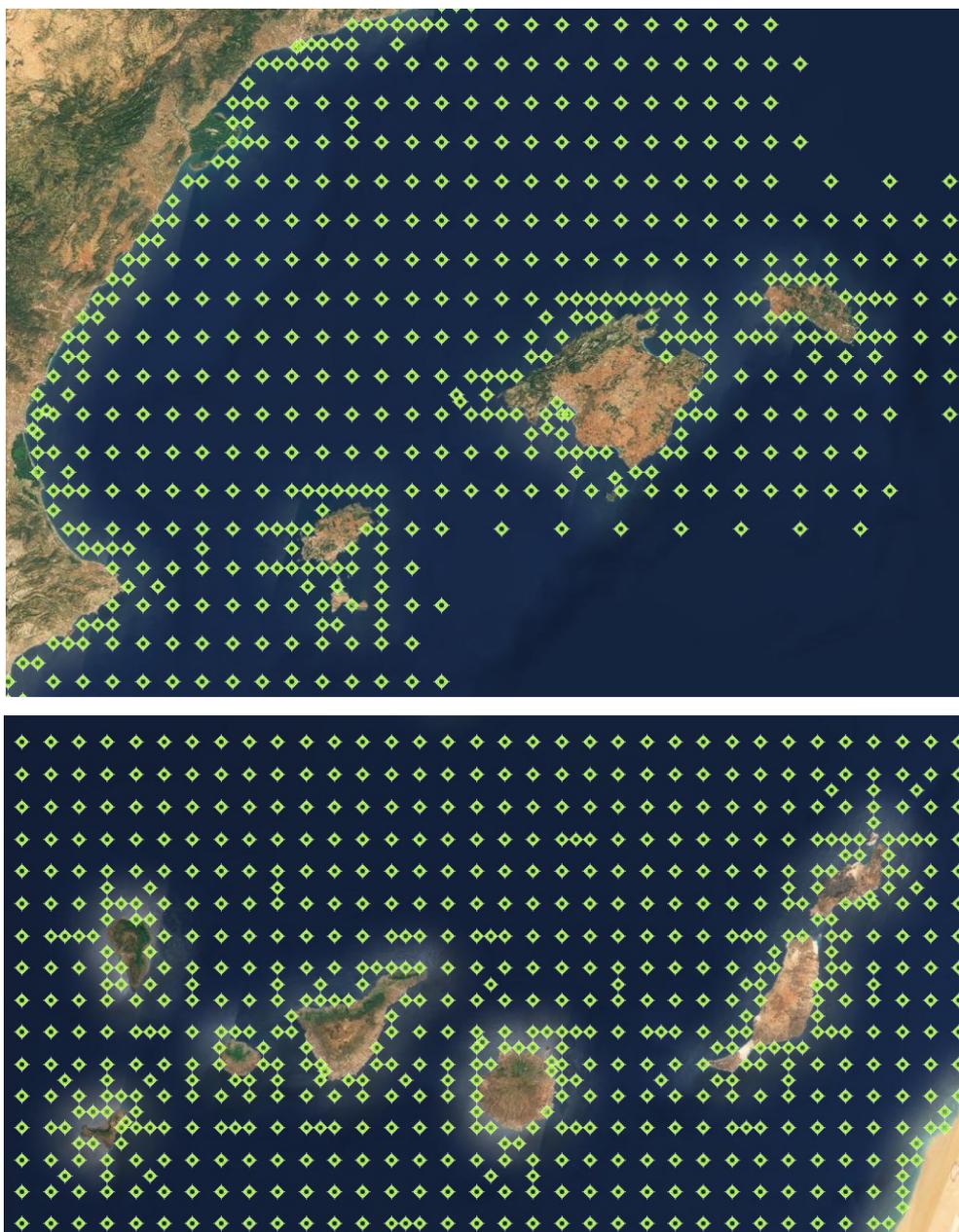


Figura 3. Ejemplos de densidad espacial de los Nodos SIMAR en Mediterráneo e Islas Canarias

Por otro lado, también es posible adquirir tanto series temporales, como informes climáticos basados en este conjunto. Para ello debe enviarse un correo electrónico a la atención de “Pilar Gil” a través de la dirección (pilar@puertos.es).