

eman ta zabal zazu



Universidad  
del País Vasco

Euskal Herriko  
Unibertsitatea

BILBOKO  
INGENIARITZA  
ESKOLA  
ESCUELA  
DE INGENIERÍA  
DE BILBAO

GRADO EN INGENIERIA EN TECNOLOGIA INDUSTRIAL

# TRABAJO FIN DE GRADO

## *DISEÑO DE PARQUE EÓLICO OFFSHORE*

**Alumno:** Alonso Fernández, Ivan

**Directora:** Rozas Guinea, Saroa

**Curso:** 2019-2020

**Fecha:** Bilbao, 18, septiembre, 2019



## RESUMEN

En un mundo en el que el cambio climático es cada vez más perceptible, es necesario realizar una transición energética hacia un sistema más sostenible. Así pues, el uso de fuentes de energía renovable es vital. Por ello, en este trabajo se diseñará un parque eólico offshore en la costa de Fuerteventura, conocido el potencial eólico que esta zona posee.

En primer lugar, se analizarán las diferentes alternativas del estudio. A continuación, se describirá la solución propuesta y, por último, se hará un estudio tanto ambiental como económico para conocer la viabilidad del proyecto.

## ABSTRACT

In a world where climate change is increasingly visible, it is necessary to make a transition to a more ecological system. That is why the use of renewable energy sources is vital. Therefore, this project will design an offshore wind farm on the coast of Fuerteventura, known the wind potential that this area has.

First, there will be analysed the different alternatives the study has got. Next, the proposed solution will be described and finally, an environmental and economic study will be carried out to know the viability of the project.

## LABURPENA

Mundu honetan, non klima aldaketa gero eta nabariagoa den, sistema ekologiko bateranzko trantsizio bat egitea beharrezkoa da. Horregatik, energia iturri berriztagarriak erabiltzea ezinbestekoa da. Hori dela eta, proiektu honetan parke eoliko offshore bat diseinatuko da Fuerteventurako kostaldean, jakinda zonalde honetan dagoen potentzial eoliko.

Lehenik eta behin, ikasketa dituen aukera ezberdinak aztertuko dira. Ostean, aukeratutako emaitza deskribatuko da eta azkenik, ingurumen eta ekonomia azterlanak burutuko dira proiektuaren bideragarritasuna ezagutzeko.

## ÍNDICE DE CONTENIDO

---

1 INTRODUCCIÓN.....	8
2 CONTEXTO.....	9
3 OBJETIVO Y ALCANCE.....	11
4 BENEFICIOS DEL PROYECTO.....	12
5 ANALISIS DE ALTERNATIVAS.....	13
5.1 SISTEMA ENERGÉTICO DE CANARIAS.....	13
5.2 EMPLAZAMIENTO DEL PARQUE EÓLICO.....	16
5.2.1 RECURSO EÓLICO.....	17
5.2.2 BATIMETRIA.....	23
5.2.3 INFRAESTRUCTURA EN TIERRA.....	24
5.2.4 INFRAESTRUCTURA DE LA RED ELÉCTRICA.....	26
5.1.5 CARACTERÍSTICAS AMBIENTALES.....	27
5.3 AEROGENERADORES.....	28
5.4 SISTEMAS DE ANCLAJE.....	32
5.4.1 ANCLAJES FIJOS.....	33
5.4.2 PLATAFORMAS FLOTANTES.....	35
5.5 DISTRIBUCIÓN DE AEROGENERADORES.....	39
6 DESCRIPCION DE LA SOLUCION PROPUESTA.....	42
6.1 SELECCIÓN DE UBICACIÓN.....	42
6.2 SELECCIÓN DEL AEROGENERADOR.....	43
6.3 SELECCIÓN DEL SISTEMA DE ANCLAJE.....	44
6.4 SELECCIÓN DE LA DISTRIBUCIÓN DE LOS AEROGENERADORES.....	44
6.5 PRODUCCIÓN ANUAL DEL PARQUE.....	46
7 IMPACTO AMBIENTAL.....	47
7.1 MEDIO INERTE.....	48
7.1.1 AGUA.....	48
7.1.2 AIRE.....	49
7.1.3 LECHO MARINO.....	49
7.2 MEDIO BIÓTICO.....	50
7.2.1 PECES Y MAMÍFEROS.....	50
7.2.2 AVES.....	50

7.2.3 FLORA.....	51
7.3 MEDIO SOCIOECONÓMICO .....	51
7.3.1 PAISAJE.....	51
7.3.2 CONTAMINACIÓN LUMÍNICA.....	52
7.3.3 PESCA.....	52
7.3.4 TURISMO.....	52
7.3.5 EMPLEO.....	53
8 ANÁLISIS ECONÓMICO .....	54
8.1 COSTES DE INVERSION .....	54
8.2 PRESUPUESTO .....	55
8.3 BENEFICIOS ANUALES .....	57
8.4 PAYBACK.....	58
9 DESCRIPCIÓN DE TAREAS.....	59
9.1 PLANIFICACION DEL PROYECTO .....	59
9.2 DIAGRAMA DE GANTT.....	61
.....	61
10 CONCLUSIONES.....	62
11 BIBLIOGRAFÍA.....	63

## ÍNDICE DE ILUSTRACIONES

---

Ilustración 1. Evolución potencia instalada (Fuente: GWEC) .....	9
Ilustración 2 Mapa parques eólicos Fuerteventura (Fuente: Gobierno de Canarias) .....	16
Ilustración 3 Mapa Fuerteventura (Fuente: Google Maps) .....	17
Ilustración 4 Velocidad media viento en islas Canarias (Fuente: IDAE) .....	20
Ilustración 5 Rosa del viento (Fuente: IDECanarias).....	22
Ilustración 6 Batimetría (Fuente: EMODnet).....	23
Ilustración 7 Puertos de Fuerteventura (Fuente: Google Maps).....	24
Ilustración 8 Puerto del Gran Tarajal (Fuente: Gobierno de Canarias).....	25
Ilustración 9 Puerto del Rosario (Fuente: Gobierno de Canarias).....	25
Ilustración 10 Red de transporte eléctrico (Fuente: REE).....	26
Ilustración 11 Estudio ambiental de Canarias (Fuente: IDAE) .....	27
Ilustración 12 Leyenda estudio ambiental (Fuente: IDAE) .....	27
Ilustración 13 Monopilote (Fuente: Iberdrola).....	33
Ilustración 14 Cimentación por gravedad (Fuente: Iberdrola) .....	34
Ilustración 15 Jacket (Fuente: Iberdrola).....	35
Ilustración 17 Modelo Hywind (Fuente: Crown Copyright) .....	36
Ilustración 18 Modelo WindFloat (Fuente: Naval Group) .....	37
Ilustración 19 Sistema Gicon (Fuente: Gicon) .....	38
Ilustración 20 Efecto estela (Fuente: Universidad Politécnica de Madrid).....	39
Ilustración 21 Distribución en línea .....	40
Ilustración 22 Distribución en cuadro alineado .....	41
Ilustración 23 Distribución en cuadro no alineado .....	41
Ilustración 24 Ubicación del parque (Fuente: Google Earth) .....	42
Ilustración 25 Vestas V117-4,2MW (Fuente: Vestas).....	43
Ilustración 26 Distribución seleccionada (Fuente: BOE) .....	45
Ilustración 27 Impacto visual aerogeneradores (Fuente: Iberdrola).....	52
Ilustración 28 Diagrama de Gantt (GanttPro) .....	61

## ÍNDICE DE GRÁFICOS

---

Gráfico 1 Mix potencia instalada (Fuente: Gobierno de Canarias) .....	14
Gráfico 2 Distribución energía (Fuente: Gobierno de Canarias) .....	15
Gráfico 3 Demanda energética (Fuente: Gobierno de Canarias) .....	15
Gráfico 4 Parámetros de Weibull (Fuente: Elaboración propia).....	19
Gráfico 5 Distribución de Weibull .....	21
Gráfico 6 Curvas de potencia (Fuente: Thewindpower) .....	30
Gráfico 7 Costes de inversión (Offshore wind power Basque Country).....	54

## ÍNDICE DE TABLAS

---

Tabla 1 Datos viento urbanización Fuerteventura Golf Club (Fuente: MeteoBlue) 18	
Tabla 2 Valores sigma en función de x .....	20
Tabla 3 Especificaciones aerogeneradores (Fuente: Thewindpower) .....	29
Tabla 4 Energía anual producida (Fuente: Elaboracion propia).....	31
Tabla 5 Potencia y numero de aerogeneradores (Fuente: Elaboración propia).....	32
Tabla 6 Coordenadas de la ubicación del parque.....	42
Tabla 7 Datos para cálculo de emisiones (Fuente: IDAE) .....	49

## 1 INTRODUCCIÓN

---

Hoy en día, el cambio climático es una realidad. Muestra de ello es el aumento continuo de la temperatura media global, la cual genera un sinnúmero de problemas a nuestro planeta: aumento del nivel del mar por el derretimiento de los cascos polares, condiciones meteorológicas extremas con mayor asiduidad, desertización, etc.

Un cambio es necesario en todos los aspectos de la sociedad, para poder hacer de nuestro entorno un lugar más sostenible y próspero para nosotros y las generaciones venideras. Entre estos aspectos, uno de los que más importancia está adquiriendo en los últimos años es el de la energía. Para poder desempeñar todas las funciones del día a día la energía es estrictamente necesaria. Es por ello que la generación de energía cobra un papel reseñable y necesita empezar a abandonar los métodos tradicionales, como pueden ser las centrales de carbón o las de ciclo combinado, las cuales son muy perjudiciales para el planeta. A cambio, se debería apostar por una transición energética que fomente las distintas fuentes de energía renovable: eólica, solar, hidráulica...

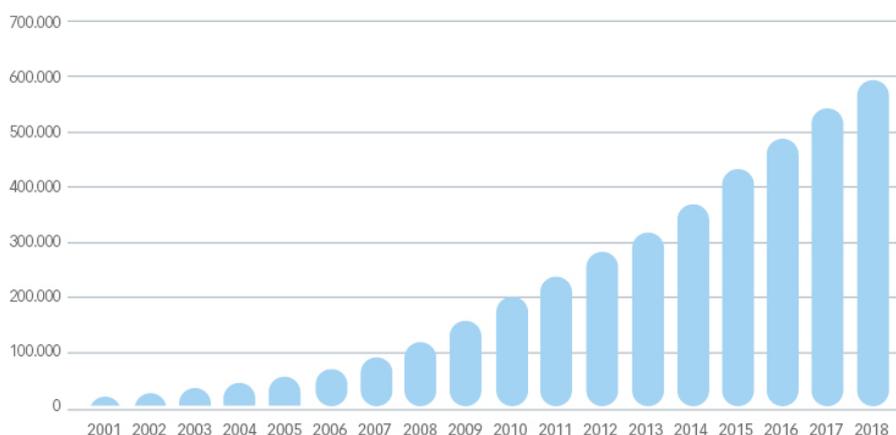
En este trabajo, se pondrá el foco principalmente en la energía eólica, y más concretamente la que se sitúa en el mar, conocida como energía eólica offshore. En primer lugar, se realizará un pequeño análisis de dicha tecnología, explicando cuál es su funcionamiento y situación en el mundo de la generación de energía. Una vez puesto en contexto, se procederá a describir el diseño de un parque eólico offshore situado en la costa de Fuerteventura. Dentro de las diferentes etapas de diseño, la primera será la selección del emplazamiento del parque, intentando buscar el lugar óptimo, A continuación, se analizarán las distintas alternativas para el dimensionamiento del parque. Finalmente, en la última etapa, se describirá la solución propuesta, en base a las alternativas anteriormente mencionadas, y se hará un presupuesto de los costes aproximados y un análisis de los principales impactos ambientales que supondrían dicho proyecto.

## 2 CONTEXTO

La energía eólica es una de las fuentes de energía más antiguas utilizadas por la humanidad. Ya en el antiguo Egipto, año 3000 a.C., se usaba el viento en los primeros barcos veleros. Unos cuantos siglos más tarde, en torno al siglo VII, empezaron a aparecer los primeros molinos de viento en la antigua Persia. Estos molinos de eje vertical se usaban principalmente para moler el grano o bombear agua. Pasaron los años, y con la llegada de la máquina de vapor en la Revolución Industrial, los molinos empezaron a perder importancia porque carecían de sentido con el nivel de tecnología que había en aquella época. Fue en 1802 cuando Lord Kelvin diseñó el primer prototipo de aerogenerador, pero este prototipo no pudo ser llevado a cabo hasta unos años más tarde, gracias a la invención del dinamo. Fue entonces cuando, en 1888, Charles F. Brush creó la primera turbina eólica para generar electricidad. (Ekidom, s.f.)

A pesar de que durante la primera mitad del siglo XX hubo importantes avances en el sector de la energía eólica, no fue hasta la década de los 70 cuando apareció un interés real por su tecnología. Este interés fue consecuencia de la grave crisis del petróleo que tuvo lugar en esta época, la cual impulsó alternativas de generación de energía eléctrica. En 1980, empezaron a aparecer los primeros aerogeneradores comerciales, los cuales generaban una potencia máxima de 55 kW. A partir de este momento, el crecimiento de la energía eólica ha sido exponencial sobre todo a comienzos del siglo XXI.

**EVOLUCIÓN DE LA POTENCIA INSTALADA EN EL MUNDO (EN MW).  
AÑO 2018**



**Ilustración 1. Evolución potencia instalada (Fuente: GWEC)**

Si se analiza la situación actual de esta fuente de energía, queda claramente visible su importante presencia en el mercado de las energías renovables. En el año 2018, según la GWEC (Global Wind Energy Council), había instalados 591 GW repartidos por todo el mundo, colocándose como la primera fuente de energía renovable en términos de potencia instalada y la segunda en producción, solo por detrás de la energía hidráulica.

Analizando la situación de esta tecnología en España, se observa que el papel que juega no es menor. Teniendo en cuenta los últimos informes del año 2018 de REE (Red Eléctrica de España), los 23.484 MW instalados por toda la geografía del país convirtieron a la energía eólica en la segunda fuente más importante en lo que respecta a la generación eléctrica.

En lo que se refiere a la energía eólica offshore, puede decirse que es una tecnología menos desarrollada que la onshore. Esto se puede ver claramente en la cantidad de potencia instalada en los mares europeos, la cual ronda los 18,5 GW, la gran mayoría en el mar del Norte y mar Báltico, frente a los 170 GW instalados en tierra. Para entender estas diferencias, hay que tener en cuenta que el primer parque comercial en alta mar fue construido en 2001 en Dinamarca. Durante estos 20 años, la tecnología ha ido desarrollándose y se ha podido empezar a salvar los principales escollos, como pueden ser el oleaje o la profundidad del lecho marino. (AEEolica)

En España, la participación de este tipo de energía eólica en la generación de energía es casi nula, con tan solo un aerogenerador instalado en la costa de las islas canarias, el cual se encuentra en fase de pruebas. Esto se debe principalmente a la elevada profundidad del fondo marino, que dificulta en exceso la cimentación de los aerogeneradores, aumentando en demasía los costes. Sin embargo, la industria española es una de las más potentes a nivel europeo en este sector, en cuanto a desarrollo e innovación se refiere. Una clara muestra de ello es el parque eólico offshore Wikinger de más de 800 MW, diseñado y operado al cien por cien por empresas españolas, pese a estar situado en costas alemanas. (Iberdrola)

El futuro de la energía eólica es realmente alentador, y se espera seguir aumentando en gran medida y renovando la capacidad instalada. La aparición de nuevos aerogeneradores con mayor potencia nominal proporcionará mayor cantidad de energía en un menor espacio. Además, en la tecnología offshore se esperan conseguir nuevas estructuras flotantes que abaraten los costes de construcción y a su vez, faciliten su instalación en lugares con mayor profundidad del fondo.

### 3 OBJETIVO Y ALCANCE

---

El principal objetivo de este trabajo es realizar un análisis de las distintas alternativas para diseñar un parque eólico offshore en la costa de Fuerteventura. Tal y como se detallará más adelante, la implantación de energías renovables en esta isla es bastante baja en comparación con la del resto del estado, en torno al 5 %. Debido a esta cuestión, se ha decidido a modo de objetivo a la hora de dimensionar la instalación, que gracias a ésta se pueda suplir el 30 % de la producción energética mediante energía de fuente renovable con el fin de dar un importante impulso a una transición energética más sostenible y poder ir reduciendo paulatinamente en la isla las emisiones de gases de efecto invernadero provenientes de centrales térmicas. También, de esta forma se tratará de igualar, dentro de unos límites razonables, la tasa de producción mediante fuentes renovables a la media española, que en 2018 alcanzó el 40 % (Total Gas y Electricidad, 2019).

El primer paso, consistirá en hacer un análisis de la situación geográfica de la isla para poder determinar el lugar idóneo para la localización de la instalación, en la cual se obtenga el mayor provecho. Para ello, se estudiarán aspectos como la demanda energética, el recurso eólico, la orografía, el impacto ambiental, etc.

Una vez seleccionado el emplazamiento del parque se procederá a estudiar las distintas alternativas para la selección de aerogeneradores, sistemas de anclajes y distribución del parque. Para ello, será necesario conocer las distintas características de cada alternativa y ver cuáles serán sus pros y sus contras.

A continuación, se hará una descripción justificada de la solución elegida para la construcción, así como un cálculo de la producción anual del parque.

Finalmente, se llevará a cabo un estudio del impacto ambiental y en lo que respecta al análisis económico, se realizará un presupuesto para la instalación del proyecto teniendo en cuenta las inversiones, amortizaciones de los equipos y costes de personal entre otros. También, se describirá un análisis de viabilidad para poder determinar el payback del proyecto.

### 4 BENEFICIOS DEL PROYECTO

---

El principal beneficio de este proyecto será la reducción de gases de tipo invernadero producidos por las centrales térmicas utilizadas para la generación de energía, ya que éstas serán sustituidas por un parque eólico offshore que generará energía limpia 100 % renovable. De esta manera, mejorará la calidad del aire en beneficio de la fauna, flora y habitantes de la zona.

Además, los parques offshore a pesar de sus limitaciones tienen varios puntos a favor en comparación con los onshore, que los hacen realmente competitivos. En primer lugar, el recurso eólico en el mar es mucho más potente y pueden alcanzarse velocidades notablemente mayores. En consecuencia, permite la instalación de aerogeneradores de mayor potencia, consiguiendo así mayores cantidades de energía. Además, la rugosidad del terreno es mínima y no se encuentran ningún tipo de obstáculos, por lo que la disponibilidad de espacio en alta mar es mucho más amplia permitiendo así la construcción de parques eólicos de gran envergadura. Por último y no menos importante, estos parques son instalados a varios kilómetros de la costa por lo que el impacto visual y acústico es mínimo, así como la posibilidad de interferencias con otros equipos.

La implantación de este proyecto también podría marcar un precedente a nivel estatal y de esta forma poder poner la primera piedra en el uso de esta tecnología en otros puntos del país en los cuales podría ser una gran opción su implementación. De esta forma, podrían empezar a ser viables las pretensiones de los órganos estatales marcados por el Plan Nacional Integrado de Energía y Clima 2021-2030:

- 21 % de reducción de emisiones de gases de efecto invernadero (GEI) respecto a 1990.
- 42 % de renovables sobre el consumo total de energía final, para toda la UE.
- 39,6 % de mejora de la eficiencia energética.
- 74 % renovable en la generación eléctrica.

## 5 ANALISIS DE ALTERNATIVAS

---

En este capítulo, se describirá el proyecto a desarrollar. Para ello, lo primero que se hará será una descripción del sistema energético de la zona en la cual se pretende instalar el parque para que de esa manera se puedan diagnosticar las necesidades del lugar en esta materia. Después, se procederá a definir el lugar en el cual podría llevarse a cabo la instalación, teniendo en cuenta distintos aspectos determinantes para la viabilidad del proyecto. A continuación, se analizarán las distintas alternativas de los aerogeneradores y amarres, así como de las posibles distribuciones de las turbinas eólicas parque.

### 5.1 SISTEMA ENERGÉTICO DE CANARIAS

En primer lugar, se debe estudiar el sistema energético de la isla con el fin de poder dimensionar de forma razonada la potencia de la instalación. Para comenzar, se describirá de forma general la situación energética del archipiélago de Canarias. Después, se pondrá el foco en la isla de Fuerteventura y se dividirá la información en tres grandes bloques: la producción de energía, distribución de la energía y situación de las energías renovables en la isla. Cabe mencionar, que todos los datos mencionados en este apartado han sido obtenidos del anuario energético de Canarias de 2017, elaborado por el propio gobierno de Canarias.

El sistema eléctrico de las islas Canarias consta de seis sistemas eléctricos aislados. Es decir, existe un sistema por cada isla, a excepción de Fuerteventura y Lanzarote que están interconectados mediante un cable subterráneo. Al ser sistemas aislados y de pequeño tamaño comparado con el que puede existir en la península ibérica, existen varias razones por las cuales el sistema es menos estable y seguro. En primer lugar, al ser pequeños sistemas, aplicar la economía en escala se complica, por lo que los costes de inversión y explotación aumentan en las plantas de generación eléctrica. Además, al ser sistemas aislados de grandes redes eléctricas de electricidad, es necesario sobredimensionar la potencia instalada para la generación de energía, ya que, en periodos de mantenimiento o averías en una de las plantas, es necesario tener otras plantas para poder seguir satisfaciendo la demanda de electricidad y poder evitar cortes en el suministro eléctrico. Por último, tal y como sucede en la muchos de los sistemas similares a éste, la tecnología más utilizada para la generación eléctrica utiliza combustibles fósiles. Esto más allá de la contaminación del medio que pueda ocasionar, supone tener un sistema vulnerable frente a las posibles fluctuaciones en el precio del petróleo, implicando una mayor dependencia del exterior.

Teniendo en cuenta todo lo anterior, el Gobierno de Canarias junto a otras administraciones, están haciendo un gran esfuerzo en la evolución hacia un nuevo sistema más sostenible y eficiente que se base en la energía renovable. De esta manera se espera poder reducir la dependencia del petróleo. Otro aspecto en el que se está haciendo hincapié es en la interconexión de las distintas islas para poder llegar a tener en un futuro cercano un sistema conjunto que dote de mayor fiabilidad en caso de incidencias. Para finalizar, en los últimos años se han llevado a cabo varios proyectos para el almacenamiento de energía mediante centrales hidroeléctricas reversibles. De esta manera, se podrá garantizar el suministro y hacer el sistema más seguro.

Centrándose en Fuerteventura, la potencia total instalada es de 213,8 MW, siendo la cuarta más grande del archipiélago. Como se puede ver en el gráfico 3, la importancia de las centrales térmicas es muy grande frente a la de las energías alternativas, las cuales se dividen a partes iguales entre eólica y fotovoltaica. Dentro de las centrales térmicas existen de dos tipos: motor diésel y turbina de gas.

### Mix Potencia instalada (MW)

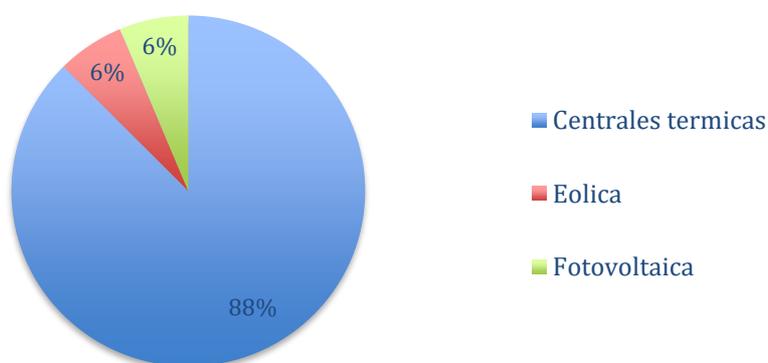


Gráfico 1 Mix potencia instalada (Fuente: Gobierno de Canarias)

En lo que se refiere a la producción eléctrica bruta, en el año 2017 fue de 720.965 MWh. El 95 % de ésta fue generada mediante las centrales térmicas. Estos valores se sitúan en la media global del archipiélago, donde solo el 7.56 % se produce mediante fuentes renovables.

El principal sustento económico de la isla es el turismo, por lo que la mayoría de la electricidad es utilizada en instalaciones relacionadas con este sector, como se puede ver en el siguiente gráfico:

## Distribución eléctrica

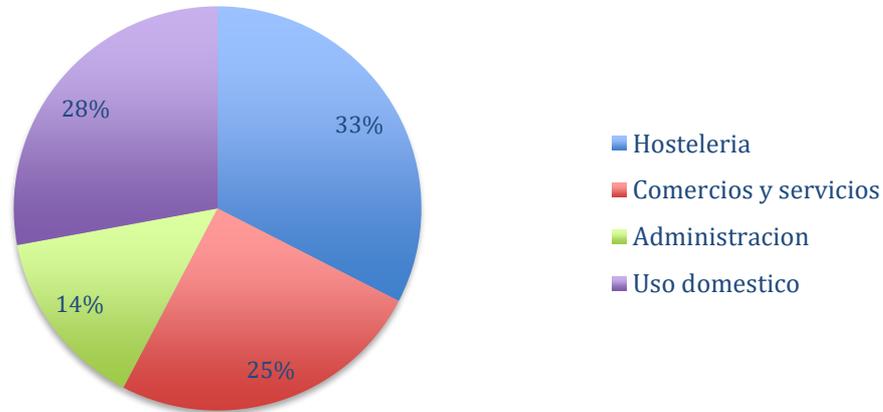


Gráfico 2 Distribución energía (Fuente: Gobierno de Canarias)

La demanda eléctrica, a pesar de que suele tener un pequeño repunte en el periodo estival de 5000 MWh, se mantiene bastante constante a lo largo del año, en torno a 60000 MWh:

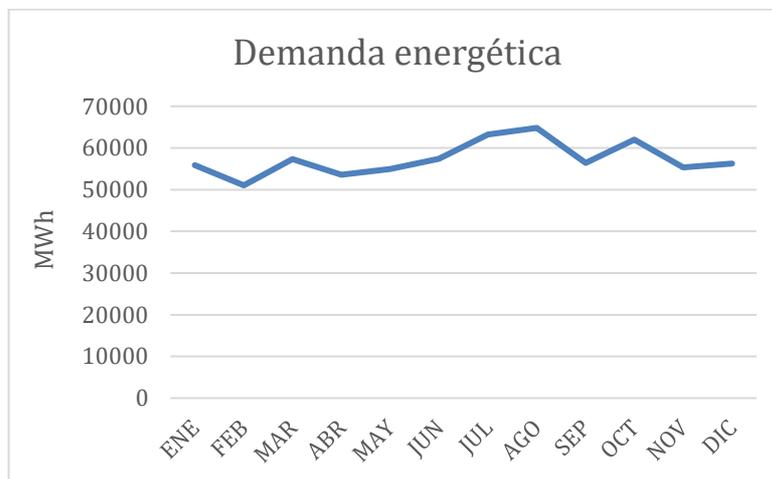
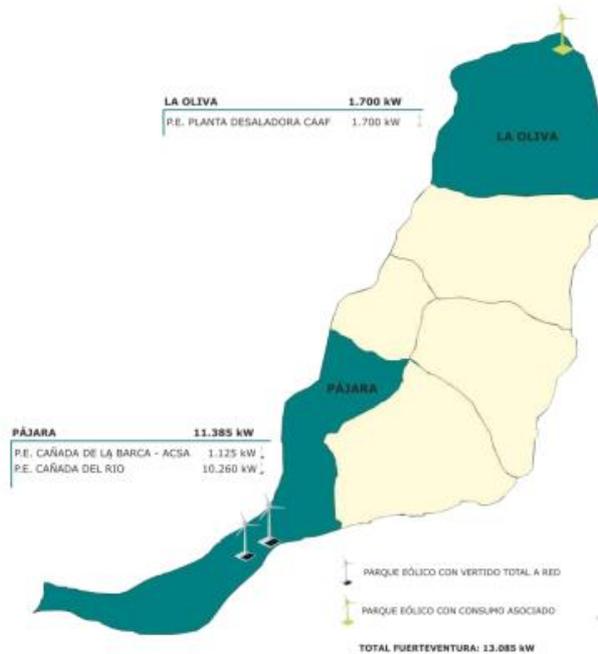


Gráfico 3 Demanda energética (Fuente: Gobierno de Canarias)

El sector eólico, como ya se ha mencionado, no tiene mayor trascendencia con solo 13.1 MW instalados y una producción anual de entorno 20000MWh anuales, lo que supone un 2.77 % de cobertura de la demanda. Todos los parques eólicos actuales son onshore, siendo el de Cañada del Río el más grande con una potencia de

10.26MW gracias a los 18 aerogeneradores de 300 kW y los 27 restantes de 180 kW instalados.



**Ilustración 2 Mapa parques eólicos Fuerteventura (Fuente: Gobierno de Canarias)**

## 5.2 EMPLAZAMIENTO DEL PARQUE EÓLICO

En este apartado se describirán las alternativas relativas al emplazamiento del parque eólico offshore. Para ello, se analizarán los diferentes factores a tener en cuenta a la hora de poder encontrar el lugar idóneo para la instalación, buscando un equilibrio entre el potencial eólico, las condiciones orográficas, el impacto ambiental y el coste de la instalación.

La ubicación seleccionada para este proyecto será la costa este de Fuerteventura, entre los municipios de Gran Tarajal y Puerto del Rosario, esta última capital de la isla. Esta isla pertenece al archipiélago de Canarias y está situada a 97 km de la costa noroeste de África. Desde 2009, la isla en su totalidad fue declarada reserva de la biosfera por la Unesco, por lo que se encuentra especialmente protegida.



Ilustración 3 Mapa Fuerteventura (Fuente: Google Maps)

La zona anaranjada será en la que se ubique el parque eólico. Ésta no está exactamente acotada ya que primero se pretende razonar la orientación y el dimensionamiento del parque, que irán desarrollándose en los próximos apartados.

### 5.2.1 RECURSO EÓLICO

El estudio del recurso eólico es vital para conocer el potencial que puede llegar a tener la instalación. La velocidad del viento marcará cual será el tipo de aerogenerador que se necesite. Como ya se ha mencionado anteriormente, una de las ventajas de emplazar el parque eólico en el mar es que las velocidades obtenidas son mayores debido a la ausencia de obstáculos y a la menor rugosidad del terreno. Esto supone un mayor aprovechamiento del recurso eólico, obteniendo así una mayor cantidad de energía.

A la hora de hacer el estudio, no solo se analizarán las velocidades. Las frecuencias con las que se dan y los posibles cambios bruscos de esas velocidades son un factor muy importante, ya que definirán realmente si ese potencial eólico es más o menos permanente en el tiempo. Normalmente, a la hora de modelar estas frecuencias de velocidades se suele hacer uso de la distribución de Weibull. Se trata de una distribución de probabilidad estadística de la velocidad del viento. Este tipo de distribución se define con los parámetros  $k$  y  $c$ , cumpliendo la siguiente función, donde la velocidad será el parámetro independiente:

$$p(v) = \frac{k}{c} \left(\frac{v}{c}\right)^{k-1} e^{-\left(\frac{v}{c}\right)^k}$$

A continuación, se muestra el método de obtención de esos dos parámetros. Para ello, se cogerán en cuenta los datos recogidos por MeteoBlue de la estación meteorológica ubicada en la urbanización Fuerteventura Golf Club:

Velocidad (km/h)	Horas totales	Frecuencia relativa (%)
0-1	6	0,07
1-5	180	2,05
5-12	749	8,55
12-19	1862	21,25
19-28	3918	44,72
28-38	1882	21,48
38-50	159	1,81
50-61	6	0,07

Tabla 1 Datos viento urbanización Fuerteventura Golf Club (Fuente: MeteoBlue)

Las velocidades vienen dadas en distintos intervalos, los cuales son bastante amplios, por lo que los resultados obtenidos serán aproximados. Además, para el cálculo de los parámetros son necesarios valores concretos, por lo que se cogerán los valores medios de cada intervalo de velocidad.

La fórmula para conseguir los parámetros  $K$  y  $c$  es la siguiente, donde el parámetro  $f(v)$  será la frecuencia acumulada con cada velocidad:

$$\ln\left(\ln \frac{1}{1-f(v)}\right) = k \ln v - k \ln c$$

Posteriormente, se representará en una gráfica donde el término de la izquierda de la igualdad será el eje vertical y el logaritmo neperiano de la velocidad será el eje horizontal,  $\ln v$ .

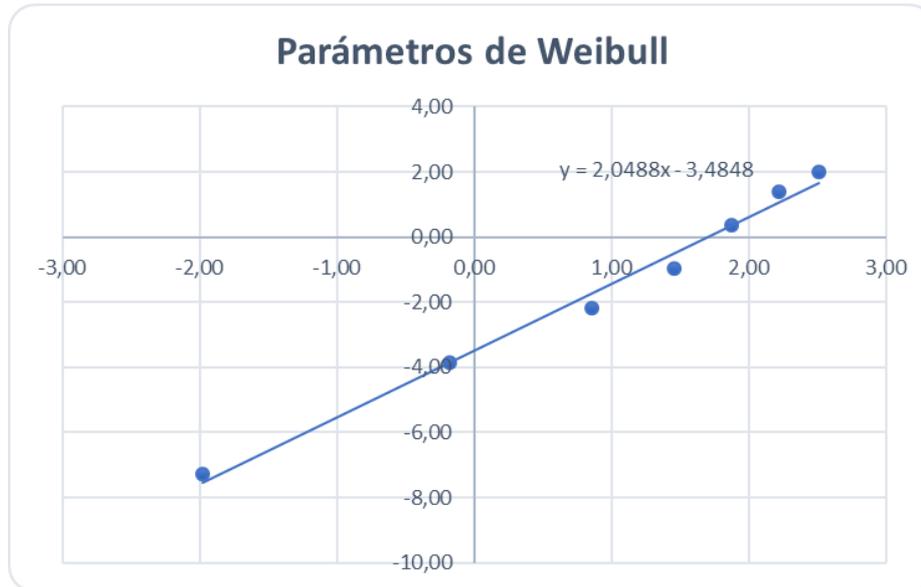


Gráfico 4 Parámetros de Weibull (Fuente: Elaboración propia)

Tal y como se muestra en el gráfico, la función que define la recta es la siguiente:

$$y = 2,0488x - 3,4848$$

De aquí ya quedan definidos los parámetros  $k$  y  $c$ :

K	2,05
$K \cdot \ln c$	-3,48
c	5,48

Mediante la distribución de Weibull también es posible obtener el cálculo de la velocidad media utilizando la siguiente fórmula:

$$\langle v \rangle = \int_0^{\infty} \rho(v) dv = c \cdot \Gamma \left[ 1 + \left( \frac{1}{k} \right) \right]$$

Los valores de esa función sigma vienen dados en la siguiente tabla:

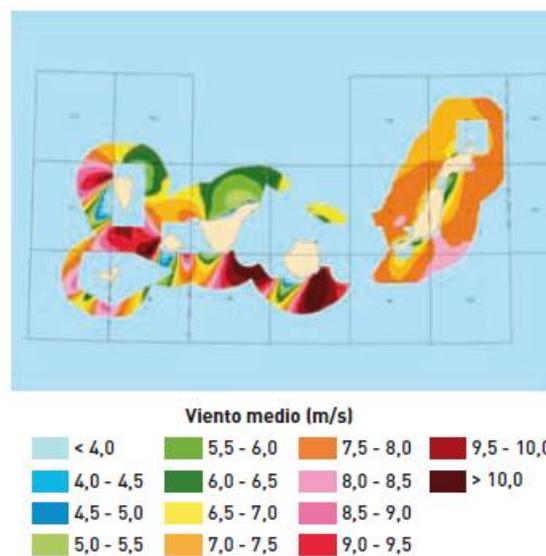
x	$\Gamma(x)$	x	$\Gamma(x)$	x	$\Gamma(x)$	x	$\Gamma(x)$
1.00	1.00000	1.25	.90640	1.50	.88623	1.75	.919906
1.01	.99433	1.26	.90440	1.51	.88659	1.76	.92137
1.02	.98884	1.27	.90250	1.52	.88704	1.77	.92376
1.03	.98355	1.28	.90072	1.53	.88757	1.78	.92623
1.04	.97844	1.29	.89904	1.54	.88818	1.79	.92877
1.05	.97350	1.30	.89747	1.55	.88887	1.80	.93138
1.06	.96874	1.31	.89600	1.56	.88964	1.81	.93408
1.07	.96415	1.32	.89464	1.57	.89049	1.82	.93685
1.08	.95973	1.33	.89338	1.58	.89142	1.83	.93969
1.09	.95546	1.34	.89222	1.59	.89243	1.84	.94261
1.10	.95135	1.35	.89115	1.60	.89352	1.85	.94561
1.11	.94740	1.36	.89018	1.61	.89468	1.86	.94869
1.12	.94359	1.37	.88931	1.62	.89592	1.87	.95184
1.13	.93993	1.38	.88854	1.63	.89724	1.88	.95507
1.14	.93642	1.39	.88785	1.64	.89864	1.89	.95838
1.15	.93304	1.40	.88726	1.65	.90012	1.90	.96177
1.16	.92980	1.41	.88676	1.66	.90167	1.91	.96523
1.17	.92670	1.42	.88636	1.67	.90330	1.92	.96877
1.18	.92373	1.43	.88604	1.68	.90500	1.93	.97240
1.19	.92089	1.44	.88581	1.69	.90678	1.94	.97610
1.20	.91817	1.45	.88566	1.70	.90864	1.95	.97988
1.21	.91558	1.46	.88560	1.71	.91057	1.96	.98374
1.22	.91311	1.47	.88563	1.72	.91258	1.97	.98768
1.23	.91075	1.48	.88575	1.73	.91466	1.98	.99171
1.24	.90852	1.49	.88595	1.74	.91683	1.99	.99581
						2.00	1.000000

**Tabla 2 Valores sigma en función de x**

Finalmente, la velocidad media obtenida en esta ubicación será de 4,85 m/s.

Tal y como se ha comentado, estos datos han sido obtenidos en tierra por lo que siempre van a ser inferiores a los obtenidos en el mar y además las aproximaciones efectuadas para los cálculos conllevaran errores no deseables. Por ello, con el fin de conseguir unos resultados lo más próximos posibles a la situación real en la localización del parque eólico se utilizarán los datos facilitados por el Gobierno de Canarias y el atlas eólico IDECanarias.

En la siguiente figura se muestra las velocidades del viento medias en las islas Canarias:



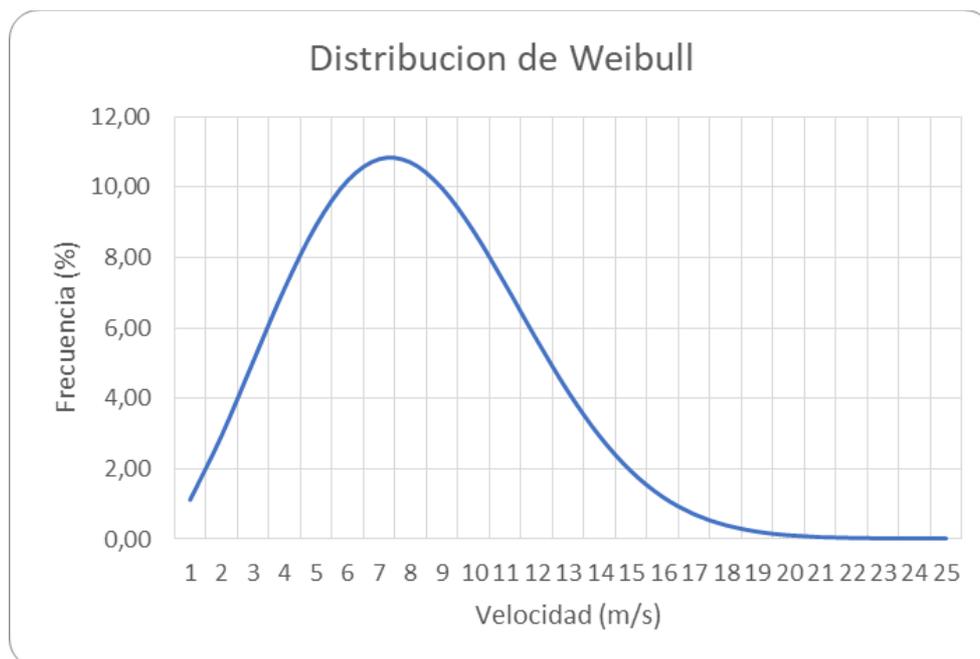
**Ilustración 4 Velocidad media viento en islas Canarias (Fuente: IDAE)**

Como se puede observar, en todo el litoral que rodea a la isla de Fuerteventura se muestra un tono anaranjado, lo que significa unas velocidades medias superiores a los 7 m/s, haciendo de este entorno un lugar apto para la explotación del recurso eólico. Si se analiza más concretamente la zona exacta donde se procederá a desarrollar el proyecto, se puede ver cómo la velocidad media es ligeramente superior, alcanzando incluso 8,5 m/s.

Los parámetros indicados en las coordenadas UTM  $x=606.050$ ,  $y= 3.118.650$ , las cuales pertenecen a la zona donde se instalará el parque eólico, son los siguientes:

K	2.438
c	9.14
Velocidad media (m/s)	8.37

Utilizando la formula anteriormente indicada para el cálculo de la frecuencia de las velocidades obtenemos la siguiente distribución:



**Gráfico 5 Distribución de Weibull**

Analizando el gráfico 2, se puede concluir que la frecuencia de altas velocidades de viento es bastante amplia, por lo que el lugar seleccionado es óptimo para la colocación de un parque eólico offshore desde el punto de vista del recurso eólico.

Otro de los factores importantes a la hora de hacer el estudio del recurso eólico es conocer la dirección del viento. De este modo, podremos determinar la orientación de los aerogeneradores, ya que para obtener la mayor cantidad de energía y mejorar el rendimiento tendremos que orientar el eje de la turbina paralela a la dirección del viento.

El modo más común de representar la dirección del viento son las rosas de viento. Se trata de un tipo de gráfico circular en el cual se muestran todos los puntos cardinales. Los distintos radios de la circunferencia determinarán la frecuencia de viento en dicha dirección.

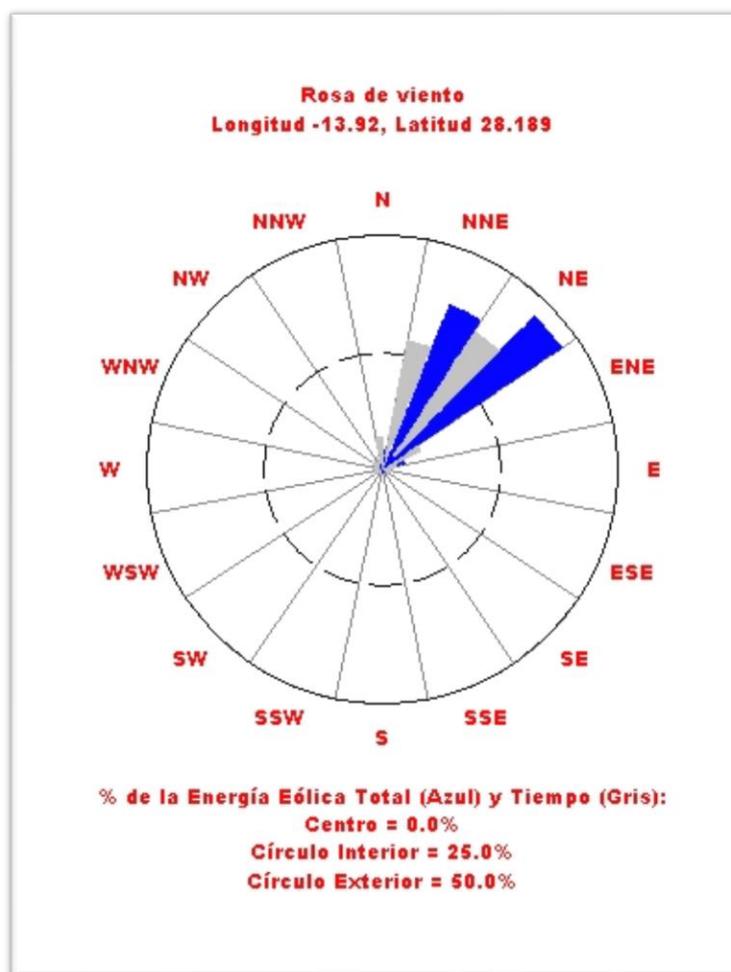


Ilustración 5 Rosa del viento (Fuente: IDECanarias)

En este caso, queda visiblemente claro que el parque offshore deberá estar orientado hacia el noreste para poder aprovechar el máximo potencial del viento.

### 5.2.2 BATIMETRIA

La batimetría es el equivalente submarino a la altimetría. Actualmente el método para poder medir el fondo marino y poder así poder confeccionar los mapas batimétricos, consiste en un sonar colocado en la parte inferior de un buque que emite una onda de sonido hacia el fondo. Después se calcula el tiempo que necesita para llegar al fondo, rebotar y volver a captar la onda; de esa manera se conocerá la distancia al fondo.

Este estudio es necesario para poder seleccionar el sistema de anclaje utilizado para poder amarrar el aerogenerador al fondo. A día de hoy con la tecnología actual, es posible utilizar un sistema de anclaje fijo hasta en torno a los 50-60 m de profundidad. Sin embargo, en el caso de profundidades mayores sería necesario optar por plataformas flotantes, las cuales actualmente continúan en fase de desarrollo. Igualmente, en capítulos posteriores, se profundizará en las características de ambos tipos de amarres.



Ilustración 6 Batimetría (Fuente: EMODnet)

El fondo marino de Fuerteventura puede ser extrapolable al del resto de la península ibérica. En los puntos cercanos a la costa, alrededor de los dos kilómetros, la profundidad de las aguas ronda los 50 m, pero una vez se supera esta distancia, ésta se dispara hasta distancias que hacen inviable el uso de plataformas fijas. Teniendo en cuenta que el Estudio Estratégico Ambiental exige para parques eólicos marinos

una distancia mínima a la línea costera de 8 km (AEEolica, 2009), será necesario optar por plataformas flotantes.

### 5.2.3 INFRAESTRUCTURA EN TIERRA

La infraestructura en tierra es fundamental a la hora de la fase de construcción del proyecto. Los distintos componentes de una instalación de estas características son de grandes dimensiones, por lo que deben de ser transportados por partes. Después éstas serán ensambladas en el puerto, por lo que se necesitará un puerto medianamente importante en el cual haya espacio suficiente para este proceso. Además, las embarcaciones necesarias para la instalación de los aerogeneradores también son de gran envergadura, necesitando un puerto apto para este tipo de barcos.

Para este proyecto se disponen de dos puertos cercanos, uno el de Gran Tarajal, y el otro en el Puerto del Rosario.



Ilustración 7 Puertos de Fuerteventura (Fuente: Google Maps)

Como se puede observar, el puerto de Gran Tarajal está más cerca del lugar donde se construirá el parque eólico offshore, lo cual es un punto a favor muy importante. Pero si se analizan las instalaciones del puerto, solo son aptas para pequeñas embarcaciones recreativas o barcos pesqueros de pequeñas dimensiones. Por lo tanto, este puerto no será apto para este proyecto, y debe ser descartado.



**Ilustración 8 Puerto del Gran Tarajal (Fuente: Gobierno de Canarias)**

La otra opción planteada, se encuentra en el Puerto del Rosario, el cual se encuentra a unos 35 km de distancia del parque. Esta distancia es perfectamente asumible para los viajes necesarios para la construcción del parque. En lo que al puerto se refiere, está notablemente mejor preparado para este tipo de operaciones comparándolo con el anterior. En este caso, sí se dispone de lugares para atracar buques de grandes dimensiones, además de una zona específica para poder montar las distintas secciones de la obra en cuestión. Otro factor importante es que, al tratarse de la capital de la isla, la conexión por carretera será mucho mejor. Por todo lo mencionado, con la utilización de este puerto se podrían subsanar todas las necesidades en lo que a infraestructura se refiere para la construcción del proyecto. Sin embargo, al tratarse de un trabajo jamás realizado, será necesario algún tipo de adecuación del puerto para poder desarrollar las distintas tareas que conllevará el proyecto.



**Ilustración 9 Puerto del Rosario (Fuente: Gobierno de Canarias)**

#### 5.2.4 INFRAESTRUCTURA DE LA RED ELÉCTRICA

Conocer las características de la red eléctrica es una parte vital a la hora de realizar un proyecto de estas características, ya que mediante ésta se evacuará y distribuirá la energía generada en el parque eólico. Entre los factores principales a tener en cuenta estarían las líneas de tensión instaladas en la zona y el nivel de saturación de la línea. Este segundo no debería ser un problema ya que al tratarse de una isla pequeña la línea no tiene tantas conexiones como para poder estar saturada. En cuanto a la línea de tensión se refiere, está claramente relacionada con la potencia total instalada en el parque eólico. A mayor potencia, mayor tensión será necesaria para poder transportarla con todas las garantías minimizando las pérdidas.

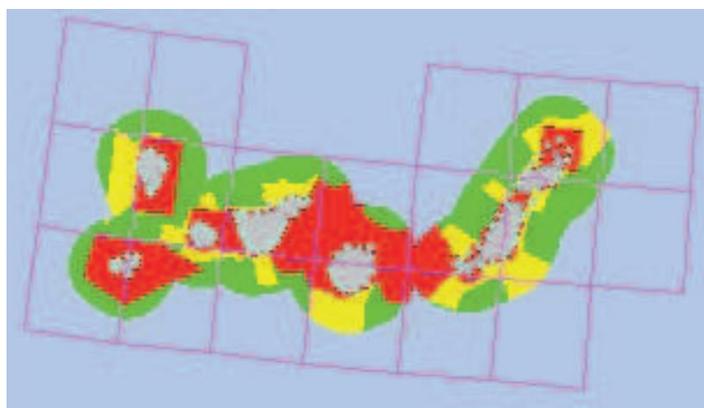
En la ilustración 9 se muestra la red de transporte eléctrico de la isla de Fuerteventura, la cual está conectada a su vez con la isla de Lanzarote mediante un cable subterráneo. Actualmente, la única línea que recorre la isla tiene una tensión de 66kV, aunque está previsto y se encuentra en construcción una línea de 132kV, la cual se finalizará en los próximos años. Esta red es perfectamente válida para poder transportar la energía generada en el parque eólico con todas las garantías, ya que a pesar de que todavía no se ha especificado la potencia del parque, no será de una potencia tan elevada como para necesitar una red de mayor tensión.



Ilustración 10 Red de transporte eléctrico (Fuente: REE)

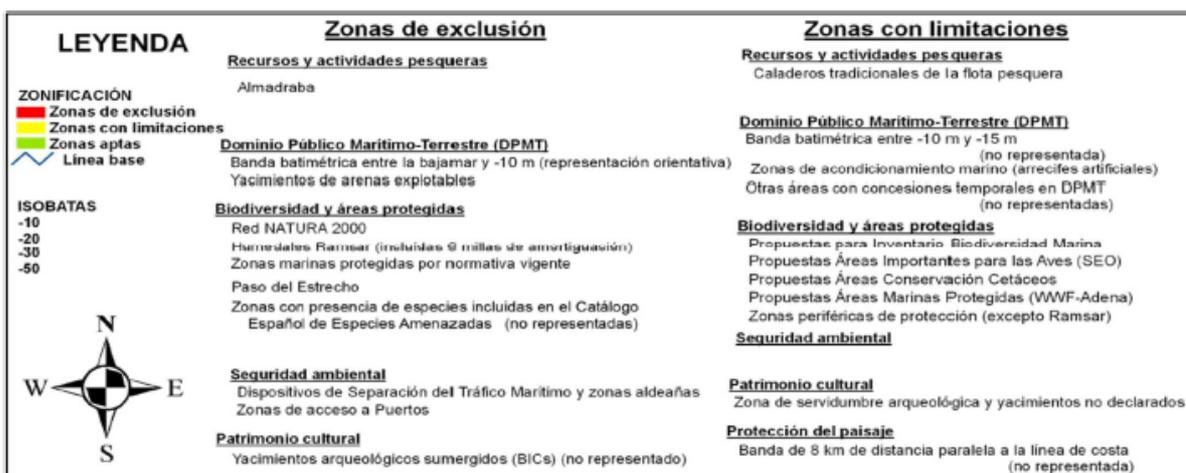
**5.1.5 CARACTERÍSTICAS AMBIENTALES**

Otro factor importante a tener en cuenta a la hora de diseñar un proyecto de estas características es el ambiental. Hoy en día, los controles en este aspecto son muy exigentes, teniendo en cuenta la situación que sufre el planeta debido al cambio climático, entre otros. Es por ello que, a la hora de seleccionar la ubicación del parque, hay que tener en cuenta los lugares protegidos bajo determinadas figuras ambientales, más allá del estudio del impacto ambiental que se detallará más adelante en otro apartado. Para ello, se utilizará el estudio realizado por IDAE en toda la costa del territorio español clasificando las zonas de exclusión (rojo), zonas con limitaciones (amarillo) y zonas aptas (verde).



**Ilustración 11 Estudio ambiental de Canarias (Fuente: IDAE)**

Para elaborar este estudio se tienen en cuenta distintos criterios relacionados con el medio ambiente que se muestran en la siguiente ilustración:



**Ilustración 12 Leyenda estudio ambiental (Fuente: IDAE)**

La zona en la cual se instalará este proyecto se considera zona con limitaciones debido a que Fuerteventura es una Reserva de la Biosfera y, por lo tanto, cuenta con una protección ambiental severa. Por ello, habrá que hacer mayor hincapié en las medidas de protección del medio marino.

### 5.3 AEROGENERADORES

Los aerogeneradores son la pieza fundamental del parque eólico offshore, ya que serán los encargados de convertir la energía eólica en energía mecánica. Teniendo esto en cuenta, es vital hacer un estudio de las diferentes opciones que podemos encontrar actualmente en el mercado. La gran mayoría de estos aerogeneradores son de eje horizontal y tripala, tanto en la tecnología onshore como offshore, debido a su mejor rendimiento, por lo que todos los modelos planteados en este proyecto serán de este tipo.

La principal ventaja de la tecnología offshore es que el recurso eólico es mucho mayor por lo que los aerogeneradores pueden tener una mayor potencia. Hoy en día existen turbinas que alcanzan los 10 MW (Diario renovables, s.f.), mientras que las diseñadas para ser colocadas en tierra no suelen superar, en casi ningún caso, los 6MW. Evidentemente, cuanto mayor sea la potencia, mayor energía se podrá obtener de ella, pero también aumentará el tamaño de sus palas y por consecuencia, el peso. Teniendo en cuenta el análisis batimétrico, probablemente habrá que usar plataformas flotantes, por lo que ese aumento del tamaño jugaría en contra. Además, el Puerto del Rosario, a pesar de ser apto para este proyecto, tendría grandes limitaciones si las palas del aerogenerador se exceden en tamaño. Por lo tanto, para este proyecto se ha decidido utilizar modelos de aerogeneradores de entre 2,3 y 5 MW, los cuales han sido bastante utilizados en distintos parques anteriormente construidos y han dado muestra de su buen funcionamiento.

Como ventajas de usar estos aerogeneradores de una potencia media dentro del amplio rango que hay en el mercado, puede estar la manejabilidad, ya que como se podrá observar son de un tamaño más comedido que los mencionados anteriormente, facilitando su instalación, ya que las embarcaciones necesarias serán también de menores dimensiones. También, al ser de menor potencia será necesario instalar mayor número de aerogeneradores y en caso de avería en uno de ellos las pérdidas serán inferiores. Por el contrario, al tener más aerogeneradores el cableado necesario será más abundante. También los trabajos de mantenimiento serán más prolongados aumentando también los costes. En definitiva, habrá que tratar de buscar un punto de equilibrio entre costes, operatividad y viabilidad del proyecto.

En la siguiente tabla se mostrarán las principales características de los modelos de aerogenerador seleccionados para este proyecto, los cuales ya han sido utilizados en otros proyectos de eólica offshore, ofreciendo un buen rendimiento en todos ellos, ya que son aerogeneradores aptos para usarse en alta mar donde las condiciones salinas pueden ser un gran escollo:

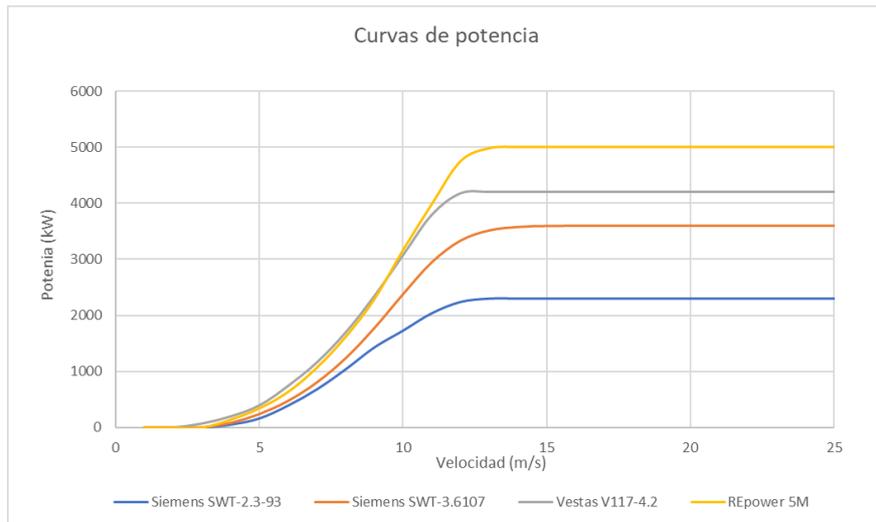
Modelo	Potencia (MW)	Altura buje (m)	Diámetro rotor (m)	Área de barrido (m <sup>2</sup> )	IEC
Siemens SWT-2,3-93	2.3	80-101	93	6793	Ila
Siemens SWT-3,6-107	3.6	80-96	107	8992	Ia
Vestas V117-4,2MW	4.2	91.5	117	10571	Ila
REpower 5M	5	90-120	126	12469	I Ib

**Tabla 3 Especificaciones aerogeneradores (Fuente: Thewindpower)**

El IEC es el código utilizado en las fichas técnicas de los aerogeneradores, para especificar la clase de viento óptimo para dicho modelo:

- El primer término hace referencia a las velocidades medias optimas:
  - Clase I: 10 m/s
  - Clase II: 8.5 m/s
  - Clase III: 7.5 m/s
  
- El segundo término hace referencia a la turbulencia del viento:
  - A: Alta
  - B: Media
  - C: Baja

Otra información importante para definir el funcionamiento de un aerogenerador es su curva de potencia. Se trata de una gráfica en la cual se muestra la potencia obtenida para cada velocidad del viento.



**Gráfico 6 Curvas de potencia (Fuente: Thewindpower)**

Como se puede observar, en todos los modelos se da una velocidad entorno a los 12,5 m/s en la que la potencia alcanza su máximo y se mantiene constante hasta una velocidad máxima que suele rondar los 25 m/s. Una vez alcanzada esta velocidad el aerogenerador se bloquea, porque se habría alcanzado una velocidad demasiado alta, en la cual podría ponerse en peligro el aerogenerador. También es reseñable mencionar que los aerogeneradores con mayor diámetro empiezan a dar una potencia notable a velocidades de viento más bajo. Esto se debe principalmente a que estos modelos tienen mayor área de barrido, pudiendo captar mayor masa de aire.

Teniendo en cuenta la curva de potencia y la distribución de Weibull, calculada en el apartado de recurso eólico, se podrá calcular la energía anual producida por cada aerogenerador. Este cálculo, es tan sencillo como multiplicar el número de horas en las que el viento tiene una velocidad concreta y la potencia a esa velocidad. En este cálculo, a modo de simplificación se asume que la dirección del viento es siempre la óptima para la orientación del aerogenerador. En este caso, tal y como se pudo observar al analizar la rosa de los vientos, es bastante uniforme, por lo que esta simplificación puede ser aceptable. Aun así, la producción real será inferior a la que aquí se muestra debido a otros efectos que se mencionarán más adelante. Por otro lado, las horas equivalentes en las cuales el aerogenerador tendría que estar trabajando a su potencia nominal para producir la misma cantidad de energía, podría ser un indicativo a tener en cuenta. Para calcularlo basta con dividir la energía anual producida con la potencia nominal del aerogenerador en cuestión.

A continuación, en la tabla 4, se muestran la producción de energía anual y horas equivalentes con cada uno de los aerogeneradores anteriormente descritos:

Modelo	Energía anual (GWh)	Horas equivalentes
Siemens SWT-2,3-93	9,45	4108
Siemens SWT-3,6-107	13,1	3637
Vestas V117-4,2MW	16,96	4037
REpower 5M	17,3	3566

**Tabla 4 Energía anual producida (Fuente: Elaboracion propia)**

Como se puede observar, a pesar de que las horas equivalentes varían, cuanto mayor es la potencia del aerogenerador, más grande es la cantidad de energía producida. Sin embargo, a pesar de la dificultad encontrada para conocer los costes de cada aerogenerador, se tomará como referencia 1.000.000 \$/MW (Bloomberg, 2018). Teniendo en cuenta esto, habrá que poner sobre la balanza el aspecto económico y la producción energética a la hora de seleccionar el aerogenerador.

Una vez se han obtenido estos datos, se debe proceder a calcular la cantidad de aerogeneradores necesarios para cumplir el objetivo marcado al principio del proyecto, producir con energía de fuente renovable al menos el 30 % de toda la energía suministrada en la isla. Para ello en primer lugar, se procederá a calcular la energía total que se deberá producir en este parque eólico utilizando los datos descritos anteriormente, en el apartado de análisis del sistema energético. A pesar de que como se explicó en el capítulo mencionado, alrededor del 5 % de la energía es de fuente renovable para este cálculo no se tendrá en cuenta con el fin de sobredimensionar en cierta medida la instalación.

- Producción total: 720 GWh
- Producción necesaria del parque:  $720 \cdot 0.3 = 216$  GWh

Posteriormente, en la tabla 5 se muestra el número de aerogeneradores necesarios y la potencia nominal del parque. Simplemente habrá que dividir la producción total necesaria entre la producción de cada turbina. Como se explicará más adelante, existen varios tipos de pérdidas en el proceso, por lo que se tratará de redondear al alza. Para el cálculo de potencia nominal del parque se multiplicará el número de aerogeneradores por la potencia nominal de cada aerogenerador:

Modelo	Nº aerogeneradores	Potencia nominal del parque (MW)
Siemens SWT-2,3-93	23	52.9
Siemens SWT-3,6-107	17	61.2
Vestas V117-4,2MW	13	54.6
REpower 5M	13	65

Tabla 5 Potencia y numero de aerogeneradores (Fuente: Elaboración propia)

#### 5.4 SISTEMAS DE ANCLAJE

Una de las ventajas que ofrece la tecnología offshore es el mayor aprovechamiento del recurso eólico; ahora bien, también presenta inconvenientes, como son los sistemas de anclaje. Cuando se instalan este tipo de estructuras en tierra, no hay mayor problema porque con una cimentación básica sería suficiente para mantenerla en pie con total seguridad. Sin embargo, cuando el emplazamiento es en alta mar, la situación cambia por completo. En el mar hay que hacer frente a las adversidades que nos genera el medio, como pueden ser: la profundidad del fondo marino, la morfología o lo más importante, los fenómenos meteorológicos adversos tales como huracanes o tormentas, que generen un fuerte oleaje y fuertes vientos que puedan llegar a tumbar el aerogenerador. Por todo ello, la elección de un sistema de anclaje adecuado es vital para el buen funcionamiento del proyecto, ya que un mal diseño podría acabar con el derrumbe del aerogenerador.

Hoy en día, existen variadas soluciones para el anclaje de los soportes para los aerogeneradores, pero principalmente se dividen en dos grandes grupos: los anclajes fijos y las plataformas flotantes. Estas primeras son las que estarán cimentadas al suelo mientras que las segundas, estarán formadas por una plataforma flotante amarrada mediante cables al fondo marino. La elección entre una opción u otra estará principalmente condicionada por la profundidad a la que vaya a ser instalado el aerogenerador. A continuación, se explicarán las principales características y sistemas utilizados para estos dos tipos de anclaje.

### 5.4.1 ANCLAJES FIJOS

Los anclajes por cimentación son los más utilizados a día de hoy, ya que al estar fijados al fondo su estabilidad es mucho mayor. Aun así, su instalación es compleja, porque hay que tener en cuenta que las estructuras utilizadas pueden llegar a ser de gran tamaño. Esto induce a tener que utilizar embarcaciones de gran tamaño para la debida colocación en alta mar, aumentando los costes considerablemente en algunos casos en los que las profundidades empiezan a ser elevadas. Teniendo esto en cuenta, este tipo de soluciones a partir de los 50-60 metros dejaría de ser una opción viable desde el punto de vista técnico y económico. Los tres principales tipos de cimentación son los monopilotes, los de gravedad y los jackets.

#### Monopilotes

Se trata de la estructura más simple. Está compuesta por un cilindro grueso, el cual se clava directamente en el fondo del mar. Pueden llegar a estar enterrados hasta 30 m para poder sustentar correctamente el aerogenerador. Es necesario que el fondo sea arenoso o arcilloso y con ausencia de rocas para favorecer la instalación de los monopilotes. Esta tecnología suele ser utilizada en profundidades inferiores a los 15 m.

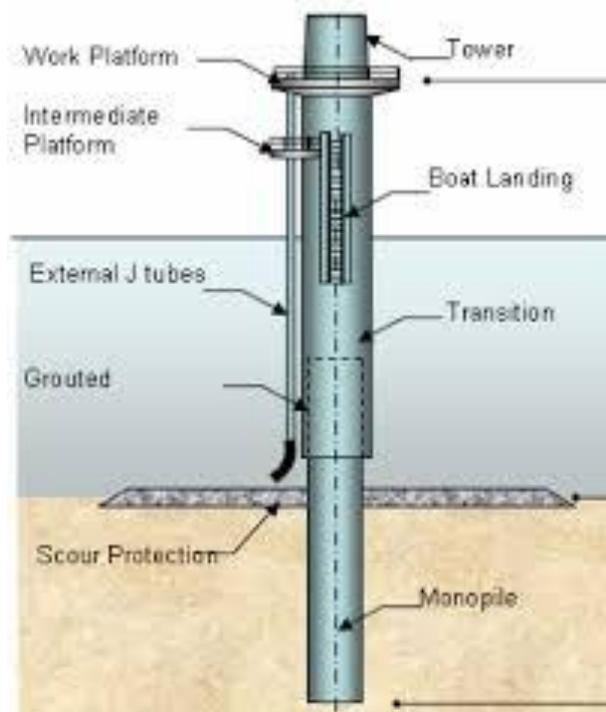


Ilustración 13 Monopilote (Fuente: Iberdrola)

## Cimentación por gravedad

Cuando la profundidad es menor o igual a 30 m una de las mejores opciones es la utilización de las cimentaciones por gravedad. Este tipo de cimentación aporta mayor robustez a la estructura siendo más útiles en entornos con mayor oleaje. Consiste en una gran plataforma de hormigón y acero de unos 15 m de diámetro y un peso que ronda las 1000 toneladas. El mayor inconveniente que tiene la cimentación por gravedad es que requiere una preparación previa del terreno.

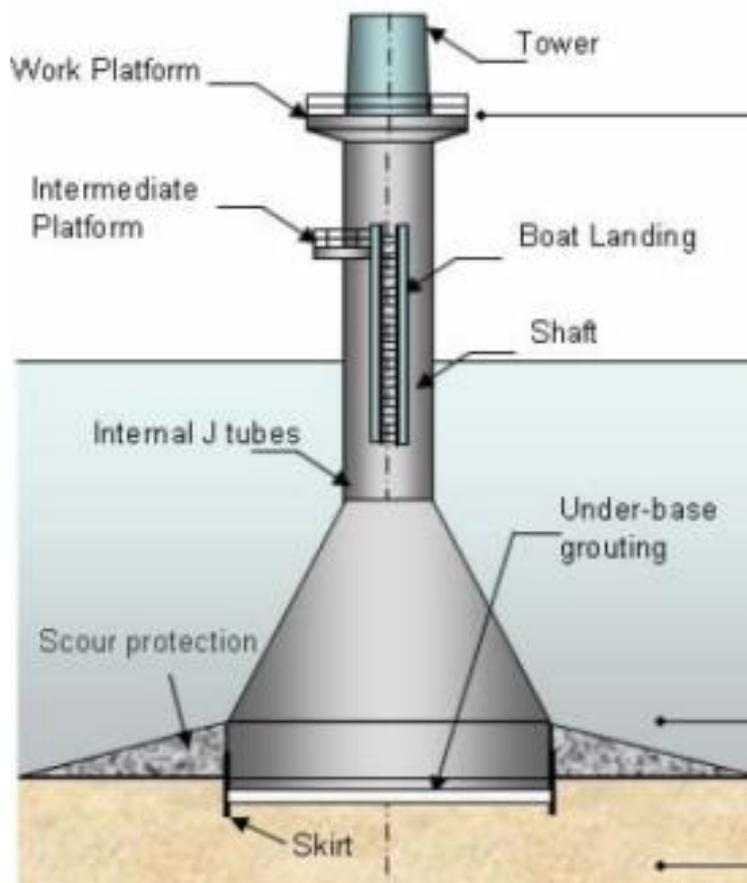


Ilustración 14 Cimentación por gravedad (Fuente: Iberdrola)

## Jackets

Cuando las profundidades superan los 30-35 m es necesario otro tipo de estructuras y sujeciones que puedan soportar el aerogenerador. Para ello, la estructura más usada es la del jacket. Se trata de una armadura en celosía con tres o cuatro patas, las cuales se fijan al suelo mediante pilotes. También, en la parte superior suelen tener una pieza de transición para colocar el fuste de la turbina. Puede ser utilizado

en diferentes tipos de suelo, siempre y cuando haya ausencia de rocas que puedan dificultar el anclaje de las patas.

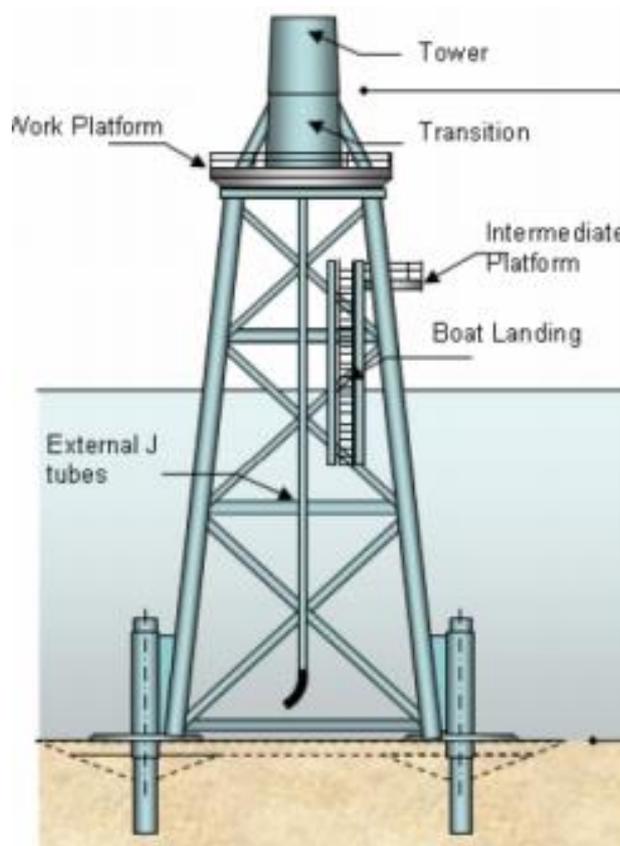


Ilustración 15 Jacket (Fuente: Iberdrola)

### 5.4.2 PLATAFORMAS FLOTANTES

Las plataformas flotantes son la alternativa a los sistemas de anclaje fijos que permitirán impulsar la energía eólica offshore. Gracias a éstas sería posible instalar parques eólicos en zonas donde la profundidad del fondo marino es demasiado elevada. Además, los costes de este tipo de proyectos descenderían notablemente, ya que la instalación de los aerogeneradores sería mucho más sencilla. A pesar de que es una tecnología en desarrollo, actualmente ya existen varios modelos aptos para ser utilizados.

A continuación, se van a describir los tres principales sistemas de flotación:

- Plataformas estabilizadas por lastre (SPAR)
- Plataformas estabilizadas por inercia de flotación (Barcazas)
- Plataformas estabilizadas por líneas de amarre (TLP)

### Plataformas estabilizadas mediante lastre (SPAR)

Las plataformas estabilizadas por lastre, las cuales también son conocidas como SPAR, están formadas por un cilindro con una relación entre su altura y diámetro bastante grande para facilitar la flotación. Para lograr que se estabilice se coloca lastre en la parte baja de la boya. De esta manera, el centro de masa se desplaza lo más bajo posible, consiguiendo una alta resistencia inercial al cabeceo y balanceo que pueda generar el oleaje. En este tipo de plataforma, a pesar de tener una de las formas más simples, será necesario que la estructura que soportará la turbina y su torre sea bastante grande para poder contrarrestar el centro de gravedad de la turbina. En lo que respecta al amarre al fondo, puede realizarse mediante líneas de catenaria o anclas de arrastre.

El modelo más avanzado con este tipo de plataforma corresponde al sistema Hywind. Actualmente existen 5 aerogeneradores de 6 MW en aguas escocesas instaladas con este modelo. Como prueba de su fiabilidad, es reseñable mencionar que recién inaugurado, el parque tuvo que soportar uno de los mayores temporales de las islas británicas, con olas de más de 8 m altura.

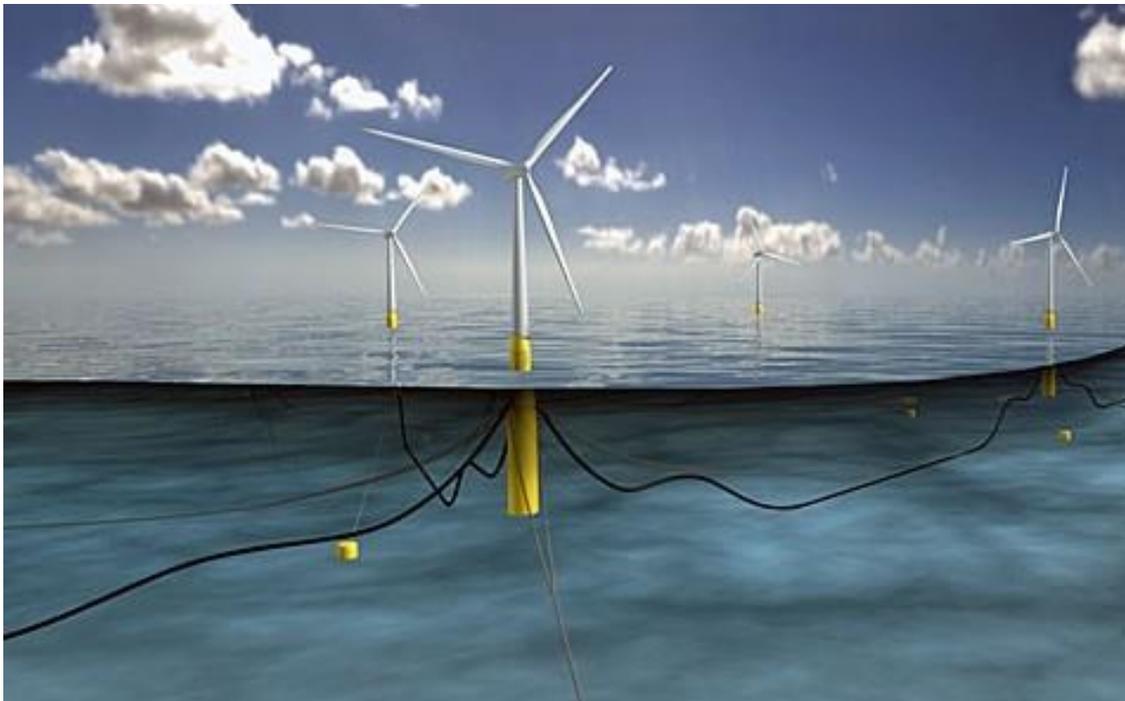


Ilustración 16 Modelo Hywind (Fuente: Crown Copyright)

### Plataformas estabilizadas por inercia de flotación (Barcazas)

Las plataformas estabilizadas por líneas de amarre logran la estabilidad mediante la tensión generada por los amarres. Para ello, parte de la plataforma se sumerge, quedando la otra por encima del nivel del agua, aportando una gran estabilidad al aerogenerador. La mayor desventaja de este tipo de sistemas es que tienen una mayor complejidad a la hora de ser diseñadas. Sin embargo, a la hora de la instalación, éstas pueden ser montadas en tierra y ser transportadas completamente ensambladas hasta el lugar seleccionado para su amarre. Además, debe tenerse en cuenta que este tipo de plataformas ya han sido utilizadas en otros sectores como puede ser el petrolero, por lo que su desarrollo es bastante avanzado.

El proyecto WindFloat ha desarrollado un modelo TLP que ha sido testado en la costa de Portugal con un aerogenerador de 2 MW. Se trata de una estructura de trípode con 3 columnas de acero conectadas entre sí para poder compensar el lastre y que se adecúe al movimiento del mar.



Ilustración 17 Modelo WindFloat (Fuente: Naval Group)

### Plataformas estabilizadas por líneas de amarre (TLP)

Este tipo de plataformas son estabilizadas utilizando cables amarrados al fondo con una tensión suficiente como para poder mantener de manera uniforme el aerogenerador. Teniendo esto en cuenta, es vital reducir el empuje que realiza el agua sobre la plataforma ya que los cables pueden sufrir una sobretensión. También al estar sometidos a grandes esfuerzos, el amarre al fondo es muy importante, por lo que la instalación de las plataformas TLP se complican en ciertos tipos de suelo. Este sistema de amarre puede ser combinado con los dos anteriores tipos de plataforma, SPAR y barcazas.

Uno de los modelos más avanzados con este tipo de tecnología es el sistema Gicon. Esta plataforma consta de 4 columnas unidas entre sí y amarradas a una cimentación mediante los cables. Toda la estructura es montada junto al aerogenerador en el puerto y después es remolcado hasta su punto de instalación. Actualmente este sistema puede ser utilizado hasta profundidades de 500 m. En 2016 se instalaron dos turbinas de 2,3 MW en el mar del Norte dando un resultado bastante satisfactorio.



Ilustración 18 Sistema Gicon (Fuente: Gicon)

## 5.5 DISTRIBUCIÓN DE AEROGENERADORES

Otro de los factores fundamentales a la hora de diseñar un parque eólico es la distribución de los aerogeneradores en el emplazamiento. Las distintas turbinas deben estar colocadas a una distancia determinada para conseguir el máximo aprovechamiento del recurso eólico, es decir, la mayor cantidad de energía posible.

El principal fenómeno que entorpece el flujo del aire es el efecto estela. Esto ocurre cuando el flujo en el aerogenerador colocado aguas abajo es inferior debido al aerogenerador ubicado delante, que frena el aire. Además, el aire que llega del primero tiene un régimen turbulento que puede influir negativamente en la vida útil del aerogenerador, ya que las cargas que recibe tienen una carga dinámica superior. En la siguiente ilustración puede observarse una representación esquemática de la estela mediante la distribución de velocidades del viento.

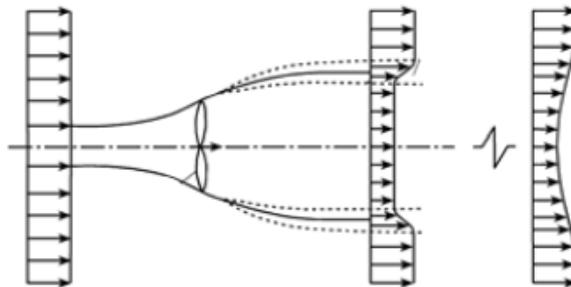


Ilustración 19 Efecto estela (Fuente: Universidad Politécnica de Madrid)

Por todo ello, es necesario hacer un análisis de estas estelas, debido al impacto que éstas pueden tener en la producción de energía. Por norma general, teniendo en cuenta distintos estudios realizados en este aspecto, suele ser necesario dejar una distancia de entre 3 y 5 diámetros del rotor en la dirección perpendicular a la dirección predominante del viento, y una distancia de entre 7 y 10 diámetros en la dirección predominante del viento. De esta manera, se consiguen reducir las pérdidas hasta que solo supongan un 2 % de la energía producida.

A continuación, se describirán las tres distribuciones de aerogeneradores: en línea, en cuadro alineado y en cuadro sin alinear. Éstas cobran especial interés ya que son las más habituales tanto en las instalaciones onshore como en las offshore, para tratar de conseguir que las pérdidas por el efecto estela sean lo más pequeñas posibles.

### Distribución en línea

La distribución en línea es muy utilizada hoy en día teniendo en cuenta que reduce el efecto estela en gran medida. En esta distribución, se coloca una sola línea de aerogeneradores, por lo que la estela del primer aerogenerador no afecta al siguiente aerogenerador aguas abajo ya que no estaría colocado detrás.

A pesar de ser una buena opción, en muchos casos es inviable ya que el espacio necesario para una distribución en línea es demasiado grande para el área en el cual pretende ser instalado el parque. Además, en situaciones en las que el viento sopla en varias direcciones las pérdidas aumentan en exceso, ya que si el viento sopla en paralelo a la línea de aerogeneradores el efecto estela se va acumulando hasta llegar al punto en el que el viento en los últimos aerogeneradores aguas abajo sea prácticamente nulo.

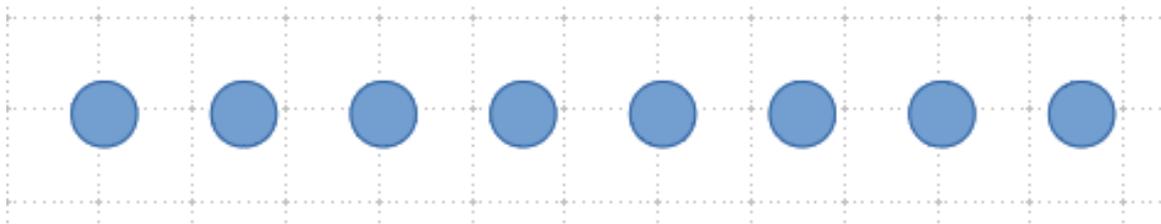


Ilustración 20 Distribución en línea

### Distribución en cuadro alineado

Este tipo de alineación es óptima para lugares en los que el espacio es medianamente reducido porque permite instalar un mayor número de aerogeneradores en un menor espacio. Pero, desafortunadamente, la distribución de cuadro alineado es incapaz de disipar de una manera eficiente el efecto estela, por lo que las pérdidas pueden ser muy grandes sino se respetan unas distancias mínimas en la separación de los aerogeneradores.

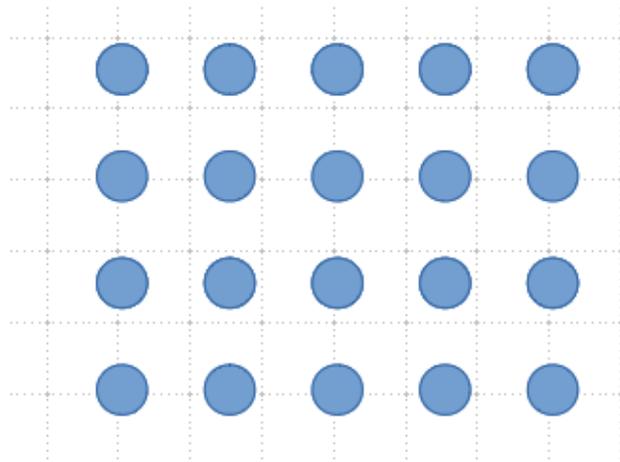


Ilustración 21 Distribución en cuadro alineado

### Distribución en cuadro no alineado

Esta distribución es muy similar a la anterior ya que consta de varias líneas de aerogeneradores. Sin embargo, en esta alineación los aerogeneradores aguas abajo no están justo detrás del anterior, sino entre medias de los dos anteriores. Gracias a esta colocación se consiguen disminuir las pérdidas por el efecto estela. No obstante, el área necesaria para la colocación de los aerogeneradores es ligeramente superior por lo que sería necesario analizar si esta opción es viable.

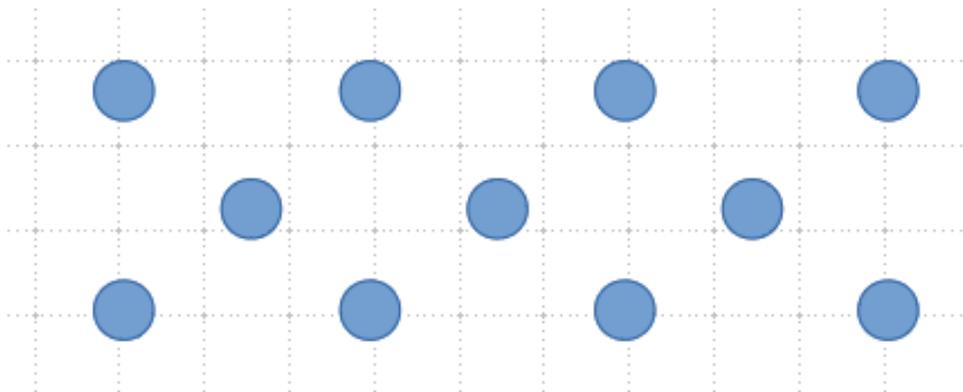


Ilustración 22 Distribución en cuadro no alineado

## 6 DESCRIPCION DE LA SOLUCION PROPUESTA

Una vez analizadas todas las alternativas en los distintos ámbitos del proyecto, ahora se procederá a explicar de forma razonada cual es la solución propuesta para el desarrollo de este trabajo.

### 6.1 SELECCIÓN DE UBICACIÓN

Teniendo en cuenta todos los factores descritos en el apartado de alternativas, se considera una zona apta la zona en la cual se hizo un primer análisis, que figura en la *Ilustración 3 Mapa Fuerteventura*.

Por tanto, la zona que se acotará a continuación estará dentro de la anterior. Mediante la rosa del viento ya se ha razonado que la dirección en la que deben estar orientados los aerogeneradores es noreste, por lo que el rectángulo que acotará la zona donde se llevará a cabo el proyecto estará orientada de igual manera. La otra condición, será la distancia mínima a tierra de 8 km. Teniendo en cuenta todo ello, la zona acotada será de 3\*5 km<sup>2</sup> y su ubicación será la siguiente:



Ilustración 23 Ubicación del parque (Fuente: Google Earth)

Punto	Latitud	Longitud
<b>A</b>	28°13'6.99"N	13°48'22.48"O
<b>B</b>	28°11'40.20"N	13°49'12.41"O
<b>C</b>	28°10'8.64"N	13°46'31.18"O
<b>D</b>	28°11'35.69"N	13°45'31.46"O

Tabla 6 Coordenadas de la ubicación del parque

### 6.2 SELECCIÓN DEL AEROGENERADOR

Para realizar la selección del aerogenerador se tendrán en cuenta principalmente los aspectos técnicos. Se supondrá que cuanto mayor sea la potencia, mayor será el coste del aerogenerador.

Comenzando por las dimensiones, a priori todas las opciones planteadas podrían ser viables para la realización de este proyecto; así que, en este sentido, no se descartaría ninguna opción.

Por otra parte, atendiendo a la clase de viento óptimo para cada aerogenerador, se puede ver cómo todos los modelos, al ser específicos para tecnología offshore, pueden soportar ciertas turbulencias, aunque el modelo REpower 5M las soporte ligeramente peor. Además, la velocidad óptima para el aerogenerador de 3,6 MW de Siemens quizá sea un tanto elevada para el recurso eólico que se dispone.

En lo que a la producción energética se refiere, analizando las horas equivalentes de cada modelo, se puede concluir que los dos modelos anteriormente mencionados se quedan un poco atrás de los modelos de 2,3 y 4,2 MW.

Por lo tanto, de acuerdo a lo mencionado anteriormente, las dos mejores opciones son: el modelo de Vestas y el modelo 2.3 MW de Siemens, de las dos principales franquicias en aerogeneradores. Como es lógico, el modelo Siemens, al ser de menor potencia, necesitará de un mayor número de aerogeneradores. Esto supondría la necesidad de un mayor número de plataformas y a su vez una mayor cantidad de cableado, encareciendo en demasía los costes. En consecuencia, el aerogenerador seleccionado para el desarrollo de este proyecto será el Vestas V117-4,2MW.



Ilustración 24 Vestas V117-4,2MW (Fuente: Vestas)

### 6.3 SELECCIÓN DEL SISTEMA DE ANCLAJE

La elección del sistema de anclaje tiene una importancia casi tan importante como la del aerogenerador. Tal y como se describió en el apartado, *5.4 SISTEMAS DE ANCLAJE*, existen dos tipos de soluciones para el amarre de los aerogeneradores: fijos y flotantes. Por lo tanto, primero habrá que decidir cuál de las dos opciones es más acorde a las necesidades del proyecto. Después se procederá a seleccionar el sistema que se utilizará.

Como ya se ha explicado en capítulos anteriores, una de las primeras limitaciones que existen en España con respecto a los parques eólicos offshore es la batimetría. Desafortunadamente, en todo el litoral español a medida que aumenta la distancia a la costa, la profundidad del lecho marino se dispara. Por consecuencia, los sistemas de anclaje fijo tienen que ser descartados, a pesar de ser la opción más utilizada en este tipo de instalaciones a día de hoy. Este tipo de estructuras no se justifican desde el punto de vista técnico y económico, cuando la profundidad supera los 50-60 m. Teniendo en cuenta que el proyecto deberá ser llevado a cabo al menos a 8 km de la costa, se deberán utilizar plataformas flotantes.

Una vez elegida la tecnología a utilizar habrá que elegir el sistema. En este caso se optará por el modelo de tipo barcaza WindFloat. Tal y como se comentó, este tipo de plataforma suele ser utilizada en plantas petrolíferas offshore, por lo que su garantía de éxito queda demostrada. Además, este tipo de sistema permitirá montar los aerogeneradores en tierra facilitando su instalación, así como reducir en gran medida los costes. También, desde el punto de vista ambiental, ésta puede ser una gran opción teniendo en cuenta que la perturbación ocasionada en el mar será menor si su instalación es más sencilla. Por último, hay que tener en cuenta que esta plataforma ya ha sido testada en la costa de Portugal en la cual se dan condiciones meteorológicas similares a las que se pueden dar en Fuerteventura.

### 6.4 SELECCIÓN DE LA DISTRIBUCIÓN DE LOS AEROGENERADORES

Para poder seleccionar la distribución de los aerogeneradores, será necesario conocer el número de turbinas que se instalarán. En este caso, al pretender instalar 54.2 MW de parque eólico, se utilizarán del 13 aeroturbinas Vestas V117-4,2MW.

Tal y como se analizó en el apartado de las alternativas, la opción más eficiente a la hora de colocar los aerogeneradores es la distribución en cuadro no alineado, por lo

que ésta será la opción seleccionada. En la siguiente figura, ilustración 26, se muestra exactamente la distribución seleccionada:

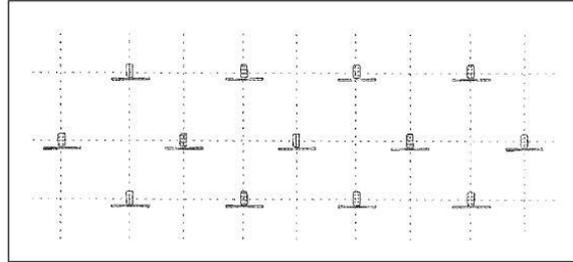


Ilustración 25 Distribución seleccionada (Fuente: BOE)

Por otro lado, la distancia que se dejará entre aerogeneradores tanto en la dirección perpendicular a la dirección del viento, como en la paralela será de 10 veces el diámetro del rotor. De esta manera, se conseguirá evitar en gran medida las pérdidas ocasionadas por el efecto estela, hasta el punto de que solo supongan un 2 % de la producción total.

A continuación, se procederá a calcular el área necesaria para esta distribución, teniendo en cuenta que el diámetro del rotor del aerogenerador seleccionado es de 117 m:

1. Distancia en la dirección paralela al viento:

$$L_{paralela} = D * 10 * (N-1) = 117 * 10 * (5-1) = 4680 \text{ m}$$

2. Distancia en la dirección perpendicular al viento:

$$L_{perpendicular} = D * 10 * (N-1) = 117 * 10 * (3-1) = 2340 \text{ m}$$

3. Área total:

$$A = L_{paralela} * L_{perpendicular} = 4680 * 2340 = 10.951.200 \text{ m}^2 = 10,95 \text{ km}^2$$

Vista la zona acotada seleccionada, de 5\*3 km<sup>2</sup>, la distribución seleccionada es totalmente viable.

### 6.5 PRODUCCIÓN ANUAL DEL PARQUE

Una vez se han elegido todos los elementos que conforman el parque eólico offshore, se procederá a calcular cual será la producción anual estimada. Para ello se tendrá en cuenta que las pérdidas ocasionadas por el efecto estela gracias a la distribución seleccionada no superan el 2 %.

$$E_{prod} = N^{aerog} * E_{nominal} * (1 - 0,02) = 13 * 16,96 \text{ MWh} * 0,98 = 217.070 \text{ MWh}$$

De esta manera, quedaría cumplido el objetivo planteado de generar el 30% de la producción total de energía de la isla mediante fuentes renovables, el cual estaba fijado en 216.000 MWh.

## 7 IMPACTO AMBIENTAL

---

A la hora de hacer un proyecto de este tipo, en el que los efectos sobre el medio natural son tan grandes, la realización de un análisis del impacto ambiental que éste puede ocasionar resulta imprescindible. De esta manera se podrán identificar los posibles efectos, tanto negativos como positivos, que la instalación generará, así como poner remedio a estos efectos. Además, hoy en día existe una gran concienciación ambiental en la sociedad debido a los grandes problemas ambientales que se están acentuando en los últimos años, por lo que no respetar unos mínimos estándares conllevaría un rechazo social que podría poner en jaque la realización del proyecto.

Sin embargo, más allá de la opinión pública, a día de hoy existe la Ley 21/2013, de 9 de diciembre, de evaluación ambiental publicada en el BOE. En ella se define cómo debe hacerse esa evaluación y que parámetros deben cumplirse. También aparecen las sanciones que podrían conllevar la falta de cumplimiento de la legislación vigente. El documento que se deberá presentar a las administraciones públicas en base a esta ley deberá seguir el siguiente esquema:

- a) Los objetivos de la planificación.
- b) El alcance y contenido del plan propuesto y de sus alternativas razonables, técnica y ambientalmente viables.
- c) El desarrollo previsible del plan o programa.
- d) Una caracterización de la situación del medio ambiente antes del desarrollo del plan o programa en el ámbito territorial afectado.
- e) Los efectos ambientales previsibles y, si procede, su cuantificación.
- f) Los efectos previsibles sobre los planes sectoriales y territoriales concurrentes.
- g) La motivación de la aplicación del procedimiento de evaluación ambiental estratégica simplificada.
- h) Un resumen de los motivos de la selección de las alternativas contempladas.
- i) Las medidas previstas para prevenir, reducir y, en la medida de lo posible, corregir cualquier efecto negativo relevante en el medio ambiente de la aplicación del plan o programa, tomando en consideración el cambio climático.
- j) Una descripción de las medidas previstas para el seguimiento ambiental del plan.

Debido al alcance de este proyecto, no se procederá a describir todo el documento como se requiere en la ley anteriormente mencionada. Sin embargo, a continuación, se identificarán los posibles impactos que se puedan generar en los tres principales medios:

- Medio inerte
- Medio biótico
- Medio socioeconómico

### 7.1 MEDIO INERTE

En primer lugar, se realizará un análisis de los impactos que tienen que ver con el medio inerte, es decir, con los elementos inertes con los cuales está en contacto el sistema del parque eólico, como pueden ser el agua, el aire o el lecho marino.

#### 7.1.1 AGUA

En lo que respecta a la hidrografía los mayores impactos se producirán en la fase de construcción. A la hora de aclimatar el suelo para poder anclar de manera correcta los anclajes de la plataforma y el cable submarino necesario para transportar la energía generada, se necesitarán realizar distintos dragados y voladuras que pueden afectar a las mareas y corrientes de la zona.

Además, la calidad del agua también puede sufrir un empeoramiento en la etapa de construcción, ya que al mover el sedimento aumentará la turbidez del agua. Asimismo, otro factor que puede perjudicar la calidad del agua serán los vertidos provenientes de las embarcaciones necesarias para las labores de instalación de los diferentes elementos del parque eólico.

Por último, un aspecto a tener muy en cuenta, son los campos magnéticos que se pueden generar debido a los cables soterrados, que pueden generar grandes problemas a la fauna de la zona como se verá después. Por ello, sería conveniente realizar estudios en este aspecto para poder minimizar este impacto.

**7.1.2 AIRE**

En este caso, al contrario de lo que pasaba con el agua, el impacto que se ocasiona es positivo. A pesar de que, tanto en la fase de fabricación de los diferentes elementos que forman parte del parque eólico, como en la instalación de estos mediante el uso de embarcaciones de gran envergadura, sí se emiten gases de efecto invernadero como pueden ser el dióxido de carbono, dióxido de azufre o dióxido de nitrógeno, en la fase de explotación, la emisión de estos gases será nula generando una energía completamente limpia.

Teniendo en cuenta que mediante la implantación de este proyecto se quieren eliminar parte de las centrales térmicas con motores gasóleo, puede resultar interesante realizar un cálculo aproximado de la cantidad de CO<sub>2</sub> que se dejaría de emitir a la atmosfera, teniendo en cuenta la producción anual que esta planta eólica tendría:

<b>Producción anual</b>	216.070 MWh
<b>Densidad gasóleo</b>	0,9 kg/l
<b>PCI gasóleo</b>	11,8 kWh/kg
<b>Factor de emisión</b>	2,79 kg CO <sub>2</sub> /l

**Tabla 7 Datos para cálculo de emisiones (Fuente: IDAE)**

$$Emisiones\ CO_2 = (Prod * Femis) / (Dens * PCI) = 56.764.150\ kg\ CO_2$$

**7.1.3 LECHO MARINO**

El lecho marino también se verá afectado debido a las labores de construcción del parque. La topografía cambiará cuando se instalen los anclajes pertinentes de las plataformas flotantes y las zanjas para el cableado eléctrico. Igualmente, la calidad del fondo marino empeorará debido al movimiento de sedimentos, que ocasionará probablemente la destrucción de ciertos hábitats naturales.

### 7.2 MEDIO BIÓTICO

El medio biótico es otro de los medios más importantes en los cuales puede influir la construcción de un proyecto de estas características, ya que pueden producirse diferentes cambios en los hábitats. Por ello, a continuación, se analizarán diferentes grupos del medio biótico: peces y mamíferos, aves, flora.

Por otro lado, las islas Canarias cuentan con una gran biodiversidad la cual debe preservarse. Teniendo en cuenta esto, desde el gobierno autonómico se elaboró el Catálogo Canario de Especies Protegidas que se muestra en la Ley 4/2010, de 4 de junio. En este documento, se muestra un listado de las especies en peligro de extinción, vulnerables o en régimen de protección especial. Por ello, habrá que hacer un especial énfasis en estas especies, y en caso de estar en la zona donde se llevará a cabo el proyecto, tomar las precauciones pertinentes para afectar lo más mínimo a las mismas.

#### 7.2.1 PECES Y MAMÍFEROS

Los animales que vivan en las aguas en las cuales vaya a construirse el parque eólico pueden sufrir grandes alteraciones en su hábitat en la etapa de construcción. Todo el trasiego de embarcaciones, el ruido que éstas generan o las voladuras de sedimentos que pueden realizarse provocan un grave trastorno a estas especies de modo que muchas de ellas se vean obligadas a cambiar de hábitat. Esto puede ser un gran problema para especies las cuales sean muy delicadas y tengan dificultades para encontrar un nuevo espacio en el que vivir, por lo que podría llegar a suponer su desaparición.

No obstante, una vez finaliza esta etapa y comienza la de explotación el ecosistema se estabiliza y no se producen grandes alteraciones en el lugar más allá de posibles labores de mantenimiento que deban realizarse en el lugar.

Entre las especies protegidas en la zona sureste de Fuerteventura destacan el delfín mular, el calderón gris o el delfín moteado.

#### 7.2.2 AVES

En lo que respecta a las aves, sucede justo lo contrario a lo de las otras especies. En la fase de construcción apenas sufren alteraciones. Sin embargo, en la fase de

explotación se producen uno de los impactos más negativos de este tipo de tecnología. El movimiento de las aspas de los aerogeneradores, pueden llegar a impactar a una de estas aves causándole la muerte. Esto hace que las aves al encontrarse con una barrera tengan la obligación de encontrar nuevas rutas que afecten al ecosistema del lugar. Además, estos aerogeneradores generan un ruido que puede hacer que las aves intenten evitar estas zonas.

Por otro lado, otro factor a tener en cuenta podría ser que ante la falta de peces en ese hábitat por lo comentado en el apartado anterior algunas aves deban buscar otros lugares para poder cazar y alimentarse. Además, a los peces y mamíferos puede sucederles lo mismo que a las aves: que tengan que modificar sus rutas migratorias.

### **7.2.3 FLORA**

Toda vegetación marina o alga que esté en la zona en la cual se instale el parque eólico puede verse afectada debido a los trabajos de acondicionamiento del terreno, anclaje o cableado eléctrico. Aun así, una vez se estabilicen los procesos en la zona puede que vuelvan a aparecer especies anteriormente destruidas, siempre y cuando las nuevas condiciones del lugar sean aptas para ellas.

## **7.3 MEDIO SOCIOECONÓMICO**

Mas allá de los impactos que tienen que ver con el medio inerte y el medio biótico, también es importante analizar otros impactos que tienen que ver con el factor humano a nivel social y económico, por ejemplo, el paisaje, la contaminación lumínica, la pesca, el turismo o el empleo.

### **7.3.1 PAISAJE**

Cuando se habla del impacto en el paisaje se habla principalmente de la contaminación visual. Es evidente que la instalación de una serie de aerogeneradores de tales dimensiones en alta mar supondrá una alteración en el paisaje, pero éste solo será apreciable desde el punto de costa más cercano. Además, tal y como se muestra en la siguiente ilustración, el impacto a partir de los 7,5 km es prácticamente nulo.



Ilustración 26 Impacto visual aerogeneradores (Fuente: Iberdrola)

### 7.3.2 CONTAMINACIÓN LUMÍNICA

Durante la noche los aerogeneradores sí que podrían ser medianamente visibles desde la costa, teniendo en cuenta que emiten unas señales lumínicas con el fin de que aviones y embarcaciones puedan saber de la presencia de estos en todo momento.

### 7.3.3 PESCA

La pesca puede ser uno de los sectores más afectados por este tipo de proyectos porque como ya se ha mencionado anteriormente van a darse varios cambios en las poblaciones de peces. Además, los pescadores se verán obligados a cambiar de ruta, lo que podría acarrear mayores inconvenientes.

### 7.3.4 TURISMO

A la hora de analizar los impactos que puede tener el turismo, dependerá mucho de la aceptación que tenga el proyecto en la sociedad. Los turistas que valoren el proyecto como algo novedoso probablemente lo vean como un aliciente para conocer el lugar. Por el contrario, la gente que lo vea como una perturbación del medio marino tendrá una postura más reacia y tratará de buscar otras zonas.

Por otro lado, al tratarse de un proyecto novedoso en España, supondría una gran repercusión en los medios de comunicación, consiguiendo poner en el mapa la isla de Fuerteventura. En este sentido sí que podría suponer un aumento del turismo consiguiendo un beneficio económico en la zona.

Otro aspecto en el que podría influir la construcción del parque sería en las actividades recreativas que se lleven a cabo en la zona, como, por ejemplo, paseos en veleros, muy comunes en este lugar. Éstos, deberán modificar su ruta debido al peligro que puede suponer el movimiento de las aspas.

### **7.3.5 EMPLEO**

Por último, en lo que se refiere al empleo, como todos los proyectos de estas características donde se necesita una gran labor técnica y logística, el empleo aumentará en la fase de construcción. También, al tratarse de un proyecto considerablemente largo en el tiempo, los empleados se verán obligados a instalarse en la zona, por lo que esto puede fomentar otros sectores.

Una vez finalizado el proyecto, cuando comience la fase de explotación de la planta, es cierto que se reducirá la demanda de empleo, pero se seguirán necesitando un número concreto de operarios que lleven a cabo las tareas de mantenimiento necesarias para el buen funcionamiento del parque eólico.

## 8 ANÁLISIS ECONÓMICO

En este apartado se procederá a realizar un análisis completo de lo que económicamente supondría la realización del proyecto. Conocer el aspecto económico es fundamental en el proyecto, ya que la futura posible realización del proyecto dependerá en gran medida de la viabilidad económica del mismo.

Para comenzar, se hará un estudio de cómo se distribuyen los costes de inversión. Después, basándose en este estudio se realizará un presupuesto aproximado del proyecto. Posteriormente, se tratará de obtener los beneficios anuales que generará la planta durante sus años de explotación y, por último, se calculará el payback de la obra para poder determinar la viabilidad económica del proyecto.

### 8.1 COSTES DE INVERSION

En primer lugar, se empezará haciendo un estudio de cómo se reparten los costes de inversión en la energía eólica offshore. Como ya se ha comentado en capítulos anteriores el coste de inversión actual de la tecnología marina es considerablemente más elevada que en la terrestre, a pesar de que en los últimos años esta diferencia se está tratando de reducir. La principal razón de esta diferencia es que la eólica offshore continúa en desarrollo mientras que la onshore lleva años totalmente consolidada como una de las alternativas renovables.

Según el estudio realizado por Offshore Wind Power Basque Country el desglose de los costes de inversión en cada una de las tecnologías el siguiente:



Gráfico 7 Costes de inversión (Offshore wind power Basque Country)

Como se puede observar, los costes de inversión en una y otra tecnología son completamente distintas. En la onshore el coste de inversión principal es la turbina mientras que en la offshore se reparten principalmente en tres grandes bloques a partes iguales: turbina, conexión a red y obra de instalación. Teniendo en cuenta que el coste de la turbina puede ser similar en ambos casos (1 M€/MW), se puede concluir lo anteriormente dicho, los costes de inversión en la eólica offshore son mayores.

Aun así, conocer los costes exactos de cada partida resulta muy difícil, ya que las empresas no suelen facilitar estos datos. Por lo tanto, habrá que basarse en las estimaciones realizadas por distintas asociaciones en las que se llega a un convenio de que el precio medio del aerogenerador rondará el millón de euros por megavatio.

## 8.2 PRESUPUESTO

HORAS INTERNAS	Horas	Coste	Total
<i>Director de proyecto</i>	800	60 €/h	48.000,00 €
<i>Ingenieros</i>	5000	40 €/h	200.000,00 €
<i>Operarios</i>	20000	20 €/h	400.000,00 €
			<b>648.000,00 €</b>

AMORTIZACIONES	Coste	Vida útil	Tiempo de uso	Amortización
<i>Ordenadores</i>	30.000,00 €	30000 h	3000 h	3.000,00 €
<i>Licencias software</i>	5.000,00 €	30000 h	3000 h	500,00 €
<i>Equipos de medición</i>	15.000,00 €	50000 h	1000 h	300,00 €
				<b>3.800,00 €</b>

## DISEÑO DE PARQUE EÓLICO OFFSHORE

<b>GASTOS</b>	<b>Cantidad</b>	<b>Coste unitario</b>	<b>Total</b>
<i>Aerogeneradores</i>	13	4.200.000,00 €	54.600.000,00 €
<i>Plataformas</i>	13	1.500.000,00 €	19.500.000,00 €
<i>Cableado</i>	-	40.000.000,00 €	40.000.000,00 €
<i>Obra civil</i>	-	20.000.000,00 €	20.000.000,00 €
<i>Otros</i>	-	2.000.000,00 €	2.000.000,00 €
			<b>136.100.000,00 €</b>

<b>SUBCONTRATACIONES</b>	<b>Coste</b>
<b>Maquinaria</b>	3.500.000,00 €
<b>Transportes</b>	25.000.000,00 €
	<b>28.500.000,00 €</b>

<b>PRESUPUESTO</b>	<b>Coste</b>
<i>Horas internas</i>	648.000,00 €
<i>Amortizaciones</i>	3.800,00 €
<i>Gastos</i>	136.100.000,00 €
<i>Subcontrataciones</i>	28.500.000,00 €
<b>Subtotal 1</b>	<b>165.251.800,00 €</b>
<i>Gastos indirectos ( %5)</i>	8.262.590,00 €
<b>Subtotal 2</b>	<b>173.514.390,00 €</b>
<i>Imprevistos ( %10)</i>	17.351.439,00 €
<b>Subtotal 3</b>	<b>190.865.829,00 €</b>
<i>Gastos financieros ( %5)</i>	9.543.291,45 €
<b>TOTAL</b>	<b>200.409.120,45 €</b>

### 8.3 BENEFICIOS ANUALES

Para poder calcular los beneficios que se obtendrán con la explotación de esta planta eólica offshore será necesario identificar cuáles serán los ingresos y cuáles serán los gastos.

Evidentemente los ingresos estarán directamente relacionados con la cantidad de energía producida, en este caso tal y como se calculó en 6.5 PRODUCCIÓN ANUAL DEL PARQUE, serán 217.070 MWh anuales. Además, deberemos conocer cuál es el actual precio medio de la energía eólica en el mercado español. Según los datos de AEE (Asociación Empresarial Eólica), el precio por megavatio hora de 110 euros. Por lo que los ingresos serían los siguientes:

$$I = E_{prod} * P_{MWh} = 217070 * 110 = 23.877.700 \text{ €}$$

Por otro lado, a estos ingresos habrá que restarle los costes de producción y mantenimiento. Conocer estos datos con exactitud resulta complicado ya que pueden depender de muchos factores. Pero según los datos facilitados por IDAE, podrían rondar los 26 euros por megavatio instalado. Estos datos son a fecha de 2010, por lo que en estos últimos años podría haber disminuido estos costes. Aun así, se tendrán en cuenta estos datos. A continuación, se calculará los costes operativos:

$$C_{oper} = E_{prod} * C_{oper \text{ MWh}} = 217070 * 26 = 5.643.820 \text{ €}$$

Una vez tenemos los ingresos y los gastos anuales se procede a calcular los beneficios anuales:

$$B = I - C_{prod} = 23.877.700 - 5.643.820 = 18.233.880 \text{ €}$$

### 8.4 PAYBACK

Para poder conocer si este proyecto puede ser económicamente viable, es interesante conocer cuánto tiempo pasará hasta que se recupere la inversión realizada, el cual puede ser inferior en el caso de que se perciban ayudas y primas por parte de las administraciones públicas. Para ello, suponiendo que los beneficios anuales se mantengan constantes bastara con dividir la inversión hecha entre los beneficios obtenidos:

$$\text{Payback} = \text{Inversión} / \text{Beneficios} = 200.409.120,45 / 18.233.880 = 11 \text{ años}$$

Es, decir, una vez hayan pasado 11 años desde el comienzo de la fase de explotación de este proyecto, se empezarán a tener ganancias. Teniendo en cuenta que la vida útil de este tipo de instalaciones ronda los 35-50 años (Cleantech camp, 2016), se podría asegurar que este proyecto es económicamente viable

## 9 DESCRIPCIÓN DE TAREAS

---

En este capítulo se pretende explicar cuáles han sido las diferentes fases que han ido desarrollándose para la realización de este proyecto. En primer lugar, se describirá cuál ha sido la planificación del proyecto explicando brevemente cada tarea. Después mediante un diagrama de Gantt se ordenarán cronológicamente las tareas.

### 9.1 PLANIFICACION DEL PROYECTO

- Selección de proyecto: Es la primera tarea, seleccionar el tema sobre el cual se va a desarrollar el proyecto y determinar con la directora cuáles van a ser las líneas generales del mismo.
- Búsqueda de información: el siguiente paso, cuando ya se ha elegido el tema, se comienza a buscar información sobre la situación de la energía eólica, proyectos de parques eólicos similares, etc.
- Selección de ubicación: la selección del lugar donde se va a llevar a cabo la obra es uno de los puntos clave. Para ello es necesario buscar la información pertinente del lugar e iniciar un análisis de la zona para poder determinar si es apta o no para poder llevar a cabo un proyecto de estas características.
- Selección de aerogenerador: en primer lugar, se buscan los aerogeneradores offshore más comunes en la actualidad. Después, se acota un grupo más reducido de modelos que puedan ser acordes a las necesidades de la obra, para buscar todos los datos técnicos. Cuando el análisis está finalizado se decide que aerogenerador resulta más conveniente
- Selección del sistema de anclaje: el procedimiento es similar al anterior. Primero se analizan cuáles son las opciones que hay en el mercado actual y después se selecciona la opción óptima para el proyecto.
- Selección de distribución de aerogeneradores: en este caso también procedimiento es el mismo a los dos anteriores.
- Redacción del proyecto: una vez tenemos definido todo el diseño del parque eólico se procede a redactar el proyecto. Primero se describen datos generales del proyecto y de la energía eólica y posteriormente se centra en la obra que se va a llevar a cabo, explicando primero las alternativas y después justificando la solución propuesta

- Análisis del impacto ambiental: el estudio ambiental se ha decidido escribirlo posteriormente a la redacción parcial del proyecto para tener una visión más clara de cuál va a ser el resultado final el parque y poder analizar mejor los distintos impactos.
- Análisis económico: Al igual que la tarea anterior, se ha redactado después para tener todos los detalles de cuáles van a ser los elementos y los trabajos necesarios para el desarrollo del proyecto y poder así hacer un presupuesto más detallado.
- Corrección del documento: cuando está todo el trabajo redactado se procede a corregir todo el proyecto con la ayuda de la directora del proyecto.
- Preparación de la defensa: Se decide junto a la directora cuál va a ser el contenido que se presentará en la defensa y se confecciona el conjunto de diapositivas que se utilizaran de guía en la presentación
- Defensa del proyecto: Ésta sería la última tarea del proyecto, en la cual se presenta frente al tribunal.

# DISEÑO DE PARQUE EÓLICO OFFSHORE

## 9.2 DIAGRAMA DE GANTT

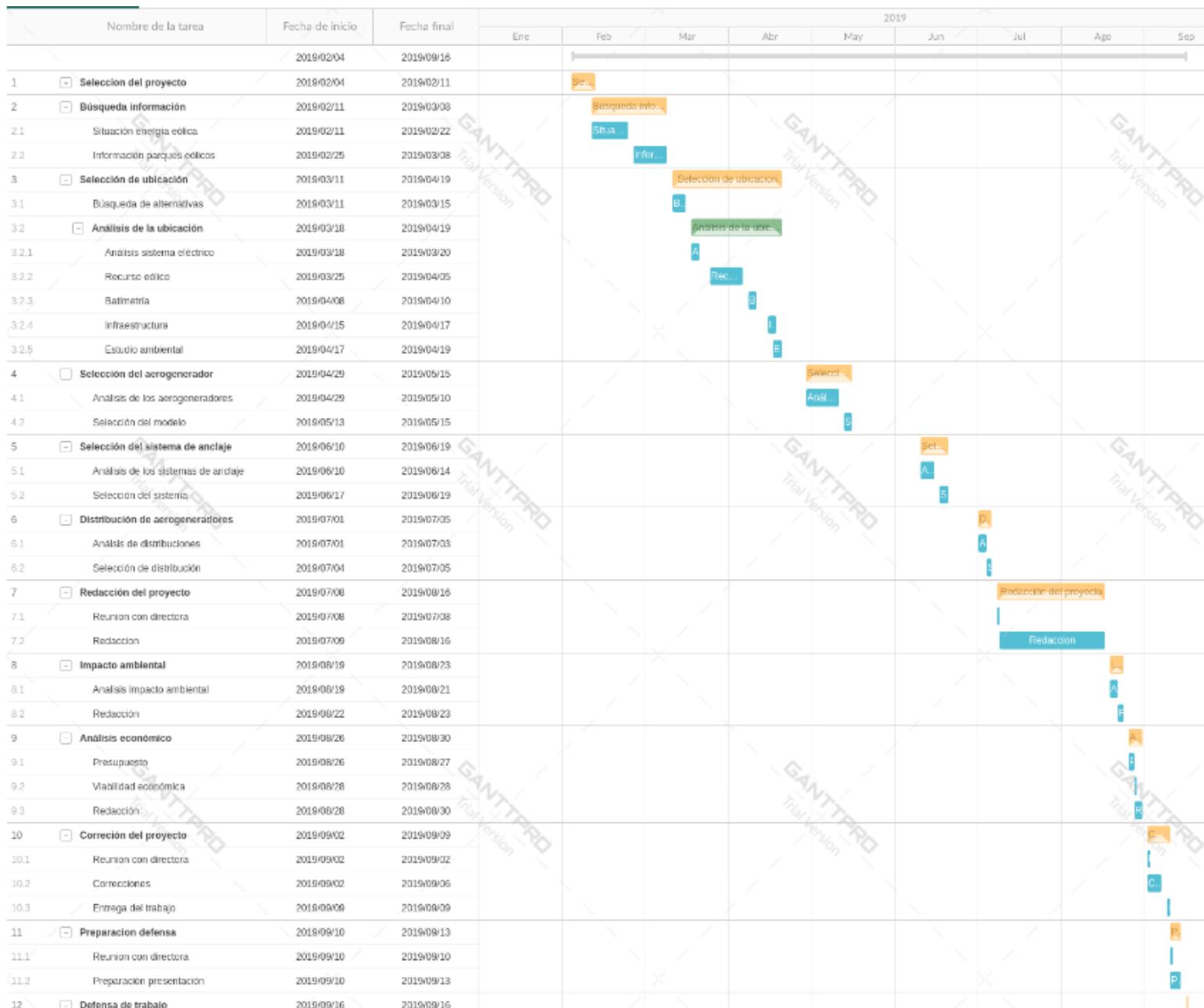


Ilustración 27 Diagrama de Gantt (GanttPro)

### 10 CONCLUSIONES

---

Después de haber realizado todos los análisis y cálculos pertinentes, se concluye que el proyecto en el que se diseña un parque eólico offshore de 54,6 MW en la costa sureste de Fuerteventura es viable desde el punto de vista técnico, ambiental y económico. Éste estará compuesto por 13 aerogeneradores Vestas V117-4,2MW, ancladas mediante plataformas flotantes WindFloat y distribuidos en cuadro no alineado ocupando un área total de 10,95 km<sup>2</sup>

Gracias a este proyecto, se cumplirá el objetivo de producir el 30 % de la energía mediante energía eólica, llegando a generar 217.070 MWh anuales y reduciendo 56.764 toneladas de CO<sub>2</sub>. En lo que respecta al factor económico, la inversión constará de 200 millones de euros que serán recuperados en un plazo de 11 años.

En definitiva, se trata de un proyecto totalmente viable tanto en el aspecto técnico como ambiental y económico, contribuyendo de manera reseñable a la autosuficiencia energética de la isla, así como al tránsito hacia un sistema más responsable con el ambiente, en el cual se reduzcan las emisiones de gases invernadero que puedan contribuir al cambio climático. Por último, este trabajo demuestra que la instalación de parques eólicos offshore es viable en la costa española mediante el uso de plataformas flotantes, lo que podría suponer una revolución en el sistema de producción energética, abriendo una puerta a esta tecnología tan potente.

## 11 BIBLIOGRAFÍA

---

- AEEólica. (2009). *ESTUDIO ESTRATÉGICO AMBIENTAL DEL LITORAL*. Obtenido de [https://www.aeeolica.org/uploads/documents/562-estudio-estrategico-ambiental-del-litoral-espanol-para-la-instalacion-de-parques-eolicos-marinos\\_mityc.pdf](https://www.aeeolica.org/uploads/documents/562-estudio-estrategico-ambiental-del-litoral-espanol-para-la-instalacion-de-parques-eolicos-marinos_mityc.pdf)
- AEEólica. (s.f.). *Evolución y perspectivas de la eólica offshore en*.
- Agencia Local Gestora de la Energía de Las Palmas de Gran Canaria (ALGE-LPGC). (s.f.). *Información energética de Canarias*. Obtenido de <https://energialaspalmasgc.es/informacion-energetica-canarias/>
- Bloomberg. (2018). *2H 2017 Wind Turbine Price Index*. Obtenido de <https://about.bnef.com/blog/2h-2017-wind-turbine-price-index/>
- BOE, B. O. (s.f.). *Ley 21/2013, de 9 de diciembre, de evaluación ambiental*. Obtenido de <https://www.boe.es/buscar/act.php?id=BOE-A-2013-12913>
- Cleantech camp. (2016). *Ahora los parques eólicos marinos pueden ser más eficientes*. Obtenido de <https://www.cleantechcamp.com/parques-eolicos-marinos-mas-eficientes/>
- climatico, O. c. (Marzo de 2011). *GUÍA PRÁCTICA PARA EL CÁLCULO DE EMISIONES DE GASES DE EFECTO INVERNADERO*. Obtenido de <http://www.caib.es/sacmicrofront/archivopub.do?ctrl=MCRST234ZI97531&id=97531>
- COUNTRY, O. w. (s.f.). *LA EÓLICA OFFSHORE ES UNA FUENTE RENOVABLE DE GRAN POTENCIAL*. Obtenido de <http://www.offshorewindbasquecountry.com/es/potencial?view=page>
- Diario renovables. (s.f.). *Siemens Gamesa presenta un nuevo aerogenerador offshore: 10 MW de potencia y palas de 94 metros*. Obtenido de <https://www.diariorenovables.com/2019/01/siemens-gamesa-un-nuevo-aerogenerador-offshore-10mw.html>
- Ekidom. (s.f.). *Historia de la energía eólica*. Obtenido de <http://www.ekidom.com/historia-de-la-energia-eolica>
- EMODnet. (s.f.). Obtenido de <http://www.emodnet.eu/geoviewer/#!/>
- GanttPro. (s.f.). Obtenido de <https://app.ganttpro.com/#/project/1566984097800/gantt>
- Gobierno de Canarias. (2010). *Catálogo Canario de Especies protegidas*. Obtenido de [http://www.gobiernodecanarias.org/cmsgobcan/export/sites/cptss/sostenibilidad/descargas/Biodiversidad/Catalogo\\_Canario\\_Especies\\_Protegidas.pdf](http://www.gobiernodecanarias.org/cmsgobcan/export/sites/cptss/sostenibilidad/descargas/Biodiversidad/Catalogo_Canario_Especies_Protegidas.pdf)

- Gobierno de Canarias. (2017). *Anuario energetico de Canarias*. Obtenido de <http://www.gobiernodecanarias.org/ceic/energia/doc/Publicaciones/AnuarioEnergeticoCanarias/ANUARIO-ENERGETICO-2017-20190109.pdf>
- Gobierno de Canarias. (s.f.). *Visor IDECanarias*. Obtenido de <https://visor.grafcan.es/visorweb/default.php?svc=svcRecursoEolico>
- González, S. F. (s.f.). *Estudio, caracterización y comparación de tipologías de plataformas*. Obtenido de [http://www.gii.udc.es/img/gii/files/Tipologias\\_Soportes\\_Aerogeneradores-Ferreno\\_Castro\\_Diaz\\_Fraguela.pdf](http://www.gii.udc.es/img/gii/files/Tipologias_Soportes_Aerogeneradores-Ferreno_Castro_Diaz_Fraguela.pdf)
- GWEC. (s.f.). *Global Wind Energy Council*. Obtenido de <https://gwec.net/>
- Herranz, M. (s.f.). Ordezko energiak energia eolikoa apunteak.
- Iberdrola. (s.f.). *Cimentaciones de aerogeneradores*. Obtenido de <https://www.iberdrola.com/sala-comunicacion/top-stories/cimentaciones-aerogeneradores-marinos>
- Iberdrola. (s.f.). *Parque eolico marino Wikinger*. Obtenido de <https://www.iberdrola.com/conocenos/lineas-negocio/proyectos-emblematicos/parque-eolico-marino-wikinger>
- IDAE. (2011). *Análisis del recurso. Atlas eólico español. Estudio técnico PER 2011-2020*. Madrid.
- IDAE. (2011). *Evolución tecnológica y perspectiva de costes de las energías renovables*. Madrid.
- IDAE. (s.f.). *Plan nacional integrado de energía y clima PNIEC 2021-2030*. Obtenido de <https://www.idae.es/informacion-y-publicaciones/plan-nacional-integrado-de-energia-y-clima-pniec-2021-2030>
- Madrid, U. p. (s.f.). *EFECTO DE LAS ESTELAS EN LOS PARQUES EÓLICOS*. Obtenido de [http://oa.upm.es/7505/1/INVE\\_MEM\\_2010\\_76793.pdf](http://oa.upm.es/7505/1/INVE_MEM_2010_76793.pdf)
- Meteoblue. (s.f.). Obtenido de [https://www.meteoblue.com/es/tiempo/semana/fuerteventura\\_espa%c3%b1a\\_2517481](https://www.meteoblue.com/es/tiempo/semana/fuerteventura_espa%c3%b1a_2517481)
- power, T. w. (s.f.). Obtenido de <https://www.thewindpower.net/>
- Red Electrica España REE. (2018). *El sistema eléctrico español*. Obtenido de [https://www.ree.es/sites/default/files/11\\_PUBLICACIONES/Documentos/InformesSistemaElectrico/2018/inf\\_sis\\_elec\\_ree\\_2018.pdf](https://www.ree.es/sites/default/files/11_PUBLICACIONES/Documentos/InformesSistemaElectrico/2018/inf_sis_elec_ree_2018.pdf)
- Total Gas y Electricidad. (2019). *El 40% de la electricidad producida en España en 2018 fue de origen renovable*. Obtenido de <https://www.electricidad.total.es/casi-mitad-produccion-electricidad-en-espana-fue-de-origen-renovable-2018>

Wikipedia. (s.f). *Fuerteventura*. Obtenido de  
<https://es.wikipedia.org/wiki/Fuerteventura>