MÁSTER UNIVERSITARIO EN INGERNIERÍA INDUSTRIAL

TRABAJO FIN DE MÁSTER

Procedimiento numérico para el dimensionamiento de estructuras de soporte de aerogeneradores offshore sobre grupos de pilotes

Autor: Borja Cabrera Rodríguez

Tutores: Dr. Luis A. Padrón Hernández

D. Guillermo M. Álamo Meneses

Fecha: Julio 2018

UNIVERSIDAD DE LAS PALMAS
DE GRAN CANARIA

Con la firma de los tutores y el autor se acredita la realización del Trabajo Fin de Máster (TFM) en el curso académico 2017/2018

Universidad de Las Palmas de Gran Canaria. **Julio de 2018**

Título: Procedimiento numérico para el dimensionamiento de estructuras de soporte de aerogeneradores offshore sobre grupos de pilotes

Autor: D. Borja Cabrera Rodríguez

Tutores: Dr. Luis A. Padrón Hernández

D. Guillermo M. Álamo Meneses

Autor:	Tutor1:	Tutor2:

UNIVERSIDAD DE LAS PALMAS
DE GRAN CANARIA

Agradecimientos:

Me gustaría agradecer a mis tutores el Dr Luis A. Padrón Hernández y D. Guillermo M. Álamo Meneses, su paciencia, esfuerzo y dedicación a lo largo del Trabajo Fin de Máster.

Sinceramente, me han aportado más de lo que ustedes pueden pensar y yo puedo expresar.

A mi madre, mi aita, mi hermano y mi novia fuentes constantes de apoyo y motivación, sin lo que no hubiera culminado esta etapa. Gracias por todos los sacrificios realizados.

A mis amigos, especialmente a Samir, María, Néstor y Juanjo, por su implicación, empuje y por compartir los momentos de esparcimiento imprescindibles para desconectar.

El presente Trabajo Fin de Master se ha realizado en el marco del proyecto BIA2017-88770-R, financiado por el Ministerio de Economía, Industria y Competitividad (MINECO) y la Agencia Estatal de Investigación (AEI), y cofinanciado con fondos FEDER.

Memoria

PROCEDIMIENTO NUMÉRICO PARA EL DIMENSIONAMIENTO DE ESTRUCTURAS DE SOPORTE DE AEROGENERADORES OFFSHORE SOBRE GRUPOS DE PILOTES

Índice

1 Objeto 1

Objeto académico 1

Objeto general 1

2 Antecedentes 1

2.1 Resumen bibliográfico 1

2.2 Descripción del problema 2

2.3 Referencia para el proceso de dimensionado 3

3 Cimentación para aerogeneradores offshore 4

3.1 Tipos de cimentación 4

3.1.1 Monopilote 4

3.1.2 Tripilote 5

3.1.3 Trípode 6

3.1.4 Jacket 7

3.1.5 Vasos de succión 8

3.1.6 Por gravedad 9

3.2 Componentes del conjunto 10

3.3 Tipología de la subestructura 11

4 Normativa de referencia 12

5 Programas de cálculo 12

5.1 Programa desarrollado en el TFM 12

5.2 Programa para el análisis estructural 13

6 Definición de la problemática y requisitos de diseño 14

6.1 Consideraciones de diseño 14

6.2 Casos de cargas externas considerados en el dimensionamiento 14

6.3 Procedimiento de diseño 15

6.4 Requisitos de diseño 18

7 Solución propuesta 19

7.1 Predimensionamiento 19

7.1.1 Estimación de las dimensiones iniciales de la torre 19

7.2 Longitud embebida 20

7.3 Cálculo de la capacidad de carga vertical **21**

7.4 Cálculo de las cargas externas **22**

7.4.1 Cargas de viento 22

7.4.2 Cargas de oleaje 27

7.4.3 Cargas de mareas 29

7.4.4 Cargas combinadas 30

7.5 Procedimiento para comprobación de estados límite **30**

7.5.1 Estado límite último 30

7.5.2 Estado Límite de Servicio 35

7.5.3 Estado Límite de Fatiga 36

8 Conclusiones **40**

8.1 Líneas futuras **40**

9 Referencias **41**

Índice de tablas:

Tabla 1: Escenarios de cargas externas. Adaptada de [12] y [13] 14

Tabla 2: Casos combinación de cargas. Adaptada de [12] 15

Tabla 3: Requisitos de diseño 18

Tabla 4: Rigidez lineal del suelo del apartado 8.5.7 de [14]..... 21

Tabla 5: Valor de C_x en función de w 35

Tabla 6: factor de amortiguamiento según la dirección del viento 38

Índice de Figuras:

Figura 1:Estructura de un aerogenerador 2

Figura 2: Cimentación tipo monopilote. Adaptado de [4] 5

Figura 3: Cimentación tripilote 6

Figura 4: Cimentación tipo trípode. Adaptada de [4] 7

Figura 5: Cimentación tipo jacket. Adaptado de [4] 8

Figura 6: Cimentación mediante vasos de succión. Adaptado de [7] 9

Figura 7:Cimentación por gravedad. Adaptado de [7] 10

Figura 8: Componentes de la estructura 11

Figura 9: Subestructura tripilote [8] 12

Figura 10: Resumen del diagrama de flujo 16

1 Objeto

Objeto académico

En el presente proyecto, enmarcado en el Trabajo de Fin de Máster, culminan los estudios del Máster Universitario en Ingeniería Industrial, de la Universidad de Las Palmas de Gran Canaria. Su consecución tiene como objeto aplicar los conocimientos y competencias adquiridos durante la realización del máster.

Objeto general

El objetivo de este TFM es proponer y formular un procedimiento numérico para dimensionar, de manera lo más autónoma posible, estructuras de soporte para aerogeneradores offshore cimentados sobre el lecho marino a través de un grupo de pilotes. Posteriormente, se implementa el procedimiento numérico en el software de programación MATLAB, incluido en el anexo II: Código de programación, y, para finalizar, se realiza un caso práctico de dimensionamiento de la estructura de cimentación de un aerogenerador situado en la costa de la zona sureste de la isla de Gran Canaria, incluido en el anexo I: Aplicación del procedimiento.

2 Antecedentes

En este apartado se exponen brevemente los puntos necesarios para entender el problema propuesto, se plantean las posibles soluciones para resolverlo y se presenta brevemente el trabajo que ha servido de punto de partida para la realización de este proyecto.

2.1 Resumen bibliográfico

A finales de 2016 un grupo de investigadores británicos, de las universidades de Bristol y Surrey, publicaron un artículo científico en el que proponían un procedimiento para el dimensionamiento de aerogeneradores monopilote offshore [1]. Se trata de la configuración de cimentación profunda más sencilla posible desde el punto de vista del modelo numérico para el análisis de la mayor parte de los parámetros estructurales de interés.

A mediados de 2017 Gentils et al. [2] presentaron un procedimiento para la optimización del diseño de la subestructura de aerogeneradores offshore. Aunque en líneas generales el contenido de este artículo queda fuera del alcance de este proyecto, ha sido útil para hacer más restrictivo alguno de los parámetros de comprobación de la deformación de la estructura.

2.2 Descripción del problema

Antes de poder abordar la explicación del procedimiento se debe hacer una introducción a la geometría general de los aerogeneradores y, posteriormente, del tipo de cimentación propuesto para el dimensionamiento.

Como se puede ver en la figura 1, un aerogenerador consta de una serie de partes diferenciadas, en el presente trabajo se dimensionan los componentes correspondientes a la estructura soporte, quedando fuera del alcance del mismo el rotor y la góndola.

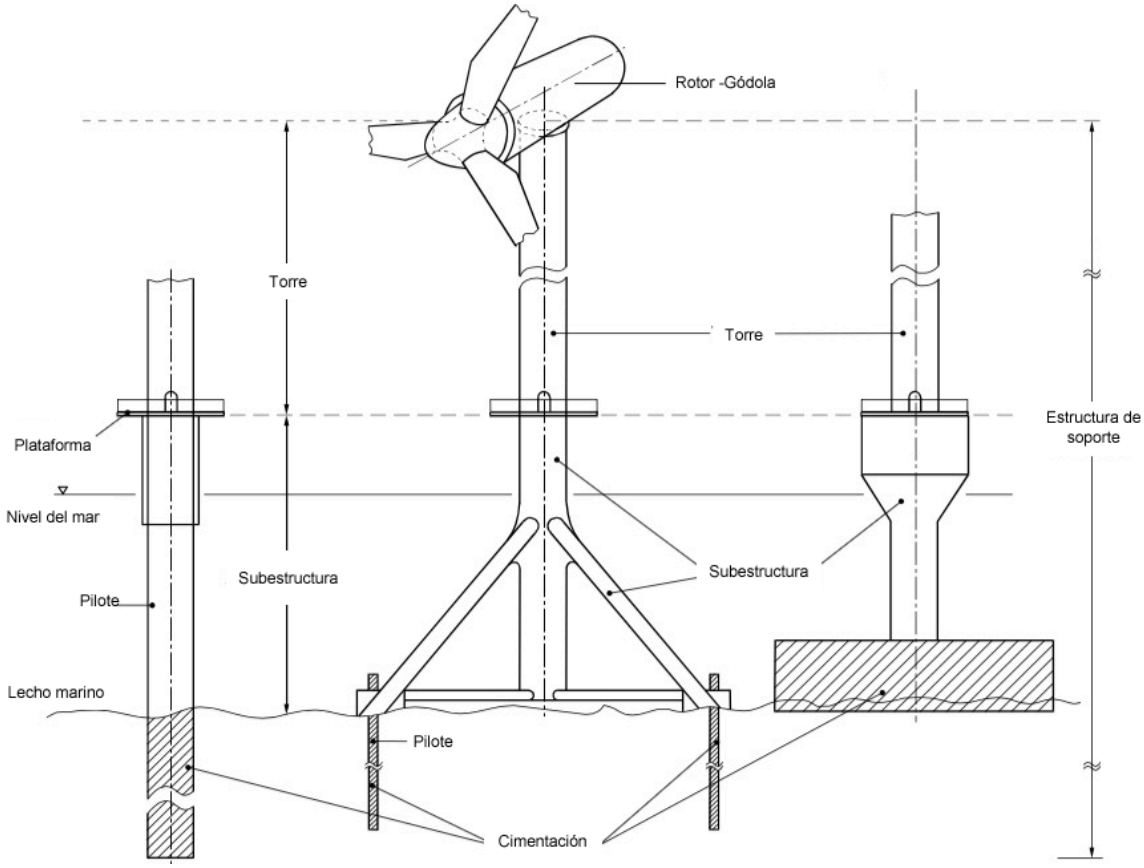


Figura 1:Estructura de un aerogenerador

Dentro de las estructuras soporte hay dos partes diferenciadas. Por un lado, la torre sobre la que se coloca el rotor y la góndola y, por otro lado, la subestructura, que es la que sustenta la torre. La función principal de la subestructura es transmitir al terreno las cargas que soporta la torre. A su vez, dentro de las subestructuras están las piezas de transición, que son las que conectan la torre con la cimentación, y la propia cimentación.

Hay dos tipos de cimentación, la cimentación superficial, que es la que se puede ver en la parte derecha de la Figura 1, y la cimentación profunda, que es la correspondiente a las otras dos

imágenes de la figura. En este TFM se emplea cimentación profunda sobre un grupo de tres pilotes, denominada cimentación profunda tripilote.

Durante el desarrollo del procedimiento hay una serie de aspectos relevantes a los que se debe prestar especial atención:

Lo primero, es el tipo de terreno considerado, así como su estratigrafía (número de estratos y la profundidad de cada uno de ellos). Posteriormente, las cargas externas debidas a los agentes naturales externos (la carga de viento, la de marea y la de oleaje). En cuanto a la geometría de la estructura, hay una gran cantidad de parámetros que son variables, como son las longitudes de los diferentes elementos, así como sus diámetros y los espesores, la longitud embebida, etc. Por lo que establecer un criterio claro a la hora de dimensionar es crucial para el procedimiento desarrollado. Por último, se establecen las comprobaciones que se le realizan a la estructura, para asegurar su sustentación y estabilidad. Los métodos de cálculo de las comprobaciones también influyen en el dimensionado final de la estructura.

2.3 Referencia para el proceso de dimensionado

Como punto de partida para el desarrollo de la propuesta de procedimiento llevada a cabo en el presente proyecto se ha tomado el trabajo de Arany et al. [1], en el cual se proponía un procedimiento para dimensionar los parámetros principales de aerogeneradores offshore cimentados mediante monopilotes. Este está compuesto por una guía en 10 pasos. A continuación, se explica brevemente la metodología que sigue esta guía:

- Comprobación de Estado Límite Último (ELU):
    1. Estima unas dimensiones iniciales de la estructura.
    2. Estima las cargas en la cimentación.
    3. Calcula la capacidad de carga geotécnica.
    4. Comprobación a pandeo.
- Comprobación de Estado Límite de Servicio (ELS):
    5. Estima la rigidez de la cimentación.
    6. Calcula la deformación máxima del lecho marino.
- Comprobación de la frecuencia natural:
    7. Calcula la frecuencia natural.
    8. Calcula los factores de amplificación dinámicos.
- Comprobación del comportamiento de la estructura a largo plazo:
    9. Estimar el número de ciclos que aguantará la estructura
    10. Analiza el comportamiento a largo plazo de la estructura.

Aunque haya diferencias sustanciales en el dimensionamiento entre la cimentación de un aerogenerador monopilote y uno tripilote, se ha partido de la idea de Arany y Bhattacharya [1], adaptándola a las necesidades de este tipo de cimentación, como se explica en el apartado 7.3 de la memoria.

3 Cimentación para aerogeneradores offshore

3.1 Tipos de cimentación

En la presente sección se realiza una breve explicación de algunos de los distintos tipos de cimentación existentes hoy en día.

3.1.1 Monopilote

En la figura 2 se identifican los distintos elementos de los que consta una cimentación monopilote. En primer lugar, se encuentra un cilindro que constituye un monopilote en sí, y que se encuentra enterrado en el lecho marino. La unión entre la torre y el monopilote suele resolverse mediante una pieza de transición.

Una limitación de este tipo de estructuras soporte es el movimiento lateral a lo largo del monopilote y la vibración; ya que se someten a grandes cargas cíclicas laterales y momentos flectores elevados debidos a las cargas de corriente marina y oleaje, además de las cargas axiales debidas al propio elemento. A pesar de ello, los monopilotes son actualmente la estructura soporte más comúnmente utilizada, empleándose en torno al 87% de los aerogeneradores offshore instalados [3].

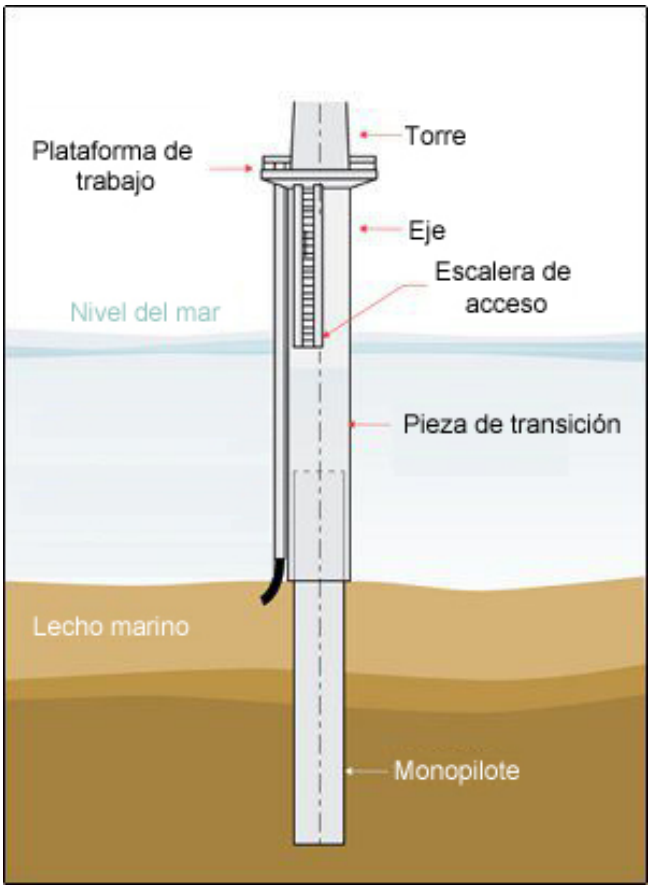


Figura 2: Cimentación tipo monopilote. Adaptado de [4]

3.1.2 Tripilote

En la figura 3 se muestran todos los elementos de los que consta una cimentación tripilote. En primer lugar, se encuentran tres cilindros que constituyen el tripilote.

Es una estructura que tiene tres pilotes en la sección inferior, conectados a la parte baja de la torre mediante un elemento de transición, la estructura está hecha en su totalidad de cilindros de acero huecos, como se observa en la figura 3. La anchura de la base y la profundidad de penetración del pilote se pueden ajustar para adaptarse a las condiciones geológicas del emplazamiento.

La principal ventaja de esta solución es la simplicidad de su instalación, que se hace instalando tres monopilotes y luego agregando la articulación superior. Algunos ejemplos de esta subestructura se pueden encontrar en: BARD Offshore (Alemania) y Veja Mate (Alemania) [5].

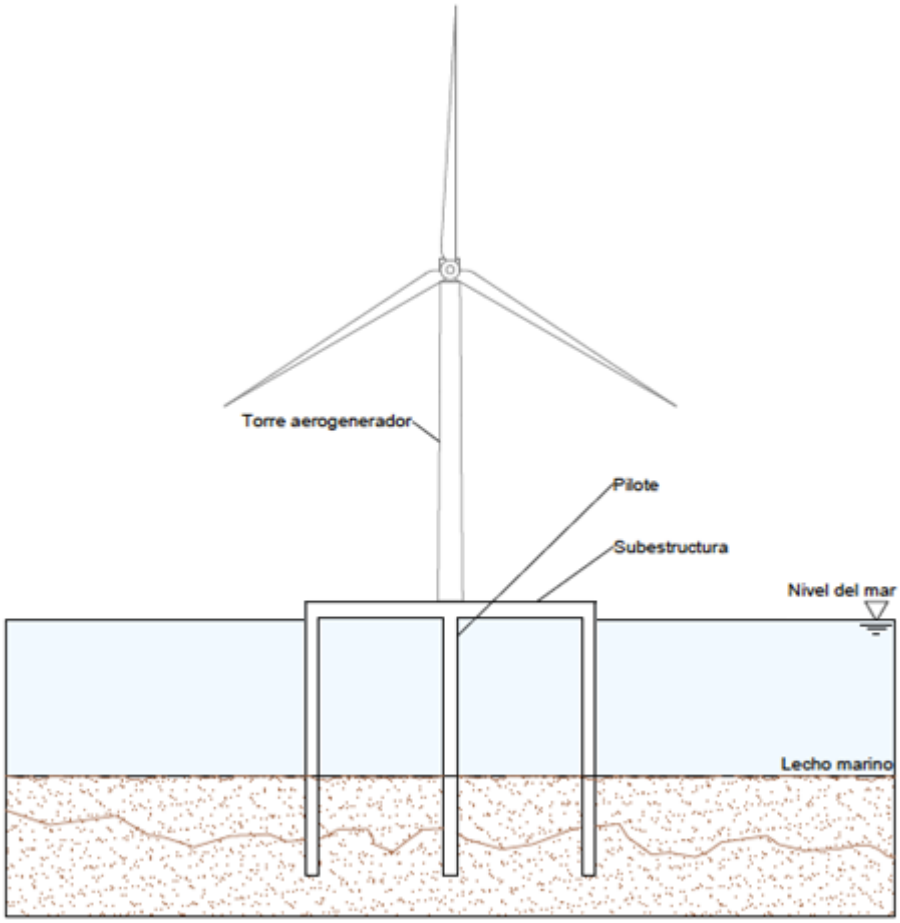


Figura 3: Cimentación tripilote

3.1.3 Trípode

Este tipo de estructura está formado por un pivote central similar al monopilote, el cual es sostenido por un soporte triangular de acero, formado por tres pilotes, unidos entre ellos por barras del mismo material, que al mismo tiempo unen el soporte con el pivote central. El soporte está anclado al fondo marino mediante tres pilotes de pequeña dimensión (véase la figura 4), lo que impide el movimiento de la estructura.

El trípode ayuda a distribuir y disminuir las cargas. Distribuye las cargas verticales recibidas por el pivote central y atenúa las cargas horizontales debidas al viento, marea y oleaje, aumentando la resistencia a flexión debida a este tipo de cargas.

Aunque su instalación no requiere de la preparación del lecho marino, sí necesita que el soporte este nivelado para su correcto funcionamiento.

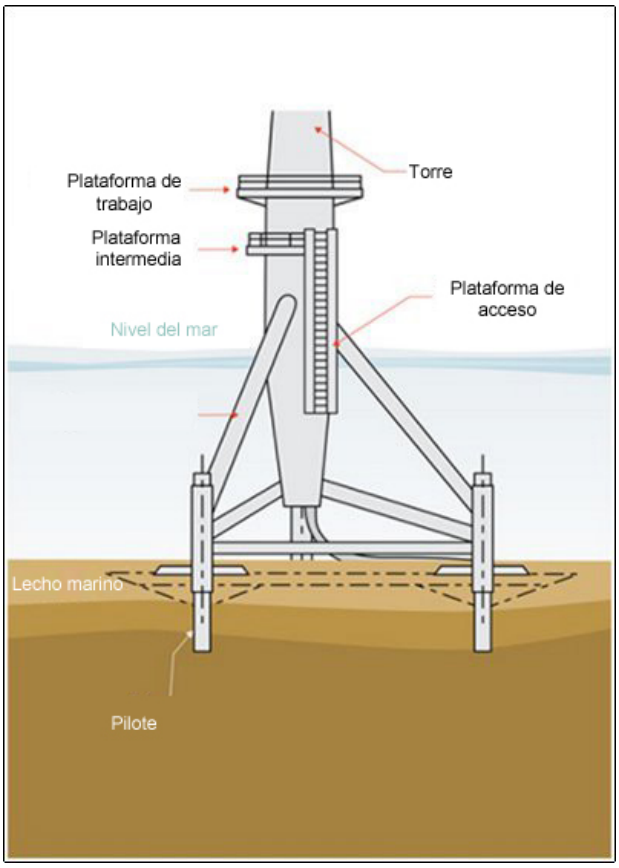


Figura 4: Cimentación tipo trípode. Adaptada de [4]

3.1.4 Jacket

Este tipo de estructura es similar a las torres de alta tensión. Consiste en una armadura de celosía que incorpora tres o cuatro puntos de anclaje al fondo marino, de forma que aporta más seguridad a la fijación de las torres. En la parte superior cuentan con una pieza de transición, como se puede ver en la figura 5, que une la torre con la subestructura. Es apto para varios tipos de suelo, pero no rocosos.

Los jacket cuentan con la ventaja de recibir cargas de corriente y oleaje bajas en comparación con las estructuras con monopilotes. Esto es debido a que el área expuesta al movimiento de las olas y las corrientes es mucho menor que en el caso de los monopilotes. Se tiene una gran experiencia en la construcción de este tipo de soportes de estructura, ya que es el empleado en el suministro de la industria petrolera y de gas.

Como importantes desventajas cabe destacar que los costes iniciales de construcción son elevados, además de los posibles costes posteriores de mantenimiento. Asimismo, el transporte también es considerado relativamente complejo y caro.

Hay dos procesos constructivos principales a la hora de instalar los jacket: el pilotado previo y el pilotado posterior.

El pilotado previo consiste en introducir, en primer lugar, los pilotes utilizando una plantilla que asegure una correcta ubicación e inclinación de los mismos. Posteriormente, se colocan y ajustan las patas de la estructura jacket en los pilotes.

El pilotado posterior se utiliza comúnmente en instalaciones petrolíferas, siendo muy poco frecuente en los parques eólicos. Consiste en utilizar las patas principales del jacket como guía de los pilotes. Para ello se sueldan o se introduce lechada para fijar los pilotes a la estructura [6].

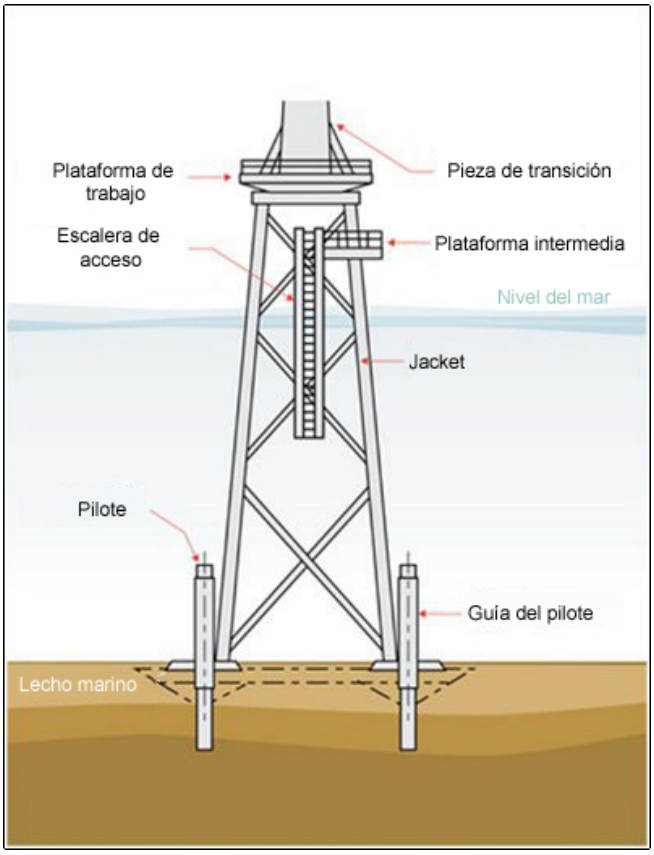


Figura 5: Cimentación tipo jacket. Adaptado de [4]

3.1.5 Vasos de succión

Este tipo de cimentación es, en apariencia, similar a la cimentación por gravedad. Los vasos se fijan al suelo mediante un sistema de succión a presión. Conformando la subestructura de un aerogenerador offshore junto al vaso de succión, se puede tener por ejemplo un pilote o una estructura tipo jacket, con más de un vaso de succión.

Es una solución simple y de rápida instalación, empleada para profundidades intermedias. No requiere preparación del lecho marino ni perforación del mismo, dado que se deposita el fondo de la cimentación y aplicar succión a la base para que penetre el suelo [7]. Se puede ver un ejemplo en la figura 6.

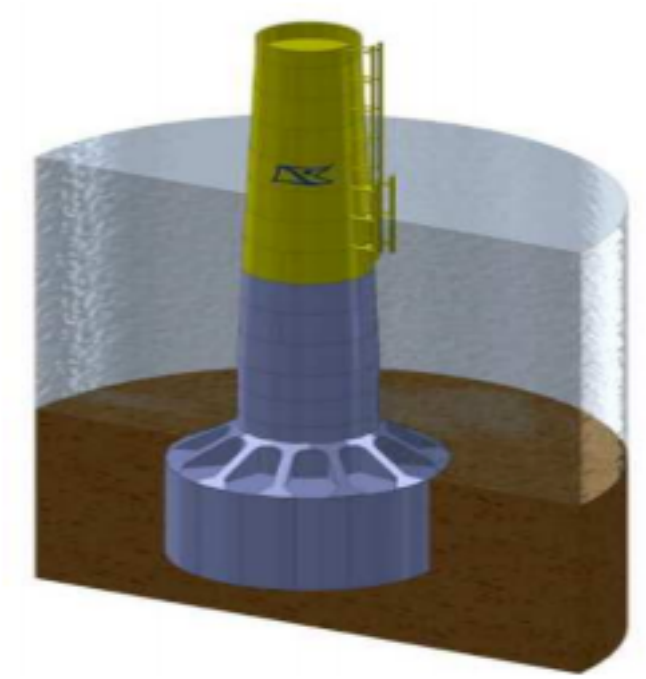


Figura 6: Cimentación mediante vasos de succión. Adaptado de [7]

3.1.6 Por gravedad

Este tipo de cimentación consiste en una gran plataforma de hormigón o acero, como se puede ver en la figura 7, de aproximadamente 15 metro de diámetro y un peso que ronda las 1000 toneladas.

Requiere una preparación previa del terreno y un terreno que soporte grandes cargas a compresión, dado que se coloca bajando por su propio peso. Es una buena solución hasta los treinta metros de profundidad, a partir de ese valor se requieren estructuras de soporte y sujeción más complejas.

A pesar de requerir poco mantenimiento su principal problema que surge en este caso es la erosión en el hormigón, por ello se suele generar una estructura de protección alrededor del mismo. Otro factor negativo son los costes de la instalación a medias o grandes profundidades por las cantidades de hormigón requeridas.

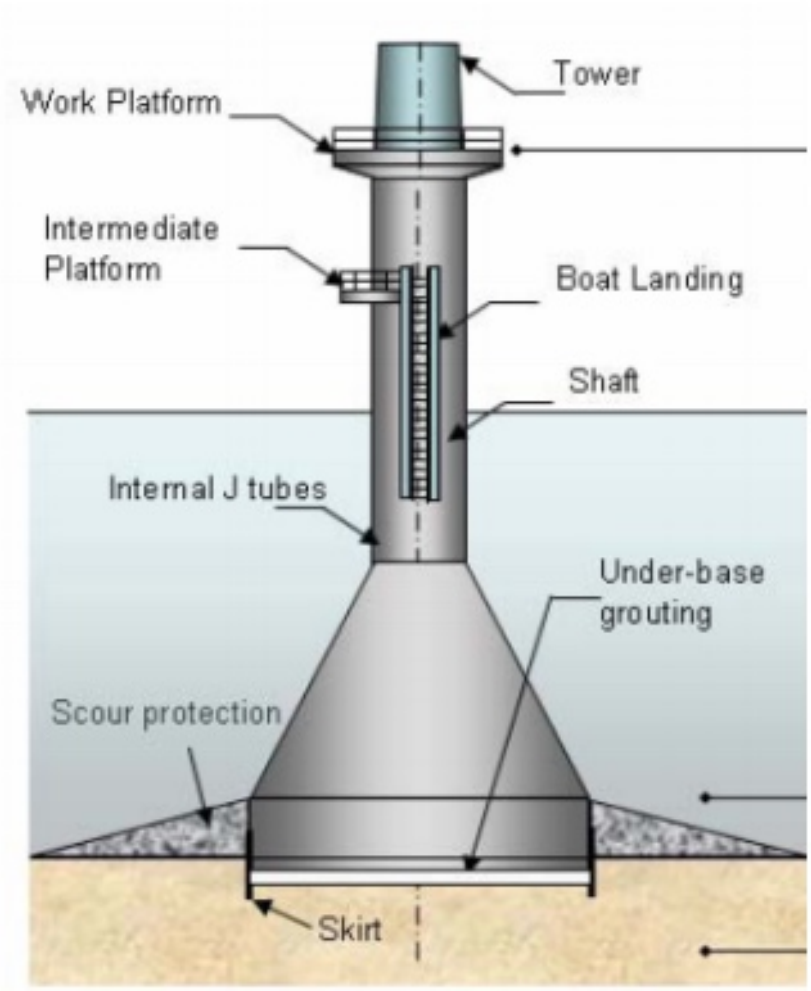


Figura 7:Cimentación por gravedad. Adaptado de [7]

3.2 Componentes del conjunto

La estructura de soporte de un aerogenerador offshore cimentado mediante tripilote, se puede dividir en dos partes principales, la torre del aerogenerador y la subestructura.

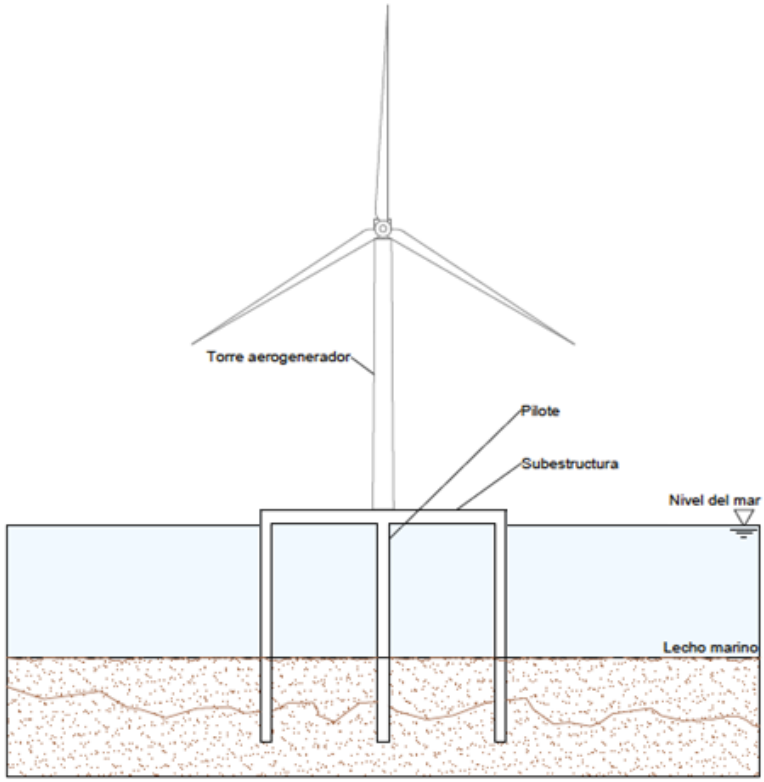


Figura 8: Componentes de la estructura

- Torre

Es el elemento estructural que une la góndola y el rotor con los elementos de unión.

- Subestructura (tripilote)
  - Elementos de unión

Son los elementos de unión que unen la base de la torre con la cabeza de los pilotes, se basa en tres barras horizontales que van desde la base de la torre hasta la cabeza de cada pilote.

  - Pilotes

Elementos de continuo que unen los elementos de unión con el lecho marino. En los pilotes se diferencian dos partes, la primera, es la parte enterrada (embebida) de los pilotes, es aquella que va enterrada en el lecho marino. Y la otra parte de los pilotes es la que va del lecho marino hasta los elementos de unión.

3.3 Tipología de la subestructura

La subestructura del aerogenerador para la cimentación tripilote, de la que se puede ver un ejemplo en la figura 10, puede variar, dependiendo de la cantidad de pilotes que se quieran instalar en este. Otro aspecto importante a considerar es el ángulo de inclinación de elemento de unión.

En el presente trabajo se decide emplear tres pilotes y un ángulo de cero grados de inclinación respecto a la horizontal de los elementos de unión.

Figura 9: Subestructura tripilote [8]

4 Normativa de referencia

Las normas empleadas como guía durante el procedimiento de dimensionado son:

- 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.
- EN 1993-1-6 (2007), Eurocode 3: Design of steel structures – Part 1-6: Strength and stability of shell structures.

5 Programas de cálculo

5.1 Programa desarrollado en el TFM

En este proyecto se ha desarrollado un programa iterativo que realiza el dimensionamiento de un aerogenerador offshore tripilote, pero las condiciones climáticas del lugar, así como las condiciones del terreno a estudiar deben ser introducidas por el usuario.

El procedimiento de diseño se ha dividido en cinco etapas:

Una primera etapa de predimensionamiento, en la que se dimensiona la estructura considerando como única carga externa, la carga máxima de viento.

En la segunda se emplea un código acoplado de elementos finitos para estructura y pilotes, y formulación integral para el suelo, capaz de analizar la respuesta dinámica del sistema estructural completo teniendo en cuenta la interacción entresuelo y estructura. [9, 10]

Una aplicación de este programa al análisis de la respuesta dinámica de las estructuras de soporte de aerogeneradores marinos puede verse en Álamo et al. [11], donde la herramienta es utilizada para obtener las funciones de impedancia de sus cimentaciones.

Con los resultados obtenidos de este código acoplado se realizan las comprobaciones correspondientes a las tres etapas que restantes del dimensionamiento.

La tercera etapa es la del Estado Límite Último (ELU), donde se comprueba que la estructura cumpla con las limitaciones de capacidad de carga en los pilotes, así como comprobar ninguno de los elementos de la estructura plastifican, ni pandean.

En la cuarta etapa, se comprueba el Estado Límite de Servicio (ELS), se vigila la deflexión y rotación en la cota de línea de barro de los pilotes, así como se comprueba que la frecuencia natural de la estructura se encuentra entre los límites establecidos.

En la quinta y última etapa se comprueba el Estado Límite de Fatiga (ELF), en él asegura que la amplitud máxima de la tensión cíclica no llegue al límite de fluencia del material y se determina el número de ciclos que resistirán los diferentes elementos.

5.2 Programa para el análisis estructural

El código para el análisis estructural del sistema estructura-cimentación-suelo desarrollado por el cotutor del presente trabajo, el Dr. Guillermo M. Álamo Meneses, en el marco de su tesis doctoral titulada “Dynamic response of piled structures. Implementation of a model based on the integral formulation of the problem and the use of a fundamental solution for the layered half space” [10].

Se trata de un modelo numérico para el análisis dinámico de cimentaciones de pilotes y estructuras pilotadas. La formulación del modelo se basa en la formulación integral del teorema de reciprocidad en el medio viscoelástico y el uso de una solución fundamental avanzada para el semiespacio estratificado. A su vez, los pilotes se tratan como líneas unidimensionales de carga actuando en el interior del terreno, incorporando los efectos derivados de la rigidez de los mismos mediante las ecuaciones de equilibrio características de una representación mediante elementos finitos. Las formulaciones del terreno y pilotes se acoplan imponiendo condiciones de compatibilidad y equilibrio en términos de los desplazamientos y fuerzas distribuidas de interacción suelo-pilote, respectivamente. Por otro lado, las estructuras se modelan como una

combinación de elementos finito tipo barra y lámina, y se acoplan a los pilotes directamente a través de condiciones de equilibrio y compatibilidad.

6 Definición de la problemática y requisitos de diseño

En este apartado se desarrollan las condiciones bajo las que caracteriza el problema, así como los diferentes requisitos que debe cumplir el modelo.

6.1 Consideraciones de diseño

Se han dimensionado todos los elementos de la estructura como cilindros huecos, incluyendo la torre.

No se han considerado las interacciones dinámicas entre pilotes.

El espectro de las cargas se considera cuasi estático y a falta de datos sobre las condiciones reales del suelo, se considera un terreno homogéneo monoestrato.

Dada la gran cantidad de incógnitas con las que se comenzaba, se considera tomar las longitudes de los elementos como datos de inicio.

6.2 Casos de cargas externas considerados en el dimensionamiento

Tabla 1: Escenarios de cargas externas. Adaptada de [12] y [13]

Descripción de escenario	Escenario de viento	Escenario de oleaje
E-1 Condiciones normales de funcionamiento Viento y olas actúan en la misma dirección	NTM en U_R (U-1)	1-año ESS (W-1)
E-2 Cargas de ola extrema Viento y olas actúan en la misma dirección	ETM en U_R (U-2)	50-años EWH (W-4)
E-3 Cargas de viento extremo Viento y olas actúan en la misma dirección	EOG en U_R (U-4)	1-año EWH (W-2)
E-4 Velocidad del viento de corte y escenario de operación de ráfaga extrema Viento y olas actúan en la misma dirección	EOG en U_{OUT} (U-4)	50-años EWH (W-4)
E-5 Olas y viento desalineados Vientos y olas desalineados 90°	ETM en U_R (U-2)	50-años EWH (W-4)

A la hora de calcular la cimentación, se pueden dar casos críticos de cargas, son fruto de la combinación de cargas mostrada en la siguiente tabla:

Tabla 2: Casos combinación de cargas. Adaptada de [12]

Descripción	Escenarios de viento	Escenarios de viento	Escenarios de corriente
Escenario- 2 Cargas de onda extrema Viento, olas y la corriente actúan en la misma dirección	ETM en U_R (U-2)	50-años EWH (W-4)	Escenario único
Escenario- 3 Cargas de viento Viento, olas y la corriente actúan en la misma dirección	EOG en U_R (U-4)	1-año EWH (W-2)	Escenario único

6.3 Procedimiento de diseño

Tal y como se comentó anteriormente, en este TFM se desarrolla e implementa un procedimiento de dimensionamiento de estructuras soporte de aerogeneradores offshore sobre tres pilotes.

Este procedimiento realiza un dimensionamiento de la estructura soporte a partir de los datos eólicos, geotécnicos, de marea y oleaje. Asegurándose de que la estructura final cumple con las comprobaciones de Estado Límite Último, Estado Límite de Servicio y Estado Límite de Fatiga.

El algoritmo desarrollado, cuyo funcionamiento se puede observar en el diagrama de flujo mostrado en la figura 10. Este diagrama de flujo se puede encontrar a mayor detalle en el plano D-01. Se trata de un procedimiento iterativo dividido en varias fases.

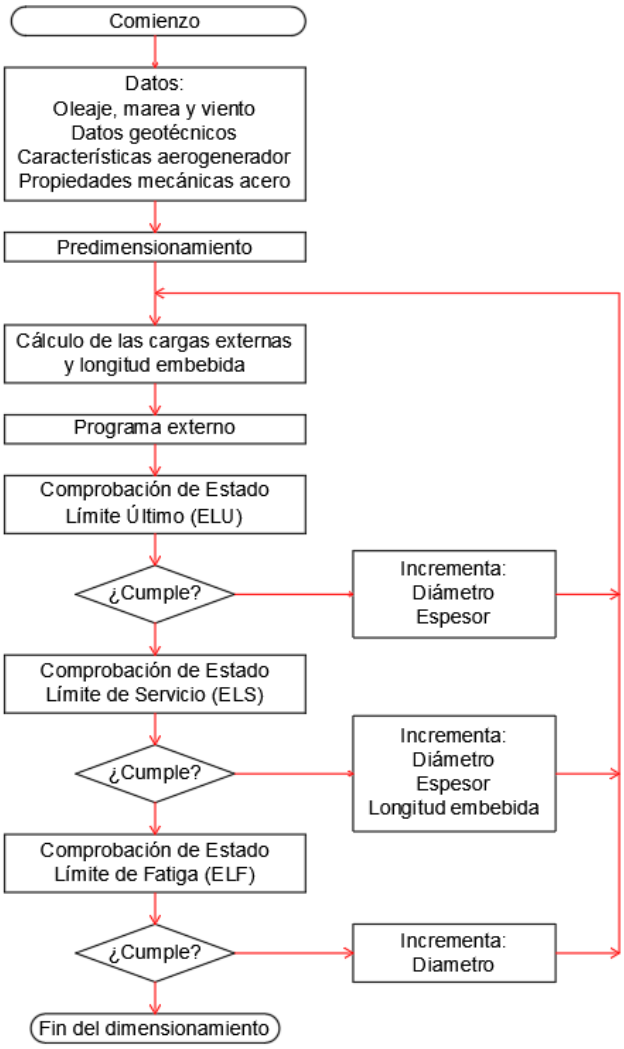


Figura 10: Resumen del diagrama de flujo

En la primera fase del procedimiento se hace un predimensionamiento inicial asumiendo que la rigidez de la cimentación es infinita, y tomando como valores de las acciones únicamente aquellos debidos a la acción del viento sobre las palas del aerogenerador.

Una vez obtenido este primer diseño se calculan todas las cargas externas consideradas en este proyecto, las cargas de viento, marea y oleaje. Tras calcular las cargas externas, se procede al cálculo de la longitud embebida (enterrada) del pilote. Posteriormente, se calculan las cargas verticales debidas al peso propio de los elementos de la estructura. Todos estos cálculos están englobados en el apartado de cargas externas del diagrama de flujo.

A continuación, se procede a generar el archivo de datos de entrada para el código encargado del análisis del sistema estructura-cimentación-suelo. El funcionamiento de este código para el análisis estructural del sistema estructura-cimentación-suelo queda explicado en el apartado

4.2 de la memoria. Una vez ejecutado el código, de entre los datos que devuelve, se emplean en este trabajo únicamente los archivos necesarios para el dimensionamiento del aerogenerador.

Con los datos obtenidos del código para el análisis estructural del sistema estructura-cimentación-suelo se obtiene la frecuencia natural del sistema, buscando la frecuencia correspondiente al valor máximo del módulo de los desplazamientos. A partir de ese valor se extrae de los archivos únicamente los datos obtenidos a esa frecuencia para disminuir el tiempo de procesamiento del programa. Obtenidos los datos relevantes para el dimensionamiento, se calcula la capacidad máxima de carga en los pilotes en la línea de barro. Si la capacidad máxima de carga de los pilotes es inferior a las cargas, se aumenta el diámetro de los pilotes y vuelve a comenzar el proceso desde el cálculo de las cargas externas. El siguiente paso es comprobar que ninguno de los elementos de la estructura plastifique, usando, para tal fin, la ecuación (64). Una vez habiendo comprobado que los elementos no plastifican, se comprueba la resistencia a pandeo de los mismos, tanto a pandeo global, como a pandeo local. Si cualquiera de estas dos comprobaciones no cumple se aumenta la sección afectada y se vuelve a comenzar el proceso de cálculo. Los pasos descritos hasta este punto corresponden a la comprobación del Estado Límite Último (ELU), el diagrama de flujo.

Posteriormente, se comprueba que la deflexión y rotación en los pilotes no superen los límites establecidos en [1] y [2], siendo 0.1 m el desplazamiento y 0.5° la rotación máximos permitidos. Si no se cumple alguna de las condiciones, se aumenta el diámetro de los pilotes y se repite el proceso, desde el punto del cálculo de cargas externas puesto que es dependiente de las dimensiones de la estructura. En caso de que sí se cumplan estas premisas, se da fin a la comprobación del Estado Límite de Servicio (ELS) del diagrama de flujo.

Una vez llegado a este punto, se calcula la amplificación dinámica de las cargas, obligando a que se realice dos iteraciones al llegar a este punto. De este modo se aumentan las cargas externas hasta los valores máximos considerados en el presente proyecto. Una vez se ha considerado la amplificación dinámica de las cargas, se comprueba que la frecuencia natural de la estructura está comprendida entre los márgenes calculados. Si la frecuencia natural del sistema queda por debajo del límite inferior del intervalo, hay que rigidizar la estructura. En este proyecto se establece que, si se produce este caso, se aumente la longitud embebida del pilote y se comienza el proceso de nuevo. En caso de que la frecuencia natural resulte en un valor que exceda al límite superior del intervalo, se tiene que flexibilizar la estructura. Para ello se comprueba si hay secciones sobredimensionadas y, en ese caso, se disminuyen dichas secciones y comienza el proceso otra vez. Si no hubiera secciones sobredimensionadas, el procedimiento de dimensionamiento no convergería a ninguna solución. El último paso del procedimiento es la comprobación de resistencia de la estructura a fatiga, que se comprueba empleando el Estado Límite de Fatiga (ELF),

en la que se comprueba que todas las secciones cumplan con las condiciones pertinentes y, en caso contrario, se aumentan las secciones afectadas.

6.4 Requisitos de diseño

Tabla 3: Requisitos de diseño

Estado Límite Último (ELU)		
1	La capacidad de carga de los pilotes no debe superar la capacidad máxima calculada	$F_{tot} < F_R \; y \; M_{tot} < M_R$
Estado Límite de Servicio (ELS)		
2	El límite elástico de los elementos debe ser mayor a la tensión máxima de los mismos	$\sigma_{max} < \frac{f_{yk}}{1.1}$
3	Se tienen que cumplir las condiciones de pandeo global y local	Resistencia a pandeo
4	La deflexión debe ser menor de 10 cm y la rotación inferior a 0.5°	Deflexión < 0.1 m [2] Rotación< 0.5°
5	La frecuencia natural del conjunto, debe ser mayor en un 5% al modo de vibración 1P e inferior en al menos un 5% al mínimo de 3P	$1.05 \cdot f_{1P} < f_n < 0.95 \cdot f_{3P}$
Estado Límite de Fatiga (ELF)		
6	Vida útil de al menos 50 años	Resistencia a fatiga

7 Solución propuesta

En el presente capítulo se detalla el algoritmo desarrollado e implementado, objeto del proyecto. Este algoritmo tiene como objetivo cumplir con todos los requisitos de diseño indicados en el capítulo anterior.

El algoritmo requiere, como datos de entrada, la información de fenómenos que provocan las cargas externas (viento, oleaje y marea), datos geotécnicos, las características del aerogenerador y las propiedades mecánicas del acero usado para la fabricación de la estructura soporte. Tras ello realiza un predimensionamiento de la estructura. A partir de los datos de viento, oleaje y marea, así como de las dimensiones iniciales, el algoritmo calcula las cargas externas aplicadas sobre la estructura soporte. Tras ello, se calcula la longitud embebida a partir de las propiedades mecánicas del material y de las dimensiones de la estructura. A continuación, se hace uso del código externo para el análisis estructural del sistema estructura-cimentación-suelo. Una vez obtenidos los datos dimensionales y de cargas, tanto externas como internas de la estructura, es posible calcular la supervivencia de la misma usando el método de estados límites. Para ello se hace uso del estado límite último (ELU), el estado límite de servicio (ELS) y el estado límite de fatiga (ELF).

En el plano D-01 se puede ver el diagrama de flujo del proceso en el que se describe el mismo en detalle. Este programa, desarrollado en el presente capítulo, se implementa en MATLAB. El código de programación implementado está incluido en el Anexo II: Código de programación.

7.1 Predimensionamiento

Es la primera etapa del proceso y en ella se determinan unas dimensiones del aerogenerador sobre las que se harán las comprobaciones posteriores. Para ello solo se considera la carga máxima de viento como la única carga externa, y se comprueba el dimensionamiento de los elementos solo mediante el criterio de plastificación a flexión pura.

7.1.1 Estimación de las dimensiones iniciales de la torre

Para determinar las dimensiones mínimas de la torre para que no plastifique se sigue lo indicado en [1].

$$\sigma_m = \frac{M_{wind,EOG}}{I_t} \cdot \frac{D_t}{2} < \frac{f_{yk}}{\gamma_M} \tag{1}$$

Donde:

D_t: diámetro de la torre $[m]$

I_t: momento de inercia geométrico de la torre $[m^4]$

f_{yk}: límite elástico del acero $\left[\frac{N}{m^2}\right]$

γ_M: coeficiente de seguridad $[-]$

Una vez calculado el diámetro para que la torre no plastifique, se calcula el espesor de la misma. Esto se realiza iterando hasta que la diferencia entre el espesor de una iteración y el de la siguiente cumpla una tolerancia preestablecida. Para atenuar la diferencia de valor entre las iteraciones se ha empleado un factor de relajación $\alpha \in (0, 1)$. En la primera iteración t_i toma el valor de espesor mínimo de la torre recomendado por el fabricante.

$$t_{i+1} = t_i \cdot \alpha + t_c \cdot (1 - \alpha) \tag{2}$$

Donde:

t_i: es el espesor de la torre para la iteración anterior $[m]$

t_c: el espesor calculado en cada iteración $[m]$

α: factor de relajación $[-]$

La convergencia de la ecuación propuesta en una solución depende de dos condiciones:

Por un lado, el espesor calculado debe ser mayor que el de la anterior iteración.

$$t_c - t_i > 0 \tag{3}$$

Por otro lado, la diferencia en valor absoluto entre el espesor calculado y el de la anterior iteración debe ser inferior a la tolerancia. El valor de la tolerancia fue fijado como el 10% del espesor calculado. El establecimiento de una tolerancia como condición para obtener un espesor, pretende evitar saltos bruscos en el mismo entre el calculado y el iterado.

$$|t_c - t_i| < 0.1 \cdot t_c \tag{4}$$

7.2 Longitud embebida

La longitud embebida de un pilote representa la longitud enterrada del mismo, que para terrenos arenosos se puede calcular en función de si se consideran los pilotes esbeltos (5) o rígidos (6) [1]:

$$L_{emb} > \left(\frac{4 \cdot E_p \cdot I_p}{nh}\right)^{0.2} \tag{5}$$

$$L_{emb} < \left(\frac{2 \cdot E_p \cdot I_p}{nh}\right)^{0.2} \tag{6}$$

Donde:

L_{emb}: longitud enterrada del pilote $[m]$

E_p: módulo de Young del acero del pilote $\left[\frac{N}{mm^2}\right]$

I_p: momento de inercia geométrico del pilote $[m^4]$

nh: rigidez del terreno $\left[\frac{MN}{m^3}\right]$

Tabla 4: Rigidez lineal del suelo del apartado 8.5.7 de [14]

$Ángulo\ efectivo\ de\ fricción\ interna\ \phi'$ [°]	25	30	35	40
$Rigidez\ lineal\ del\ suelo\ nh\ \left[\frac{MN}{m^3}\right]$	5.4	11	22	45

7.3 Cálculo de la capacidad de carga vertical

La capacidad de carga vertical de los pilotes es el peso muerto que soporta cada elemento:

$$m = m_{RNA} + m_t + m_u + m_p \tag{7}$$

Donde:

m: peso total de la estructura $[kg]$

m_{RNA}: masa del rotor, el eje y la góndola $[kg]$

m_t: masa de la torre $[kg]$

m_u: masa de los elementos de unión $[kg]$

m_p: masa de los pilotes $[kg]$

A su vez estás masas se calcularán siguiendo:

$$m = n \cdot V \cdot \rho_{acero} \tag{8}$$

Donde:

m: es la masa de los diferentes elementos $[kg]$

V: volumen de cada de elemento $[m^3]$

n: cantidad de ese tipo de elementos presentes en el total de la estructura $[-]$

Una vez calculadas las masas, se determinan las cargas verticales que soportan los elementos de unión, los pilotes y la torre:

$$V_t = (m_{RNA} + m_t)g \tag{9}$$

$$V_u = \frac{1}{3}(m_{RNA} + m_t)g \tag{10}$$

$$V_p = \frac{1}{3}(m_{RNA} + m_t + m_u)g \tag{11}$$

Donde:

V: carga axil debida al peso en cada elemento de la estructura $[N]$

g: intensidad del campo gravitatorio: $\left[9.81\frac{m}{s^2}\right]$

7.4 Cálculo de las cargas externas

En el presente proyecto se han tenido en cuenta las cargas dinámicas previsibles. Es decir, las cargas provenientes de marea, viento y oleaje. Han quedado fuera del análisis del proyecto cargas accidentales tales como terremotos, impactos o cualquier otro tipo de carga no prevista similar. Para la metodología de cálculo de las cargas se ha seguido la propuesta por Arany y Bhattacharya [1].

7.4.1 Cargas de viento

La fuerza de empuje en el rotor (Th) de un aerogenerador se puede estimar, de manera simplificada [1]:

$$\text{Th}=\frac{1}{2}\cdot\rho_a A_R C_T U^2 \tag{12}$$

Donde:

ρ_a: densidad del aire $\left[\frac{kg}{m^3}\right]$

A_R: área barrida por el rotor $[m^2]$

C_T: coeficiente de empuje o coeficiente de Betz $[-]$

U: es la velocidad del viento $\left[\frac{m}{s}\right]$

Coeficiente de empuje en función de la velocidad de operación [15]:

1. Velocidad entre la velocidad de corte y la velocidad nominal del viento:

$$C_T = \frac{3.5\left[\frac{m}{s}\right]\cdot\left(2\cdot U_R+3.5\left[\frac{m}{s}\right]\right)}{U_R^2} \approx \frac{7\left[\frac{m}{s}\right]}{U_R} \tag{13}$$

2. Después de la velocidad nominal, cuando el control de ángulo de la pala está activo, el coeficiente de empuje se puede calcular:

$$C_T = 3.5\left[\frac{m}{s}\right]\cdot U_R\cdot\left(2\cdot U_R + 3.5\left[\frac{m}{s}\right]\right)\cdot\frac{1}{U^3} \approx 7\left[\frac{m}{s}\right]\cdot\frac{U_R^2}{U^3} \tag{14}$$

3. El coeficiente de empuje no debe exceder a 1. Cuando la velocidad está por debajo de la nominal siguiendo este criterio el coeficiente de empuje se excede de ese valor, por lo que hay que limitarlo a 1.

Considerando un método cuasi estático de cálculo de fuerzas, la velocidad del viento se puede separar en dos componentes. Una de ellas es la velocidad media del viento ($\overline{U}$) y la otra es su componente turbulenta (u), por lo que la velocidad total del viento:

$$U = \overline{U} + u \tag{15}$$

Debido a que la carga del viento se puede separar en estos dos términos, así también se puede separar las cargas debidas a esta perturbación. Esto resulta en la carga media de viento (carga estática) y la carga turbulenta de viento (carga dinámica). Por tanto, se puede expresar la fuerza de empuje total como:

Puesto que la carga de viento se puede separar en dos, la carga media de viento (carga estática) y la carga turbulenta de viento (carga dinámica), se puede expresar la carga como:

$$Th = Th_{media} + Th_{turbulenta} = \frac{1}{2}\rho_a A_R C_T \overline{U}^2 + \frac{1}{2}\rho_a A_R C_T (2\overline{U}u + u^2) \tag{16}$$

7.4.1.1 Escenario de viento (U-1): Turbulencia normal y velocidad nominal del viento

Este es un escenario típico para el funcionamiento normal de la turbina. La desviación estándar de la velocidad del viento ($\sigma_{U,NTM}$) para turbulencias normales(u_{NTM}) y velocidad nominal del viento (U_R) ,se calcula siguiendo [1]:

$$\sigma_{U,NTM} = I_{ref} \cdot (0.75 \cdot U + b) \tag{17}$$

Donde:

b = 5.6 $\left[\frac{m}{s}\right]$

I_{ref}: intensidad de turbulencia de referencia [%] (esperada para una U = 15 $\frac{m}{s}$)

Para calcular el máximo de la componente turbulenta del viento u_{NTM}, hay que suponer que la constante de tiempo del control de ángulo de la pala, es igual al tiempo de rotación del rotor. Es decir, u_{NTM} se puede determinar calculando las contribuciones de la variación del viento con una frecuencia mayor que $f_{1P,max}$ a la desviación total estándar de la velocidad del viento $(\sigma_{U,NTM,f})$. Se puede calcular usando:

$$\sigma_{U,NTM,f} = \sigma_{U,NTM} \cdot \sqrt{\frac{1}{\left(\frac{6 \cdot L_k}{U_R} \cdot f_{1P,max}\right)^{\frac{2}{3}}}} \tag{18}$$

Siendo:

L_k: Escala de longitud integral de turbulencia

La componente turbulenta de la velocidad del viento en condiciones normales de operación bajo condiciones normales de turbulencia, se determina asumiendo que sigue una distribución normal y se toma el valor de intervalo de confianza del 90%, y posteriormente, se sustituye en la ecuación cuasiestática (16).

$$u_{NTM} = 1.28 \cdot \sigma_{U,NTM,f} \tag{19}$$

$$F_{wind,NTM} = \frac{1}{2} \cdot \rho_a A_R C_T (U_R + u_{NTM})^2 \tag{20}$$

$$M_{wind,NTM} = F_{wind,NTM} \cdot L_t \tag{21}$$

Donde:

$F_{wind,NTM}$: fuerza del viento para condiciones normales de turbulencia y

velocidad nominal del viento.

$M_{wind,NTM}$: momento del viento para condiciones normales de turbulencia y velocidad nominal del viento.

7.4.1.2 Escenario de viento (U-2): Turbulencia extrema y velocidad nominal del viento

El modelo de turbulencia extrema (ETM) se emplea para calcular la desviación estándar del viento a la velocidad nominal del viento (U_R), y a partir de ella la carga máxima del viento bajo condiciones de operación de turbulencia extrema.

La desviación estándar del viento en ETM viene dada por (16):

$$\sigma_{U,ETM} = c \cdot I_{ref} \cdot [0.072 \cdot \left(\frac{U_{avg}}{c} + 3\right) \cdot \left(\frac{U_R}{c} - 4\right) + 10] \tag{22}$$

Donde:

c = 2 $\left[\frac{m}{s}\right]$

U_{avg}: velocidad media del viento a largo plazo.

El valor máximo de la componente turbulenta del viento u_{ETM} se calcula:

$$\sigma_{U,ETM,f} = \sigma_{U,ETM} \cdot \sqrt{\frac{1}{\left(\frac{6 \cdot L_k}{U_R} \cdot f_{1P,max} + 1\right)^{\frac{2}{3}}}} \tag{23}$$

La componente turbulenta de la velocidad del viento en condiciones normales de operación y bajo condiciones de turbulencia extrema, usada en el análisis de cargas cíclicas dinámicas, se obtiene de asumir una distribución normal de la componente turbulenta de la velocidad del viento y tomar el valor de intervalo de confianza del 95%, y sustituirlo en la ecuación (16).

$$u_{ETM} = 2 \cdot \sigma_{U,ETM,f} \tag{24}$$

$$F_{wind,ETM} = \frac{1}{2} \cdot \rho_a A_R C_T (U_R + u_{ETM})^2 \tag{25}$$

$$M_{wind,ETM} = F_{wind,ETM} \cdot L_t \tag{26}$$

7.4.1.3 Escenario de viento (U-3): Ráfaga extrema de operación y velocidad nominal del viento

Se asume que la fuerza máxima ocurre cuando la fuerza máxima de empuje actúa y las condiciones de ráfaga extrema de operación (EOG) actúan sobre el rotor.

Se considera que la velocidad del viento cambia tan rápido que el sistema de control de ángulo de la pala no tiene tiempo suficiente para ajustar la inclinación de la misma. Esta

consideración es extremadamente conservadora dado que el control del ángulo de la pala en realidad tiene una constante de tiempo que le permite hacer un cierto ajuste en el ángulo de la pala a pesar de que este ajuste no es total.

La metodología para el cálculo de la ráfaga de operación extrema a 50 años se describe en el manual DNV [13]. Esta metodología desarrolla una distribución a largo plazo de intervalos de 10 minutos de la velocidad media del viento, se representación típica es mediante una distribución de Weibull. La función de distribución acumulativa se pude describir como:

$$\Phi_{U10}(K,s) = 1 - e^{-\left(\frac{U}{K}\right)^2} \tag{27}$$

Donde:

K: es el factor de escala de la distribución de Weibull $[m/s]$

s: es la constante de Weibull $[-]$

La función de distribución acumulativa de un año de la velocidad del viento se puede obtener usando:

$$\Phi_{U10,1año}(K,s) = \Phi_{U10}(K,s)^{52596} \tag{28}$$

De donde el 52 596 representa la cantidad de intervalos de 10 minutos existentes en 1 año $\left(1\ año \cdot 365.25\ \frac{días}{año} \cdot 24\ \frac{horas}{día} \cdot 6\ \frac{intervalos\ de\ 10\ min}{hora}\right)$.

Para determinar la velocidad extrema del viento a 50 años, que es típica en el diseño de aerogeneradores bajo condiciones extremas de viento, se toma el intervalo de confianza de 0,98 de la función de distribución acumulativa.

$$U_{10,50\ años} = K \cdot [-\ln(1 - 0.98^{\frac{1}{52596}})]^{\frac{1}{s}} \tag{29}$$

La velocidad extrema de operación se puede calcular a partir de la velocidad nominal del viento:

$$u_{EOG} = \min\left\{1.35 \cdot \left(U_{10,1\ año} - U_R\right); \frac{3.3 \cdot \sigma_{U,c}}{1 + \frac{0.1 \cdot D}{\Lambda_1}}\right\} \tag{30}$$

Donde:

$\Lambda_1 = L_k/8$

$\sigma_{U,c} = 0.11 \cdot U_{10,1\ año}$ es la desviación estándar de la velocidad del viento $U_{10,1\ año} = 0.8 \cdot U_{10,50\ años}$. Empleando los cálculos realizados, se pueden calcular las cargas totales de viento estimadas como:

$$F_{EOG} = Th_{EOG} = \frac{1}{2} \cdot \rho_a A_R C_T (U_R + u_{EOG})^2 \tag{31}$$

$$M_{wind,EOG} = F_{wind,EOG} \cdot L_t \tag{32}$$

7.4.1.4 Escenario de viento (U-4): Ráfaga extrema de operación y velocidad de corte del viento (U_{out})

Este caso se estudia puesto que es lógico esperar las cargas más grandes cuando el aerogenerador está trabajando a la máxima velocidad de operación.

La carga de viento generada por la ráfaga extrema de operación (EOG) a la máxima velocidad de operación se calcula teniendo en consideración que la expresión del coeficiente de empuje de [15] ya no es válida. El coeficiente de empuje se determina asumiendo que el control del ángulo de la pala mantiene la potencia constante. Esto significa que el coeficiente de empuje es directamente proporcional al cuadrado de la velocidad del viento calculada anteriormente U_R e inversamente proporcional al cubo de velocidad del viento.

$$C_T = \frac{7\left[\frac{m}{s}\right] \cdot U_R^2}{U^3} \tag{33}$$

Una vez determinada la ráfaga extrema de operación a la velocidad de corte del viento $u_{EOG,U_{out}}$, queda calcular el valor de la fuerza y momento de empuje que vienen dados por:

$$F_{wind,U_{out}} = \frac{1}{2} \rho_a A_R C_T (U_R + u_{EOG})^2 \tag{34}$$

$$M_{wind,U_{out}} = F_{wind,U_{out}} \cdot L_t \tag{35}$$

7.4.2 Cargas de oleaje

En este proyecto la metodología seguida para calcular las cargas debidas al oleaje [1], se basa en olas lineales, donde da la elevación de terreno η, la partícula de velocidad horizontal w y la aceleración horizontal de la partícula $\dot{w}$, se expresan como:

$$\eta(x,t) = \frac{H_m}{2} \cos\left(\frac{2\pi t}{T_s} - kx\right) \tag{36}$$

$$w(x,z,t) = \frac{\pi \cdot H_m \cdot \cosh(k \cdot L_t)}{T_s \cdot \sinh(k \cdot S)} \cdot \cos\left(\frac{2\pi t}{T_s} - kx\right) \tag{37}$$

$$\dot{w}(x,z,t) = \frac{-2 \cdot \pi^2 \cdot H_m \cdot \cosh(k \cdot L_t)}{{T_s}^2 \cdot \sinh(k \cdot S)} \cdot \operatorname{sen}\left(\frac{2\pi t}{T_s} - kx\right) \tag{38}$$

Donde x es la coordenada horizontal a lo largo de la dirección del viento y el número de olas k se obtiene de la relación de dispersión:

$$w^2 = g \cdot k \cdot \tanh(k \cdot S), \text{ donde } w = \frac{2\pi}{T_s} \tag{39}$$

La fuerza por unidad de longitud de la subestructura es la suma de la fuerza de arrastre F_Dy la fuerza de inercia F_I.

$$\begin{aligned} dF_{wave}(z,t) &= dF_D(z,t) + dF_I(z,t) \\ &= \frac{1}{2} \cdot \rho_w D_S C_D w(z,t) \cdot |w(z,t)| + C_m \rho_w A_S \dot{w}(z,t) \end{aligned} \tag{40}$$

Donde:

C_D: coeficiente de arrastre $[-]$ [16]

C_m: coeficiente de inercia $[-]$ [16]

ρ_w: densidad del agua de mar $\left[\frac{kg}{m^3}\right]$

La fuerza total horizontal y el momento flector sobre la línea de barro (altura del lecho marino) se obtienen integrando:

$$F_{wave}(t) = \int_{-S}^{\eta} dF_D \cdot dz + \int_{-S}^{\eta} dF_I \cdot dz \tag{41}$$

$$M_{wave}(t) = \int_{-S}^{\eta} dF_D \cdot (L_t + L_p) dz + \int_{-S}^{\eta} dF_I \cdot (L_t + L_p) dz \tag{42}$$

Los máximos de las fuerzas de arrastre e inercia ocurren en momentos distintos, por lo que se calcularán por separado. La carga máxima de inercia se da para el instante de tiempo t=0, cuando $\eta = 0$ y la fuerza de inercia ocurre para el instante t=$\frac{T_S}{4}$ y $\eta = \frac{H_m}{2}$. La carga máxima se obtendrá de integrar con estos límites:

$$F_{D,max} = \frac{1}{2} \rho_w D_S C_D \frac{\pi^2 H_S^2}{T_S^2 sinh^2(kS)} P_D(k,S,\eta) \tag{43}$$

$$M_{D,max} = \frac{1}{2} \rho_w D_S C_D \frac{\pi^2 H_S^2}{T_S^2 sinh^2(kS)} Q_D(k,S,\eta) \tag{44}$$

$$P_D(k,S,\eta) = \frac{e^{2k(S+\eta)} - e^{-2k(S+\eta)}}{8k} + \frac{S+\eta}{2} \tag{45}$$

$$Q_D(k,S,\eta) = \left(\frac{S+\eta}{8k} - \frac{1}{16k^2}\right) \cdot e^{2k(S+\eta)} - \left(\frac{S+\eta}{8k} - \frac{1}{16k^2}\right) \cdot e^{-2k(S+\eta)} + \left(\frac{S+\eta}{2}\right)^2 + \frac{1}{8k} \tag{46}$$

$$F_{I,max} = \frac{1}{2}\rho_w {D_S}^2 C_m \frac{\pi^3 H_S}{T_S^2 sinh^2(kS)} P_I(k,S,\eta) \tag{47}$$

$$M_{I,max} = \frac{1}{2}\rho_w {D_S}^2 C_m \frac{\pi^3 H_S}{T_S^2 sinh^2(kS)} Q_I(k,S,\eta) \tag{48}$$

$$P_I(k,S,\eta) = \frac{\sinh(k(S+\eta))}{k} \tag{49}$$

$$Q_I(k,S,\eta) = \left(\frac{S+\eta}{2k} - \frac{1}{2k^2}\right) \cdot e^{k(S+\eta)} - \left(\frac{S+\eta}{2k} - \frac{1}{2k^2}\right) \cdot e^{-k(S+\eta)} + \frac{1}{k^2} \tag{50}$$

En el método simplificado para obtener las cargas sobre la cimentación, se puede asumir conservativamente que la suma de las cargas máximas de inercia y de arrastre resultan en la carga de oleaje de diseño. Esta consideración es conservativa, ya que los máximos de ambas cargas se obtienen en momentos distintos. Todos los escenarios de oleaje, desde (W-1) hasta (W-4), se evalúan mediante el mismo procedimiento, pero empleando diferentes valores de altura de las olas H y periodo de las olas T.

7.4.3 Cargas de mareas

Se sigue el apartado 3.4.3 del manual DNV-OS-J101 [13] para el cálculo de las corrientes, donde la variación de velocidad de la corriente con la profundidad viene dada por:

$$v(z) = v_{marea}(z) + v_{viento}(z) \tag{51}$$

Para $z \leq 0$:

$$v_{marea}(z) = v_{marea0} \cdot \left(\frac{h+z}{h}\right)^{1/7} \tag{52}$$

Y para $-h_0 \leq z \leq 0$:

$$v_{viento}(z) = v_{viento0} \cdot \left(\frac{h_0+z}{h_0}\right) \tag{53}$$

Donde:

v(z): corriente total de velocidad a cota z

z: coordenada vertical desde el nivel del agua en reposo en sentido positivo

v_{marea0}: corriente de marea en la cota de agua en reposo

$v_{viento0}$: corriente de viento generada en la cota de agua en reposo

h: profundidad de agua tomada desde el nivel de agua en reposo (se toma en positivo)

h_0: profundidad de referencia para la corriente de viento generada a nivel de agua en reposo (se toma $h_0 = 50$).

Una vez determinada la variación de velocidad de la corriente, se calcula fuerza de arrastre debida a la corriente integrando la distancia desde la línea de barro hasta la superficie:

$$dF_{Dcorriente} = \frac{1}{2} \cdot \rho_w \cdot (v(z))^2 \cdot C_D \cdot D_p \, dz \tag{54}$$

$$F_{Dcorriente} = \int_{-S}^{0} \frac{1}{2} \cdot \rho_w \cdot (v(z))^2 \cdot C_D \cdot D_p \, dz \tag{55}$$

Una vez calculada la fuerza, se determina el punto de aplicación de la fuerza. Para ello se calcula el centro de gravedad donde se aplica la fuerza, sabiendo que el momento en ese punto es 0.

$$M_{cdg} = 0;$$

$$0 = \int_{-S}^{0} (z_{cdg} - z) \cdot dF_{Dcorriente} \tag{56}$$

$$M_{Dcorriente} = F_{Dcorriente} \cdot (S - z_{cdg}) \tag{57}$$

7.4.4 Cargas combinadas

Una vez calculadas las cargas de viento, oleaje y marea, se combinan las cargas siguiendo lo descrito en los escenarios de cargas combinadas E-2 y E-3. El momento máximo obtenido en el cálculo de los escenarios, se empleará para volver a calcular las dimensiones del pilote.

Esto se ha realizado mediante un programa automatizado implementado en MATLAB, que emplea un sistema de cálculo iterativo, que actualiza las dimensiones de los elementos en función de las necesidades de carga.

7.5 Procedimiento para comprobación de estados límite

En esta etapa del proceso se realizan las comprobaciones de los estados límite, si alguna de ellas no se desarrolla de manera satisfactoria, se varían los parámetros de dicha comprobación según se puede apreciar en el diagrama de flujo (plano D-01).

7.5.1 Estado límite último

En él se comprueba la resistencia y estabilidad de la estructura.

7.5.1.1 Comprobación de la capacidad de carga de los pilotes

Se considera que la capacidad de carga de los pilotes varía linealmente con la profundidad. Se ha considerado un tipo de terreno homogéneo sin cohesión (arena fina).

Para determinar dicha capacidad de carga, se debe calcular los siguientes parámetros previos.

$$K_p = \frac{1 + sen(\phi')}{1 - sen(\phi')} \tag{58}$$

$$e = \frac{M}{F} \tag{59}$$

Donde:

ϕ': ángulo efectivo de fricción interna[°]

M: momento máximo que soporta el pilote $[MN\ m]$

F: fuerza máxima que se ejerce sobre el pilote $[MN]$

e: excentricidad de la carga$[m]$

Los esfuerzos máximos que puede soportar el pilote se pueden calcular según [1], como:

$$F_R = \gamma * 0.5 * D_p * \frac{Lemb^3 * Kp}{(e + Lemb)} \tag{60}$$

$$M_R = F_R \cdot (e + \frac{2}{3}) \cdot 0.82 \sqrt{\frac{F_R}{D_p K_p \gamma}} \tag{61}$$

Donde:

F_R: Capacidad de carga horizontal del pilote $[MN]$

M_R: Momento que puede soportar el pilote $[MN\ m]$

γ: Peso unitario del suelo sumergido (se considera constante con la profundidad)

7.5.1.2 Comprobación a plastificación de las secciones

La comprobación a plastificación de la sección de un elemento se realiza comparando el límite elástico de la misma es mayor que la máxima tensión a la que ésta está sometida:

$$f_{yd} > \sigma \tag{62}$$

$$f_{yd} = \frac{f_{yk}}{\gamma_M} \tag{63}$$

Donde:

f_{yd}: límite elástico del acero habiéndole aplicado un coeficiente de seguridad $\left[\frac{N}{mm^2}\right]$

f_{yk}: límite elástico del acero $\left[\frac{N}{mm^2}\right]$

γ_M: coeficiente de seguridad $[-]$

La tensión σ es la tensión a la que está sometida la sección del elemento.

$$\sigma = \frac{N}{A} + \frac{M}{W} \tag{64}$$

Donde:

σ: tensión a la que está sometida la sección $\left[\frac{MN}{m^2}\right]$

N: esfuerzo axil al que está sometida la sección $[MN]$

M: momento flector máximo al que está sometida la sección $[MN\ m]$

W: módulo resistente de la sección $[m^3]$

7.5.1.2.1 Espesor de los elementos

Para poder realizar la comprobación a plastificación de todos los elementos, es necesario determinar el área, el momento de inercia, etc. Es necesario calcular primero el espesor de los elementos y se realiza siguiendo [1]:

$$t = 6.35 + \frac{D}{100} \tag{65}$$

Donde:

t: espesor de los elementos $[mm]$

D: diámetro de la pieza estudiada $[m]$

7.5.1.3 Comprobación a pandeo de las secciones

7.5.1.3.1 Comprobación a pandeo global

Para las comprobaciones a pandeo global se seguirá un método de [17], descrito en el apéndice D, del eurocódigo 3:

En primer lugar, se deben realizar los cálculos del esfuerzo axil y el momento flector de plastificación de la sección de cada elemento, para poder obtener la esbeltez reducida.

$$N_{pl} = A \cdot f_{yd} \tag{66}$$

Donde:

N_{pl}: axil de plastificación $[MN]$

A: sección transversal del elemento $[m^2]$

$$M_{pl} = W \cdot f_{yd} \tag{67}$$

Donde:

M_{pl}: momento flector de plastificación $[MN\ m]$

W: módulo resistente de la sección $[m^3]$

El módulo resistente, para una sección circular hueca es:

$$W = \frac{I}{\left(\frac{D}{2}\right)} \tag{68}$$

Es necesario hallar el esfuerzo axil crítico N_{crit} de la sección para posteriormente poder calcular la esbeltez reducida:

$$N_{crit} = \left(\frac{\pi}{L_k}\right)^2 E\ I \tag{69}$$

Donde:

E: es el módulo de elasticidad del acero

$L_k = \beta \cdot L$

Para el coeficiente de pandeo β se toma el valor β=2, ya que es el valor más desfavorable.

Se calcula la esbeltez reducida λ según:

$$\lambda = \sqrt{\frac{N_{pl} \cdot \gamma}{N_{crit}}} \tag{70}$$

Una vez calculada la esbeltez reducida se procede a calcular el factor de reducción k:

$$k = \frac{1}{v + \sqrt{\phi^2 - \lambda^2}} \tag{71}$$

Donde ϕ, se calcula mediante:

$$\phi = 0.5 \cdot (1 + \alpha \cdot (\lambda - 0.2) + \lambda^2) \tag{72}$$

El parámetro α depende del tipo de sección del elemento, en este caso. Este caso puesto que se emplean secciones circulares huecas se toma el valor $\alpha = 0.21$ [17].

$$\Delta n = 0.25 \cdot k \cdot \lambda^2 \leq 0.1 \tag{73}$$

La expresión para calcular el pandeo global viene descrita por los parámetros definidos anteriormente y su expresión no puede ser superior a la unidad:

$$\frac{N}{N_{pl}} + \frac{\beta_M \cdot M}{M_{pl}} + \Delta n \leq 1 \tag{74}$$

Cuando se calcula el pandeo en los pilotes, ha de considerarse que la longitud de los pilotes no tiene en cuenta la longitud embebida de los mismos, para simplificar los cálculos.

7.5.1.3.2 Comprobación a pandeo local

El pandeo local es el que se produce en las secciones aisladas que componen cada uno de los elementos de la estructura.

Para las comprobaciones a pandeo local se sigue un método de [17], descrito en el apéndice D, del eurocódigo 3:

$$\sigma_{S,RCR} = 0.605 \cdot E \cdot I \cdot C_x \cdot \frac{t}{r} \tag{75}$$

Donde:

E: módulo de elasticidad del material $\left[\frac{N}{mm^2}\right]$

I: momento de inercia de la barra $[m^4]$

t: espesor de la barra $[m]$

r: radio de la barra $[m]$

El parámetro C_x es un parámetro de cálculo dependiente de la longitud y del radio del elemento. Mediante el cálculo de w se determinan diferentes formas de calcular C_x:

$$w = \frac{L}{\sqrt{\frac{t \cdot D}{2}}} \tag{76}$$

Donde:

w: es la longitud del segmento definido en [17] $[-]$

L: longitud de la barra $[m]$

D: diámetro de la barra $[m]$

t: espesor de la barra $[m]$

Tabla 5: Valor de C_x en función de w

w	C_x
$1.7 \leq w \leq 0.5\,\frac{r}{t}$	$C_x = 1$
$w \leq 1.7$	$C_x = 1.36 - \frac{1.83}{w} + \frac{2.07}{w^2}$
$w \leq 0.5\,\frac{r}{t}$	$C_x = 0.6$

$$\sigma_{x,d} = \frac{N}{A} + \frac{M}{W} \tag{77}$$

Para conseguir superar la comprobación a pandeo local se debe cumplir:

$$\sigma_{x,d} \leq \frac{\sigma_{S,RCR}}{\gamma_M} \tag{78}$$

Donde γ_M ha sido definida con anterioridad, siendo el valor γ_M= 1.1.

7.5.2 Estado Límite de Servicio

Marca el límite, que de ser rebasado produce una pérdida de funcionalidad o deterioro de la estructura [7].

7.5.2.1 Comprobación de deflexión y rotación

Teniendo calculados los esfuerzos en cada nodo del a estructura se comprueba el desplazamiento y el giro en la línea de barro de los pilotes con los límites:

$$u_x < 0.1m \qquad [2]$$

$$\theta_x < 0.5° \qquad [1]$$

En caso de que no se cumpla cualquiera de los dos criterios, se aumenta el diámetro de los pilotes en un valor preestablecido.

7.5.3 Estado Límite de Fatiga

En él se determinan los ciclos de carga que soportan los diferentes elementos de la estructura antes de producir la rotura del material.

7.5.3.1 Comprobación de la frecuencia natural del sistema

Se establece que la frecuencia natural de la estructura f_n ha de estar comprendida entre los siguientes límites:

$$f_{1P} = \frac{v_{max\ rotor}}{60}\ [Hz] \tag{78}$$

$$f_{3P} = 3\frac{v_{min\ rotor}}{60}\ [Hz] \tag{79}$$

Donde:

f_{1P}: frecuencia de rotación del rotor$[Hz]$

f_{3P}: frecuencia de vibración del paso de pala$[Hz]$

$v_{max\ rotor}$: frecuencia máxima de operación del rotor (rpm)

$v_{min\ rotor}$: frecuencia mínima de operación del rotor (rpm)

Se aplica un factor de seguridad del 5%, resultando, por tanto, en la condición:

$$1.05 \cdot f_{1P} < f_n < 0.95 \cdot f_{3P} \tag{80}$$

Si la frecuencia natural queda por debajo del límite inferior se han desarrollado dos metodologías para rigidizar la estructura a fin de aumentar la frecuencia natural de la estructura.

La primera metodología consiste en aumentar los espesores de las secciones de todos los elementos de la estructura en un valor preestablecido:

$$t_{i+1} = t_i + \Delta t \tag{79}$$

Donde:

t_i: espesor de la sección en la iteración i $[m]$

Δt: aumento de espesor preestablecido $[m]$

Una vez calculado el nuevo espesor, se comprueba que la relación δ entre los diámetro interior y exterior de todos los elementos de la estructura, se mantiene en 0.97, donde:

$$\delta = \frac{D_{int}}{D_{ext}} \tag{80}$$

En la segunda metodología, se aumenta la longitud embebida de los pilotes y se vuelven a realizar las comprobaciones.

$$L_{emb_{i+1}} = L_{emb_i} + \Delta L \tag{83}$$

Donde:

L_{emb_i}: longitud embebida de los pilotes en la iteración i

ΔL: incremento de la longitud embebida (valor preestablecido)

En caso de que la frecuencia natural quede por encima del límite establecido, se comprueba si hay elementos de la estructura sobredimensionados. En ese caso se disminuye la sección de esos elementos en función de un porcentaje preestablecido de su valor:

$$D = D \cdot (1 - x) \tag{84}$$

Si no hay elementos sobredimensionados el proceso de dimensionamiento no converge a ninguna solución.

7.5.3.2 Cálculo de la amplificación dinámica de las cargas externa

Para calcular la amplificación dinámica de las cargas primero hay que determinar el factor de amplificación dinámica D.A.F., para ello se ha seguido [1]:

$$D.A.F. = \frac{1}{\sqrt{\left(1 - \left(\frac{f_{ola}}{f_n}\right)^2\right)^2 + 2\,\chi\left(\frac{f_{ola}}{f_n}\right)^2}} \tag{85}$$

Donde:

f_n: frecuencia natural del sistema $[Hz]$

$f_{ola} = \frac{1}{T}$ (T es el periodo de la ola y depende del caso que se esté estudiando) $[Hz]$

χ: factor de amortiguamiento del viento $[-]$

Se toman dos tipos de factor de amortiguamiento del viento:

Tabla 6: factor de amortiguamiento según la dirección del viento

Longitudinal (χ_x)	0.02 (2%)
Transversal (χ_y)	0.005 (0.5%)

Una vez calculados los factores de amplificación dinámica para ambos factores de amortiguamiento, se procede a calcular las cargas para el mayor valor de factor de amplificación dinámica:

$$F_{max,oleaje,total} = F_{max,total} \cdot D.A.F. \quad (86)$$

$$M_{max,oleaje,total} = M_{max,total} \cdot D.A.F. \quad (81)$$

7.5.3.3 Comprobación a fatiga de las secciones

En la comprobación a fatiga se llevan a cabo dos comprobaciones. Por un lado, se comprueba que, al calcular los factores de amplificación dinámica de las cargas, las amplitudes de las tensiones cíclicas de las cargas son inferiores a la f_{yd} del material:

$$\sigma_{max,cíclica} < f_{yd} \quad (82)$$

Por otro lado, siguiendo [18] se obtiene el número de ciclos que aguanta cada uno de los elementos de la estructura:

$$\log(N) = \log(a) - m \cdot \log\left(\sigma \cdot \left(\frac{t}{t_{ref}}\right)^k\right) \quad (83)$$

Donde:

N= número de ciclos $[-]$

t: espesor del elemento $[m]$

t_{ref}: espesor de referencia de 25 mm (si el espesor del elemento es inferior a 25 mm $t = t_{ref}$) $[m]$

m: valor inverso de la pendiente de la curva S-N (m=3) [18]

log(a): corte de la curva N con el eje x (log(a)=12.449) [18]

k: exponente del espesor

8 Conclusiones

En este Trabajo de Fin de Máster se plantea y desarrolla un procedimiento numérico para el dimensionamiento de la estructura de cimentación tripilote de un aerogenerador offshore.

Para realizar este proyecto se ha documentado los distintos tipos de cimentación existente, mentando las principales características de los mismos. Como base del procedimiento numérico se han usado distintas publicaciones científicas, adaptándolas al objetivo de este TFM. También se usa normativa internacional de referencia para el proceso de dimensionado. Tras ello, y una vez establecidas las condiciones y requisitos que debe cumplir la estructura diseñada para asegurar su sustentación y estabilidad, así como los agentes externos a los que es sometida la estructura, se desarrolla el algoritmo que conduce a la solución numérica del problema planteado, apoyándose en cálculo iterativo y cálculo matricial. Una vez desarrollado, se implementa este algoritmo en un software de programación y se ejecuta para un caso práctico con valores reales tanto de fenómenos externos, así como de terreno, demostrando la validez del programa desarrollado.

8.1 Líneas futuras

Ya realizado el proyecto, es de especial interés las posibilidades de mejora que presenta, tales como:

- Incluir en el modelo comprobaciones que no se encuentran en el presente trabajo, como son la deflexión y la rotación a largo plazo, así como la variación de la frecuencia con el tiempo.
- Sustituir el método de cálculo de pandeo usado en el presente proyecto por uno más riguroso.
- Tener en cuenta los espectros reales de las cargas, dado que se han simplificado sus cálculos.
- Analizar la interacción dinámica entre los pilotes. Debe comprobarse la relevancia de esta influencia entre pilotes.
- Dimensionar los elementos de transición entre los pilotes y los elementos de unión, así como la pieza de transición entre los elementos de unión y la torre. Considerar que la torre tiene forma cónica, dado que se consideró cilíndrica.
- Desarrollar el proceso de manera que se dimensione la estructura para diferentes ángulos de inclinación de los elementos de unión y comprobar en cuál de estos casos se obtienen las dimensiones mínimas.

9 Referencias

[1] L. Arany, S. Bhattacharya, J. Macdonald y S. Hogan, «Design of monopiles for offshore wind turbines in 10 steps,» *Soil Dynamics and Earthquake Engineering,* nº 92, pp. 126-152, 2017.

[2] T. Gentils, L. Wang y A. Kolios, «Integrated structural optimisation of offshore wind turbine support structures based on finite element analysis and genetic algorithm,» *Applied Energy,* pp. 187-204, 09 mayo 2017.

[3] Wind EUROPE, «Offshore Wind in Europe Key trends and statistics 2017,» 2018.

[4] J. Cardona, «Slideshare,» Iberdrola, 04 noviembre 2005. [En línea]. Available: https://es.slideshare.net/jose_cardona/embarcacin-de-apoyo-al-montaje-offshore. [Último acceso: 25 junio 2018].

[5] C. Perez-Collazo, D. Greaves y G. Iglesias, «A review of combined wace and offshore wind energy,» *Renewable and Susteinable Energy Reviews,* nº 42, pp. 141-153, 2015.

[6] D. Bolado Fernández, Diseño de estructura offshore tipo Jacket con pieza de transición de hormigón, Santander, 2017.

[7] V. Herrando Germán, Optimización del diseño de la cimentación para un aerogenerador de gran altura, Barcelona, 2012.

[8] F. García, G. M. Álamo, L. A. Padrón, J. J. Aznárez y O. Maeso, «Rigidez dinámica de cimentaciones tripilote para aerogeneradores marinos,» de *Congreso de Métodos Numéricos en Ingeniería*, Lisboa, 2015.

[9] G. M. Álamo, A. E. Martínez-Castro, L. A. Padrón, J. J. Aznárez, R. Gallego y O. Maeso, «Efficient numerical model for the computation of impedance functions of inclined pile groups in layed soils,» *Engineering Structures,* nº 126, pp. 379-390, 25 July 2016.

[10] G. M. Álamo Meneses, Dynamic response of piled structures. Implementation of a model based on the integral formulation of the problem and the use of a fundamental solution for the layered half space. Tesis Doctoral, Universidad de Las Palmas de Gran Canaria, Las Palmas de Gran Canaria, 2018.

[11] G. M. Álamo, J. J. Aznárez, L. A. Padrón y A. E. Martínez-Castro, «Dynamic soil-structure interaction in offshore wind turbines on monopiles in layered seabed based on

real data,» *Ocean Engineering,* nº 156, pp. 14-24, 2018.

[12] S. V. Vera Rodríguez, Diseño y dimensionamiento de la cimentación de un aerogenerador offshore en las islas canarias, Las Palmas de Gran Canaria, 2017.

[13] Det Norske Veritas, DNV-OS-J101: Design of offshore wind turbine, Høvik, 2014.

[14] American Petroleum Institut, Specific requirements for offshore structures, Part4-Geotechnical and foundation design considerations, 2014.

[15] P. Frohboese y C. Schmuck, «Thrust coefficients used for estimation of wake effects for fatigue load calculation,» de *European Wind Energy Coference*, Warsaw, 2010.

[16] F. M. White, Mecánica de fluidos, McGraw -Hill, 2008.

[17] European Committee for Standardisation, «Part 1-6: Strength and Stability of Shell Structures, Annex D: Expressions for buckling stress design,» de *Eurocode 3: Design of steel structures*, Bruselas, 2004.

[18] Det Norske Veritas , DNV-C203: Fatigue Design of Offshore Steel Structures, 2011.

[19] SCR Rent, [En línea]. Available: http://src.lv/portfolio-item/tripods-for-wind-turbines-foundations/. [Último acceso: 14 dicembre 2017].

[20] A. Domínguez Bargueño, Proyecto básico de procedimiento constructivo y diseño de equipo de elevación para aerogeneradores offshore, Santander, 2014.

[21] S. Butterfield, W. Muriel, J. Jonkman y P. Sclavounos, «Engineering Challenges for Floating Offshore Wind Turbines,» de *Offshore Wind Turbines Conference*, Copenague, 2005.

[22] «Everything about solar energy,» 22 octubre 2017. [En línea]. Available: http://energyprofessionalsymposium.com/?p=36674. [Último acceso: 27 junio 2018].

[23] Det Norske Veritas , Guidelines for Design of Wind Turbines, Copenague: Jydsk Centraltrykkeri, 2002.

[24] International Electrotechnical Comission, International Standard IEC-61400-1: Design requirements, Geneva, 2005.

[25] International Electrothecnical Comission, IEC 61400-3: Design requirements for offshore wind turbines, Geneve, 2009.

Anexo I: Aplicación del procedimiento

PROCEDIMIENTO NUMÉRICO PARA EL DIMENSIONAMIENTO DE ESTRUCTURAS DE SOPORTE DE AEROGENERADORES OFFSHORE SOBRE GRUPOS DE PILOTES

Índice

1 Introducción 1

1.1 Normativa de obligado cumplimiento 1

2 Datos de partida 1

2.1 Ubicación 1

2.2 Datos eólicos 1

2.3 Datos de oleaje 2

2.4 Datos del nivel del mar 2

2.5 Datos geotécnicos 3

2.6 Aerogenerador seleccionado 3

2.7 Propiedades del acero 3

3 Metodología 4

4 Cargas sobre la cimentación 4

4.1 Cargas de viento 4

4.2 Cargas del oleaje 5

4.3 Cargas de las corrientes marinas 5

4.4 Combinación de cargas 6

4.5 Carga vertical 6

4.6 Factores dinámicos de amplificación 6

4.7 Resumen de cargas 7

5 Resultados 7

5.1 Comprobaciones 7

5.1.1 Capacidad de carga última de la cimentación 7

5.1.2 Deformaciones 8

5.1.3 Plastificación 8

5.1.4 Pandeo 8

5.1.5 Frecuencia natural 9

5.1.6 Fatiga 10

5.1.7 Resumen de las comprobaciones 10

5.2 Solución adoptada 11

Índice de tablas:

Tabla 1: Ubicación del aerogenerador 1
Tabla 2: Datos eólicos 2
Tabla 3: Datos de oleaje 2
Tabla 4: Datos del nivel del mar 2
Tabla 5: Datos geotécnicos 3
Tabla 6: Características del aerogenerador 3
Tabla 7: Propiedades del acero S355 3
Tabla 8: Resumen del procedimiento 4
Tabla 9: Cargas de viento para los diferentes escenarios 4
Tabla 10: Cargas de oleaje 5
Tabla 11: Tablas de corriente 5
Tabla 12: Combinación de cargas 6
Tabla 13: Carga vertical 6
Tabla 14: Factores de amortiguamiento 7
Tabla 15: Resumen de cargas 7
Tabla 16: Comprobación carga última de la cimentación 8
Tabla 17: Comprobación deflexión y rotación 8
Tabla 18: Comprobación de plastificación de las diferentes secciones 8
Tabla 19: Comprobación de pandeo global 9
Tabla 20: Comprobación de pandeo lateral 9
Tabla 21: Comprobación de la frecuencia 9
Tabla 22: Comprobación a fatiga 10
Tabla 23: Resumen comprobaciones 11
Tabla 24: Solución para la torre 11
Tabla 25: Solución por elemento de unión 11
Tabla 26: Solución por pilote 11

Índice de figuras:

Figura 1: Respuesta en frecuencia 10

1 Introducción

En el presente anexo se aplica el procedimiento desarrollado en la memoria a un caso real en la costa sureste de Gran Canaria. La ubicación elegida y las condiciones de viento, oleaje y marea ya fueron estudiadas por Sergio V. Vera Rodríguez en su Trabajo Fin de Máster "Diseño y Dimensionamiento de la Cimentación de un Aerogenerador Offshore en las Islas Canarias" en junio de 2017 [1].

Los datos del recurso eólico, así como los de mareas, son tomados de los plasmados en dicho TFM.

1.1 Normativa 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.

2 Datos de partida

En el presente capítulo se define el emplazamiento del aerogenerador, así como los datos eólicos, de oleaje, del nivel del mar y geotécnicos necesarios para el dimensionamiento del aerogenerador.

2.1 Ubicación

Para decidir un emplazamiento han de ser considerados los datos de viento, profundidad y de batimetría de las posibles alternativas.

La ubicación seleccionada se sitúa en el sureste de Gran Canaria. Concretamente, frente a la costa del municipio de Santa Lucía de Tirajana, cuya ubicación exacta queda indica en la Tabla 1.

Tabla 1: Ubicación del aerogenerador

Coordenadas UTM	X: 452850 Y: 3069850
Distancia con respecto a la costa [m]	4300
Profundidad de la lámina de agua [m]	50

2.2 Datos eólicos

Los parámetros de viento requeridos de la ubicación del aerogenerador offshore son los reflejados en la Tabla 2.

Tabla 2: Datos eólicos

Parámetro	Valor
Constante de Weibull (s)	1.896 [-]
Factor de escala medio del viento (Función de Weibull) (k)	10.4 [m/s]
Intensidad de turbulencia de referencia (I_{ref})	17 [%]
Escala de longitud integral del viento (l_k)	260.1 [m]
Densidad del aire (ρ_{aire})	1.225 [kg/m^3]

2.3 Datos de oleaje

Los datos de oleaje de la zona indicada son los mostrados en la Tabla 3.

Tabla 3: Datos de oleaje

Descripción	Valor
Altura significativa de la ola con un periodo de retorno de 50 años (HS50)	6.57 [m]
Periodo pico de la ola con un periodo de retorno de 50 años (TS50)	15.2 [s]
Altura máxima de la ola con un periodo de retorno de 25 años (Hm25)	9.5 [m]
Periodo máximo de la ola con un periodo de retorno de 25 años (Tm25)	10.92 [s]
Altura significativa de la ola con un periodo de retorno de 1 año (HS1)	4.6 [m]
Periodo pico de la ola con un periodo de retorno de 1 año (TS1)	7.6 [s]
Altura máxima de la ola con un periodo de retorno de 1 año (Hm1)	8.6 [m]
Periodo máximo de la ola con un periodo de retorno de 1 año (Tm1)	10.39 [s]

2.4 Datos del nivel del mar

Para el emplazamiento seleccionado, los datos del nivel del mar son los reflejados en la tabla 4.

Tabla 4: Datos del nivel del mar

Descripción	Valor
Nivel del mar (proporcionado por la batimetría)	50 [m]
Pleamar máxima	3.19 [m]
Lámina de agua	53.19 [m]

2.5 Datos geotécnicos

Para el presente estudio se ha de considerar las propiedades del terreno homogéneas e invariantes con la profundidad. Por ello, la densidad del terreno es considerada constante a lo largo del perfil estudiado. Esto es debido a lo limitado de los datos geotécnicos reflejados en la Tabla 5.

Tabla 5: Datos geotécnicos

Parámetro	Valor
Rigidez lineal del suelo (ángulo de rigidez interna) (nh1)	5.4 [MN/m^3]
Densidad del suelo (ρ_s)	1800 [kg/m^3]
Coeficiente de Poisson del suelo (ν_s)	0.2 [-]

2.6 Aerogenerador seleccionado

El aerogenerador para el cual se ha diseñado la cimentación es el modelo Vestas V164 cuyas características principales se muestran en la Tabla 6.

Tabla 6: Características del aerogenerador

Parámetro	Valor
Potencia nominal	8 [MW]
Frecuencia de giro nominal del aerogenerador	10.5 [rpm]
Velocidad mínima de operación ($v_{min\ op}$)	4.8 [rpm]
Velocidad máxima de operación ($v_{max\ op}$)	12.1 [rpm]
Longitud de las palas	80 [m]
Diámetro del rotor	164 [m]
Área de barrido (A_R)	21.164 [m^2]
Peso (rotor + góndola) (m_{RNA})	390 [t] $\pm$ 10%
Peso de cada pala (m_{pala})	35 [t]

2.7 Propiedades del acero

El acero empleado para el dimensionamiento del aerogenerador es S355 y sus propiedades son las que se muestran a continuación:

Tabla 7: Propiedades del acero S355

Parámetro	Valor
Módulo de elasticidad (E)	$2.1 \cdot 10^{11}$ [N/m^2]

Módulo de rigidez (G)	$8.3 \cdot 10^{10}$ [N/m^2]
Densidad (ρ)	7850 [kg/m^3]
Límite elástico (f_{yk})	$3.55 \cdot 10^{8}$ [N/m^2]

3 Metodología

La metodología seguida para el dimensionamiento del aerogenerador es la desarrollada en la memoria, y se puede resumir como:

Tabla 8: Resumen del procedimiento

Orden	Paso del proceso
1	Pre dimensionamiento de la estructura
2	Cálculo de la longitud embebida
3	Cálculo de la capacidad de carga vertical
4	Programa externo de cálculo
5	Cálculo de las cargas externas
6	Comprobación de carga de los pilotes
7	Comprobación a plastificación de los elementos de la estructura
8	Comprobación a pandeo de los elementos de la estructura
9	Comprobación de deflexión y rotación en la línea de barro de los pilotes
10	Comprobación de la frecuencia natural del sistema
11	Cálculo de los factores de amplificación dinámica de las cargas
12	Comprobación de los espesores mínimos de los elementos
13	Comprobación a fatiga de los elementos

4 Cargas sobre la cimentación

4.1 Cargas de viento

En el presente proyecto se realiza el estudio para cuatro casos de viento. En la Tabla 9 se muestran las cargas de viento divididas para cada uno de los escenarios.

Tabla 9: Cargas de viento para los diferentes escenarios

Parámetro	Símbolo	(U-1) NTM	(U-2) ETM	(U-3) EOG U_R	(U-4) EOG U_{OUT}

Fuerza máxima en el ciclo de carga	$F_{windmax}$ [MN]	1.33	2.58	3.08	0.97
Fuerza media sin turbulencia	$F_{windmean}$ [MN]	0.92	1.31	1.64	1.03
Fuerza mínima en el ciclo de carga	$F_{windmin}$ [MN]	0.72	0.16	0.15	0.09
Momento máximo en el ciclo de carga	$M_{windmax}$ [MN·m]	132.62	257.89	307.5	91.07
Momento medio sin turbulencia	$M_{windmean}$ [MN·m]	99.81	99.81	99.81	8.50
Momento mínimo en el ciclo de carga	$M_{windmin}$ [MN·m]	27.04	15.39	13.77	5.98

4.2 Cargas del oleaje

En este proyecto se calculan las cargas de oleaje para los diferentes escenarios establecidos. Además, cabe destacar que los casos más desfavorables son W-2 y W-4, por lo que solo se realiza el estudio de estos escenarios, caracterizados en la Tabla 10.

Tabla 10: Cargas de oleaje

Parámetro	W-2	W-4
Fuerza máxima de la ola	0.17 [MN]	0.25 [MN]
Momento máximo de la ola	7.41 [MN m]	9.38 [MN m]

4.3 Cargas de las corrientes marinas

Las cargas debidas a las corrientes marinas también son relevantes para en el dimensionado de la estructura, los parámetros que caracterizan este tipo de cargas son los mostrados en la Tabla 11.

Tabla 11: Tablas de corriente

Parámetro	W-2
Fuerza arrastre ($F_{arrastre}$)	0.16 [MN]
Punto de aplicación (z_{cdg})	33.24 [m]
Momento máximo en la línea de barro $M_{arrastre}$	5.68 [MN m]

4.4 Combinación de cargas

En la tahla 12 se muestra un resumen de las cargas obtenidas para los escenarios más desfavorables. Se ha resaltado el caso más desfavorable en verde.

Tabla 12: Combinación de cargas

Carga	Escenario de ola extrema E2 (U-2)+(W-4)+Corriente	Escenario de viento extremo E3 (U-3)+(W-2)+Corriente
Fuerza máxima de viento	2.58 [MN]	3.08 [MN]
Momento máximo de viento	257.89 [MN m]	307.5 [MN m]
Fuerza máxima de ola	0.17 [MN]	0.25 [MN]
Momento máximo de la ola	7.41 [MN m]	9.38 [MN m]
Fuerza máxima de la corriente	0.16 [MN]	0.16 [MN]
Momento máximo de la corriente	5.68 [MN m]	5.68 [MN m]
Fuerza total	2.91 [MN]	3.49 [MN]
Momento de vuelco total	270.98 [MN m]	322.56 [MN m]
Momento de vuelco total * 1.35	365.82 [MN m]	435.46 [MN m]

4.5 Carga vertical

La carga vertical es la carga debida al peso propio de los elementos. Esta queda reflejada en la Tabla 13.

Tabla 13: Carga vertical

Parámetros	Valores
Masa del conjunto (rotor+góndola) (m_{RNA})	534 [t]
Masa de la torre (m_T)	427 [t]
Masa de los elementos de unión (m_U)	123.4 [t]
Masa de los pilotes (m_P)	524.4 [t]
Masa total (m_T)	1608.8 [t]
Carga vertical (peso muerto) (V)	15.78 [MN]

4.6 Factores dinámicos de amplificación

Como queda reflejado en la memoria, para determinar los factores dinámicos de amplificación es necesario conocer el factor pico de la ola y el factor de amortiguamiento. Para decidir el factor de amortiguamiento se tienen en cuenta las dos direcciones principales en las que las fuerzas externas actúan sobre el aerogenerador.

Por un lado, tenemos la dirección en la misma línea que viene el viento (longitudinal, x), por otro lado, la dirección de viento de costado (transversal, y). Los valores de factor de amortiguamiento usados para cada uno de los dos posibles casos quedan reflejados en la Tabla 14.

Tabla 14: Factores de amortiguamiento

Parámetro	Valor
Factor de amortiguamiento longitudinal (x) (ξ_x)	2 [%]
Factor de amortiguamiento transversal (y) (ξ_y)	0.5 [%]

Una vez calculados los factores dinámicos de amplificación es necesario recalcular las cargas debidas al oleaje, así como el momento flector máximo.

4.7 Resumen de cargas

En la tabla 15 se resume las cargas externas obtenidas, para el escenario de cálculo más desfavorable, que es el caso de viento (U-3)

Tabla 15: Resumen de cargas

Tipos de cargas	Valor
Carga media de viento	99.81 [MN m]
Carga máxima de viento	307.5 [MN m]
Carga mínima de viento	13.77 [MN m]
Carga máxima debida al oleaje	9.38 [MN m]
Carga mínima debida al oleaje	-9.38 [MN m]
Carga de corriente	5.68 [MN m]
Carga máxima combinada	322.56 [MN m]
Carga máxima combinada y factor de carga de 1.35	435.46 [MN m]
Carga mínima combinada	[MN m]

5 Resultados

5.1 Comprobaciones

Las comprobaciones se hacen en el mismo orden que se calculan en el procedimiento, y se comprueba que se cumple cada una de las comprobaciones.

5.1.1 Capacidad de carga última de la cimentación

La capacidad de carga última de la cimentación es la carga máxima que soportan los pilotes. Se comprueba que la fuerza axil de compresión y el momento flector soportados por los pilotes

debidos a las cargas externas y el peso propio de la estructura son inferiores a los esfuerzos máximos que resisten los mismos. Los resultados están resumidos en la tabla 16.

Tabla 16: Comprobación carga última de la cimentación

Comprobación	Valor calculado	Valor límite	Cumplimiento
Fuerza	3.59 [MN]	5.02 [MN]	Cumple
Momento	427.92 [MN m]	612.42 [MN m]	Cumple

5.1.2 Deformaciones

Se ha decidido mostrar únicamente los datos del pilote que presenta mayores deformaciones (tanto deformación como rotación en la tabla 17) y comprobar si estos cumplen con los requisitos de diseño:

Tabla 17: Comprobación deflexión y rotación

Comprobación	Valor calculado	Valor límite	Cumplimiento
Deflexión	$3.02 \cdot 10^{-3}$ [m]	0.1 [m]	Cumple
Rotación	0.0066 [°]	0.5 [°]	Cumple

5.1.3 Plastificación

En este apartado se comprueba que ninguno de los elementos plastifique, como se muestra en la tabla 18.

Tabla 18: Comprobación de plastificación de las diferentes secciones

Condición	Elemento	Comprobación	Cumplimiento
$f_{yd} > \frac{N}{A} + \frac{M}{W}$	Torre	322.73 > 89.88 [MN/m^2]	Cumple
	Elem. de unión	322.73 > 92.51 [MN/m^2]	Cumple
	Pilotes	322.73 > 214.59 [MN/m^2]	Cumple

5.1.4 Pandeo

En esta etapa se realizan las comprobaciones a pandeo global y lateral para asegurar la estabilidad de la estructura.

5.1.4.1 Pandeo global

En la tabla 19 queda reflejada la condición que ha de cumplirse para que evitar el pandeo global en los elementos de la estructura, así como la comprobación que asegura que en ninguno de ellos se produce este efecto.

Tabla 19: Comprobación de pandeo global

Condición	Elemento	Comprobación	Cumplimiento
$\frac{N}{N_p \cdot k} + \frac{\beta_M \cdot M}{M_P} + \Delta n \leq 1$	Torre	0.4816 < 1	Cumple
	Elem. de unión	0.6395 < 1	Cumple
	Pilotes	0.4607 < 1	Cumple

5.1.4.2 Pandeo lateral

En la Tabla 14 queda reflejada la condición que ha de cumplirse para que evitar el pandeo local en los elementos de la estructura, así como la comprobación que asegura que en ninguno de ellos se produce este efecto.

Tabla 20: Comprobación de pandeo lateral

Condición	Elemento	Comprobación	Cumplimiento
$\frac{N}{A} + \frac{M}{W} \leq \frac{\sigma_{S_RCR}}{\gamma_M}$	Torre	128.50 < 1060.2 [MN/m^2]	Cumple
	Elem. de unión	132.14 < 6949.8 [MN/m^2]	Cumple
	Pilotes	214.59 < 4423.3 [MN/m^2]	Cumple

5.1.5 Frecuencia natural

Para el modelo de aerogenerador seleccionado, Vestas V164, la frecuencia natural en base flexible debe estar en un rango de frecuencias muy pequeño, tanto que se ha establecido un margen superior e inferior del 5%. En la figura 1, se puede loa diferentes valores que toma el desplazamiento en función de la frecuencia en extremo superior de la torre del aerogenerador..

Tabla 21: Comprobación de la frecuencia

Frecuencia	Valor
Frecuencia 1P (incrementada un 5%)	0.212 Hz
Frecuencia natural en base flexible	0.215 Hz
Frecuencia 3P (minorada un 5%)	0.228 Hz
$1.05 \cdot f_{1P} < f_n < 0.95 \cdot f_{3P}$	Cumple

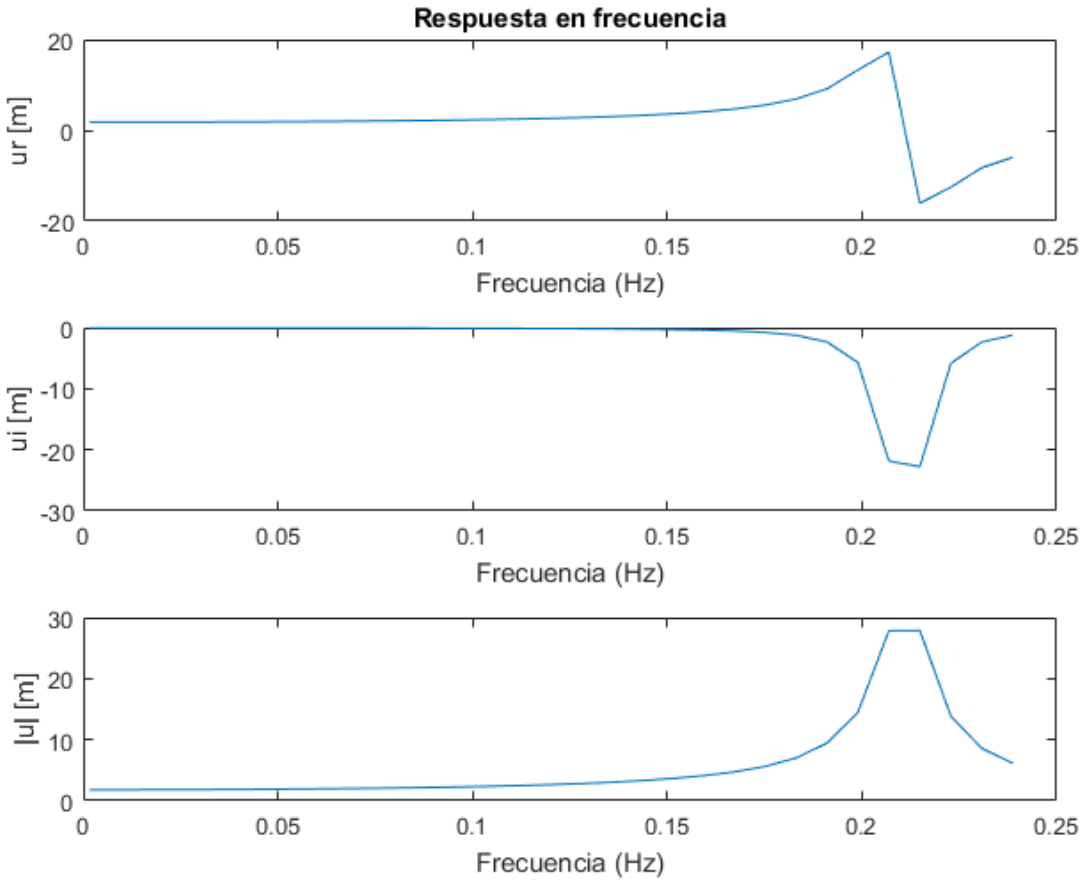


Figura 1: Respuesta en frecuencia

5.1.6 Fatiga

Teniendo el valor de las todas las cargas aplicadas sobre la estructura, una vez incluidos los factores dinámicos de amplificación, se puede calcular la vida útil de las secciones y así determinar el número de ciclos que dura la estructura.

Tabla 22: Comprobación a fatiga

Parámetro	Torre	Elemen. de unión	Pilotes
Nº de ciclos que aguanta los elementos de la estructura	$5.1 \cdot 10^5$	$4.8 \cdot 10^5$	$4.8 \cdot 10^5$
Comprobación	Cumple	Cumple	Cumple

5.1.7 Resumen de las comprobaciones

En este apartado, en la tabla 23, se muestra de manera resumida si las comprobaciones se han

Tabla 23: Resumen comprobaciones

Comprobación	Cumplimiento
Capacidad de carga de la cimentación	Cumple
Deflexión y rotación	Cumple
Plastificación	Cumple
Pandeo	Cumple
Comprobación de la frecuencia natural	Cumple
Fatiga	Cumple

5.2 Solución adoptada

Se presenta en la Tabla 24 la solución adoptada para la torre del aerogenerador. En las Tablas 25 y 26, respectivamente, se muestran las soluciones para los elementos de unión y los pilotes.

Tabla 24: Solución para la torre

Parámetros	Valor
Longitud	100 m
Diámetro	6.2 m
Espesor	56.1 mm

Tabla 25: Solución por elemento de unión

Parámetros	Valor
Longitud	12 m
Diámetro	5 m
Espesor	55.9 mm

Tabla 26: Solución por pilote

Parámetros	Valor
Longitud	53.19 m
Longitud embebida	19.2 m
Longitud total	73.4 m
Diámetro	4.1 m
Espesor	47.4 mm

6 Bibliografía

[1] S. V. Vera Rodríguez, Diseño y dimensionamiento de la cimentiación de un aerogenerador offshore en las Islas Canarias.Trabajo Fin de Máster, Las Palmas de Gran Canaria: Universidad de Las Palmas de Gran Canaria, 2017.

Anexo II: Código

PROCEDIMIENTO NUMÉRICO PARA EL DIMENSIONAMIENTO DE ESTRUCTURAS DE SOPORTE DE AEROGENERADORES OFFSHORE SOBRE GRUPOS DE PILOTES

Índice:

1 MAIN 1

2 Pre dimensionamiento 4

2.1 Torreinicial 5

2.2 Parametrosi 6

2.3 Plastificacionpyu 6

2.4 Matriz del sistema 7

3 Diámetros 10

4 Cargas externas 11

4.1 Cargas de viento 11

4.2 Cargas de oleaje 12

4.3 Cargas de marea 13

5 Amplificaciones dinámicas 13

6 Longitud embebida 14

7 Carga vertical 14

8 Datos entrada 15

9 Gráfica de desplazamiento frecuencia 18

10 Esfuerzos en barras 19

11 Combinación cargas ELU 20

12 Capacidad de carga geotécnica 20

13 Comprobación 21

14 Plastificación 21

15 Pandeo 21

15.1 Parametrost 23

16 Deflexión y rotación 23

17 Factores dinámicos 24

18 Resumen cargas 24

19 Datos frecuencia 25

20 Comprobación frecuencia 26

21 Comprobación espesor mínimo 26

22 Fatiga 27

23 Resultados 27

1 MAIN

Este fichero es el cuerpo principal del programa en el que se dimensiona de manera iterativa la estructura soporte de aerogeneradores offshore sobre grupos de pilotes.

```
%% TFM: PROCEDIMIENTO NUMERICO PARA EL DIMENSIONAMIENTO DE
ESTRUCTURAS DE SOPORTE DE AEROGENERADORES OFFSHORE SOBRE GRUPOS DE
PILOTES
clear
clc
[datosfabricante,datoseolicos,datosacero]=Datos(); %% Datos previos necesarios
%% Predimensionamiento
fprintf('Comienza el predimensionamiento\n')
Dp=0.5;%Diametro inicial de los pilotes
Du=1;%Diametro inicial de los elementos de union
Lemb=0;
aD=datosfabricante.aD;
tti=datosfabricante.tt;%Espesor inicial de la torre (min del fabricante)
[Dp,Du,Dt,tt]=Predimensionamiento(Dp,Du,tti);
[~,tu,tp]=Diametros(Dt,Du,Dp);
contador =0;
fprintf('Acaba el predimensionamiento\n\n')
%% Bucle principal para el dimensionamiento del aero
fprintf('Comienza el bucle principal\n')
dimensionamiento=0;
while dimensionamiento==0
   comprobacion=0;
   while comprobacion==0
      fprintf('Datos al comienzo de iteracion: Dt: %f, Du:%f, Dp:%f\n\n',Dt,Du,Dp)
      %% Cargas externas
      fprintf('Comienza el calculo de las cargas externas\n')
      %Cargas viento
      [Fmax_windNTM,Fmean_windNTM,Fmin_windNTM,Mmax_windNTM,Mmean_windNTM
,Mmin_windNTM]=CargaWind(1);
      [Fmax_windETM,Fmean_windETM,Fmin_windETM,Mmax_windETM,Mmean_windETM,
Mmin_windETM]=CargaWind(2);
      [Fmax_windEOG,Fmean_windEOG,Fmin_windEOG,Mmax_windEOG,Mmean_windEOG,
Mmin_windEOG]=CargaWind(3);
      [Fmax_windOUT,Fmean_windOUT,Fmin_windOUT,Mmax_windOUT,Mmean_windOUT,
Mmin_windOUT]=CargaWind(4);
      %Cargas oleaje
      [datosmarea]=DatosMarea(datoseolicos,Dp);
      if contador < 2  %Factores de amplificacion dinamica
         [Fmax_waveW2,Mmax_waveW2]=CargaWave(2,Dp,datoseolicos);
         [Fmax_waveW4,Mmax_waveW4]=CargaWave(4,Dp,datoseolicos);
      end
      if contador >1  %Factores de amplificacion dinamica
         [Fmax_waveW2,Mmax_waveW2,Fmax_waveW4,Mmax_waveW4]=AmplificacionesDina
micas(Fmax_waveW2TOTAL,Mmax_waveW2TOTAL,Fmax_waveW4TOTAL,Mmax_waveW4T
OTAL);
      end
      %Carga marea
      Lp=datoseolicos.Lp;
      [Marrastre,Farrastre]=CargaMarea(datoseolicos.Lp,Dp,datoseolicos);
```

```
fprintf('Termino el calculo de las cargas ext\n\n')
%% Longitud embebida
fprintf('Comienza el calculo de la longitud embebida\n')
E=datosacero.E;
[Lemb1]=Longembebida(Dp,E);
if Lemb>Lemb1 & contador>=1
   Lemb=Lemb;
else
   Lemb=Lemb1;
end
fprintf('Termina el calculo de la longitud embebida\n\n')
%% Carga vertical(peso muerto)
fprintf('Comienza el calculo de la carga vertical\n')
[V,Vu,Vp,Vt,m]=CargaVertical(datosfabricante.mRNA,Dp,Du,Dt,datosacero.rho,datosfabrica
nte.Lt,datoseolicos.Lp,Lemb,datoseolicos.Lu);
fprintf('Termina el calculo de la carga vertical\n\n')
%% Generacion del archivo de texto
fprintf('General el script de datos para entrada prog Guillermo\n')
delete datosentrada.dat
datos_entrada(Dp,Du,Dt,Lemb,Fmax_windEOG,Fmax_waveW2,datosfabricante.mRNA);
%% Lanzar programa
fprintf('Comienza a ejecutar el programa de Guillermo\n')
delete *.txt
status=unix('/home/local/jdrodriguezl/Escritorio/TFMEjecutar/programa_corregido/pilote
datosentrada.dat>out');
fprintf('Termina de ejecutar el programa de Guillermo\n\n')
%% Frecuencia fundamental del sistema y graficas
[vectorgrafica,wnatu]=GraficaDespFrec(dlmread('desplestr_epb.txt'),datosfabricante,datoseoli
cos);
fprintf('fn: %f en esta iteracion\n\n',wnatu)
wn=0.01;
%% Extraer esfuerzos de las barras del prog.
[esfuerzospilotese,esfuerzospilotess,esfuerzosuniones,esfuerzostorre]=EsfuerzosBarras(wn);
%% Estimacion de la capacidad de carga geotecnica
fprintf('Comienza capacidad de carga geotecnica\n')
[Mtot,Ftot]=CombinacionCargasELU(Fmax_waveW2,Farrastre,Fmax_windEOG,Mmax_wav
eW2,Marrastre,Mmax_windEOG,datosacero);
[cg,CCG]=CapacidadGeotecnica(Mtot,Ftot,Lemb,Dp,datosacero);
fprintf('Mtot: %f MR:%f',CCG.Mtot,CCG.MR);
[comprobacion,Dp]=Comprobacion(Dp,cg,aD);
if comprobacion==1
   break
end
fprintf('Termina capacidad de carga geotecnica\n\n')
%% Comprobacion de plastificacion en pilotes y elementos de union
fprintf('Comienza comprobacion de plastificacion\n')
f=datosacero.fyk/datosacero.gamma;
[plastificacionp,Dp,sigmap]=
Plastificacion(esfuerzospilotess(1:6,8),esfuerzospilotess(1:6,9:10),Dp,f,aD);
[plastificacionu,Du,sigmau]=
Plastificacion(esfuerzospilotess(1:6,8),esfuerzosuniones(1:6,9:10),Du,f,aD);
[plastificaciont,Dt,sigmat]=
Plastificacion(esfuerzospilotess(1:6,8),esfuerzostorre(1:6,9:10),Dt,f,aD);
if plastificacionp==1||plastificacionu==1||plastificaciont==1
   break
```

```
    end
    fprintf('Termina comprobacion de plastificacion\n\n')
    %% Pandeo
    fprintf('Comienza comprobacion pandeo\n')
    fprintf('\nEspesores: tt:%f tu:%f tp:%f\n',tt,tu,tp)
    Lp=datoseolicos.Lp;
    [pandeop,Dp,tp,Pgp,slmp,slcp]=Pandeo(esfuerzospilotess(1:6,9:10),Vp,Lp,Dp,tp,datosfabricante,datosacero);
    Lu=datoseolicos.Lu;
    [pandeou,Du,tu,Pgu,slmu,slcu]=Pandeo(esfuerzosuniones(1:6,9:10),Vu,Lu,Du,tu,datosfabricante,datosacero);
    Lt=datosfabricante.Lt;
    [pandeot,Dt,tt,Pgt,slmt,slct]=Pandeo(esfuerzosuniones(1:6,9:10),Vt,Lt,Dt,tt,datosfabricante,datosacero);
    if pandeou==1 || pandeop==1 || pandeot==1
      break
    end
    fprintf('Termina comprobacion pandeo\n\n')
    %% Deflexion y rotacion
    fprintf('Comienza comprobacion deflexion y rot\n')
    [DyR,deflexrot,Dp] = DeflexionyRot(dlmread('Incognitacabeza.txt'),aD,Dp,wn,Lu);
    if deflexrot==1
      break
    end
    fprintf('Termina comprobacion deflexion\n\n')
    if contador < 2
      [Fmax_waveW2TOTAL,Mmax_waveW2TOTAL]=Factoresdinamicos(wnatu,Fmax_waveW2,Mmax_waveW2,2,datosmarea,datoseolicos);
      [Fmax_waveW4TOTAL,Mmax_waveW4TOTAL]=Factoresdinamicos(wnatu,Fmax_waveW4,Mmax_waveW4,4,datosmarea,datoseolicos);
      contador=contador+1;
      break
    end
    %% Resumen de cargas
    [Cargamaxima_combinadaE2,Cargaminima_combinadaE2,Nivelmax_tensionE2,Amplitudmax_tensionciclicaE2,frecE2]=ResumenCargas(Marrastre,Mmax_windETM,Mmin_windETM,Mmax_waveW4TOTAL,-Mmax_waveW4TOTAL,datoseolicos.Tm25,Dp);
    [Cargamaxima_combinadaE3,Cargaminima_combinadaE3,Nivelmax_tensionE3,Amplitudmax_tensionciclicaE3,frecE3]=ResumenCargas(Marrastre,Mmax_windEOG,Mmin_windEOG,Mmax_waveW2TOTAL,-Mmax_waveW2TOTAL,datosmarea.Tm1,Dp);
    Mcarganeg=[Cargamaxima_combinadaE2;Cargamaxima_combinadaE3];
    Mtotalcarganeg=datosacero.gammal*(max(max(Mcarganeg)));
    %% Comprobacion de la frecuencia
    fprintf('Comienza comprobacion de frecuencia\n')
    [datoscomprobaciones]=datosfrecuencia(f,sigmat,sigmau,sigmap,Pgt,Pgu,Pgp,slct,slcu,slcp,slmt,slmu,slmp);
    [frecuencia,Dt,Du,Dp,tt,tu,tp,Lemb]=ComprobacionFrecuencia(wnatu,Dt,Du,Dp,tt,tu,tp,dlmread('datofrec.dat'),datosfabricante,Lemb);
    if frecuencia==1
      break
    end
    fprintf('Termina comprobacion de frecuencia: wf=%f\n',wn)
    %% Comprobacion del espesor del pilote para que hinque sin probls.
    [tp]=Comprobacionespmin(Dp,tp);
    %% Fatiga
```

```
        fprintf('Comienza comprobacion de fatiga\n')
        [Nu,fatigau,Du]=Fatiga(Amplitudmax_tensionciclicaE2,Du,tu,aD,f);
        [Np,fatigap,Dp]=Fatiga(Amplitudmax_tensionciclicaE2,Dp,tp,aD,f);
        [Nt,fatigat,Dt]=Fatiga(Amplitudmax_tensionciclicaE2,Dt,tt,aD,f);
        [Nu3,~,~]=Fatiga(Amplitudmax_tensionciclicaE3,Du,tu,aD,f);
        [Np3,~,~]=Fatiga(Amplitudmax_tensionciclicaE3,Dp,tp,aD,f);
        [Nt3,~,~]=Fatiga(Amplitudmax_tensionciclicaE3,Dt,tt,aD,f);
        if fatigau==1 || fatigap==1|| fatigat==1
            break
        end
        if fatigau==0 && fatigap==0 && comprobacion==0
            comprobacion=1;
            dimensionamiento=1;
        end
        fprintf('Termina comprobacion de fatiga\n\n')
    end
end
fprintf('Termino el bucle principal\n')
Resultados(Dp,Du,Dt,Lemb,Lp,datoscomprobaciones,CCG,DyR,Nu,Np,Nt,tt,tu,tp,wnatu);
fprintf('Imprimio los resultados\n')
```

2 Pre dimensionamiento

A la función de pre dimensionamiento se le dan como datos de entrada el diámetro de los pilotes y los elementos de unión, así como un espesor inicial de la torre. Se obtiene como resultado el diámetro de los pilotes, elementos de unión y de la torre y el espesor de la misma.

```
function[Dp,Du,Dt,tt]=Predimensionamiento(Dp,Du,tti)
%% Carga la funcion datos y el matricial
[datosfabricante,datoseolicos,datosacero]=Datos();
[K]= matricial();
%% Declaracion de datos
f=datosacero.fyk/datosacero.gamma;
E=datosacero.E;
G=datosacero.G;
Lt=datosfabricante.Lt;
Lu=datoseolicos.Lu;
Lp=datoseolicos.Lp;
aD=datosfabricante.aD; %aumento(paso) del diametro en cada iteracion
gammaL=datosacero.gammaL;
%% Carga los dos pasos previos del predim
[Fmax_windEOG,Fmean_windEOG,Fmin_windEOG,Mmax_windEOG,Mmean_windEOG,Mmin
_windEOG]=CargaWind(3);
[tt,At,It,Jt,Wt,Dt] = torreinicial(tti,0.5,f,Mmax_windEOG,gammaL);
%Espesor minimo es 0.044, recomendado por el fabricante (por eso se
%comienza por ese
%0.5: Factor de relajacion para el bucle que determina el espesor
    %Suposicion: al principio los elementos de union y el pilote plastifican
  plastificacionu=1;
  plastificacionp=1;
  while plastificacionu == 1 || plastificacionp == 1
```

```
        [tu,Au,Iu,Ju,Wu]=Parametrosi(Du);
        [tp,Ap,Ip,Jp,Wp]=Parametrosi(Dp);
        %Pasamos las matrices a numerico
        Ksn=eval(K.Ks);
        Khn=eval(K.Kh);
        K34n=eval(K.K34);
        K35n=eval(K.K35);
        Kpn=eval(K.Kp);
        Ktn=eval(K.Kt);
        %Vector de fuerzas externas y solucion del sistema
        Fen= zeros(30,1);
        Fen(1,1)=Fmax_windEOG; %[MN]
        Kinv=inv(Ksn);
        sol=Kinv*Fen; %res en MN y m
        [Mh,Mp]= Mbarras3D(Ktn,Khn,K34n,K35n,Kpn,sol);
        [Du,plastificacionu]= Plastificacionpyu(Mh,Du,f,aD);
        [Dp,plastificacionp]= Plastificacionpyu(Mp,Dp,f,aD);
    end
end
```

2.1 Torreinicial

Para la función torre inicial se da como dato de entrada el espesor que tenga la torre en ese punto, el factor de relajación (alpha) para atenuar el salto de espesor de la torre entre iteraciones, el límite de fluencia del material, el coeficiente gamma de (1,1) y la carga máxima de viento.

Se obtiene como salida el espesor de la torre, el área de la misma, el momento de inercia, la constante de torsión, el modulo resistente y el diámetro de la torre.

```
function [t,A,I,J,W,D]=torreinicial(ti2,alpha,f,Mmax_wind,gL)
%Toma como Dato de entrada en diametro y Dta como salida: el espesor, la
%seccion, el momento de inercia, la constante de torsion, el modulo
%resistente de la barra y la densidad de la misma
% Ojo: el Diametro debe introducirse en m
% ti2=0.044; %[m] Espesor torre minimo dado por el fabricante
% alpha=0.5;
% f=355/1.1;
t=ti2;
tol=2;
tc=ti2+1;
%alpha=0.5;   %factor Dte relajacion [0-1]
Mmax_wind=Mmax_wind*gL;
%% Bucle para Dteterminar el espesor Dte la torre
while (tc-t>0)&&(abs(tc-t)< tol)
   t=ti2;
   syms Dtt0;
   D=vpasolve(Mmax_wind*(Dtt0/2)/((1/4)*pi*(((Dtt0/2)^4)-(((Dtt0/2)-t)^4))) - f==0,Dtt0);
   D=max(D);
   tc=(6.35+(D*10^3)/100)*10^-3;
   tol=tc/10;
   ti2= t*alpha+tc*(1-alpha);
```

```
end
t=double(ti2);%(m)
if t<0.044
   t=0.044;
end
D=double(D);%(m)
[A,I,J,W]=Parametrost(D,t);
end
```

2.2 Parametrosi

Se emplea en el pre dimensionamiento para calcular los parámetros de los elementos a partir del diámetro de los mismos.

```
function [t,A,I,J,W]=Parametrosi(D)
%Funcion que se emplea solo en la etapa inicial(predimensionamiento)
%Toma como dato de entrada en diametro y da como salida, el espesor, la
%seccion, el momento de inercia, la constante de torsion
% Ojo: el diametro debe introducirse en m
t=(6.35+(D*10^3)/100)*10^(-3); %(m)
A=pi*((D/2)^2 -((D/2)-t)^2); %(m^2)
I= (1/4)*pi*(((D/2)^4)-(((D/2)-t)^4));%(m^4)
J= 2*I;%(m^4)
W=I/(D/2);
end
```

2.3 Plastificacionpyu

Esta comprobación de plastificación de las secciones se emplea solo en esta etapa del diseño, ya que se comprueba que las secciones cumplan únicamente a flexión pura. Como datos de entrada se introducen el momento máximo al que está sometida la sección el diámetro de la misma, el límite de fluencia del material, y el valor del aumento del diámetro (paso) en caso que la sección plastifique.

```
function [D,plastificacion]= Plastificacionpyu(M,D,f,paso)
%M: vector que contiene los momentos de la barra estudiada (MNm)
%D: diametro de la barra (m)
[t,A,I,J,W]=Parametrosi(D);
sigma=max(abs(M))/W; %(N/mm^2)
if sigma >= f
      plastificacion=1;
      D=D+paso;
   else
      plastificacion=0;
end
end
```

2.4 Matriz del sistema

Esta función genera y almacena las matrices de la estructura en simbólico, para posteriormente en el pre dimensionamiento sustituir las variables, por su valor numérico.

Sin requerir datos de entrada, la función devuelve una estructura de matrices simbólicas necesarias para posteriores comprobaciones.

```
function[K]= matricial()
%% Guia de los subindices de las matrices
% t: matrices de la torre
% u: matrices de los elementos de union
% p: matrices de los pilotes
% e: matriz de las barras equivalentes
% NOTA: todas las matrices estan en 3D, salvo que su subindice indique lo
%  contrario

% Declaracion de variables
syms E Ip Iu It Lp Lu Lt G Ju Jt Jp Ap Au At

%% Guia de los subindices elementos de matrices
% p: hace referencia a las propiedades de los pilotes
% u: hace referencia a las propiedades de los elementos de union entre los
% pilotes y la torre del aero
% t: hace referencia a las propiedades de la torre del aero
% Fe: fuerza externa

%%%%%%%%%%%%
% Matrices de rigidez
%%%%%%%%%%%%
%% Matriz original en vertical (Ojo: ejes Aznares)
K= sym(zeros (12));
A =sym([1 -1; -1 1]);
B =sym([1 1; -1 -1]);
C =sym([-1 -1; 1 1]);
D =sym([-1 1; -1 1]);
H =sym([1 0.5; 0.5 1]);
F =sym([1 -1; 1 -1]);

K([1 7],[1 7])= sym((12*E*Iu/Lu^3)*A);
K([2 8],[2 8])= sym((12*E*Iu/Lu^3)*A);
K([1 7],[5 11])= sym((6*E*Iu/Lu^2)*B);
K([2 8],[4 10])= sym((6*E*Iu/Lu^2)*C);
K([3 9],[3 9])= sym((E*Au/Lu)*A);
K([4 10],[2 8])= sym((6*E*Iu/Lu^2)*D);
K([4 10],[4 10])= sym((4*E*Iu/Lu)*H);
K([5 11],[1 7])= sym((6*E*Iu/Lu^2)*F);
K([5 11],[5 11])= sym((4*E*Iu/Lu)*H);
K([6 12],[6 12])= sym((G*Ju/Lu)*A);
```

```
%% Matriz para la torre del aero
Kt= sym(zeros (12));
% Se han aprovechado las matrices A,B,C, ... del apartado anterior
Kt([1 7],[1 7])= sym((12*E*It/Lt^3)*A);
Kt([1 7],[5 11])= sym((6*E*It/Lt^2)*B);
Kt([2 8],[2 8])= sym((12*E*It/Lt^3)*A);
Kt([2 8],[4 10])= sym((6*E*It/Lt^2)*C);
Kt([3 9],[3 9])= sym((E*At/Lt)*A);
Kt([4 10],[2 8])= sym((6*E*It/Lt^2)*D);
Kt([4 10],[4 10])= sym((4*E*It/Lt)*H);
Kt([5 11],[1 7])= sym((6*E*It/Lt^2)*F);
Kt([5 11],[5 11])= sym((4*E*It/Lt)*H);
Kt([6 12],[6 12])= sym((G*Jt/Lt)*A);

%% Matriz para los pilotes
Kp=sym(zeros(12));
% Se han aprovechado las matrices A,B,C, ... del apartado anterior
Kp([1 7],[1 7])= sym((12*E*Ip/Lp^3)*A);
Kp([1 7],[5 11])= sym((6*E*Ip/Lp^2)*B);
Kp([2 8],[2 8])= sym((12*E*Ip/Lp^3)*A);
Kp([2 8],[4 10])= sym((6*E*Ip/Lp^2)*C);
Kp([3 9],[3 9])= sym((E*Ap/Lp)*A);
Kp([4 10],[2 8])= sym((6*E*Ip/Lp^2)*D);
Kp([4 10],[4 10])= sym((4*E*Ip/Lp)*H);
Kp([5 11],[1 7])= sym((6*E*Ip/Lp^2)*F);
Kp([5 11],[5 11])= sym((4*E*Ip/Lp)*H);
Kp([6 12],[6 12])= sym((G*Jp/Lp)*A);

%%%%%%%%%%
% Matrices de giro
%%%%%%%%%%
% Matriz de ayuda para completar las matrices de giro
Z= sym(zeros(3));
%% GIRO THETA
Lh = sym([0 0 1; 0 1 0; -1 0 0]);
Ldz = sym([Lh Z Z Z; Z Lh Z Z; Z Z Lh Z;Z Z Z Lh]);

%% Giro de 60 sobre el eje z (Ojo: z positivo hacia abajo)
% giro positivo
Lsp = sym([cos(pi/3) cos(pi/2+pi/3) 0; -cos(pi/2-pi/3) cos(pi/3) 0; 0 0 1]);
Lp = sym([Lsp Z Z Z; Z Lsp Z Z; Z Z Lsp Z; Z Z Z Lsp]);

% giro negativo
Lsn = sym([-cos(-pi/3) cos(pi/2-pi/3) 0; -cos(pi/2+pi/3) -cos(-pi/3) 0; 0 0 1]);
Ln = sym([Lsn Z Z Z; Z Lsn Z Z; Z Z Lsn Z; Z Z Z Lsn]);

%% Giro de las barras
% Girar para colocar horizontalmente las barras (Kh)
Kh =Ldz*K*Ldz';

% Girar las matrices sesenta grados barras 3-4 (K34) y 3-5(K35)
K34= sym(Lp*Kh*Lp');
K35= sym(Ln*Kh*Ln');
```

```
%%%%%%%%%%%%%%%
%% Montaje del sistema 3D
%%%%%%%%%%%%%%%
Ks= sym(zeros(30));
% Barra1-3: torre del aero
Ks(1:6,1:6)= sym(Ks(1:6,1:6)+Kt(1:6,1:6));
Ks(1:6,13:18)= sym(Ks(1:6,13:18)+Kt(1:6,7:12));
Ks(13:18,1:6)= sym(Ks(13:18,1:6)+Kt(7:12,1:6));
Ks(13:18,13:18)= sym(Ks(13:18,13:18)+Kt(7:12,7:12));
% Barra 2-3: elemento de union
Ks(7:12,7:12)= sym(Ks(7:12,7:12)+Kh(1:6,1:6));
Ks(7:12,13:18)= sym(Ks(7:12,13:18)+Kh(1:6,7:12));
Ks(13:18,7:12)= sym(Ks(13:18,7:12)+Kh(7:12,1:6));
Ks(13:18,13:18)= sym(Ks(13:18,13:18)+Kh(7:12,7:12));
% Barra 3-4: elemento de union
Ks(13:18,13:18)= sym(Ks(13:18,13:18)+K34(1:6,1:6));
Ks(13:18,19:24)= sym(Ks(13:18,19:24)+K34(1:6,7:12));
Ks(19:24,13:18)= sym(Ks(19:24,13:18)+K34(7:12,1:6));
Ks(19:24,19:24)= sym(Ks(19:24,19:24)+K34(7:12,7:12));
% Barra 3-5: elemento de union
Ks(13:18,13:18)= sym(Ks(13:18,13:18)+K35(1:6,1:6));
Ks(13:18,25:30)= sym(Ks(13:18,25:30)+K35(1:6,7:12));
Ks(25:30,13:18)= sym(Ks(25:30,13:18)+K35(7:12,1:6));
Ks(25:30,25:30)= sym(Ks(25:30,25:30)+K35(7:12,7:12));
% Barra 2-6: pilote
Ks(7:12,7:12)= sym(Ks(7:12,7:12)+Kp(1:6,1:6));
% Barra 4-7: pilote
Ks(19:24,19:24)= sym(Ks(19:24,19:24)+Kp(1:6,1:6));
% Barra 5-8: pilote
Ks(25:30,25:30)= sym(Ks(25:30,25:30)+Kp(1:6,1:6));

%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
%% Calculo de la matriz equivalente de rigidez
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
Ke=sym(zeros(18));
%Barra 3-4: elemento de union
Ke(1:12,1:12)= sym(Ke(1:12,1:12)+K34(:,:));
%Barra 3-5: elementos de union
Ke(1:6,1:6)= sym(Ke(1:6,1:6)+K35(1:6,1:6));
Ke(1:6,13:18)= sym(Ke(1:6,13:18)+K35(1:6,7:12));
Ke(13:18,1:6)= sym(Ke(13:18,1:6)+K35(7:12,1:6));
Ke(13:18,13:18)= sym(Ke(13:18,13:18)+K35(7:12,7:12));
% Barra 4-7: pilote
Ke(7:12,7:12)= sym(Ke(7:12,7:12)+Kp(1:6,1:6));
% Barra 5-8: pilote
Ke(13:18,13:18)= sym(Ke(13:18,13:18)+Kp(1:6,1:6));

% Simplificacion por columnas
Ke(:,7) = sym(Ke(:,7)+Ke(:,13));
Ke(:,8) = sym(Ke(:,8)+Ke(:,14));
Ke(:,9) = sym(Ke(:,9)+Ke(:,15));
Ke(:,10) = sym(Ke(:,10)+Ke(:,16));
Ke(:,11) = sym(Ke(:,11)+Ke(:,17));
Ke(:,12) = sym(Ke(:,12)+Ke(:,18));
```

```
% Simplificacion por filas
Ke(7,:) = sym(Ke(7,:)+Ke(13,:));
Ke(8,:) = sym(Ke(8,:)+Ke(14,:));
Ke(9,:) = sym(Ke(9,:)+Ke(15,:));
Ke(10,:) = sym(Ke(10,:)+Ke(16,:));
Ke(11,:) = sym(Ke(11,:)+Ke(17,:));
Ke(12,:) = sym(Ke(12,:)+Ke(18,:));

%%%%%%%%%%%%%%%%
%% Sistema simplificado 2D
%%%%%%%%%%%%%%%%
% Pasar las matrices ya existentes a 2D - Plano xz
%Kt2D=sym(Kt([1 3 5 7 9 11],[1 3 5 7 9 11]));
%Kh2D=sym(Kh([1 3 5 7 9 11],[1 3 5 7 9 11]));
%Kp2D=sym(Kp([1 3 5 7 9 11],[1 3 5 7 9 11]));
%Ke2D=sym(Ke([1 3 5 7 9 11],[1 3 5 7 9 11]));

%Ks2D= sym(zeros(12)); % Matriz del sistema 2D
% Barra 1-3: torre del aero
%Ks2D(1:3,1:3)=sym(Ks2D(1:3,1:3)+Kt2D(1:3,1:3));
%Ks2D(1:3,7:9)=sym(Ks2D(1:3,7:9)+Kt2D(1:3,4:6));
Ks2D(7:9,1:3)=sym(Ks2D(7:9,1:3)+Kt2D(4:6,1:3));
%Ks2D(7:9,7:9)=sym(Ks2D(7:9,7:9)+Kt2D(4:6,4:6));
% Barra 2-3: union
%Ks2D(4:6,4:6)=sym(Ks2D(4:6,4:6)+Kh2D(1:3,1:3));
%Ks2D(4:6,7:9)=sym(Ks2D(4:6,7:9)+Kh2D(1:3,4:6));
%Ks2D(7:9,4:6)=sym(Ks2D(7:9,4:6)+Kh2D(4:6,1:3));
%Ks2D(7:9,7:9)=sym(Ks2D(7:9,7:9)+Kh2D(4:6,4:6));
% Barra 3-9: union equivalente
%Ks2D(7:9,7:9)=sym(Ks2D(7:9,7:9)+Ke2D(1:3,1:3));
%Ks2D(7:9,10:12)=sym(Ks2D(7:9,10:12)+Ke2D(1:3,4:6));
%Ks2D(10:12,7:9)=sym(Ks2D(10:12,7:9)+Ke2D(4:6,1:3));
%Ks2D(10:12,10:12)=sym(Ks2D(10:12,10:12)+Ke2D(4:6,4:6));
% Barra 2-6: pilote
%Ks2D(4:6,4:6)=sym(Ks2D(4:6,4:6)+Kp2D(1:3,1:3));
K=struct('Ks',Ks,'Kh',Kh,'Kp',Kp,'K34',K34,'K35',K35,'Kt',Kt);
end
```

3 Diámetros

Esta función sirve para calcular un espesor para cada diámetro

```
function [tt,tu,tp]=Diametros (Dt,Du,Dp)
tt=(6.35+(Dt*10^3)/100)*10^-3; %(m)
tu=(6.35+(Du*10^3)/100)*10^-3; %(m)
tp=(6.35+(Dp*10^3)/100)*10^-3; %(m)
if tt< 0.044
   tt=0.044;
end
end
```

4 Cargas externas

En este apartado se expondrán las funciones desarrolladas para el cálculo de las cargas externas.

4.1 Cargas de viento

Dando como dato de entrada el escenario de carga de viento que se quiere calcular (m), la función devuelve las fuerzas y momentos que genera dicho escenario.

```
function [Fmax,Fmean,Fmin,Mmax,Mmean,Mmin]=CargaWind(m)
[datosfabricante,datoseolicos,datosacero]=Datos();
%m: numero del escenario de viento que se quiere cargar

%% Cargar datos:
lk=datoseolicos.lk;
f1max=datosfabricante.velmin/60; %(Hz)
s=datoseolicos.s;
ur=datosfabricante.ur;
Dr=datosfabricante.Dr;
Lt=datosfabricante.Lt;
rhowi=datoseolicos.rhowi;
Ar=datosfabricante.Ar;
k=datoseolicos.k;
%%
Ct=7/ur; % ec[11] para predim inicial: paper de los 10 pasos
Iref=0.18;  %Poner de que tabla lo saque

if m==1       % Escenario de viento U-1
   %Turbulencia normal (NTM) y velocidad estimada del viento (ur)
   b=5.6;  %Valor que viene dado
   u=15; %[m/s] velocidad de la turbulencia a la altura del rotor
   sigmaUNTM=Iref*(0.75*u+b);
   sigmaUNTMf=sigmaUNTM*sqrt(1/(((6*lk/ur)*f1max+1))^(2/3));
   u=1.28*sigmaUNTMf;
elseif m==2    % Escenario de viento U-2
   %Turbulencia extrema (ETM) y velocidad estimada del viento (ur)
   c=2; %[m/2]
   uAVG=15.2; %Velocidad media promerdio del sitio en 1 jahr (m/s)
   sigmaUETM=c*Iref*(0.72*((uAVG/c)+3)*((ur/c)-4)+10);
   sigmaUETMf=sigmaUETM*sqrt(1/((6*lk/ur)*f1max+1)^(2/3));
   u=2*sigmaUETMf;
elseif m==3    % Escenario de viento U-3
   %Condiciones extremas de funcionamiento (EOG) y vel. estimada viento (ur)
   Ct=7/ur; % ec[11] para predim inicial
   Udiezcincuenta=k*(-log(1-0.98^(1/52596)))^(1/s); %vel extrema del viento durac 10 min
   Udiezuno=0.8*Udiezcincuenta;%vel extrema del viento durac 10 min durante 1 a?o
   ouc=0.11*Udiezuno; %desv standard caract. de vel viento
   uEOGc=[1.35*(Udiezuno-ur);3.3*ouc/(1+((0.1*Dr)/(lk/8)))]; %Velocidad de r?faga extrema
(m/s)
   u=min(min(uEOGc));
elseif m==4  % Escenario de viento U-4
   u=25; % velocidad de corte [m/s]
```

```
   Ct=(7*ur^2)/u^3;
else
   fprintf('Solo hay 4 escenarios de viento cargados');
end
%F(MN) y M(MNm)
Fmax=(0.5*rhowi*Ar*Ct*(ur+u)^2)*10^(-6);
%Fuerza de empuje media sin turbulencia
Fmean=(0.5*rhowi*Ar*Ct*ur^2)*10^(-6);
%Fuerza de empuje minima en el ciclo de carga
Fmin=(0.5*rhowi*Ar*Ct*(ur-u)^2)*10^(-6);
%Momentos
Mmax=Fmax*Lt;
Mmean=Fmean*Lt;
Mmin=Fmin*Lt;
end
```

4.2 Cargas de oleaje

Dando como datos de entrada el escenario de carga de oleaje que se quiera calcular, el diámetro de los pilotes y los datos eólicos, la función devuelve la fuerza y momento máximos generados por dichas cargas.

```
function[Fmax_wave,Mmax_wave]=CargaWave(k,D,datoseolicos)
[datosmarea]=DatosMarea(datoseolicos,D);
%% Datos necesarios
%DS
%CD
%Cm
S=datoseolicos.S;
rhowa=datoseolicos.rhowa;
DS=D;
CD=0.97;%Frank. M.White. tabla 7.3.5
Cm=0.75;
if k==2
   K=datosmarea.K;
   Hm=datosmarea.Hm1;
   HS=datosmarea.HS1;
   TS=datosmarea.TS1;
elseif k==4
   K=datosmarea.K1;
   Hm=datoseolicos.Hm25;
   HS=datoseolicos.HS50;
   TS=datoseolicos.TS50;
else
   fprintf('Ese escenario no esta implementado');
end

PDW=(((exp(2*K*(S+(Hm/2))))-(exp(-2*K*(S+Hm/2))))/(8*K))+((S+(Hm/2))/2);
PIW=((sinh(K*S))/K);
FDmax=(0.5*rhowa*DS*CD*(((pi^2)*(HS^2))/((TS^2)*((sinh(K*S))^2)))*PDW)*(10^(-
6));%(MN)
```

```
FImax=(0.5*rhowa*Cm*(DS^2)*(((pi^3)*HS)/((TS^2)*(sinh(K*S))))*PIW)*(10^(-6));%(MN)

QDW=((((S+(Hm/2))/(8*K))-(1/(16*(K^2))))*(exp(2*K*(S+Hm/2))))-
((((S+(Hm/2))/(8*K))+(1/(16*(K^2))))*(exp(-
2*K*(S+Hm/2))))+(((S+(Hm/2))/2)^2)+(1/(8*(K^2)));
QIW=((((S+0)/(2*K))-(1/(2*(K^2))))*(exp(K*S)))-(((S/(2*K))-(1/(2*(K^2))))*(exp(-
K*(S))))+(1/(K^2));
MDmax=(0.5*rhowa*DS*CD*(((pi^2)*(HS^2))/((TS^2)*((sinh(K*S))^2)))*QDW)*(10^(-
6));%(MNm)
MImax=(0.5*rhowa*Cm*(DS^2)*(((pi^3)*HS)/((TS^2)*(sinh(K*S))))*QIW)*(10^(-6));%(MNm)

Fmax_wave=FDmax+FImax;
Mmax_wave=MDmax+MImax;
end
```

4.3 Cargas de marea

Esta función requiere como datos de entrada la longitud de los pilotes, los datos eólicos y el diámetro de los pilotes, dando como resultados la fuerza y momento de las cargas de marea, así como el punto de aplicación de la misma.

```
function[Marrastre,Farrastre,zcdg]=CargaMarea(Lp,Dp,datoseolicos)
% Cargas debidas a las corrientes marinas: DNV-J101 pag.58
%% integrando de -Lp a 0
Lp=53.19;
CD=1;
fun= @(z) ((0.96+(((Lp+z)/Lp).^1/7)+(0.33*((50+z)/50))).^2);
Int=integral(fun,-Lp,0);
Farrastre=Int*datoseolicos.rhowa*Dp*0.5*CD*10^-6;

syms zcdg2
Mcdg=zcdg2*Lp*Farrastre;
funm= @(z) (z*(0.96+(((Lp+z)/Lp).^1/7)+(0.33*((50+z)/50))).^2);
Intm=integral(funm,-Lp,0);
Marrastre2=Intm*datoseolicos.rhowa*Dp*0.5*CD*10^-6;
zcdg=vpasolve(Mcdg-Marrastre2- f==0,zcdg2);
zcdg=double(zcdg)

Marrastre= Farrastre*zcdg;
end
```

5 Amplificaciones dinámicas

Esta función entra en funcionamiento a partir de la segunda iteración del proceso de dimensionamiento, dado que tiene un contador que no permite uso en la primera iteración.

Se ha implementado para tener en cuenta la amplificación dinámica de las cargas, que se calculan al final del proceso.

```
function[Fmax_waveW2,Mmax_waveW2,Fmax_waveW4,Mmax_waveW4]=AmplificacionesDinamicas(Fmax_waveW2TOTAL,Mmax_waveW2TOTAL,Fmax_waveW4TOTAL,Mmax_waveW4TOTAL)
   Fmax_waveW2=Fmax_waveW2TOTAL;
   Mmax_waveW2=Mmax_waveW2TOTAL;
   Fmax_waveW4=Fmax_waveW4TOTAL;
   Mmax_waveW4=Mmax_waveW4TOTAL;
end
```

6 Longitud embebida

En este apartado se calcula la longitud embebida de los pilotes requiriendo como dato de entrada el diámetro de los pilotes y el módulo de Young del material del que estén compuestos los pilotes y da como resultado la longitud embebida de los pilotes.

```
function [Lemb]=Longembebida(D,E)
%Tomando como dato de entrada el diametro del pilote determina la longitud
%embedida del mismo
[t,A,I,J,W]=Parametrosi(D);
nh= [5.4; 11; 22; 45];  %Tabla 5, API-2GEO apartado 8.5.7
Lnh= zeros(4,1);
for i=1:size(nh)
   Lnh(i)=2*((E)*(I)/(nh(i)))^0.2;
end
Lemb=max(Lnh);

end
```

7 Carga vertical

En este apartado se calcula la carga vertical de todos los elementos, así como la masa total del sistema, necesitando como datos de entrada los diámetros longitudes de los elementos, la densidad del acero de los mismos y la masa del conjunto rotor, góndola y eje.

```
function[V,Vu,Vp,Vt,m]=CargaVertical(mRNA,Dp,Du,Dt,rho,Lt,Lp,Lemb,Lu)
[tp,Ap,Ip,Jp,Wp]=Parametrosi(Dp);
[tu,Au,Iu,Ju,Wu]=Parametrosi(Du);
[tt,At,It,Jt,Wt]=Parametrosi(Dt);

mt=rho*At*Lt;%(kg): masa de la torre
mp=3*rho*Ap*(Lp+Lemb);%(kg): masa de los pilotes
mu=3*rho*Au*Lu;%(kg): masa de los elementos de union

m=mRNA+mt+mu+mp;%Unidades(kg)
V=m*9.81*10^-6;%(N): Carga vertical
Vt=((mRNA+mt)*9.81*10^-6);%(MN):
Vu=((mRNA+mt+mu)*9.81*10^-6)/3;%(MN):Carga vertical sobre cada elemento de union
Vp=V/3;%(MN): Carga vertical sobre cada pilote
end
```

8 Datos entrada

Mediante esta función se genera un fichero de texto, para el que se requiere los diámetros de los elementos, la longitud embebida, las fuerzas externas, la masa total del sistema y el punto de aplicación de las cargas de marea.

```
function datos_entrada(Dp,Du,Dt,Lemb,Fwi,Fwa,m,zcdg)
%Genera el fichero de entrada que requiere el programa de Guillermo
[datosfabricante,datoseolicos,datosacero]=Datos();
Lt=datosfabricante.Lt;
Lu=datoseolicos.Lu;
Lp=datoseolicos.Lp;
%wa: num de frecuencias a muestrear (debe ser entero)
wa=0:0.05:1.5;

%numero de tramos en los que esta dividida cada barra
%Esta guardado en el archivo Datos-datosacero
ntram=datosacero.ntram;
E=(datosacero.E)*10^6;
rho=datosacero.rho;
[tp,Ap,Ip,Ep,Wp,rhop]=Parametros(Dp,E,rho);
[tu,Au,Iu,Eu,Wu,rhou]=Parametros(Du,E,rho);
[tt,At,It,Et,Wt,rhot]=Parametros(Dt,E,rho);

%alpha de Timoshenko (si elemento macizo: alpha=0.9)
%alpha(1) es la del pilote
%alpha(2) es la de los elementos de union
%alpha(3) es la de los pilotes
alpha=[0.5 0.5 0.5];

Fwi=Fwi*10^6; % Todos los datos a introducir en el programa de Guillermo deben estar en N y m
Fwa=Fwa*10^6;
%% Generar archivo de texto para comprobar los resultados realizados en el programa de
Guillermo
datos=fopen('datosentrada.dat','w');
fprintf(datos,'#num.freq  freq.referencia (w = ao * wref):\n');
fprintf(datos,'#lista de freq. adimensional ao:\n');
fprintf(datos,' %i   1.0\n\n',length(wa));
wa(1,1)=0.01;  %el primer valor no puede ser 0
fprintf(datos,' %.2f\n',wa);

%Numero y diametro de los pilotes
fprintf(datos,'\n#num.pil Dpilotes\n');
fprintf(datos,' 3    %f\n\n',Dp);

%Propiedades de los pilotes
fprintf(datos,'#Propiedades pilotes\n');
fprintf(datos,'#E              xi   rho  nu    alpha(Tim)\n');
fprintf(datos,' %e    0.   0.   0.25  %f\n\n',Ep, alpha(1));

%Dimensionamiento de los tramos de estudio de los pilotes
```

```
fprintf(datos,'#Long y tramos\n');
fprintf(datos,'#id num.tramos\n');
fprintf(datos,'#Ltramo nelem\n');
fprintf(datos,' 1    1\n');
fprintf(datos,'%f   %f\n',Lemb,ntram(1));
fprintf(datos,' 2    1\n');
fprintf(datos,'%f   %f\n',Lemb,ntram(1));
fprintf(datos,' 3    1\n');
fprintf(datos,'%f   %f\n\n',Lemb,ntram(1));

%Posicion de los pilotes
fprintf(datos,'#coordenadas de cabeza, inclinacion y cc de los pilotes\n');
fprintf(datos,'#id xcabeza ycabeza dx_punta dy_punta tipo_cc_cabeza tipo_cc_punta\n');
fprintf(datos,' 1 %f  0. 0. 0. 2 -1 \n', -Lu);
fprintf(datos,' 2 %f %f 0. 0. 2 -1 \n', Lu/2, Lu*sin(pi/3));
fprintf(datos,' 3 %f %f 0. 0. 2 -1 \n\n', Lu/2, -Lu*sin(pi/3));

%Propiedades de las barras
fprintf(datos,'#num. materiales\n');
fprintf(datos,'#id E xi nu rho\n');
fprintf(datos,' 3\n');
fprintf(datos,' 1  %e 0. 0.25 %f\n',E,rho);
fprintf(datos,' 2  %e 0. 0.25 %f\n',E,rho);
fprintf(datos,' 3  %e 0. 0.25 %f\n\n',E,rho);



%Ojo: alpha(Tim): elemento macizo=0.9 y elemento hueco=0.5
fprintf(datos,'#num. secciones(barras)\n');
fprintf(datos,'#id A alpha(Tim) Ix Iy Vx(x) Vy(x) Vz(x)\n');
fprintf(datos,' 7\n');
fprintf(datos,' 1 %f %f %f  %f 1. 0. 0. ',At,alpha(3),It,It); %vertical(v)
fprintf(datos,'\n 2 %f %f %f  %f 0. 0. 1.',Au,alpha(2),Iu,Iu);%horizontal(h)
fprintf(datos,'\n 3 %f %f %f  %f 0. 0. 1.',Au,alpha(2),Iu,Iu);%h
fprintf(datos,'\n 4 %f %f %f  %f 0. 0. 1.',Au,alpha(2),Iu,Iu);%h
fprintf(datos,'\n 5 %f %f %f  %f 1. 0. 0.',Ap,alpha(2),Ip,Ip);%v
fprintf(datos,'\n 6 %f %f %f  %f 1. 0. 0.',Ap,alpha(2),Ip,Ip);%v
fprintf(datos,'\n 7 %f %f %f  %f 1. 0. 0.',Ap,alpha(2),Ip,Ip);%v

%Declaracion de las barras no enterradas
fprintf(datos,'\n\n#num. macroelementos(placas+barras)\n');
fprintf(datos,' 7\n');
fprintf(datos,'#tipo\n');
fprintf(datos,'#id mat.  id seccion\n');
fprintf(datos,'#(x y z)iniciales (x y z)finales num.elementos\n');
%Torre
fprintf(datos,' 2\n');
fprintf(datos,' 1   1\n'); %barra1-3
fprintf(datos,' 0. 0. %f 0. 0. %f %i\n\n',-(Lp+Lt),-Lp,ntram(4));
%Elementos de union
fprintf(datos,' 2\n');
fprintf(datos,' 2   2\n');
fprintf(datos,' %f 0. %f 0. 0. %f %i\n\n',-Lu,-Lp,-Lp,ntram(3)); %barra2-3
fprintf(datos,' 2\n');
fprintf(datos,' 2   3\n');
```

```
fprintf(datos,' 0. 0. %f %f %f %f %i\n\n',-Lp,Lu*cos(pi/3),Lu*sin(pi/3),-Lp,ntram(3)); %barra3-4
fprintf(datos,' 2\n');
fprintf(datos,' 2   4\n');
fprintf(datos,' 0. 0. %f %f %f %f %i\n\n',-Lp,Lu*cos(pi/3),Lu*sin(-pi/3),-Lp,ntram(3)); %barra3-5
%parte de los pilotes sumergida, no enterrada
fprintf(datos,' 2\n');
fprintf(datos,' 3   5\n');
fprintf(datos,' %f 0. %f %f 0. 0. %i\n\n',-Lu,-Lp,-Lu,ntram(2)); %barra2-6
fprintf(datos,' 2\n');
fprintf(datos,' 3   6\n');
fprintf(datos,' %f %f %f %f %f 0. %i\n\n',Lu*cos(pi/3),-Lu*sin(pi/3),-Lp,Lu*cos(pi/3),-
Lu*sin(pi/3),ntram(2)); %barra4-7
fprintf(datos,' 2\n');
fprintf(datos,' 3   7\n');
fprintf(datos,' %f %f %f %f %f 0. %i\n\n',Lu*cos(pi/3),Lu*sin(pi/3),-Lp,Lu*cos(pi/3),-Lu*sin(-
pi/3),ntram(2)); %barra5-8

fprintf(datos,'#num. masas puntuales\n');
fprintf(datos,'#coord.(x,y,z)\n');
fprintf(datos,'#m Ix Iy Iz\n');
%fprintf(datos,' 0\n\n');
%Cuando se realice el calculo dinamico
fprintf(datos,'  1\n');
fprintf(datos,'  0. 0. %f\n',-(Lt+Lp));
fprintf(datos,'  %f 0. 0. 0.\n\n',m);

%Fuerzas externas
fprintf(datos,'#num. fuerzas externas\n');
fprintf(datos,'#coord.(x,y,z)\n');
fprintf(datos,'#fx fy fz mx my mz\n');
fprintf(datos,' 4\n');
%Peso propio mRNA, porque estamos calculando el equiv. estat. simplificado
% fprintf(datos,' 0. 0. %f\n', -(Lt+Lp));
% fprintf(datos,' (0.,0.) (0.,0.) (%e,0.) (0.,0.) (0.,0.) (0.,0.)\n\n',V);
%Fmax de viento
fprintf(datos,' 0. 0. %f\n',-(Lt+Lp));
fprintf(datos,' (%e,0.) (0.,0.) (0.,0.) (0.,0.) (0.,0.) (0.,0.)\n\n',Fwi);
%Fmax oleaje y marea en cada pilote
%cp= (Lp/2)+((1/6)*Dp*(Lp^3)/(Lp/2)*Lp*2*Dp)
zfuerza=zcdg;
%barra 2-6
fprintf(datos,' %f 0. %f\n',-Lu,-zfuerza); % barra2-3
fprintf(datos,' (%e,0.) (0.,0.) (0.,0.) (0.,0.) (0.,0.) (0.,0.)\n\n',-Fwa);
fprintf(datos,' %f %f %f\n',Lu*cos(pi/3),-Lu*sin(pi/3),-zfuerza); % barra3-4
fprintf(datos,' (%e,0.) (0.,0.) (0.,0.) (0.,0.) (0.,0.) (0.,0.)\n\n',-Fwa);
%barra 3-5
fprintf(datos,' %f %f %f\n',Lu*cos(pi/3),Lu*sin(pi/3),-zfuerza); % barra3-5
fprintf(datos,' (%e,0.) (0.,0.) (0.,0.) (0.,0.) (0.,0.) (0.,0.)\n\n',-Fwa);
Eterreno=1.49e+7; % [N/m^2]TFM SERGIO VERA
fprintf(datos,'#Propiedades del suelo\n');
fprintf(datos,'#num. estratos 3 0.01 0.01\n');
fprintf(datos,'#E   xi (REnu, IMnu) rho espesor\n');
fprintf(datos,'#Repetir el ultimo estrato y aumentar el espesor dos unidades\n');
fprintf(datos,' 1   3   0.01   0.01\n');
fprintf(datos,' %e    0.05    (0.4, 0.000)   18e2   500\n',Eterreno);
```

```
fprintf(datos,' %e    0.05    (0.4, 0.000)   18e2   50000\n\n',Eterreno);


fprintf(datos,'#num.puntos_internos donde calcular la solucion\n');
fprintf(datos,' 0\n\n');
fprintf(datos,'#ceros de seguridad\n 0\n 0\n 0\n 0');
save 'datosentrada.txt'
fclose('all')
end
```

9 Gráfica de desplazamiento frecuencia

Esta función recibe como datos de entrada los desplazamientos de la estructura, los datos de fabricante y los datos eólicos, dando como resultado la frecuencia natural del sistema e imprime la gráfica de desplazamientos frente a la frecuencia.

```
function [vectorgrafica,wn]=GraficaDespFrec(desplazamientos,datosfabricante,datoseolicos)
Lt=datosfabricante.Lt;
Lp=datoseolicos.Lp;

%desplazamientos= dlmread('desplazamientostrepb.txt');
[rows colums]=size(desplazamientos);
l=1;
vector=zeros(rows,4);
for k=1:rows
   if desplazamientos(k,3)==0 && desplazamientos(k,4)==0 && desplazamientos(k,5)==-(Lp+Lt)
      vector(l,1)=desplazamientos(k,1); %frecuencia
      vector(l,2)=desplazamientos(k,6); %desplazamiento x real
      vector(l,3)=desplazamientos(k,7); %desplazamiento x imag.
      vector(l,4)=sqrt((desplazamientos(k,6)^2)+(desplazamientos(k,7)^2)); %modulo del desplaz.x
      l=l+1;
   end
end
for j=1:rows
   if vector(j,1)==0 || vector(j,2)==0 || vector(j,3)==0
     vectorgrafica=vector(1:j-1,:);
     break
   end
end
x=vectorgrafica(:,1);
y1=vectorgrafica(:,2);%frecuencia y despl real
A=subplot(3,1,1);
plot(x,y1)
title('Respuesta en frecuencia');
set( get(A,'XLabel'), 'String', 'frecuencia(rad/s)' );
set( get(A,'YLabel'), 'String', 'ur (m)' );
B=subplot(3,1,2);
y2=vectorgrafica(:,3);%frecuencia y despli
plot(x,y2);
set( get(B,'XLabel'), 'String', 'frecuencia(rad/s)' );
set( get(B,'YLabel'), 'String', 'ui (m)' );
C=subplot(3,1,3);
```

```
y3=vectorgrafica(:,4);%frecuencia y mod u
plot(x,y3)
set( get(C,'XLabel'), 'String', 'frecuencia(rad/s)');
set( get(C,'YLabel'), 'String', 'mod|u| (m)' );
 [m]=find(vectorgrafica(:,4)==max(max(vectorgrafica(:,4))));
wn=vectorgrafica(m,1);
end
```

10 Esfuerzos en barras

En esta función requiere como dato de entrada la frecuencia natural y devuelve los valores de los esfuerzos en todos los elementos de la estructura para esa frecuencia.

```
function[esfuerzospilotese,esfuerzospilotess,esfuerzosuniones,esfuerzostorre]=EsfuerzosBarras(wn
)
[datosfabricante,datoseolicos,datosacero]=Datos();
%% Llamar a los ficheros de datos
barrasw=dlmread('esfuerzosbarras_epb.txt');% con todas las frecuencias
a=(find(barrasw(:,1)==wn));
esfbarrasG=barrasw(a,:);
nodosw=dlmread('fuerzasnodales.txt');% con todas las frecuencias
b=(find(nodosw(:,1)==wn));
esfnodosG=nodosw(b,:);
% numero de tramos para los que se ha estudiado la cada tipo de barra
ntram=datosacero.ntram;

%% Posicion y efuerzos de las barras
for k=1:2
   %% Pilotes
   % Esfuerzos en la parte enterrada de los pilotes
   esfuerzospilotese=zeros(6,8);
   %barra 2-6
   esfuerzospilotese(k,1:3)=esfnodosG(k*ntram(1)-2,2:4); %Posicion
   esfuerzospilotese(k,4:8)=esfnodosG(k*ntram(1)-2,5:2:13); %Datos utiles
   %barra 4-7
   esfuerzospilotese(k+2,1:3)=esfnodosG(k*ntram(1)+2,2:4);
   esfuerzospilotese(k+2,4:8)=esfnodosG(k*ntram(1)+2,5:2:13);
   %barra 5-8
   esfuerzospilotese(k+4,1:3)=esfnodosG(k*ntram(1)+6,2:4);
   esfuerzospilotese(k+4,4:8)=esfnodosG(k*ntram(1)+6,5:2:13);
   %% Elementos de union
   esfuerzosuniones=zeros(6,11);
   % barra 2-3
   esfuerzosuniones(k,1:5)=esfbarrasG(ntram(4)+k*ntram(3),2:6);
   esfuerzosuniones(k,6:11)=esfbarrasG(ntram(4)+k*ntram(3),7:2:17);
   % barra 3-5
   esfuerzosuniones(k+2,1:5)=esfbarrasG(ntram(4)+ntram(3)*(k+1)+1,2:6);
   esfuerzosuniones(k+2,6:11)=esfbarrasG(ntram(4)+ntram(3)*(k+1)+1,7:2:17);
   % barra 3-4
   esfuerzosuniones(k+4,1:5)=esfbarrasG(ntram(4)+ntram(3)*(k+2)+1,2:6);
   esfuerzosuniones(k+4,6:11)=esfbarrasG(ntram(4)+ntram(3)*(k+2)+1,7:2:17);
   %% Pilotes parte sumergida
   esfuerzospilotess=zeros(6,11);
```

```
    %barra 2-6
    b=ntram(4)+3*ntram(3)+5+ntram(2)*(k-1);
    esfuerzospilotess(k,1:5)=esfbarrasG(b,2:6);
    esfuerzospilotess(k,6:11)=esfbarrasG(b,7:2:17);
    %barra 5-8
    c=ntram(4)+3*ntram(3)+ntram(2)*k+6;
    esfuerzospilotess(k+2,1:5)=esfbarrasG(c,2:6);
    esfuerzospilotess(k+2,6:11)=esfbarrasG(c,7:2:17);
    %barra 4-7
    d=ntram(4)+3*ntram(3)+ntram(2)*(k+1)+7;
    esfuerzospilotess(k+4,1:5)=esfbarrasG(d,2:6);
    esfuerzospilotess(k+4,6:11)=esfbarrasG(d,7:2:17);
end
    %% torre: barra 1-3
    esfuerzostorre=zeros(ntram(4)+1,11);
    esfuerzostorre(1:ntram(4)+1,1:5)=esfbarrasG(1:ntram(4)+1,2:6);
    esfuerzostorre(1:ntram(4)+1,6:11)=esfbarrasG(1:ntram(4)+1,7:2:17);
end
```

11 Combinación cargas ELU

Recibiendo como datos de entrada las cargas máximas, da como resultados las cargas máximas sobre los pilotes.

```
function
[Mtot,Ftot]=CombinacionCargasELU(Fmax_waveW2,Farrastre,Fmax_windEOG,Mmax_waveW2,
Marrastre,Mmax_windEOG,datosacero)
Ftot=Fmax_waveW2+Farrastre+Fmax_windEOG;
Mtot=datosacero.gammaL*(Mmax_waveW2+Marrastre+Mmax_windEOG);
end
```

12 Capacidad de carga geotécnica

```
function[cg,CCG,Lemb]=CapacidadGeotecnica(Mtot,Ftot,Lemb,Dp,datosacero)
%Estimacion de la carga geotecnica
Kp=(sin(datosacero.phip)+1)/(-sin(datosacero.phip)+1);
e=Mtot/Ftot;%Excentricidad de la carga
gammap=datosacero.gammap; % OJo: no es un dato propio del acero, pero se englobo en ese grupo
FR=(gammap*0.5*Dp*(Lemb^3)*Kp)/(e+Lemb);%Unidades(MN)
f=0.82*(sqrt(FR/(Dp*Kp*gammap)));
MR=max(abs(FR*(e+((2/3)*f))));%Unidades(MNm)
if MR>=Mtot && FR>=Ftot
    cg=0;%Aguanta sobrado
else
    cg=1;
    Lemb=Lemb+0.05;
end
CCG=struct('Ftot',Ftot,'Mtot',Mtot,'FR',FR,'MR',MR);
end
```

13 Comprobación

Requiere como datos de entrada el diámetro, la comprobación (a) y el aumento del diámetro (paso), da como resultado el valor de la comprobación (0 o 1) y el valor del diámetro.

```
function[comprobacion,D]=Comprobacion(D,a,paso)
if a==1
   D=D+paso;
   comprobacion=1;
elseif a==0
   comprobacion=0;
else
   fprintf('Las condiciones de la funcion no estan definidas para ese parametro de entrada');
end
end
```

14 Plastificación

Tomando como datos de entra el momento, el esfuerzo axil, el diámetro, el límite de fluencia del material y el aumento del diámetro (paso), da como resultados, la tensión que sufre la sección, el diámetro de la misma y la comprobación de plastificación (0= no plastifica, 1= si palstifica).

```
function [plastificacion,D,sigma]= Plastificacion(N,M,D,f,paso)
%M: vector que contiene los momentos de la barra estudiada (MNm)
%D: diametro de la barra (m)
[t,A,I,J,W]=Parametrosi(D);
sigma=max((max(abs(N))/A+max(abs(M))/W)*10^(-6)); %(N/mm^2)

if sigma >= f
      plastificacion=1;
      D=D+paso;
   else
      plastificacion=0;
end
end
```

15 Pandeo

Tomando como datos de entra el momento, el esfuerzo axil, el diámetro y la longitud de la seción, da como resultados, el diámetro del elemento, las tensiones que sufre y la máxima que soportaría y la comprobación de pandeo (0= no plastifica, 1= si palstifica).

```
function
[Pbarra,D,ts,PANDEOGLOBAL,sigmaS_RCR,sigma_pl]=Pandeo(M,Ned,L,D,t,datosfabricante,da
tosacero)
%M: Momentos de la barras
%N: Axil
E=datosacero.E;
[A,I,J,W]=Parametrost(D,t);
```

```
paso=datosfabricante.aD;
betta=2;
Lk=L*betta;
f=datosacero.fyk/datosacero.gamma;
Npandeo= A*f;
Mpl= W*f;
alphapandeo=0.21;
Ncrit=((pi/Lk)^2)*E*I;
gamma=datosacero.gamma;
lambdared=sqrt((Npandeo*gamma)/Ncrit);
phi=0.5*(1+alphapandeo*(lambdared-0.2)+(lambdared^2));
%factor de reduccion
kred=1/(phi+sqrt((phi^2)-(lambdared^2)));
increm_n=0.25*kred*lambdared^2;
if increm_n > 0.1
   increm_n=0.1;
end
bettam=1; % factor de mayoracion
Nb_Rd=kred*A*f;
PANDEOGLOBAL=((max(max(Ned))*10^-
6)/(Npandeo*kred))+((max(max(abs(M)))*bettam*10^-6)/Mpl)+increm_n;

if PANDEOGLOBAL<=1 & (max(max(Ned))*10^-6)<Nb_Rd
   P1=0;
else
   P1=1;
end
% Pandeo local
w=L/sqrt(t*D/2); %longitud de la cascara/armazon
% Cxb=3;
% if  w<=1.7
%     Cx=1.36-(1.83/w)+(2.07/w^2);
% elseif w>(0.5*D/(2*t))
%     Cx=1+(0.2/Cxb)*(1-2*w*t/(D/2));
% end
% if Cx < 0.6
   Cx=0.6;
% else
%     Cx=1;
% end

sigmaS_RCR=0.605*E*I*Cx*t/(D/2);

% Ojo el momento total Mtot, es el equivalente de la carga maxima def
% en el MAIN
sigma_pl=(((max(abs(Ned)))*10^-6)/A)+((max(max(abs(M)))*10^-6)/W); % pandeo lateral

if sigmaS_RCR > sigma_pl
   P2=0;
else
   P2=1;
end
if P1==1 || P2==1
   ts=t+0.01; % aumenta 1 mm cada vez que no cumple
   Pbarra=1;
```

```
   if (D-2*ts)/D< 0.95
      D=D+paso;
   end
else
   Pbarra=0;
   ts=t;
end
end
```

15.1 Parametrost

Recibiendo como parámetros de entrada el diámetro y el espesor, devuelve el área, el momento de inercia y el módulo resistente del elemento.

```
function [A,I,J,W]=Parametrost(D,t)
%Funcion que se emplea solo en la etapa comprobacion de conicida torre(predimensionamiento)
%Toma como dato de entrada en diametro y da como salida, el espesor, la
%seccion, el momento de inercia, la constante de torsion
% Ojo: el diametro debe introducirse en m
A=pi*((D/2)^2 -((D/2)-t)^2); %(m^2)
I= (1/4)*pi*(((D/2)^4)-(((D/2)-t)^4));%(m^4)
J= 2*I;%(m^4)
W=I/(D/2);
% Esto se recalcula porque son huecas
end
```

16 Deflexión y rotación

Recibiendo como datos de entrada el archivo de desplazamientos, el aumento del diámetro (paso), el diámetro del elemento, la frecuencia natural y la longitud del pilote, devuelve como resultado un vector con las deflexiones y rotaciones en la base de los pilotes, el diámetro de los mismo y la comprobación de deflexión y rotación (0= cumple a deflexión y rotación 1= no cumple una o ambas de las comprobaciones).

```
function [DyR,deflexrot,D] = DeflexionyRot(desplazamiento,paso,D1,wn,Lp)
[row colum]=size(desplazamiento);
for i=1:row
   if desplazamiento(i,1)==wn & desplazamiento(i,2)==-12 & desplazamiento(i,3)==0
      thetax2=(abs(desplazamiento(i,10)+1i*desplazamiento(i,11)))*180/pi;%(rad)
      ux2=(abs(desplazamiento(i,4)+1i*desplazamiento(i,5)));%(rad)
   end
   if desplazamiento(i,1)==wn & abs(desplazamiento(i,2)-Lu*cosd(60))<1e-3 &
abs(desplazamiento(i,3)+Lu*sind(60))<1e-3
      thetax4=(abs(desplazamiento(i,10)+1i*desplazamiento(i,11)))*180/pi;%(rad)
      ux4=(abs(desplazamiento(i,4)+1i*desplazamiento(i,5)));%(rad)
   end
   if desplazamiento(i,1)==wn & abs(desplazamiento(i,2)-Lu*cosd(60))<1e-3 &
abs(desplazamiento(i,3)-Lu*sind(60))<1e-3
      thetax5=(abs(desplazamiento(i,10)+1i*desplazamiento(i,11)))*180/pi;%(rad)
      ux5=(abs(desplazamiento(i,4)+1i*desplazamiento(i,5)));%(rad)
```

```
    end
end
ux=[ux2 ux4 ux5];
thetax=[thetax2 thetax4 thetax5];
DyR=[ux2 thetax2;ux4 thetax4;ux5 thetax5];
if not(any(ux(:)>0.1 | thetax(:)>0.5))
    deflexrot=0;
    D=D1;
else
    deflexrot=1;
    fprintf('\nNo cumple en el pilote dos por:  %f(desp)   %f(giro)',ux2/0.1,thetax2/0.5);
    fprintf('\nNo cumple en el pilote dos por:  %f(-)   %f(-)',ux4/0.1,thetax4/0.5);
    fprintf('\nNo cumple en el pilote dos por:  %f(-)   %f(-)\n',ux5/0.1,thetax5/0.5);
    D=D1+paso;
end
end
```

17 Factores dinámicos

```
function[FmaxwaveWTOTAL,MmaxwaveWTOTAL]=Factoresdinamicos(wn,FwavemaxW,Mwav
emaxW,k,datosmarea,datoseolicos)
%factor de amortiguamiento "chi"
%factor de amortiguamiento del viento longitudinal 2%(x)
chix=0.02;%(valor por unidad)
%factor de amortiguamiento del viento transversal 0.5%(x)
chiy=0.005;%(valor por unidad)
if k==2
    T=datosmarea.Tm1;
elseif k==4
    T=datoseolicos.Tm25;
else
    fprintf('No es una de las dos hipotesis mas desfavorables');
end
f0=wn;
fola=1/T;
DAFxW=1/sqrt(((1-(fola/f0)^2)^2)+(2*chix*(fola/f0)^2));
DAFyW=1/sqrt(((1-(fola/f0)^2)^2)+(2*chiy*(fola/f0)^2));
DAFW=[DAFxW;DAFyW];
FmaxwaveWTOTAL=FwavemaxW*(max(max(DAFW)));
MmaxwaveWTOTAL=MwavemaxW*(max(max(DAFW)));
end
```

18 Resumen cargas

Dando a la función como datos de entrada los valores máximos de las cargas de entrada, el periodo del ciclo, y el diámetro de la sección, devuelve las cargas combinadas máxima, media y mínima.

```
function[Cargamaxima_combinada,Cargaminima_combinada,Nivelmax_tension,Amplitudmax_ten
sionciclica,Frec]=ResumenCargas(Marrastre,MmaxWi,MminWi,Mmaxwa,Mminwa,Tm,D)
%% Resumen de cargas de los dos escenarios mas desfavorables, siguiendo DNV-Os-J101
```

```
%D: tiene que ser del pilote
%Tm: depende del escenario de calculo

[~,~,I,~]=Parametrosi(D);
%Todas las cargas estan en MNm
% Escenario W-2:
Cargamaxima_wind=MmaxWi;
Cargaminima_wind=MminWi;

Cargamaxima_wave=Mmaxwa;
Cargaminima_wave=Mminwa;

Cargamaxima_combinada=Cargamaxima_wind+Cargamaxima_wave+Marrastre;
Cargaminima_combinada=Cargaminima_wind+Cargaminima_wave;
%% Para que puse aqui estos dos valores, revisar
Periodociclo=Tm; %s
Frec=1/(Periodociclo); %Hz
gammal=1; %factor mayorador sacado de DNV-Os-J101
Nivelmax_tension=gammal*Cargamaxima_combinada*(D/(2*I));%Mpa

% Habra variaciones respecto del monopilote ?????
Amplitudmax_tensionciclica=gammal*((Cargamaxima_combinada-
Cargaminima_combinada)/2)*(D/(2*I));
end
```

19 Datos frecuencia

Recibiendo como datos de entrada los resultados de cargas en las comprobaciones de plastificación y pandeo y el límite de fluencia del acero, devuelve como resultado una estructura que contiene todos esos datos para la posterior comprobación de la frecuencia.

```
function[datoscomprobaciones]=datosfrecuencia(f,sigmat,sigmau,sigmap,Pgt,Pgu,Pgp,plct,plcu,plc
p,plmt,plmu,plmp)
%Genera el fichero de datos para comprobar la frecuencia
% Fichero datos
% Elem\Comp      Plastificacion          Pandeo g.(0-1)        Pandeo l.
%              calc.     max                        calc.     max
% Torre         (1,1)                    ...                (1,4)
% E.union        ...                     ...                ...
% Pilotes       (3,1)                    ...              (3,4)
datos=fopen('datofrec.dat','w');
fprintf(datos,' %f %f %f %f %f',sigmat,f,Pgt,plct,plmt);
fprintf(datos,' %f %f %f %f %f',sigmau,f,Pgu,plcu,plmu);
fprintf(datos,' %f %f %f %f %f',sigmap,f,Pgp,plcp,plmp);
datoscomprobaciones=struct('sigmat',sigmat,'sigmau',sigmau,'sigmap',sigmap,'f',f,'Pgt',Pgt,'Pgu',Pg
u,'Pgp',Pgp,'plct',plct,'plcu',plcu,'plcp',plcp,'plmt',plmt,'plmu',plmu,'plmp',plmp);
save 'datosfrec.dat'
fclose('all');
end
```

20 Comprobación frecuencia

Recibiendo como datos de entrada la frecuencia natural, los diámetros y espesores y los datos obtenidos de la función 19, esta función devuelve los diámetros y espesores de los elementos, la longitud embebida y la comprobación de la frecuencia (0= la frecuencia es válida, 1= si se sale del intervalo).

```
function[frecuencia,Dt,Du,Dp,tt,tu,tp,Lemb]=ComprobacionFrecuencia(w,D1,D2,D3,t1,t2,t3,datos
frec,datosfabricante,L)
%% Se comprueba si la frecuencia fundamental del sistema esta entre los margenes establecidos
w=w/(2*pi);
f1P=datosfabricante.velmax/60;
f3P=3*datosfabricante.velmin/60;
% Valores predeterminados para la consideracion del sobredimensionamiento
% para los fenomenos de plastificacion y pandeo
splas=0.8;
span=0.8;
    if w < 1.05*f1P
        Lemb=L+0.1;
        Dt=D1;Du=D2;Dp=D3;
        tt=t1;tu=t2;tp=t3;
        frecuencia=1;
    elseif w > 0.95*f3P
        Lemb=L;
          %Comprobar si hay sobredimensionamiento en alguna barra
          x=0.01;
          [Dt,Du,Dp,sobredim]=ComprobacionSobredimensionamiento(datosfrec,D1,D2,D3,x,splas,s
pan);
          if sobredim ==1
              frecuencia=1;
          else
              fprintf('No se ha podido converger a una solucion valida');
              frecuencia=1;
          end
    else
        Lemb=L;
        frecuencia=0;
        Dt=D1;Du=D2;Dp=D3;
        tt=t1;tu=t2;tp=t3;
    end
end
```

21 Comprobación espesor mínimo

Esta función recibe como datos de entrada el diámetro y espesor de los elementos, y devuelve el espesor del elemento, comprobando que el espesor es al menos superior al mínimo requerido.

```
function [tp]=Comprobacionespmin(D,t)
%% POner de que norma venia
tc=(6.35+(D*10^3)/100)*10^-3; %(m)
if t<tc
```

```
    tp=tc;
else
    tp=t;
end
end
```

22 Fatiga

Recibiendo como datos de entrada la amplitud máxima de la tensión cíclica, el diámetro y el espesor del elemento y el límite de fluencia del material, devuelve el número de ciclos que aguanta el elemento, la comprobación de fatiga (0= cumple a fatiga, 1= no cumple a fatiga) y el diámetro del elemento.

```
function [N,fatiga,D]=Fatiga(sigma,D,t,paso,f)
%incsigma: rango de tensiones
%Diametro del elemento para obtener la seccion
[A,I,J,W]=Parametrost(D,t);
loga=12.449;
m=3;
k=0.15;
tref=0.32;
gammaL=1; %Factor del eurocodigo
syms N1
sigma=sigma;
N=vpasolve(log(N1)-loga+m*log(sigma*(t/tref)^k)==0,N1);
N=double(N)*10^6;
if sigma>= f
    fatiga=1;
    D=D+paso;
else
    fatiga=0;
end
end
```

23 Resultados

Está función recibe como datos de entrada los diámetros y espesores de los elementos, así como todos los valores de las comprobaciones calculados y máximos para generar con ellos un archivo donde se plasmen esos valores.

```
function Resultados(Dp,Du,Dt,Lemb,Lp,dd,CCG,DyR,Nu,Np,Nt,tt,tu,tp,wnatu)
%Genera el fichero de salida con las caracteristicas de cada barra y las
%comprobaciones realizadas
datos=fopen('Resultados.dat','w');
fprintf(datos,' Parametros caracteristicos del aerogenerador\n\n');
fprintf(datos,' Frecuencia natural del sistema: %f (Hz)\n',wnatu/(2*pi));
fprintf(datos,' Elemento    Diametros(m)    Espesor(m)\n');
fprintf(datos,' E.union:    %f      %f\n',Du,tu);
fprintf(datos,' Torre:      %f      %f    Forma: ||\n',Dt,tt);
```

```
fprintf(datos,' Pilotes:    %f      %f\n\n',Dp,tp);
fprintf(datos,' Longitud embebida de los pilotes:    %f (m)\n',Lemb);
fprintf(datos,' Longitud total de los pilotes:       %f (m)\n\n',Lemb+Lp);

fprintf(datos,' Comprobaciones                    Valores calculados                    Valores maximos\n');
fprintf(datos,' Capacidad de carga geotecnica:   %f(MN)   %f(MNm)        %f(MN)  %f(MNm)
\n\n',CCG.Ftot,CCG.Mtot,CCG.FR,CCG.MR);%Carga geotecnica(p)
fprintf(datos,' Deflexion y
rotacion:           Deflex.(m)          Rot.()          Deflex.(m)   Rot.(?)\n');
fprintf(datos,' Pilote 2-
6:                  %f(m)       %f(?)         0.2(m)     0.5(?)\n\n',DyR(1,1),DyR(1,2));
fprintf(datos,' Pilote 4-
7:                  %f(m)       %f(?)         0.2(m)     0.5(?)\n\n',DyR(2,1),DyR(2,2));
fprintf(datos,' Pilote 5-
8:                  %f(m)       %f(?)         0.2(m)     0.5(?)\n\n',DyR(3,1),DyR(3,2));

fprintf(datos,' Elem/Comprob:     Plastificacion                    Pandeo g.              Pandeo
l.                    N.ciclos\n');
fprintf(datos,'           Calculado          Max                              Calculado          Max\n');
fprintf(datos,'
Torre      %f        %f          %f          %f       %f           %f\n\n',dd.sigmat,dd.f,dd.Pgt,dd.plct,d
d.plmt,Nt);
fprintf(datos,'
E.union     %f        %f          %f          %f       %f           %f\n\n',dd.sigmau,dd.f,dd.Pgu,dd.plcu
,dd.plmu,Nu);
fprintf(datos,'
Pilotes     %f        %f          %f          %f       %f           %f\n\n',dd.sigmap,dd.f,dd.Pgp,dd.plcp
,dd.plmp,Np);

fclose('all');
end
```

Planos

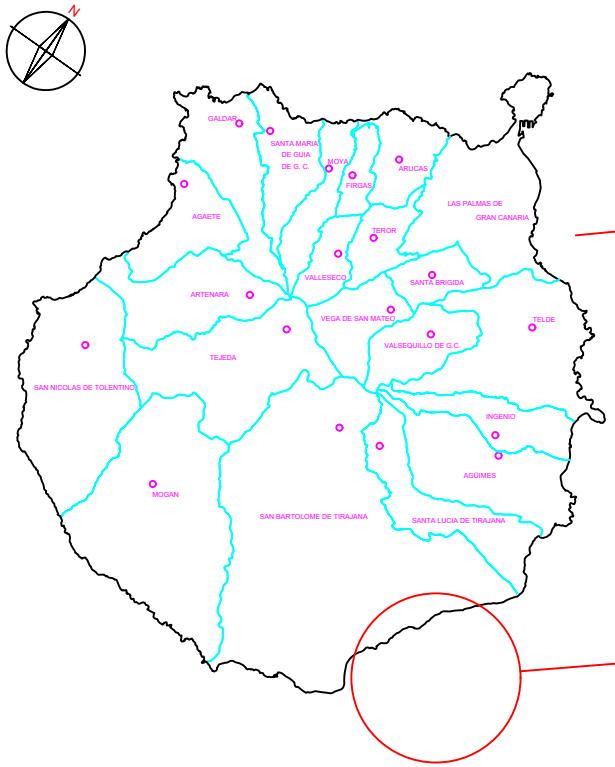
PROCEDIMIENTO NUMÉRICO PARA EL DIMENSIONAMIENTO DE ESTRUCTURAS DE SOPORTE DE AEROGENERADORES OFFSHORE SOBRE GRUPOS DE PILOTES

Índice:

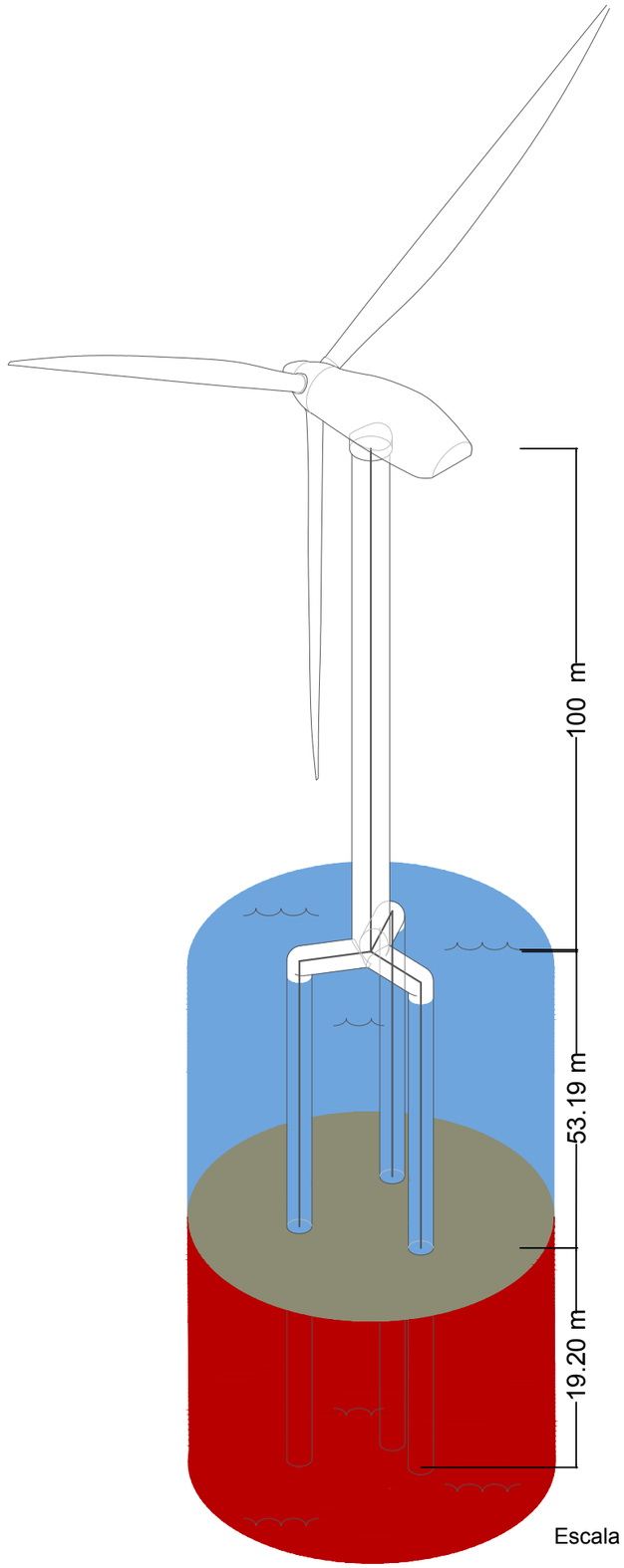
Plano 1: Situación y emplazamiento

Plano 2: Plano general del aerogenerador

Plano D-01: Diagrama de flujo

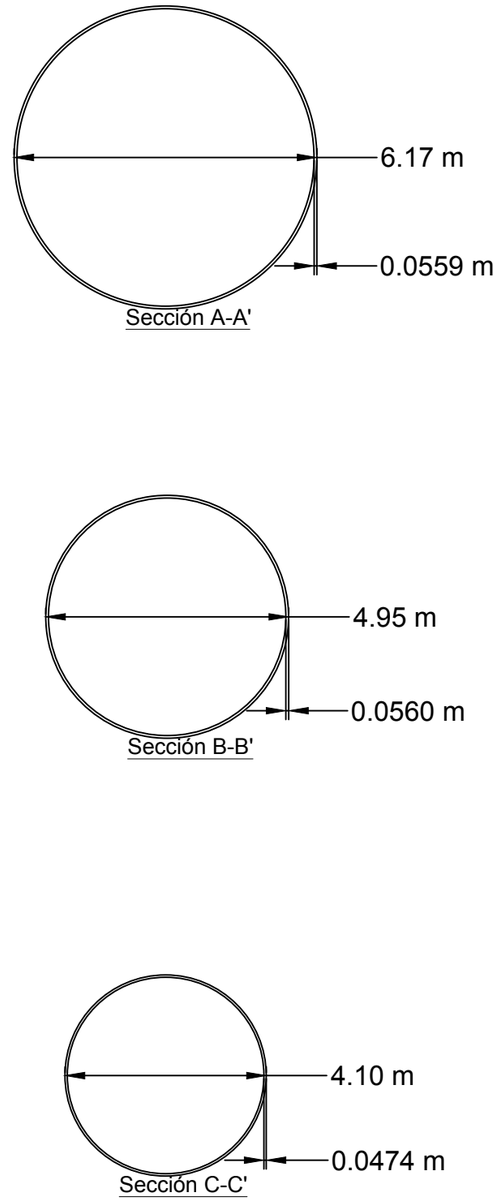


ULPGC	PROYECTO: Procedimiento numérico para el dimensionamiento de estructuras de aerogeneradores offshore sobre grupo de pilotes	
	PETICIONARIO: UNIVERSIDAD DE LAS PALMAS DE GRAN CANARIA	
	DIRECCION: Costa de Gran Canaria | 35.100 | Coordenadas UTM (X:452850; Y: 3069850)	
	TUTORES: Luis A. Padrón Hernández y Guillermo M. Álamo Meneses	
Nº PLANO: 01	TITULO: PLANO DE SITUACIÓN Y EMPLAZAMIENTO	ESCALA: 1:--
FECHA: 07/2018	AUTOR: Borja Cabera Rodríguez - 45334695Q	FIRMA



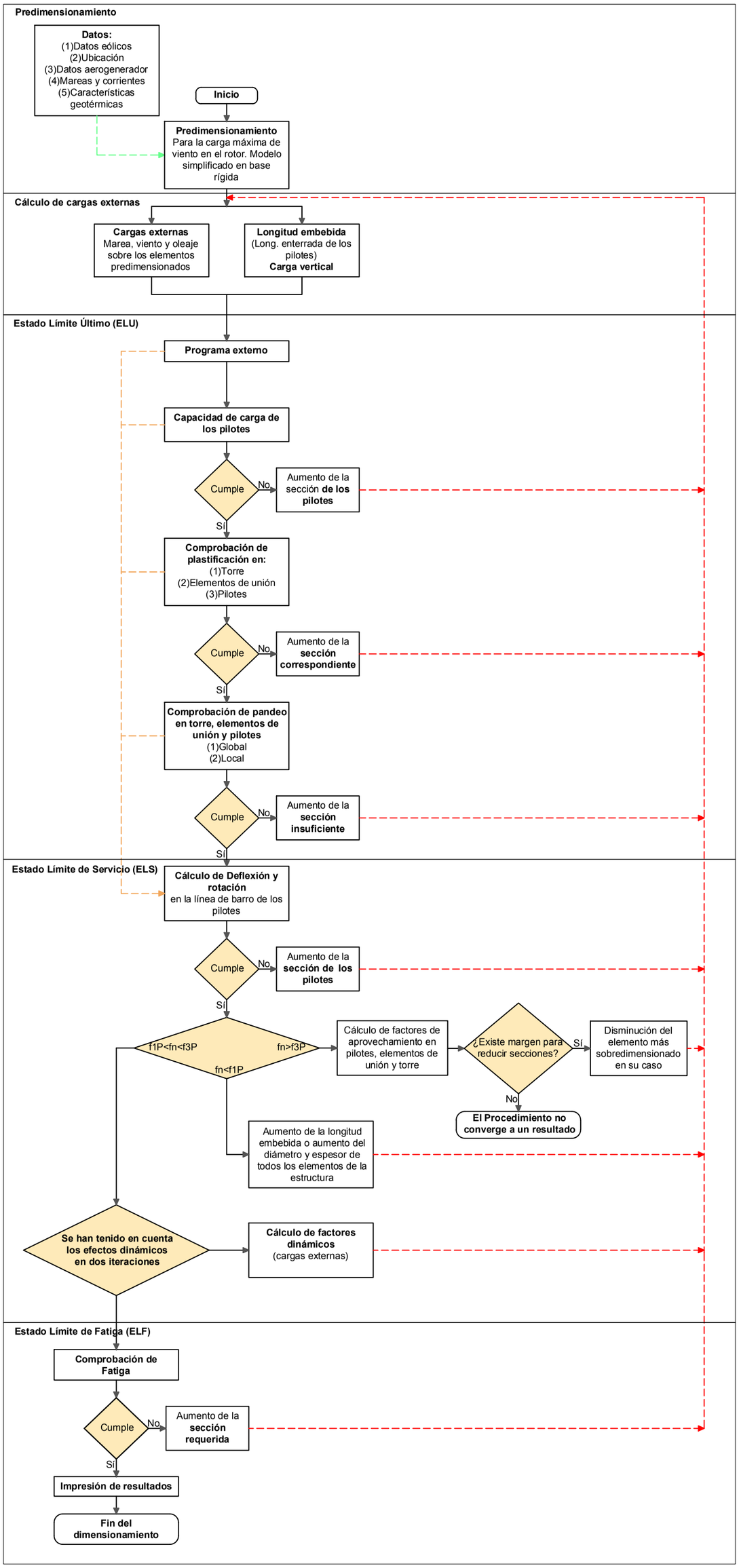
Escala 1:1000

Detalle: Secciones



Escala 1:125

ULPGC	PROYECTO: Procedimiento numérico para el dimensionamiento de estructuras de aerogeneradores offshore sobre grupo de pilotes	
	PETICIONARIO: UNIVERSIDAD DE LAS PALMAS DE GRAN CANARIA	
	DIRECCION: Costa de Gran Canaria | 35.100 | Coordenadas UTM (X:452850; Y: 3069850)	
	TUTORES: Luis A. Padrón Hernández y Guillermo M. Álamo Meneses	
Nº PLANO: 02	TITULO: PLANO GENERAL AEROGENERADOR	ESCALA: 1:--
FECHA: 07/2018	AUTOR: Borja Cabera Rodríguez - 45334695Q	FIRMA



PROYECTO: Procedimiento numérico para el dimensionamiento de estructuras de aerogeneradores offshore sobre grupo de pilotes

PETICIONARIO: UNIVERSIDAD DE LAS PALMAS DE GRAN CANARIA

DIRECCION: Costa de Gran Canaria | 35.100 | Coordenadas UTM (X:452850; Y: 3069850)

TUTORES: Luis A. Padrón Hernández y Guillermo M. Álamo Meneses

TITULO: DIAGRAMA DE FLUJO

ESCALA: 1:--

Nº PLANO: D-01

FECHA: 07/2018

AUTOR: Borja Cabera Rodríguez - 45334695Q

FIRMA