



UNIVERSIDAD DE LAS PALMAS DE GRAN CANARIA
Escuela de Ingenierías Industriales y Civiles



MÁSTER UNIVERSITARIO EN INGENIERÍA INDUSTRIAL

TRABAJO FINAL DE MÁSTER

**DISEÑO Y DIMENSIONAMIENTO
DE LA CIMENTACIÓN DE UN
AEROGENERADOR OFFSHORE
EN LAS ISLAS CANARIAS**

Autor: Sergio Vicente Vera Rodríguez

Tutores: Luis Alberto Padrón Hernández

Juan José Aznárez González

Curso Académico: 2016-2017

Las Palmas de Gran Canaria, Junio de 2017

Se acredita la realización del trabajo final de máster, con las firmas de los tutores y el autor, correspondiente al curso 2016/2017.

Título: Diseño y dimensionamiento de la cimentación de un aerogenerador offshore en las Islas Canarias.

Universidad de Las Palmas de Gran Canaria.

Autor: Sergio Vicente Vera Rodríguez

Tutores: Luis Alberto Padrón Hernández

Juan José Aznárez González

HOJA DE FIRMAS

AUTOR	TUTOR 1	TUTOR 2
Sergio Vicente Vera Rodríguez	Luis Alberto Padrón Hernández	Juan José Aznárez González

En Las Palmas de Gran Canaria, a 12 de Junio de 2017.

CONTENIDO

Memoria descriptiva

Memoria justificativa

Estudio previo. Datos de partida

Anejo de cálculo. Selección del aerogenerador

Planos

Presupuesto

MEMORIA DESCRIPTIVA

**DISEÑO Y DIMENSIONAMIENTO DE LA CIMENTACIÓN DE UN
AEROGENERADOR OFFSHORE EN LAS ISLAS CANARIAS**

ÍNDICE

1. CONSIDERACIONES GENERALES	2
1.1. ANTECEDENTES	2
1.2. OBJETO DEL PROYECTO	3
1.2.1. <i>Objeto académico</i>	3
1.2.2. <i>Objeto general</i>	3
1.3. AUTOR	4
1.4. PETICIONARIO	4
1.5. EMPLAZAMIENTO.....	4
1.6. DATOS DE PARTIDA DE LA UBICACIÓN SELECCIONADA	5
1.7. LEGISLACIÓN.....	6
1.7.1. <i>Normas de obligado cumplimiento</i>	6
1.7.2. <i>Otras normas de interés</i>	6
1.8. IMPACTO AMBIENTAL	6
1.9. DOCUMENTOS DEL PROYECTO	7
2. DISEÑO DE LA CIMENTACION PARA UN AEROGENERADOR OFFSHORE	7
2.1. INTRODUCCIÓN	7
2.2. TIPOS DE CIMENTACIÓN	7
2.3. CIMENTACIÓN SELECCIONADA	8
2.4. COMPONENTES DEL CONJUNTO	9
2.5. PROCEDIMIENTO DE DIMENSIONADO	10
2.6. CRITERIOS DE DISEÑO	11
2.7. CARGAS SOBRE LA ESTRUCTURA	12
2.8. PROCESO DE FABRICACIÓN CIMENTACIÓN SELECCIONADA.....	14
2.9. INSTALACIÓN DE LA CIMENTACIÓN.....	15
3. SOLUCIÓN ADOPTADA	16
4. RESUMEN DEL PRESUPUESTO.....	17
5. BIBLIOGRAFÍA.....	18

1. CONSIDERACIONES GENERALES

1.1. Antecedentes

La mayoría de los países de todo el mundo se encuentran de acuerdo en que han de cambiar sus políticas energéticas para conseguir reducir las emisiones de gases de efecto invernadero. Las energías renovables juegan un papel clave a lo hora de lograr este objetivo, y acuerdos como el firmado en París en el año 2015 aseguran la participación de un gran número de naciones comprometidas con el medio ambiente.

El consumo de energía eléctrica cada vez es mayor debido al crecimiento exponencial de la población que lleva a su vez asociado una mayor demanda energética, tanto para industria como para uso individual. Esta situación, también se ha revertido a favor de las energías renovables aumentando de manera notoria la producción de la misma en los últimos años.

La energía eólica en sí es una fuente de energía eléctrica de origen renovable que se encuentra en plena expansión. La eólica marina, en particular, es una tecnología que está aún en pleno desarrollo. El hecho de situar los aerogeneradores en el mar no es cuestión de azar, sino que se consigue un mayor aprovechamiento del viento. En la actualidad, Europa es uno de los territorios, donde más se ha promovido la instalación de parques eólicos offshore, contando con más de 3300 aerogeneradores instalados en el mar, según datos de la EWEA. A pesar de este dato, un país puntero en la producción y en el I+D de la energía eólica, como es España, no cuenta con ningún aerogenerador offshore, lo que implica que se encuentra a la cola, y que a su vez, tenga la obligación de desarrollar esta tecnología.

Canarias, por sus condiciones de viento, es un territorio ideal para el aprovechamiento del recurso eólico, y mediante la realización del presente proyecto se pretende aumentar la producción de energía eléctrica a través de medios renovables, en un territorio “aislado” como puede ser las Islas Canarias, y no depender tanto de las importaciones de hidrocarburos, así como reducir de forma importante las emisiones contaminantes y los residuos generados. Se espera además, impulsar la energía eólica offshore en España y que se avance en la implantación de este tipo de fuente de energía renovable, muy utilizada en la actualidad en el marco de la Unión Europea y a nivel mundial. Por el contrario las grandes profundidades alrededor de las islas, y la protección del territorio, hacen difícil la implantación de aerogeneradores marinos.

Aun así, el potencial es grande, y esto se nota en la publicación de diferentes noticias de actualidad, como pueden ser las del proyecto de la plataforma oceánica de canarias (PLOCAN), con su prototipo Elisa, o el proyecto Flocan 5 de la empresa ACS. La inversión tanto pública como privada se ha disparado en estos últimos meses, con el fin de llevar a cabo la instalación de aerogeneradores offshore en aguas canarias. La tecnología Elisa es interesante, desde el punto de vista de que se facilita todo el proceso de montaje del aerogenerador, ya que se transporta todo el sistema ensamblado hasta su punto de colocación, reduciendo en un alto porcentaje los costes. Por su parte, mediante el proyecto Flocan 5 se pretende instalar 5 aerogeneradores offshore en la costa este de Gran Canaria, sin embargo se han exigido por parte de las administraciones públicas numerosos informes medioambientales exhaustivos que aseguren la compatibilidad del medio con la instalación, siendo esta, uno de las mayores trabas a superar a la hora de llevar a cabo este proyecto.

Se propone el diseño y cálculo de una cimentación para un aerogenerador marino ubicado en las costas del archipiélago. Por otro lado, nos encontramos ante una industria en auge que demanda profesionales cualificados, por lo que se cree que abordar este tipo de problemas podrá contribuir a la proyección profesional del estudiante.

1.2. Objeto del proyecto

El objeto del proyecto tiene dos variantes, por un lado tenemos el objeto académico y por otro lado, tenemos el objeto general.

1.2.1. Objeto académico

A través del presente proyecto, se culminan los estudios de Máster en Ingeniería Industrial, en la Universidad de Las Palmas de Gran Canaria. El proyecto, servirá de apoyo para demostrar la utilidad de los conocimientos adquiridos durante los dos años en los que se ha cursado dicho máster oficial.

1.2.2. Objeto general

El presente trabajo de fin de título, tiene por objeto diseñar, definir y dimensionar la cimentación adecuada para un aerogenerador fijado en el fondo marino, situado en las costas canarias.

El trabajo a realizar consta de diferentes fases, descritas a continuación.

1. Proposición de una ubicación factible para un aerogenerador offshore en las Islas Canarias teniendo en cuenta el recurso eólico, la profundidad y propiedades del fondo marino, además del nivel de protección de las costas.
2. Selección y estudio de un aerogenerador comercial factible para ser colocado esa ubicación.
3. Estimación del comportamiento dinámico de la estructura de soporte del aerogenerador, y estimación de las cargas a las que estará sometido el sistema.
4. Realización del diseño y dimensionamiento de la cimentación.
5. Estimación de los costes asociados a su construcción.

1.3. Autor

El autor del presente proyecto, es el alumno **Sergio Vicente Vera Rodríguez**, cuyos tutores son los profesores **D. Luis Alberto Padrón Hernández** y **D. Juan José Aznárez González**, pertenecientes al departamento de ingeniería civil, de la Universidad de Las Palmas de Gran Canaria.

1.4. Peticionario

El peticionario de este proyecto es la Escuela de Ingenierías Industriales y Civiles (EIIC) de Las Palmas de G.C, situada en el Campus Universitario de Tafira Baja y perteneciente a la Universidad de Las Palmas de Gran Canaria.

1.5. Emplazamiento

La selección de la ubicación del aerogenerador offshore depende de varios factores limitantes, que han de ser considerados antes de proponer la ubicación final escogida. Es necesario obtener los datos del viento de la zona, siendo el factor determinante que caracteriza el rendimiento de la instalación, por otro lado, la profundidad o batimetría del punto seleccionado, para considerar si es viable o no la colocación de la cimentación para el aerogenerador y, por último, ha de comprobarse la legislación vigente que afecta a la zona dónde se ubicará previsiblemente el aerogenerador.

La zona escogida para la ubicación del aerogenerador offshore es el sur este de la isla de Gran Canaria, frente a las costas del municipio de San Bartolomé de Tirajana. Todas las consideraciones relativas a la elección de la ubicación vienen recogidas en el anejo a la memoria “Estudio previo. Datos de partida”. En la tabla 1 se muestran las características del punto exacto de la ubicación seleccionada.

Características de la ubicación seleccionada	
Coordenadas	X: 452850, Y: 3069850
Distancia a la costa	4300 [m]
Profundidad de lámina de agua	50 [m]

Tabla 1. Características de la ubicación seleccionada.



Figura 1. Ubicación del aerogenerador offshore. (Adaptada de [1]).

1.6. Datos de partida de la ubicación seleccionada

Los datos de partida, tanto de viento, datos geotécnicos, como de las olas, o las corrientes marinas, han sido proporcionados por diversas entidades públicas facilitando el proceso de búsqueda de la información referente a las características del lugar de la ubicación del aerogenerador. Se encuentran detallados en el anejo a la memoria “Estudio previo. Datos de partida”.

Por otro lado, una vez se cuenta con los datos de viento de la zona se realiza un estudio a conciencia del tipo de aerogenerador que mejor se adapta y que mayor rendimiento proporciona, seleccionando el óptimo para este proyecto en concreto. El modelo elegido es el **V-164 - 8.0 MW** del fabricante **Vestas**. Las principales características de dicho aerogenerador se muestran en la tabla 2.

Características del aerogenerador V-164-8MW.	
Potencia nominal	8 [MW]
Velocidad de operación del rotor	4.8-12.1 [rpm]
Diámetro del rotor	164 [m]

Tabla 2. Características del aerogenerador V-164-8MW.

Los criterios de elección del aerogenerador, se encuentran especificados y detallados en el “Anejo de cálculo. Selección del aerogenerador”.

1.7. Legislación

En este apartado se tiene en consideración la normativa de aplicación al proyecto de instalar un aerogenerador en el ámbito marino. A continuación se muestra un listado de las diferentes normas divididas en dos apartados, por un lado, normas de obligado cumplimiento y por otro lado otras normas consultadas.

1.7.1. Normas de obligado cumplimiento

- Real Decreto 1028/2007, de 20 de julio, por el que se establece el procedimiento administrativo para la tramitación de las solicitudes de autorización de instalaciones de generación eléctrica en el mar territorial.
- Real Decreto 661/2007, de 25 de mayo, por el que se regula la actividad de producción de energía eléctrica en régimen especial.
- Ley 21/2013, de 9 de diciembre, de evaluación ambiental.

1.7.2. Otras normas de interés

- EN 1993-1-4 (2005), Eurocode 1: Actions on structures - Part 1-4: General actions - Wind actions.
- EN 1993-1-6 (2007), Eurocode 3: Designs of steel structures - Part 1-6: Strength and stability of shell structures.
- International Standard IEC-61400-1 (2005), of August, wind turbines – Part 1: design requirements.
- International Standard IEC-61400-3 (2009), of February, wind turbines - Part 3: design requirements for offshore wind turbines.

1.8. Impacto ambiental

Será necesario la realización de estudios de impacto ambiental que tengan en cuenta el efecto que tendrá en el medio la instalación de un aerogenerador offshore. Han de tenerse en cuenta

tanto las modificaciones sufridas por el medio, así como, el efecto que va a tener sobre las diferentes especies que habitan esa zona, en la fase de colocación, en la de funcionamiento y en la fase de desmantelamiento del aerogenerador offshore, quedando fuera del alcance de este trabajo de fin de máster.

1.9. Documentos del proyecto

El proyecto se compone de los siguientes documentos:

1. Memoria
 - 1.1. Memoria descriptiva
 - 1.2. Memoria justificativa
 - 1.3. Anejos
 - 1.3.1. Estudio previo. Datos de partida
 - 1.3.2. Anejo de cálculo. Selección del aerogenerador
2. Planos
3. Presupuesto

2. DISEÑO DE LA CIMENTACION PARA UN AEROGENERADOR OFFSHORE

2.1. Introducción

Los aerogeneradores offshore necesitan un sistema de cimentación que puede variar en su tipología llegando a poder estar fijado mediante anclajes y estructuras flotantes. En este punto de la memoria descriptiva se realizará una descripción de los diferentes tipos de cimentación existentes, así como, la explicación del cometido de dicha cimentación a la hora de transferir las cargas recibidas hasta el suelo. Por otro lado realiza una breve explicación del procedimiento de dimensionado y los diferentes criterios de diseño establecidos para definir la cimentación seleccionada, además de su proceso de fabricación e instalación.

2.2. Tipos de cimentación

Una de las características que influyen en la elección del tipo de cimentación de un aerogenerador offshore es la profundidad del lecho marino, sin dejar de lado las cargas producidas por el viento, las olas o las corrientes marinas, y el tipo de suelo. Atendiendo a estos parámetros podemos encontrar diferentes tipos de configuraciones de cimentaciones adecuadas para cada caso, como pueden ser las cimentaciones superficiales, las profundas y las flotantes.

La cimentación superficial o cimentación por gravedad, garantiza la estabilidad del aerogenerador mediante su propio peso. Para su construcción suelen utilizarse piezas de hormigón reforzado fabricadas previamente en los astilleros de los muelles.

Por otro lado las cimentaciones profundas se dividen en pilotes y vasos de succión. La primera consiste en el hincado de un pilote de sección cilíndrica hueca en el lecho marino, mientras que el vaso de succión, elimina el agua mediante una bomba, creando succión entre la cimentación y el terreno, confiriendo así una gran estabilidad.

Se pueden establecer configuraciones individuales o un grupo de cimentaciones (tipo trípode, tipo jacket entre otras), ya sea a través de cimentaciones superficiales o profundas.

La cimentación por trípode destaca por tener una geometría formada por una columna central y tres patas, estando todos los elementos conectados entre sí. La tipo jacket, es parecida a la tipo trípode, pero con la salvedad de que, la geometría de su estructura tiene forma de celosía.

Por último para la cimentación flotante se utilizan plataformas flotantes, que son fijadas al fondo mediante cables. En la actualidad, está muy poco desarrolladas, pero se espera que en el futuro se conviertan en las más utilizadas. Se pueden encontrar más detalles de los tipos de cimentaciones en la memoria justificativa.

2.3. Cimentación seleccionada

La cimentación escogida para el caso de estudio del presente proyecto es la tipo monopilote, ya que, nos encontramos ante un suelo de baja resistencia (arena) y además, la estructura recibe grandes cargas debido al gran tamaño del aerogenerador seleccionado, siendo capaz este tipo de estructura, de transmitir de forma adecuada estas cargas al suelo. Es de especial importancia la solución adoptada, en función de la profundidad del mar de la zona en la que se vaya a colocar, con lo que la selección de esta configuración de cimentación es idónea para las profundidades que se tienen en la ubicación especificada con anterioridad. Son de utilidad, para el diseño de dicho monopilote, las pautas establecidas por Arany et al. [4], y las diferentes normas y manuales proporcionados por la Det Norske Veritas (DNV), el American Petroleum Institute (API) y la International Electrotechnical Commission (IEC).

Como se puede apreciar en la figura 2, la configuración más utilizada para la cimentación de los aerogeneradores offshore, es la de monopilote, cuyo porcentaje de instalación es muy superior al resto de las cimentaciones.

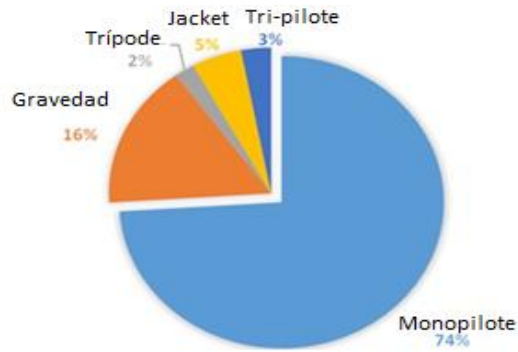


Figura 2. Porcentajes de cimentaciones (Adaptada de [3]).

2.4. Componentes del conjunto

Las partes de un aerogenerador offshore cimentado mediante monopilote, pueden dividirse en tres partes, formando cada una, un elemento diferenciado del resto, explicados a posteriori.

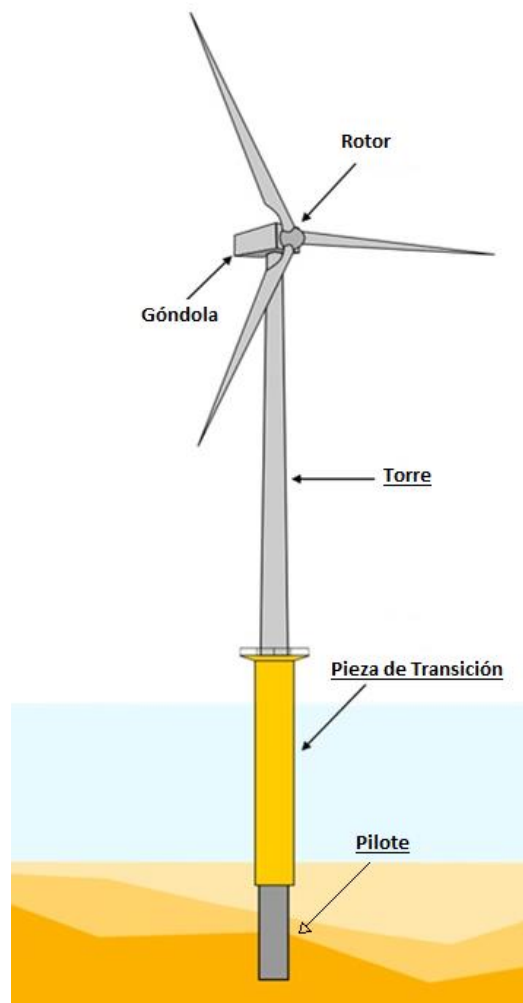


Figura 3. Componentes de la estructura. (Adaptada de [3]).

a) Torre

Forma parte del sistema estructural del aerogenerador, y su longitud recorre la línea que va desde la base superior de la pieza de transición, hasta la unión de la góndola y rotor. El aerogenerador se compone de la torre, la góndola y el rotor con las palas.

b) Pieza de transición

Elemento que sirve de unión entre el pilote y el aerogenerador. Entre el pilote y dicha pieza, existe un espacio que será rellenado de lechada, para evitar movimientos no deseados.

c) Pilote

Elemento estructural, de longitud continua. Se diferencian dos partes en la misma pieza, una parte irá enterrada en el lecho marino (longitud enterrada), y la otra parte irá desde el lecho marino (o línea de barro), hasta la superficie marina.

2.5. Procedimiento de dimensionado

El procedimiento de diseño y dimensionamiento se dividirá en varias partes, enfocado hacía la configuración de cimentación seleccionada. El monopilote se define mediante una geometría simple, como es el diámetro del pilote, el espesor de la pared, la longitud del pilote y la longitud enterrada o embebida en el fondo marino. Se han seguido los pasos recomendados por Arany et al. [2] y se ha complementado con lo establecido en las normas IEC, los manuales de la DNV y, lo aconsejado por el API.

El objetivo principal de la cimentación es transferir todas las cargas recibidas por el aerogenerador al terreno de manera segura, dentro de los límites admitidos. Para ello han de tenerse en cuenta los estados límites de diseño (ELU, ELS y ELF), detallados en la memoria justificativa. El procedimiento de diseño se ha llevado a cabo según lo establecido en la tabla 3.

PASOS	PROCEDIMIENTO DE DIMENSIONADO
1	Establecer el diseño base (Criterios de diseño: ELU, ELF, ELS) y recopilar los diferentes datos de partida específicos del lugar de colocación.
2	Suponer unas dimensiones iniciales del pilote (diámetro), teniendo en cuenta las cargas de viento estimadas y los criterios estructurales del pilote.

3	Estimar un espesor de pared mínimo del pilote, así como una longitud enterrada.
4	Calcular las cargas debidas a las olas y si fuera necesario, actualizar las dimensiones del pilote.
5	Estimar la capacidad de carga geotécnica, tanto vertical como lateral, de la cimentación.
6	Hallar los parámetros de rigidez (lateral, giro y rigidez del acoplamiento) y estimar los desplazamientos y giros de la cabeza enterrada del pilote.
7	Calcular la frecuencia natural de todo el sistema, asegurando que se encuentre en el rango especificado. Aplicar coeficientes dinámicos, para aumentar las cargas dinámicas. Se actualizarán las dimensiones del pilote si fuese necesario.
8	Cambio de la frecuencia natural durante la vida útil de la estructura.
9	Estimar la vida a fatiga de la cimentación (mayor o igual a 50 años).
10	Comprobar la estabilidad local y global del pilote.

Tabla 3. Procedimiento de dimensionado.

Dicho procedimiento de dimensionado se especifica y detalla en la memoria justificativa, acompañado de un diagrama de flujo correspondiente, así como de la bibliografía consultada en cada uno de los pasos establecidos.

2.6. Criterios de diseño

Los criterios de diseño, se han establecido considerando todos y cada uno de los conceptos descritos anteriormente, teniendo en cuenta lo establecido en Arany et al. [2] y las pautas recogidas en las diferentes normas IEC, así como en las guías DNV y las recomendaciones de la API. La tabla 4 describe los criterios de diseño seleccionados en este caso en concreto.

CATEGORIA	DESCRIPCION	CRITERIO
ELU	La capacidad de carga de la cimentación ha de superar la carga máxima calculada.	$M_{tot} < M_{plasticación}$

	El límite elástico del pilote, ha de ser superior a la tensión máxima que soporta la estructura. ($f_{yd}=f_{yk}/1.1$).	$\sigma_{max} < f_{yd}$
	El momento resistente de la cimentación ha de ser superior al momento total calculado.	$M_{tot} < M_R$
	Se ha de cumplir las condiciones establecidas para pandeo local y pandeo global.	Resistencia a pandeo.
ELS	La deflexión máxima ha de ser inferior a 20 cm.	$Despx < 0.2 \text{ m}$
	La rotación máxima ha de ser inferior a 0.5° .	$Rot < 0.5^\circ$
	La frecuencia natural del conjunto (Aerogenerador-subestructura-cimentación), en base flexible, ha de ser superior al menos en el 10% del modo de vibración 1P, e inferior al mínimo de 3P.	$(1.1) \cdot 1P_{max} < f_0 < 3P_{min}$
ELF	La vida útil de la estructura ha de ser 50 años.	Resistencia a Fatiga

Tabla 4. Criterios de diseño.

2.7. Cargas sobre la estructura

Las cargas recibidas por un aerogenerador offshore pueden ser clasificadas según su naturaleza como:

- Cargas muertas (Masa del conjunto de la estructura).
- Cargas dinámicas (Cargas de las olas, viento, corrientes marinas, 1P, 3P).
- Cargas accidentales (Terremotos, impactos...). – Fuera del alcance de este proyecto.

Se adjunta la figura 4, en la que se muestran las diferentes cargas que pueden actuar sobre la estructura de un aerogenerador offshore, así como el perfil de dichas cargas.

Es necesario calcular, la influencia que tienen todas las cargas en la estructura, para establecer un diseño óptimo de la cimentación, y garantizar la capacidad portante del conjunto.

La tabla 5 muestra un resumen de las cargas obtenidas para el escenario más negativo, especificado en la memoria justificativa (viento extremo E3), tanto del viento, de las olas y de las corrientes, así como el valor de la carga combinada. Los diferentes cálculos realizados vendrán reflejados en la memoria justificativa.

TIPO CARGA	VALOR
Carga media de viento [MNm]	152.62
Carga máxima de viento [MNm]	470.16
Carga mínima de viento [MNm]	87.03
Carga máxima de ola [MNm]	56.52
Carga mínima de ola [MNm]	-56.52
Carga de corriente [MNm]	5.05
Carga máxima combinada [MNm]	531.74
Carga máxima combinada con factor de carga (1.35) [MNm]	717.85
Carga mínima combinada [MNm]	30.52

Tabla 5. Resumen de cargas más desfavorables.

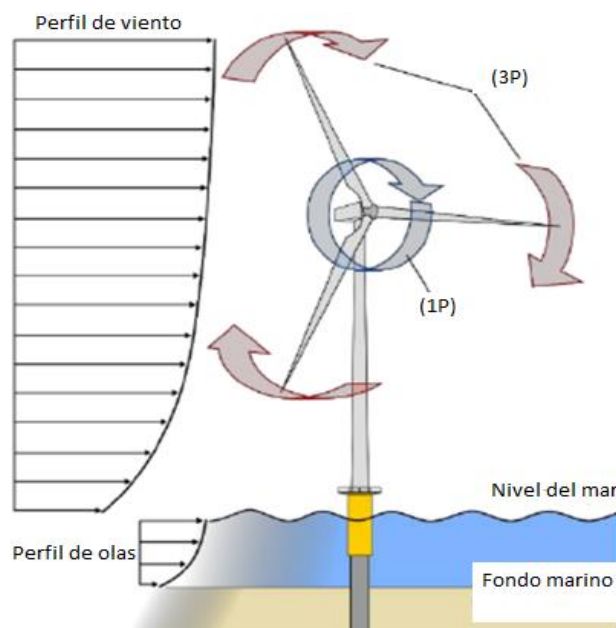


Figura 4. Cargas sobre la estructura (Adaptada de [4]).

2.8. Proceso de fabricación cimentación seleccionada

El proceso de fabricación del monopilote se realiza en varias operaciones hasta obtener la pieza final. Los pasos que componen el proceso serán descritos a continuación:

1) Cilindrado o doblado en frío

En esta operación se confiere la forma de cilindro a las placas de acero, con un espesor estándar determinado y una anchura de 3 metros.

2) Preparación de los bordes laterales (longitudinal)

Una vez se tiene la forma cilíndrica, se mecanizan los bordes de dicha formación para posteriormente realizar la soldadura.

3) Soldadura de los bordes laterales de cada sección (longitudinales)

La soldadura se realiza a tope, mediante aporte de material (MIG/MAG), cubriendo el espacio que se ha dejado después del proceso de mecanizado, de la parte longitudinal de los cilindros.

4) Preparación de los bordes superiores

Una vez se tienen todos los cilindros de 3 metros, que formarán el pilote final, se ha de realizar un mecanizado de la parte superior de cada cilindro para posteriormente realizar la soldadura.

5) Soldadura de los bordes de cada sección con la siguiente

En este punto se realiza la unión de todos los cilindros, uno a uno, mediante soldadura a tope, con aporte de material (MIG/MAG), soldando las caras superior e inferior de los cilindros, hasta obtener el pilote final.

6) Ensayos no destructivos

Una vez se ha obtenido la pieza final, se le realizan diferentes análisis, para comprobar el estado de la pieza, y que se cumplen los estándares marcados. Se realiza una prueba de partículas magnéticas, otra de rayos X en las zonas de soldadura que se consideren problemáticas o defectuosas.

El coste asociado a la fabricación vendrá especificado en el capítulo del presupuesto correspondiente a la cimentación del aerogenerador offshore.

2.9. Instalación de la cimentación

Teniendo en cuenta que nos encontramos en un territorio “aislado”, como es Canarias, no se dispone de industria siderúrgica que disponga de placas de acero y que además pueda llevar a cabo la operación de doblado o cilindrado. Por este motivo, los cuatro primeros procesos descritos anteriormente, han de ser llevados a cabo en astilleros del norte de España, ya que cuentan con grandes industrias siderúrgicas.

Una vez se hayan obtenido, las secciones cilíndricas de 3 metros, se procederá a transportarlos vía marítima, hasta el puerto de Luz y de Las Palmas, dónde se realizarán el resto de operaciones por astilleros locales.

El pilote total, será fletado hasta la ubicación exacta dónde estará situado, mediante un buque especializado en la colocación de este tipo de cimentaciones (Figura 5). Una vez en el sitio, y con un estudio previo realizado de las propiedades exactas del fondo marino, se procede a la operación de alineación y colocación vertical (Figura 6). En el momento que el pilote esté ubicado en el punto exacto, marcado por su ubicación, se procede al proceso de hincado que será realizada mediante un martillo hidráulico (Figura 7). En todo momento se monitoriza la alineación y la medida que profundiza cada vez el pilote en el lecho marino.



Figura 5. Buque especializado (Obtenida de [4]).



Figura 6. Alineación e izado (Obtenida de [5]).

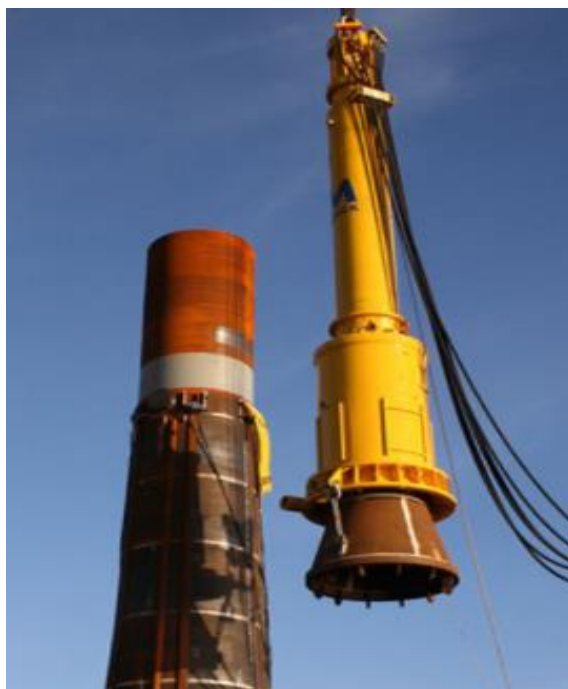


Figura 7. Martillo hidráulico (Obtenida de [6]).

3. SOLUCIÓN ADOPTADA

Se propone un pilote de acero de sección circular, para llevar a cabo la cimentación del aerogenerador offshore en las aguas del sureste de la isla de Gran Canaria. En las tablas 6 y 7, se muestran las características del material del pilote, así como sus dimensiones finales. Todo el proceso de cálculo se encuentra especificado y detallado en la memoria justificativa.

PARÁMETRO	SÍMBOLO	VALOR	UNIDADES
Diámetro del pilote	D_p	7.4	m
Espesor de pared del pilote	t_p	0.08	m
Longitud enterrada del pilote	L_{p1}	30.81	m
Longitud total del pilote	L_{pTOT}	84	m
Masa del pilote	m_p	1226	tons

Tabla 6. Dimensiones del pilote.

PARÁMETRO	SÍMBOLO	VALOR	UNIDADES
Módulo de Young - Acero S355 - Pilote	EP	210000	MPa
Densidad - Acero S355 - Pilote	ρ_p	7850	Kg/m ³
Límite elástico - Acero S355 - Pilote	f_{yk}	355	MPa

Tabla 7. Material del pilote.

4. RESUMEN DEL PRESUPUESTO

CAPÍTULO	RESUMEN	EUROS	%
01	CIMENTACIONES	1.721.780,14	100
TOTAL PRESUPUESTO EJECUCIÓN MATERIAL		1.721.780,14	
	13,00 % Gastos generales.....	223381,42	
	6,00 % Beneficio industrial.....	103306,81	
	SUMA DE G.G y BI	327138,23	
TOTAL PRESUPUESTO EJECUCIÓN POR CONTRATA		2.048.918,37	
	7,00 % IGIC.....	143.424,29	
TOTAL PRESUPUESTO GENERAL		2.192.342,65	

Tabla 8. Resumen del presupuesto.

El presupuesto general asciende a la expresada cantidad de DOS MILLONES CIENTO NOVENTA Y DOS MIL TRESCIENTOS CUARENTA Y DOS EUROS con SESENTA Y CINCO CÉNTIMOS.

5. BIBLIOGRAFÍA

[1] Observatorio Ambiental de Granadilla (2006). OAG. Canarias, España. Recuperado de <http://www.arcgis.com/apps/webappviewer/index.html?id=7aceb7b46dfd43adae2829f09770cdc5>.

[2] Arany L, Bhattacharya S, Macdonald J, Hogan SJ. Design of monopiles for offshore wind turbines in 10 steps. *Soil Dyn Earthq Eng* 2017; 92:126-152.

[3] VJTech (2017). Dynamics soil of offshore wind turbines and long term performance prediction. Recuperado de <http://www.vjtech.co.uk/vj-tech/>.

[4] Researchgate (2016). Recuperado de <http://www.researchgate.net>.

[5] Offshorewind (2016). Recuperado de <http://www.offshorewind.biz>.

[6] Kable (2017). Offshore technology. Recuperado de <http://www.offshore-technology.com>.

MEMORIA JUSTIFICATIVA

**DISEÑO Y DIMENSIONAMIENTO DE LA CIMENTACIÓN DE UN
AEROGENERADOR OFFSHORE EN LAS ISLAS CANARIAS**

ÍNDICE

1.	INTRODUCCION	4
1.1.	TIPOS DE CIMENTACIÓN	4
1.1.1.	<i>Cimentación por gravedad.....</i>	4
1.1.2.	<i>Cimentación mediante monopilote.....</i>	5
1.1.3.	<i>Cimentación tipo trípode.....</i>	6
1.1.4.	<i>Cimentación jacket.....</i>	7
1.1.5.	<i>Cimentación flotante.....</i>	8
1.2.	PROCEDIMIENTO DE DISEÑO.....	9
2.	METODO DE CÁLCULO.....	10
2.1.	OPTIMIZACIÓN INICIAL DE LAS DIMENSIONES DEL PILOTE (LONGITUD, DIÁMETRO, Y ESPESOR).....	11
2.1.1.	<i>Diámetro del pilote (D_p).....</i>	11
2.1.2.	<i>Espesor de la pared del pilote (t_p).....</i>	12
2.1.3.	<i>Longitud enterrada del pilote (L_p).....</i>	12
2.1.4.	<i>Longitud total del pilote (L_{pTOT}).....</i>	13
2.1.5.	<i>Altura de la plataforma por encima de la línea de barro (L_s).....</i>	14
2.1.6.	<i>Diámetro de la subestructura.....</i>	15
2.2.	CARGAS SOPORTADAS POR LA CIMENTACIÓN (MOMENTO DE VUELCO, CARGA VERTICAL Y CARGA CORTANTE)	15
2.2.1.	<i>Casos de cargas para diseño de cimentaciones.....</i>	16
2.2.2.	<i>Carga de viento.....</i>	20
2.2.3.	<i>Escenario de viento (U-1): Turbulencia normal (NTM) a la velocidad nominal del viento (U_R)</i>	22
2.2.4.	<i>Escenario de viento (U-2): Turbulencia extrema (ETM) a la velocidad nominal del viento (U_R)</i>	23
2.2.5.	<i>Escenario de viento (U-3): Ráfaga extrema de operación (EOG) a la velocidad nominal del viento (U_R).....</i>	24
2.2.6.	<i>Escenario de viento (U-4): Ráfaga extrema de operación (EOG) a la velocidad del viento de corte-desconexión (U_{out}).....</i>	25
2.2.7.	<i>Cargas debidas a las olas.....</i>	26
2.2.8.	<i>Cargas debidas a las corrientes.....</i>	28
2.2.9.	<i>Cargas combinadas.....</i>	30
2.2.10.	<i>Carga vertical (Peso muerto).....</i>	30
2.3.	CAPACIDAD ÚLTIMA DEL PILOTE	31
2.3.1.	<i>Pilote en suelos sin cohesión.....</i>	32
2.4.	RIGIDEZ DE LA CIMENTACIÓN.....	33

2.5.	DEFORMACIONES.....	36
2.6.	FRECUENCIA NATURAL	37
2.7.	FACTORES DE AMPLIFICACIÓN DINÁMICOS.....	41
2.8.	CAMBIO DE LA FRECUENCIA NATURAL A LARGO PLAZO	42
2.9.	VIDA A FATIGA	43
2.10.	COMPROBACIÓN A PANDEO.....	44
2.10.1.	<i>Pandeo Global</i>	44
2.10.2.	<i>Pandeo Local</i>	46
2.11.	CRITERIOS DE DISEÑO	48
2.12.	DESCRIPCIÓN DEL PROGRAMA DE CÁLCULO	49
2.12.1.	<i>Diagrama de flujo</i>	50
3.	RESULTADOS	51
3.1.	DATOS DE PARTIDA	51
3.1.1.	<i>Ubicación</i>	51
3.1.2.	<i>Aerogenerador</i>	52
3.1.3.	<i>Datos meteorológicos y oceánicos</i>	53
3.1.4.	<i>Datos geotécnicos</i>	54
3.1.5.	<i>Datos del material del pilote y pieza de transición</i>	55
3.2.	DIMENSIONADO	56
3.2.1.	<i>Cargas en la cimentación</i>	56
3.3.	CAPACIDAD DE CARGA ÚLTIMA DE LA CIMENTACIÓN.....	61
3.4.	RIGIDEZ Y DEFORMACIONES EN LA CIMENTACIÓN.....	61
3.4.1.	<i>Rigidez</i>	62
3.4.2.	<i>Deformaciones</i>	63
3.5.	FRECUENCIA NATURAL Y FACTORES DE AMPLIFICACIÓN DINÁMICOS	64
3.5.1.	<i>Frecuencia natural</i>	64
3.5.2.	<i>Factores dinámicos de amplificación</i>	65
3.6.	CARGAS DE LAS OLAS CON LOS FACTORES DE AMPLIFICACIÓN DINÁMICA.....	66
3.7.	RESUMEN DE LAS CARGAS OBTENIDAS EN LOS DOS PEORES ESCENARIOS DE CARGA	66
3.8.	VIDA A FATIGA	67
3.9.	COMPROBACIÓN A PANDEO	68
3.9.1.	<i>Pandeo global</i>	68
3.9.2.	<i>Pandeo local</i>	68
3.10.	CUMPLIMIENTO DE LOS CRITERIOS DE DISEÑO	68

3.11.	RESUMEN DE DIMENSIONES FINALES	69
3.11.1.	<i>Pilote</i>	69
3.11.2.	<i>Subestructura</i>	70
3.11.3.	<i>Pieza de transición</i>	70
4.	CONCLUSIONES	70
5.	BIBLIOGRAFIA	71

1. INTRODUCCION

La selección del tipo de cimentación para un aerogenerador offshore, así como, su diseño son procesos difíciles, ya que no solo dependen de las características del suelo, sino que además representan un desafío en cuanto a la novedad de los conceptos de diseño, y al escaso desarrollo de las tecnologías asociadas. Los aerogeneradores offshore tienen una vida útil de aproximadamente 20-30 años, mientras que las cimentaciones son diseñadas para una mayor vida útil, aproximadamente 50 años. Existen diferentes tipos de cimentación, de entre los que destacan, cimentación por gravedad, tipo jacket, de trípode, por monopilote, o flotantes.

1.1. Tipos de cimentación

Una de las características que influyen en la elección del tipo de cimentación de un aerogenerador offshore es la profundidad del lecho marino, sin dejar de lado las cargas producidas por el viento, las olas o las corrientes marinas. Atendiendo a la profundidad podemos encontrar una serie de cimentaciones adecuadas para cada caso, nombrando y describiendo las más comúnmente utilizadas.

1.1.1. Cimentación por gravedad

La cimentación por gravedad garantiza la estabilidad del aerogenerador mediante su propio peso. Para su construcción suelen utilizarse piezas de hormigón reforzado fabricadas previamente en los astilleros de los muelles.

La profundidad, como en el resto de tipos de cimentación, es un parámetro determinante a la hora de la fabricación de este tipo de cimentación, ya que, la cantidad de hormigón que se utiliza es directamente proporcional a la profundidad a la que se coloca. Se suele emplear la combinación de cimentaciones de gravedad con un tubo de acero.

El hecho de tener una base ancha, como se indica en la figura 1, la convierte en idónea para soportar grandes cargas laterales, sin embargo, está sujeta a una serie de condicionantes, como pueden ser, la capacidad portante del suelo para aguantar el peso de esta cimentación y su utilización en configuraciones de poca profundidad, ya que, a mayores profundidades es necesaria mayor cantidad de material, lo que supone en la mayoría de los casos, un sobrecoste. Se suele utilizar en configuraciones poco profundas de hasta 25 metros.

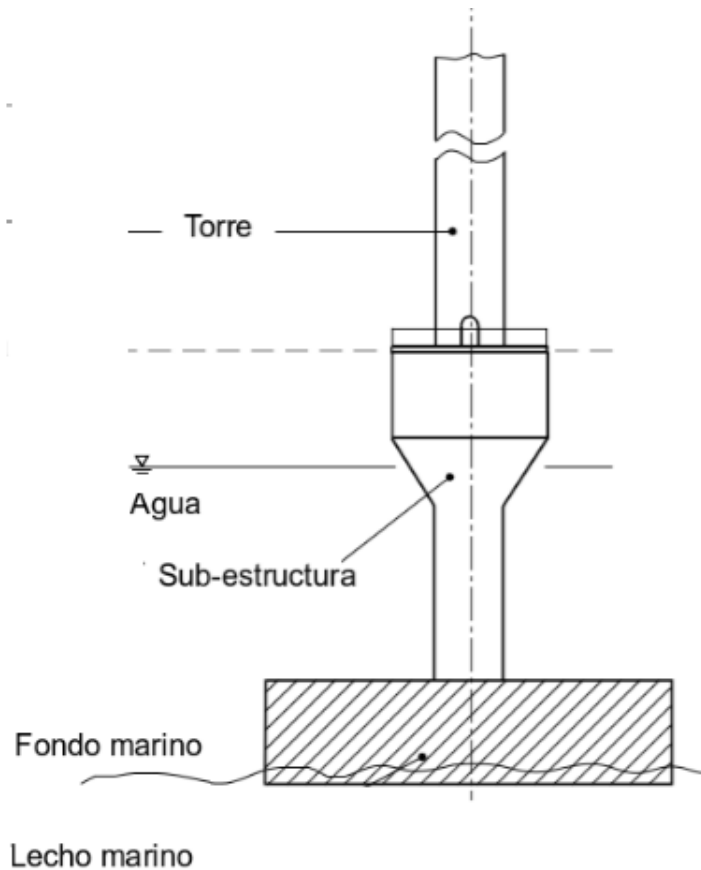


Figura 1. Cimentación por gravedad (Adaptada de [11]).

1.1.2. Cimentación mediante monopilote

La cimentación mediante monopilote consiste en el hincado de un pilote de sección cilíndrica hueca en el lecho marino. A este pilote se le acopla una pieza de transición sobre la que estará instalada el aerogenerador garantizando la estabilidad del conjunto, llegando a soportar grandes cargas en relación a su dimensión.

Otra de sus características es la capacidad de penetración en suelos arenosos y de sedimentos finos. En la figura 2, se muestra un esquema de una cimentación mediante pilote, al igual que en el caso anterior, se construye en los astilleros, para su posterior transporte y colocación.

Se suele utilizar para configuraciones, en las que la profundidad de la lámina de agua se encuentra entre 20 y 60 metros. La profundidad es un hándicap, ya que a mayor profundidad mayor ha de ser el tamaño del pilote, con lo que aumenta su coste de fabricación.

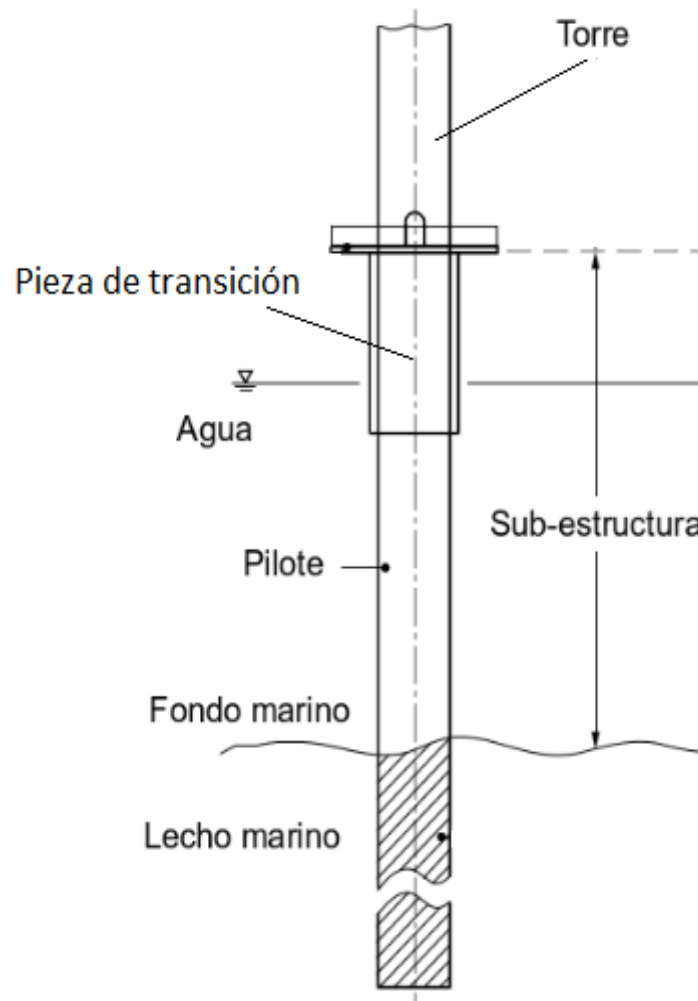


Figura 2. Cimentación mediante monopilote (Adaptada de [11]).

1.1.3. Cimentación tipo trípode

La cimentación por trípode destaca por tener una geometría formada por una columna central y tres patas, estando todos los elementos conectados entre sí. Al tener más puntos de apoyos que el monopilote, favorece a un mejor reparto de cargas y mejorar la estabilidad, soportando mayores cargas.

Se utiliza para profundidades de la lámina de agua, de hasta 60 metros, siendo algo más polivalentes que los monopilotes en este sentido. Al igual que en los dos casos anteriores, se construye en los astilleros, para su posterior transporte y colocación. Su coste suele ser elevado, debido a su geometría compleja.

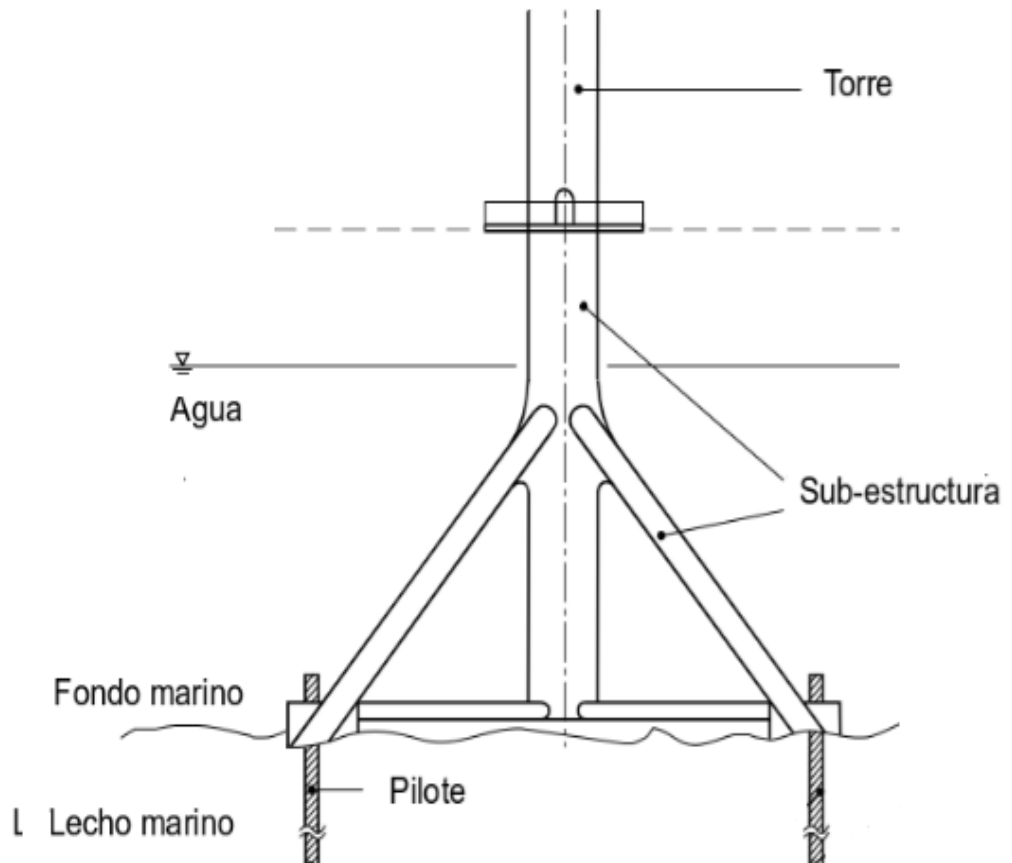


Figura 3. Cimentación mediante trípode (Adaptada de [11]).

1.1.4. Cimentación jacket

Este tipo de cimentación es parecida a la tipo trípode, pero con la salvedad de que, la geometría de su estructura tiene forma de celosía. Posee además, una baja masa estructural y una gran rigidez, pero en su contra tiene la complejidad de construcción, así como, la gran cantidad de material necesaria para su fabricación.

Se suele utilizar para profundidades de hasta 50 metros. Al igual que las anteriores configuraciones, se construye en los astilleros, para su posterior transporte y colocación. Su coste suele ser elevado, debido a su geometría compleja, y a la gran cantidad de material que conforma la estructura. Sin embargo, es muy utilizado en ubicaciones, donde se soportan fuerzas con direcciones cambiantes continuamente.

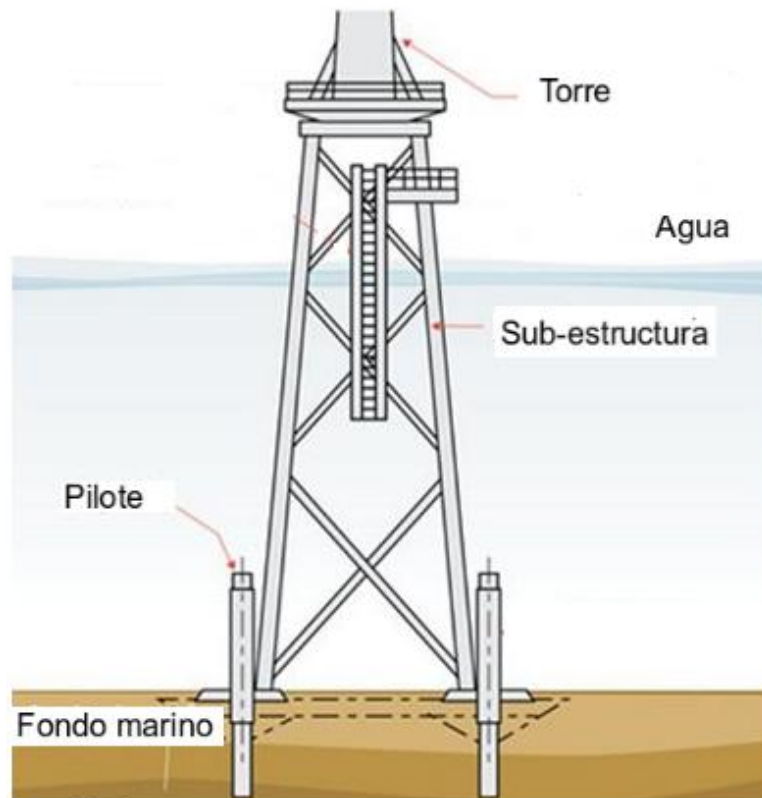


Figura 4. Cimentación Jacket (Adaptado de [23]).

1.1.5. Cimentación flotante

Para esta configuración se utilizan plataformas flotantes, que son fijadas al fondo mediante cables. En la actualidad, está muy poco desarrolladas, pero se espera que en el futuro se conviertan en las más utilizadas. La mayor ventaja reside en la posibilidad de anclar los cables al fondo marino, aun teniendo que salvar grandes distancias, optimizando además la utilización de material.



Figura 5. Cimentación Flotante (Obtenida de [23]).

1.2. Procedimiento de diseño

El procedimiento de diseño y dimensionamiento se dividirá en varias partes, enfocado hacia la configuración de monopilote seleccionada en base a los criterios mencionados en la memoria descriptiva.

El monopilote se define mediante una geometría simple, como es el diámetro del pilote, el espesor de la pared, la longitud del pilote y la longitud enterrada o embebida en el fondo marino. Se han seguido los pasos recomendados por Arany et al. [1]. Toda la información ha sido contrastada y complementada con lo recogido en las normas de International Electrotechnical Commission (IEC) y manuales de la sociedad Det Norske Veritas (DNV) y, lo aconsejado por el American Petroleum Institute (API).

El objetivo principal de la cimentación es transferir todas las cargas del aerogenerador al terreno de manera segura, dentro de los límites admitidos. Para ello han de tenerse en cuenta los estados límites de diseño y se deben garantizar las diferentes condiciones de diseño, descritas a continuación. En la figura 6, se resumen los casos considerados:

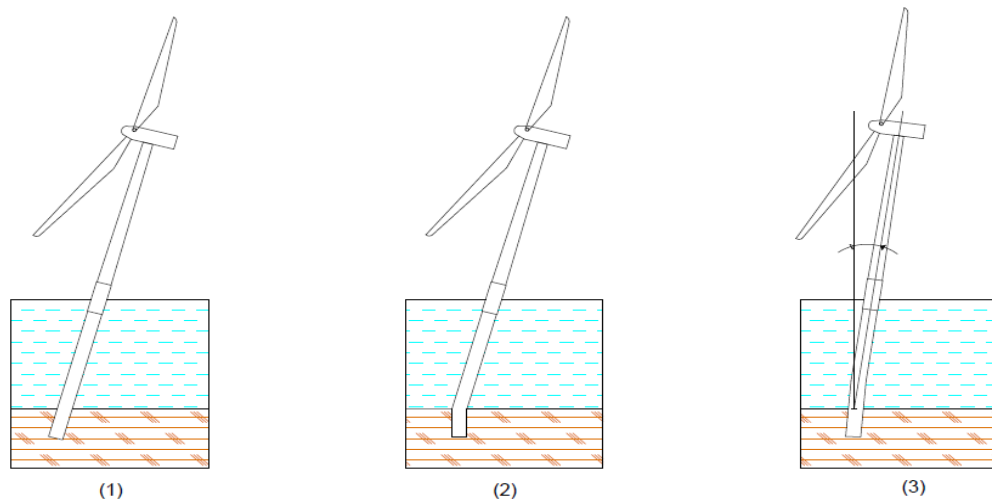


Figura 6: Condiciones de diseño (Adaptada de Arany et al. [1]).

- (1) ELU (Estado límite último) – Capacidad de la cimentación.
 - (2) ELU (Estado límite último) – Plasticidad de la sección.
 - (3) ELS (Estado límite de servicio)
- Estado Límite Último (ELU): En primer lugar, se han de estimar las máximas cargas que recibe la cimentación (Momento de vuelco, carga lateral y carga vertical) y compararlo con la resistencia de la cimentación escogida.

- Frecuencia Propia y Estado Límite de Servicio (ELS): Es necesario estudiar y predecir la frecuencia propia a lo largo de la vida útil de todo el sistema. Otro aspecto a tener en cuenta es la rigidez del monopilote, para poder garantizar valores aceptables de deformación y rotación.
- Estado Límite de Fatiga (ELF): Se ha de predecir la vida a fatiga del monopilote así como los efectos de una carga cíclica de larga duración en la cimentación.
- Robustez y Facilidad de Instalación: Se ha de asegurar que la cimentación pueda ser instalada y que va a aguantar de forma segura las cargas, generadas durante la instalación.

El procedimiento para el cálculo de la cimentación ha sido el siguiente:

- 1) Establecer el diseño base (Criterios de diseño: ELU, ELF, ELS) y recopilar los diferentes datos de partida (aerogenerador, mareomotrices, viento y datos geotécnicos), específicos del lugar de colocación.
- 2) Suponer unas dimensiones iniciales del pilote (diámetro), teniendo en cuenta las cargas de viento estimadas y los criterios estructurales del pilote.
- 3) Estimar un espesor de pared mínimo del pilote, así como una longitud enterrada.
- 4) Usar las dimensiones iniciales del pilote para calcular las cargas debidas a las olas y si fuera necesario, actualizar las dimensiones del pilote.
- 5) Estimar la capacidad de carga geotécnica, tanto vertical como lateral, de la cimentación.
- 6) Hallar los parámetros de rigidez (lateral, balanceo y rigidez del acoplamiento) y estimar los desplazamientos y giros de la cabeza enterrada del pilote.
- 7) Calcular la frecuencia natural de todo el sistema. Aplicar coeficientes dinámicos, para aumentar las cargas dinámicas. Se actualizarán las dimensiones del pilote si fuese necesario.
- 8) Comprobar que la frecuencia natural cambia durante la vida útil de la estructura.
- 9) Estimar la vida a fatiga de la cimentación.
- 10) Comprobar la estabilidad local y global del pilote.

2. METODO DE CÁLCULO

En este apartado se describe la metodología seguida para llevar a cabo el diseño del pilote descrito en los pasos de la sección anterior, sostenidos en todo momento por las normativas

correspondientes.

2.1. Optimización inicial de las dimensiones del pilote (longitud, diámetro, y espesor)

Los principales factores de diseño se basan en las consideraciones de los Estados Límite Últimos (ELU) y en los Estados Límite de Servicio (ELS). La geometría del pilote se define mediante tres variables: El diámetro del pilote D_P , el espesor de la pared del pilote t_P y la longitud enterrada del pilote L_P .

En primer lugar se elige el diámetro del pilote, en función de las mayores cargas de viento, siendo un parámetro independiente. A continuación se calcula el espesor de la pared del pilote en función del diámetro del pilote. Por último, la longitud enterrada del pilote puede ser elegida basándose en la longitud crítica, que será calculada teniendo en cuenta el diámetro del pilote y la rigidez relativa del suelo.

2.1.1. Diámetro del pilote (D_P)

Como se ha definido anteriormente el diámetro del pilote es un parámetro independiente, fundado en las cargas de viento máximas que recibe la estructura ($M_{wind,EOG}$). En todo momento se tiene que garantizar que el pilote resista las cargas que recibe de la estructura, cumpliendo que la sección no plastifique ante dichas cargas recibidas.

$$\sigma_m = \frac{M_{wind,EOG}}{I_P} \cdot \frac{D_P}{2} < \frac{f_{yk}}{\gamma_M} \quad (1)$$

Siendo:

σ_m = Tensión máxima de la sección.

I_P = Momento de inercia del pilote.

D_P = Diámetro del pilote.

f_{yk} = Límite elástico del material.

γ_M = Coeficiente del material (1.1).

Una vez se van calculando el resto de cargas que actúan sobre la estructura, las dimensiones del pilote aumentarán. Por ello, para facilitar todo el proceso, el cálculo se realiza con un programa de cálculo iterativo implementado en Matlab.

2.1.2. *Espesor de la pared del pilote (t_p)*

El valor inicial del espesor de la pared del pilote, viene dado a través de la siguiente relación, recogida en la ecuación (9.1) de la API-2A-WSD [2]. En el apartado 9.10.6 del mismo documento, se indica que la relación D/t de toda la longitud del pilote debe ser lo suficientemente baja, como para impedir el pandeo local. El pilote, centro del proyecto, va a ser instalado mediante hincado, con lo que el espesor mínimo de la pared del pilote no será inferior al valor calculado mediante la ecuación (2) de este documento. Este valor será el mínimo que pueda tener el pilote para un valor de diámetro concreto, pudiendo ser aumentado, en el caso de que no cumpla alguna de las comprobaciones, incluso pudiendo variar el espesor por secciones.

$$t_p \geq 6.35 + \frac{D_p}{100} [mm] \quad (2)$$

Puede ser que la estimación del valor del espesor mínimo del pilote mediante la ecuación (2), no proporcione una estabilidad suficiente para evitar el pandeo local o global. Por otro lado, es necesario estudiar también la vida a fatiga, siendo posible un aumento del espesor del pilote si no se obtienen los resultados deseados.

Sin embargo, según lo indicado por Randolph M y Gourvenec [3], la guía GL Wind 2005 [4], y la API-2A-WSD [2], después de tener en cuenta todos los factores mencionados anteriormente, podría ser necesario aumentar este espesor después del estudio de hincado del pilote si, tras la elección del martillo a utilizar y el cálculo de la energía de hincado, se determina que el espesor calculado no es suficientemente elevado, como para soportar la combinación de carga estática y dinámica generada durante el hincado, o la fatiga acumulada durante el proceso. Debido a la complejidad, y la falta de la información de partida necesaria, este estudio de hincado queda fuera del alcance de este trabajo fin de máster.

Por razones prácticas, el espesor de la pared se selecciona siguiendo los valores estándar de la placa de acero.

2.1.3. *Longitud enterrada del pilote (L_p)*

La longitud enterrada del pilote puede ser determinada en función del diámetro del pilote y la relación de rigidez relativa entre el suelo y el pilote. Para ello se ha usado el criterio de la longitud crítica del pilote, y ha de considerarse teniendo en cuenta a la profundidad, en que se transmiten las cargas laterales a la base del mismo.

La longitud enterrada del pilote puede hallarse mediante la expresión enunciada por Poulos and Davis [5], utilizando el módulo de rigidez lineal del suelo (n_h) y el diámetro del pilote. Sin embargo, la longitud que se obtenga mediante esta relación, únicamente será el punto de partida, ya que, otros factores determinarán la longitud final del pilote, como se verá posteriormente.

Para suelos arenosos, la longitud para pilote flexible puede ser calculada como:

$$L_p > 4 \cdot \left(\frac{E_p \cdot I_p}{n_h} \right)^{\frac{1}{5}} \quad (3)$$

Y para pilotes rígidos como:

$$L_p < 2 \cdot \left(\frac{E_p \cdot I_p}{n_h} \right)^{\frac{1}{5}} \quad (4)$$

Siendo:

I_p = Momento de inercia de la sección del pilote.

$$I_p = \frac{1}{8} \cdot (D_p - t_p)^3 \cdot t_p \cdot \pi \quad (5)$$

E_p = Módulo de Young del pilote.

Esta longitud del pilote será utilizada para realizar todos los cálculos, y si una vez llegado al cálculo del momento resistente del suelo, se obtiene un valor muy elevado, se tiene la opción de reducir la longitud del pilote, siempre y cuando se garantice un valor de momento de resistente de la cimentación que sea capaz de soportar las acciones que recibe de la estructura.

2.1.4. Longitud total del pilote (L_{pTOT})

La longitud total del pilote, se compondrá por la suma de la longitud enterrada del pilote (L_p) y la distancia entre la línea de barro y la superficie (S).

Como se ha descrito en la memoria descriptiva, las secciones del pilote son de 3 metros de ancho. Por este motivo, se toma como condicionante, que el valor de la longitud total del pilote ha de ser múltiplo de 3, para simplificar la logística y fabricación de la pieza.

Por este motivo la longitud enterrada del pilote, podrá ser aumentada, hasta que la longitud del pilote total sea divisible en partes enteras de 3 metros, y así evitar un sobrecoste añadido de tener que fabricar piezas con medidas especiales.

2.1.5. *Altura de la plataforma por encima de la línea de barro (L_s)*

Se define la altura de la plataforma, como la distancia entre la parte superior de la pieza de transición (coincidente con la parte inferior de la torre del aerogenerador) y la línea que marca el fondo marino (línea de barro). Esta altura se calcula como [6]:

$$L_s = HWL + \eta_{50} + g_A = S + H_{m,50} + 0.2 \cdot H_{S,50} \quad (6)$$

Siendo:

HWL = Mayor nivel del agua con un periodo de retorno de 50 años.

$\eta_s = H_m$ = La mayor altura de cresta de ola esperada en un periodo de 50 años.

g_A (Entrehierro) = $0.2 \cdot H_{S,50}$

$H_{S,50}$ = Altura significativa de las olas en un periodo de 50 años.

El parámetro “S” es equivalente a la suma de la profundidad de la lámina del agua, añadiéndole además, la mayor subida del nivel de la marea, debido al efecto gravitatorio.

Es importante definir la altura de la plataforma, para poder conocer la frecuencia natural de la estructura global. Además, el peso de dicha plataforma también influye en el peso total de la estructura y en la carga vertical total V sobre la cimentación. A continuación, en la figura 7, se muestran los componentes de un aerogenerador offshore, con cimentación mediante monopilote.

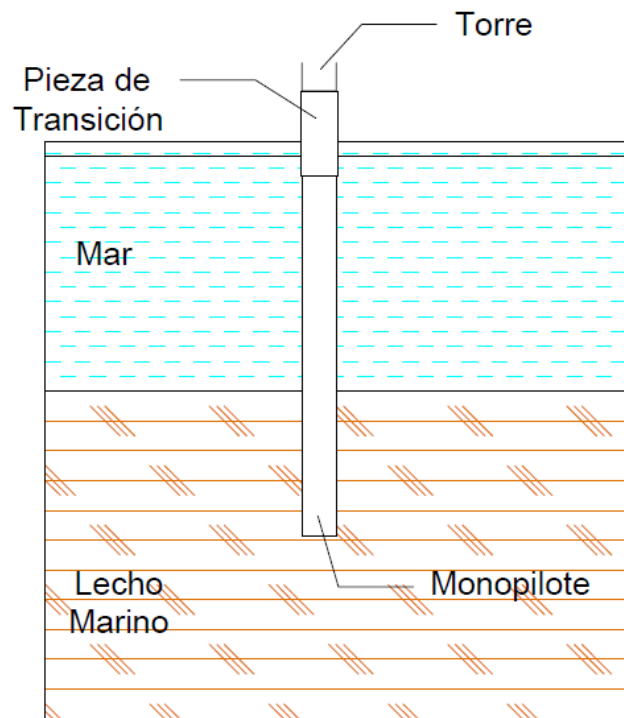


Figura 7: Esquema de plataforma offshore.

2.1.6. Diámetro de la subestructura

Como se ha descrito anteriormente, la torre del aerogenerador se conecta al pilote a través de una pieza de transición. Ha de tenerse en cuenta una separación de t_G entre el pilote y la pieza de transición para la lechada, además la pieza de transición tendrá de espesor de pared t_{TP} . Al calcular las cargas debidas a las olas en la subestructura, es importante utilizar el diámetro total de la subestructura D_S , que será equivalente al diámetro de pieza de transición D_{TP} , ya que es mayor que el diámetro del pilote. D_S se expresa como:

$$D_S = D_{TP} = D_P + 2 \cdot t_G + 2 \cdot t_{TP} \quad (7)$$

El diámetro y espesor de pared de la pieza de transición también influirán en el peso muerto de la estructura y, por tanto, también tendrán efecto en la frecuencia natural.

2.2. Cargas soportadas por la cimentación (Momento de vuelco, carga vertical y carga cortante)

La cimentación absorbe las cargas recibidas tanto en el aerogenerador como en la subestructura y se dividen en dos tipos. Por un lado tenemos las cargas estáticas o pesos propios debidos a la propia estructura y por otro lado están las cargas dinámicas producidas por el viento, las olas, las corrientes, entre otras. En el ámbito de la dinámica los puntos más

relevantes son la carga lateral cíclica debido a la turbulencia del viento, las cargas producidas por las olas, las cargas producidas por las corrientes, los desequilibrios de masas y la turbulencia producida por las palas, siendo descritos a continuación:

- Se produce una carga lateral cíclica (dinámica) a la altura de la góndola, debido al giro de las palas. Esta carga depende de la intensidad en la turbulencia de la velocidad del viento.
- Por otro lado, se produce una carga lateral cercana a la base de la subestructura, debido al choque de las olas contra la misma. Esta carga va a depender del tamaño de la ola, el periodo y la profundidad del agua.
- También ha de tenerse en cuenta el desequilibrio de masa del rotor y la góndola y los desequilibrios aerodinámicos de las palas que producen una vibración a la altura de la góndola y se traducen en una carga lateral y un momento de vuelco recibidos por la cimentación. La frecuencia de esta carga tiene una frecuencia igual a la frecuencia de rotación del rotor (1P). La frecuencia 1P, variará en función de las revoluciones por minuto más alta y más bajas, ya que el aerogenerador elegido tiene una velocidad variable de funcionamiento.
- Los efectos de la vibración del paso de pala (3P), conocido como efecto de sombra, se genera cada vez que pasa la pala por delante de la torre y produce un apantallamiento del viento incidente, provocando a su vez una carga pulsante. La frecuencia de esta carga se obtiene multiplicando la frecuencia (1P) por el número de palas del aerogenerador, en este caso en concreto por 3, ya que el aerogenerador posee tres palas.
- Por último se han tenido en cuenta, el efecto de las corrientes en el pilote, ya que dependiendo de la época del año las tormentas pueden alterar el valor de dichas corrientes y afectar de forma negativa a la estructura.

2.2.1. Casos de cargas para diseño de cimentaciones

Para asegurar que la vida útil de la cimentación esté cercana a los 50 años, es importante asegurar que se cumplen una serie de requerimientos estructurales. Teniendo en cuenta que los principales requerimientos de diseño de la cimentación son el ELU, ELS y el ELF, descritos en la introducción, en la tabla 1 se muestran cinco casos importantes para el diseño de la cimentación.

Descripción	Escenarios de viento	Escenarios de olas	Alineación
<p>E-1 Condiciones normales de funcionamiento</p> <p><i>Viento y olas actúan en la misma dirección</i></p>	NTM en U_R (U-1)	1-año ESS (W-1)	Alineado
<p>E-2 Cargas de onda extrema</p> <p><i>Viento y olas actúan en la misma dirección</i></p>	ETM en U_R (U-2)	50-años EWH (W-4)	Alineado
<p>E-3 Cargas de viento extremo</p> <p><i>Viento y olas actúan en la misma dirección</i></p>	EOG en U_R (U-3)	1-año EWH (W-2)	Alineado
<p>E-4 Velocidad del viento de corte y escenario de operación de ráfaga extrema</p> <p><i>Viento y olas actúan en la misma dirección</i></p>	EOG en U_{OUT} (U-4)	50-años EWH (W-4)	Alineado
<p>E-5 Olas y viento desalineados</p> <p><i>Viento y ondas desalineados 90°</i></p>	ETM en U_R (U-2)	50-años EWH (W-4)	Desalineado en $\varnothing = 90^\circ$

Tabla 1. Escenarios de cargas.

Los diferentes escenarios para el diseño de la cimentación se componen de una combinación de cuatro casos de viento y cuatro casos del mar, además a todos ellos se les añaden el valor de las cargas debidas a las corrientes.

Las condiciones en las que puede actuar el viento son las siguientes:

1. Turbulencia normal: la velocidad media del viento se corresponde a la velocidad nominal del viento (U_R), donde se espera la mayor fuerza de empuje, y la turbulencia del viento sigue el modelo de la turbulencia normal (NTM), como se indica en la IEC-61400-1 [7].

2. Turbulencia extrema: la velocidad media del viento es la velocidad nominal del viento (U_R), y la turbulencia del viento es muy alta. Se utiliza el modelo de turbulencia extrema (ETM), definido en la IEC-61400-1 [7].
3. Ráfaga extrema en el caso de velocidad nominal del viento: la velocidad media del viento es la velocidad nominal del viento (U_R), y por otro lado, la ráfaga extrema de operación (EOG) en un periodo de 50 años, es calculada donde la U_R llega al rotor. Cuando se habla de EOG, este se refiere a un cambio brusco en la velocidad del viento, tan rápido que el sistema de control de cambio de ángulo de las palas del aerogenerador no es capaz de disipar la carga en un periodo de tiempo tan corto. La velocidad EOG se define en la IEC-61400-1 [7].
4. Ráfaga extrema en el caso de corte: en este caso la velocidad media del viento es ligeramente inferior a la velocidad del viento de corte (U_{out}), que es cuando la turbina eólica deja de funcionar, y la mayor EOG, ráfaga extrema del periodo de 50 años que se da en el rotor. Al tratarse de un cambio repentino de la velocidad del viento la turbina no se puede detener. Todos los pasos se encuentran en la IEC-61400-1 [7].

Las condiciones en las que pueden actuar las olas son las siguientes:

1. Estado extremo del mar en el periodo de 1 año (ESS1): una ola de altura equivalente a la altura significativa de la ola registrada en un año ($H_{s, 1}$) actuando sobre la subestructura.
2. Altura extrema de la ola en el periodo de 1 año (EWH1): una ola de altura equivalente a la altura de la mayor onda registrada en un año ($H_{m, 1}$) actuando sobre la subestructura.
3. Estado extremo del mar en el periodo de 50 años (ESS50): una ola de altura equivalente a la altura significativa de la ola registrada en 50 años ($H_{s, 50}$), actuando sobre la subestructura.
4. Altura extrema de la ola en el periodo de 50 años (EWH50): una ola de altura equivalente a la altura de la mayor ola registrada en 50 años ($H_{m, 50}$), actuando sobre la subestructura.

Por su parte el ESS y EWH en el periodo de 1 año son estimaciones conservadoras de la altura de la ola normal (NWH), definidos en la IEC-61400-3 [11]. La diferencia existente entre la altura de la ola significativa del estado del mar extremo (ESS) y la altura mayor de la ola (EWH), es que la ola significativa es la media del tercio más alto de todas las olas en el transcurso del estado del mar en 3 horas, sin embargo la altura mayor de la ola, hace referencia a la ola más alta en el mismo estado de mar en esas 3 horas.

Por otro lado hemos de contar con la información de las condiciones de viento y olas en un periodo de 50 años. Gracias a los instrumentos meteorológicos, se sabe que las olas extremas y las velocidades del viento más altas se dan al mismo tiempo, sin embargo, la mayor carga debida al viento no se da cuando se producen las velocidades de viento más altas. Esto se debe en parte, a que el control de cambio ángulo (control de paso de la pala) reduce la carga bajo la velocidad nominal del viento, pero además, porque las turbinas eólicas se desconectan con altas velocidades de viento por razones de seguridad. En estos casos, mediante el coeficiente de empuje reducido, se consigue que la fuerza de empuje sea baja, en comparación con la que se produciría a la velocidad nominal del viento.

La carga más alta debida al viento se espera en el escenario (U-3) y la carga más alta debida a las olas la encontramos en el escenario (W-4). En la práctica, la carga extrema de viento en 50 años y la carga de ola extrema en 50 años tienen una probabilidad insignificante de ocurrir al mismo tiempo, y el código DNV-OS-J101 [6] tampoco exige que estos casos de carga extrema sean evaluados juntos. Antes de realizarse los cálculos, ha de evaluarse el caso más extremo, en un periodo de retorno de 50 años, teniendo en cuenta la probabilidad conjunta de carga de viento y de ola.

Por consiguiente, se adoptan dos combinaciones para el análisis del ELU:

- 1) La carga de viento del modelo de turbulencia extrema (ETM) a la velocidad nominal del viento, combinada con la altura extrema de ola en el periodo de 50 años (EWH). Es decir, la combinación del escenario de viento (U-2) y el escenario de onda (W-4). Será designado como E-2.
- 2) La carga de la ráfaga extrema de viento en 50 años (EOG) combinada con la altura máxima de onda de 1 año. Es decir, la combinación del escenario de viento (U-3) y el escenario de onda (W-2). Será designado como E-4.

Los escenarios propuestos, son algo más conservadores que los recogidos en las normas, lo que implica trabajar del lado de la seguridad cuando seguimos este método de cálculo.

Para el cálculo de las diferentes cargas y combinaciones, es necesario conocer antes diferentes datos de la ubicación del aerogenerador (viento, olas, corrientes, datos geológicos y geotécnicos, batimetría, entre otros), así como datos propios del aerogenerador (Número de palas, dimensiones, velocidad de desconexión), entre otros.

2.2.2. Carga de viento

Las cargas dinámicas debidas al viento se calculan siguiendo los procedimientos recogidos en los apartados, 6.3 de la norma IEC-61400-1 [7], 4.5.2 del manual DNV-OS-J101 [6], y las pautas establecidas por Frohboese y Schmuck [8] en relación a los coeficientes de empuje.

La fuerza de empuje en el rotor de un aerogenerador (T_h) debida al viento se puede calcular mediante la siguiente expresión:

$$T_h = \frac{1}{2} \cdot \rho_a \cdot A_R \cdot C_T \cdot U^2 \quad (8)$$

Siendo:

ρ_a = Densidad del aire.

A_R = Área barrida por el rotor.

C_T = Coeficiente de empuje.

U = Velocidad del viento.

La velocidad del viento puede variar entre la velocidad de conexión y la velocidad de desconexión. El coeficiente de empuje puede aproximarse según el rango operativo del aerogenerador usando tres intervalos diferentes (como se muestra en la figura 8):

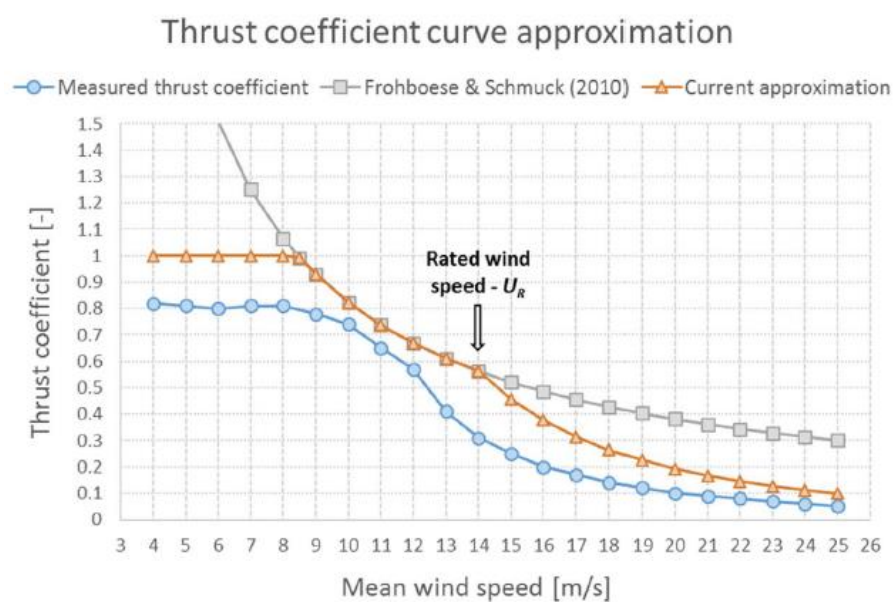


Figura 8: Coeficiente de empuje. (Obtenida de Arany et al. [1]).

- 1) En el intervalo, entre la velocidad de viento de conexión (U_{in}) y la velocidad nominal del viento (U_R), se utiliza la fórmula de Frohboese and Schmuck [8]:

$$C_T = \frac{3.5 \left[\frac{m}{s} \right] \cdot \left(2 \cdot U_R + 3.5 \left[\frac{m}{s} \right] \right)}{U_R^2} = \frac{7 \left[\frac{m}{s} \right]}{U_R} \quad (9)$$

- 2) Una vez superada la velocidad nominal de viento, cuando el control de ángulo de las palas entra en funcionamiento, se asume que la potencia va a ser constante, con lo que el coeficiente de empuje viene dado por la siguiente expresión:

$$C_T = 3.5 \left[\frac{m}{s} \right] \cdot U_R \cdot \left(2 \cdot U_R + 3.5 \left[\frac{m}{s} \right] \right) \cdot \frac{1}{U_R^3} = 7 \left[\frac{m}{s} \right] \cdot \frac{U_R^3}{U^3} \quad (10)$$

- 3) Se hace la suposición de que el coeficiente de empuje no sobrepase de 1, por lo que en el régimen de baja velocidad del viento el valor se limita a 1.

Por otro lado, si la velocidad del viento varía lentamente, la fuerza de empuje sigue la curva media de empuje, cuando el control del ángulo de las palas cambia con la velocidad del viento. Pero si se produce una ráfaga repentina que choca contra el rotor, el control de ángulo puede no reaccionar ante un episodio tan repentino.

La carga del viento se puede dividir en dos partes. Por un lado se tiene una velocidad media del viento (\bar{U}) y por otro, la velocidad turbulenta del viento (u), con lo que la velocidad total del viento queda dividida en dos componentes y se define como:

$$U = \bar{U} + u \quad (11)$$

Teniendo en cuenta esta suposición, la carga del viento se puede separar en una fuerza de empuje media (o fuerza estática) y una fuerza de empuje turbulenta (o fuerza dinámica). Expresada como:

$$\begin{aligned} Th &= Th_{mean} + Th_{turb} = \\ &= \frac{1}{2} \cdot \rho_a \cdot A_R \cdot C_T \cdot \bar{U}^2 + \frac{1}{2} \cdot \rho_a \cdot A_R \cdot C_T \cdot (2 \cdot \bar{U} \cdot u + u^2) \end{aligned} \quad (12)$$

El coeficiente de empuje C_T , se calcula de la forma mostrada anteriormente.

2.2.3. Escenario de viento (U-1): Turbulencia normal (NTM) a la velocidad nominal del viento (U_R)

Este caso es habitual en el funcionamiento normal del aerogenerador. La desviación estándar de la velocidad del viento en una turbulencia normal puede expresarse según el apartado 6.3.1.3 de la IEC-61400-1 [7] como:

$$\sigma_{U,NTM} = I_{ref} \cdot (0.75 \cdot U + b) \quad (13)$$

Siendo $b = 5.6$ (m/s)

Donde I_{ref} es la intensidad de referencia de la turbulencia (Esperada para un valor de $U=15$ m/s). Se pueden extraer valores para la I_{ref} , de la figura 9, obtenida de la IEC-61400-1 [7]:

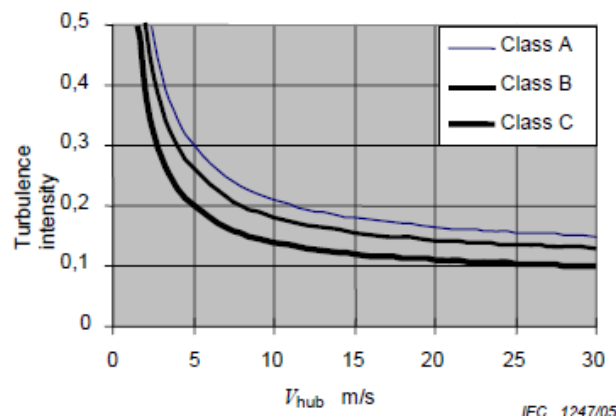


Figura 9. Intensidad de referencia de la turbulencia (I_{ref}) [7].

Por otro lado, para calcular la componente máxima de la velocidad turbulenta del viento u_{NTM} , se supondrá que la constante de tiempo del control de cambio de ángulo es igual que el periodo de tiempo de la rotación del rotor. Es decir, se supone que el control de ángulo puede seguir cambios en la velocidad del viento que se producen a una frecuencia inferior a la velocidad de rotación de la turbina ($f_{1P, \text{máx}} = 0.2$ [Hz]). Entonces u_{NTM} se puede determinar calculando la contribución de las variaciones en la velocidad del viento con una frecuencia más alta que $f_{1P, \text{máx}}$. El viento turbulento se puede calcular como:

$$\sigma_{U,NTM,f > f_{1p}} = \sigma_{U,NTM} \cdot \sqrt{\frac{1}{\left(\frac{6 \cdot L_K}{U_R} \cdot f_{1P,max} + 1\right)^{\frac{2}{3}}}} \quad (14)$$

Siendo:

L_k = Escala de longitud integral de turbulencia.

$$u_{NTM} = 1.28 \cdot \sigma_{U,NTM.f} > f1p \quad (15)$$

$$F_{wind,NTM} = \frac{1}{2} \cdot \rho_a \cdot A_R \cdot C_T \cdot (U_R + u_{NTM})^2 \quad (16)$$

$$M_{wind,NTM} = F_{wind,NTM} \cdot (S + Z_{hub}) \quad (17)$$

La escala de longitud integral de turbulencia se calcula siguiendo el anexo B, del Eurocódigo 1 [9].

La velocidad turbulenta del viento en condiciones normales de funcionamiento se obtiene suponiendo una distribución normal de la componente de velocidad del viento turbulenta y tomando el valor del nivel de confianza del 90%. Este valor se sustituye en la ecuación cuasi-estática (12).

2.2.4. Escenario de viento (U-2): Turbulencia extrema (ETM) a la velocidad nominal del viento (U_R)

El modelo de turbulencia extrema (ETM) se utiliza para calcular la desviación estándar de la velocidad del viento a la velocidad nominal del viento, y a partir de ese valor, calcular la carga máxima del viento bajo condiciones extremas de turbulencia en condiciones normales de operación. La desviación estándar de la velocidad del viento en ETM puede expresarse según el apartado 6.3.2.3 de la IEC-61400-1 [7] como:

$$\sigma_{U,ETM} = c \cdot I_{ref} \cdot \left[0.072 \cdot \left(\frac{U_{avg}}{c} + 3 \right) \cdot \left(\frac{U_R}{c} - 4 \right) + 10 \right] \quad (18)$$

Siendo $c = 2$ (m/s)

Donde U_{avg} es la velocidad media del viento a largo plazo, en la ubicación seleccionada.

La componente de velocidad máxima del viento turbulenta, u_{ETM} se determina de forma similar al caso anterior.

$$\sigma_{U,ETM.f} > f1p = \sigma_{U,ETM} \cdot \sqrt{\frac{1}{\left(\frac{6 \cdot L_K}{U_R} \cdot f_{1P,max} + 1 \right)^{\frac{2}{3}}}} \quad (19)$$

$$u_{ETM} = 1.28 \cdot \sigma_{U,ETM.f} > f1p \quad (20)$$

$$F_{wind,ETM} = \frac{1}{2} \cdot \rho_a \cdot A_R \cdot C_T \cdot (U_R + u_{ETM})^2 \quad (21)$$

$$M_{wind,ETM} = F_{wind,ETM} \cdot (S + Z_{hub}) \quad (22)$$

La velocidad turbulenta del viento en condiciones normales de funcionamiento en condiciones de turbulencia extrema, se obtiene suponiendo una distribución normal de la componente de velocidad del viento turbulenta y tomando el valor del nivel de confianza del 95%. Este valor se sustituye en la ecuación cuasi-estática (12).

2.2.5. Escenario de viento (U-3): Ráfaga extrema de operación (EOG) a la velocidad nominal del viento (U_R)

Se supone que la fuerza máxima ocurre cuando la fuerza máxima de empuje promedio actúa y la ráfaga extrema de operación (EOG) en el periodo de 50 años, chocan en el rotor. Debido a esta ráfaga repentina, se supone que la velocidad del viento cambia tan rápidamente que el control de paso (cambio de ángulo de las palas) no tiene tiempo para ajustar los ángulos de paso de las palas. Esta suposición es muy conservadora ya que el control de paso puede que se ajuste a estas variaciones, sin embargo descartamos esa posibilidad y suponemos que no se puede ajustar a tiempo.

La metodología para el cálculo de la magnitud de la ráfaga extrema de 50 años se describe en la guía DNV-OS-J101 [6]. Esta metodología se basa en la distribución a largo plazo de velocidades medias de viento, en un periodo de 10 minutos en el sitio, representada por una distribución de Weibull. La Función de Distribución Acumulada se expresa como:

$$\Phi_{U10}(k, s) = 1 - e^{-\left(\frac{U}{K}\right)^s} \quad (23)$$

Donde K y s son parámetros dependientes de la distribución de Weibull. A partir de esta expresión, la Función de Distribución Acumulada de velocidades de viento de 1 año se puede expresar como:

$$\Phi_{U10,1-año}(K, s) = \Phi_{U10}(K, s)^{52596} \quad (24)$$

Donde el número 52596 equivale al número de intervalos de 10 minutos, en un año ($52596 = 365.25$ [días / año] $\cdot 24$ [h / día] $\cdot 6$ [intervalos 10 min / h]).

A partir de estos valores, la velocidad del viento de 50 años, que suele utilizarse en el diseño de turbinas eólicas para condiciones de viento extremo, puede determinarse a partir de la

velocidad del viento a la que la Función de Distribución Acumulada es de 0,98 (es decir, tiene un 2% de probabilidad). Se calcula como:

$$U_{10,50-años} = K \cdot \left[-\ln \left(1 - 0.98^{\frac{1}{52596}} \right) \right]^{\frac{1}{5}} \quad (25)$$

La velocidad de ráfaga extrema, se calcula a la velocidad nominal del viento, comparando los dos términos, escogiendo el menor, de la siguiente expresión:

$$u_{EOG} = \min \left\{ 1.35 \cdot (U_{10,1-año} - U_R); \frac{3.3 \cdot \sigma_{U,c}}{1 + \frac{0.1 \cdot D}{\Lambda_1}} \right\} \quad (26)$$

Donde D es el diámetro del rotor, $\Lambda_1 = L_K/8$ (L_K , escala de longitud integral), la desviación estándar característica de la velocidad del viento $\sigma_{U,c} = 0.11 \cdot U_{10,1-año}$, y teniendo en cuenta además que $U_{10,1-año} = 0.8 \cdot U_{10,50-años}$.

Por consiguiente la carga del viento total puede expresarse como:

$$F_{wind,EOG} = Th_{EOG} = \frac{1}{2} \cdot \rho_a \cdot A_R \cdot C_T \cdot (U_R + u_{EOG})^2 \quad (27)$$

Y como en los escenarios anteriores, usando la profundidad del agua (S) y la altura de la góndola sobre el nivel del mar (Z_{hub}), el momento flector de la línea de barro (sin el factor de carga γ_L) se expresa como:

$$M_{wind,EOG} = F_{wind,EOG} \cdot (S + Z_{hub}) \quad (28)$$

2.2.6. Escenario de viento (U-4): Ráfaga extrema de operación (EOG) a la velocidad del viento de corte-desconexión (U_{out})

Puede parecer normal esperar las cargas más altas cuando la turbina está trabajando a la velocidad operacional máxima del viento, sin embargo, esto no sucede así. La carga del viento causada por la ráfaga extrema de operación (EOG) a la velocidad de viento operacional más alta (la velocidad del viento de corte U_{out}) se calcula teniendo en cuenta que la expresión del coeficiente de empuje de Frohboese y Schmuck [8] ya no es válida. El coeficiente de empuje se determina a partir del supuesto de que el control de paso mantiene la potencia constante, como se ha comentado anteriormente, en la ecuación (10).

La velocidad extrema de giro de funcionamiento a la velocidad del viento de corte $u_{EOG, U_{out}}$ se determina como se indica en el escenario anterior (Variando la U_R por U_{out}).

$$u_{EOG, U_{out}} = \min \left\{ 1.35 \cdot (U_{10,1-año} - U_{out}); \frac{3.3 \cdot \sigma_{U,c}}{1 + \frac{0.1 \cdot D}{\Lambda_1}} \right\} \quad (29)$$

Por consiguiente La fuerza de empuje y el momento pueden expresarse como:

$$T_{wind, U_{out}} = \frac{1}{2} \cdot \rho_a \cdot A_R \cdot C_T(U_{out}) \cdot (U_{out} + u_{EOG, U_{out}})^2 \quad (30)$$

$$M_{wind, U_{out}} = T_{wind, U_{out}} \cdot (S + Z_{hub}) \quad (31)$$

2.2.7. Cargas debidas a las olas

Las cargas debidas a las olas son un parámetro importante para poder realizar un dimensionado correcto de la estructura. Para la estimación de las cargas debidas a las olas, se utiliza un modelo simplificado, a través de la ecuación de Morison (o MOJS) [10]. En estas ecuaciones el diámetro de la subestructura se toma como $D_S = D_P + 2t_{TP} + 2t_G$ [m] teniendo en cuenta el espesor de la pieza de transición (t_{TP}), el espesor de la lechada (t_G), y el diámetro del pilote (D_P).

El procedimiento seguido en este caso, se basa en la teoría de ondas lineales, que da la elevación de superficie (η), la velocidad de partícula horizontal (w) y la aceleración de partícula horizontal (\dot{w}), expresadas como:

$$\eta(x, t) = \frac{H_m}{2} \cdot \cos\left(\frac{2 \cdot \pi \cdot t}{T_s} - kx\right) \quad (32)$$

Donde:

H_m = Altura máxima de ola.

T_s = Periodo significativo de ola.

$$w(x, z, t) = \frac{\pi \cdot H_m \cdot \cosh(k \cdot (S + z))}{T_s \cdot \sinh(kS)} \cdot \cos\left(\frac{2 \cdot \pi \cdot t}{T_s} - kx\right) \quad (33)$$

$$\dot{w}(x, z, t) = \frac{-2\pi^2 \cdot H_m \cdot \cosh(k \cdot (S + z))}{T_s^2 \cdot \sinh(kS)} \cdot \sin\left(\frac{2 \cdot \pi \cdot t}{T_s} - kx\right) \quad (34)$$

Donde x es la coordenada horizontal en la dirección longitudinal del viento ($x=0$, se da en la ubicación del aerogenerador) y el parámetro de onda (k) se obtiene a partir de la siguiente relación de dispersión:

$$w^2 = gk \cdot \tanh(kS); \text{ siendo } w = \frac{2\pi}{T_s} \quad (35)$$

La fuerza sobre una zona de longitud unitaria de la subestructura es la suma de la fuerza de arrastre (F_D) y la fuerza de inercia (F_I). Expresada como:

$$dF_{wave}(z, t) = dF_D(z, t) + dF_I(z, t); \quad (36)$$

$$dF_{wave}(z, t) = \frac{1}{2} \cdot \rho_w \cdot D_S \cdot C_D \cdot w(z, t) + C_m \cdot \rho_w \cdot A_S \cdot \dot{w}(z, t)$$

Donde C_D es el coeficiente de arrastre, C_m es el coeficiente de inercia y ρ_w es la densidad del agua de mar.

La fuerza horizontal total y momento flector en la línea de barro se hallan integrando de la siguiente forma:

$$F_{wave}(t) = \int_{-S}^{\eta} dF_D dz + \int_{-S}^{\eta} dF_I dz \quad (37)$$

$$M_{wave}(t) = \int_{-S}^{\eta} dF_D(S + Z_{hub}) dz + \int_{-S}^{\eta} dF_I(S + Z_{hub}) dz \quad (38)$$

La carga máxima de las cargas de arrastre e inercia se produce en diferentes instantes de tiempo, y por lo tanto los máximos se evalúan por separado. El máximo de la fuerza de inercia se produce en el instante $t=0$, cuando $\eta=0$, y el máximo de la fuerza de arrastre se produce cuando $t=T_s/4$ y $\eta=H_m/2$. La carga máxima se obtiene integrando.

$$F_{Dmax} = \frac{1}{2} \cdot \rho_w \cdot D_S \cdot C_D \cdot \frac{\pi^2 \cdot H_S^2}{T_s^2 \cdot \sinh(kS)} \cdot P_D(k, S, \eta) \quad (39)$$

$$M_{Dmax} = \frac{1}{2} \cdot \rho_w \cdot D_S \cdot C_D \cdot \frac{\pi^2 \cdot H_S^2}{T_s^2 \cdot \sinh(kS)} \cdot Q_D(k, S, \eta) \quad (40)$$

$$P_D(k, S, \eta) = \frac{e^{2k(S+\eta)} - e^{-2k(S+\eta)}}{8k} + \frac{S + \eta}{2} \quad (41)$$

$$Q_D(k, S, \eta) = \left(\frac{S + \eta}{8k} - \frac{1}{16k^2}\right) e^{2k(S+\eta)} - \left(\frac{S + \eta}{8k} - \frac{1}{16k^2}\right) e^{-2k(S+\eta)} + \left(\frac{S + \eta}{2}\right)^2 \quad (42)$$

$$F_{I_{max}} = \frac{1}{2} \cdot \rho_w \cdot C_m \cdot D_S^2 \cdot \frac{\pi^3 \cdot H_S}{T_S^2 \cdot \sinh(kS)} \cdot P_I(k, S, \eta) \quad (43)$$

$$M_{I_{max}} = \frac{1}{2} \cdot \rho_w \cdot C_m \cdot D_S^2 \cdot \frac{\pi^3 \cdot H_S}{T_S^2 \cdot \sinh(kS)} \cdot Q_I(k, S, \eta) \quad (44)$$

$$P_I(k, S, \eta) = \frac{\sinh(k(S + \eta))}{k} \quad (45)$$

$$Q_I(k, S, \eta) = \left(\frac{S + \eta}{2k} - \frac{1}{2k^2}\right) e^{k(S+\eta)} - \left(\frac{S + \eta}{2k} - \frac{1}{2k^2}\right) e^{-k(S+\eta)} + \frac{1}{k^2} \quad (46)$$

Se tomará como fuerza máxima, la suma de la fuerza de inercia y la fuerza de arrastre, aunque esta suposición es conservadora, ya que, los valores máximos de la fuerza de arrastre y la fuerza de inercia se producen en diferentes instantes. Todos los escenarios de ola desde el (W-1) al (W-4) se evalúan con el mismo procedimiento, utilizando diferentes valores de altura de ola H y período de ola T.

2.2.8. Cargas debidas a las corrientes

La fuerza y el momento debido a las corrientes marinas, también tienen influencia sobre la estructura y son calculadas, siguiendo las pautas recogidas en la DNV-OS-J101 [6]. Se parte de la expresión de la fuerza de arrastre, que varía en función de la profundidad. Una vez calculada la fuerza de arrastre, se procede a hallar el punto de aplicación de la fuerza y por último calcular el momento en la línea de barro.

$$dF_{Dcorriente} = \frac{1}{2} \cdot \rho_w \cdot (v(z))^2 \cdot CD \cdot D_p \cdot dz \quad (47)$$

Siendo:

$F_{Dcorriente}$ = Fuerza de arrastre debida a la corriente.

D_p = Diámetro del pilote.

ρ_w = Densidad del agua de mar.

CD = Coeficiente de arrastre.

La expresión de la velocidad total de la corriente al nivel z ($v(z)$), proviene del apartado 3.4.3 del manual DNV-OS-J101 [6], donde se especifica que $v(z) = v_{\text{tide}}(z) + v_{\text{wind}}(z)$. Es decir depende de la corriente del agua y del viento.

La norma nos indica que $v_{\text{tide}}(z) = v_{\text{tide}0} \cdot \left(\frac{h+z}{h}\right)^{\frac{1}{7}}$ y que $v_{\text{wind}}(z) = v_{\text{wind}0} \cdot \left(\frac{h_0+z}{h_0}\right)$.

Cuyos parámetros se definen de la siguiente forma:

$v(z)$ = Velocidad total de la corriente.

z = Variación de la profundidad del mar.

$v_{\text{tide}0}$ = Corriente marina de referencia.

$v_{\text{wind}0}$ = Corriente generada por el viento de referencia.

h = Profundidad de la lámina de agua (tomada como positiva). En este caso 53.19 metros.

h_0 = Profundidad de referencia para la corriente generada por el viento (Se toman 50 metros).

Integrando la distancia comprendida entre la línea de barro y la superficie (S), obtenemos el valor de la fuerza de arrastre debida a la corriente:

$$F_{D\text{corriente}} = \int_{-S}^0 \frac{1}{2} \cdot \rho_w \cdot (v(z))^2 \cdot CD \cdot DP \cdot dz \quad (48)$$

Una vez hallado este valor, se procede al cálculo del punto de aplicación de la fuerza, para ello se utiliza el centro de gravedad donde se aplica la fuerza, ya que el momento en ese punto es cero.

$$M_{cdg} = 0; 0 = \int_{-S}^0 (z_{cdg} - z) \cdot dF_{D\text{corriente}} \quad (49)$$

De esta expresión se despeja el valor de la z_{cdg} , y ese será el valor del punto de aplicación de la fuerza de arrastre debida a la corriente.

El momento en la línea de barro debido a la corriente, se calcula fácilmente multiplicando la fuerza de arrastre debida a la corriente por la distancia entre el punto de aplicación y la línea de barro.

$$M_{Dcorriente} = F_{Dcorriente} \cdot (S - zcdg) \quad (50)$$

2.2.9. Cargas combinadas

Una vez se hayan calculado las cargas de viento, olas y corriente, se combinarán las cargas siguiendo los pasos descritos para los escenarios de cargas combinadas E-2 y E-3. El valor del momento mayor proporcionado por estos escenarios, será el utilizado como momento total para actualizar y calcular nuevamente las dimensiones del pilote.

Todo este proceso será realizado de manera automatizada, mediante el programa de cálculo iterativo implementado en Matlab, que actualizará automáticamente las dimensiones del pilote en función de los valores que tomen las cargas que actúen sobre la estructura.

2.2.10. Carga vertical (Peso muerto)

La carga vertical total sobre la cimentación se calcula como:

$$V = m \cdot g \quad (51)$$

Siendo m la masa total de la estructura.

$$m = m_{RNA} + m_{TP} + m_P + m_T \quad (52)$$

Donde m_{RNA} es la masa total del conjunto góndola y rotor, m_T es el peso total de la torre, m_{TP} es la masa de la pieza de transición y m_P es la masa del pilote.

$$m_T = \rho_T \cdot D_T \cdot \pi \cdot t_T \cdot L_T \quad (53)$$

$$m_{TP} = \rho_{TP} \cdot (D_P + 2 \cdot t_G + 2 \cdot t_{TP}) \pi \cdot t_{TP} \cdot L_{TP} \quad (54)$$

$$m_P = \rho_P \cdot D_P \cdot \pi \cdot t_P \cdot (L_P + S) \quad (55)$$

Siendo:

ρ_T = Densidad del material de la torre.

ρ_{TP} = Densidad del material de la pieza de transición.

ρ_P = Densidad del material del pilote.

D_T = Diámetro de la torre (Media de la suma del valor del diámetro de la base y de lo alto).

D_P = Diámetro del pilote.

L_{TP} = Longitud de la pieza de transición.

L_T = Longitud de la torre.

S = Altura de la de la línea de barro a la superficie.

L_P = Longitud enterrada del pilote.

t_T = Espesor de la pared de la torre.

t_{TP} = Espesor de la pared de la pieza de transición.

t_P = Espesor de la pared del pilote.

Al igual que en el caso de la longitud total del pilote, para la longitud de la pieza de transición también se escoge en función de que sea divisible en partes enteras de 3 metros, para este caso en particular, debido a la tipología de su fabricación.

Muchos de los valores de los parámetros mencionados, serán facilitados por fabricantes, sin embargo ante falta de información de algunos de ellos, se ha optado por realizar estimaciones en base a otras instalaciones actuales.

2.3. Capacidad última del pilote

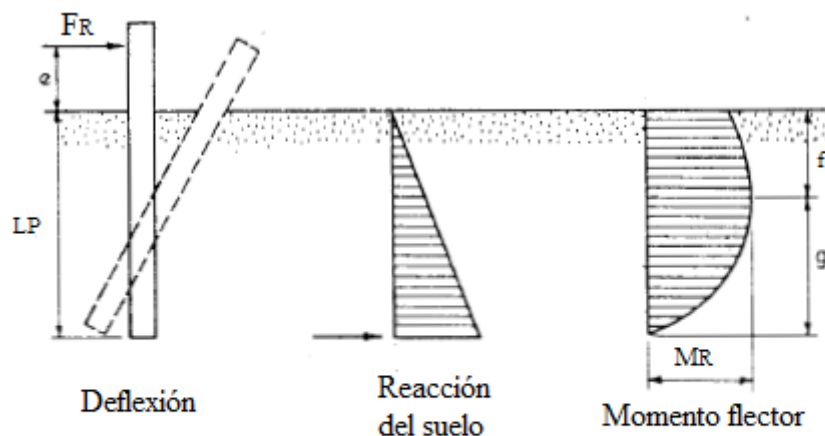
Los pilotes están sometidos a fuerzas laterales y momentos, debidos a los efectos de diferentes fuerzas como pueden ser las del viento y las de las olas. Para dimensionar correctamente un monopilote es necesario asegurar que pueda soportar las cargas recibidas durante su vida útil, por ello se ha de estudiar la capacidad última del pilote.

Para realizar el estudio de capacidad última, se acude al procedimiento simplificado para la capacidad lateral y vertical de pilotes, en suelos cohesivos y sin cohesión, enunciado por Poulos and Davis [5]. Sólo se tiene en cuenta la capacidad horizontal y el momento de vuelco, ya que, son las restricciones típicas, para los pilotes y, si se cumplen estos requisitos, la capacidad vertical también suele ser satisfactoria, ya que los valores de las cargas son muy inferiores. El método más simple para estimar la resistencia lateral última del pilote, es modelarlo, como un pilote sin restricciones en la cabeza del mismo. Al no tener datos exactos de las capas del terreno del fondo marino, se decide abordar el escenario más desfavorable, suelos sin cohesión.

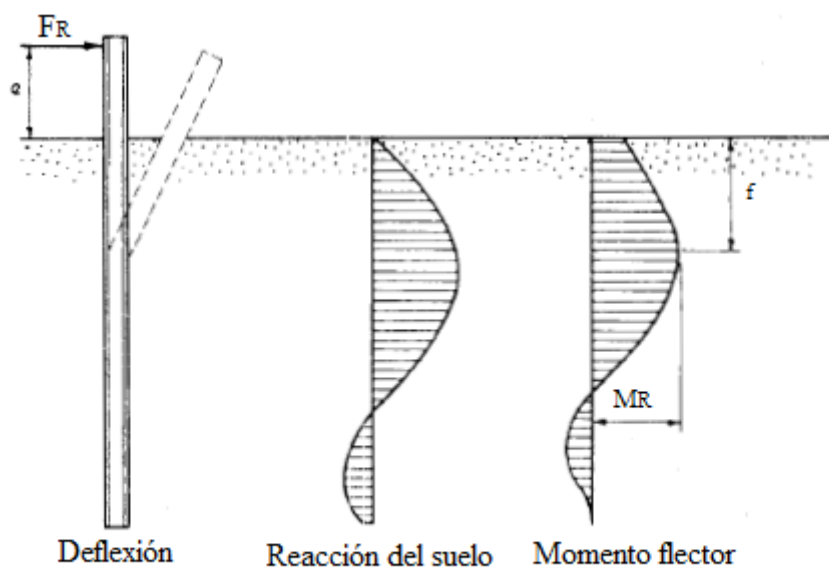
2.3.1. Pilote en suelos sin cohesión

En este tipo de terrenos (arena), que se caracterizan por no ejercer una unión estable entre sus partículas, se supone que la resistencia del suelo aumenta linealmente con la profundidad. El hecho de encontrarse ante un suelo sin cohesión puede verse representado en el ángulo de fricción interna, entre menos cohesión, menor será dicho ángulo.

En la figura 10 se muestra el posible modo de fallo, la distribución de la resistencia del suelo y la distribución de momentos flectores, tanto para pilotes rígidos (cortos) y pilotes flexibles (largos), todo ello modelado para suelos sin cohesión, plasmando como sería la capacidad última del pilote ante una fuerza lateral.



Pilote rígido - Suelo sin cohesión



Pilote flexible - Suelo sin cohesión

Figura 10. Capacidad última del pilote. (Adaptada de Poulos and Davis [5]).

La capacidad horizontal (o lateral) de carga y el momento resistente de la cimentación, se expresa mediante las ecuaciones propuestas por Poulos and Davis [5].

$$F_R = \frac{3}{2} \cdot \gamma' \cdot DP \cdot KP \cdot f^2 \quad (56)$$

$$f = 0.82 \cdot \sqrt{\frac{F_R}{DP \cdot KP \cdot \gamma'}} \quad (57)$$

$$KP = \frac{1 + \sin\phi'}{1 - \sin\phi'} \quad (58)$$

$$M_R = F_R \cdot \left(e + \frac{2}{3} \cdot f \right) \quad (59)$$

Siendo:

DP = Diámetro del pilote.

γ' = Peso unitario del suelo sumergido (Se supone constante con la profundidad).

e = Excentricidad de la carga ($e=M/F$)

M_R = Momento resistente de la cimentación.

F_R = Capacidad de carga horizontal.

f = Distancia entre el lecho marino y el punto dónde se localiza el momento máximo.

ϕ' = Ángulo de fricción interna.

El valor del momento resistente de la cimentación debe ser lo suficientemente grande, como para poder soportar el momento provocado por la combinación de las diferentes cargas dinámicas, recibido por la estructura, y así asegurar la capacidad de carga lateral.

2.4. Rigidez de la cimentación

Se modela de forma simplificada la rigidez de la estructura, teniendo en cuenta tres resortes para calcular dicha rigidez, con lo que los resultados obtenidos pueden diferir de los calculados mediante modelos matemáticos computacionales más precisos.

La rigidez de la cimentación está compuesta a su vez por cuatro resortes a tener en cuenta, por un lado, están las resistencias lineales (K_V , K_L , K_{LR}) y por está la resistencia a la rotación o giro (K_R).

- K_V (Rigidez vertical): Relación directa existente entre el desplazamiento vertical y la carga vertical.
- K_L (Rigidez lateral): Relación directa existente entre el desplazamiento horizontal y la carga horizontal.
- K_{LR} (Rigidez acoplamiento cruzado): Al aplicar una carga horizontal se produce desplazamiento horizontal pero también giro, la relación que existe entre la carga horizontal y el giro corresponde al término de K_{LR} .
- K_R (rigidez de rotación): Relación existente entre el giro y el momento.

En la figura 11 se muestra la rigidez de la cimentación, que se compone por K_V (rigidez vertical), K_L (rigidez lateral), K_R (rigidez de rotación) y K_{LR} (rigidez acoplamiento cruzado), descritas anteriormente. Para este cálculo simplificado, no es necesario hallar la K_V (rigidez vertical), ya que se supone que la estructura es muy rígida verticalmente.

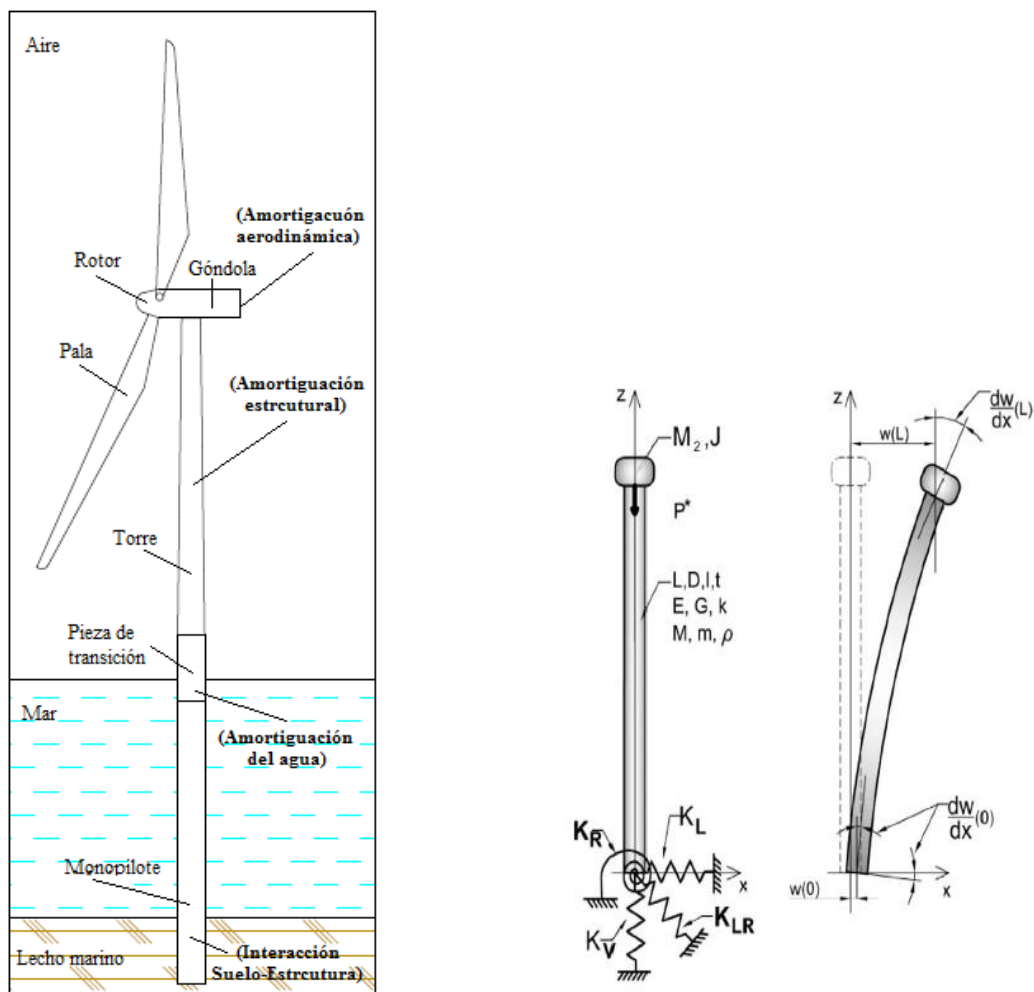


Figura 11. Componentes de la rigidez de la cimentación. (Adaptado de Arany et al. [1]).

En primer lugar es necesario clasificar el comportamiento del pilote como pilote flexible largo o como pilote rígido corto y posteriormente, utilizar las relaciones apropiadas para obtener las componentes de la rigidez de dicho pilote (K_L , K_{LR} , K_R). Se considera que la rigidez vertical no es necesaria para realizar los cálculos simplificados, ya que, la estructura es muy rígida verticalmente.

En el caso de pilotes rígidos (cortos) pueden sufrir una rotación completa bajo el suelo, al recibir las cargas. Sin embargo en pilotes flexibles (largos), la cabeza enterrada del pilote no siente los efectos de las cargas, y es la parte central la que sufre la deformación, con lo que el pilote puede considerarse infinitamente largo.

En el procedimiento simplificado para obtener la rigidez de la cimentación se necesita conocer E_{S0} (rigidez del suelo a una vez el DP por debajo de la línea de barro). Para calcular este parámetro se acude a la siguiente expresión:

$$E = 2 \cdot G_S \cdot (1 + \nu_S) \quad (60)$$

Donde G_S , es el módulo de corte del suelo y se establece como:

$$G_S = p_S \cdot C_S^2 \quad (61)$$

Siendo:

p_S = Densidad del terreno.

C_S = Velocidad de la onda de corte.

La velocidad de la onda de corte (C_S), dependerá del modelo de suelo utilizado en cada caso, pudiendo variar en función de la tipología del perfil de suelo.

Una vez se localizan estos valores, se procede a calcular la E_{S0} , que no es más que la particularización de la ecuación (60), cuando la z toma el valor de 1 vez el diámetro del pilote (DP).

Las expresiones simplificadas más comunes utilizadas para el cálculo de los valores de las componentes de la rigidez anteriormente mencionados, se realizan siguiendo Shadlou y Bhattacharya [12], pudiendo variar las expresiones de la rigidez, en función de si son pilotes rígidos o flexibles, y en función del tipo de suelo. Los valores obtenidos se acercan bastante

a la realidad, sin embargo sería necesario implementar un modelo computacional específico, para obtener unos datos más precisos.

El cálculo de la rigidez de la cimentación es necesaria para poder seguir realizando los cálculos posteriores, que serán los correspondientes a la deformación (deflexión (ρ) y rotación (θ) en la línea de barro) y por otro lado a la estimación de la frecuencia natural.

2.5. Deformaciones

Para hallar las deformaciones de la cimentación, es necesario haber calculado las rigideces y las fuerzas y momentos que actúan sobre la estructura. Un modelo de tres resortes, como el utilizado, se puede relacionar mediante la siguiente matriz de rigidez:

$$\begin{bmatrix} F_x \\ M_y \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} K_L & K_{LR} \\ K_{LR} & K_R \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \rho \\ \theta \end{bmatrix} \quad (62)$$

Donde:

F_x = Fuerza lateral en dirección del eje x.

M_y = Momento de vuelco alrededor del eje y.

ρ = Desplazamiento en x (Deflexión).

θ = Rotación (Giro).

En la figura 12 se muestran las componentes de las rigidez de la cimentación, así como la deformación ante la aplicación de una carga.

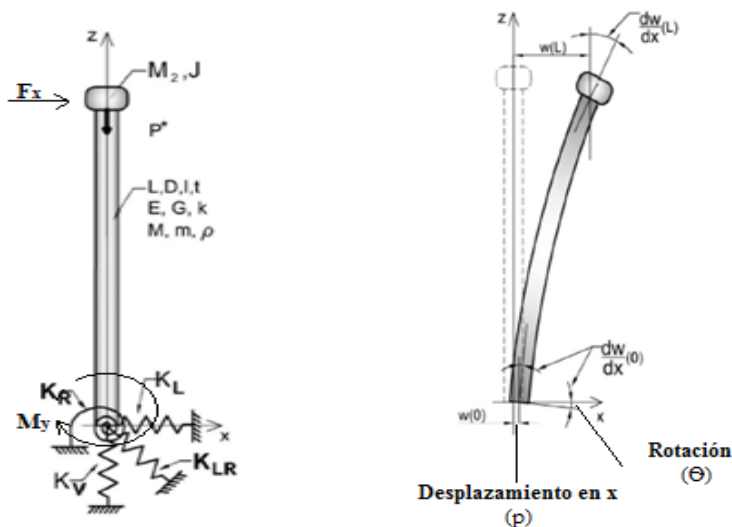


Figura 12. Deformaciones en la cimentación. (Adaptada de Arany et al. [1]).

Las expresiones para calcular las deformaciones, una vez se despeja el sistema de ecuaciones provenientes de la expresión (62) quedan así, las expresiones del desplazamiento en x y la rotación:

$$\rho = \frac{K_R}{K_L \cdot K_R - K_{LR}^2} \cdot F_x - \frac{K_{LR}}{K_L \cdot K_R - K_{LR}^2} \cdot M_y \quad (63)$$

$$\theta = \frac{K_{LR}}{K_L \cdot K_R - K_{LR}^2} \cdot F_x + \frac{K_L}{K_L \cdot K_R - K_{LR}^2} \cdot M_y \quad (64)$$

2.6. Frecuencia natural

La frecuencia natural de un sistema, es la frecuencia a la que vibra dicho sistema cuando es desplazado de su posición de reposo (debido a las diferentes acciones que recibe), y ya no actúa sobre él ninguna fuerza externa.

En el caso del aerogenerador las acciones recibidas provienen de las cargas dinámicas. Cada tipología de aerogenerador, con su cimentación correspondiente, poseerá un conjunto de frecuencias naturales, que variará según sus características.

El problema reside, cuándo el sistema es excitado con frecuencias próximas a la frecuencia natural, en este momento puede producirse el fenómeno de resonancia, lo que provoca una oscilación excesiva del conjunto, que a su vez puede producir efectos de fatiga y conducir a la estructura al colapso.

El cálculo de la frecuencia natural del conjunto de la estructura es importante para poder predecir cómo va a comportarse el conjunto, cuando actúan simultáneamente diferentes cargas dinámicas. Las frecuencias debidas a las cargas dinámicas siguientes, son las tenidas en cuenta en el cálculo de la frecuencia natural.

- Cargas de viento.
- Cargas de las olas.
- Desequilibrio de masa del rotor y la góndola (1P).
- Efecto de la vibración del paso de pala (3P).

En primer lugar se realiza el cálculo de la frecuencia natural en base rígida (aerogenerador), en el cual se desprecia la componente suelo-cimentación, es decir se tiene en cuenta el conjunto torre-góndola.

A esta frecuencia natural en base flexible, se le aplicarán los coeficientes modificadores para tener en cuenta la flexibilidad de la cimentación y la subestructura, y con ello calcular posteriormente, la frecuencia natural en base flexible del conjunto (aerogenerador-cimentación). En este caso, la interacción suelo-estructura si será tomada en cuenta, y su efecto será el de disminuir el valor de la frecuencia natural obtenida anteriormente (base rígida).

Es condición necesaria que la frecuencia natural en base flexible del conjunto se encuentre en el intervalo comprendido por los valores que se encuentran por encima del 10% del valor de (1P) máximo y por debajo del (3P) mínimo. Esta condición se debe a que, en otro espectro de frecuencia podría coincidir con otras frecuencias (vientos, olas, 1P, 3P), lo que podría suponer la aparición de fenómenos negativos, como puede ser la resonancia.

En el caso de no encontrarse el valor de la frecuencia en base rígida calculada (f_0), dentro del rango de valores establecidos para dicha frecuencia, es necesario aumentar las dimensiones del pilote, hasta que se establezca el valor deseado. Para realizar este proceso iterativo, se ha implementado el programa de cálculo en Matlab, anteriormente nombrado, que irá actualizando automáticamente los valores, hasta alcanzar un valor adecuado para la frecuencia natural en base flexible.

Se sigue la siguiente expresión propuesta por Arany et al. [13], para el cálculo de la frecuencia natural en base flexible (f_0) de la estructura. Donde f_{FB} , es la frecuencia en base rígida del aerogenerador y C_L , C_R y C_S , son los coeficientes de flexibilidad.

$$f_0 = C_L \cdot C_R \cdot C_S \cdot f_{FB} \quad (65)$$

Siendo f_{FB} la frecuencia en base rígida del aerogenerador, expresada de forma simplificada mediante la rigidez equivalente (k_0) y la masa equivalente (m_0), del primer modo de vibración (1P).

$$f_{FB} = \frac{1}{2 \cdot \pi} \cdot \sqrt{\frac{k_0}{m_0}} = \frac{1}{2 \cdot \pi} \cdot \sqrt{\frac{3 \cdot E_T \cdot I_T}{L_T^3 \cdot \left(m_{RNA} + \frac{33}{140} \cdot m_T \right)}} \quad (66)$$

Dónde:

m_T = Masa de la torre.

m_{RNA} = Masa del conjunto rotor y góndola.

E_T = Módulo de Young del material de la torre.

I_T = Momento de inercia de la torre.

$$I_T = \frac{1}{16} \cdot t_T \cdot \pi \cdot (D_b + D_t)^3 \quad (67)$$

El valor de D_b corresponde al diámetro de la base de la torre y el valor de D_t corresponde al diámetro de la parte superior de torre. Por otro lado el valor del espesor de la torre se calcula como:

$$t_T = \frac{m_T}{\rho_T \cdot L_T \cdot D_T \cdot \pi}; D_T = \frac{D_b + D_t}{2} \quad (68)$$

Siendo:

ρ_T = Densidad del material de la torre.

L_T = Longitud de la torre.

D_T = Diámetro equivalente de la torre.

Por otro lado los coeficientes de flexibilidad se calculan, a través de las siguientes expresiones simplificadas como:

$$C_R(\eta_L, \eta_R, \eta_{LR}) = 1 - \frac{1}{1 + a \cdot \left(\eta_R - \frac{\eta_{LR}^2}{\eta_L} \right)} \quad (69)$$

$$C_L(\eta_L, \eta_R, \eta_{LR}) = 1 - \frac{1}{1 + b \cdot \left(\eta_L - \frac{\eta_{LR}^2}{\eta_R} \right)} \quad (70)$$

$$C_S = \sqrt{\frac{1}{1 + (1 + \Psi)^3 \cdot X - X}} \quad (71)$$

Para poder hallar de estos coeficientes antes es necesario conocer el valor de los siguientes parámetros:

a = Coeficiente empírico (toma el valor 0.5).

b = Coeficiente empírico (toma el valor 0.6).

$$\eta_L = \frac{KL \cdot L_T^3}{EI_\eta} \quad (72)$$

$$\eta_{LR} = \frac{KLR \cdot L_T^2}{EI_\eta} \quad (73)$$

$$\eta_R = \frac{KR \cdot L_T}{EI_\eta} \quad (74)$$

Los valores de K_L , K_{LR} , K_R , corresponden a la rigidez de la cimentación, y el EI_η , es la rigidez de flexión equivalente.

$$EI_\eta = E_T \cdot I_T \cdot f(q); q = \frac{D_b}{D_t}; f(q) = \frac{1}{3} \cdot \frac{2 \cdot q^2 \cdot (q - 1)^3}{2 \cdot q^2 \cdot \ln q^2 - 3 \cdot q^2 + 4 \cdot q - 1} \quad (75)$$

$$X = \frac{E_T \cdot I_T}{E_P \cdot I_P}; \psi = \frac{L_S}{L_T} \quad (76)$$

Donde:

E_P = Módulo de Young del material del pilote.

I_P = Momento de inercial pilote.

L_S = Longitud de la subestructura.

En la figura 13, se muestran las frecuencias típicas para un aerogenerador offshore y su rango de valores. Se trata de un modelo general, una vez se ha escogido el aerogenerador y calculado las cargas correspondientes, habrá que particularizar la gráfica para cada modelo.

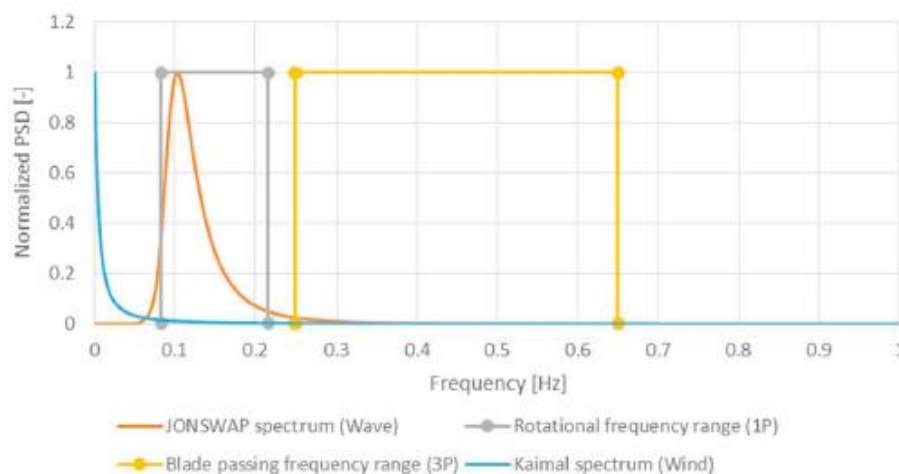


Figura 13. Frecuencias de un aerogenerador offshore. (Obtenida de Arany et al. [1]).

Se puede apreciar que la frecuencia propia se puede encontrar en una región, en la que se encuentran la frecuencia de rotación (1P), y las frecuencias de viento y olas, ese sería el caso más negativo, pudiendo llegar a producirse la resonancia. Por otro lado, si cae en el intervalo donde se encuentra (3P), no es que entre en resonancia, pero se produce más vibraciones que hace que se acumule fatiga y se reduzca su vida útil.

Puede llegar a darse el caso, de que las dimensiones del pilote aumenten hasta un límite demasiado alto, en este caso, sería necesario usar sistemas de cimentación alternativos como puede ser el jacket o trípode. Esto propiciaría un aumento considerable en la frecuencia propia del sistema pudiendo alcanzarse los valores deseados.

2.7. Factores de amplificación dinámicos

Hasta ahora no se ha tenido en cuenta el carácter dinámico de algunas acciones, sobretodo de aquellas cuyas frecuencias características son cercanas a las frecuencias naturales de la estructura, en cuyo caso su efecto puede ser superior al efecto causado por una carga de la misma magnitud pero de carácter estático.

El espectro del viento, tiene unas frecuencias muy bajas y no es considerado, sin embargo el espectro de las olas si tiene que ser tenido en cuenta, y en función de que esté más cerca o más lejos de la frecuencia natural del sistema tendrá mayor o menor efecto. Por ello entra en juego la amortiguación, ya que la amplitud del valor de la frecuencia depende del amortiguamiento.

Para elegir el factor de amortiguamiento, tenemos que tener en cuenta las dos direcciones principales en las que las fuerzas actúan en el aerogenerador. Por un lado tenemos la dirección en la misma línea en la que viene el viento (a lo largo, x) y la dirección de viento de costado (de lado, y). Los valores escogidos para el factor de amortiguamiento en cada caso son, viento a lo largo (x) toma un valor del 2%, y viento de costado (y) toma un valor de 0.5%.

El factor de amplificación dinámica es la relación existente entre la amplitud de las vibraciones y el desplazamiento estático. La ecuación usada para calcular los factores de amplificación dinámica (DAF), siguiendo Arany et al. [14], relaciona la frecuencia de las olas (f) con la frecuencia natural en base flexible del sistema (f_0) y los factores de amortiguamiento establecidos (ξ).

$$DAF = \frac{1}{\sqrt{\left(1 - \left(\frac{f}{f_0}\right)^2\right)^2 + \left(2 \cdot \xi \cdot \frac{f}{f_0}\right)^2}} \quad (77)$$

Dónde:

f_0 : Frecuencia propia del sistema en base flexible (Hz)

f : Frecuencia del espectro de la ola (Hz)

ξ : Factor de amortiguamiento

Una vez se calculan los factores de amplificación dinámica, se realiza nuevamente un proceso iterativo mediante el programa implementado en Matlab, a través del cual se recalculan las fuerzas debidas a las olas, y con estos valores se actualizarán los cálculos posteriores y las dimensiones del pilote.

2.8. Cambio de la frecuencia natural a largo plazo

La estabilidad dinámica de la estructura puede verse afectada a largo plazo, en el caso de que la frecuencia natural modifique su valor. Con el paso del tiempo, se degrada el suelo o la cimentación y se va reduciendo la rigidez y se podría desplazar la frecuencia natural en base flexible del conjunto, hasta entrar en (1P). En el fondo marino la rigidez suele ser la misma, y no suele variar con el paso del tiempo, ya que tienen las mismas condiciones, no dependen de factores climáticos como por ejemplo la lluvia, que puede afectar a los valores de la rigidez del suelo terrestre.

Es por ello que a la hora de establecer los valores del rango entre los que ha de estar comprendida la f_0 , se aumenta el valor del (1P) máximo en 10%, para tener en cuenta el efecto comentado anteriormente.

Se puede observar en la figura 14, que un cambio del 30% en la rigidez del suelo produce menos que un 1,5% de variación en la frecuencia natural. También es evidente que la degradación es más crítica que el endurecimiento desde el punto de vista del cambio de frecuencia.

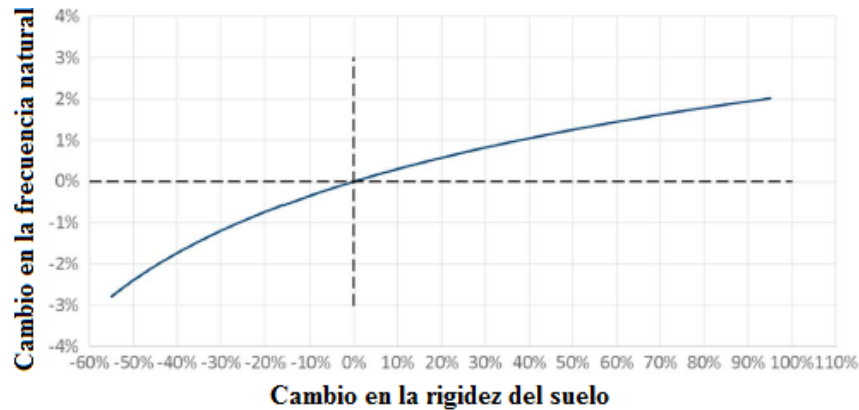


Figura 14. Cambios en la rigidez del suelo. (Adaptada de Arany et al. [1]).

2.9. Vida a fatiga

El análisis de la vida de fatiga de la cimentación se lleva a cabo siguiendo el manual DNV-RP-C203 [15]. Se utilizará un factor de material $\gamma_M=1.1$ y un factor de carga $\gamma_L=1.0$, acorde con la DNV-OS-J101 [6]. Los niveles máximos de tensión (σ_m) causados por los diferentes casos de carga se pueden calcular como:

$$\sigma_m = \gamma_L \cdot M_{max} \frac{D_P}{2 \cdot I_P} \quad (78)$$

Siendo:

M_{max} = Momento flector mayor que ocurre en los escenarios de carga.

D_P = Diámetro del pilote.

I_P = Momento de inercia del pilote.

Por otro lado la amplitud máxima de la tensión cíclica se calcula como:

$$\sigma_m = \gamma_L \cdot \frac{(M_{max} - M_{min})}{2} \cdot \frac{D_P}{2 \cdot I_P} \quad (79)$$

Donde:

M_{min} = Momento flector mínimo que ocurre en los escenarios de carga.

El análisis de fatiga de las soldaduras de los pilotes se realiza utilizando las curvas del tipo C1 y D definidas en el apartado 2.4 de la DNV-RP-C203 [15]. Mediante estas curvas y la amplitud máxima de la tensión cíclica se establecerá el número de ciclos que es capaz de soportar la estructura.

2.10. Comprobación a Pandeo

Una vez se ha realizado el dimensionado completo de la cimentación, se procede a la comprobación de la estabilidad de la estructura, la comprobación a pandeo. El fenómeno de pandeo se puede dar en casos, en los que la estructura está sometida a cargas axiales de compresión, lo que puede llevar a una pérdida de estabilidad y una rotura plástica.

Se procede a comprobar tanto el caso de inestabilidad de pandeo global, como el de pandeo local, teniendo en cuenta las condiciones de sujeción (empotrado-empotrado, articulado-empotrado, libre-empotrado...), la tipología de la sección y las cargas que recibe la estructura.

2.10.1. Pandeo Global

El pandeo global se da cuando una estructura se deforma y esta deformación no es proporcional a las cargas recibidas, con lo que el pandeo se produce longitudinalmente provocando la inestabilidad lateral de toda la estructura, sin que los elementos estructurales hayan alcanzado su propia carga de pandeo.

Para el cálculo del pandeo global, se siguen los pasos recogidos en la DNV-RP-C201 [17], y las indicaciones del Eurocódigo 3 parte 1-6 [18]. Se calculan los diferentes parámetros y por último se comprueba que la estructura cumple la condición.

Se empieza calculando, el axil (N_P) y momento (M_P) de plastificación de la sección, para poder calcular la esbeltez reducida de la sección (λ).

$$N_P = \frac{A \cdot f_{yk}}{\gamma_M} \quad (80)$$

$$M_P = \frac{W_P \cdot f_{yk}}{\gamma_M} \quad (81)$$

Donde:

A = Sección del anillo (pilote).

W_P = Módulo resistente del pilote.

$$w_P = \frac{I_P}{\frac{D_P}{2}} \quad (82)$$

f_{yk} = Límite elástico de la sección.

γ_M = Factor de material (1.1).

$$\lambda = \sqrt{\frac{N_P \cdot \gamma_M}{N_{CRIT}}} \quad (83)$$

Siendo:

$$N_{CRIT} = \left(\frac{\pi}{Lk}\right)^2 \cdot E_P \cdot I_P \quad (84)$$

La longitud crítica de pandeo se toma como ($L_k = \beta \cdot L$), siendo beta (β) el valor más negativo de la tabla, recogida en la norma y la L, se corresponde con la longitud del pilote sin tener en cuenta la parte enterrada del mismo. E_p , hace referencia al módulo de Young del pilote y por otro lado, I_p es el módulo de inercia del pilote.

Una vez se ha calculado el valor de la esbeltez reducida es posible, calcular el factor de reducción (k), de la siguiente manera:

$$k = \frac{1}{\phi + \sqrt{\phi^2 - \lambda^2}} \quad (85)$$

Donde el parámetro ϕ , lo hallamos a través de la expresión dada por:

$$\phi = 0.5 \cdot [1 + \alpha \cdot (\lambda - 0.2) + \lambda^2] \quad (86)$$

El valor de α , se toma como 0.21, para secciones circulares en forma de anillo.

La condición que ha de cumplirse viene dada por la expresión formada por los diferentes parámetros descritos anteriormente, los cuales sumados no pueden superar el valor numérico 1. A esta suma hay que añadir un parámetro designado como (Δn).

$$\Delta n = 0.25 \cdot k \cdot \lambda^2 \leq 0.1 \quad (87)$$

$$\frac{N}{N_P \cdot k} + \frac{\beta_M \cdot M}{M_P} + \Delta n \leq 1 \quad (88)$$

Donde:

N = Axil máximo de cálculo, que viene dado por la carga vertical (peso muerto).

M = Momento total de cálculo.

β_M = Factor de corrección aplicable (1).

Cabe destacar que la longitud utilizada para el cálculo de pandeo, es la longitud del pilote que no está enterrada. Esta consideración permite simplificar los cálculos, según lo descrito por Bhattacharya et al. [19]. La longitud enterrada del pilote no ha de ser considerada, a menos que, se tenga constancia de que existan fuerzas laterales que no pueda soportar el pilote, que se produzca licuefacción del suelo circundante debido a terremotos u otros efectos, o por la posibilidad de la existencia de perfiles de suelo con estratos intermedios de escasa capacidad portante.

2.10.2. Pandeo Local

El pandeo local es aquel que se produce en las secciones aisladas que componen el pilote, en este caso la sección transversal se deforma provocando un daño localizado. Debido a este fenómeno, se reduce drásticamente la capacidad de carga del pilote, pudiendo conducir al colapso de la cimentación.

La comprobación realizada para pandeo local, es una comprobación inicial siguiendo el Eurocódigo 3, parte 1-6 [18], mediante el modelo simplificado recogido en el anexo D. La sección del pilote, es una sección clase 4, con lo que la norma indica que ha de realizarse abordando la teoría de láminas. Sin embargo, este cálculo ha de llevado a cabo con modelos computacionales, quedando fuera del alcance de este proyecto. Por ello se decide hacer el cálculo simplificado comentado anteriormente.

La sección de la parte enterrada del pilote, que se encuentra por debajo de la línea de barro, no es necesario considerarla para el cálculo de pandeo, según lo descrito por la API-2A-WSD [2]. A menos que, se considere que el pilote no es capaz de soportar las cargas laterales, debido a una baja resistencia del suelo, cálculo de grandes desplazamientos o motivos similares descritos en el caso anterior.

La misma indicación para pandeo local, se recoge en la GL Wind 2005 [4], en la que se especifica que no es necesario averiguar el pandeo local de la longitud enterrada del pilote.

En el anexo D del Eurocódigo 3, parte 1-6 [18] se indica el procedimiento de cálculo a seguir, así como la condición que ha de cumplir la sección, para resistir a pandeo local y superar la comprobación de inestabilidad local.

$$\sigma_{S,RCR} = 0.605 \cdot E_P \cdot I_P \cdot C_x \cdot \frac{t_P}{r_P} \quad (89)$$

Siendo:

E_P = Módulo de Young del acero del pilote.

I_P = Momento de inercia del pilote.

C_x = Parámetro de cálculo.

t_P = Espesor de la pared del pilote.

r_P = Radio del pilote.

El parámetro de cálculo C_x se calcula teniendo en cuenta, el parámetro dependiente de la longitud y del radio (w). El valor de (w), indicará diferentes formas de calcular (C_x), que será sustituido posteriormente en la ecuación (89).

$$w = \frac{S}{\sqrt{r_P \cdot t_P}} \quad (90)$$

La S , equivale a la longitud del pilote que no se encuentra enterrada.

En la figura 15, se muestra la geometría del cilindro (pilote), así como el efecto que tendría una carga en una sección concreta.

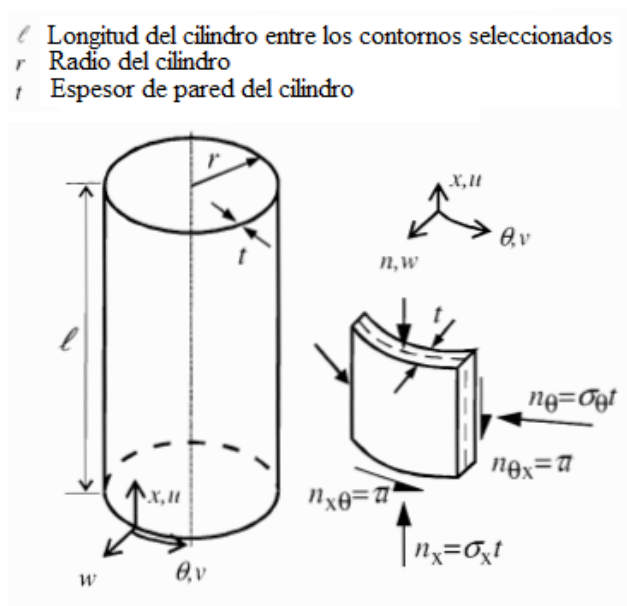


Figura 15. Geometría del cilindro para el cálculo de pandeo local (Adaptada de [18]).

Es necesario escoger una condición de contorno (BC), para poder definir diferentes parámetros necesarios para realizar los cálculos. Las condiciones de contorno, vienen recogidas en la tabla D.1, del mencionado anexo D.

Para poder superar la comprobación de pandeo local con éxito ha de cumplirse la condición de que:

$$\sigma_{x,d} \leq \frac{\sigma_{S,RCR}}{\gamma_M} \quad (91)$$

Siendo en este caso γ_M , el factor de material nombrado con anterioridad, con valor de 1.1. La tensión calculada ($\sigma_{x,d}$), se calcula como:

$$\sigma_{x,d} = \frac{N}{A} + \frac{M}{w_P} \quad (92)$$

Donde:

N = Axil máximo de cálculo, que viene dado por la carga vertical (peso muerto).

M = Momento total de cálculo.

A = Sección del anillo (pilote).

w_P = Módulo resistente del pilote.

Se ha de comprobar que se cumple dicha condición particularizada para las dimensiones del diseño final del pilote. En caso de no ser así, habrá que aumentar el espesor del pilote hasta que se alcance un valor adecuado.

2.11. Criterios de diseño

Los criterios de diseño, se han establecido considerando todos y cada uno de los conceptos descritos anteriormente, teniendo en cuenta lo establecido en Arany et al. [1] y las pautas recogidas en las diferentes normas IEC, así como en las guías DNV y las recomendaciones de la API.

CATEGORIA	DESCRIPCION	CRITERIO
ELU	La capacidad de carga de la cimentación ha de superar la carga máxima calculada.	$M_{tot} < M_{plasticación}$

	El límite elástico del pilote, ha de ser superior a la tensión máxima que soporta la estructura. ($f_{yd}=f_{yk}/1.1$).	$\sigma_{max} < f_{yd}$
	El momento resistente de la cimentación ha de ser superior, al momento total calculado.	$M_{tot} < M_R$
	Se ha de cumplir las condiciones establecidas, para pandeo local y pandeo global.	Resistencia a pandeo.
ELS	La deflexión máxima ha de ser inferior a 20 cm.	$Despx < 0.2 \text{ m}$
	La rotación máxima ha de ser inferior a 0.5°.	$Rot < 0.5^\circ$
	La frecuencia natural del conjunto (Aerogenerador-subestructura-cimentación), en base flexible, ha de ser superior al menos en el 10% del modo de vibración 1P, e inferior al mínimo de 3P.	$(1.1) \cdot 1P_{max} < f_0 < 3P_{min}$
ELF	La vida útil de la estructura ha de ser 50 años.	Resistencia a Fatiga

Tabla 2. Criterios de diseño.

En caso de no cumplir los criterio de diseño establecidos, las dimensiones del pilote han de ser redefinidos y así poder superar las condiciones impuestas con éxito, garantizando así la vida útil del mismo para el periodo de tiempo establecido.

2.12. Descripción del programa de cálculo

El proceso de cálculo tanto para establecer las dimensiones de un monopilote para un aerogenerador offshore, así como para realizar las diferentes comprobaciones, es un proceso iterativo. Realizar esta tarea a través de forma convencional, conlleva una enorme inversión de tiempo, con lo que para optimizar los recursos disponibles se ha decidido implementar un programa de cálculo iterativo. El programa ha sido desarrollado en Matlab, de forma que, se realiza un pre dimensionado del pilote y se comprueba que cumple las diferentes condiciones establecidas, en caso de no ser así, se procede a aumentar las dimensiones hasta que se obtiene un resultado favorable. Se explicará a continuación, mediante un diagrama de flujo,

el proceso de cálculo simplificado que sigue el programa implementado.

Dicho programa, se adjunta como material complementario al proyecto, con el nombre de fichero (“CALCULOPILOTE.m”).

2.12.1. Diagrama de flujo

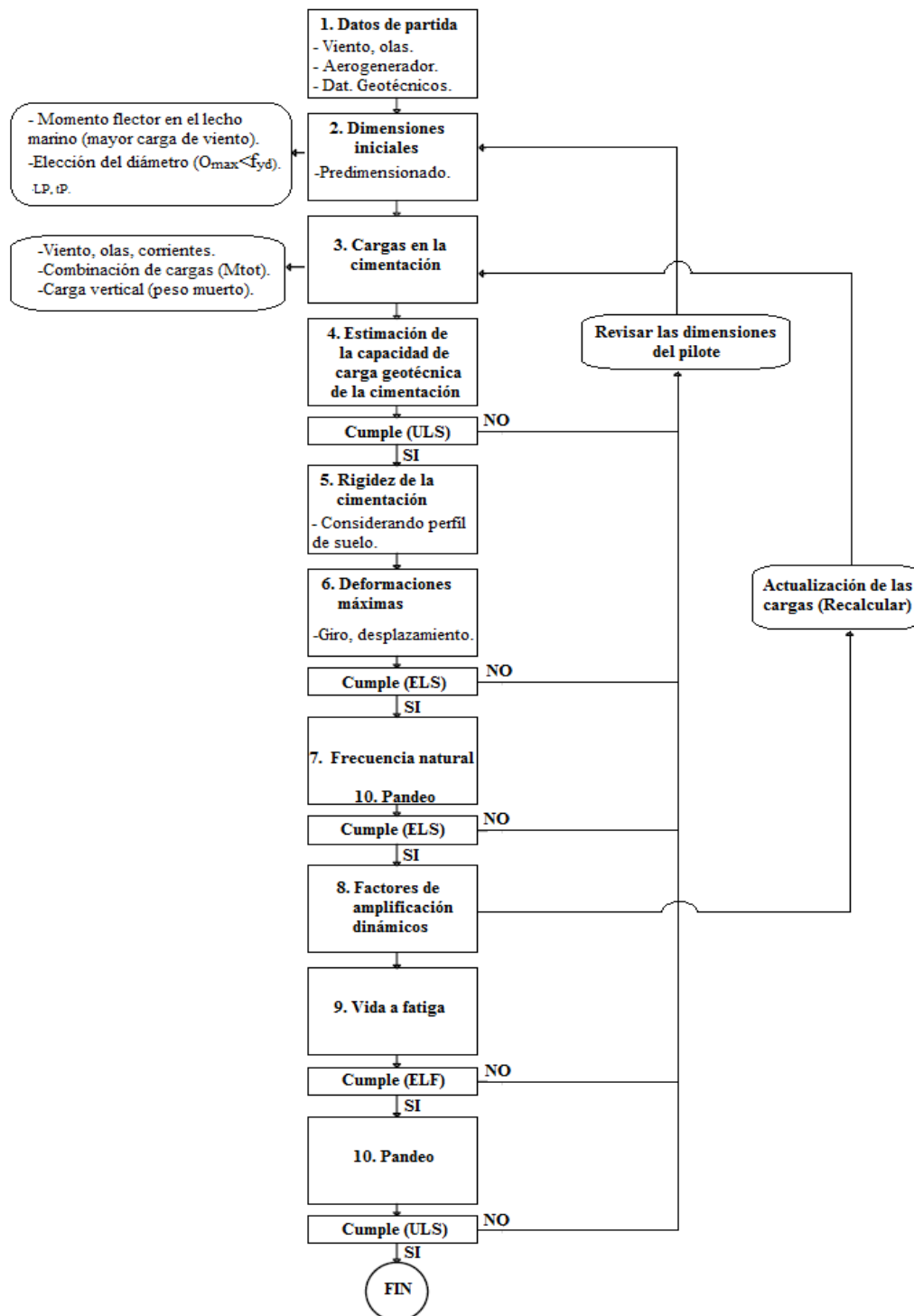


Figura 16. Diagrama de flujo programa de cálculo implementado, CALCULOPILOTE.

3. RESULTADOS

En el siguiente apartado del presente proyecto, se mostrarán diversas tablas resumen, dónde quedan recogidos los valores obtenidos tras la realización de los diferentes cálculos descritos en la memoria justificativa. Se comenzará por los datos de partida, y se llegará a unas dimensiones finales del pilote, después de realizar el proceso de cálculo iterativo, mediante el programa implementado en Matlab, descrito en el apartado de método de cálculo.

3.1. Datos de partida

Es muy importante contar con fuentes de datos precisas y de confianza ya que antes de comenzar a realizar los cálculos, es necesario conocer los diferentes datos de partida correspondientes a la ubicación, aerogenerador seleccionado, datos de viento y oceánicos, datos geotécnicos y las características del material utilizado en la construcción de la cimentación.

En las posteriores tablas, se mostrará un resumen los diferentes parámetros de partida necesarios para comenzar a calcular las dimensiones del pilote. Estos datos de partida vendrán especificados de forma más detallada en el anejo a la memoria “Estudio Previo”.

3.1.1. Ubicación

La ubicación seleccionada es al sureste de la isla de Gran Canaria, frente a las costas del término municipal de San Bartolomé de Tirajana.

PARÁMETRO	SÍMBOLO	UNIDADES
Coordenadas	X:452850, Y:3069850	-
Distancia a la costa	4300	m
Profundidad de la lámina de Agua	50	m
Morfología y perfil estratigráfico	Sedimento fino (Arena)	-

Tabla 3. Características ubicación.

La figura 17 muestra la ubicación seleccionada, para la colocación del aerogenerador offshore en la isla de Gran Canaria.



Figura 17. Ubicación del aerogenerador offshore. (Adaptada de [22]).

3.1.2. Aerogenerador

En base a los criterios establecidos en el anejo de cálculo selección del aerogenerador, el modelo seleccionado, corresponde al V164-8.0 MW, del fabricante Vestas. Algunos datos, han tenido que ser estimados en función de otros aerogeneradores de similares características, debido a que el fabricante no aporta dicha información.

PARÁMETRO	SÍMBOLO	VALOR	UNIDADES
Altura de la góndola	Zhub	100	m
Diámetro del rotor	D	164	m
Altura de la torre	Lt	86	m
Diámetro superior torre	Dts	5.1	m
Diámetro de la base de la torre	Dtb	7.4	m
Espesor de la torre	tt	0.044	m
Densidad del material de la torre	pt	7860	Kg/m ³
Masa de la torre	mT	583	tons
Velocidad nominal del viento	UR	11	m/s
Masa del conjunto rotor-góndola	mRNA	429	tons

Rango de velocidad de operación del rotor	opmin-opmax	4.8-12.1	rpm
---	-------------	----------	-----

Tabla 4. Datos aerogenerador.

3.1.3. Datos meteorológicos y oceánicos

3.1.3.1. Viento

Para poder llevar a cabo el cálculo de las cargas de viento es necesario disponer de diferentes parámetros referidos al emplazamiento concreto del aerogenerador offshore, dichos parámetros se muestran en la tabla 5.

PARÁMETRO	SÍMBOLO	VALOR	UNIDADES
Constante de Weibull	s	1.896	-
Factor del escala medio del viento (Función de Weibull)	k	10.4	m/s
Intensidad de la turbulencia de referencia	I	17	%
Escala de longitud integral del viento	lk	260.1	m
Densidad del aire	pa	1.225	Kg/m ³

Tabla 5. Datos del viento.

3.1.3.2. Océano Atlántico

Los datos marinos son necesarios para hallar el efecto que producen las cargas de las olas en la estructura, y para ello es necesario conocer diferentes datos (periodo de olas, tamaño de olas...), tanto en períodos de tiempo cortos (1 año), como para periodos largos de tiempo (50 años), entre otros datos significativos resumidos en la tabla 6.

PARÁMETRO	SÍMBOLO	VALOR	UNIDADES
Altura significativa de ola (Periodo retorno 50 años)	HS50	6.57	m
Periodo pico de la ola (Periodo retorno 50 años)	TS50	15.2	s

Altura máxima de ola (Periodo retorno 25 años)	Hm25	9.5	m
Periodo máximo de la ola (Periodo retorno 25 años)	Tm25	10.92	s
Altura significativa de ola (Periodo retorno 1 año)	HS1	4.60	m
Periodo pico de la ola (Periodo retorno 1 año)	TS1	7.60	s
Altura máxima de ola (Periodo retorno 1 año)	Hm1	8.59	m
Periodo máximo de la ola (Periodo retorno 1 año)	Tm1	10.39	s
Profundidad máxima (Periodo retorno 21 años)	S	53.19	m
Densidad del agua del mar	pw	1030	Kg/m ³

Tabla 6. Datos del mar.

3.1.4. Datos geotécnicos

Los datos geotécnicos están limitados a la información que se tiene de la superficie del lecho marino (sedimento fino), no pudiendo obtener datos reales del perfil morfológico real que posee el suelo marino. Es por este motivo que se ha optado por realizar una modelización del perfil del suelo, a través de la velocidad de la onda de corte (C_s), a través de la expresión de Álamo et al. [20], donde:

$$C_s = 78.98 \cdot z^{0.312} \cdot P \quad (93)$$

Siendo (z) el valor de la profundidad, y por otro lado (P = toma los valores 1.000, 1.260 o 1.286, para arcilla, arena fina y arena media, respectivamente). En este caso en concreto, los datos que se tienen es que nos encontramos ante un suelo de arena fina. El perfil de suelo obtenido para este caso concreto se muestra en la figura 18.

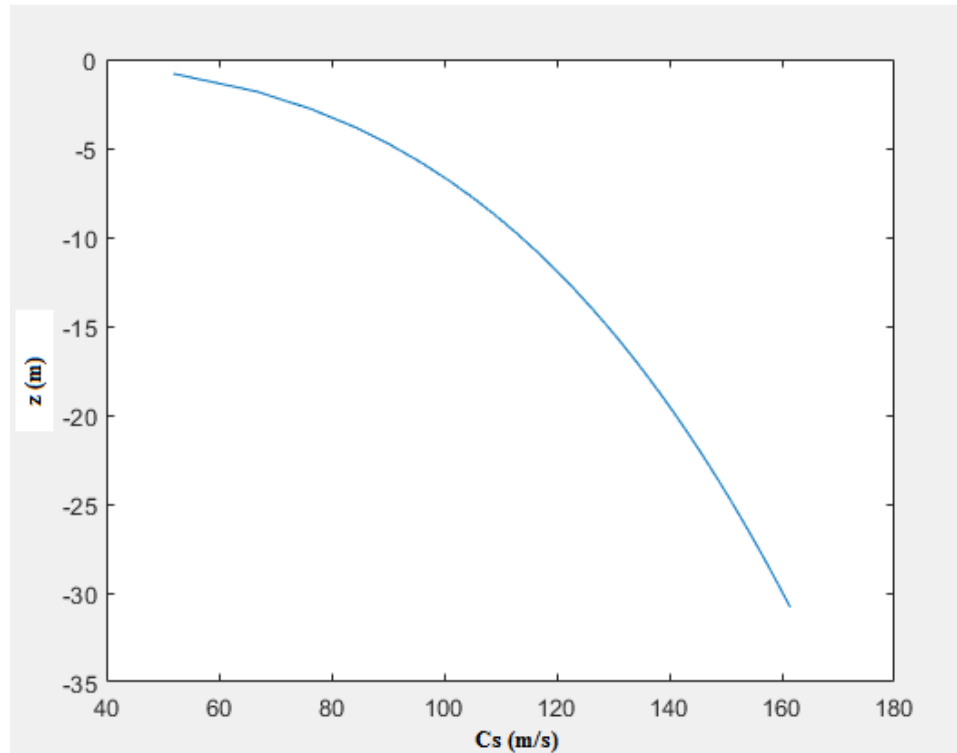


Figura 18. Perfil de suelo.

Se toma la condición también, por falta de datos, que la densidad del terreno es constante a lo largo de todo el perfil estudiado, así como el dato del coeficiente de Poisson del suelo.

PARÁMETRO	SÍMBOLO	VALOR	UNIDADES
Rigidez lineal del suelo (ángulo de fricción interna 25°)	nh1	5.4	MN/ m ³
Densidad del suelo (Se toma constante)	ps	1800	Kg/m ³
Coefficiente de Poisson del suelo	vs	0.2	-

Tabla 7. Datos geotécnicos.

3.1.5. Datos del material del pilote y pieza de transición

Tanto el pilote, como la pieza de transición se fabricarán de acero S355, debido a sus excelentes características estructurales y resistencia a la corrosión, dato importante debido a la dureza del medio al que se expone (mar).

PARÁMETRO	SÍMBOLO	VALOR	UNIDADES
Módulo de Young - Acero S355 - Pilote	EP	210000	MPa
Densidad - Acero S355 - Pilote	pP	7850	Kg/m ³
Límite elástico - Acero S355 - Pilote	fyk	355	MPa
Densidad - Acero S355 – Pieza transición	pTP	7850	Kg/m ³
Espesor pieza transición y espacio entre piezas	sum	0.22	m

Tabla 8. Material pieza de transición y pilote.

3.2. Dimensionado

Para realizar todo el proceso de cálculo iterativo se ha implementado el programa en Matlab capaz de introducir todas las actualizaciones necesarias para recalculer la cimentación, que será adjuntado a la memoria, como se ha nombrado con anterioridad.

En primer lugar se procede a realizar un pre-dimensionado de la estructura, partiendo de los datos que se tienen del viento. La ráfaga extrema de operación (EOG) en un periodo de 50 años es la que provoca la mayor carga de viento (U-3). El momento que se produce en la línea de barro debido a esa carga de viento, multiplicado por un factor de carga de 1.35, será el punto de partida para obtener un diámetro, un espesor y una longitud inicial de pilote.

3.2.1. Cargas en la cimentación

Una vez se cuenta con unas dimensiones iniciales del pilote, es posible calcular las cargas debidas a las olas sobre la estructura. Con las cargas del viento, las de las olas y las cargas de las corrientes, se realizarán a posteriori, las combinaciones de dichas cargas, obteniendo los escenarios más negativos.

3.2.1.1. Cargas de viento

En la tabla 9 se muestra un resumen de las cargas de viento obtenidas para los diferentes escenarios establecidos con anterioridad.

PARÁMETRO	SÍMBOLO [Unidad]	U-1 (NTM)	U-2 (ETM)	U-3 (EOG-UR)	U-4 (EOG-UO)
-----------	---------------------	--------------	--------------	-----------------	-----------------

Desviación estándar de la velocidad del viento	O_u [m/s]	3.03	4.01	-	-
Desviación estándar en $f > f_{1P}$	O_{uf} [m/s]	0.98	1.30	-	-
Componente máxima de la velocidad turbulenta	u [m/s]	1.25	2.59	8.31	8.31
Fuerza máxima en el ciclo de carga	$F_{windmax}$ [MN]	1.24	1.52	3.07	0.78
Fuerza mínima en el ciclo de carga	$F_{windmin}$ [MN]	0.78	0.58	0.57	0.2
Fuerza media sin turbulencia	$F_{windmean}$ [MN]	0.99	0.99	0.99	0.44
Momento máximo en el ciclo de carga	$M_{windmax}$ [MNm]	189.52	233.31	470.16	119.19
Momento mínimo en el ciclo de carga	$M_{windmin}$ [MNm]	119.7	88.98	87.03	29.94
Momento medio sin turbulencia	$M_{windmean}$ [MNm]	152.62	152.62	152.62	67.15

Tabla 9. Cargas de viento de los diferentes escenarios.

3.2.1.2. Cargas de las olas

Las cargas debidas a las olas se calculan para los diferentes escenarios establecidos en este proyecto. Se indica además que los peores casos de olas serán el W-2 y el W-4, con lo que para simplificar los cálculos solo se realizan las operaciones correspondientes a dos estos escenarios.

Los valores de C_D , coeficiente de arrastre y C_m , coeficiente de inercia han sido seleccionados a partir de las tablas del F.M. White [21], particularizada para formas cilíndricas.

PARÁMETRO	SÍMBOLO [Unidad]	W-2	W-4
Coefficiente de arrastre	C_D [-]	1	0.82
Coefficiente de inercia	C_m [-]	1	0.82
Altura de la ola	H [m]	8.59	9.5
Periodo de la ola	T [s]	10.39	10.92
Fuerza máxima de arrastre	F_D [MN]	0.19	0.37
Fuerza máxima de inercia	F_I [MN]	0.92	1.07
Fuerza máxima de ola	$F_{wavemax}$ [MN]	1.11	1.44
Momento máximo de arrastre	M_D [MNm]	9.62	13.27
Momento máximo de inercia	M_I [MNm]	36.40	42.80
Momento máximo de ola	$M_{wavemax}$ [MNm]	46.02	56.07

Tabla 10. Cargas debidas a las olas.

Estas cargas debidas a las olas, se actualizarán y aumentarán una vez se apliquen posteriormente los factores dinámicos de amplificación.

3.2.1.3. Cargas de las corrientes

Las corrientes marinas también influyen sobre la estructura, tomando los siguientes valores. Los diferentes parámetros necesarios para el cálculo de esta fuerza se detallan en el anejo correspondiente al estudio previo.

PARÁMETRO	SÍMBOLO [Unidad]	ESCENARIO UNICO
Fuerza de arrastre	$F_{arrastre}$ [MN]	0.156
Punto de aplicación	Z_{cd} [m]	32.42
Momento máximo en la línea de barro	$M_{arrastre}$ [MNm]	5.05

Tabla 11. Cargas debidas a las corrientes.

3.2.1.4. Combinación de cargas

Los casos más críticos de carga que se pueden dar a la hora de calcular la cimentación, son las combinaciones de las cargas recogidas en la siguiente tabla:

DESCRIPCIÓN	ESCENARIOS DE VIENTO	ESCENARIOS DE OLAS	ESCENARIO DE CORRIENTE
<p>Escenario-2 Cargas de onda extrema</p> <p><i>Viento y olas y la corriente actúan en la misma dirección</i></p>	<p>ETM en U_R</p> <p>(U-2)</p>	<p>50-años EWH</p> <p>(W-4)</p>	<p>Corrientes</p>
<p>Escenario-3 Cargas de viento extremo</p> <p><i>Viento y olas y la corriente actúan en la misma dirección</i></p>	<p>EOG en U_R</p> <p>(U-3)</p>	<p>1-año EWH</p> <p>(W-2)</p>	<p>Corrientes</p>

Tabla 12. Casos de combinación de cargas.

Es necesario aplicar un factor de carga de 1.35, para estar del lado de la seguridad a la hora de realizar los diferentes cálculos. Así nos aseguramos de que la estructura puede aguantar una carga superior a la considerada, antes de aplicar el factor carga. En la siguiente tabla se muestran los valores de las cargas combinadas, para los dos escenarios más negativos, es decir los que van a tener un momento más elevado.

CARGA	ESCENARIO DE OLA EXTREMA E2 (U-2)+(W-4)+Cor	ESCENARIO DE VIENTO EXTREMO E3 (U-3)+(W-2)+Cor
Fuerza máxima de viento [MN]	1.52	3.07
Momento máximo de viento [MNm]	233.31	470.16
Fuerza máxima de ola [MN]	1.44	1.11

Momento máximo de ola [MNm]	56.07	46.02
Fuerza máxima de corriente [MN]	0.156	0.156
Momento máximo de corriente [MNm]	5.05	5.05
Fuerza total [MN]	3.12	4.34
Momento de vuelco total [MNm]	294.43	521.23
Momento de vuelco total*(1.35) [MNm]	397.48	703.66

Tabla 13. Cargas combinadas.

Este momento total combinado, se actualizará una vez se apliquen los factores dinámicos de amplificación a las cargas debidas a las olas. Pero para ello antes se han de calcular los diferentes parámetros necesarios para hallar la frecuencia natural, y posteriormente se calcularán dichos factores.

Con este momento total, se realiza de nuevo un cálculo iterativo y se recalculan las dimensiones del pilote.

3.2.1.5. Carga vertical (peso muerto)

La carga vertical, se compone por la masa de todas las partes que forman la estructura, desde el aerogenerador hasta la cimentación.

PARÁMETRO	SÍMBOLO	VALOR	UNIDADES
Masa conjunto rotor y góndola	mRNA	429	tons
Masa de la torre	mT	583	tons
Masa de la pieza de transición	mTP	522	tons
Masa del pilote	mP	1226	tons
Masa vertical	m	2760	tons
Carga vertical (peso muerto)	CARGA VERTICAL	27.08	MN

Tabla 14. Peso muerto.

3.3. Capacidad de carga última de la cimentación

Es necesario comprobar que la cimentación es capaz de soportar las cargas máximas que se transmite a la estructura. Para ello se compara el momento total, con el momento resistente de la cimentación, que tendrá que ser superior para garantizar la estabilidad de la estructura.

CARGA	SÍMBOLO	VALOR	UNIDADES
Fuerza resistente de la cimentación	FR	27.78	MN
Momento resistente de la cimentación	MR	4478	MNm

Tabla 15. Capacidad de carga de la cimentación.

Se comprueba que los valores calculados en el terreno, son muy superiores a los obtenidos en el cálculo de las cargas que recibe la estructura.

CONDICIÓN	VALOR	CUMPLE
$F_{tot} < FR$	$4.34 < 27.78$	SI
$M_{tot} < MR$	$703.66 < 4478$	SI

Tabla 16. Condición de capacidad última.

Este resultado indica que se podría reducir la longitud del pilote, y seguiría cumpliendo esta condición. Sin embargo, se ha escogido como criterio que la longitud enterrada para estructuras de esta envergadura, ha de ser de como mínimo 25 metros, con lo que se decide establecer la longitud proveniente de la ecuación (4), que da una longitud en torno a 28 metros, para este caso. Finalmente, para facilitar el armado de la estructura, se decide ajustar la medida a 30.81, para que quede un total de 84 metros de longitud de pilote.

3.4. Rigidez y deformaciones en la cimentación

Como se ha indicado anteriormente, la rigidez de la estructura, se halla siguiendo las fórmulas enunciadas por Shadlou y Bhattacharya [12], particularizadas para este caso en concreto de pilote flexible, en suelos no homogéneos parabólicos. Es necesario recordar, que la densidad del suelo se ha tomado como constante ya que no se poseen más datos que definan el suelo a mayores profundidades.

3.4.1. Rigidez

En el caso concreto de este proyecto, se trata de un pilote flexible largo, ya que en un primer momento se optó por seleccionar pilote rígido, pero el rango de valores obtenidos para la rigidez no era coherente. Se calculan diferentes rigideces K_R , K_L y K_{LR} como:

$$K_L = \frac{1.02 \cdot E_{S0} \cdot D_P}{f(v_S)} \cdot \left(\frac{Eeq}{E_{S0}}\right)^{0.27} \quad (94)$$

$$K_{LR} = -\frac{0.29 \cdot E_{S0} \cdot D_P^2}{f(v_S)} \cdot \left(\frac{Eeq}{E_{S0}}\right)^{0.52} \quad (95)$$

$$K_R = \frac{0.17 \cdot E_{S0} \cdot D_P^3}{f(v_S)} \cdot \left(\frac{Eeq}{E_{S0}}\right)^{0.76} \quad (96)$$

Donde:

D_P = Diámetro del pilote.

La siguiente función viene dada por el módulo de Poisson del suelo.

$$f(v_S) = 1 + |v_S - 0.25| \quad (97)$$

v_S = Módulo de Poisson del suelo.

$$Eeq = \frac{E_P \cdot I_P}{\frac{D_P^4 \cdot \pi}{64}} \quad (98)$$

E_P = Módulo de elasticidad del pilote.

I_P = Momento de inercia del pilote.

El parámetro E_{S0} , corresponde a la rigidez del suelo a una vez el diámetro del pilote (D_P) por debajo de la línea de barro. Para calcular este parámetro se acude a la siguiente expresión:

$$E = 2 \cdot G_S \cdot (1 + v_S) \quad (99)$$

Donde G_S , es el módulo de corte del suelo y se establece como:

$$G_S = p_S \cdot C_S^2 \quad (100)$$

Siendo:

p_s = Densidad del terreno (Se toma constante porque no se tienen más datos).

C_s = Velocidad de la onda de corte.

Es necesario destacar, que para obtener valores de la rigidez más realista, habría que acudir a modelos computacionales más avanzados, ya que en este caso se realiza un cálculo simplificado. Sin embargo, este procedimiento queda fuera del alcance de este proyecto.

PARÁMETRO	SÍMBOLO	VALOR	UNIDADES
Profundidad a 1DP	z_z	7.4	m
Rigidez del suelo a 1DP	E_{SO}	149	MPa
Rigidez lateral	K_L	3955	MN/ m
Rigidez de acoplamiento cruzado	K_{LR}	-27857	MN
Rigidez de rotación	K_R	385520	MN/rad

Tabla 17. Rigidez de la cimentación.

3.4.2. Deformaciones

Una vez se poseen las rigideces de la cimentación, se pueden calcular la deflexión y la rotación del sistema, obteniendo los siguientes resultados:

PARÁMETRO	SÍMBOLO	VALOR	UNIDADES
Deflexión del pilote	$despx$	0.03	m
Rotación del pilote	rot	0.21	$^{\circ}$

Tabla 18. Deformaciones.

Se comprueba a posteriori, que se cumple con las condiciones establecidas en el criterio de diseño.

CONDICIÓN	VALOR	CUMPLE
$Despx < 0.2$ m	$0.03m < 0.2$ m	SI
$Rot < 0.5^{\circ}$	$0.21^{\circ} < 0.5^{\circ}$	SI

Tabla 19. Condiciones deformaciones.

En caso de no haber cumplido la condición, hubiese sido necesario aumentar las dimensiones del pilote, hasta que se obtuviesen valores adecuados.

3.5. Frecuencia natural y factores de amplificación dinámicos

Para poder calcular la frecuencia natural del sistema en base flexible (aerogenerador-cimentación), es necesario hallar previamente una serie de coeficientes de flexibilidad, así como la frecuencia en base fija (aerogenerador).

La frecuencia natural del sistema en base flexible, ha de estar por encima del valor máximo de 1P y a su vez ser inferior al valor de mínimo de 3P, para así evitar las frecuencias de vibración más negativas. El 1P se aumenta el 10%, ya que con el paso del tiempo si el suelo va perdiendo rigidez, la frecuencia natural podría ser más pequeña y podría acabar dentro del 1P. Además de esta, hay que tener en consideración todas las pautas descritas en la metodología de cálculo.

3.5.1. Frecuencia natural

En la figura 19 se muestra el margen tan pequeño en el que puede estar comprendida la frecuencia natural en base flexible del conjunto (entre 0.22-0.24 Hz), para el caso concreto del aerogenerador seleccionado en este caso (Vestas V164).

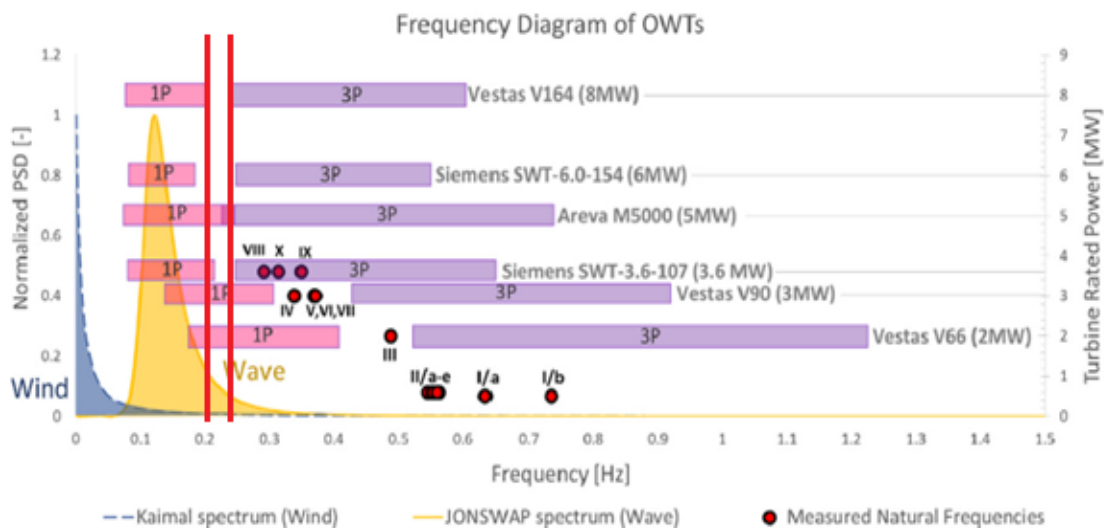


Figura 19. Frecuencias para diferentes aerogeneradores. (Obtenida de Arany et al. [14]).

En la tabla 20, se muestra el resumen de los parámetros obtenidos en el cálculo de la frecuencia natural del aerogenerador.

PARÁMETRO	SÍMBOLO	VALOR	UNIDADES
1DP máximo (Aumentado 10%)	f_{\min}	0.22	Hz
3DP mínimo	f_{\max}	0.24	Hz
Coefficiente de flexibilidad de la subestructura	C_S	0.63	-
Coefficiente de flexibilidad rotacional de la cimentación	C_R	0.78	-
Coefficiente de flexibilidad lateral de la cimentación	C_L	0.997	-
Frecuencia natural en base fija	f_{FB}	0.45	Hz
Frecuencia natural en base flexible	f_0	0.223	Hz

Tabla 20. Frecuencia natural.

3.5.2. Factores dinámicos de amplificación

Siguiendo lo descrito con anterioridad, los factores de amplificación dinámica se calculan mediante la frecuencia pico de la onda y un factor de amortiguamiento. Para elegir el factor de amortiguamiento, tenemos que tener en cuenta las dos direcciones principales en las que las fuerzas actúan en el aerogenerador. Por un lado, tenemos la dirección en la misma línea en la que viene el viento (a lo largo, x) y la dirección de viento de costado (de lado, y).

PARÁMETRO	SÍMBOLO	VALOR	UNIDADES
Factor de amortiguamiento, viento a lo largo (x)	ξ_x	2	%
Factor de amortiguamiento, viento de costado (y)	ξ_y	0.5	%

Tabla 21. Factores de amortiguamiento.

PÁRAMETRO	SÍMBOLO [Unidad]	W-2	W-4
Frecuencia de la ola	f_e [Hz]	0.0962	0.0916
Amplificación dinámica-Viento a lo largo	DAF _x [-]	1.2209	1.1979

Amplificación dinámica-Viento de costado	DAFy[-]	1.2280	1.2023
--	---------	--------	--------

Tabla 22. Factores de amplificación dinámica.

Una vez se tienen estos parámetros, es necesario actualizar las cargas debidas a las olas, así como recalcular el momento total.

3.6. Cargas de las olas con los factores de amplificación dinámica

A la hora de aplicar los factores de amplificación de carga a las olas, se escoge el mayor entre (DAFx y DAFy).

PÁRAMETRO	SÍMBOLO [Unidad]	W-2	W-4
Fuerza máxima de ola total	$F_{wvavemax}[MN]$	1.11	1.44
Momento máximo de ola total	$M_{wvavemax}[MNm]$	46.02	56.07
Fuerza máxima de ola total con DAF	$F_{wvavemaxTOTAL}[MN]$	1.36	1.73
Momento máximo de ola total con DAF	$M_{wvavemaxTOTAL}[MNm]$	56.56	67.41

Tabla 23. Cargas de las olas con DAF.

3.7. Resumen de las cargas obtenidas en los dos peores escenarios de carga

En la tabla 24, se resumen las cargas que se dan en los dos escenarios más negativos, definidos anteriormente. Escogiendo de entre los dos el más negativo, para realizar las diferentes comprobaciones a pandeo y la vida a fatiga.

CARGA	ESCENARIO DE OLA EXTREMA E2	ESCENARIO DE VIENTO EXTREMO E3
Carga media de viento [MNm]	152.62	152.62
Carga máxima de viento [MNm]	233.30	470.16
Carga mínima de viento [MNm]	88.98	87.03
Carga máxima de ola [MNm]	67.41	56.52
Carga mínima de ola [MNm]	-67.41	-56.52
Carga de corriente [MNm]	5.05	5.05

Carga máxima combinada [MNm]	305.79	531.74
Carga máxima combinada con factor de carga (1.35) [MNm]	412.82	717.85
Carga mínima combinada [MNm]	21.57	30.52
Periodo del ciclo [s]	10.92	10.39
Frecuencia del ciclo [Hz]	0.0916	0.0962
Tensión máxima [MPa]	86.11	149.73
Amplitud máxima de la tensión del ciclo [MPa]	105.09	165.65

Tabla 24. Resumen de escenarios de carga.

Una vez calculado el momento total, se ha de comparar con el momento de plastificación de la sección del pilote, cuyo valor se muestra en la tabla 24.

PARÁMETRO	SÍMBOLO	VALOR	UNIDADES
Momento de plastificación de la sección	M_{plastifi}	1146	MNm
Momento total calculado (con factor de carga 1.35)	$M_{\text{TOTALBACK}}$	717.84	MNm

Tabla 25. Momento de plastificación y momento total.

3.8. Vida a fatiga

Una vez se tienen todas las cargas se puede llevar a cabo el cálculo de la vida a fatiga, para así hallar el número de ciclos que es capaz de aguantar la estructura.

PARÁMETRO	ESCENARIO E2	ESCENARIO E3
Amplitud de la tensión de ciclo máxima [MPa]	105.09	165.65
Número de ciclos que aguanta el pilote	$1.60 \cdot 10^6$	$4.10 \cdot 10^5$

Tabla 26. Vida a fatiga.

3.9. Comprobación a pandeo

Se realizan las comprobaciones tanto a pandeo global, como a pandeo local para asegurar la estabilidad de la estructura.

3.9.1. Pandeo global

CONDICIÓN	VALOR	CUMPLE
$\frac{N}{N_P \cdot k} + \frac{\beta_M \cdot M}{M_P} + \Delta n \leq 1$	0.75 < 1	SI

Tabla 27. Pandeo Global.

3.9.2. Pandeo local

Se escoge la condición de contorno como (BC=2) en la parte superior e inferior, para así estar del lado de la seguridad. Se trata de la configuración articulado-articulado.

CONDICIÓN	VALOR	CUMPLE
$\frac{N}{A} + \frac{M}{W_P} \leq \frac{\sigma_{S,RCR}}{\gamma_M}$	231 < 1663	SI

Tabla 28. Pandeo Local.

3.10. Cumplimiento de los criterios de diseño

Las diferentes comprobaciones para garantizar el cumplimiento de los criterios de diseño se muestran en la tabla 29.

CONDICIÓN	VALOR	CUMPLE
$M_{tot} < M_{plasticación}$ [MNm]	717.84 < 1146	SI
$\sigma_{max} < f_{yd}$ [Mpa]	149.73 < 322	SI
$F_{tot} < F_R$ [MN]	4.34 < 27.78	SI
$M_{tot} < M_R$ [MNm]	717.84 < 4478	SI
$Desp_x < 0.2$ [m]	0.03 < 0.2	SI
$Rot < 0.5$ [°]	0.21 < 0.5	SI

Fatiga [Ciclos]	$4.31 \cdot 10^5$	SI
Pandeo	-	SI

Tabla 29. Resumen de condiciones.

3.11. Resumen de dimensiones finales

Las dimensiones finales del pilote y de la pieza de transición quedan recogidas en las diferentes tablas resumen mostradas a continuación.

3.11.1. Pilote

PARÁMETRO	SÍMBOLO	VALOR	UNIDADES
Diámetro del pilote	D_P	7.4	m
Espesor de pared del pilote	t_p	0.08	m
Longitud enterrada del pilote	L_{P1}	30.81	m
Longitud total del pilote	L_{PTOT}	84	m
Masa del pilote	m_P	1226	tons

Tabla 30. Dimensiones del pilote.

La longitud del pilote se ha calculado, siguiendo diferentes valores de la rigidez lineal del suelo (nh), con lo que obtienen diferentes longitudes que varían dicha rigidez, escogiendo el valor mayor de la longitud enterrada (LP), el considerado caso más crítico. A continuación se muestra una tabla con los diferentes valores obtenidos.

nh [MN/m ³]		LP [m]	
nh1	5.4	L_{P1}	27.71
nh2	11	L_{P2}	24.03
nh3	22	L_{P3}	20.93
nh4	45	L_{P4}	18.14

Tabla 31. Rango de longitudes enterradas.

3.11.2. Subestructura

PARÁMETRO	SÍMBOLO	VALOR	UNIDADES
Diámetro de subestructura	D_s	7.84	m
Longitud de la subestructura (Hasta línea de barro)	L_s	64	m

Tabla 32. Dimensiones de la subestructura.

3.11.3. Pieza de transición

PARÁMETRO	SÍMBOLO	VALOR	UNIDADES
Diámetro de la pieza de transición	D_s	7.84	m
Espesor de pared de la pieza de transición	t_{TP}	0.15	m
Espacio entre pilote y pieza de transición	t_G	0.07	m
Longitud de la pieza de transición	L_{TP}	18	m
Masa de la pieza de transición	m_{TP}	522	tons

Tabla 33. Dimensiones de la pieza de transición.

4. CONCLUSIONES

Un aerogenerador offshore junto con su sistema de cimentación por monopilote es una estructura sensible a numerosos parámetros, como pueden ser la frecuencia natural del conjunto o la rigidez de la cimentación. Por este motivo se han escogido los casos de carga más negativos, y así dimensionar la estructura para que sea capaz de resistir todos los esfuerzos previstos que se dan en el sitio escogido para su emplazamiento.

El diseño del monopilote requiere un proceso iterativo que abarca numerosos parámetros independientes entre sí, siendo necesario la implementación de un programa informático para llevar a cabo el proceso de cálculo. A parte de ahorrar tiempo, este programa permite modelar diferentes escenarios y dimensionar un pilote, simplemente cambiando los parámetros relativos a la ubicación del aerogenerador offshore (viento, olas, corrientes...).

Por otro lado se ha de recalcar la utilización de diferentes hipótesis de cálculo simplificadas, pudiendo mejorar los resultados obtenidos con modelos computacionales más avanzados.

Entre estas hipótesis destacan la falta de información geotécnica por debajo de la superficie del lecho marino, la utilización de expresiones simplificadas para el cálculo de la rigidez y de la frecuencia natural y la estabilidad del pilote en el proceso de hincado.

Debido a la citada falta de información geotécnica, se estima una velocidad de la onda de corte (C_s) en el suelo, se estima una densidad constante del suelo y además se establece un suelo homogéneo (ausencia de estratos).

Aunque se planteó al comienzo del proyecto, pero no se realizó por falta de tiempo, es interesante realizar un estudio de la influencia de las características del suelo sobre la rigidez y la capacidad portante del pilote, y comprobar su rango de variabilidad, así como estudiar su influencia posterior en las frecuencias naturales. Para el cálculo de las rigideces se han utilizado expresiones simplificadas, siendo necesario utilizar técnicas numéricas más precisas a posteriori, y obtener unos valores más precisos.

Es necesario además, comprobar la estabilidad de las paredes del pilote, para asegurar que soporta las cargas recibidas durante el hincado. Una vez se realiza el estudio de hincado y conocida la energía que trasmite el martillo hidráulico al pilote en el proceso de hincado, se ha de asegurar que el espesor de la pared del pilote sea adecuado para soportar estas cargas. Sin embargo, este estudio se ha omitido en este proyecto.

El diseño y dimensionado del pilote se ha llevado a cabo en todo momento teniendo presente el objetivo de optimizar al máximo el material. Sin embargo, ha de analizarse el conjunto (D_P , t_P , L_P), y asegurar que la cimentación cumple las condiciones establecidas al comienzo del estudio.

Aun habiendo realizado diferentes simplificaciones y a pesar de ser necesaria la realización de las diferentes comprobaciones citadas anteriormente, se considera que, el diseño propuesto para la cimentación de un aerogenerador offshore es seguro y suficiente para soportar todas las acciones a las que pueda estar sometida la cimentación propuesta.

5. BIBLIOGRAFIA

[1] Arany L, Bhattacharya S, Macdonald J, Hogan SJ. Design of monopiles for offshore wind turbines in 10 steps. *Soil Dyn Earthq Eng* 2017; 92:126-152.

[2] American Petroleum Institute. Recommended practice API-2A-WSD. Planning, Designing, and Constructing Fixed Offshore Platforms—Working Stress Design; 2005.

- [3] Randolph M y Gourvenec MRS. Offshore Geotechnical Engineering. New York (USA): Spon Press; 2011.
- [4] GermanischerLloyd. Guideline for the certification of offshore wind turbines. Germany; 2005.
- [5] Poulos H, Davis E. Pile foundation analysis and design. Rainbow-Bridge Book Co.; 1980.
- [6] Det Norske Veritas. Offshore Standard DNV-OS-J101 Design of offshore wind turbine structures. Høvik, Norway; 2014.
- [7] International Electrotechnical Commission. International Standard IEC-61400-1 wind turbines – Part 1: design requirements, 3rd ed.; 2005.
- [8] Frohboese P, Schmuck C. Thrust coefficients used for estimation of wake effects for fatigue load calculation. In: Proceedings of the European Wind Energy Conference, Warsaw, Poland; 2010.
- [9] European Committee for Standardization. Eurocode 1: Actions on structures - Part 1-4: General actions - Wind actions; 2005.
- [10] Morison JR, Johnson JW, Schaaf SA. The force exerted by surface waves on piles. J Pet Technol 1950; 2:149–54.
- [11] International Electrotechnical Commission. International Standard IEC-61400-3 wind turbines - Part 3: design requirements for offshore wind turbines, 1.0 ed.; 2009.
- [12] Shadlou M, Bhattacharya S. Dynamic stiffness of monopiles supporting offshore wind turbine generators. Soil Dyn Earthq Eng 2016;15–32.
- [13] Arany L, Bhattacharya S, Adhikari S, et al. An analytical model to predict the natural frequency of offshore wind turbines on three-spring flexible foundations using two different beam models. Soil Dyn Earthq Eng 2015; 74:40–5.
- [14] Arany L, Bhattacharya S, Macdonald JHG, Hogan SJ. Closed form solution of Eigen frequency of monopile supported offshore wind turbines in deeper waters incorporating stiffness of substructure and SSI. Soil Dyn Earthq Eng. 2016; 83:18–32.

- [15] Det Norske Veritas. DNV-RP-C203-Fatigue design of offshore steel structures. Recomm Pract; 2005.
- [16] Luis Moncada (2011). Definición de los parámetros de respuesta transitoria. Control de procesos. Recuperado de http://plantscontrol.blogspot.com.es/2012/02/8_3049.html
- [17] Det Norske Veritas. DNV-RP-C201-buckling strength of plated structures. Recomm Pract; 2010.
- [18] European Committee for Standardization. Eurocode 3: Designs of steel structures - Part 1-6: Strength and stability of shell structures; 2007.
- [19] Bhattacharya S, Carrington T.M, Aldridge T.R. Buckling considerations in pile design. Frontiers in Offshore Geotechnics: ISFOG; 2005.
- [20] Álamo G, Aznárez J, Padrón L, Martínez-Castro A, Gallego R, Maeso O. Dynamic soil-structure interaction in offshore wind turbines on monopiles in layered seabed based on real data. Elsevier Editorial System (tm) for Ocean Engineering. Manuscript Draft; 2016.
- [21] Frank M. White, (2004), Mecánica de fluidos, Madrid, España: M. McGraw-Hill.
- [22] Observatorio Ambiental de Granadilla (2006). OAG. Canarias, España. Recuperado de <http://www.arcgis.com/apps/webappviewer/index.html?id=7aceb7b46dfd43adae2829f09770cdc5>.
- [23] 4coffshore (2017). 4coffshore, Suffolk, United Kingdom. Recuperado de <http://www.4coffshore.com>.

ESTUDIO PREVIO. DATOS DE PARTIDA

DISEÑO Y DIMENSIONAMIENTO DE LA CIMENTACIÓN DE UN
AEROGENERADOR OFFSHORE EN LAS ISLAS CANARIAS

ÍNDICE

1. OBJETIVO	2
2. CARACTERÍSTICAS DE LAS ISLAS CANARIAS	2
3. ESTUDIO DE LA UBICACIÓN	2
3.1. ZONIFICACIÓN AMBIENTAL.....	3
3.2. BATIMETRÍA.....	4
3.3. DATOS DEL VIENTO.....	4
3.4. CONSIDERACIONES DE LAS UBICACIONES PROPUESTAS	6
4. UBICACIÓN FINAL.....	6
4.1. DATOS DE BATIMETRÍA	7
4.2. DATOS DE VIENTO	8
4.2.1. <i>Velocidad media del viento</i>	8
4.2.2. <i>Calculo de la velocidad del viento a la altura del rotor</i>	9
4.2.3. <i>Dirección predominante del viento</i>	12
4.3. DATOS MARINOS	13
4.3.1. <i>Datos del oleaje</i>	13
4.3.2. <i>Datos nivel del mar</i>	16
4.3.3. <i>Datos de las corrientes</i>	17
4.4. DATOS GEOTÉCNICOS	19
4.4.1. <i>Morfología y perfil estratigráfico de la ubicación seleccionada</i>	19
4.4.2. <i>Rigidez lineal del suelo (nh)</i>	20
5. ELECCIÓN DEL AEROGENERADOR.....	21
6. BIBLIOGRAFÍA.....	21

1. OBJETIVO

A través del presente estudio previo se establecen las condiciones de partida para la realización del proyecto “Diseño y dimensionamiento de la cimentación de un aerogenerador offshore en las Islas Canarias”. Es de gran importancia seleccionar una localización óptima donde se garanticen una serie de características funcionales de la ubicación, como pueden ser:

- Profundidad de la lámina de agua (o lecho marino) factible.
- Calidad del viento.
- Legislación aplicable en la zona.
- Cargas debidas al mar, que actúan sobre la estructura.

Una vez se haya recopilado dicha información se podrá seleccionar el aerogenerador y seguidamente, realizar el diseño y dimensionamiento de la cimentación.

2. CARACTERÍSTICAS DE LAS ISLAS CANARIAS

El recurso eólico en Canarias es un bien muy valioso para producir energía. Sin embargo el territorio es pequeño, para la colocación de aerogeneradores por ello la solución de ubicarlos en el mar puede ser muy atractiva. Sin embargo, una vez mar adentro, a unos pocos kilómetros de la costa, la profundidad del lecho marino aumenta hasta límites inalcanzables para la tecnología actual. Es por ello necesario instalar los aerogeneradores offshore relativamente cerca a las costas, encontrando el otro gran problema asociado a esta forma de producción de energía, la protección legislativa de las zonas costeras, lo que no facilita el desarrollo de esta nueva tecnología en el territorio canario.

3. ESTUDIO DE LA UBICACIÓN

Atendiendo a los tres parámetros principales a la hora de seleccionar una localización adecuada, como son la batimetría (profundidad del lecho marino), el potencial eólico y la legislación aplicable, se proponen cuatro ubicaciones factibles como pudieran ser:

- Canal entre Fuerteventura-Lanzarote.
- Norte de Tenerife.
- Sur de Fuerteventura.
- Sureste de Gran Canaria.

3.1. Zonificación ambiental

A continuación, en la figuras 1 y 2 se puede observar qué zonas son aptas, cuáles tienen condicionantes y cuáles están prohibidas, para la implantación de un aerogenerador offshore. Dicha información procede del Ministerio de energía, turismo y agenda digital, del Gobierno de España, a través del instituto para diversificación y ahorro de energía (IDAE) [2].



Figura 1. Restricciones zonales del territorio español. (Obtenida de [2]).



Figura 2. Restricciones zonales en Canarias. (Obtenida de [2]).

3.2. Batimetría

La batimetría es posiblemente el parámetro más restrictivo, después de la legislación medio ambiental, ya que no es posible salvar grandes profundidades con la tecnología actual. Para obtener la batimetría (profundidad del lecho marino), de cada zona en concreto, se procesa la información geográfica facilitada por el Observatorio Ambiental de Granadilla (OAG) [1].

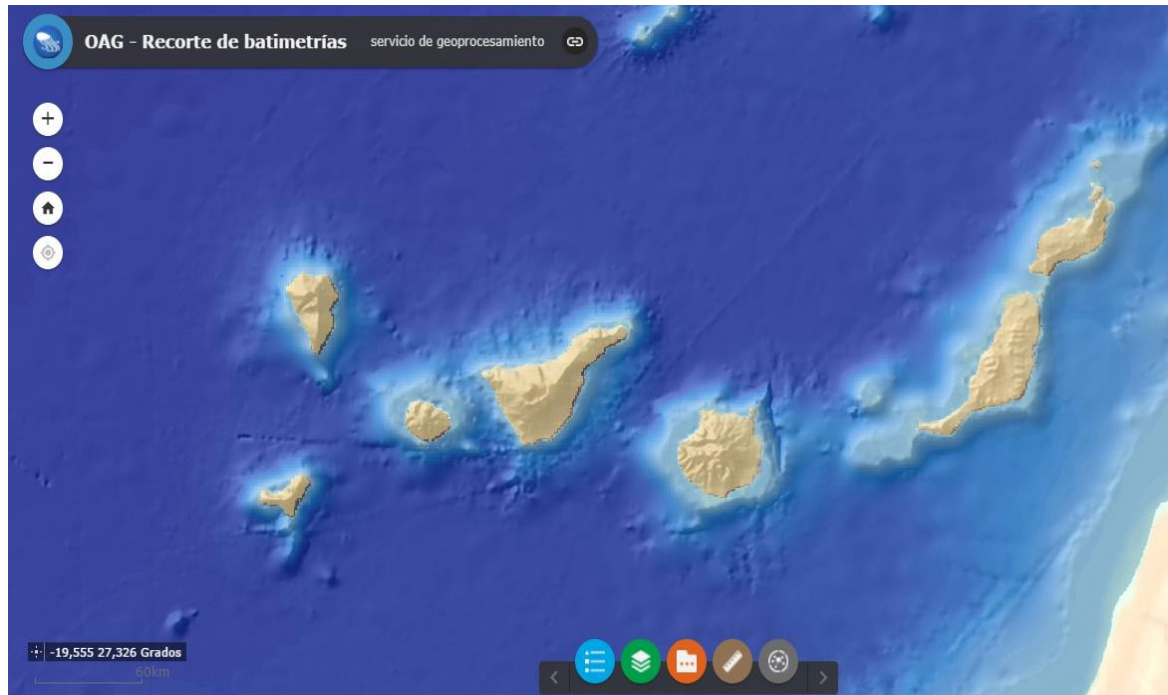


Figura 3. Batimetría Islas Canarias. (Obtenida de [1]).

3.3. Datos del viento

Para los datos del viento se utilizan, como punto de partida, los facilitados por el Ministerio de energía, turismo y agenda digital, del Gobierno de España. El IDAE [2], facilita el mapa eólico de España, donde destacan las zonas con mayor potencial eólico del territorio canario.

Una vez se ha seleccionado la ubicación final del aerogenerador, se complementan dichos datos, con los facilitados por la AEMET (Agencia estatal de meteorología), a través de la estación más cercana a la ubicación final del aerogenerador.



Figura 4. Mapa eólico español. (Obtenida de [2]).



Figura 5. Mapa eólico en Canarias. (Obtenida de [2]).

3.4. Consideraciones de las ubicaciones propuestas

- Batimetría

Las diferentes localizaciones propuestas inicialmente, son idóneas debida a su batimetría, ya que en ninguno de los casos se superan los 60 metros de profundidad. El mejor enclave de entre los citados es el canal Fuerteventura-Lanzarote, ya que la profundidad no supera los 20 metros.

- Legislación zonal

La legislación ambiental aplicable, hace que sea necesario descartar una zona, como es la del canal Fuerteventura-Lanzarote, ya que se encuentra marcada en color rojo en el mapa facilitado por la IDAE [2]. Por otro lado, el resto de ubicaciones propuestas, se encuentran en zona amarilla, es decir, tienen condicionantes, que se han de considerar.

- Datos de viento

Los datos de viento para las tres ubicaciones finales factibles, se pueden estimar a partir del mapa eólico que muestra la figura 5, destacando por encima del resto, la localización de la zona sureste de la Isla de Gran Canaria.

4. UBICACIÓN FINAL

La localización finalmente escogida para el aerogenerador offshore, será al sureste de Gran Canaria, frente a la punta de Tarajalillo. Esta ubicación tiene una variación de profundidad, de entre 30 y 60 metros, pudiendo salvarse con los diferentes tipos de cimentaciones comentadas. Se elige esta zona con la intención de aprovechar su enorme potencial eólico, además de por su relativa poca profundidad del lecho marino.

Se escogen unas coordenadas lo más alejadas posibles de la costa, e intentando que la profundidad no supere los 60 metros. Después de escoger la ubicación, se tiene una distancia a la costa de 4300 metros aproximadamente, cuyas coordenadas son:

- X: 452580
- Y: 3069850

Cabe destacar además a favor de la ubicación seleccionada, la cercanía a puerto, con lo que facilita la operación de transporte y montaje del conjunto, tanto aerogenerador, como de la cimentación.

Es importante destacar, que la zona está sujeta a condicionantes, como así designa el IDAE [2] en su mapa de zonas hábiles para eólica marina, sin embargo al tratarse de un proyecto de carácter académico, se supone que es una zona factible para la ubicación de la turbina eólica.

4.1. Datos de Batimetría

La profundidad del lecho marino de la ubicación seleccionada es de 50 metros, lo que facilita la utilización de cimentaciones comunes, como puede ser la cimentación mediante monopilote. Se accede a la información geográfica facilitada por el OAG [1].

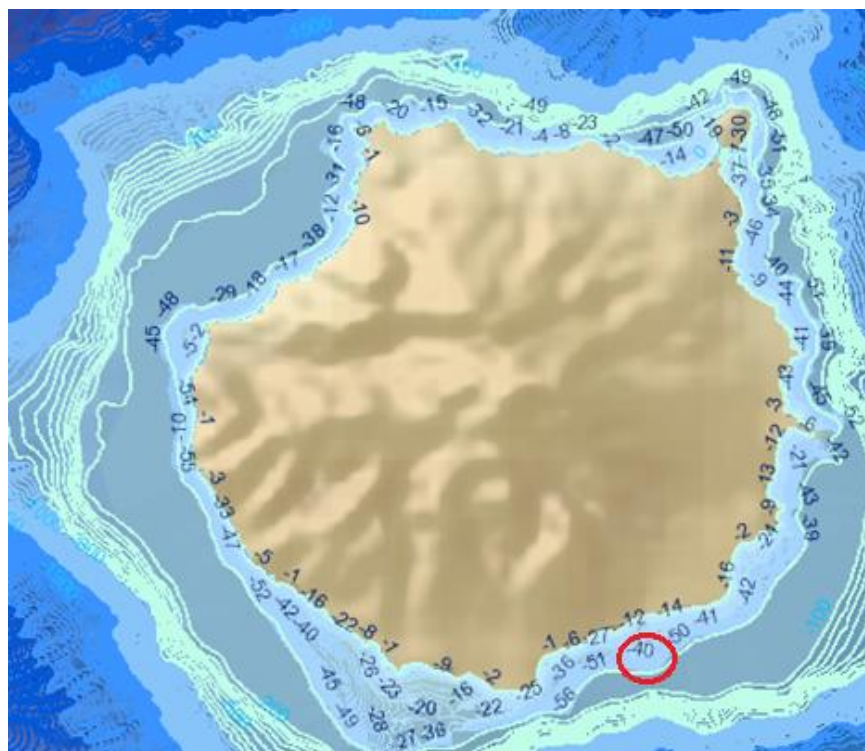


Figura 6. Batimetría Gran Canaria. (Obtenida de [1]).

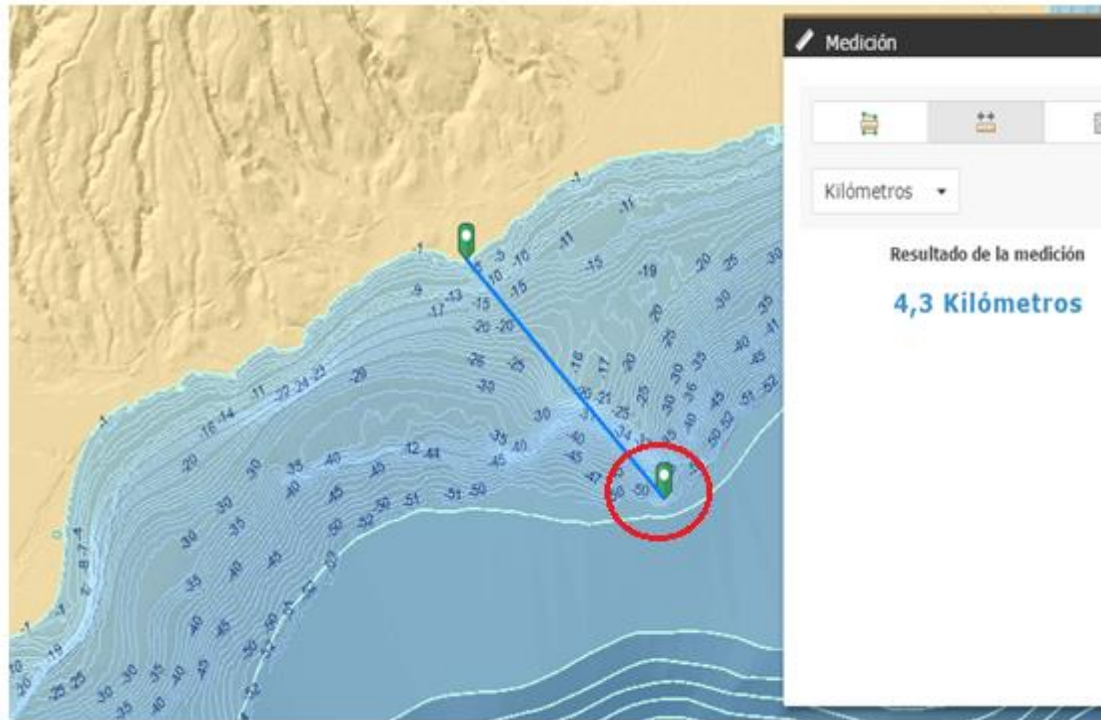


Figura 7. Batimetría Ubicación seleccionada. (Obtenida de [1]).

4.2. Datos de viento

A continuación se va a llevar a cabo un estudio de los datos de viento recogidos en una zona cercana al lugar de la instalación del aerogenerador, como es el aeropuerto de Gando. El periodo de tiempo seleccionado va desde el mes de Enero de 2016, hasta el mes de Enero de 2017, tiempo suficiente para establecer conclusiones y una aproximación de cómo será el comportamiento del viento en la zona de la ubicación del aerogenerador offshore. Como se ha comentado anteriormente, se accede a estos datos por medio de la AEMET (Agencia estatal de meteorología), y por medio del ITC (Instituto tecnológico de Canarias). Para seleccionar el aerogenerador más adecuado tiene que tenerse en cuenta la densidad del aire, la velocidad media del aire y diferentes parámetros del viento.

4.2.1. Velocidad media del viento

La velocidad media del viento en los trece de meses de estudio es de 10.8 m/s, medidos a 10 m de altura sobre el nivel del mar, la altura de la estación anemométrica. Se accede a estos datos por medio de la AEMET [4].

Velocidad Media del Viento por meses	
MES/AÑO	VELOCIDAD (m/s)
ENERO 2016	7.8
FEBRERO 2016	12.4
MARZO 2016	10,9
ABRIL 2016	10.6
MAYO 2016	11,1
JUNIO 2016	14.2
JULIO 2016	15.1
AGOSTO 2016	14.2
SEPTIEMBRE 2016	12.3
OCTUBRE 2016	8.7
NOVIEMBRE 2016	8.0
DICIEMBRE 2016	7.2
ENERO 2017	7.9
TOTAL MEDIA	10.8

Tabla 1. Velocidad media del viento a 10 metros.

4.2.2. *Calculo de la velocidad del viento a la altura del rotor*

La altura del buje del aerogenerador en cuestión se encuentra a 100 metros, sin embargo las medias fueron tomadas a la altura de la estación anemométrica a 10 metros. Para la realización de los cálculos posteriores se ha elegido la altura de 100 metros, la altura del rotor. Se sabe que el viento aumenta con la altura, con lo que ha de realizarse una aproximación siguiendo el siguiente criterio.

$$\frac{V_h}{V_a} = \left(\frac{H_h}{H_a}\right)^\alpha ; V_h = V_a \cdot \left(\frac{H_h}{H_a}\right)^\alpha \quad (1)$$

Dónde:

V_h = Velocidad de viento a calcular (m/s)

V_a = Velocidad de viento conocida (m/s)

H_h = Altura a la que se quieren conocer los datos de viento (m)

H_a = Altura a la que se obtuvieron los datos de viento (m)

α = Coeficiente dependiente de la rugosidad

Sabiendo que la longitud de la rugosidad (z_0) es inferior a 0,1, al encontrarse el aerogenerador en una superficie de agua (Tabla 2), calculamos α mediante la siguiente expresión aproximada:

$$\alpha = 0.24 + 0.04 \ln z_0 + 0.003 \cdot (\ln z_0)^2 \quad (2)$$

Clase de rugosidad	Longitud de rugosidad (m)	Índice de energía (%)	Tipo de paisaje
0	0.0002	100	Superficie del agua
0.5	0.0024	73	Terreno completamente abierto con una superficie lisa.
1	0.03	52	Área agrícola abierta sin cercados ni setos y con edificios muy dispersos.
1.5	0.055	45	Terreno agrícola con algunas casas y setos de 8 metros de altura con una distancia aproximada de 1250 m.
2	0.1	39	Terreno agrícola con algunas casas y setos de 8 metros de altura con una distancia aproximada de 500 m.

2.5	0.2	31	Terreno agrícola con muchas casas, arbustos y plantas, o setos de 8 metros de altura con una distancia aproximada de 250 m.
3	0.4	24	Pueblos, ciudades pequeñas, terreno agrícola, bosques y terreno accidentado y muy desigual.
3.5	0.8	18	Ciudades con edificios altos.
4	1.6	13	Ciudades muy grandes con edificios muy altos.

Tabla 2. Clases de rugosidad.

$$\alpha = 0.24 + 0.04 \ln(0.0002) + 0.003 \cdot (\ln(0.0002))^2 = 0.11694$$

Una vez aplicadas las expresiones correspondientes obtenemos los siguientes resultados para velocidades medias correspondientes a 100 m de altura (V_b):

MES/AÑO	VELOCIDAD V_a (m/s)	VELOCIDAD V_b (m/s)
ENERO 2016	7.8	10.2
FEBRERO 2016	12.4	16.2
MARZO 2016	10,9	14.3
ABRIL 2016	10.6	13.9
MAYO 2016	11,1	14.5
JUNIO 2016	14.2	18.6
JULIO 2016	15.1	19.8
AGOSTO 2016	14.2	18.6
SEPTIEMBRE 2016	12.3	16.1

OCTUBRE 2016	8.7	11.4
NOVIEMBRE 2016	8.0	10.5
DICIEMBRE 2016	7.2	9.4
ENERO 2017	7.9	10.3
TOTAL MEDIA	10.8	15.2

Tabla 3. Velocidad media del viento a 10 metros y 100 metros.

Según los datos obtenidos se tiene una velocidad media a la altura del buje del aerogenerador de aproximadamente 15.2 m/s, para los trece meses que se realiza el estudio.

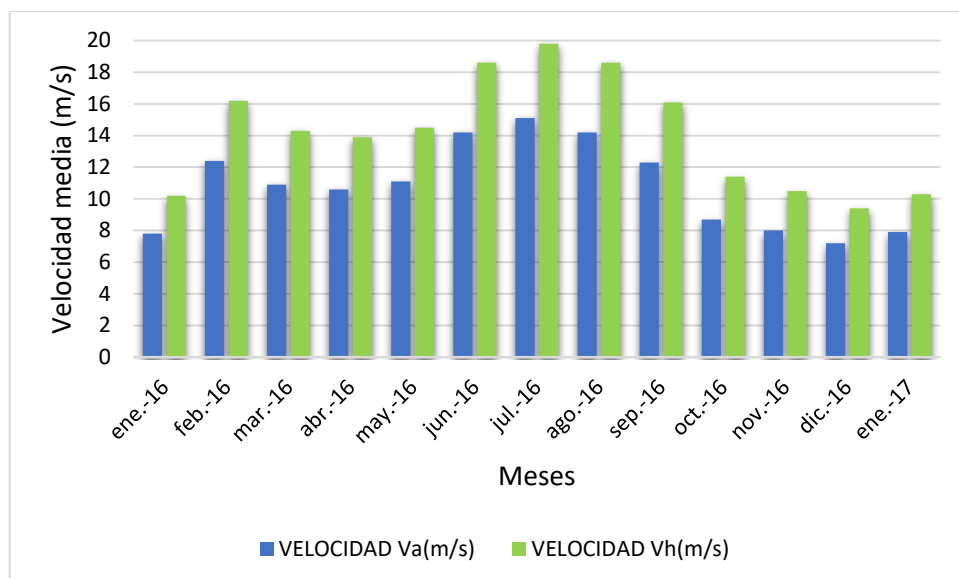


Figura 8. Velocidad media del viento a 10 metros y 100 metros.

4.2.3. Dirección predominante del viento

La dirección dominante del viento dominante en esta zona de la isla de Gran Canaria es la NNE, según la información facilitada por el ITC [3], la AEMET [4] y complementada por windfinder [5].

En la figura 9 se muestra la rosa de los vientos, para la ubicación seleccionada, proporcionada por la página web nombrada anteriormente. Dónde se muestra claramente que la dirección dominante del viento es la NNE.

Distribución de la dirección del viento en (%) Año

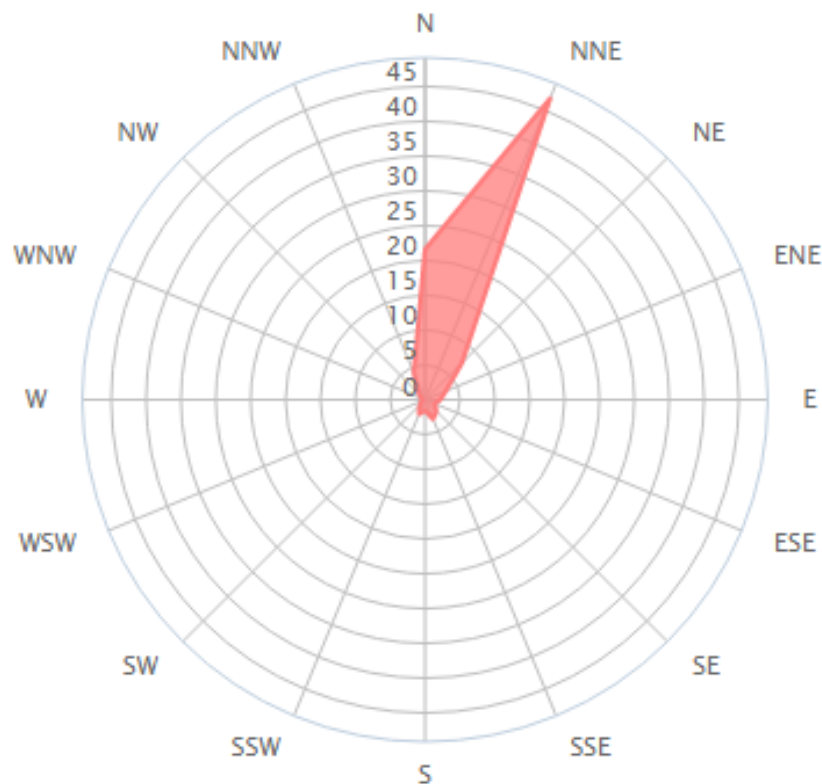


Figura 9. Rosa de los vientos. (Obtenida de [3]).

4.3. Datos marinos

Los datos marinos han sido facilitados por el ministerio de fomento del Gobierno de España, a través del organismo de puertos del estado [6].

4.3.1. Datos del oleaje

Los siguientes datos han sido tomados para periodos de retorno de muestreo se han adaptado a los disponibles que son de entre 25 y 50 años. La boya seleccionada, de la cual provienen los datos, es la boya del este cercana a la costa de Telde, al este de la isla de Gran Canaria. Se toman como correctos, los datos proporcionados, debido a la cercanía de la situación de la boya a la ubicación del aerogenerador, siendo además la única fuente de datos disponible en la zona sureste de la isla.

Los datos que se han tomado con el fin de realizar el diseño y dimensionamiento de la instalación han sido los siguientes:

- **Altura significativa de la ola con un periodo de retorno de 50 años (HS50)**

Esta altura significativa de ola se refiere a una ola de altura equivalente a la altura significativa de la ola registrada en 50 años. La ola significativa es la media del tercio más alto de todas las olas en el transcurso del estado del mar en 3 horas. Los datos han sido facilitados por puertos del estado [6].

HS50 = 6.57 m

- **Periodo pico de la ola con un periodo de retorno de 50 años (TS50)**

Este periodo pico muestra el valor máximo de la superación del umbral marcado para el periodo en 50 años. Los datos han sido facilitados por puertos del estado [6].

TS50 = 15.2 s

- **Altura máxima de ola con un periodo de retorno de 25 años (Hm25)**

La altura máxima de ola es la ola más alta, registrada en el mismo estado de mar anterior, durante tres horas, en un periodo de estudio de 25 años. Los datos han sido facilitados por puertos del estado [6].

MES	AÑO	Hm(m)
ENERO	1994	9.5
FEBRERO	2015	7.6
MARZO	2001	6.8
ABRIL	2004	6.8
MAYO	2015	5.8
JUNIO	2000	5.7
JULIO	2004	5.5
AGOSTO	2016	5.2
SEPTIEMBRE	1995	5.3
OCTUBRE	1998	6.5
NOVIEMBRE	2002	5.7

DICIEMBRE	2006	7.2
-----------	------	-----

Tabla 4. Alturas máximas de ola.

Hm25 = 9.5 m

- **Periodo máximo de la ola con un periodo de retorno de 25 años (Tm25)**

Este periodo máximo hace referencia, al periodo del estado de mar donde se encuentra la ola máxima en el periodo de 25 años. Se calcula mediante la expresión detallada en la DNV-OS-J101 [7].

$$T_m = 11.1 \cdot \sqrt{\frac{H_m}{g}} \quad (3)$$

$T_{m25} = 11.1 \cdot \sqrt{\frac{9.5}{9.8}} = 10.92 \text{ s}$

Una vez se poseen los datos, de los periodos de retorno de entre 25 y 50 años, es necesario conocer los mismos datos de las olas, pero para el periodo de 1 año. Para ello se realizan estimaciones conservadoras por medio de las expresiones recogidas en la DNV-OS-J101 [7].

- **Altura significativa de la ola con un periodo de retorno de 1 año (HS1)**

La DNV-OS-J101 [7] indica que se puede escoger un valor de confianza del 80%. O que dicho valor puede ser hallado, mediante la distribución de Weibull, obteniendo un valor aproximado de.

HS1= 4.60 m

- **Periodo pico de la ola con un periodo de retorno de 1 año (TS1)**

Este periodo pico para 1 año, se calcula mediante la siguiente expresión, de la DNV-OS-J101 [7]:

$$TS = 11.1 \cdot \sqrt{\frac{HS}{9.8}} \quad (4)$$

TS1 = 7.60 s

- **Altura máxima de ola con un periodo de retorno de 1 año (Hm1)**

La altura máxima de ola para 1 año, se calcula utilizando la siguiente expresión, en de la DNV-OS-J101 [7]:

$$Hm = HS \cdot \sqrt{\frac{1}{2} \cdot \ln(N)} \quad (5)$$

Siendo N, el número de olas en el periodo de 3 horas, que se calcula como:

$$N = \frac{3\text{horas}}{TS1} = \frac{10800\text{segundos}}{TS1} \quad (6)$$

$$Hm1 = 4.6 \cdot 1.87 = 8.6 \text{ m}$$

- **Periodo máximo de la ola con un periodo de retorno de 1 año (Tm1)**

El periodo máximo se calcula mediante la ecuación (3), mostrada anteriormente, tomando un valor de:

$$Tm1 = 11.1 \cdot \sqrt{\frac{8.6}{9.8}} = 10.39 \text{ s}$$

4.3.2. Datos nivel del mar

Nuevamente, se acude a la fuente de información proporcionada por puertos del estado [6]. Se seleccionan los datos históricos, el nivel del mar y luego se visualiza la tabla de datos observados para el lugar. Los periodos de muestreo se han adaptado a los disponibles que son de 21 años.

En la tabla 5 se muestran los datos referentes a diferentes estados del mar, tomando como referencia el cero hidrográfico. Se toma como valor máximo de nivel del mar, obtenido durante una pleamar, el de 3.19 metros.

	Niveles (cm)							
	Observados				Marea astronómica			
	Máx	Mín	Med	D.E.	Máx	Mín	Med	D.E.
Pleamar	319	169	239	27	311	173	238	26
Bajamar	146	0	77	26	141	13	78	25
Pleamar viva	319	244	278	16	311	246	276	15
Bajamar viva	112	0	43	17	73	13	45	14
Pleamar muerta	258	169	199	12	223	173	198	11
Bajamar muerta	146	82	116	12	141	95	116	10

Tabla 5. Nivel del mar. (Obtenida de [6]).

El valor del nivel del mar es importante a la hora de realizar los cálculos de la futura cimentación, ya que a los 50 metros proporcionados por la información batimétrica de la zona, se le añadirán estos 3.19 metros correspondientes a la pleamar máxima, obteniendo una lámina de agua de 53.19 metros (profundidad del lecho marino). Este valor de 53.19 metros, corresponde a la profundidad máxima de agua en un periodo de retorno de 21 años.

4.3.3. Datos de las corrientes

Para hallar las cargas debidas a las corrientes marinas se ha de consultar el modelo de corrientes de la DNV-OS-J101 [7], donde designa la ecuación a través de la cual se puede calcular la velocidad total de la corriente, dependiendo de la profundidad (z).

$$v(z) = v_{tide}(z) + v_{wind}(z) \quad (7)$$

Donde:

$$v_{tide}(z) = v_{tide0} \cdot \left(\frac{h+z}{h}\right)^{\frac{1}{7}} \quad (8)$$

$$v_{wind}(z) = v_{wind0} \cdot \left(\frac{h_0+z}{h_0}\right) \quad (9)$$

Cuyos parámetros se definen de la siguiente forma:

$v(z)$ = Velocidad total de la corriente.

z = Variación de la profundidad del mar.

v_{tide0} = Corriente marina de referencia.

v_{wind0} = Corriente generada por el viento de referencia.

h = Profundidad de la lámina de agua (tomada como positiva). En este caso 53.19 metros.

h_0 = Profundidad de referencia para la corriente generada por el viento (Se toman 50 metros).

Los datos de la corriente de referencia de la corriente marina, han sido extraídos de la plataforma online, facilitada por puertos del estado [6]. Se han seleccionando datos históricos, corrientes y por último tablas de máximos por meses, obteniendo los siguientes valores.

MES	AÑO	Corrientes (cm/s)	Dirección
ENERO	2003	71.1	194
FEBRERO	2014	55.0	236
MARZO	2014	60.9	270
ABRIL	2013	58.5	199
MAYO	2014	84.3	303
JUNIO	2002	78.2	238
JULIO	2015	79.6	267
AGOSTO	2013	96.0	230
SEPTIEMBRE	1997	82.7	256
OCTUBRE	2014	70.3	227
NOVIEMBRE	2014	73.8	236
DICIEMBRE	2009	66.7	244

Tabla 6. Velocidad de la corriente marina. (Adaptada de [6]).

La corriente máxima se da en agosto de 2013 y es de 0.96 m/s. A partir de este valor se calcularán posteriormente las cargas debidas a las corrientes.

Por otro lado, para hallar la corriente de referencia generada por el viento, se acude a la DNV-OS-J101 [7], donde se especifica que este parámetro viene dado como:

$$v_{wind0} = k \cdot U_0 \quad (10)$$

Siendo:

k = parámetro de cálculo entre 0.015 y 0.03. (Se selecciona 0.03).

U_0 = Velocidad media del viento en 1 hora, a 10 metros de altura. (En este caso 10.8 m/s).

Sustituyendo los valores obtenemos un valor de 0.33 m/s, para la corriente de referencia generada por el viento. Con lo cual la ecuación (7) para la velocidad total de la corriente a nivel z , particularizada para el caso de estudio del presente proyecto queda como:

$$v(z) = 0.96 \cdot \left(\frac{53.19 + z}{53.19} \right)^{\frac{1}{7}} + 0.33 \cdot \left(\frac{50 + z}{50} \right)$$

Este parámetro, será utilizado en cálculo de las cargas debidas a las corrientes marinas, realizado en la memoria de cálculo.

4.4. Datos geotécnicos

Los obtención de los datos geotécnicos marinos de la ubicación seleccionado, ha sido uno de los puntos más conflictivos en la realizan de este proyecto, ya que existe escasa información de utilidad a la hora de descifrar la composición del fondo marino.

4.4.1. Morfología y perfil estratigráfico de la ubicación seleccionada

La información geológica de esa zona ha sido obtenida a través de administraciones públicas como han sido departamentos de investigación de la Universidad de Las Palmas de Gran Canaria y colaboradores de la plataforma PLOCAN. Se cuenta además, con la información morfológica de los fondos procedente del estudio ecocartográfico del arco sur de Gran Canaria, que realizó el ministerio de Medio Ambiente en el año 2000 [8]. No obstante, este estudio está limitado a los 50 m de profundidad máxima.

El fondo marino, en la ubicación seleccionada, a 50 metros de profundidad, está compuesto por sedimento fino principalmente compuesto por arena. En la figura 10 podemos diferenciar el color amarillo, correspondiente a la zona de colocación, y se indica a su vez la composición del lecho marino (sedimento fino).



Figura 10. Composición del lecho marino. (Obtenida de [8]).

Sin embargo no se poseen datos del suelo, a mayores profundidades, ni datos de perforaciones para saber qué perfil morfológico posee el fondo marino. Los datos que con los que se podrían contar, son indicados como estudios de carácter restringido, que no se encuentran disponibles para el público en general.

- **Suposiciones**

A falta de información al alcance académico, para realizar los cálculos de la cimentación se optará por suponer que a partir de del lecho marino, cuando se hincó el pilote, seguirá existiendo el mismo perfil morfológico de sedimento fino en el total de la profundidad de penetración (longitud enterrada del pilote). Tomando además una densidad, un coeficiente de poisson y el peso del suelo sumergido, constantes en toda esa longitud enterrada, por la mencionada falta de información. En caso de llevarse a ejecución el proyecto, sería necesario realizar un estudio previo, del detalle del perfil morfológico de la ubicación seleccionada.

4.4.2. Rigidez lineal del suelo (nh)

Los valores para la rigidez lineal del suelo, se toman a través de los estándares recomendados en la API – 2GEO [9], vienen dados a través de la siguiente tabla, dónde se establecen los valores de la rigidez lineal del suelo en función del ángulo de fricción interno.

Ángulo de fricción interno (ϕ') [°]	Rigidez lineal del suelo (nh) [MN/m ³]
25	5.4
30	11
35	22
40	45

Tabla 7. Rigidez lineal del suelo. (Obtenida de [9]).

Se realizarán los cálculos, con todos los valores de la rigidez lineal del suelo, ya que no disponemos información detallada del perfil morfológico, escogiendo finalmente el valor de la rigidez lineal del suelo que ofrezca la longitud enterrada mayor del pilote.

5. ELECCIÓN DEL AEROGENERADOR

A la hora de escoger un aerogenerador determinado se han de estudiar varios parámetros del viento, así como la energía que es capaz de producir. Para tomar la decisión final, se realiza un estudio económico en el que se comparan los costes, con la recuperación de la inversión en un determinado periodo de tiempo.

La elección del aerogenerador, se realiza en base al estudio de cuatro modelos de diferentes fabricantes, con diferentes rangos de potencia. Los aerogeneradores elegidos para el estudio han sido los siguientes:

- **Vestas V-164 - 8.0 MW**
- **Senvion 126 - 6.2 MW**
- **Gamesa - 5.0 MW**
- **Enercon E-126 EP - 4MW**

Se pueden encontrar, las especificaciones técnicas de cada uno de ellos, en los catálogos proporcionados por el fabricantes, que de adjuntan al proyecto como documentos complementarios.

Todos los parámetros analizados y calculados, como han sido la distribución de Weibull del viento por meses, la energía producida por meses, los costes y beneficios, considerados para seleccionar el aerogenerador, son especificados y detallados en el “anejo de cálculo. Selección del aerogenerador”.

Una vez obtenidos todos los datos necesarios para tomar la decisión, se escoge el modelo del fabricante **Vestas (V-164 - 8.0 MW)**, ya que es el que mejor resultados arroja para la ubicación seleccionada. Se trata de un aerogenerador de grandes dimensiones, uno de los más grandes que se fabrica en la actualidad, con la gran ventaja de producir una elevada cantidad de energía.

6. BIBLIOGRAFÍA

[1] Observatorio Ambiental de Granadilla (2006). OAG. Canarias, España. Recuperado de <http://www.arcgis.com/apps/webappviewer/index.html?id=7aceb7b46dfd43adae2829f09770cdc5>.

- [2] Instituto para la Diversificación y Ahorro de la Energía. IDAE. Madrid, España. Recuperado de <http://www.idae.es/>.
- [3] Instituto tecnológico de Canarias (2011). ITC. Canarias, España. Recuperado de <http://www.itccanarias.org/web/>
- [4] Agencia estatal de meteorología. AEMET. España. Recuperado de <http://www.aemet.es/>.
- [5] Windfinder. España. Recuperado de <https://www.es.windfinder.com/>.
- [6] Puertos del estado. España. Recuperado de http://portus.puertos.es/Portus_RT/.
- [7] Det Norske Veritas. Offshore Standard DNV-OS-J101 Design of offshore wind turbine structures. Høvik, Norway; 2014.
- [8] Ministerio de agricultura y pesca, alimentación y medio ambiente. Ecocartografía de Las Palmas. España. Recuperado de <http://www.mapama.gob.es/es/costas/temas/proteccion-costa/ecocartografias/>.
- [9] American Petroleum Institute. Recommended practice API-2GEO. Geotechnical and Foundation Design Considerations; 2014.

ANEJO DE CÁLCULO. SELECCIÓN DEL AEROGENERADOR

**DISEÑO Y DIMENSIONAMIENTO DE LA CIMENTACIÓN DE UN
AEROGENERADOR OFFSHORE EN LAS ISLAS CANARIAS**

ÍNDICE

1. OBJETO	2
2. ANÁLISIS DE LOS DATOS DE VIENTO	2
2.1. DESCRIPCIÓN DE LAS VARIACIONES DE VIENTOS POR MESES (DISTRIBUCIÓN DE WEIBULL)	2
3. ELECCIÓN DEL AEROGENERADOR	24
3.1. ENERGÍA PRODUCIDA CADA MES	25
3.1.1. <i>Factor de capacidad</i>	26
3.1.2. <i>Horas equivalentes</i>	26
3.2. RELACIÓN PRECIO-POTENCIA INSTALADA.....	27
4. CONCLUSIONES	29
5. BIBLIOGRAFÍA	30

1. OBJETO

En el presente documento vendrán detallados los diferentes cálculos, tablas y gráficas obtenidas en la elección del aerogenerador particularizadas para los datos de la ubicación final. El principal factor tenido en cuenta es garantizar que el aerogenerador optimice el recurso eólico a la altura del buje, así como hacer una comparativa de la energía producida por los diferentes modelos seleccionados, con las velocidades de viento disponibles.

Los cuatro aerogeneradores seleccionados para el estudio son todos de eje horizontal y de tres palas, que a su vez son los más utilizados en la actualidad, ya que proporcionan un buen rendimiento energético.

Los parámetros definidos en este anejo de cálculo han sido varios, y van desde datos del viento y producción de energía hasta datos económicos, que servirán para tomar la decisión final de cual es elegido para el presente proyecto.

2. ANALISIS DE LOS DATOS DE VIENTO

En este apartado se procede a analizar los diferentes parámetros de viento que pueden ser útiles a la hora de realizar la comparativa entre los aerogeneradores. En la documentación complementaria al proyecto, se adjunta un archivo Excel (“Cálculos viento”), en el que se recogen todos los datos y gráficas de cada parámetro estudiado.

2.1. Descripción de las variaciones de vientos por meses (Distribución De Weibull)

Se va a utilizar la función de Weibull que permite determinar la distribución de velocidades de viento a lo largo de un periodo de tiempo determinado. La fórmula utilizada se designa como:

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

Donde:

k = Factor de forma o k de Weibull.

C = Factor de escala (m/s).

v = Velocidad del viento de cada mes (m/s).

Para poder realizar las distribuciones de velocidades para cada mes, antes se procede al cálculo de los diferentes parámetros de la ecuación.

- **Velocidad de viento de cada mes (m/s)**

Valor que define la marca de clase de diferentes intervalos de velocidades de cada mes, medido en (m/s). Se utilizan los datos de velocidad media de viento, de cada mes, a 100 metros de altura, especificados en el anejo “Estudio previo. Datos de partida”.

MES/AÑO	VELOCIDAD $V_h(m/s)$
ENERO 2016	10.2
FEBRERO 2016	16.2
MARZO 2016	14.3
ABRIL 2016	13.9
MAYO 2016	14.5
JUNIO 2016	18.6
JULIO 2016	19.8
AGOSTO 2016	18.6
SEPTIEMBRE 2016	16.1
OCTUBRE 2016	11.4
NOVIEMBRE 2016	10.5
DICIEMBRE 2016	9.4
ENERO 2017	10.3
TOTAL MEDIA	15.2

Tabla 1. Velocidad media del viento a 100 metros.

• **Factor de forma (k de Weibull)**

El factor de forma se extrae de las tablas proporcionadas por el instituto tecnológico de canarias (ITC) [1], para el Recurso Eólico de Canarias. Una vez tenemos las coordenadas del emplazamiento del aerogenerador entramos en la tabla y determinamos la K de Weibull que viene dada a los 80 metros, y que tendremos que extrapolar hasta que coincide con la altura de colocación del buje del aerogenerador, que se sitúa en 100 metros.

Coord. X (UMT)	Coord. Y (UMT)	Vel. Viento (40m)	Weib k (40m)	Vel. Viento (60m)	Weib k (60m)	Vel. Viento (80m)	Weib k (80m)	Dirección Predomina.
452850	3069850	8.810	1.925	9.210	1.890	9.530	1.850	NNE

Tabla 2. Constate de Weibull de la ubicación. (Obtenida de [1]).

La constante de Weibull a la altura de 100 metros, se halla aplicando la siguiente fórmula:

$$k_{100\ m} = k_{80\ m} \cdot \left[\frac{1 - 0.088 \cdot \ln\left(\frac{Z_{80\ m}}{10}\right)}{1 - 0.088 \cdot \ln\left(\frac{Z_{100\ m}}{10}\right)} \right] \quad (2)$$

$$k_{100\ m} = 1.850 \cdot \left[\frac{1 - 0.088 \cdot \ln\left(\frac{80}{10}\right)}{1 - 0.088 \cdot \ln\left(\frac{100}{10}\right)} \right] = 1.896$$

• **Factor de escala**

El factor de escala muestra la relación que existe entre la variación de velocidad y la altura. Para calcular el factor de escala se utiliza la siguiente expresión, que lo relaciona con la velocidad media de viento, un coeficiente gamma y la k de Weibull.

$$C = \frac{\bar{V}}{\gamma \cdot \left(1 + \frac{1}{k}\right)} \quad (3)$$

Donde:

\bar{V} = Velocidad media del viento de cada mes (m/s).

γ = función gamma.

El valor de la velocidad media total se estable como 15.2 m/s, en la tabla 1.

Antes de hallar el valor de gamma, se ha hallar el valor del parámetro de cálculo x, para poder entrar en tablas.

$$x = 1 + \frac{1}{k} \quad (4)$$

x	$\gamma(x)$	x	$\gamma(x)$	x	$\gamma(x)$	x	$\gamma(x)$
1.00	1.00000	1.25	0.90640	1.50	0.88623	1.75	0.91906
1.01	0.99433	1.26	0.90440	1.51	0.88659	1.76	0.92137
1.02	0.98884	1.27	0.90250	1.52	0.88704	1.77	0.92376
1.03	0.98355	1.28	0.90072	1.53	0.88757	1.78	0.92623
1.04	0.97844	1.29	0.89904	1.54	0.88818	1.79	0.92877
1.05	0.97350	1.30	0.89747	1.55	0.88887	1.80	0.93138
1.06	0.96874	1.31	0.89600	1.56	0.88964	1.81	0.93408
1.07	0.96415	1.32	0.89464	1.57	0.89049	1.82	0.93685
1.08	0.95973	1.33	0.89338	1.58	0.89142	1.83	0.93969
1.09	0.95546	1.34	0.89222	1.59	0.89243	1.84	0.94261
1.10	0.95135	1.35	0.89115	1.60	0.89352	1.85	0.94561
1.11	0.94740	1.36	0.89018	1.61	0.89468	1.86	0.94869
1.12	0.94359	1.37	0.88931	1.62	0.89592	1.87	0.95184
1.13	0.93993	1.38	0.88854	1.63	0.89724	1.88	0.95507
1.14	0.93642	1.39	0.88758	1.64	0.89864	1.89	0.95838
1.15	0.93304	1.40	0.88726	1.65	0.90012	1.90	0.96177
1.16	0.92980	1.41	0.88676	1.66	0.90167	1.91	0.96523
1.17	0.92670	1.42	0.88636	1.67	0.90330	1.92	0.96877
1.18	0.92373	1.43	0.88604	1.68	0.90500	1.93	0.97240

1.19	0.92089	1.44	0.88581	1.69	0.90678	1.94	0.97610
1.20	0.91817	1.45	0.88566	1.70	0.90864	1.95	0.97988
1.21	0.91558	1.46	0.88560	1.71	0.91057	1.96	0.98374
1.22	0.91311	1.47	0.88563	1.72	0.91258	1.97	0.98768
1.23	0.91075	1.48	0.88575	1.73	0.91467	1.98	0.98171
1.24	0.90852	1.49	0.88595	1.74	0.91683	1.99	0.99581
						2.00	1.00000

Tabla 3. Parámetro de cálculo x.

$$x = 1 + \frac{1}{1.896} = 1.53 \rightarrow \gamma = 0.88757$$

A continuación se muestra una tabla resumen de los diferentes factores de escala obtenidos para cada mes:

Factores de escala por mes				
MES/AÑO	VELOCIDAD Vh(m/s)	k (a 100m)	Gamma	C
ene-16	10.2	1.896	0.88757	7.523802
feb-16	16.2	1.896	0.88757	11.94957
mar-16	14.3	1.896	0.88757	10.54807
abr-16	13.9	1.896	0.88757	10.25302
may-16	14.5	1.896	0.88757	10.6956
jun-16	18.6	1.896	0.88757	13.71987
jul-16	19.8	1.896	0.88757	14.60503
ago-16	18.6	1.896	0.88757	13.71987

sep-16	16.1	1.896	0.88757	11.8758
oct-16	11.4	1.896	0.88757	8.408955
nov-16	10.5	1.896	0.88757	7.74509
dic-16	9.4	1.896	0.88757	6.933699
ene-17	10.3	1.896	0.88757	7.597564
Factor de escala medio				10.4289

Tabla 4. Factores de escala por meses.

Una vez calculados todos los parámetros, se puede llevar a cabo la distribución de Weibull $p(v)$ por meses. Se realiza mediante el programa Excel, y se adjunta como documentación complementaria al proyecto.

- **Enero 2016**

ENERO-2016				
v	Velocidad del viento	k (a 100 m)	C	Probabilidad de Weibull
0-1	0,5	1,896	7,5238016	0,022072296
(1-2)	1,5	1,896	7,5238016	0,056686144
(2-3)	2,5	1,896	7,5238016	0,082965158
(3-4)	3,5	1,896	7,5238016	0,100422241
(4-5)	4,5	1,896	7,5238016	0,109019069
(5-6)	5,5	1,896	7,5238016	0,109575275
(6-7)	6,5	1,896	7,5238016	0,103602962
(7-8)	7,5	1,896	7,5238016	0,092998248
(8-9)	8,5	1,896	7,5238016	0,07971819
(9-10)	9,5	1,896	7,5238016	0,065515775
(10-11)	10,5	1,896	7,5238016	0,051769768
(11-12)	11,5	1,896	7,5238016	0,039415818
(12-13)	12,5	1,896	7,5238016	0,028962742
(13-14)	13,5	1,896	7,5238016	0,020565843

(14-15)	14,5	1,896	7,5238016	0,014126911
(15-16)	15,5	1,896	7,5238016	0,009395468
(16-17)	16,5	1,896	7,5238016	0,006054475
(17-18)	17,5	1,896	7,5238016	0,003782605
(18-19)	18,5	1,896	7,5238016	0,002292422
(19-20)	19,5	1,896	7,5238016	0,00134831
(20-21)	20,5	1,896	7,5238016	0,000769938
(21-22)	21,5	1,896	7,5238016	0,000427023
(22-23)	22,5	1,896	7,5238016	0,000230101
(23-24)	23,5	1,896	7,5238016	0,0001205
(24-25)	24,5	1,896	7,5238016	6,1344E-05

Tabla 5. Dist. Weibull Enero 2016.

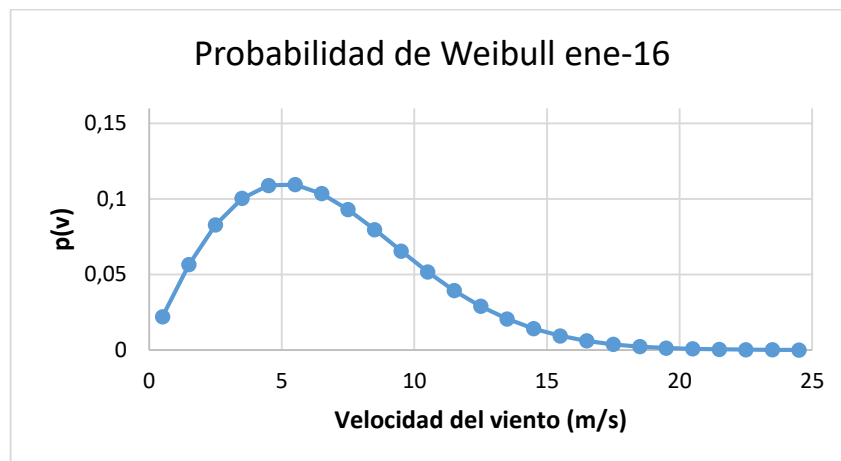


Figura 1. Dist. Weibull Enero 2016.

- **Febrero 2016**

FEBRERO-2016				
v	Velocidad del viento	k (a 100 m)	C	Probabilidad de Weibull
0-1	0,5	1,896	11,94956719	0,009212935
(1-2)	1,5	1,896	11,94956719	0,024236209
(2-3)	2,5	1,896	11,94956719	0,037099263
(3-4)	3,5	1,896	11,94956719	0,047899471
(4-5)	4,5	1,896	11,94956719	0,056530592
(5-6)	5,5	1,896	11,94956719	0,062922723

(6-7)	6,5	1,896	11,94956719	0,067088401
(7-8)	7,5	1,896	11,94956719	0,069129055
(8-9)	8,5	1,896	11,94956719	0,069226043
(9-10)	9,5	1,896	11,94956719	0,067624027
(10-11)	10,5	1,896	11,94956719	0,064610731
(11-12)	11,5	1,896	11,94956719	0,060495824
(12-13)	12,5	1,896	11,94956719	0,05559103
(13-14)	13,5	1,896	11,94956719	0,050192935
(14-15)	14,5	1,896	11,94956719	0,044569469
(15-16)	15,5	1,896	11,94956719	0,038950493
(16-17)	16,5	1,896	11,94956719	0,03352249
(17-18)	17,5	1,896	11,94956719	0,028427005
(18-19)	18,5	1,896	11,94956719	0,023762232
(19-20)	19,5	1,896	11,94956719	0,019586973
(20-21)	20,5	1,896	11,94956719	0,015926206
(21-22)	21,5	1,896	11,94956719	0,012777484
(22-23)	22,5	1,896	11,94956719	0,010117538
(23-24)	23,5	1,896	11,94956719	0,007908554
(24-25)	24,5	1,896	11,94956719	0,006103769

Tabla 6. Dist. Weibull Febrero 2016.

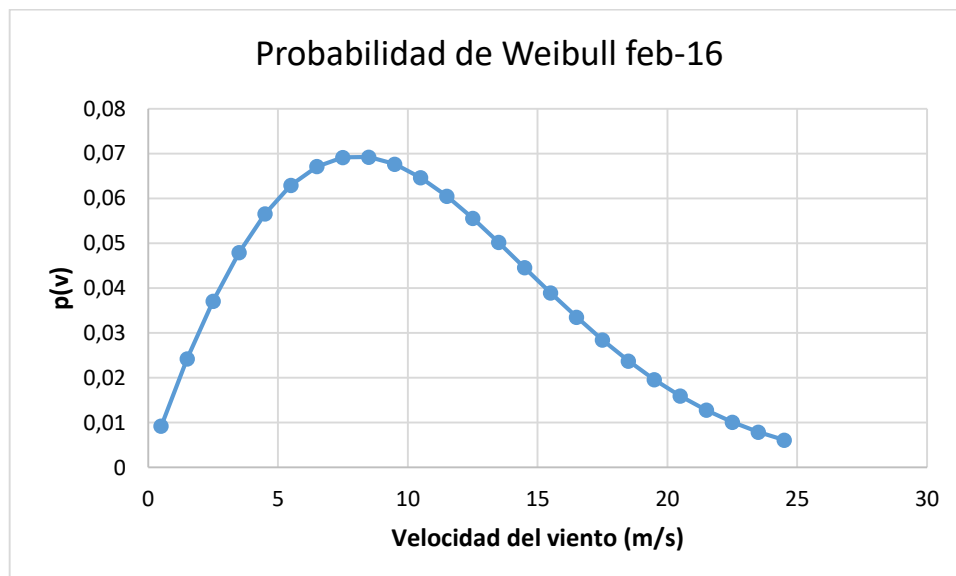


Figura 2. Dist. Weibull Febrero 2016.

- Marzo 2016

MARZO-2016				
v	Velocidad del viento	k (a 100 m)	C	Probabilidad de Weibull
0-1	0,5	1,896	10,54807474	0,011663774
(1-2)	1,5	1,896	10,54807474	0,03054373
(2-3)	2,5	1,896	10,54807474	0,046357495
(3-4)	3,5	1,896	10,54807474	0,059123177
(4-5)	4,5	1,896	10,54807474	0,068677606
(5-6)	5,5	1,896	10,54807474	0,07497506
(6-7)	6,5	1,896	10,54807474	0,078133873
(7-8)	7,5	1,896	10,54807474	0,078427056
(8-9)	8,5	1,896	10,54807474	0,076250158
(9-10)	9,5	1,896	10,54807474	0,072079136
(10-11)	10,5	1,896	10,54807474	0,066426032
(11-12)	11,5	1,896	10,54807474	0,059797996
(12-13)	12,5	1,896	10,54807474	0,052663433
(13-14)	13,5	1,896	10,54807474	0,045427398
(14-15)	14,5	1,896	10,54807474	0,038416883
(15-16)	15,5	1,896	10,54807474	0,031875402
(16-17)	16,5	1,896	10,54807474	0,0259654
(17-18)	17,5	1,896	10,54807474	0,020776511
(18-19)	18,5	1,896	10,54807474	0,016337527
(19-20)	19,5	1,896	10,54807474	0,012630092
(20-21)	20,5	1,896	10,54807474	0,009602432
(21-22)	21,5	1,896	10,54807474	0,007181919
(22-23)	22,5	1,896	10,54807474	0,00528566
(23-24)	23,5	1,896	10,54807474	0,003828773
(24-25)	24,5	1,896	10,54807474	0,002730321

Tabla 7. Dist. Weibull Marzo 2016.

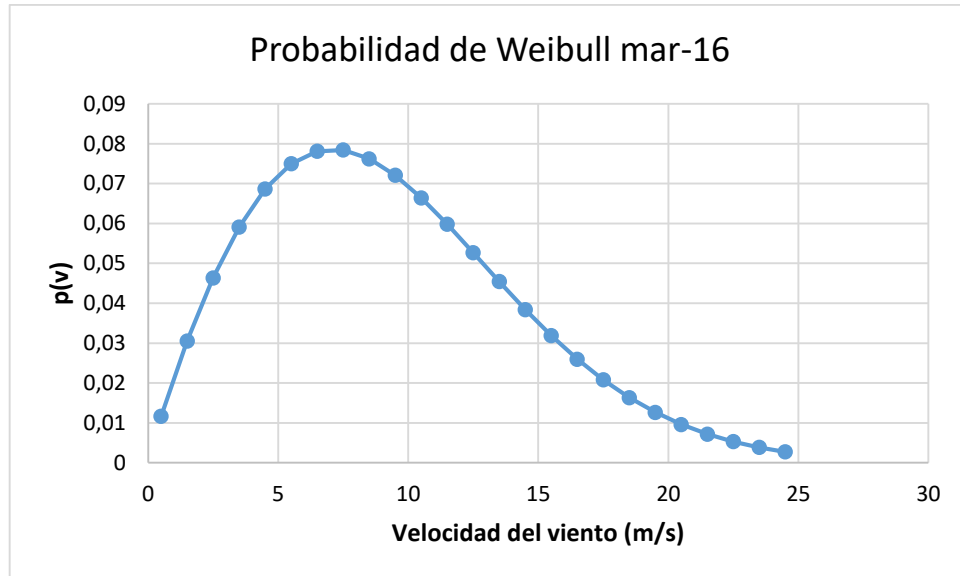


Figura 3. Dist. Weibull Marzo 2016.

- **Abril 2016**

ABRIL-2016				
v	Velocidad del viento	k (a 100 m)	C	Probabilidad de Weibull
0-1	0,5	1,896	10,2530237	0,012306261
(1-2)	1,5	1,896	10,2530237	0,032187603
(2-3)	2,5	1,896	10,2530237	0,048743314
(3-4)	3,5	1,896	10,2530237	0,06196623
(4-5)	4,5	1,896	10,2530237	0,071680882
(5-6)	5,5	1,896	10,2530237	0,077856574
(6-7)	6,5	1,896	10,2530237	0,08065213
(7-8)	7,5	1,896	10,2530237	0,080399797
(8-9)	8,5	1,896	10,2530237	0,077564426
(9-10)	9,5	1,896	10,2530237	0,072692461
(10-11)	10,5	1,896	10,2530237	0,066359875
(11-12)	11,5	1,896	10,2530237	0,059125479
(12-13)	12,5	1,896	10,2530237	0,051493782
(13-14)	13,5	1,896	10,2530237	0,043889537
(14-15)	14,5	1,896	10,2530237	0,036644229
(15-16)	15,5	1,896	10,2530237	0,029993346

(16-17)	16,5	1,896	10,2530237	0,024082299
(17-18)	17,5	1,896	10,2530237	0,018978392
(18-19)	18,5	1,896	10,2530237	0,014686196
(19-20)	19,5	1,896	10,2530237	0,011164005
(20-21)	20,5	1,896	10,2530237	0,008339529
(21-22)	21,5	1,896	10,2530237	0,006123582
(22-23)	22,5	1,896	10,2530237	0,004421083
(23-24)	23,5	1,896	10,2530237	0,00313917
(24-25)	24,5	1,896	10,2530237	0,00219259

Tabla 8. Dist. Weibull Abril 2016.

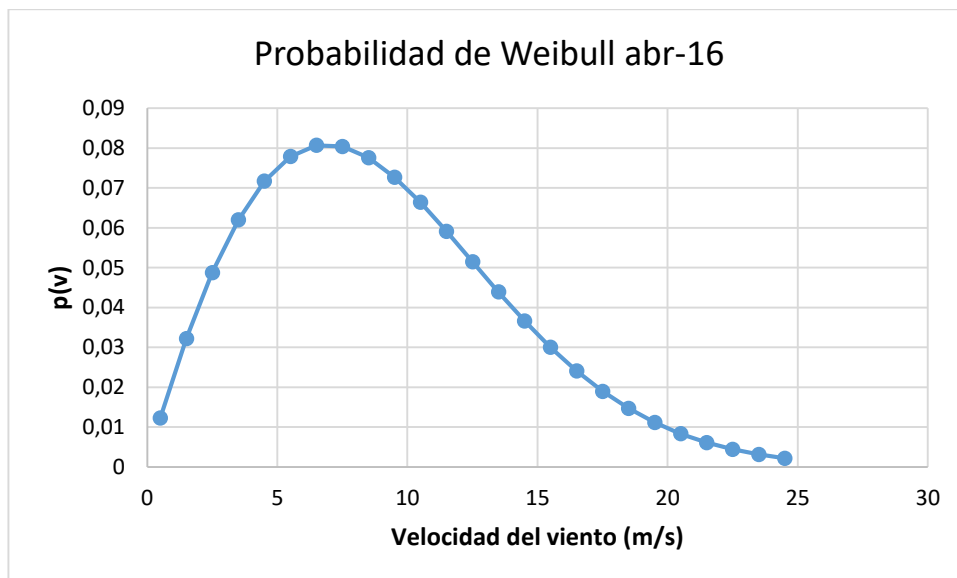


Figura 4. Dist. Weibull Abril 2016.

- Mayo 2016

MAYO-2016				
v	Velocidad del viento	k (a 100 m)	C	Probabilidad de Weibull
0-1	0,5	1,896	10,69560026	0,011361543
(1-2)	1,5	1,896	10,69560026	0,029769056
(2-3)	2,5	1,896	10,69560026	0,045229295
(3-4)	3,5	1,896	10,69560026	0,057771678
(4-5)	4,5	1,896	10,69560026	0,067239299

(5-6)	5,5	1,896	10,69560026	0,073580724
(6-7)	6,5	1,896	10,69560026	0,076897156
(7-8)	7,5	1,896	10,69560026	0,077435803
(8-9)	8,5	1,896	10,69560026	0,075561437
(9-10)	9,5	1,896	10,69560026	0,071718116
(10-11)	10,5	1,896	10,69560026	0,066388323
(11-12)	11,5	1,896	10,69560026	0,060054637
(12-13)	12,5	1,896	10,69560026	0,053167523
(13-14)	13,5	1,896	10,69560026	0,046121327
(14-15)	14,5	1,896	10,69560026	0,039239252
(15-16)	15,5	1,896	10,69560026	0,032766924
(16-17)	16,5	1,896	10,69560026	0,026873362
(17-18)	17,5	1,896	10,69560026	0,021657638
(18-19)	18,5	1,896	10,69560026	0,01715931
(19-20)	19,5	1,896	10,69560026	0,013370806
(20-21)	20,5	1,896	10,69560026	0,010250182
(21-22)	21,5	1,896	10,69560026	0,007733052
(22-23)	22,5	1,896	10,69560026	0,00574288
(23-24)	23,5	1,896	10,69560026	0,004199229
(24-25)	24,5	1,896	10,69560026	0,00302386

Tabla 9. Dist. Weibull Mayo 2016.

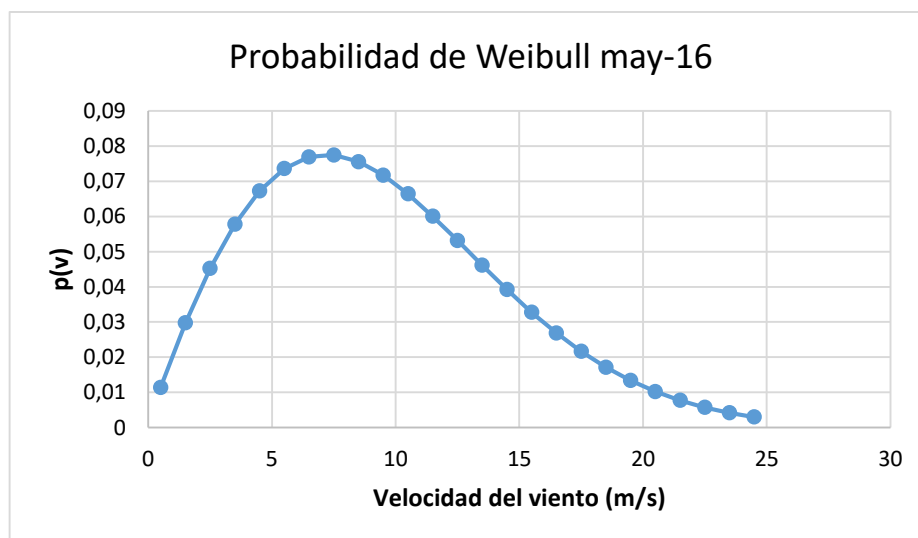


Figura 5. Dist. Weibull Mayo 2016.

- Junio 2016

JUNIO-2016				
v	Velocidad del viento	k (a 100 m)	C	Probabilidad de Weibull
0-1	0,5	1,896	13,71987344	0,00709391
(1-2)	1,5	1,896	13,71987344	0,018735506
(2-3)	2,5	1,896	13,71987344	0,028891064
(3-4)	3,5	1,896	13,71987344	0,03769899
(4-5)	4,5	1,896	13,71987344	0,045106298
(5-6)	5,5	1,896	13,71987344	0,051054539
(6-7)	6,5	1,896	13,71987344	0,055518613
(7-8)	7,5	1,896	13,71987344	0,058517379
(8-9)	8,5	1,896	13,71987344	0,060114158
(9-10)	9,5	1,896	13,71987344	0,060412256
(10-11)	10,5	1,896	13,71987344	0,059547695
(11-12)	11,5	1,896	13,71987344	0,057680476
(12-13)	12,5	1,896	13,71987344	0,054985322
(13-14)	13,5	1,896	13,71987344	0,051642636
(14-15)	14,5	1,896	13,71987344	0,047830259
(15-16)	15,5	1,896	13,71987344	0,043716427
(16-17)	16,5	1,896	13,71987344	0,039454204
(17-18)	17,5	1,896	13,71987344	0,03517749
(18-19)	18,5	1,896	13,71987344	0,030998597
(19-20)	19,5	1,896	13,71987344	0,027007288
(20-21)	20,5	1,896	13,71987344	0,023271069
(21-22)	21,5	1,896	13,71987344	0,019836516
(22-23)	22,5	1,896	13,71987344	0,016731353
(23-24)	23,5	1,896	13,71987344	0,013967037
(24-25)	24,5	1,896	13,71987344	0,0115416

Tabla 10. Dist. Weibull Junio 2016.

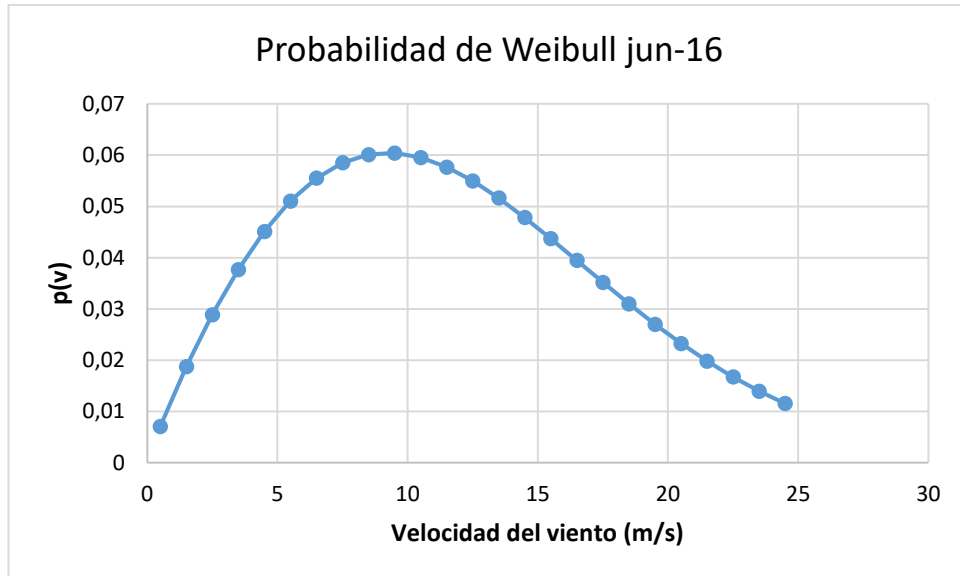


Figura 6. Dist. Weibull Junio 2016.

- **Julio 2016**

JULIO-2016				
v	Velocidad del viento	k (a 100 m)	C	Probabilidad de Weibull
0-1	0,5	1,896	14,60502656	0,006302255
(1-2)	1,5	1,896	14,60502656	0,016669219
(2-3)	2,5	1,896	14,60502656	0,025775495
(3-4)	3,5	1,896	14,60502656	0,033766861
(4-5)	4,5	1,896	14,60502656	0,040608884
(5-6)	5,5	1,896	14,60502656	0,046252303
(6-7)	6,5	1,896	14,60502656	0,050668111
(7-8)	7,5	1,896	14,60502656	0,053858185
(8-9)	8,5	1,896	14,60502656	0,055857433
(9-10)	9,5	1,896	14,60502656	0,05673188
(10-11)	10,5	1,896	14,60502656	0,056574436
(11-12)	11,5	1,896	14,60502656	0,055499339
(12-13)	12,5	1,896	14,60502656	0,053635919
(13-14)	13,5	1,896	14,60502656	0,051122226
(14-15)	14,5	1,896	14,60502656	0,048098926
(15-16)	15,5	1,896	14,60502656	0,044703778

(16-17)	16,5	1,896	14,60502656	0,041066946
(17-18)	17,5	1,896	14,60502656	0,037307259
(18-19)	18,5	1,896	14,60502656	0,033529502
(19-20)	19,5	1,896	14,60502656	0,029822726
(20-21)	20,5	1,896	14,60502656	0,026259497
(21-22)	21,5	1,896	14,60502656	0,022895988
(22-23)	22,5	1,896	14,60502656	0,019772752
(23-24)	23,5	1,896	14,60502656	0,016916035
(24-25)	24,5	1,896	14,60502656	0,014339462

Tabla 11. Dist. Weibull Julio 2016.

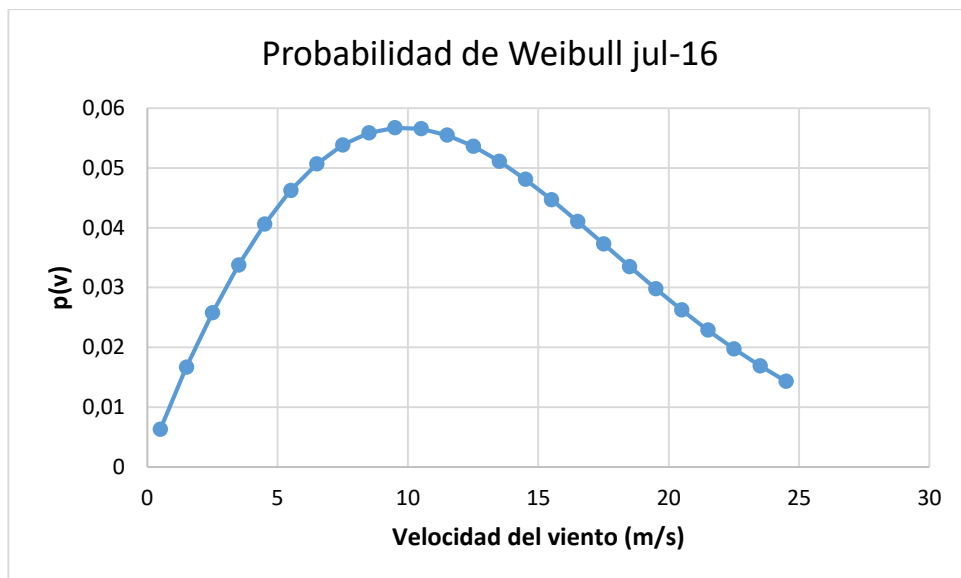


Figura 7. Dist. Weibull JuLio 2016.

- Agosto 2016

AGOSTO-2016				
v	Velocidad del viento	k (a 100 m)	C	Probabilidad de Weibull
0-1	0,5	1,896	13,71987344	0,00709391
(1-2)	1,5	1,896	13,71987344	0,018735506
(2-3)	2,5	1,896	13,71987344	0,028891064
(3-4)	3,5	1,896	13,71987344	0,03769899

(4-5)	4,5	1,896	13,71987344	0,045106298
(5-6)	5,5	1,896	13,71987344	0,051054539
(6-7)	6,5	1,896	13,71987344	0,055518613
(7-8)	7,5	1,896	13,71987344	0,058517379
(8-9)	8,5	1,896	13,71987344	0,060114158
(9-10)	9,5	1,896	13,71987344	0,060412256
(10-11)	10,5	1,896	13,71987344	0,059547695
(11-12)	11,5	1,896	13,71987344	0,057680476
(12-13)	12,5	1,896	13,71987344	0,054985322
(13-14)	13,5	1,896	13,71987344	0,051642636
(14-15)	14,5	1,896	13,71987344	0,047830259
(15-16)	15,5	1,896	13,71987344	0,043716427
(16-17)	16,5	1,896	13,71987344	0,039454204
(17-18)	17,5	1,896	13,71987344	0,03517749
(18-19)	18,5	1,896	13,71987344	0,030998597
(19-20)	19,5	1,896	13,71987344	0,027007288
(20-21)	20,5	1,896	13,71987344	0,023271069
(21-22)	21,5	1,896	13,71987344	0,019836516
(22-23)	22,5	1,896	13,71987344	0,016731353
(23-24)	23,5	1,896	13,71987344	0,013967037
(24-25)	24,5	1,896	13,71987344	0,0115416

Tabla 12. Dist. Weibull Agosto 2016.

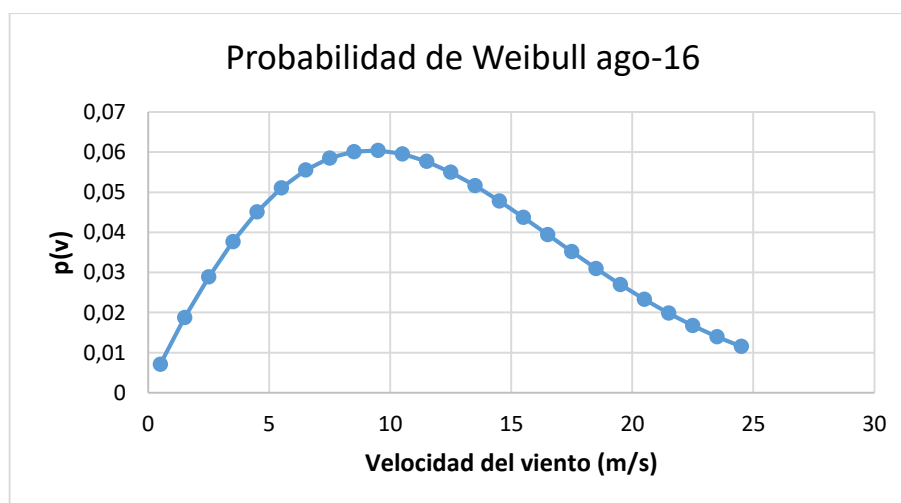


Figura 8. Dist. Weibull Agosto 2016.

- **Septiembre 2016**

SEPTIEMBRE-2016				
v	Velocidad del viento	k (a 100 m)	C	Probabilidad de Weibull
0-1	0,5	1,896	11,87580443	0,009321464
(1-2)	1,5	1,896	11,87580443	0,024516757
(2-3)	2,5	1,896	11,87580443	0,037514551
(3-4)	3,5	1,896	11,87580443	0,048409367
(4-5)	4,5	1,896	11,87580443	0,057092238
(5-6)	5,5	1,896	11,87580443	0,063493361
(6-7)	6,5	1,896	11,87580443	0,067628438
(7-8)	7,5	1,896	11,87580443	0,069604709
(8-9)	8,5	1,896	11,87580443	0,069611267
(9-10)	9,5	1,896	11,87580443	0,067901579
(10-11)	10,5	1,896	11,87580443	0,064772373
(11-12)	11,5	1,896	11,87580443	0,060541756
(12-13)	12,5	1,896	11,87580443	0,055528703
(13-14)	13,5	1,896	11,87580443	0,050035456
(14-15)	14,5	1,896	11,87580443	0,044333799
(15-16)	15,5	1,896	11,87580443	0,038655639
(16-17)	16,5	1,896	11,87580443	0,033187855
(17-18)	17,5	1,896	11,87580443	0,02807101
(18-19)	18,5	1,896	11,87580443	0,023401276
(19-20)	19,5	1,896	11,87580443	0,019234757
(20-21)	20,5	1,896	11,87580443	0,015593398
(21-22)	21,5	1,896	11,87580443	0,012471686
(22-23)	22,5	1,896	11,87580443	0,00984348
(23-24)	23,5	1,896	11,87580443	0,007668453
(24-25)	24,5	1,896	11,87580443	0,005897782

Tabla 13. Dist. Weibull Septiembre 2016.

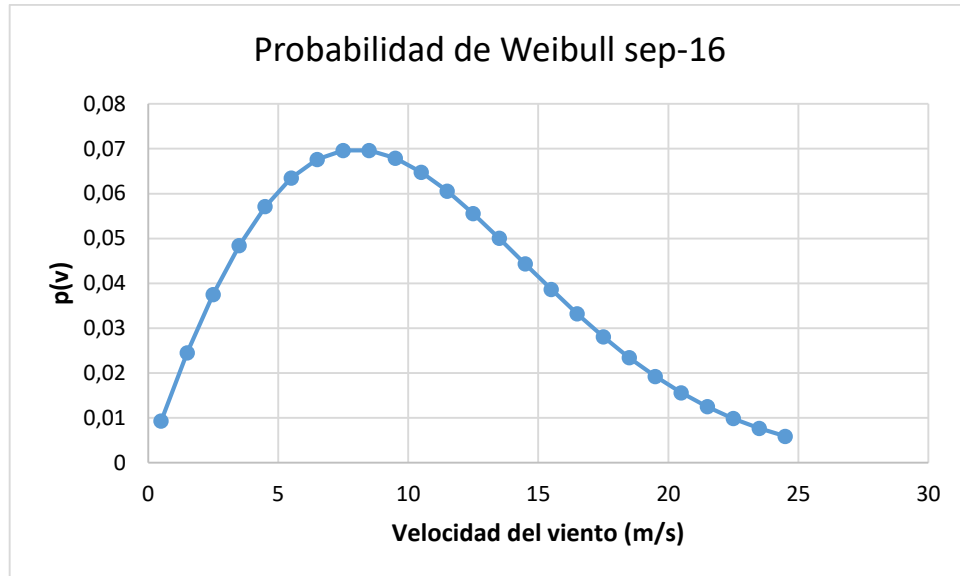


Figura 9. Dist. Weibull Septiembre 2016.

- **Octubre 2016**

OCTUBRE-2016				
v	Velocidad del viento	k (a 100 m)	C	Probabilidad de Weibull
0-1	0,5	1,896	8,408954687	0,01789556
(1-2)	1,5	1,896	8,408954687	0,046320431
(2-3)	2,5	1,896	8,408954687	0,068791341
(3-4)	3,5	1,896	8,408954687	0,085034196
(4-5)	4,5	1,896	8,408954687	0,094858735
(5-6)	5,5	1,896	8,408954687	0,09856301
(6-7)	6,5	1,896	8,408954687	0,096908316
(7-8)	7,5	1,896	8,408954687	0,090984566
(8-9)	8,5	1,896	8,408954687	0,082041535
(9-10)	9,5	1,896	8,408954687	0,071326802
(10-11)	10,5	1,896	8,408954687	0,059955985
(11-12)	11,5	1,896	8,408954687	0,048828138
(12-13)	12,5	1,896	8,408954687	0,038588139
(13-14)	13,5	1,896	8,408954687	0,029629614
(14-15)	14,5	1,896	8,408954687	0,022127073
(15-16)	15,5	1,896	8,408954687	0,016084486

(16-17)	16,5	1,896	8,408954687	0,011388749
(17-18)	17,5	1,896	8,408954687	0,007859321
(18-19)	18,5	1,896	8,408954687	0,005288749
(19-20)	19,5	1,896	8,408954687	0,003471918
(20-21)	20,5	1,896	8,408954687	0,002224339
(21-22)	21,5	1,896	8,408954687	0,001391218
(22-23)	22,5	1,896	8,408954687	0,000849733
(23-24)	23,5	1,896	8,408954687	0,00050697
(24-25)	24,5	1,896	8,408954687	0,000295529

Tabla 14. Dist. Weibull Octubre 2016.

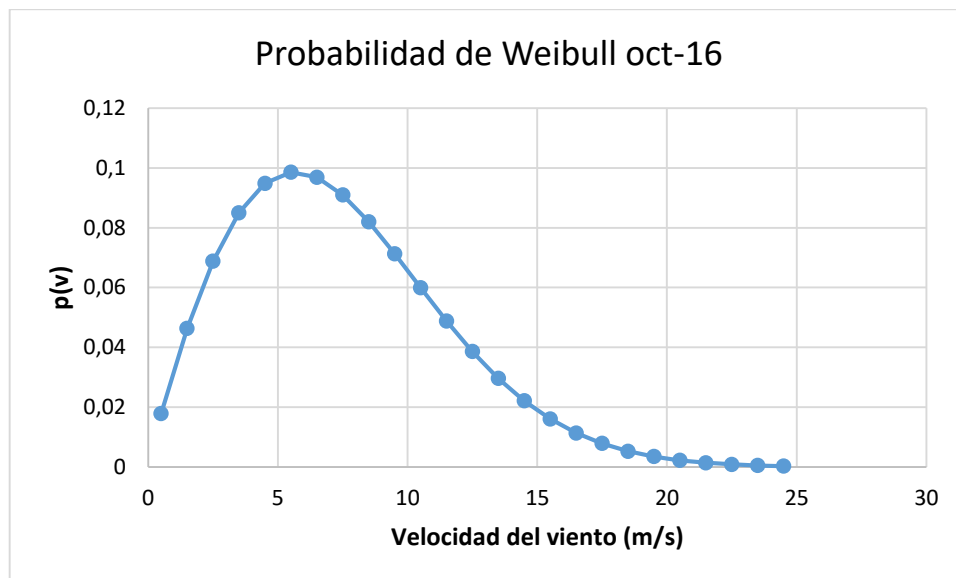


Figura 10. Dist. Weibull Octubre 2016.

- **Noviembre 2016**

NOVIEMBRE-2016				
v	Velocidad del viento	k (a 100 m)	C	Probabilidad de Weibull
0-1	0,5	1,896	7,745089843	0,020898471
(1-2)	1,5	1,896	7,745089843	0,053789761
(2-3)	2,5	1,896	7,745089843	0,079050082
(3-4)	3,5	1,896	7,745089843	0,096250549

(4-5)	4,5	1,896	7,745089843	0,105292597
(5-6)	5,5	1,896	7,745089843	0,106823206
(6-7)	6,5	1,896	7,745089843	0,102118209
(7-8)	7,5	1,896	7,745089843	0,092830692
(8-9)	8,5	1,896	7,745089843	0,080715585
(9-10)	9,5	1,896	7,745089843	0,067393388
(10-11)	10,5	1,896	7,745089843	0,054187539
(11-12)	11,5	1,896	7,745089843	0,042045436
(12-13)	12,5	1,896	7,745089843	0,03153407
(13-14)	13,5	1,896	7,745089843	0,022889701
(14-15)	14,5	1,896	7,745089843	0,016097185
(15-16)	15,5	1,896	7,745089843	0,010976941
(16-17)	16,5	1,896	7,745089843	0,007263504
(17-18)	17,5	1,896	7,745089843	0,004666699
(18-19)	18,5	1,896	7,745089843	0,002912734
(19-20)	19,5	1,896	7,745089843	0,001766926
(20-21)	20,5	1,896	7,745089843	0,001042169
(21-22)	21,5	1,896	7,745089843	0,000597882
(22-23)	22,5	1,896	7,745089843	0,000333725
(23-24)	23,5	1,896	7,745089843	0,000181295
(24-25)	24,5	1,896	7,745089843	9,58778E-05

Tabla 15. Dist. Weibull Noviembre 2016.

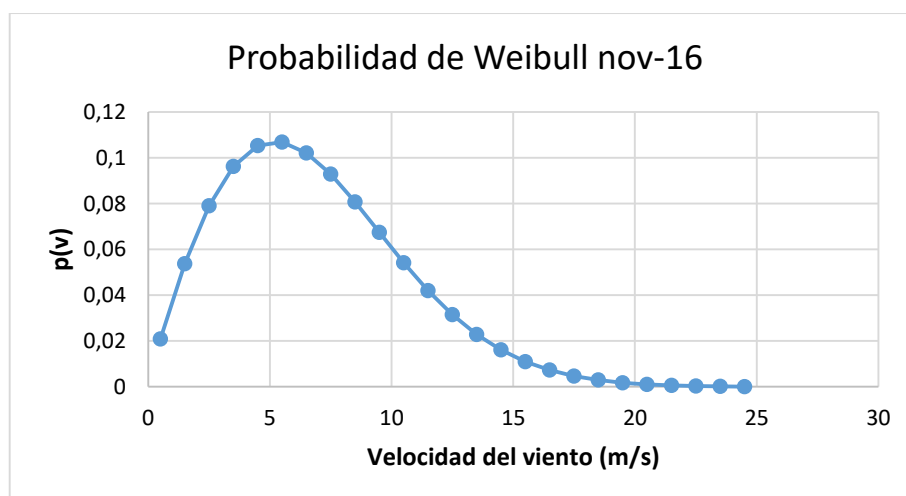


Figura 11. Dist. Weibull Noviembre 2016.

- Diciembre 2016

DICIEMBRE-2016				
v	Velocidad del viento	k (a 100 m)	C	Probabilidad de Weibull
0-1	0,5	1,896	6,933699479	0,025744065
(1-2)	1,5	1,896	6,933699479	0,065661857
(2-3)	2,5	1,896	6,933699479	0,094873453
(3-4)	3,5	1,896	6,933699479	0,11273003
(4-5)	4,5	1,896	6,933699479	0,119483288
(5-6)	5,5	1,896	6,933699479	0,116629453
(6-7)	6,5	1,896	6,933699479	0,106537562
(7-8)	7,5	1,896	6,933699479	0,091922802
(8-9)	8,5	1,896	6,933699479	0,075359792
(9-10)	9,5	1,896	6,933699479	0,058939455
(10-11)	10,5	1,896	6,933699479	0,044104558
(11-12)	11,5	1,896	6,933699479	0,031645793
(12-13)	12,5	1,896	6,933699479	0,021808928
(13-14)	13,5	1,896	6,933699479	0,014455047
(14-15)	14,5	1,896	6,933699479	0,009224527
(15-16)	15,5	1,896	6,933699479	0,005672835
(16-17)	16,5	1,896	6,933699479	0,00336448
(17-18)	17,5	1,896	6,933699479	0,001925663
(18-19)	18,5	1,896	6,933699479	0,001064222
(19-20)	19,5	1,896	6,933699479	0,000568182
(20-21)	20,5	1,896	6,933699479	0,000293181
(21-22)	21,5	1,896	6,933699479	0,000146268
(22-23)	22,5	1,896	6,933699479	7,05788E-05
(23-24)	23,5	1,896	6,933699479	3,29498E-05
(24-25)	24,5	1,896	6,933699479	1,48871E-05

Tabla 16. Dist. Weibull Diciembre 2016.

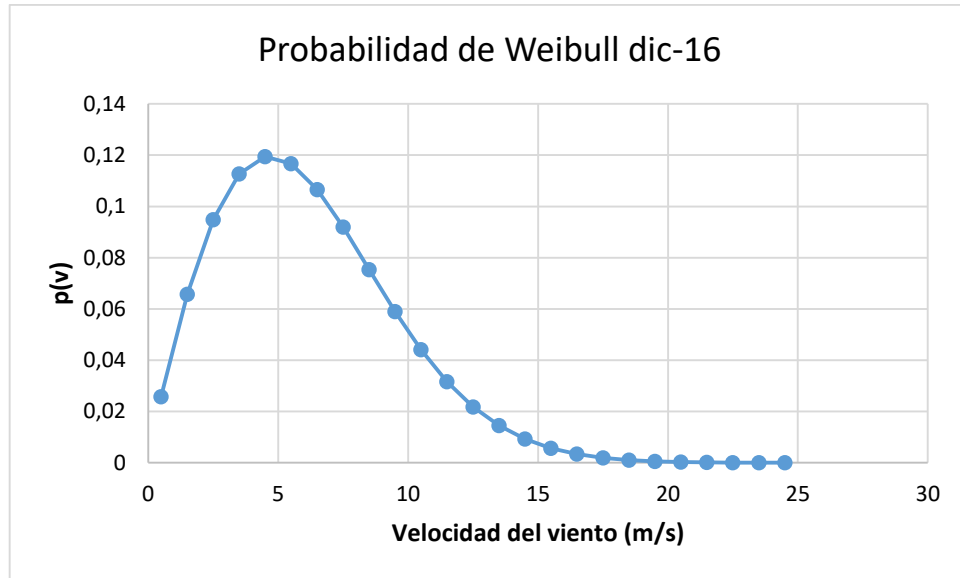


Figura 12. Dist. Weibull Diciembre 2016.

- Enero 2017

ENERO-2017				
v	Velocidad del viento	k (a 100 m)	C	Probabilidad de Weibull
0-1	0,5	1,896	7,597564323	0,021670087
(1-2)	1,5	1,896	7,597564323	0,055695179
(2-3)	2,5	1,896	7,597564323	0,081629625
(3-4)	3,5	1,896	7,597564323	0,099006026
(4-5)	4,5	1,896	7,597564323	0,107763757
(5-6)	5,5	1,896	7,597564323	0,108660941
(6-7)	6,5	1,896	7,597564323	0,103126568
(7-8)	7,5	1,896	7,597564323	0,09297223
(8-9)	8,5	1,896	7,597564323	0,080085703
(9-10)	9,5	1,896	7,597564323	0,06617568
(10-11)	10,5	1,896	7,597564323	0,052603772
(11-12)	11,5	1,896	7,597564323	0,040311607
(12-13)	12,5	1,896	7,597564323	0,02982955
(13-14)	13,5	1,896	7,597564323	0,021341632
(14-15)	14,5	1,896	7,597564323	0,014778392
(15-16)	15,5	1,896	7,597564323	0,009913348

(16-17)	16,5	1,896	7,597564323	0,006446471
(17-18)	17,5	1,896	7,597564323	0,004066308
(18-19)	18,5	1,896	7,597564323	0,002489352
(19-20)	19,5	1,896	7,597564323	0,001479727
(20-21)	20,5	1,896	7,597564323	0,000854406
(21-22)	21,5	1,896	7,597564323	0,000479393
(22-23)	22,5	1,896	7,597564323	0,00026146
(23-24)	23,5	1,896	7,597564323	0,000138654
(24-25)	24,5	1,896	7,597564323	7,15135E-05

Tabla 17. Dist. Weibull Enero 2017.

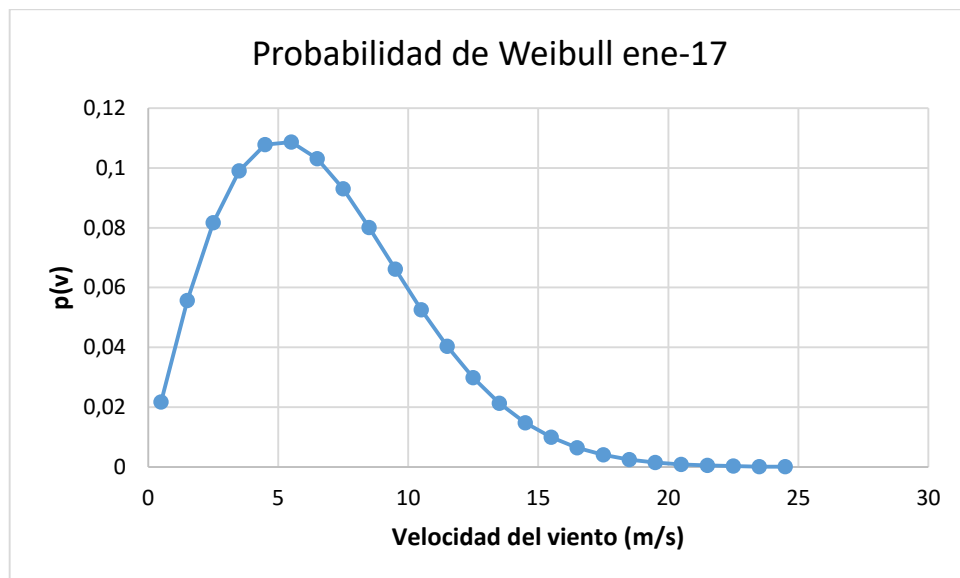


Figura 13. Dist. Weibull Enero 2017.

3. ELECCIÓN DEL AEROGENERADOR

En el apartado de elección del aerogenerador se procede a comparar los resultados obtenidos, por diferentes aerogeneradores de diferentes fabricantes, con el nexo de unión de que, se han escogido modelos con una elevada potencia nominal (a partir de 4 MW), capaces de producir grandes cantidades de energía. Los aerogeneradores seleccionados para el estudio han sido los siguientes:

- **Vestas V-164 - 8.0 MW**
- **Senvion 126 - 6.2 MW**
- **Gamesa - 5.0 MW**

- **Enercon E-126 EP - 4MW**

Las especificaciones técnicas, como puedan ser las curvas de potencia, dimensiones, entre otras características, vendrán dadas por los catálogos proporcionados por los fabricantes, adjuntos en documentación complementaria.

Para poder tomar la decisión adecuada, sobre que aerogenerador escoger, debemos estudiar diferentes parámetros que fundamenten que la decisión tomada es la correcta.

3.1. Energía producida cada mes

La energía producida por un aerogenerador viene dada por la distribución de las velocidades de viento y por la curva de potencia de dicho aerogenerador.

Las distribuciones de las diferentes velocidades de viento en cada periodo muestran la probabilidad de que el viento sople a cada intervalo de la velocidad del viento. Para conocer la producción energética mensual, tenemos que establecer la relación entre la potencia que sumista el aerogenerador en cada intervalo de velocidades y el tiempo que se da cada intervalo de velocidad durante el mes.

$$E = \sum P \cdot t \quad (5)$$

Donde:

E = Energía producida durante el mes (kW·h).

P = Potencia en un intervalo de velocidad (kW).

t = tiempo del intervalo de velocidad (horas).

El tiempo de duración de cada intervalo será calculado siguiendo las diferentes probabilidades halladas en cada mes y teniendo en cuenta la duración en horas del mes completo.

$$t = p(v) \cdot \text{duración mes (horas)} \quad (6)$$

Una vez se obtienen estos datos se realiza el cálculo de la energía producida por cada modelo de aerogenerador en el mismo periodo de tiempo. A continuación se muestra una tabla resumen con la cantidad de energía producida a lo largo de los 13 meses de estudio, por cada modelo, así como su producción de energía media.

Modelos	ΣE (kWW·h)	E.Media (kW·h)
Vestas V-164 8.0 MW	35500160	2730166
Senvion 126 6.2 MW	24316651	1952270
Gamesa 5 MW	22500447	1756301
Enercon E126 EP 4 MW	19513796	1522700

Tabla 18. Energía producida.

Al compararse diferentes modelos de aerogeneradores con distintas potencias nominales, es difícil encontrar una solución óptima atendiendo solamente a la energía producida, con lo que se calcula además, el factor de capacidad, las horas equivalentes y diferentes costes asociados para elegir la mejor opción.

3.1.1. Factor de capacidad

Es un parámetro que relaciona la energía útil producida por el aerogenerador durante un periodo de tiempo y la que de forma ficticia hubiera producido funcionando a la potencia nominal durante el mismo periodo de tiempo. En este caso se selecciona un periodo de tiempo correspondiente al total de horas de cada mes. La fórmula usada para calcular el factor de capacidad es:

$$FC = \frac{E}{P_N \cdot T} \quad (7)$$

Siendo:

FC = Factor de capacidad

E = Energía útil producida en un periodo de tiempo (kW·h)

P_N = Potencia nominal del aerogenerador (kW)

T = Periodo de tiempo en horas

3.1.2. Horas equivalentes

Las horas equivalentes son el número de horas que un aerogenerador debería trabajar a la potencia nominal para producir la misma cantidad de energía en el periodo de tiempo considerado. Se calcula como:

$$HE = \frac{E}{P_N} \quad (8)$$

Donde:

HE = Horas equivalentes

E = Energía útil producida en un periodo de tiempo (kW·h)

P_N = Potencia nominal del aerogenerador (kW)

A continuación se muestra una tabla resumen con factor de capacidad medio y las horas equivalentes, durante los 13 meses de estudio, para cada modelo.

Modelos	FC MEDIO	HE (13 MESES)
Vestas V-164 8.0 MW	0,47	4437
Senvion 126 6.2 MW	0,42	3953
Gamesa 5 MW	0,47	4499
Enercon E126 EP 4 MW	0,49	4645

Tabla 19. Factor de capacidad medio-Horas equivalentes.

Una vez obtenidos los resultados, se comprueba que los aerogeneradores escogidos están cercanos al 50% de factor de capacidad, bastantes superiores a la media normal que se sitúa entre 20% y 30%, lo que indica que el emplazamiento escogido es muy bueno para posicionar el aerogenerador. Por el momento, se puede apreciar que los modelos de Vestas y Enercon son los que mejores resultados dan para la ubicación seleccionada. Sin embargo se procederá a realizar un breve estudio económico que será clave a la hora de tomar la decisión final.

3.2. Relación precio-potencia instalada

Mediante esta relación se puede establecer lo que cuesta cada MW instalado (€/MW) pudiendo conocer la inversión inicial que se ha de realizar. En este caso en particular se divide el precio del aerogenerador entre la potencia nominal que es capaz de suministrar. En el caso de tener varios aerogeneradores se realizaría de igual manera, pero sumando todas las potencias nominales de los aerogeneradores y dividiéndola por el precio total de dichos aerogeneradores.

Sólo se ha podido obtener los datos del precio del aerogenerador de la marca Vestas, del resto se realiza una estimación, ya que, no se han podido recabar datos de los diferentes fabricantes por motivos de confidencialidad. Se estima que el precio de cada MW instalado asciende a 1.125.000€.

Modelos	Pot. Instalada (MW)	Precio Aero. (€)	Precio/Potencia (€/MW)
Vestas V-164 8.0 MW	8,00	9000000	1125000,00
Senvion 126 6.2 MW	6,15	6918750	1125000,00
Gamesa 5 MW	5,00	5625000	1125000,00
Enercon E126 EP 4 MW	4,20	4725000	1125000,00

Tabla 20. Precio por cada MW instalado.

- **Costes fijos**

A este coste se ha de asociar los costes de la obra civil y eléctrica, que se estimaría como un coste fijo, es decir sería muy parecido instalar un solo aerogenerador que varios, con lo que para disminuir este coste interesaría instalar el mayor número posible de turbinas eólicas. Sin embargo no es objeto de este proyecto la realización de ningún tipo de aparamenta eléctrica o subestación.

- **Coste específico**

El coste específico, se designa como el precio de cada aerogenerador entre el área barrida por el rotor de dicho aerogenerador. Con este resultado se puede comprobar que aerogenerador es el más caro a la hora de instalarse y cuál es el más barato.

Modelos	Precio Aero. (€)	Área Barrida (m ²)	Coste Específico (€/m ²)
Vestas V-164 8.0 MW	9000000	21124	426,06

Senvion 126 6.2 MW	6918750	12469	554,88
Gamesa 5 MW	5625000	13685	411,03
Enercon E126 EP 4 MW	4725000	13847	341,23

Tabla 21. Costes específicos.

- **Recuperación de la inversión**

Por último, se establece un precio de generación estándar, calculando el beneficio obtenido a lo largo de los trece meses de estudios, cuyo resultado se plasma en la tabla 22.

Modelos	Precio Generación (€/kWh)	ΣE (kW·h)	Beneficios (€)
Vestas V-164 8.0 MW	0,053688	35500160	1905932,59
Senvion 126 6.2 MW	0,053688	24316651	1305512,36
Gamesa 5 MW	0,053688	22500447	1208004,00
Enercon E126 EP 4 MW	0,053688	19513796	1047656,68

Tabla 22. Recuperación de la inversión.

4. CONCLUSIONES

Atendiendo al factor más importante, el económico, el aerogenerador de la marca Vestas toma la cabeza de la lista, a la hora de producir beneficios económicos derivados de la producción de energía, sin embargo, su coste específico es superior al de otros modelos. Por ello es necesario analizar el resto de factores.

Los otros tres factores más determinantes, son la producción de energía, el factor capacidad y las horas equivalente. De entre los cuatro modelos destaca, también por encima de todos,

el de la marca Vestas, siendo estos, datos esperados al poseer una potencia nominal mayor que el resto (8MW).

El aerogenerador seleccionado por consiguiente, es el **Vestas V-164 8.0 MW**, ya que aunque tiene un coste superior al del resto, es el que mejor aprovecha las condiciones de viento de la zona, y más energía produce a lo largo del tiempo estudiado.

Cabe destacar que, se cree oportuno, realizar un estudio económico mucho más exhaustivo para elegir de manera óptima el modelo de aerogenerador ideal, sin embargo, en este proyecto se realiza un estudio y una proposición inicial, ya que queda fuera del alcance del proyecto realizar el estudio económico propiamente dicho.

5. BIBLIOGRAFÍA

[1] Instituto tecnológico de Canarias (2011). ITC. Canarias, España. Recuperado de <http://www.itccanarias.org/web/>

PLANOS

DISEÑO Y DIMENSIONAMIENTO DE LA CIMENTACIÓN DE UN
AEROGENERADOR OFFSHORE EN LAS ISLAS CANARIAS

ÍNDICE DE PLANOS

Plano nº 1. Plano de situación

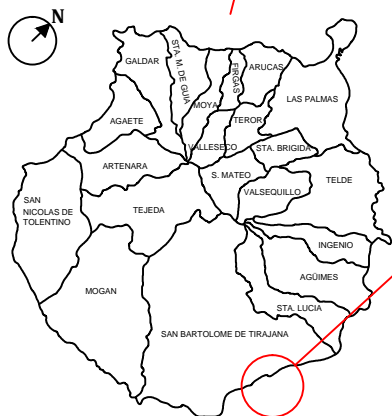
Plano nº 2. Plano general

Plano nº 3. Plano detalles constructivos

Archipiélago Canario



Gran Canaria



Costas de San Bartolomé de Tirajana

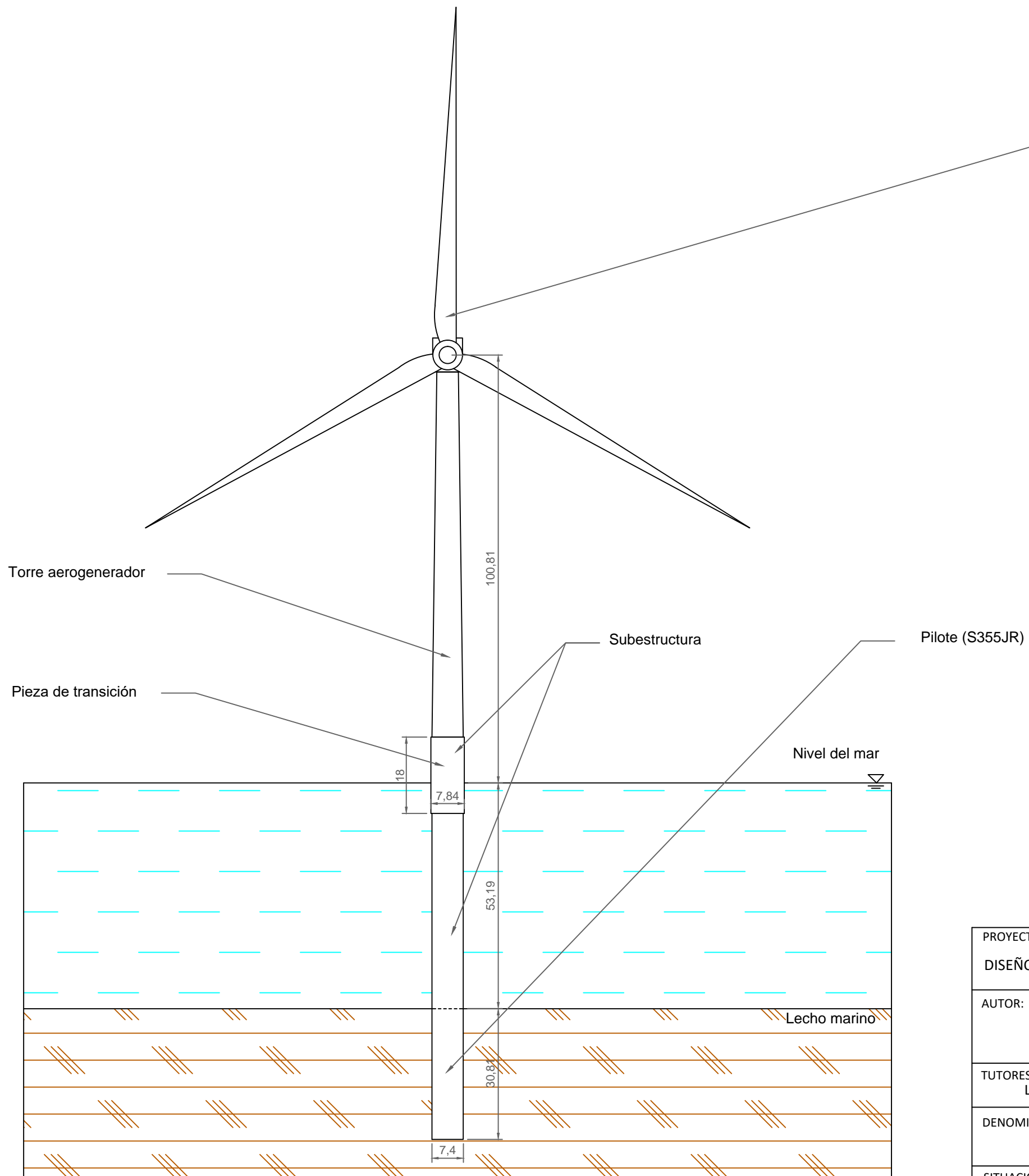


Coordenadas UTM	X:452850;Y:3069850
Prof. Lam. agua	50 [m]
Dist. a la costa	4300 [m]

PROYECTO: DISEÑO Y DIMENSIONAMIENTO DE LA CIMENTACIÓN DE UN AEROGENERADOR OFFSHORE EN LAS ISLAS CANARIAS		
AUTOR: Sergio Vicente Vera Rodríguez	FIRMA:	FECHA: JUNIO 2017
TUTORES: Luis Alberto Padrón Hernández Juan José Aznárez González	PETICIONARIO: ULPGC 	
DENOMINACIÓN: Plano de situación	ESCALA: N/D	
SITUACIÓN: Costa de Gran Canaria. Cordenas UTM (X:452850; Y:3069850)	Nº PLANO 1	

Aerogenerador Vestas V-164-8MW

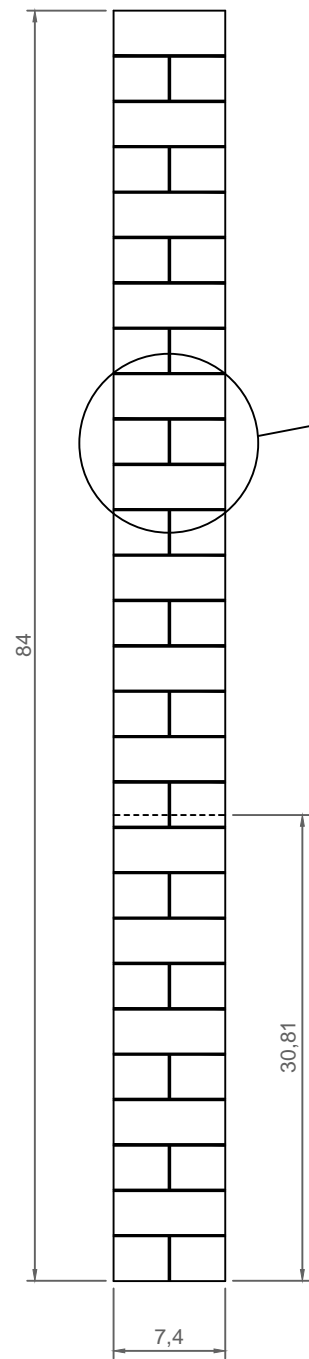
Características V-164	
Potencia nominal	8 [MW]
Longitud de las palas	80 [m]
Diámetro del rotor	164 [m]
Área barrida	21124 [m ²]



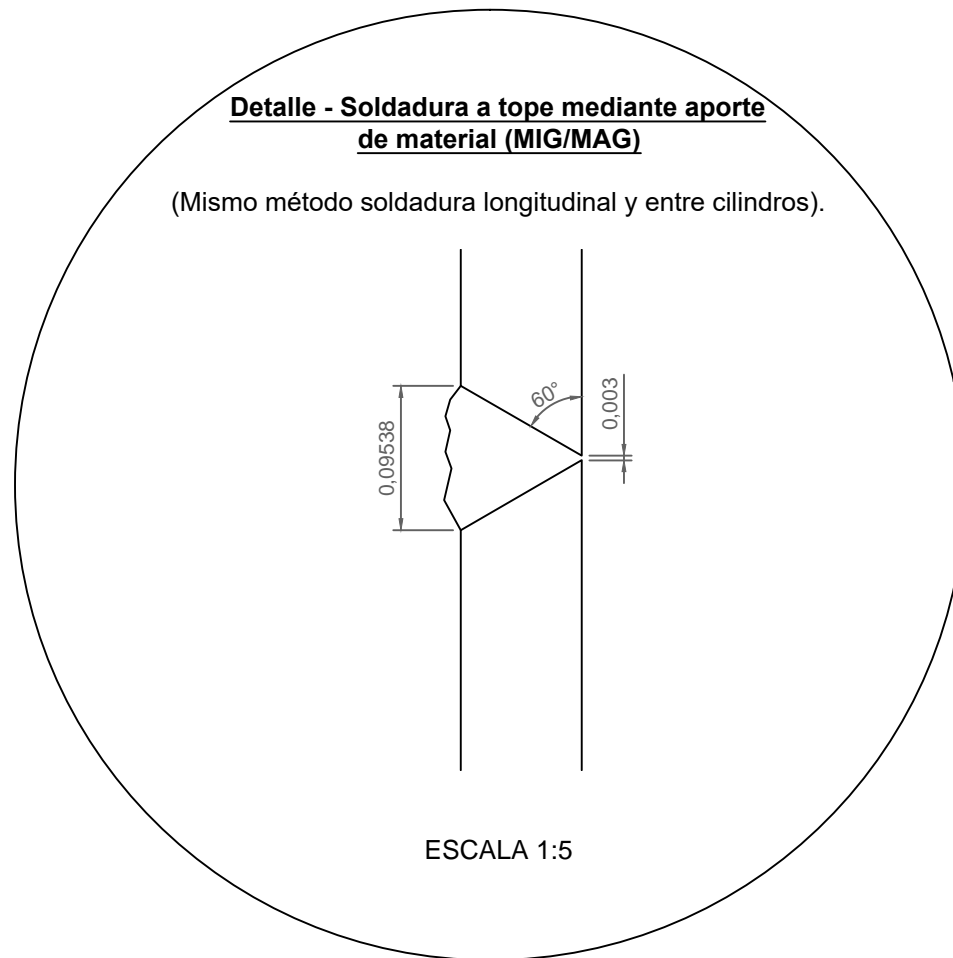
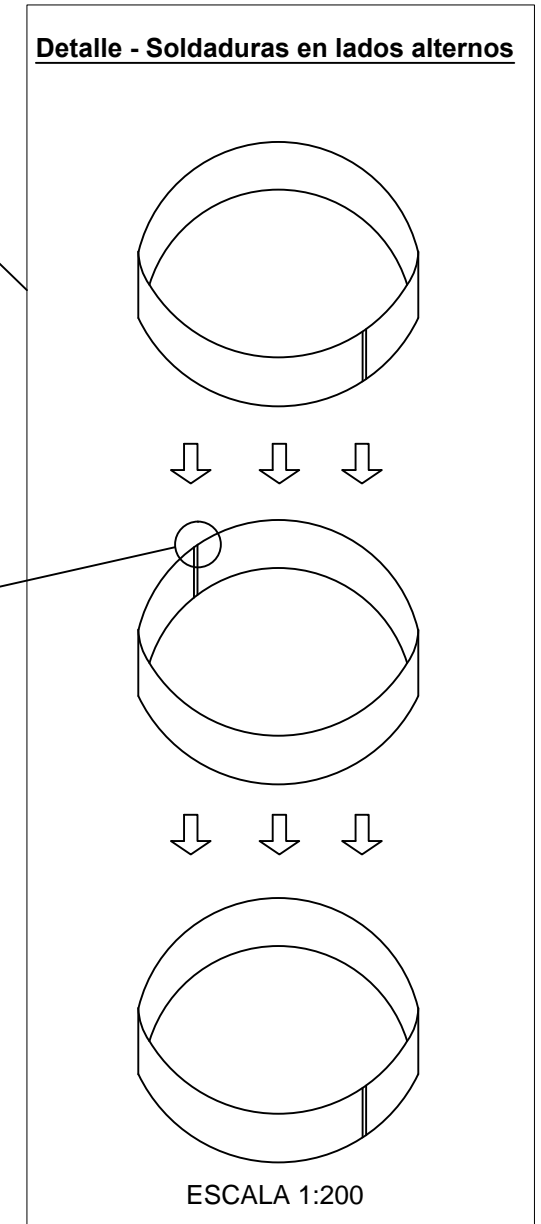
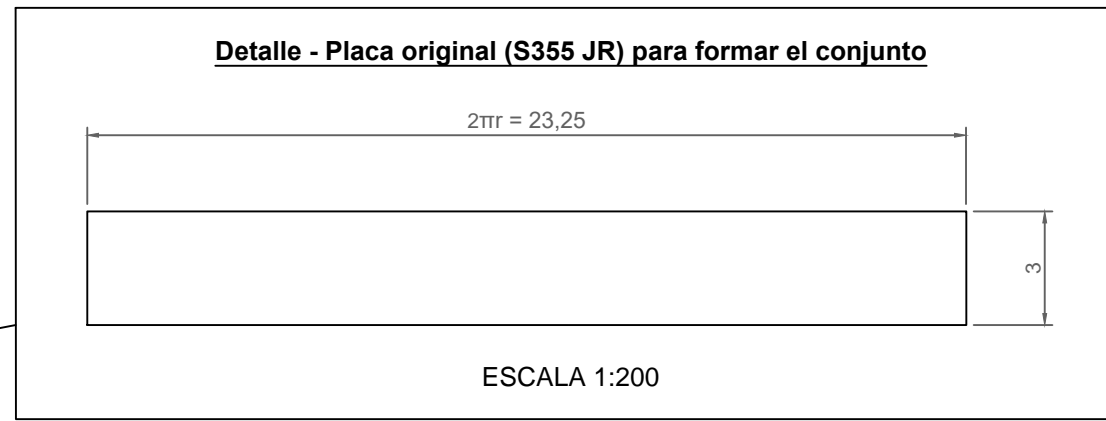
Características Acero S355JR	
Límite elástico	355 [N/mm ²]
Mod. Elasticidad	210000 [N/mm ²]
Mod. Rigidez	81000 [N/mm ²]
Densidad	7850 [kg/m ³]

PROYECTO: DISEÑO Y DIMENSIONAMIENTO DE LA CIMENTACIÓN DE UN AEROGENERADOR OFFSHORE EN LAS ISLAS CANARIAS		
AUTOR: Sergio Vicente Vera Rodríguez	FIRMA:	FECHA: JUNIO 2017
TUTORES: Luis Alberto Padrón Hernández Juan José Aznárez González	PETICIONARIO: ULPGC	
DENOMINACIÓN: Plano general		ESCALA: 1:1000
SITUACIÓN: Costa de Gran Canaria. Cordenas UTM (X:452850; Y:3069850)		Nº PLANO 2

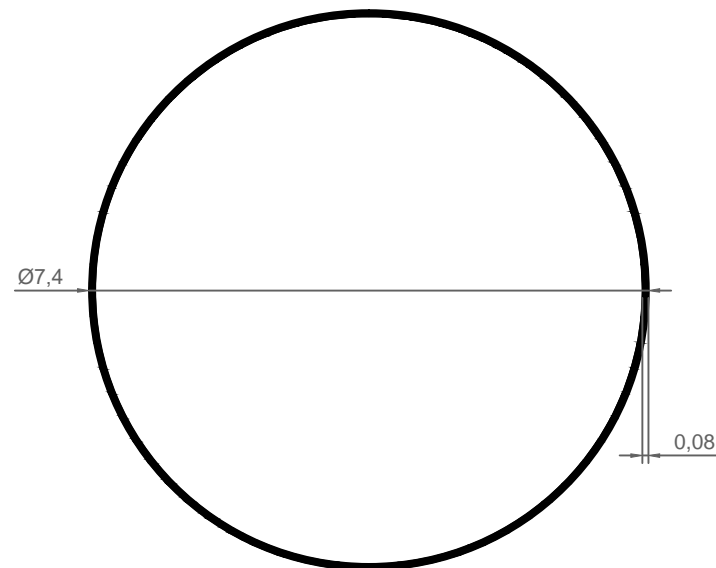
Pilote (Acero S355JR)



ESCALA 1:500



Detalle - Sección circular del pilote



ESCALA 1:100

PROYECTO: DISEÑO Y DIMENSIONAMIENTO DE LA CIMENTACIÓN DE UN AEROGENERADOR OFFSHORE EN LAS ISLAS CANARIAS		
AUTOR: Sergio Vicente Vera Rodríguez	FIRMA:	FECHA: JUNIO 2017
TUTORES: Luis Alberto Padrón Hernández Juan José Aznárez González	PETICIONARIO: ULPGC 	
DENOMINACIÓN: Plano detalles constructivos	ESCALA: VARIAS	
SITUACIÓN: Costa de Gran Canaria. Cordenas UTM (X:452850; Y:3069850)	Nº PLANO 3	

PRESUPUESTO

DISEÑO Y DIMENSIONAMIENTO DE LA CIMENTACIÓN DE UN
AEROGENERADOR OFFSHORE EN LAS ISLAS CANARIAS

ÍNDICE PRESUPUESTO

Mediciones

Cuadro de precios 1

Cuadro de precios 2

Presupuesto y mediciones

Resumen del presupuesto

MEDICIONES

DISEÑO Y DIMENSIONAMIENTO DE LA CIMENTACIÓN DE UN
AEROGENERADOR OFFSHORE EN LAS ISLAS CANARIAS

MEDICIONES

CÓDIGO	DESCRIPCIÓN	UDS	LONGITUD	ANCHURA	ALTURA	PARCIALES	CANTIDAD
CAPÍTULO 01 CIMENTACIÓN							
01.01	kg PLACA DE ACERO S355JR, 23.26x3 m, 80 mm DE ESPESOR Placa para cimentación realizada con chapa de acero laminado S355JR, de dimensiones 23.26x3x0.08 m, cumple los requisitos establecidos en la EAE. Se necesitan un total de 28 placas de acero con un peso de 43.877,70 kg/unidad.						1.228.575,60
01.02	m OPERACION DOBLADO-CLINDRADO PLACA DE ACERO Conformado con deformación plástica del material para dar forma cilíndrica a las placas de acero que conforman el pilote, teniendo en cuenta la maquinaria necesaria y la mano de obra cualificada. Productividad de 1 metro por cada hora.	28	24,00			672,00	
							672,00
01.03	m MECANIZADO DE BORDES LONGITUDINALES Operación de eliminación de material, proporcionando a los bordes a unir una inclinación de 60º, se incluye la maquinaria necesaria y la mano de obra cualificada. Productividad de 0.8 metros por hora.	28	3,00			84,00	
							84,00
01.04	m MECANIZADO DE BORDES ENTRE CILINDROS Operación de eliminación de material, proporcionando a los bordes a unir una inclinación de 60º, se incluye la maquinaria necesaria y la mano de obra cualificada. Productividad de 0.7 metros por hora.	54	7,40			399,60	
							399,60
01.05	m SOLDADURA A TOPE (MIG/MAG) CON APORTE DE MATERIAL. LONG. Soldadura por arco bajo gas protector con aporte de material mediante electrodo consumible de acero inoxidable, para realizar la unión longitudinal de cada cilindro. Equipos auxiliares incluidos.	3	28,00			84,00	
							84,00
01.06	u TRANSPORTE POR CARRETERA Transporte por carretera mediante camiones especializados. Trayecto entre Ferrol , dónde se encuentra la siderúrgica, y el Puerto de Vigo.						14,00
							14,00
01.07	u TRANSPORTE MARÍTIMO Desplazamiento de las piezas cilíndricas de acero S355JR de 3 metros desde el puerto de Vigo hasta el puerto de la Luz y de Las Palmas. Incluido el precio del barco y de las operaciones de carga y descarga. Tarda 7 días en realizarse dicho transporte.						1,00
							1,00
01.08	u TRANSPORTE POR CARRETERA Transporte por carretera mediante camiones especializados. Trayecto que cubre la distancia desde el punto de descarga del buque hasta los astilleros de Puerto de la Luz y de Las Palmas.						14,00
							14,00
01.09	m SOLDADURA A TOPE (MIG/MAG) CON APORTE DE MATERIAL. ENT. CIL Soldadura por arco bajo gas protector con aporte de material mediante electrodo consumible de acero inoxidable, para realizar la unión entre cilindros. Equipos auxiliares incluidos.	27	7,40			199,80	
							199,80
01.10	m ENSAYO NO DESTRUCTIVO. PARTÍCULAS MAGNÉTICAS Ensayo no destructivo sobre una unión soldada, mediante partículas magnéticas, incluyendo desplazamiento a obra e informe de resultados. Productividad de 5 metros por hora.						349,44

01.11

m ENSAYO NO DESTRUCTIVO. RAYOS X

Ensayo no destructivo sobre una unión soldada, mediante rayos X, incluyendo desplazamiento a obra e informe de resultados. Se estima defectuoso un 10% de la medida tomada en el ensayo de partículas magnéticas. Productividad de 5 metros por hora.

34,94

CUADRO DE PRECIOS 1

DISEÑO Y DIMENSIONAMIENTO DE LA CIMENTACIÓN DE UN
AEROGENERADOR OFFSHORE EN LAS ISLAS CANARIAS

CUADRO DE PRECIOS 1

CÓDIGO	UD	DESCRIPCIÓN	PRECIO
CAPÍTULO 01 CIMENTACIÓN			
01.01	kg	PLACA DE ACERO S355JR, 23.26x3 m, 80 mm DE ESPESOR Placa para cimentación realizada con chapa de acero laminado S355JR, de dimensiones 23.26x3x0.08 m, cumple los requisitos establecidos en la EAE. Se necesitan un total de 28 placas de acero con un peso de 43.877,70 kg/unidad.	1,08
		UN EUROS con OCHO CÉNTIMOS	
01.02	m	OPERACION DOBLADO-CLINDRADO PLACA DE ACERO Conformado con deformación plástica del material para dar forma cilíndrica a las placas de acero que conforman el pilote, teniendo en cuenta la maquinaria necesaria y la mano de obra cualificada. Productividad de 1 metro por cada hora.	100,25
		CIEN EUROS con VEINTICINCO CÉNTIMOS	
01.03	m	MECANIZADO DE BORDES LONGITUDINALES Operación de eliminación de material, proporcionando a los bordes a unir una inclinación de 60°, se incluye la maquinaria necesaria y la mano de obra cualificada. Productividad de 0.8 metros por hora.	109,56
		CIENTO NUEVE EUROS con CINCUENTA Y SEIS CÉNTIMOS	
01.04	m	MECANIZADO DE BORDES ENTRE CILINDROS Operación de eliminación de material, proporcionando a los bordes a unir una inclinación de 60°, se incluye la maquinaria necesaria y la mano de obra cualificada. Productividad de 0.7 metros por hora.	125,21
		CIENTO VEINTICINCO EUROS con VEINTIUN CÉNTIMOS	
01.05	m	SOLDADURA A TOPE (MIG/MAG) CON APORTE DE MATERIAL. LONG. Soldadura por arco bajo gas protector con aporte de material mediante electrodo consumible de acero inoxidable, para realizar la unión longitudinal de cada cilindro. Equipos auxiliares incluidos.	211,63
		DOSCIENTOS ONCE EUROS con SESENTA Y TRES CÉNTIMOS	
01.06	u	TRANSPORTE POR CARRETERA Transporte por carretera mediante camiones especializados. Trayecto entre Ferrol , dónde se encuentra la siderúrgica, y el Puerto de Vigo.	1.347,21
		MIL TRESCIENTOS CUARENTA Y SIETE EUROS con VEINTIUN CÉNTIMOS	
01.07	u	TRANSPORTE MARÍTIMO Desplazamiento de las piezas cilíndricas de acero S355JR de 3 metros desde el puerto de Vigo hasta el puerto de la Luz y de Las Palmas. Incluido el precio del barco y de las operaciones de carga y descarga. Tarda 7 días en realizarse dicho transporte.	177.382,80
		CIENTO SETENTA Y SIETE MIL TRESCIENTOS OCHENTA Y DOS EUROS con OCHENTA CÉNTIMOS	
01.08	u	TRANSPORTE POR CARRETERA Transporte por carretera mediante camiones especializados. Trayecto que cubre la distancia desde el punto de descarga del buque hasta los astilleros de Puerto de la Luz y de Las Palmas.	487,39
		CUATROCIENTOS OCHENTA Y SIETE EUROS con TREINTA Y NUEVE CÉNTIMOS	
01.09	m	SOLDADURA A TOPE (MIG/MAG) CON APORTE DE MATERIAL. ENT. CIL Soldadura por arco bajo gas protector con aporte de material mediante electrodo consumible de acero inoxidable, para realizar la unión entre cilindros. Equipos auxiliares incluidos.	220,97
		DOSCIENTOS VEINTE EUROS con NOVENTA Y SIETE CÉNTIMOS	
01.10	m	ENSAYO NO DESTRUCTIVO. PARTÍCULAS MAGNÉTICAS Ensayo no destructivo sobre una unión soldada, mediante partículas magnéticas, incluyendo desplazamiento a obra e informe de resultados. Productividad de 5 metros por hora.	7,50
		SIETE EUROS con CINCUENTA CÉNTIMOS	

01.11	m	ENSAYO NO DESTRUCTIVO. RAYOS X	20,00
		Ensayo no destructivo sobre una unión soldada, mediante rayos X, incluyendo desplazamiento a obra e informe de resultados. Se estima defectuoso un 10% de la medida tomada en el ensayo de partículas magnéticas. Productividad de 5 metros por hora.	

VEINTE EUROS

CUADRO DE PRECIOS 2

DISEÑO Y DIMENSIONAMIENTO DE LA CIMENTACIÓN DE UN
AEROGENERADOR OFFSHORE EN LAS ISLAS CANARIAS

CUADRO DE PRECIOS 2

CÓDIGO	UD	DESCRIPCIÓN	PRECIO
CAPÍTULO 01 CIMENTACIÓN			
01.01	kg	PLACA DE ACERO S355JR, 23.26x3 m, 80 mm DE ESPESOR Placa para cimentación realizada con chapa de acero laminado S355JR, de dimensiones 23.26x3x0.08 m, cumple los requisitos establecidos en la EAE. Se necesitan un total de 28 placas de acero con un peso de 43.877,70 kg/unidad.	
		TOTAL PARTIDA.....	1,08
01.02	m	OPERACION DOBLADO-CLINDRADO PLACA DE ACERO Conformado con deformación plástica del material para dar forma cilíndrica a las placas de acero que conforman el pilote, teniendo en cuenta la maquinaria necesaria y la mano de obra cualificada. Productividad de 1 metro por cada hora.	
		Mano de obra.....	21,81
		Maquinaria	78,44
		TOTAL PARTIDA.....	100,25
01.03	m	MECANIZADO DE BORDES LONGITUDINALES Operación de eliminación de material, proporcionando a los bordes a unir una inclinación de 60º, se incluye la maquinaria necesaria y la mano de obra cualificada. Productividad de 0.8 metros por hora.	
		Mano de obra.....	25,34
		Maquinaria	84,22
		TOTAL PARTIDA.....	109,56
01.04	m	MECANIZADO DE BORDES ENTRE CILINDROS Operación de eliminación de material, proporcionando a los bordes a unir una inclinación de 60º, se incluye la maquinaria necesaria y la mano de obra cualificada. Productividad de 0.7 metros por hora.	
		Mano de obra.....	27,95
		Maquinaria	97,26
		TOTAL PARTIDA.....	125,21
01.05	m	SOLDADURA A TOPE (MIG/MAG) CON APORTE DE MATERIAL. LONG. Soldadura por arco bajo gas protector con aporte de material mediante electrodo consumible de acero inoxidable, para realizar la unión longitudinal de cada cilindro. Equipos auxiliares incluidos.	
		Mano de obra.....	18,66
		Resto de obra y materiales.....	192,97
		TOTAL PARTIDA.....	211,63
01.06	u	TRANSPORTE POR CARRETERA Transporte por carretera mediante camiones especializados. Trayecto entre Ferrol , dónde se encuentra la siderúrgica, y el Puerto de Vigo.	
		TOTAL PARTIDA.....	1.347,21
01.07	u	TRANSPORTE MARÍTIMO Desplazamiento de las piezas cilíndricas de acero S355JR de 3 metros desde el puerto de Vigo hasta el puerto de la Luz y de Las Palmas. Incluido el precio del barco y de las operaciones de carga y descarga. Tarda 7 días en realizarse dicho transporte.	
		Resto de obra y materiales.....	177.382,80
		TOTAL PARTIDA.....	177.382,80
01.08	u	TRANSPORTE POR CARRETERA Transporte por carretera mediante camiones especializados. Trayecto que cubre la distancia desde el punto de descarga del buque hasta los astilleros de Puerto de la Luz y de Las Palmas.	
		TOTAL PARTIDA.....	487,39
01.09	m	SOLDADURA A TOPE (MIG/MAG) CON APORTE DE MATERIAL. ENT. CIL Soldadura por arco bajo gas protector con aporte de material mediante electrodo consumible de acero inoxidable, para realizar la unión entre cilindros. Equipos auxiliares incluidos.	
		Mano de obra.....	28,00
		Resto de obra y materiales.....	192,97
		TOTAL PARTIDA.....	220,97

01.10

m ENSAYO NO DESTRUCTIVO. PARTÍCULAS MAGNÉTICAS

Ensayo no destructivo sobre una unión soldada, mediante partículas magnéticas, incluyendo desplazamiento a obra e informe de resultados. Productividad de 5 metros por hora.

TOTAL PARTIDA.....7,50

PRESUPUESTO Y MEDICIONES

DISEÑO Y DIMENSIONAMIENTO DE LA CIMENTACIÓN DE UN
AEROGENERADOR OFFSHORE EN LAS ISLAS CANARIAS

PRESUPUESTO Y MEDICIONES

CÓDIGO	DESCRIPCIÓN	UDS	LONGITUD	ANCHURA	ALTURA	PARCIALES	CANTIDAD	PRECIO	IMPORTE
CAPÍTULO 01 CIMENTACIÓN									
01.01	kg PLACA DE ACERO S355JR, 23.26x3 m, 80 mm DE ESPESOR Placa para cimentación realizada con chapa de acero laminado S355JR, de dimensiones 23.26x3x0.08 m, cumple los requisitos establecidos en la EAE. Se necesitan un total de 28 placas de acero con un peso de 43.877,70 kg/unidad.						1.228.575,60	1,08	1.326.861,6
5									
01.02	m OPERACION DOBLADO-CLINDRADO PLACA DE ACERO Conformado con deformación plástica del material para dar forma cilíndrica a las placas de acero que conforman el pilote, teniendo en cuenta la maquinaria necesaria y la mano de obra cualificada. Productividad de 1 metro por cada hora.	28	24,00			672,00	672,00	100,25	67.368,00
01.03	m MECANIZADO DE BORDES LONGITUDINALES Operación de eliminación de material, proporcionando a los bordes a unir una inclinación de 60°, se incluye la maquinaria necesaria y la mano de obra cualificada. Productividad de 0.8 metros por hora.	28	3,00			84,00	84,00	109,56	9.203,04
01.04	m MECANIZADO DE BORDES ENTRE CILINDROS Operación de eliminación de material, proporcionando a los bordes a unir una inclinación de 60°, se incluye la maquinaria necesaria y la mano de obra cualificada. Productividad de 0.7 metros por hora.	54	7,40			399,60	399,60	125,21	50.033,92
01.05	m SOLDADURA A TOPE (MIG/MAG) CON APORTE DE MATERIAL. LONG. Soldadura por arco bajo gas protector con aporte de material mediante electrodo consumible de acero inoxidable, para realizar la unión longitudinal de cada cilindro. Equipos auxiliares incluidos.	3	28,00			84,00	84,00	211,63	17.776,92
01.06	u TRANSPORTE POR CARRETERA Transporte por carretera mediante camiones especializados. Trayecto entre Ferrol , dónde se encuentra la siderúrgica, y el Puerto de Vigo.						14,00	1.347,21	18.860,94
01.07	u TRANSPORTE MARÍTIMO Desplazamiento de las piezas cilíndricas de acero S355JR de 3 metros desde el puerto de Vigo hasta el puerto de la Luz y de Las Palmas. Incluido el precio del barco y de las operaciones de carga y descarga. Tarda 7 días en realizarse dicho transporte.						1,00	177.382,80	177.382,80
01.08	u TRANSPORTE POR CARRETERA Transporte por carretera mediante camiones especializados. Trayecto que cubre la distancia desde el punto de descarga del buque hasta los astilleros de Puerto de la Luz y de Las Palmas.						14,00	487,39	6.823,46
01.09	m SOLDADURA A TOPE (MIG/MAG) CON APORTE DE MATERIAL. ENT. CIL Soldadura por arco bajo gas protector con aporte de material mediante electrodo consumible de acero inoxidable, para realizar la unión entre cilindros. Equipos auxiliares incluidos.	27	7,40			199,80	199,80	220,97	44.149,81

01.10	<p>m ENSAYO NO DESTRUCTIVO. PARTÍCULAS MAGNÉTICAS</p> <p>Ensayo no destructivo sobre una unión soldada, mediante partículas magnéticas, incluyendo desplazamiento a obra e informe de resultados. Productividad de 5 metros por hora.</p>	349,44	7,50	2.620,80
01.11	<p>m ENSAYO NO DESTRUCTIVO. RAYOS X</p> <p>Ensayo no destructivo sobre una unión soldada, mediante rayos X, incluyendo desplazamiento a obra e informe de resultados. Se estima defectuoso un 10% de la medida tomada en el ensayo de partículas magnéticas. Productividad de 5 metros por hora.</p>	34,94	20,00	698,80
TOTAL CAPÍTULO 01 CIMENTACIÓN.....				1.721.780,14
TOTAL.....				1.721.780,14

RESUMEN DEL PRESUPUESTO

DISEÑO Y DIMENSIONAMIENTO DE LA CIMENTACIÓN DE UN
AEROGENERADOR OFFSHORE EN LAS ISLAS CANARIAS

RESUMEN DEL PRESUPUESTO

CAPÍTULO	RESUMEN	EUROS	%
01	CIMENTACIÓN	1.721.780,14	100
TOTAL PRESUPUESTO EJECUCIÓN MATERIAL		1.721.780,14	
	13,00% Gastos generales.....	223.381,42	
	6,00% Beneficio industrial.....	103.306,81	
	SUMA DE G.G y BI	327.138,23	
TOTAL PRESUPUESTO EJECUCIÓN POR CONTRATA		2.048.918,37	
	7,00% IGIC.....	143.424,29	
TOTAL PRESUPUESTO GENERAL		2.192.342,65	

El presupuesto general asciende a la expresada cantidad de DOS MILLONES CIENTO NOVENTA Y DOS MIL TRESCIENTOS CUARENTA Y DOS EUROS con SESENTA Y CINCO CÉNTIMOS.

