



# Diseño de una estructura Jacket multipilotada para soporte de un aerogenerador marino en la isla de Gran Canaria



Autor: *Román Quevedo Reina*

Tutor: *Juan José Aznárez González*

Tutor: *Guillermo Manuel Álamo Meneses*

Curso 2018-2019









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

# Diseño de una estructura Jacket multipilotada para soporte de un aerogenerador marino en la isla de Gran Canaria

*Por Román Quevedo Reina*

Trabajo presentado para la obtención del Máster en Ingeniería Industrial

Autor:

Román Quevedo Reina

Tutor:

Juan José Aznárez González

Tutor:

Guillermo M. Álamo Meneses

Las Palmas de Gran Canaria, Junio de 2019



*Este trabajo se encuentra en el ámbito de los objetivos del proyecto BIA2017-88770-R financiado por el Ministerio de Ciencia, Innovación y Universidades, la Agencia Estatal de Investigación y FEDER.*





## ÍNDICE DEL PROYECTO

Memoria .....	1
Anexo I: Estudio del emplazamiento .....	61
Anexo II: Selección del aerogenerador .....	83
Anexo III: Resultados del cálculo estructural .....	99
Planos .....	163
Mediciones y Presupuesto .....	173

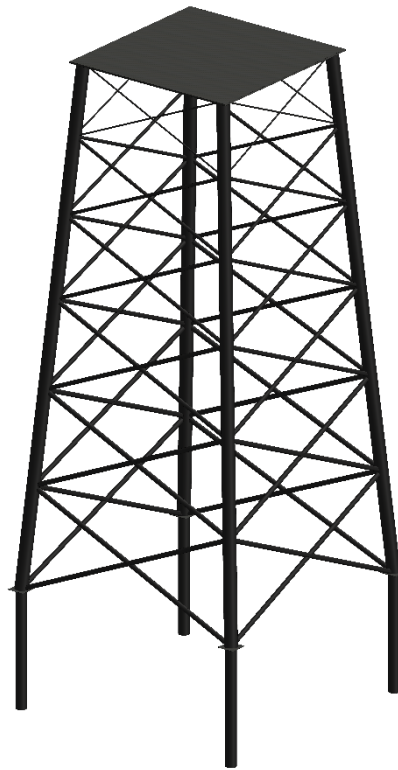




UNIVERSIDAD DE LAS PALMAS DE GRAN CANARIA  
Escuela de Ingenierías Industriales y Civiles

Diseño de una estructura tipo Jacket multipilotada para soporte  
de un aerogenerador marino en la isla de Gran Canaria

# Memoria



Autor: *Román Quevedo Reina*

Tutor: *Juan José Aznárez González*

Tutor: *Guillermo Manuel Álamo Meneses*



---

## Contenido

Índice de tablas.....	5
Índice de figuras.....	7
1. Memoria descriptiva .....	9
1.1. Objeto.....	9
1.2. Alcance.....	9
1.3. Antecedentes .....	10
1.4. Legislación.....	10
1.4.1. Normas de obligado cumplimiento .....	10
1.4.2. Estándares recomendados .....	11
1.5. Requisitos de diseño.....	11
1.5.1. Emplazamiento.....	11
1.5.2. Aerogenerador.....	12
1.6. Análisis de las soluciones.....	12
1.6.1. Estructura de soporte por gravedad.....	13
1.6.2. Estructura de soporte monopilote.....	13
1.6.3. Estructura de soporte tripilote .....	14
1.6.4. Estructura de soporte trípode.....	15
1.6.5. Estructura de soporte jacket .....	15
1.7. Solución adoptada .....	16
1.7.1. Diseño .....	16
1.7.2. Presupuesto .....	17
1.8. Documentos del proyecto.....	17
2. Memoria justificativa .....	18
2.1. Introducción .....	18
2.1.1. Geometría.....	18
2.1.2. Metodología de cálculo .....	19
2.2. Criterios de diseño.....	20
2.2.1. Criterios generales.....	20



2.2.2.	Estados de carga .....	25
2.2.3.	Criterios de fallo .....	35
2.2.4.	Procedimiento de diseño.....	47
2.3.	Diseño propuesto .....	51
2.3.1.	Datos de partida .....	51
2.3.2.	Descripción del diseño.....	54
3.	Referencias .....	57

---

## Índice de tablas

Tabla M-1: Ubicación seleccionada.....	11
Tabla M-2: Caracterización geométrica de la estructura. ....	16
Tabla M-3: Resumen de las secciones de la estructura.....	17
Tabla M-4: Reducción del límite elástico en función del espesor. ....	21
Tabla M-5: Factor parcial de seguridad para las cargas.....	21
Tabla M-6: Hipótesis de carga.....	26
Tabla M-7: Parámetros del coeficiente de reducción de pandeo.....	40
Tabla M-8: Parámetros de la curva S-N.....	46
Tabla M-9: Ubicación seleccionada.....	52
Tabla M-10: Características del viento en la ubicación seleccionada.....	52
Tabla M-11: Características del oleaje en la ubicación seleccionada.....	52
Tabla M-12: Características del terreno en la ubicación seleccionada.....	53
Tabla M-13: Características del aerogenerador seleccionado.....	53
Tabla M-14: Predimensionado de la torre del aerogenerador.....	54
Tabla M-15: Características del acero utilizado.....	54
Tabla M-16: Caracterización geométrica de la estructura.....	55
Tabla M-17: Resumen de las secciones de la estructura.....	56
Tabla M-18: Resumen de las comprobaciones de la estructura.....	56





---

## Índice de figuras

Figura M-1: Ubicación seleccionada [2].....	12
Figura M-2: Estructura de soporte por gravedad [3].....	13
Figura M-3: Estructura de soporte monopilote [3].....	14
Figura M-4: Estructura de soporte tripilote [3]. ....	14
Figura M-5: Estructura de soporte trípode [3]. ....	15
Figura M-6: Estructura de soporte jacket [3]. ....	16
Figura M-7: Estructura jacket [4].....	18
Figura M-8: Tipologías de arriostamiento de una estructura jacket [5].....	19
Figura M-9: Cargas resultantes de la presión hidrostática. ....	28
Figura M-10: Diagrama de flujo. ....	50



---

# 1. Memoria descriptiva

## 1.1. Objeto

El objeto del presente proyecto es el de diseñar una estructura tipo Jacket multipilotada para el soporte de un aerogenerador offshore en la costa de la isla de Gran Canaria. Dicho diseño incluirá tanto la elección de la turbina del aerogenerador y la localización de la misma, así como el dimensionamiento de los elementos estructurales y de la cimentación.

## 1.2. Alcance

El alcance de este proyecto se centra en el diseño y cálculo estructural de una estructura tipo jacket multipilotada para soporte de un aerogenerador marino. No obstante, para su desarrollo, se debe realizar un trabajo previo relativo a la selección de la ubicación y del aerogenerador; careciendo dicha tarea de entidad suficiente para poder ser considerada como definitiva. Por ello, quedan pendientes las siguientes actividades necesarias para completar el proyecto:

- Estudio de impacto ambiental que justifique el beneficio de la implantación del aerogenerador marino.
- Estudio detallado de las condiciones ambientales de la ubicación seleccionada y propiedades del terreno sobre el que sustenta la estructura.
- Diseño y cálculo estructural de la torre del aerogenerador.

En cuanto al diseño y cálculo de la estructura jacket y su cimentación, en este proyecto se define, de forma detallada, la geometría global del conjunto y las dimensiones de los elementos estructurales tipo barra que lo conforman. En una segunda etapa, no desarrollada en esta fase del proyecto, se procederá a:

- Verificar que el diseño propuesto está de acuerdo con la Instrucción de Acero Estructural (EAE). Debido al carácter singular de la estructura, se ha decidido aplicar los estándares internacionales propuestos por DNV GL Group, organización especializada en la materia, por considerarse más específicos.
- Calcular las uniones soldadas entre los distintos elementos estructurales que conforman el sistema.
- Calcular la plataforma superior donde se conecta la torre del aerogenerador.
- Comprobar el dimensionado del pilote frente a las cargas derivadas del procedimiento de hincado.
- Determinar la protección catódica necesaria para garantizar la resistencia de la estructura frente a la corrosión.



### **1.3. Antecedentes**

El uso de fuentes de energía renovables para satisfacer la gran demanda energética es uno de los problemas que afronta la sociedad actual. En este sentido, la energía eólica offshore se presenta como una alternativa viable que ha ganado importancia durante los últimos años. Concretamente, el incremento del uso de aerogeneradores marinos frente a terrestres viene motivado por diversos factores, tales como la limitada disponibilidad de suelo, el menor impacto visual y acústico a poblaciones cercanas o las mejores características del viento en mar abierto. De entre las diferentes tipologías estructurales que se emplean para soportar los aerogeneradores offshore, los monopilotes son la opción más extendida. Sin embargo, la necesidad de cubrir mayores profundidades de agua ha motivado el uso de alternativas tales como estructuras con múltiples pilotes (tripods, tripilote) o estructuras tipo Jacket.

Para el adecuado dimensionamiento de las estructuras de soporte de los aerogeneradores offshore, es importante considerar la naturaleza particular de las cargas que inciden sobre el sistema (viento, marea, giro del rotor, paso de palas, ...). La gran componente dinámica de las mismas, además, hace necesario un correcto dimensionamiento de la estructura para evitar fenómenos de resonancia que, consecuentemente, reduzcan la vida útil de los aerogeneradores. En este sentido, estudios recientes indican la importancia de considerar los efectos de interacción suelo-estructura a la hora de estimar las propiedades modales del conjunto cimentación-estructura-aerogenerador.

### **1.4. Legislación**

Existe una gran variedad de legislación que, de un modo u otro, afecta a un proyecto de esta envergadura. A continuación, se detalla la normativa relacionada con el alcance del mismo:

#### **1.4.1. Normas de obligado cumplimiento**

- Real Decreto 1028/2007, de 20 de julio, por el que se establece el procedimiento administrativo para la tramitación de las solicitudes de autorización de instalaciones de generación eléctrica en el mar territorial.
- Real Decreto 1485/2012, de 29 de octubre, por el que se modifica el 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, para adaptarlo a la nueva denominación y estructura de los departamentos ministeriales.
- 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.

- Ley 9/2018, de 5 de diciembre, por la que se modifica la Ley 21/2013, de 9 de diciembre, de evaluación ambiental, la Ley 21/2015, de 20 de julio, por la que se modifica la Ley 43/2003, de 21 de noviembre, de Montes y la Ley 1/2005, de 9 de marzo, por la que se regula el régimen del comercio de derechos de emisión de gases de efecto invernadero.
- Real Decreto 751/2011, de 27 de mayo, por el que se aprueba la Instrucción de Acero Estructural (EAE).

#### 1.4.2. Estándares recomendados

- DNVGL-OS-B101: Metallic materials (2015).
- DNVGL-ST-0126: Support structures for wind turbines (2016).
- DNVGL-ST-0437: Loads and site conditions for wind turbines (2016).
- DNVGL-RP-C202: Buckling strength of shells (2017).
- DNVGL-RP-C203: Fatigue design of offshore steel structures (2016).
- DNVGL-RP-C205: Environmental conditions and environmental loads (2017).
- IEC 61400-1:2007: Wind turbines. Part 1: Design requirements (2007).
- API RP 2A-WSD: Recommended Practice for Planning, Designing and Constructing Fixed Offshore Platforms: Working Stress Design (2007).

### 1.5. Requisitos de diseño

#### 1.5.1. Emplazamiento

La ubicación seleccionada para el aerogenerador marino se encuentra al sureste de la costa del municipio de San Bartolomé de Tirajana en la isla de Gran Canaria, España. Según el Estudio Estratégico Ambiental del litoral español para la instalación de parques eólicos marinos [1], este lugar se identifica como *zona con condicionantes*; por lo que se requiere un mayor análisis de los efectos o conflictos que puedan surgir debido al proyecto.

A continuación, se muestra la ubicación seleccionada:

Tabla M-1: Ubicación seleccionada.

Ubicación del aerogenerador marino	
<b>Latitud</b>	27° 45' 08,55" N
<b>Longitud</b>	15° 28' 34,55" O
<b>Profundidad de la lámina de agua</b>	49 metros
<b>Distancia a la costa</b>	4.314 metros



Figura M-1: Ubicación seleccionada [2].

Toda la información relativa a la selección de dicho emplazamiento y sus características se encuentra detallada en el Anexo I: Estudio del emplazamiento.

### **1.5.2. Aerogenerador**

De acuerdo con el Anexo II: Selección del aerogenerador, el modelo para el que se diseña la estructura jacket se trata del modelo 6.3M152 de la marca Senvion (Alemania). Sus principales características, útiles para el cálculo estructural, vienen detalladas en el apartado 2.3.1.2.

## **1.6. Análisis de las soluciones**

Existe una gran variedad de tipologías para diseñar soportes de aerogeneradores marinos. Cada una de ellas presenta diferentes aptitudes que incrementan su eficiencia frente a las condiciones de una ubicación particular, siendo conveniente evaluar diferentes tipologías para alcanzar el diseño óptimo.

A continuación, se analizan diferentes tipologías y sus características principales.

### 1.6.1. Estructura de soporte por gravedad

Se trata de una estructura que basa su estabilidad en la acción gravitatoria debida a su elevada masa. Normalmente se construye a base de hormigón armado, empleando materiales de relleno como arena o roca para reducir el material estructural. Este tipo de estructuras suele mostrar competitividad cuando las cargas ambientales son relativamente bajas, normalmente a poca profundidad. Además, el hormigón es un material resistente en el medio marino, lo que reduce notoriamente los costes de preparación y mantenimiento frente a la corrosión.

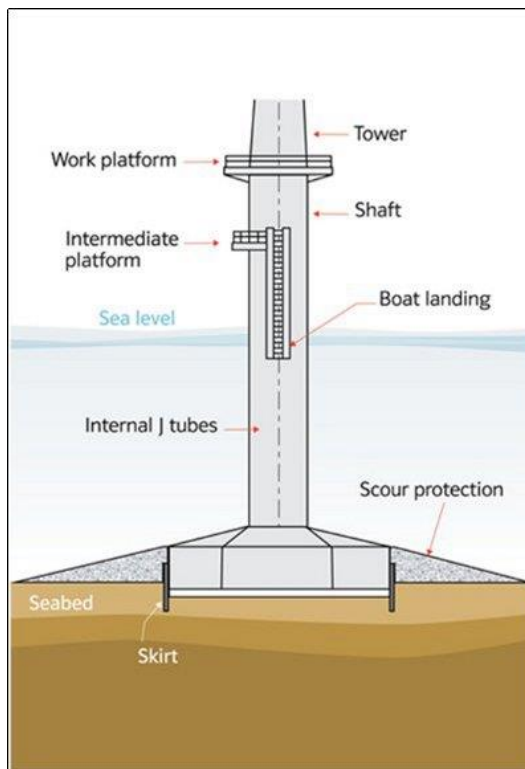


Figura M-2: Estructura de soporte por gravedad [3].

### 1.6.2. Estructura de soporte monopilote

La cimentación por medio de un monopilote consiste en el hincado de un pilote cilíndrico hueco de acero a través del lecho marino, variando la profundidad de hincado en función de las condiciones ambientales y del terreno. Suele emplearse en profundidades inferiores a 30 metros debido a su fácil instalación. Sin embargo, a nivel estructural se trata de un elemento relativamente flexible, presentando limitaciones en cuanto a los desplazamientos laterales del aerogenerador y a los fenómenos de resonancia.

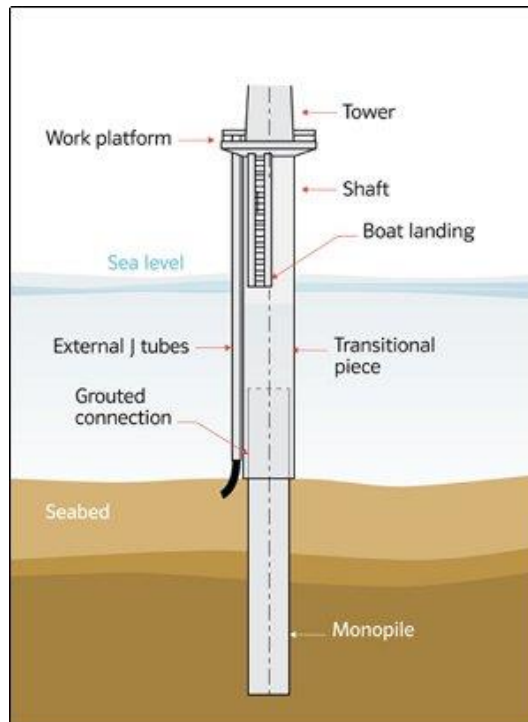


Figura M-3: Estructura de soporte monopilote [3].

### 1.6.3. Estructura de soporte tripilote

La estructura de soporte tripilote, como su propio nombre indica, consiste en cimentar mediante tres pilotes unidos en cabeza mediante un elemento estructural donde se apoya el aerogenerador. El conjunto presenta una mayor rigidez que el monopilote, alcanzando profundidades superiores (hasta 40 metros). No obstante, su mayor complejidad de montaje e instalación, limita su uso a circunstancias en las que no se deba emplear el monopilote.



Figura M-4: Estructura de soporte tripilote [3].



#### 1.6.4. Estructura de soporte trípode

La estructura de trípode se caracteriza por constar de una columna central y tres apoyos, generalmente pilotados, unidos mediante elementos cilíndricos. Dicha geometría presenta un reparto de cargas más eficiente, mejorando la estabilidad del conjunto. Se suele utilizar para profundidades mayores, en torno a 50 metros.

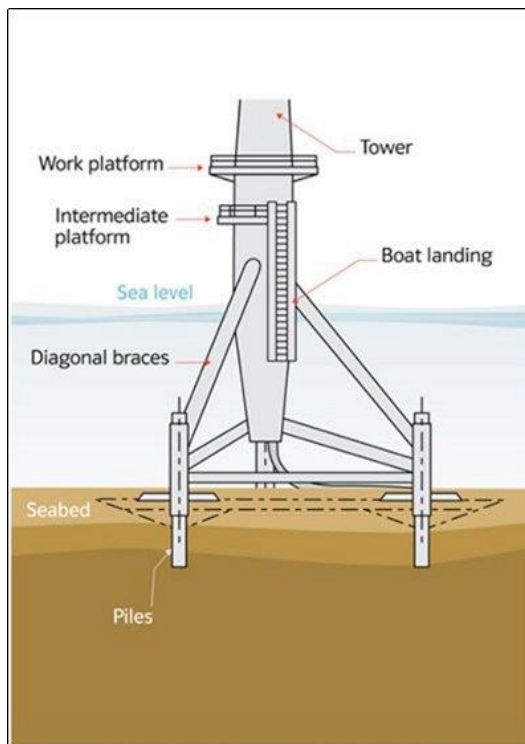


Figura M-5: Estructura de soporte trípode [3].

#### 1.6.5. Estructura de soporte jacket

La estructura jacket consiste en unos elementos estructurales principales, relativamente verticales, arriostrados en forma de celosía. Debido a que las barras trabajan principalmente a axil, se alcanza una alta eficiencia del material que permite reducir la cantidad del mismo. Sin embargo, la complejidad de montaje de la estructura exige un análisis más exhaustivo de los costes. Al igual que la estructura de soporte trípode, se recomienda su uso en grandes profundidades, alrededor de 50 metros.

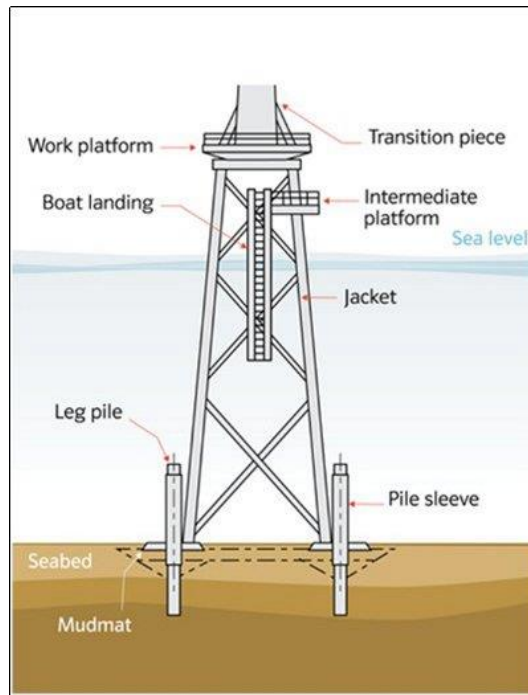


Figura M-6: Estructura de soporte jacket [3].

## 1.7. Solución adoptada

### 1.7.1. Diseño

La definición detallada del diseño alcanzado se puede consultar en el documento Planos del presente proyecto. A continuación, se indican los valores de los principales parámetros que definen este tipo de estructuras y las secciones empleadas:

Tabla M-2: Caracterización geométrica de la estructura.

Geometría de la estructura	
Altura	57 m
Número de apoyos	4
Separación de los soportes principales en la base	27 m
Separación de los soportes principales en la cima	18 m
Número de niveles de arriostramientos	6
Tipo de arriostramiento	X
Geometría de arriostramientos	Inclinación constante
Arriostramientos horizontales	Sin arriostramientos horizontales
Número de pilotes	4
Longitud de los pilotes	13 m

Tabla M-3: Resumen de las secciones de la estructura.

ID sección	Localización	Diámetro	Espesor	Total de longitudes	Masa
1	Pilotes	1,1680 m	20,0 mm	52,0000 m	29.443,86 kg
2	Soportes principales	1,4000 m	25,0 mm	229,4167 m	194.485,48 kg
3	Arriostramiento N1	0,5080 m	12,5 mm	227,3714 m	34.730,34 kg
4	Arriostramiento N2	0,5080 m	10,0 mm	212,5139 m	26.099,74 kg
5	Arriostramiento N3	0,4570 m	10,0 mm	198,6272 m	21.896,05 kg
6	Arriostramiento N4	0,4064 m	8,0 mm	185,6480 m	14.592,14 kg
7	Arriostramiento N5	0,3556 m	6,3 mm	173,5168 m	9.416,73 kg
8	Arriostramiento N6	0,1683 m	4,0 mm	162,1784 m	2.628,51 kg

### 1.7.2. Presupuesto

Tras realizar las mediciones del diseño alcanzado y una estimación inicial del precio de las unidades de obra de las que se dispone, se presupuesta la estructura jacket para soporte de un aerogenerador marino en un total de *un millón trescientos cuatro mil ochocientos sesenta euros con sesenta y un céntimos* (1.304.860,61 €).

### 1.8. Documentos del proyecto

El presente proyecto está compuesto por los siguientes documentos:

- Memoria.
- Anexo I: Estudio del emplazamiento.
- Anexo II: Selección del aerogenerador.
- Anexo III: Resultados del cálculo estructural.
- Planos.
- Mediciones y Presupuesto.

## 2. Memoria justificativa

### 2.1. Introducción

#### 2.1.1. Geometría

La subestructura tipo jacket se trata de una estructura de carácter tridimensional. A pesar de presentar mayor complejidad de montaje e instalación que otras cimentaciones alternativas como puede ser el monopilote o el tripilote; permite alcanzar una mayor eficiencia del material, reduciendo la cantidad necesaria. Por este motivo, se convierte en una tipología especialmente indicada para aquellas situaciones que necesiten salvar mayores profundidades (entre 20 y 60 metros).

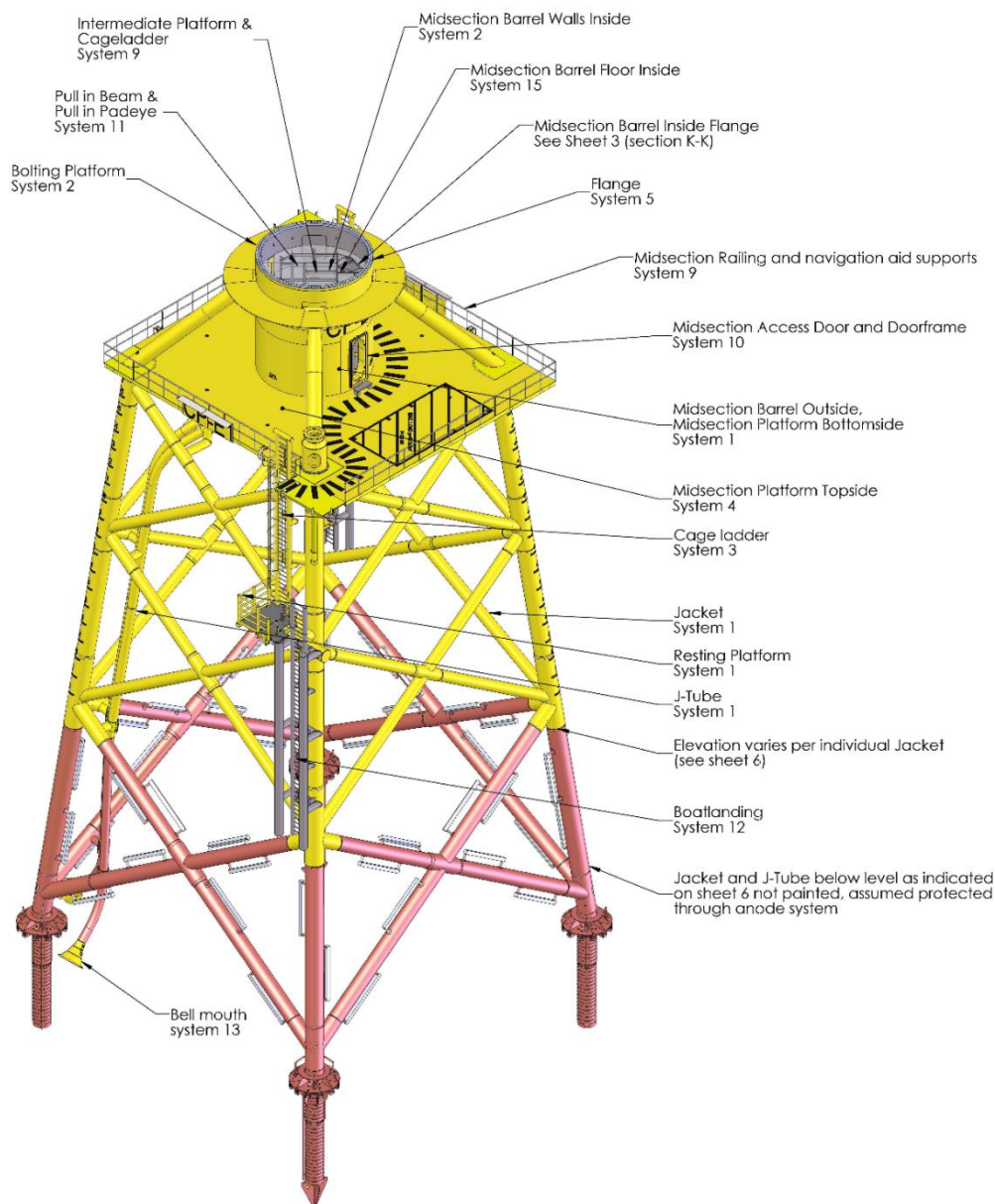


Figura M-7: Estructura jacket [4].

Como se aprecia en la Figura M-7: Estructura jacket, una estructura tipo jacket se trata de sistema multiparamétrico, donde se debe definir un gran número de variables. El primer aspecto a

considerar consiste en el tipo de arriostramiento que se emplea, existiendo la tipología en Z, en K y en X; tal y como muestra la Figura M-8.

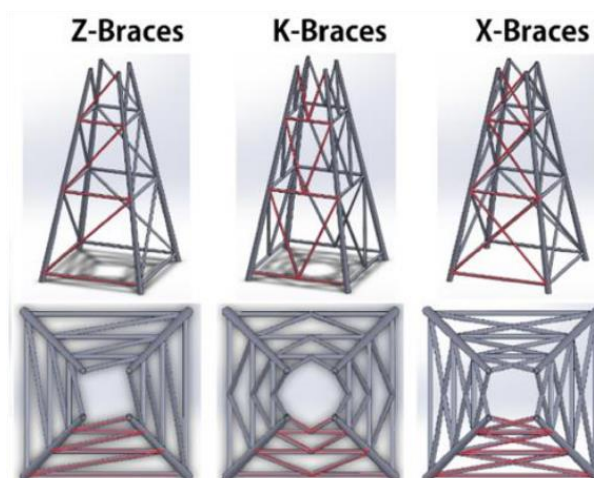


Figura M-8: Tipologías de arriostramiento de una estructura jacket [5].

Debido a que la tipología en X es la más extendida para diversas aplicaciones, el diseño del jacket se realiza bajo este esquema. Destacar que los arriostramientos horizontales son opcionales, pudiendo incrementar o reducir la eficiencia de la estructura dependiendo de las características específicas del sistema.

A continuación, se detallan los parámetros que definen la geometría final del sistema:

- Altura de la subestructura.
- Número de apoyos.
- Separación entre los soportes principales en la plataforma y en la base.
- Número de niveles de arriostramientos.
- Arriostramientos de altura o de inclinación constante.
- Existencia de arriostramientos horizontales.
- Diámetro y espesor de las distintas secciones.
- Diámetro, espesor y longitud de los pilotes.

Esta geometría descrita culmina con una plataforma en la cima que enlaza los extremos superiores de los soportes principales y la base del aerogenerador. Suele presentar una superficie transitable para facilitar las labores de mantenimiento propias de este tipo de dispositivos.

### 2.1.2. Metodología de cálculo

El carácter tridimensional de la subestructura tipo jacket, unido a su condición de hiperestaticidad, exigen procedimientos de cálculo más complejos que suelen implicar el cálculo computacional. Para dicha tarea, se emplea un código propio programado en MATLAB que permite



definir los nodos y elementos del sistema, realizar el cálculo estructural, verificar las comprobaciones incluidas y ajustar las secciones para dimensionar la estructura. Este procedimiento se encuentra detallado en el apartado 2.2.4.

El cálculo estructural se realiza empleando el Método Directo de la Rigidez. Para ello se emplea el modelo de viga de Timoshenko, que incluye la deformación por cortante de la barra. Además, las cargas distribuidas a lo largo de cada barra se discretizan en tramos rectos, empleando suficientes particiones para recoger el carácter variable de la carga.

A modo de simplificación, no se incluye el cálculo de la plataforma. El carácter bidimensional de la misma exige el uso de métodos de computación más complejos, como el Método de Elementos Finitos. Por ello, para evaluar la estructura, se considera como un elemento infinitamente rígido capaz de vincular los nodos superiores de los soportes principales. Su masa se computa como la que presentaría una lámina maciza de acero de 20 centímetros de espesor que ocupe toda su superficie. Evidentemente este predimensionado se aleja de la realidad, pero se asume que representa un mayor peso que la plataforma definitiva, estando del lado de la seguridad.

## **2.2. Criterios de diseño**

### **2.2.1. Criterios generales**

#### **2.2.1.1. Materiales**

El material a emplear se trata de acero, de acuerdo los estándares de DNG GL Group. Esta información viene recogida en la norma DNVGL-OS-B101 [6]. En ella se indica cómo se debe considerar que disminuye el límite de elástico del material a medida que se incrementa el espesor de la sección. La designación del material viene definida por VL xyz, siendo:

- x: Letra que designa la temperatura del test de Charpy:
  - A: Test realizado a 0°C.
  - D: Test realizado a -20°C.
  - E: Test realizado a -40°C.
  - F: Test realizado a -60°C.
- y: W si el material presenta soldabilidad mejorada; en caso contrario se omite.
- z: Número que referencia, de forma aproximada, el límite elástico del material.

A continuación, se indica la variación del límite elástico con el espesor para aceros con soldabilidad mejorada, probados a -40°C, de diferentes resistencias; tal y como se muestra en la Tabla M-4.

Tabla M-4: Reducción del límite elástico en función del espesor.

Espesor	VL EW27	VL EW32	VL EW36	VL EW420	VL EW460	VL EW500
≤ 25 mm	265 MP	315 MP	355 MP	420 MP	460 MP	500 MP
> 25 mm ≤ 50 mm	245 MP	295 MP	335 MP	420 MP	460 MP	500 MP
> 25 mm ≤ 50 mm	230 MP	280 MP	320 MP	400 MP	440 MP	480 MP
> 25 mm ≤ 50 mm	220 MP	270 MP	310 MP	380 MP	420 MP	460 MP

### 2.2.1.2. Factores de seguridad

Para otorgar fiabilidad a un diseño que se realiza bajo grandes incertidumbres, se incorporan factores de seguridad que minimicen la capacidad del material e incrementen las cargas frente a la que se debe dimensionar la estructura. En primer lugar, la DNVGL-ST-0126 [7] indica que, para el caso de estructuras tubulares, se considere un factor del material ( $\gamma_M$ ) igual a 1,10.

Por otro lado, los factores de seguridad que incrementan las cargas dependen de la naturaleza de la misma y de la comprobación que se realice. Vienen definidos en la DNVGL-ST-0437 [8]:

Tabla M-5: Factor parcial de seguridad para las cargas.

	ELU (favorable)	ELU (desfavorable)	ELS	ELF
<b>Cargas permanentes</b>	0,90	1,10	1,00	1,00
<b>Cargas ambientales</b>	1,35	1,35	1,00	1,00

Debido a las características geométricas que muestra la estructura tipo jacket, el pandeo se presenta como uno de los principales problemas a resolver en el dimensionado de las secciones. Por este motivo se opta por aplicar un factor parcial de seguridad para las cargas permanentes de 1,10. Además, para simplificar el cálculo, se considera un único factor de cargas ambientales para las distintas comprobaciones, empleándose el de Estados Límite Últimos (ELU) por ser el más desfavorable; es decir, un factor de cargas ambientales de 1,35.

### 2.2.1.3. Vida útil

La vida útil de los aerogeneradores suele situarse entre 20 y 30 años. No obstante, sus cimentaciones suelen diseñarse para que perduren más tiempo. Por ello, se establece una vida útil de diseño de 50 años.



#### 2.2.1.4. Clase de la sección

De forma similar a cómo aparece en la norma española, la DNVGL-ST-0126 [7] establece para las secciones metálicas cuatro tipos en función de los criterios de plastificación. A continuación, se indican las consideraciones a aplicar a cada tipo, así como el criterio que debe cumplir una sección circular.

- **Tipo I:** La sección transversal puede formar una rótula plástica con la capacidad de rotación requerida para el análisis plástico. Se debe cumplir:

$$\frac{D}{t} \leq 50 \frac{235}{f_y} \quad \text{Ecuación M-1}$$

- **Tipo II:** La sección transversal puede desarrollar su momento plástico resistente, pero tiene limitada su capacidad de rotación. Se debe cumplir:

$$\frac{D}{t} \leq 70 \frac{235}{f_y} \quad \text{Ecuación M-2}$$

- **Tipo III:** La sección transversal puede alcanzar su límite elástico en la fibra más comprimida. Se debe cumplir:

$$\frac{D}{t} \leq 90 \frac{235}{f_y} \quad \text{Ecuación M-3}$$

- **Tipo IV:** La sección transversal no puede alcanzar su límite elástico en la fibra más comprimida debido a efectos de pandeo local.

Para simplificar la comprobación del criterio de fallo de plastificación (apartado 2.2.3.2.1) de los distintos elementos de la estructura, se omite el análisis plástico tanto de la estructura como de la sección; y se fuerza a que la sección deba ser de tipo III o superior. De este modo, se reduce la variabilidad de las soluciones, estando siempre del lado de la seguridad.

Por otro lado, el pilote recibe una consideración especial debido al proceso de hincado. Entre las recomendaciones del American Petroleum Institute, la API RP 2A-WSD [9] aconseja el siguiente espesor mínimo en función del diámetro del pilote:

$$t(\text{mm}) \geq 6,35 + \frac{D(\text{mm})}{100} \quad \text{Ecuación M-4}$$

#### 2.2.1.5. Altura de la subestructura

La altura que debe presentar la subestructura tipo jacket debe asegurar que la plataforma quede sobre la superficie del agua, evidentemente. Por ello, se establece que la altura de la misma debe sobreponerse a la profundidad de la lámina de agua, el mayor nivel de la marea y la máxima



ola. Además, se debe dejar una brecha de aire de un mínimo de 1 m o del 20% de la mayor ola significativa con un periodo de retorno de 50 años. Todo esto se indica en la DNVGL-ST-0126 [7]. En resumen:

$$h \geq \begin{cases} h_a + n_m + \frac{H_{M,50}}{2} + 1 \\ h_a + n_m + \frac{H_{M,50}}{2} + 0,2H_{S,50} \end{cases} \quad \text{Ecuación M-5}$$

Siendo:

- $h$ : la altura de la subestructura.
- $h_a$ : la profundidad de la lámina de agua.
- $n_m$ : el máximo nivel que alcanza la marea.
- $H_{M,50}$ : la máxima altura de la ola con un periodo de retorno de 50 años.
- $H_{S,50}$ : la altura significativa con un periodo de retorno de 50 años.

#### 2.2.1.6. Análisis estático equivalente

Las cargas ambientales que afectan a la estructura destacan por el carácter variable de las mismas, ya que van evolucionando a lo largo del tiempo. Este hecho, unido a fenómenos de resonancia propios de los sistemas estructurales, exige considerar el carácter dinámico de las sollicitaciones.

El procedimiento riguroso para considerar el carácter dinámico de las cargas implica incorporar los efectos inerciales al Método Directo de la Rigidez y realizar un cálculo en el dominio del tiempo. Sin embargo, se opta por simplificar el procedimiento realizando un análisis estático equivalente en el que se introduce un Factor de Amplificación Dinámico (DAF) que simula la amplificación que sufren los efectos de las cargas al acercarse su frecuencia de excitación a la frecuencia de resonancia del sistema.

$$DAF = \frac{1}{\sqrt{\left(1 - \left(\frac{f}{f_o}\right)^2\right)^2 + \left(2\xi \frac{f}{f_o}\right)^2}} \quad \text{Ecuación M-6}$$

Siendo:

- $f$ : la frecuencia de excitación de la carga.
- $f_o$ : la frecuencia natural de sistema.
- $\xi$ : factor de amortiguamiento. En este tipo de elementos estructurales se suele adoptar un factor de amortiguamiento del 2%.



Las cargas variables que se consideran son las debidas al viento y al oleaje. La primera de ella presenta una frecuencia de excitación muy baja; es decir, sus fluctuaciones se producen en periodos de tiempo muy superiores al periodo de la estructura. Por este motivo, únicamente se considerará el Factor de Amplificación Dinámica (DAF) ya descrito a las sollicitaciones propias del oleaje.

### 2.2.1.7. Interacción suelo-estructura

La interacción suelo estructura se trata de uno de los fenómenos más complejos de analizar de los sistemas estructurales. Un análisis riguroso implica el cálculo computacional por medio del Método de los Elementos Finitos o el Método de los Elementos de Contorno. No obstante, numerosos trabajos científicos han desarrollado diferentes expresiones explícitas que permiten describir, de manera aproximada, el comportamiento de un pilote enterrado. En este proyecto se emplean las fórmulas enunciadas por Shadow y Battacharya [10] para el caso de pilotes flexibles en suelos no homogéneos con perfil parabólico.

La rigidez que presenta un pilote en cabeza puede reducirse, en cada uno de los dos planos longitudinales, a una rigidez lateral ( $K_L$ ), una rigidez de giro ( $K_G$ ) y una rigidez cruzada ( $K_{LG}$ ) que vincula ambos grados de libertad. A continuación, se muestran las expresiones que las definen:

$$K_L = \frac{1,02 \cdot E_{SO} \cdot D_P}{f(\nu_S)} \cdot \left(\frac{E_{eq}}{E_{SO}}\right)^{0,27} \quad \text{Ecuación M-7}$$

$$K_G = \frac{0,17 \cdot E_{SO} \cdot D_P^3}{f(\nu_S)} \cdot \left(\frac{E_{eq}}{E_{SO}}\right)^{0,76} \quad \text{Ecuación M-8}$$

$$K_{LG} = -\frac{0,29 \cdot E_{SO} \cdot D_P^2}{f(\nu_S)} \cdot \left(\frac{E_{eq}}{E_{SO}}\right)^{0,52} \quad \text{Ecuación M-9}$$

Siendo:

- $D_P$ : El diámetro del pilote.
- $E_{SO}$ : El módulo de elasticidad del suelo.
- $E_{eq}$ : El módulo de elasticidad equivalente del pilote:

$$E_{eq} = \frac{E_P \cdot I_P}{\frac{D_P^4 \cdot \pi}{64}} \quad \text{Ecuación M-10}$$

- $E_P$ : El módulo de elasticidad del pilote.
- $I_P$ : El momento de inercia del pilote.
- $\nu_S$ : El coeficiente de Poisson del suelo.

- $f(v_S)$ : Factor dependiente el coeficiente de Poisson:

$$f(v_S) = 1 + |v_S - 0,25| \quad \text{Ecuación M-11}$$

Por último, indicar que en el caso de la rigidez axial del pilote se considera que es infinitamente rígida, ya que suelen presentar magnitudes muy superiores a las anteriores.

## 2.2.2. Estados de carga

### 2.2.2.1. Hipótesis de carga

En las normas que sirven de guía para el cálculo estructural de los aerogeneradores marinos se describen numerosas hipótesis de carga que deben ser comprobadas. En cambio, se observa que no todas ellas presentan la misma relevancia para el análisis de la cimentación. En el trabajo de L. Arany y otros [11], se describen las cinco hipótesis de carga que se identifican como las más relevantes:

- E-1: Condiciones de operación normal:** Considera un escenario de viento a la velocidad nominal con turbulencia normal (U-1) y el estado extremo del mar previsto en 1 año (W-1). Ambos estados de carga actúan alineados.
- E-2: Escenario de carga extrema por oleaje:** Considera un escenario de viento a la velocidad nominal con turbulencia extrema (U-2) y la ola extrema prevista en 50 años (W-4). Ambos estados de carga actúan alineados.
- E-3: Escenario de carga extrema por viento:** Considera un escenario de viento a la velocidad nominal con la máxima ráfaga de viento prevista en 50 años (U-3) y la ola extrema prevista en 1 año (W-2). Ambos estados de carga actúan alineados.
- E-4: Escenario de velocidad de corte del viento y ráfaga extrema de operación:** Considera un escenario de viento a la velocidad de corte con la máxima ráfaga de viento prevista en 50 años (U-4) y la ola extrema prevista en 50 años (W-4). Ambos estados de carga actúan alineados.
- E-5: Escenario de viento y oleaje desalineados:** Considera un escenario de viento a la velocidad nominal con turbulencia extrema (U-2) y la ola extrema prevista en 50 años (W-4). Ambos estados de carga actúan desalineados 90°.

Todas las hipótesis de carga se complementan incorporando las cargas permanentes presentes en el sistema y la acción de las corrientes marina, evaluada en todas ellas en su estado máximo registrado.

A continuación, se enumeran los estados de carga provenientes del viento y del oleaje que se incorporan en las hipótesis de carga:



- U-1: NTM a  $U_R$ :** Escenario de viento a la velocidad nominal con turbulencia normal.
- U-2: ETM a  $U_R$ :** Escenario de viento a la velocidad nominal con turbulencia extrema.
- U-3: EOG a  $U_R$ :** Escenario de viento a la velocidad nominal con la máxima ráfaga de viento prevista en 50 años. La ráfaga es lo suficientemente rápida como para permitir que actúe el control del ángulo de palas.
- U-4: EOG a  $U_{out}$ :** Escenario de viento a la velocidad de corte con la máxima ráfaga de viento prevista en 50 años. La ráfaga es lo suficientemente rápida como para permitir que actúe el control del ángulo de palas.
- W-1: 1-año ESS:** Se considera una ola con la altura de la máxima altura significativa prevista en 1 año.
- W-2: 1-año EWH:** Se considera la máxima ola prevista en 1 año.
- W-3: 50-años ESS:** Se considera una ola con la altura de la máxima altura significativa prevista en 50 años.
- W-4: 50-año EWH:** Se considera la máxima ola prevista en 50 años.

A modo de resumen se incluye una tabla que recoge los distintos escenarios:

Tabla M-6: Hipótesis de carga.

Hipótesis	Modelo de viento	Modelo de oleaje	Alineación
E-1	U-1	W-1	Alineados
E-2	U-2	W-4	Alineados
E-3	U-3	W-2	Alineados
E-4	U-4	W-4	Alineados
E-5	U-2	W-4	Desalineados 90°

#### 2.2.2.2. Cargas permanentes

Las cargas permanentes hacen referencia a aquellas solicitaciones que actúan constantemente sobre la estructura una vez ha finalizado el proceso de instalación.

##### 2.2.2.2.1. Peso propio

El peso propio de la estructura incluye la carga vertical de todos los elementos con masa del sistema. En el caso particular de un aerogenerador marino, prácticamente toda la masa presente se encuentra agrupada en los distintos elementos estructurales y en el conjunto góndola-rotor.

Dichos elementos son:

- Conjunto góndola-rotor.

- Torre del aerogenerador.
- Plataforma del jacket.
- Elementos de la estructura jacket.

Los tres primeros casos se evalúan como cargas puntuales en función de su masa:

$$\vec{P} = M \cdot g \cdot \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ -1 \end{bmatrix} \quad \text{Ecuación M-12}$$

Siendo:

- $M$ : La masa del elemento.
- $g$ : La gravedad en la Tierra, que se toma el valor de 9,80665 m/s<sup>2</sup>.

Por otro lado, en el caso de los elementos de la estructura jacket, se considera como una carga distribuída de valor constante:

$$\vec{p} = A \cdot \rho \cdot g \cdot \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ -1 \end{bmatrix} \quad \text{Ecuación M-13}$$

Siendo:

- $A$ : El área de la sección.
- $\rho$ : la densidad del material del que está compuesto.

#### 2.2.2.2.2. Presión hidrostática

Todo cuerpo sumergido en un fluido se encuentra bajo la acción de la presión hidrostática, que actúa en la dirección normal a toda la superficie en contacto con el fluido. Dicha sollicitación presenta dos efectos a diferente escala dentro del análisis estructural:

1. Presencia de tensiones normales en las direcciones perpendiculares al eje de la barra.
2. Fuerza resultante que actúa sobre la barra.

El primero de estos efectos no influye en las cargas globales que presenta el sistema. Sin embargo, el segundo produce las siguientes sollicitaciones:

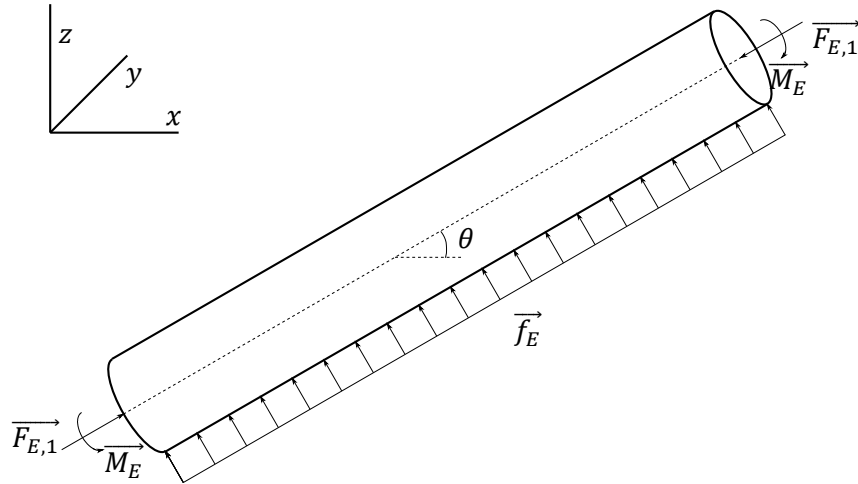


Figura M-9: Cargas resultantes de la presión hidrostática.

Las expresiones de dichas cargas son:

$$\vec{f}_E = A_d \cdot \rho_{agua} \cdot g \cdot \begin{bmatrix} -\cos(\theta) \operatorname{sen}(\theta) \\ 0 \\ \cos^2(\theta) \end{bmatrix} \quad \text{Ecuación M-14}$$

$$\vec{F}_E = A_d \cdot (h_a - z) \cdot \rho_{agua} \cdot g \cdot \begin{bmatrix} \cos(\theta) \\ 0 \\ \operatorname{sen}(\theta) \end{bmatrix} \quad \text{Ecuación M-15}$$

$$\vec{M}_E = I_d \cdot \rho_{agua} \cdot g \cdot \begin{bmatrix} 0 \\ \cos(\theta) \\ 0 \end{bmatrix} \quad \text{Ecuación M-16}$$

Siendo:

- $A_d$ : El área de agua desplazada por la sección.
- $I_d$ : El momento de inercia de agua desplazada por la sección.
- $\rho_{agua}$ : La densidad del agua.
- $g$ : La gravedad en la Tierra, que se toma el valor de  $9,80665 \text{ m/s}^2$ .
- $\theta$ : El ángulo que forma la barra con la horizontal.
- $h_a$ : La profundidad de la lámina de agua.
- $z$ : La altura a la que se encuentra la sección medida desde la línea de barro.

### 2.2.2.3. Cargas variables

Las cargas variables incluyen aquellas solicitaciones que actúan de forma intermitente a lo largo de la vida de la estructura. Suelen estar vinculadas al uso que se le da a la misma y a las acciones climáticas. En este caso en particular destaca principalmente este segundo grupo.

### 2.2.2.3.1. Acción del viento

#### 2.2.2.3.1.1. Cargas

Las cargas producidas por la acción del viento están ligadas a la fuerza de arrastre que sufren los cuerpos que se encuentran en la trayectoria de una corriente de aire. Dicha fuerza la experimentan todos los cuerpos expuestos; no obstante, el rotor sufre una consideración especial.

De acuerdo a como se indica en el trabajo de L. Arany y otros [11], la fuerza que actúa en el rotor se puede simplificar a:

$$T_h = \frac{1}{2} C_T \cdot \rho_{aire} \cdot A_R \cdot U^2 \quad \text{Ecuación M-17}$$

Siendo:

- $C_T$ : El coeficiente de arrastre.

$$C_T = \begin{cases} \frac{3,5(2U+3,5)}{U^2} & U \leq U_R \\ \frac{3,5U_R(2U_R+3,5)}{U^3} & U_R < U \leq U_{out} \end{cases} ; \text{ tal que } C_T \leq 1 \quad \text{Ecuación M-18}$$

- $\rho_{aire}$ : La densidad del aire.
- $A_R$ : El área que barre el rotor.
- $U$ : La velocidad del aire en el eje de rotación.
- $U_R$ : La velocidad nominal del aerogenerador.
- $U_{out}$ : La velocidad de corte del aerogenerador.

Por otro lado, la fuerza de arrastre introducida para los elementos tubulares, tanto la torre del aerogenerador como los elementos del jacket que quedan por encima de la superficie del agua, se evalúa de acuerdo a la DNVGL-RP-C205 [12]. Dicha carga distribuida a lo largo del elemento se evalúa como:

$$f_T = \frac{1}{2} C \cdot \rho_{aire} \cdot S \cdot \text{sen}(\alpha) \cdot U(z)^2 \quad \text{Ecuación M-19}$$

Donde:

- $C$ : El coeficiente de forma.

$$C = \begin{cases} 0,65 & \text{si } \Delta \leq 10^{-4} \\ (29 + 4 \log(\Delta))/20 & \text{si } 10^{-4} < \Delta \leq 10^{-2} \\ 1,05 & \text{si } \Delta > 10^{-2} \end{cases} \quad \text{Ecuación M-20}$$

- $\Delta = 5 \cdot 10^{-6}/D$
- $\rho_{aire}$ : densidad del aire.



- $S$ : la superficie que se opone al viento. En este caso, al tratarse de carga por unidad de longitud, equivale al diámetro ( $D$ ).
- $\alpha$ : el ángulo que forma la dirección del viento y la dirección normal a la superficie expuesta.
- $U(z)$ : velocidad del viento a la altura correspondiente.

### 2.2.2.3.1.2. Condiciones de viento

A continuación se detalla el cálculo de las condiciones de viento de las distintas hipótesis de viento, de acuerdo a la IEC 614001-1 [13] y siguiendo las indicaciones de L. Arany y otros [11].

Destacar que, para definir el estado de carga según la IEC 614001-11 [13], se debe emplear el siguiente perfil de velocidad definido a partir de la velocidad medida a una cierta altura de referencia:

$$U(z) = U(h_{referencia}) \left( \frac{z}{h_{referencia}} \right)^{0,2} \quad \text{Ecuación M-21}$$

#### 2.2.2.3.1.2.1. NTM a $U_r$ (U-1)

En primer lugar, determina la desviación estándar del viento en el modelo de turbulencia normal:

$$\sigma_{U,NTM} = I_{ref}(0,75U(\text{m/s}) + 5,6) \quad \text{Ecuación M-22}$$

Donde  $I_{ref}$  toma el valor de 0,16 para las características de las turbulencias más altas.

A continuación, se debe excluir de dicha variable estadística todas las turbulencias con frecuencias que puedan ser seguidas por el control del ángulo de palas. Se asume que únicamente afectan a este modelo aquellas turbulencias con frecuencia mayores que la máxima frecuencia de giro del rotor:

$$\sigma_{U,NTM,f > f_{1P,max}} = \sigma_{U,NTM} \sqrt{\frac{1}{\left( \frac{6L_K}{U_R} f_{1P,max} + 1 \right)^{\frac{2}{3}}}} \quad \text{Ecuación M-23}$$

Donde:

- $f_{1P,max}$ : La máxima frecuencia de giro del rotor.
- $-L_K = 8,1\Lambda_1$ : El parámetro escalar integral de la componente de la velocidad.
- $\Lambda_1$ : El parámetro escalar de la turbulencia, que vale 42 para alturas superiores a 60 m.



Finalmente, la velocidad de cálculo para esta hipótesis de cálculo se obtiene como:

$$U = U_R + 1,28 \sigma_{U,NTM,f>f_{1P,max}} \quad \text{Ecuación M-24}$$

### 2.2.2.3.1.2.2. ETM a $U_r$ (U-2)

Esta hipótesis de viento representa un cálculo muy similar al especificado en el apartado 2.2.2.3.1.2.1. la desviación estándar del viento en el modelo de turbulencia extrema se obtiene de:

$$\sigma_{U,NTM} = 2I_{ref} \left[ 0,072 \left( \frac{U_{avg}}{2} + 3 \right) \left( \frac{U_R}{2} - 4 \right) + 10 \right] \quad \text{Ecuación M-25}$$

Siendo  $U_{avg}$  la velocidad media del viento a la altura del eje del rotor.

Del mismo modo, se excluyen las turbulencias con frecuencias menores que las que puede asumir el control del ángulo de palas.

$$\sigma_{U,ETM,f>f_{1P,max}} = \sigma_{U,ETM} \sqrt{\frac{1}{\left( \frac{6L_K}{U_R} f_{1P,max} + 1 \right)^{\frac{2}{3}}}} \quad \text{Ecuación M-26}$$

Por último, la velocidad de cálculo sería:

$$U = U_R + 2 \sigma_{U,ETM,f>f_{1P,max}} \quad \text{Ecuación M-27}$$

### 2.2.2.3.1.2.3. EOG a $U_r$ (U-3)

Inicialmente, se calcula la máxima velocidad media en un periodo de 10 minutos que se espera que ocurra en 1 año:

$$U_{10,1-año} = 0,8 \lambda \left[ -\ln \left( 1 - 0,98^{\frac{1}{52596}} \right) \right]^{\frac{1}{k}} \quad \text{Ecuación M-28}$$

Donde  $\lambda$  es el parámetro de escala de la distribución de Weibull que describe el viento en la zona y  $k$  su parámetro de forma.

A continuación, se obtiene la desviación estándar característica de la velocidad del viento:

$$\sigma_{U,c} = 0,11 U_{10,1-año} \quad \text{Ecuación M-29}$$

De este modo, el incremento de velocidad de cálculo que se debe considerar, debido a la ráfaga de viento a la que no se puede ajustar el control de ángulo de palas, sería:



$$u_{EOG} = \min \left\{ 1,35(U_{10,1-año} - U_R); \frac{3,3 \sigma_{U,c}}{1 + \frac{0,1 D}{\Lambda_1}} \right\} \quad \text{Ecuación M-30}$$

Siendo la velocidad de cálculo:

$$U = U_R + u_{EOG} \quad \text{Ecuación M-31}$$

#### 2.2.2.3.1.2.4. EOG a $U_{out}$ (U-4)

Esta última hipótesis de viento presenta un procedimiento idéntico al empleado en el apartado 2.2.2.3.1.2.3, con la salvedad de que se emplea la velocidad de corte del aerogenerador en lugar de la velocidad nominal.

### 2.2.2.3.2. Acción del mar

#### 2.2.2.3.2.1. Cargas

Las cargas debidas a la acción del mar a las que se ve sometido un cuerpo sumergido están vinculadas a las fuerzas de arrastre debidas al movimiento del fluido y a las fuerzas inerciales por las variaciones de dicho movimiento. Ambas cargas se evalúan de acuerdo a las indicaciones dadas por la DNVGL-RP-C205 [12].

La fuerza que recibe un elemento cilíndrico bajo la acción del mar se define como una carga distribuida variable a lo largo de la barra perpendicular a su eje. Se opta por despreciar la componente tangencial de la fuerza debido a que presenta un orden de magnitud veinte veces inferior a la componente normal. El valor que toma dicha carga distribuida normal a la barra es:

$$f_n = \rho_{agua}(1 + C_A) A \dot{v}_n + \frac{1}{2} \rho_{agua} C_D D |v_n| v_n \quad \text{Ecuación M-32}$$

Siendo:

- $\rho_{agua}$ : La densidad del agua.
- $D$ : El diámetro de la sección.
- $A$ : El área de la sección que se opone al movimiento del agua:  $A = \frac{\pi D}{4}$
- $v_n$ : La componente de la velocidad normal al eje de la barra.
- $\dot{v}_n$ : La componente de la aceleración normal al eje de la barra.
- $C_A$ : El coeficiente de masa añadida. Toma el valor de 1,6 para cilindros lisos.
- $C_D$ : El coeficiente de arrastre.

$$C_D = \begin{cases} 0,65 & \text{si } \Delta \leq 10^{-4} \\ (29 + 4 \log(\Delta))/20 & \text{si } 10^{-4} < \Delta \leq 10^{-2} \\ 1,05 & \text{si } \Delta > 10^{-2} \end{cases} \quad \text{Ecuación M-33}$$

$$- \Delta = 5 \cdot 10^{-6}/D$$

### 2.2.2.3.2.2. Condiciones del mar

Como se ha indicado en el apartado anterior, las cargas debidas a la acción del mar recibidas por un elemento cilíndrico dependen, exclusivamente, de la velocidad y la aceleración que presente el fluido en dicho punto. Dichas variables surgen por la superposición de las corrientes marinas y del oleaje. A continuación, se describe ambas situaciones, de acuerdo a la DNVGL-RP-C205 [12].

#### 2.2.2.3.2.2.1. Corrientes marina

En el caso de las corrientes marinas se considera que se encuentran en estado estacionario; es decir, el perfil de velocidad es constante en el tiempo y no presenta aceleraciones.

Para determinar el perfil de velocidades, se divide el problema en dos componentes: la velocidad propiamente derivada de las corrientes marinas y la velocidad debida a la acción del viento sobre la superficie.

$$v_c = v_{c,tide} + v_{c,wind} \quad \text{Ecuación M-34}$$

Ambas componentes se definen mediante una ley exponencial:

$$v_{c,tide} = v_{c,tide}(0) \left( \frac{z}{h_a} \right)^{\frac{1}{7}} \quad \text{para } z \geq 0 \quad \text{Ecuación M-35}$$

$$v_{c,wind} = v_{c,wind}(0) \left( \frac{z - h_a + d_o}{d_o} \right) \quad \text{para } z \geq h_a - d_o \quad \text{Ecuación M-36}$$

Donde:

- $v_{c,tide}(0)$ : El valor medido de la corriente en la superficie. Se toma el valor máximo medido en la ubicación del aerogenerador.
- $v_{c,wind}(0)$ : La velocidad de la corriente en la superficie inducida por el viento. Se aproxima como el 3% de la velocidad del viento a 10m de altura.
- $z$ : La cota medida desde la línea de barro.
- $h_a$ : La profundidad de la lámina de agua.
- $d_o$ : La profundidad de referencia para las corrientes generadas por el viento. Se toma el valor de 50m.



### 2.2.2.3.2.2.2. Oleaje

Las distintas hipótesis de oleaje que se emplean hacen referencia a dos tipos de olas en periodos de retorno de 1 año y 50 años:

- Altura de la ola significativa: se trata de la altura media del tercio de olas más altas que se registra en un periodo de 3 horas.
- Altura de la ola máxima: se trata de la altura de la ola más alta registrada en el mismo periodo de 3 horas.

En ambos casos, se emplea el mismo procedimiento para obtener el perfil de velocidades y aceleraciones, utilizando en cada caso la altura de la ola en cuestión. Para definir el oleaje se emplea la teoría de ondas de Airy para una profundidad de la lámina de agua cualquiera.

En primer lugar, se debe establecer las variables propias de propagación de ondas que identifica el estado que se analiza. De acuerdo con la DNVGL-ST-0437 [8], se puede establecer un rango de confianza en el que suele encontrarse el periodo de la ola en función de su altura:

$$11,1 \sqrt{\frac{H_w}{g}} \leq T_w \leq 14,3 \sqrt{\frac{H_w}{g}} \quad \text{Ecuación M-37}$$

Debido a que un periodo menor (más ciclos por unidad de tiempo) resulta más crítico al evaluar las cargas, se emplea el límite inferior de dicho intervalo. El último parámetro por conocer se trata del número de ondas ( $k_w$ ), se obtiene resolviendo la siguiente ecuación implícita:

$$\frac{2\pi}{k_w} = T_w \sqrt{\frac{g}{k} \tanh(k_w h_a)} \quad \text{Ecuación M-38}$$

A continuación, se definen la velocidad y aceleración que presenta una partícula en función de su ubicación y del tiempo:

$$v_{w,h} = \frac{\pi H_w}{T_w} \frac{\cosh(k_w z)}{\sinh(k_w h_a)} \cos\left(k_w x - \frac{2\pi}{T} t\right) \quad \text{Ecuación M-39}$$

$$v_{w,v} = \frac{\pi H_w}{T_w} \frac{\sinh(k_w z)}{\sinh(k_w h_a)} \sin\left(k_w x - \frac{2\pi}{T} t\right) \quad \text{Ecuación M-40}$$

$$\dot{v}_{w,h} = \frac{2\pi^2 H_w}{T_w^2} \frac{\cosh(k_w z)}{\sinh(k_w h_a)} \sin\left(k_w x - \frac{2\pi}{T} t\right) \quad \text{Ecuación M-41}$$

$$\dot{v}_{w,v} = -\frac{2\pi^2 H_w}{T_w^2} \frac{\sinh(k_w z)}{\sinh(k_w h_a)} \cos\left(k_w x - \frac{2\pi}{T} t\right) \quad \text{Ecuación M-42}$$

Siendo:

- $v_{w,h}$ : La velocidad horizontal de la partícula.

- $v_{w,v}$ : La velocidad vertical de la partícula.
- $\dot{v}_{w,h}$ : La aceleración horizontal de la partícula.
- $\dot{v}_{w,v}$ : La aceleración vertical de la partícula.
- $z$ : La cota medida desde la línea de barro.
- $x$ : la distancia, medida en la horizontal, que separa el punto donde se desea conocer la variable y un lugar de referencia.
- $t$ : el instante de tiempo.

Debido a que este estado de cargas depende del tiempo, se debe evaluar en distintos instantes para poder recoger las condiciones más desfavorables para las distintas hipótesis.

### 2.2.3. Criterios de fallo

La viabilidad de una estructura se analiza mediante una serie de criterios que verifican si son aptas para su implantación en obra. Dichos criterios se agrupan en función del objetivo que persigan:

- **Estados Límite Últimos (ELU)**: Establecen los requisitos para asegurar que la estructura sea capaz de soportar las cargas a las que se somete sin que se produzca el colapso total o parcial de la misma.
- **Estados Límite de Servicio (ELS)**: Establecen los requisitos que debe alcanzar la estructura para garantizar el correcto funcionamiento del sistema.
- **Estados Límite de Fatiga (ELF)**: Establecen los requisitos que debe presentar la estructura para evitar el fallo debido al daño acumulado producido por cargas cíclicas.

#### 2.2.3.1. Estado de tensiones

Para evaluar muchos de los criterios de fallo, se requiere conocer el estado de tensiones presente en la sección. En el caso particular de elementos tipo barra de pared delgada sometidos a los esfuerzos propios del modelo unidimensional de barras y a la presión hidrostática, las tensiones que aparecen son:

- Tensión normal en la dirección de la barra ( $\sigma_x$ ).
- Tensión tangencial en el plano normal al eje de la barra ( $\tau$ ).
- Tensión normal en la dirección radial de la sección ( $\sigma_r$ ).
- Tensión normal en la dirección tangencial a la sección ( $\sigma_h$ ).

A continuación, se establece cómo se determina cada una de ellas en función de los esfuerzos de la sección y de la presión hidrostática.



### 2.2.3.1.1. Tensión normal en la dirección de la barra ( $\sigma_x$ ).

Esta tensión depende del axil y del momento flector al que se encuentre sometida la sección.

Se evalúa de la siguiente manera:

$$\sigma_x = \frac{N}{A} + \frac{M_y}{I_y} \operatorname{sen}(\theta) - \frac{M_z}{I_z} \operatorname{cos}(\theta) \quad \text{Ecuación M-43}$$

Siendo:

- $N$ : El esfuerzo axil.
- $M_y$ : El momento flector con respecto al eje  $y$  de la sección.
- $M_z$ : El momento flector con respecto al eje  $z$  de la sección.
- $A$ : El área de la sección.
- $I_y$ : El momento de inercia de la sección con respecto al eje  $y$ .
- $I_z$ : El momento de inercia de la sección con respecto al eje  $z$ .
- $\theta$ : El ángulo que presenta el punto que se evalúa con respecto al semieje  $y$  positivo.

### 2.2.3.1.2. Tensión tangencial en el plano normal al eje de la barra ( $\tau$ ).

Esta tensión depende del cortante y del momento torsor al que se encuentre sometida la sección. Se evalúa de la siguiente manera:

$$\tau = -\frac{2 V_y}{A} \operatorname{sen}(\theta) + \frac{2 V_z}{A} \operatorname{cos}(\theta) + \frac{M_x}{J_o} \quad \text{Ecuación M-44}$$

Siendo:

- $V_y$ : El esfuerzo cortante en la dirección del eje  $y$  de la sección.
- $V_z$ : El esfuerzo cortante en la dirección del eje  $z$  de la sección.
- $M_x$ : El momento torsor de la sección.
- $A$ : El área de la sección.
- $J_o$ : El momento polar de la sección.
- $\theta$ : El ángulo que presenta el punto que se evalúa con respecto al semieje  $y$  positivo.

### 2.2.3.1.3. Tensión normal en la dirección radial de la sección ( $\sigma_r$ ).

Esta tensión surge al someter la sección a la presión hidrostática. Su cálculo se establece a partir de la fórmula extraída del libro Shigley's Mechanical Engineering Design [14], particularizada para el exterior de la sección:

$$\sigma_r = p_{out} \quad \text{Ecuación M-45}$$

Donde  $p_{out}$  representa a la presión en el exterior de la sección que se evalúa como:

$$p_{out} = (h_a - z) \rho_{agua} g \quad ; \quad \text{para } z < h_a \quad \text{Ecuación M-46}$$

#### 2.2.3.1.4. Tensión normal en la dirección tangencial a la sección ( $\sigma_h$ ).

Al igual que el caso anterior, esta tensión surge al someter la sección a la presión hidrostática, estableciéndose a partir la formulación que aparece en el libro Shigley's Mechanical Engineering Design [14], particularizada para el exterior de la sección:

$$\sigma_h = \frac{p_{out}(r_i^2 + r_{out}^2) - 2 p_{in} r_{in}^2}{r_{in}^2 - r_{out}^2} \quad \text{Ecuación M-47}$$

Siendo:

- $p_{out}$ : La presión en el exterior de la sección evaluada por medio de la Ecuación M-46.
- $p_{in}$ : La presión en el interior de la sección. Puede ser igual a  $p_{out}$  si la sección está llena de agua o 0 si no. Se asume que la sección se llena de agua, ya que facilita la instalación.
- $r_{in}$ : El radio interior de la sección.
- $r_{out}$ : El radio exterior de la sección.

#### 2.2.3.2. Estados Límite Últimos (ELU)

##### 2.2.3.2.1. Plastificación

Para garantizar la resistencia de la sección frente a los esfuerzos a los que se encuentra sometida, se considera el criterio de plastificación del material. Debido a que existe un estado de tensiones complejo, se opta por emplear el criterio de tensión equivalente de Von Mises, ya que se trata del más empleado para materiales metálicos. Aplicado al estado de tensiones presente sería:

$$\sigma_{eq,VM} = \sqrt{\frac{(\sigma_x - \sigma_r)^2 + (\sigma_r - \sigma_h)^2 + (\sigma_h - \sigma_x)^2 + 6 \tau^2}{2}} \quad \text{Ecuación M-48}$$

Esta tensión equivalente obtenida presenta diferentes valores a lo largo de la sección, debiendo evaluarse en los puntos más críticos de la misma. De este modo, el criterio de aplicación para evitar la plastificación es:

$$\sigma_{eq,VM} \leq \frac{f_y}{\gamma_M} \quad \text{Ecuación M-49}$$

Siendo  $f_y$  el límite elástico del material y  $\gamma_M$  el factor de seguridad del material.



### 2.2.3.2.2. Inestabilidad

Además de la resistencia de la sección, se debe analizar la estabilidad del elemento. En este caso, al tratarse de secciones tubulares de pequeño espesor, los fenómenos de inestabilidad pueden aparecer tanto a nivel global del elemento como localizadas en un punto en concreto al producirse la abolladura de la chapa. A continuación, se detallan ambos procesos de verificación según la DNVGL-RP-C202 [15].

#### 2.2.3.2.2.1. Definiciones sobre inestabilidad elástica

##### 2.2.3.2.2.1.1. Factor del material

El factor de seguridad del material frente a los efectos de inestabilidad se toma como:

$$\gamma_M = \begin{cases} 1,15 & \text{si } \bar{\lambda}_s < 0,5 \\ 0,85 + 0,6 \bar{\lambda}_s & \text{si } 0,5 \leq \bar{\lambda}_s \leq 1 \\ 1,45 & \text{si } \bar{\lambda}_s > 1 \end{cases} \quad \text{Ecuación M-50}$$

Donde  $\bar{\lambda}_s$  es la esbeltez reducida de la chapa (apartado 2.2.3.2.2.1.2).

##### 2.2.3.2.2.1.2. Esbeltez reducida de la chapa

La esbeltez reducida de la chapa se calcula mediante:

$$\bar{\lambda}_s = \sqrt{\frac{f_y}{\sigma_{eq}} \left[ \frac{\sigma_{a0}}{f_{E,a}} + \frac{\sigma_{m0}}{f_{E,m}} + \frac{\sigma_{h0}}{f_{E,h}} + \frac{\tau}{f_{E,t}} \right]} \quad \text{Ecuación M-51}$$

Donde:

- $f_y$ : El límite elástico del material.
- $\sigma_{eq}$ : La tensión equivalente de cálculo.
- $\sigma_{a0}$ : El mínimo valor entre 0 y la tensión normal correspondiente al esfuerzo axial.
- $\sigma_{m0}$ : El mínimo valor entre 0 y la tensión normal correspondiente al esfuerzo flector.
- $\sigma_{h0}$ : El mínimo valor entre 0 y la tensión normal en la dirección tangencial a la sección.
- $\tau$ : La tensión tangencial en la dirección del eje de la barra.
- $f_{E,cc}$ : La resistencia elástica a pandeo (apartado 2.2.3.2.2.1.6).

##### 2.2.3.2.2.1.3. Esbeltez reducida del elemento

La esbeltez reducida del elemento se obtiene a partir de:



$$\bar{\lambda} = \sqrt{\frac{f_{ak}}{f_E}}$$

Ecuación M-52

Siendo:

- $f_{ak}$  : La resistencia característica a pandeo reducida (apartado 2.2.3.2.2.1.7).
- $f_E$ : La resistencia a pandeo de Euler (apartado 2.2.3.2.2.1.5).

#### 2.2.3.2.2.1.4. Tensión equivalente

La tensión equivalente empleada en el cálculo correspondiente a pandeo se trata de la tensión equivalente de Von Mises omitiendo la tensión normal en la dirección radial de la sección. Se evalúa:

$$\sigma_{eq} = \sqrt{\frac{\sigma_x^2 + \sigma_h^2 + (\sigma_h - \sigma_x)^2 + 6 \tau^2}{2}}$$

Ecuación M-53

#### 2.2.3.2.2.1.5. Resistencia a pandeo de Euler

La resistencia a pandeo de Euler se evalúa mediante:

$$f_E = \frac{\pi^2 E I}{(k L)^2 A}$$

Ecuación M-54

Siendo:

- $E$ : El módulo de elasticidad del material.
- $k$ : El factor de longitud efectiva. Depende de las condiciones de apoyo en los extremos. Debido a su complejidad de cálculo, se considera que el elemento se encuentra biarticulado ( $k = 1$ ), estando del lado de la seguridad.
- $L$ : La longitud del elemento.
- $I$ : El momento de inercia de la sección.
- $A$ : El área de la sección.

#### 2.2.3.2.2.1.6. Resistencia elástica a pandeo

La resistencia elástica a pandeo varía en función del estado de carga, obteniéndose un valor para cada uno:

$$f_{E,cc} = C_{cc} \frac{\pi^2 E}{12(1 - \nu^2)} \left(\frac{t}{L}\right)^2$$

Ecuación M-55



Donde:

- $C_{cc}$ : El coeficiente de reducción de pandeo en función del estado de carga.
- $E$ : El módulo de elasticidad el material.
- $\nu$ : El coeficiente de Poisson del material.
- $t$ : El espesor de la sección.
- $L$ : La longitud del elemento.

Dicho coeficiente de reducción se evalúa mediante la siguiente expresión:

$$C_{cc} = \Psi_{cc} \sqrt{1 + \left(\frac{\rho \xi_{cc}}{\Psi_{cc}}\right)^2} \quad \text{Ecuación M-56}$$

Dependiendo de los parámetros  $\Psi$ ,  $\xi$  y  $\rho$ ; especificados para cada estado de carga. Dichos parámetros vienen especificados en la Tabla M-7:

Tabla M-7: Parámetros del coeficiente de reducción de pandeo.

<b>cc</b>	<b><math>\Psi</math></b>	<b><math>\xi</math></b>	<b><math>\rho</math></b>
<b>Axil</b>	1	$0,702 Z_L$	$0,5 \left(1 + \frac{r}{150 t}\right)^{-0,5}$
<b>Flector</b>	1	$0,702 Z_L$	$0,5 \left(1 + \frac{r}{150 t}\right)^{-0,5}$
<b>Cortante</b>	5,34	$0,856 Z_L^{3/4}$	0,6
<b>Presión hidrostática</b>	2	$1,04\sqrt{Z_L}$	0,6

Dependiendo  $\xi$  del parámetro de curvatura:

$$Z_L = \frac{L^2}{r t} \sqrt{1 - \nu^2} \quad \text{Ecuación M-57}$$

No obstante, para elementos muy esbeltos, se modifica la resistencia elástica a pandeo frente a esfuerzos cortantes y a la presión hidrostática:

$$\text{Si } \frac{L}{r} > 3,85 \sqrt{\frac{r}{t}} \quad \text{entonces: } f_{E,\tau} = 0,25 E \left(\frac{t}{r}\right)^{3/2} \quad \text{Ecuación M-58}$$

$$\text{Si } \frac{L}{r} > 2,25 \sqrt{\frac{r}{t}} \quad \text{entonces: } f_{,Eh} = 0,25 E \left(\frac{t}{r}\right)^{3/2} \quad \text{Ecuación M-59}$$

### 2.2.3.2.2.1.7. Resistencia característica a pandeo reducida

La resistencia característica a pandeo reducida se evalúa mediante la siguiente expresión:

$$f_{ak} = \frac{b + \sqrt{b^2 - 4 a c}}{2 a} \quad \text{Ecuación M-60}$$

De modo que:

- $a = 1 + \left(\frac{f_y}{f_{E,a}}\right)^2$
- $b = \left(\frac{2 f_y^2}{f_{E,a} f_{E,h}} - 1\right) \sigma_h$
- $c = \sigma_h^2 \left(1 + \left(\frac{f_y}{f_{E,h}}\right)^2\right) - f_y^2$
- $f_{E,cc}$ : La resistencia elástica a pandeo (apartado 2.2.3.2.2.1.6).
- $f_y$ : El límite elástico del material.

### 2.2.3.2.2.1.8. Resistencia característica a pandeo de la chapa

La resistencia característica a pandeo de la chapa se calcula mediante la siguiente expresión:

$$f_{ks} = \frac{f_y}{\sqrt{1 + \bar{\lambda}_s^4}} \quad \text{Ecuación M-61}$$

Siendo:

- $f_y$ : El límite elástico del material.
- $\bar{\lambda}_s$ : La esbeltez reducida de la chapa (apartado 2.2.3.2.2.1.2).

### 2.2.3.2.2.1.9. Resistencia característica a pandeo del elemento

La resistencia característica a pandeo del elemento se obtiene a partir de la resistencia a pandeo de la chapa. De este modo:

$$f_{kc} = \begin{cases} (1 - 0,28 \bar{\lambda}^2) f_{ak} & \text{si } \bar{\lambda} \leq 1,34 \\ \frac{0,9}{\bar{\lambda}^2} f_{ak} & \text{si } \bar{\lambda} > 1,34 \end{cases} \quad \text{Ecuación M-62}$$

Siendo:

- $f_{ak}$ : La resistencia característica a pandeo reducida (apartado 2.2.3.2.2.1.7).
- $\bar{\lambda}$ : La esbeltez reducida del elemento (apartado 2.2.3.2.2.1.3).



### 2.2.3.2.2.2. Criterio de estabilidad frente a pandeo local

Para verificar la estabilidad de la sección frente al fenómeno de pandeo local, se debe cumplir:

$$\sigma_{eq} \leq \frac{f_{ks}}{\gamma_M} \quad \text{Ecuación M-63}$$

Siendo:

- $\sigma_{eq}$ : La tensión equivalente (apartado 2.2.3.2.2.1.4).
- $f_{ks}$ : La resistencia característica a pandeo de la chapa (apartado 2.2.3.2.2.1.8).
- $\gamma_M$ : El factor del material (apartado 2.2.3.2.2.1.1).

### 2.2.3.2.2.3. Criterio de estabilidad frente a pandeo global

La estabilidad a pandeo frente a pandeo global del elemento se tiene que verificar únicamente en barras esbeltas que cumplan lo siguiente:

$$\left(\frac{kL}{i}\right)^2 \geq 2,5 \frac{E}{f_y} \quad \text{Ecuación M-64}$$

Donde:

- $k$ : El factor de longitud efectiva. Depende de las condiciones de apoyo en los extremos. Debido a su complejidad de cálculo, se considera que el elemento se encuentra biarticulado ( $k = 1$ ), estando del lado de la seguridad.
- $L$ : La longitud del elemento.
- $i$ : El radio de giro de la sección.
- $E$ : El módulo de elasticidad del material.
- $f_y$ : El límite elástico del material.

En el caso de que se deba verificar, la comprobación frente a pandeo global es:

$$\frac{\sigma_{a0}}{\frac{f_{kc}}{\gamma_M}} + \frac{1}{\frac{f_{ak}}{\gamma_M}} \frac{\sigma_m}{1 - \frac{\sigma_{a0}}{f_E}} \leq 1 \quad \text{Ecuación M-65}$$

Siendo:

- $f_{kc}$ : La resistencia característica a pandeo del elemento (apartado 2.2.3.2.2.1.9).
- $f_{ak}$ : La resistencia característica a pandeo reducida (apartado 2.2.3.2.2.1.7).
- $\gamma_M$ : El factor del material (apartado 2.2.3.2.2.1.1).

- $f_E$ : La resistencia a pandeo de Euler (apartado 2.2.3.2.2.1.5).
- $\sigma_{a0}$ : El mínimo valor entre 0 y la tensión normal correspondiente al esfuerzo axial.
- $\sigma_m$ : La tensión normal correspondiente al momento flector.

### 2.2.3.2.3. Capacidad del terreno

Para evaluar la capacidad de carga que el pilote puede transmitir al terreno, se emplean las expresiones de Poulos y Davis [16] para terrenos cuya resistencia se incrementa linealmente con la profundidad. Dicho análisis se realiza frente a carga lateral y flector, ya que suele ser el criterio de fallo más relevante. Debido al carácter bidimensional de este estado de cargas, mediante un cambio de ejes, se divide el problema en una situación con toda la carga lateral y su momento flector asociado y otro estado perpendicular con momento flector sin carga lateral. Para ambos casos, los criterios que se deben verificar son:

$$\frac{F_t}{F_R} \leq 1 \quad \text{Ecuación M-66}$$

$$\frac{M_t}{M_R} \leq 1 \quad \text{Ecuación M-67}$$

Donde  $F_t$  y  $M_t$  son la carga lateral y el momento flector que resiste el pilote, mientras que  $F_R$  y  $M_R$  son la carga lateral y el momento flector que resiste la cimentación.

#### 2.2.3.2.3.1. Situación de carga excéntrica

La carga lateral que resiste la cimentación viene definida mediante la siguiente expresión:

$$F_R = \frac{0,5 \rho_S g D_p L_p^3 K_p}{e + L_p} \quad \text{Ecuación M-68}$$

Siendo:

- $\rho_S$ : La densidad del terreno.
- $g$ : La gravedad en la Tierra, que se toma el valor de 9,80665 m/s<sup>2</sup>.
- $D_p$ : El diámetro del pilote.
- $L_p$ : La longitud del pilote.
- $e = \frac{M_t}{F_t}$ : La excentricidad de la carga
- $K_p = \frac{1+\text{sen}(\phi)}{1-\text{sen}(\phi)}$
- $\phi$ : El ángulo de fricción interno del terreno.



Por otro lado, el flector que resiste en cabeza se obtiene a partir de:

$$M_R = F_R \left( e + \frac{2}{3} \sqrt{\frac{2}{3} \frac{F_R}{D_p K_p \rho_S g}} \right) \quad \text{Ecuación M-69}$$

#### 2.2.3.2.3.2. Situación de flector sin carga

En el caso de que únicamente exista momento flector en cabeza, sin carga lateral, su capacidad resistente se evalúa de la siguiente manera:

$$M_R = 0,5 \rho_S g D_p L_p^3 K_p \quad \text{Ecuación M-70}$$

### 2.2.3.3. Estados Límite de Servicio (ELS)

#### 2.2.3.3.1. Deformación

Para garantizar el correcto funcionamiento del aerogenerador se debe rigidizar su base, de modo que el eje del dispositivo no se desvíe de la vertical. De acuerdo con la DNVGL-ST-0126 [7], dicho criterio se fija de modo que el giro en la base del aerogenerador sea menor a  $0,25^\circ$ .

$$\theta_b \leq 0,25^\circ \quad \text{Ecuación M-71}$$

#### 2.2.3.3.2. Resonancia

El funcionamiento de un aerogenerador introduce, inevitablemente, cargas cíclicas en el sistema que pueden producir fenómenos de resonancia. Dichas cargas cíclicas están vinculadas a dos fenómenos:

- Fuerzas inerciales debidas a un desequilibrio en el rotor. Esta carga está asociada a la frecuencia de giro del rotor.
- Efecto sombra del paso de palas. Este ciclo de carga se produce debido a que cuando la pala del aerogenerador pasa por delante de la torre reduce la carga de viento que ésta recibe. Por este motivo, está asociada a una frecuencia el triple de la de giro del rotor, para la tipología generalizada de aerogeneradores de tres palas.

Debido a que ambos estados de carga se producen siempre en frecuencias conocidas y acotadas, en la DNVGL-ST-0126 [7] se establece que la frecuencia natural del sistema no puede encontrarse dentro del rango de frecuencias de giro del rotor (1P) y del de paso de palas (3P). Esto conlleva que la frecuencia natural del sistema ubicarse en el siguiente intervalo:

$$\frac{f_{1P,max}}{0,95} \leq f_n \leq \frac{f_{3P,min}}{1.05}$$

Ecuación M-72

A continuación, se detallan las consideraciones tomadas para el cálculo de la frecuencia natural del sistema:

- El procedimiento de cálculo seguido resuelve el problema de autovalores a partir de las matrices de rigidez y de masa del sistema.
- Debido a la geometría variable que muestra la torre del aerogenerador, se opta por discretizarla en suficientes elementos de sección constante de modo que el comportamiento global sea equivalente.
- La masa que presentan la góndola, el rotor y la plataforma se incorporan como masas puntuales en los nodos donde se encuentren.
- Para tener en cuenta los efectos que produce la interacción agua-estructura en la frecuencia natural del sistema, se considera una masa añadida en la oscilación traslacional en el plano perpendicular al eje de la barra. De este modo, se suma a la masa de la sección la masa de agua que se encuentra dentro de la misma, así como otro sumando que agrupa la interacción con el agua exterior, tal y como indica la DNVGL-RP-C205 [12].

$$m_a = C_A \rho_{agua} \frac{\pi D^2}{4}$$

Ecuación M-73

Donde  $C_A$  representa el coeficiente de masa añadida, que se toma igual a 1.

- Dada la complejidad del análisis de la interacción suelo-estructura, se obviará el carácter dinámico de la misma. Se toma la impedancia estática de los pilotes descrita en el apartado 2.2.1.7 para el cálculo de la frecuencia natural.

#### 2.2.3.4. Estados Límite de Fatiga (ELF)

##### 2.2.3.4.1. Número de ciclos de carga

Para evaluar la resistencia a fatiga de la estructura se emplea el criterio del número de ciclos de carga, mediante el cual se evalúa el número de ciclos que resiste la estructura ( $N_R$ ) bajo las hipótesis de carga propuestas y el número de ciclos que se prevé que reciba ( $N_{oleaje}$ ), siendo principalmente debidos al oleaje.

$$N_{oleaje} \leq N_R$$

Ecuación M-74



### 2.2.3.4.1.1. Ciclos de carga que resiste

Para evaluar el número de ciclos de carga que resiste la estructura se emplea el modelo de curvas S-N propuesto en la DNVGL-RP-C203 [17]. Dicho límite se obtiene mediante la siguiente expresión:

$$\log N_R = \log \bar{a} - m \log \left( \Delta\sigma \left( \frac{t}{t_{ref}} \right)^k \right) \quad \text{Ecuación M-75}$$

Siendo:

- $\Delta\sigma$ : La tensión equivalente de Von Mises (Ecuación M-48) de la tensión alterna. Se entiende como tensión alterna la mitad de la máxima diferencia de tensiones que presenta la sección a lo largo del tiempo dentro de un mismo estado de cargas.
- $t_{ref}$ : El espesor de referencia. Toma el valor de 16 mm en las uniones soldadas y de 25 mm en el resto de la barra.
- $t$ : El valor máximo entre el espesor de la sección y el espesor de referencia ( $t_{ref}$ ).
- $k$ : El exponente de espesor. Toma el valor de 0,1 en las uniones soldadas y de 0 en el resto de la barra.
- $m$ : La pendiente de la curva S-N. Sus valores aparecen en la Tabla M-8.
- $\log \bar{a}$ : Intersección de la curva S-N con el eje N. Sus valores aparecen en la Tabla M-8.

Tabla M-8: Parámetros de la curva S-N.

	Barra		Uniones	
	$N_R \leq 10^6$	$N_R > 10^6$	$N_R \leq 10^7$	$N_R > 10^7$
<b><i>m</i></b>	4	5	3	5
<b><math>\log \bar{a}</math></b>	14,917	17,146	12,18	16,13

### 2.2.3.4.1.2. Ciclos de carga que recibe

Evaluar el número de ciclos que se prevé que reciba la estructura se trata de un problema de gran complejidad; ya que se encuentra sujeto a una gran incertidumbre debido a la variabilidad de las condiciones ambientales.

Debido a que, para cada hipótesis, la única carga variable en el tiempo es la debida al oleaje; se realiza una estimación de cuantos ciclos de carga recibiría la estructura con respecto a cada hipótesis. De este modo:



$$N_{oleaje} = f \cdot \frac{50 \frac{\text{años}}{\text{vida útil}} \cdot 365 \frac{\text{día}}{\text{año}} \cdot 24 \frac{\text{horas}}{\text{día}} \cdot 3600 \frac{\text{s}}{\text{hora}}}{T_{oleaje}}$$

Ecuación M-76

Donde  $T_{oleaje}$  representa el periodo de la ola recogida en la hipótesis de carga y  $f$  un factor de frecuencia que indica la probabilidad de que el mar se encuentre en un estado en el que la ola significativa sea igual o mayor al de cálculo.

$$f = 1 - \sqrt[2920]{P}$$

Ecuación M-77

Siendo  $P$  el cuantil empleado para estimar la altura de la máxima ola significativa según la DNVGL-ST-0437 [8]. Toma el valor de 0,8 para un periodo de retorno de 1 año y de 0,98 para un periodo de retorno de 50 años.

#### 2.2.4. Procedimiento de diseño

En esta sección se explica el procedimiento que se ha seguido para alcanzar la solución óptima del diseño de la estructura jacket. Todo ello de acuerdo a los criterios de diseño detallados en el apartado 2.2.

##### 2.2.4.1. Predimensionado del aerogenerador

Debido a la falta de información disponible acerca de la geometría de aerogeneradores comerciales, se opta por realizar un predimensionado de la torre del aerogenerador para disponer de aquellos parámetros necesarios para el cálculo. El diseño estructural de dicho dispositivo no se incluye en el ámbito de este proyecto, por lo que la geometría obtenida no puede ser considerada como válida frente a todas las comprobaciones que se requieren en los mismo.

El predimensionado de la torre se lleva a cabo mediante los criterios de Estados Límite últimos detallados en el apartado 2.2.3.2.

##### 2.2.4.2. Dimensionado

El procedimiento de diseño empleado parte de una geometría de la estructura jacket ya definida. Los parámetros que deben estar prefijados son los siguientes:

- Altura de la subestructura.
- Número de soportes principales.
- Separación entre los soportes principales en la plataforma y en la base.
- Número de niveles de arriostramientos.
- Arriostramientos de altura o de inclinación constante.



- Existencia de arriostramientos horizontales.

A partir de la geometría definida, se comienza un proceso de dimensionado en el que se obtiene el diámetro y espesor de cada una de las secciones presentes en la estructura; así como la longitud de los pilotes. En todo el proceso, se trata de alcanzar una solución que minimice la masa total de la estructura; o lo que es lo mismo, el coste de la misma.

A continuación, se indican las distintas etapas que presenta el programa:

1. Se establecen unos valores para los diámetros, espesores y longitud de pilotes claramente sobredimensionados.
2. Se calcula la frecuencia natural del sistema.
3. Se evalúan las cargas acordes para la geometría actual.
4. Se resuelven los sistemas de ecuaciones relativos a cada hipótesis de carga. Obteniéndose:
  - 4.1. Desplazamientos.
  - 4.2. Esfuerzos.
  - 4.3. Cargas en la cimentación.
5. Se evalúa el giro de la base del aerogenerador. Si es mayor que el permitido se sobredimensiona la estructura de manera proporcional (más rígida).
6. Se dimensionan las secciones para el estado de carga actual. El proceso se subdivide en:
  - 6.1. Se realizan las comprobaciones ELU, mayoradas por el sobredimensionamiento en función del giro.
  - 6.2. Se realizan las comprobaciones ELF, mayoradas por el sobredimensionamiento en función del giro.
  - 6.3. Se incrementa o reduce el diámetro de manera proporcional a la comprobación más desfavorable en cada sección.
  - 6.4. Se ajusta el espesor de la sección para que sea Tipo III.
  - 6.5. Se repite el proceso hasta que las comprobaciones más desfavorables cumplan con una eficiencia entre el 95% y el 100%.
7. Se dimensiona la longitud de los pilotes para el estado de carga actual. El proceso se subdivide en:
  - 7.1. Se realizan las comprobaciones ELU relativas a la capacidad del terreno.
  - 7.2. Se incrementa o reduce la longitud del pilote de manera proporcional a la comprobación más desfavorable.

- 7.3. Se repite el proceso hasta que las comprobaciones más desfavorables cumplan con una eficiencia entre el 95% y el 100%.
8. Se repiten las etapas desde la 2 a la 7 hasta que no se realice ninguna modificación de las secciones o la longitud del pilote.
9. Se emite un informe de los resultados del dimensionado. Destacar que no se dimensiona frente al criterio de fallo de resonancia (ELS), por lo que el diseño final puede no cumplir dicha comprobación.

En la Figura M-10 se muestra el diagrama de flujo del código.

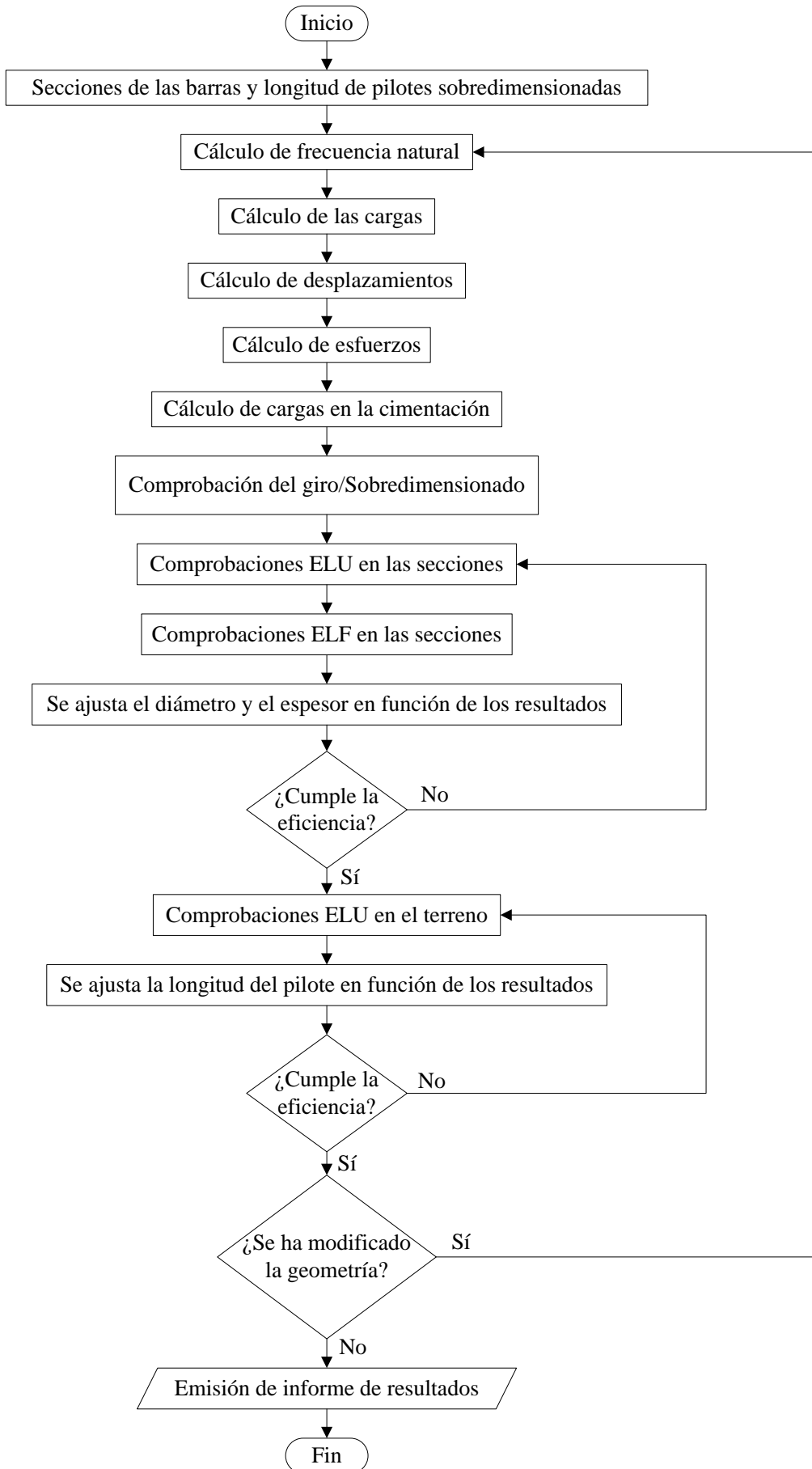


Figura M-10: Diagrama de flujo.

### **2.2.4.3. Optimización**

Debido al elevado número de variables presentes en el diseño de la estructura jacket; la búsqueda de la solución óptima exige el uso de algoritmos complejos, como pueden ser los algoritmos genéticos. Por este motivo, el código desarrollado únicamente dimensiona las secciones de las barras y la longitud de los pilotes. No obstante, el elevado precio de las estructuras requiere de procesos de optimización que minimicen la inversión necesaria.

Para identificar el diseño óptimo, se opta por variar metódicamente todas las variables predefinidas para el dimensionado. Dentro de la gran variedad de soluciones alcanzadas, se establece como óptima aquella que presente menos masa total y cumpla todas las comprobaciones.

Finalmente, una vez alcanzado el diseño óptimo, se sustituyen las secciones obtenidas por aquellas normalizadas según la norma UNE-EN-10210-2 [18], siempre que sea posible; y se verifica que continúa cumpliendo las distintas comprobaciones.

## **2.3. Diseño propuesto**

En este apartado se realiza una descripción de los distintos datos de partida que se requieren para el dimensionado de la estructura jacket, así como del diseño final propuesto.

### **2.3.1. Datos de partida**

#### **2.3.1.1. Emplazamiento**

Toda la información relativa a la selección del emplazamiento y sus condiciones se encuentra detallada en el Anexo I: Estudio del emplazamiento. En este apartado únicamente se incluye el contenido necesario para el desarrollo del proyecto.

##### **2.3.1.1.1. Ubicación**

La ubicación seleccionada para el aerogenerador marino se encuentra al sureste de la costa del municipio de San Bartolomé de Tirajana en la isla de Gran Canaria, España. Según el Estudio Estratégico Ambiental del litoral español para la instalación de parques eólicos marinos [1], este lugar se identifica como *zona con condicionantes*; por lo que se requiere un mayor análisis de los efectos o conflictos que puedan surgir debido al proyecto.

A continuación, se detalla la información de la ubicación:



Tabla M-9: Ubicación seleccionada.

<b>Ubicación del aerogenerador marino</b>	
<b>Latitud</b>	27° 45' 08,55" N
<b>Longitud</b>	15° 28' 34,55" O
<b>Profundidad de la lámina de agua</b>	49 metros
<b>Distancia a la costa</b>	4.314 metros

### 2.3.1.1.2. Condiciones de viento

Las condiciones de viento identificadas en la ubicación seleccionada se muestran a continuación:

Tabla M-10: Características del viento en la ubicación seleccionada.

<b>Características del viento</b>	
<b>Velocidad media del viento</b>	7,629 m/s
<b>Cota de medida</b>	10 m
<b>Exponente del perfil de viento (<math>\alpha</math>)</b>	0,12
<b>Parámetro de forma de la distribución de Weibull (<math>k</math>)</b>	1,853
<b>Densidad del aire</b>	1,226 kg/m <sup>3</sup>

### 2.3.1.1.3. Condiciones de oleaje

Las condiciones relativas al oleaje atribuidas a la ubicación seleccionada se muestran a continuación:

Tabla M-11: Características del oleaje en la ubicación seleccionada.

<b>Características del oleaje</b>	
<b><math>H_{S,1}</math></b>	2,859 m
<b><math>H_{M,1}</math></b>	5,744 m
<b><math>H_{S,50}</math></b>	3,340 m
<b><math>H_{M,50}</math></b>	6,680 m
<b>Densidad del agua</b>	1.024,7 kg/m <sup>3</sup>

#### 2.3.1.1.4. Nivel del mar

El máximo nivel del mar alcanzado en la zona desde que se realiza un registro (1992), asciende hasta los 3,19 metros de altura.

#### 2.3.1.1.5. Corrientes marinas

La máxima velocidad de la corriente registrada asciende hasta 1,105 metros/segundo en la superficie. Su dirección presentaba un ángulo de 116° con respecto al norte geográfico.

#### 2.3.1.1.6. Caracterización geotécnica

Las propiedades estimadas del terreno sobre el que se desea cimentar el aerogenerador se muestran a continuación:

Tabla M-12: Características del terreno en la ubicación seleccionada.

Características del terreno	
Módulo de elasticidad ( $E_S$ )	217,72 MPa
Módulo de Poisson ( $\nu_S$ )	0,35
Ángulo de fricción interna ( $\phi$ )	0,35
Densidad ( $\rho$ )	2.039,43 kg/m <sup>3</sup>

### 2.3.1.2. Aerogenerador

#### 2.3.1.2.1. Datos del aerogenerador

De acuerdo con el Anexo II: Selección del aerogenerador, el modelo para el que se diseña la estructura jacket se trata del modelo 6.3M152 de la marca Senvion (Alemania). Sus principales características son:

Tabla M-13: Características del aerogenerador seleccionado.

Fabricante	Senvion (Alemania)
Nombre	6.3M152
P	6.300 kW
Nº palas	3
D	152 m
A <sub>barrido</sub>	18.146 m <sup>2</sup>
H <sub>gondola</sub>	124 m



$V_{\text{acoplamiento}}$	3,5 m/s
$V_{\text{nominal}}$	12 m/s
$V_{\text{desconexión}}$	30 m/s
$f_{\text{rotor,min}}$	6,40 $\text{min}^{-1}$
$f_{\text{rotor,max}}$	10,11 $\text{min}^{-1}$
$M_{\text{rotor}}$	156 t
$M_{\text{gondola}}$	350 t

### 2.3.1.2.2. Predimensionado del aerogenerador

Por otro lado, del predimensionado realizado de la torre se obtienen las siguientes dimensiones:

Tabla M-14: Predimensionado de la torre del aerogenerador..

Predimensionado de la torre	
Diámetro en la base	6,96 m
Espesor en la base	164,6 mm
Diámetro en la góndola	3,48 m
Espesor en la góndola	82,3 mm

### 2.3.1.3. Material

El material seleccionado se trata de acero VL EW36, de acuerdo con la norma DNVGL-OS-B101 [6]. Sus propiedades se muestran en la siguiente tabla:

Tabla M-15: Características del acero utilizado.

Características del acero	
Módulo de elasticidad ( $E_S$ )	210 GPa
Módulo de Poisson ( $\nu_S$ )	0,3
Densidad ( $\rho_S$ )	7.850 $\text{kg/m}^3$
Límite elástico ( $f_y$ )	355 MPa

### 2.3.2. Descripción del diseño

En este apartado se detalla el resultado del dimensionado y posterior optimización de la estructura jacket para soporte de un aerogenerador marino. Para ellos se divide en tres niveles:

- La geometría de la estructura a nivel global.



- La geometría de las distintas secciones que presentan los elementos de la estructura.
- Las comprobaciones que se le exigen a esta estructura, descritas en el apartado 2.2.3 .

### 2.3.2.1. Definición de la geometría

Las principales características geométricas que presenta la estructura a nivel global son:

Tabla M-16: Caracterización geométrica de la estructura.

<b>Geometría de la estructura</b>	
<b>Altura</b>	57 m
<b>Número de apoyos</b>	4
<b>Separación de los soportes principales en la base</b>	27 m
<b>Separación de los soportes principales en la cima</b>	18 m
<b>Número de niveles de arriostramientos</b>	6
<b>Tipo de arriostramiento</b>	X
<b>Geometría de arriostramientos</b>	Inclinación constante
<b>Arriostramientos horizontales</b>	Sin arriostramientos horizontales
<b>Número de pilotes</b>	4
<b>Longitud de los pilotes</b>	13 m

### 2.3.2.2. Definición de las secciones

Debido a la gran cantidad de material necesario, resulta significativo aumentar el número de secciones diferentes; de modo que cada una se ajuste a las solicitaciones a las que se encuentra sometida. No obstante, interesa mantener simetrías que otorguen robustez a la estructura frente a cambios en las direcciones de incidencia de las distintas cargas.

En el diseño definitivo, se obtienen ocho secciones diferentes: una sección para los pilotes, otra sección para los soportes principales y una sección por cada uno de los niveles de arriostramiento (6 niveles). Destacar que todas las secciones se encuentran normalizadas de acuerdo a la norma UNE-EN-10210-2 [18]; excepto la sección propia de los soportes principales, que debido a sus dimensiones ligeramente superiores requiere que sea fabricada a medida.

Las características de las secciones se muestran a continuación:

Tabla M-17: Resumen de las secciones de la estructura.

ID sección	Localización	Diámetro	Espesor	Total de longitudes	Masa
1	Pilotes	1,1680 m	20,0 mm	52,0000 m	29.443,86 kg
2	Soportes principales	1,4000 m	25,0 mm	229,4167 m	194.485,48 kg
3	Arriostramiento N1	0,5080 m	12,5 mm	227,3714 m	34.730,34 kg
4	Arriostramiento N2	0,5080 m	10,0 mm	212,5139 m	26.099,74 kg
5	Arriostramiento N3	0,4570 m	10,0 mm	198,6272 m	21.896,05 kg
6	Arriostramiento N4	0,4064 m	8,0 mm	185,6480 m	14.592,14 kg
7	Arriostramiento N5	0,3556 m	6,3 mm	173,5168 m	9.416,73 kg
8	Arriostramiento N6	0,1683 m	4,0 mm	162,1784 m	2.628,51 kg

### 2.3.2.3. Resumen de las comprobaciones

La estructura jacket diseñada debe verificar todas las comprobaciones aquí descritas, de modo que sea apta para su puesta en funcionamiento. En el Anexo III: Resultados del cálculo estructural, se puede consultar todas las comprobaciones realizadas para las distintas barras en las 5 hipótesis de cargas planteadas. A continuación, se muestra un resumen de dichas comprobaciones, donde se muestra el caso más desfavorable.

Tabla M-18: Resumen de las comprobaciones de la estructura.

ELU		
<b>Plastificación del material</b>	$\eta = 0,917 \leq 1$	Cumple
<b>Pandeo local del elemento</b>	$\eta = 0,973 \leq 1$	Cumple
<b>Pandeo global del elemento</b>	$\eta = 0,948 \leq 1$	Cumple
<b>Carga lateral sobre pilote</b>	$\eta = 0,976 \leq 1$	Cumple
<b>Momento flector excéntrico sobre pilote</b>	$\eta = 0,105 \leq 1$	Cumple
<b>Momento flector no excéntrico sobre pilote</b>	$\eta = 0,009 \leq 1$	Cumple
ELS		
<b>Giro de la plataforma</b>	Giro = $0,239^\circ \leq 0,25^\circ$	Cumple
<b>Resonancia</b>	$f_{1P}/0,95 = 0,177 \leq f = 0,268 \leq f_{3P}/1,05 = 0,305$	Cumple
ELF		
<b>Número de ciclos</b>	$N_{Oleaje} = 2,010 \cdot 10^4 \leq N_R = 2,405 \cdot 10^5$	Cumple

### 3. Referencias

- [1] Ministerio de Industria, Turismo y Comercio, Ministerio de Medio Ambiente y Ministerio de Agricultura, Pesca y Alimentación, «Estudio Estratégico Ambiental del litoral español para la instalación de parques eólicos marinos.,» 2009.
- [2] GRAFCAN, [En línea]. Available: <https://www.grafcan.es/>. [Último acceso: Abril 2019].
- [3] 4C Offshore Ltd, [En línea]. Available: <https://www.4coffshore.com/>. [Último acceso: Mayo 2019].
- [4] C-Power, [En línea]. Available: <http://www.c-power.be/>. [Último acceso: Mayo 2019].
- [5] I. Chen, B. Wong, Y. Lin, S. Chau y H. Huang, «Design and Analysis of Jacket Substructures for Offshore Wind Turbines,» *Energies*, 2016.
- [6] DNV GL Group, *DNVGL-OS-B101: Metallic materials.*, 2015.
- [7] DNV GL Group, *DNVGL-ST-0126: Support structures for wind turbines.*, 2016.
- [8] DNV GL Group, *DNVGL-ST-0437: Loads and site conditions for wind turbines.*, 2016.
- [9] American Petroleum Institute (API), *API RP 2A-WSD: Recommended Practice for Planning, Designing and Constructing Fixed Offshore Platforms: Working Stress Design.*, 2007.
- [10] M. Shadow y S. Bhattacharya, «Dynamic stiffness of monopiles supporting offshore wind turbine generators.,» *Soil Dyn Earthq Eng*, pp. 15-32, 2016.
- [11] L. Arany, S. Bhattacharya, J. Macdonald y S. Hogan, «Design of monopiles for offshore wind turbines in 10 steps.,» *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, pp. 126-152, 2017.
- [12] DNV GL Group, *DNVGL-RP-C205: Environmental conditions and environmental loads.*, 2017.
- [13] International Electrotechnical Commission (IEC), «IEC 61400-1:2007: Wind turbines. Part 1: Design requirements.,» 2007.
- [14] R. Budynas y J. Nisbett, *Shigley's Mechanical Engineering Design*. (10th ED), 2015.
- [15] DNV GL Group, *DNVGL-RP-C202: Buckling strength of shells.*, 2017.
- [16] H. Poulos y E. Davis, *Pile foundation analysis and design.*, Rainbow-Bridge Book Co., 1980.



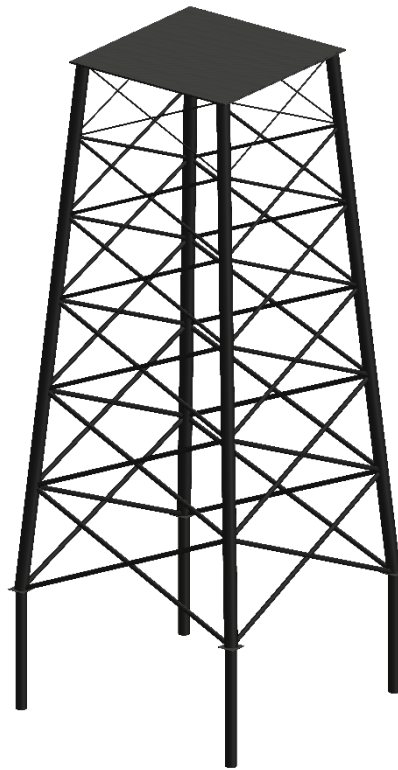
- [17] DNV GL Group, *DNVGL-RP-C203: Fatigue design of offshore steel structures.*, 2016.
- [18] Asociación Española de Normalización (UNE), *UNE-EN- 10210-2:2007: Perfiles huecos para construcción, acabados en caliente, de acero no aleado y de grano fino.*, 2007.







# Anexo I: Estudio del emplazamiento



Autor: *Román Quevedo Reina*

Tutor: *Juan José Aznárez González*

Tutor: *Guillermo Manuel Álamo Meneses*





---

## Contenido

Índice de tablas.....	65
Índice de figuras.....	67
1. Objeto.....	69
2. Estudio de la ubicación .....	69
2.1. Zonificación del litoral.....	69
2.2. Recurso eólico.....	71
2.3. Batimetría.....	71
3. Ubicación seleccionada.....	72
3.1. Criterio de selección.....	72
3.2. Identificación de la ubicación .....	73
3.3. Condiciones ambientales.....	73
3.3.1. Viento.....	74
3.3.2. Oleaje .....	76
3.3.3. Nivel del mar.....	78
3.3.4. Corrientes marinas .....	79
3.3.5. Terreno .....	79
4. Referencias.....	80



## Índice de tablas

Tabla AI-1: Ubicación seleccionada. ....	73
Tabla AI-2: Ubicación de puntos SIMAR [4].....	74
Tabla AI-3: Velocidad media del viento en los puntos SIMAR [4].....	74
Tabla AI-4: Velocidad media del viento.....	75
Tabla AI-5: Parámetros de Weibull del oleaje en los puntos SIMAR [4].....	77
Tabla AI-6: Datos del oleaje en los puntos SIMAR.....	78
Tabla AI-7: Datos del oleaje. ....	78
Tabla AI-8: Datos del nivel del mar [4].....	78
Tabla AI-9: Datos de corrientes marinas [4].....	79



## Índice de figuras

Figura AI-1: Zonificación del litoral español [2]. .....	70
Figura AI-2: Zonificación del litoral de las Islas Canarias [2]. .....	70
Figura AI-3: Recurso eólico a 80 metros [3]. .....	71
Figura AI-4: Batimetría del sur de la isla de Gran Canaria [3]. .....	72
Figura AI-5: Ubicación seleccionada [3]. .....	73



## 1. Objeto

El objeto de este Anexo consiste en analizar las características de las costas de la isla de Gran Canaria y establecer la ubicación idónea para instalar un aerogenerador marino. Dicha elección se debe fundamentar bajo los siguientes criterios legales y técnicos:

- Zonificación del litoral.
- Recurso eólico.
- Profundidad de la lámina de agua.

## 2. Estudio de la ubicación

La selección de la ubicación apropiada para la instalación de un aerogenerador marino se encuentra delimitada, principalmente, por tres aspectos:

- La zonificación del litoral, que establece aquellas zonas donde han sido detectados efectos ambientales significativos o conflictividad con otros usos del medio marino.
- El recurso eólico presente, que determina el potencial energético del que se dispone y la rentabilidad de la inversión que se puede alcanzar.
- La profundidad de la lámina de agua, convirtiéndose en un factor limitante debido a dificultades técnicas asociadas a la cimentación.

A continuación, se detallan dichos criterios aplicados al caso del litoral de la isla de Gran Canaria.

### 2.1. Zonificación del litoral

De acuerdo con los objetivos fijados a nivel estatal en cuanto a la transición hacia un sistema de producción energética más sostenible, se ha elaborado un Estudio Estratégico Ambiental del litoral español para la instalación de parques eólicos marinos [1].

En dicho estudio, se recoge el impacto que podría implicar la instalación de un parque eólico marino, atendiendo tanto a los ecosistemas marinos como a otros usos de este recurso como son el tránsito marítimo o la pesca. Bajo estas limitaciones, se establecen tres zonas:

- **Zonas aptas:** se trata de las zonas más adecuadas para el establecimiento de parque eólicos marinos por considerarse reducidos sus efectos ambientales frente a las ventajas que aporta.
- **Zonas con condicionantes:** son áreas en las que se requiere un mayor análisis de los efectos o conflictos que puedan surgir debido al proyecto.

- **Zonas de exclusión:** consiste en aquellas regiones en las que se han identificado potenciales efectos ambientales o conflictividad con otros usos del medio marino.

De acuerdo con estas restricciones, el Instituto para la Diversificación y Ahorro de la Energía (IDEA) [2], ha elaborado un Estudio técnico donde analiza el recurso eólico de las distantes comunidades autónomas e incluye la zonificación del litoral. A continuación, se muestra dicha clasificación:

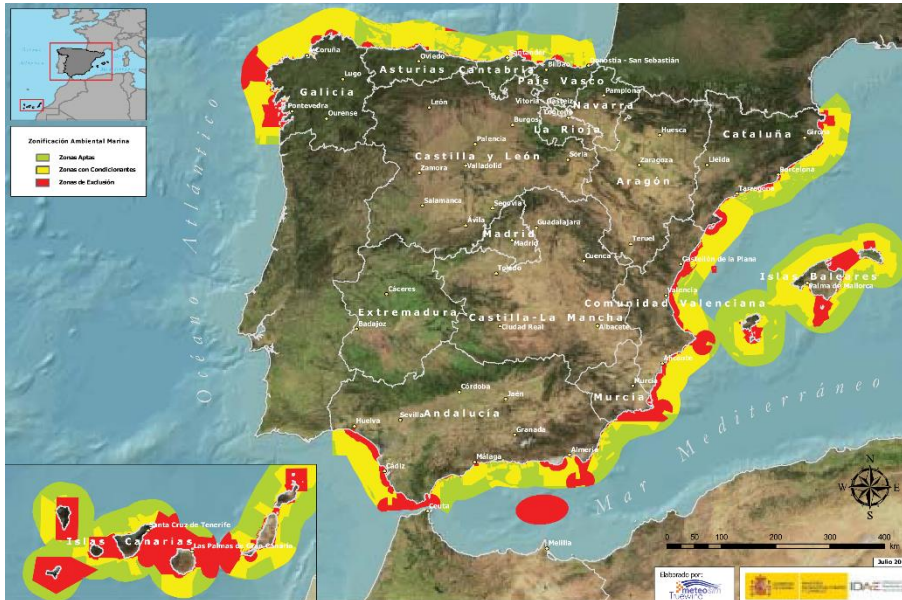


Figura AI-1: Zonificación del litoral español [2].

Ampliando la vista al caso de la Comunidad Autónoma de las Islas Canarias:



Figura AI-2: Zonificación del litoral de las Islas Canarias [2].

De acuerdo con la zonificación del litoral, se concluye que aquellas regiones aptas para la implementación de un parque eólico se encuentran relativamente alejadas de la costa; localizándose al sureste de la isla la zona apta más cercana. Sin embargo, se permitiría su instalación en un área mayor, que abarca desde el sureste hasta el sur de la isla, siempre y cuando se realice un estudio de impacto ambiental que justifique la ejecución del proyecto.



## 2.2. Recurso eólico

Para justificar la inversión que supone la instalación de un aerogenerador, se requiere disponer de un potencial energético suficiente. Para ello, se analiza el potencial eólico en la costa de la isla de Gran Canaria suministrado por el visor web de la empresa pública GRAFCAN [3].

En este caso, se consulta el recurso eólico a una cota de 80 m sobre el nivel del mar (altura más cercana a la que se encontrará el rotor), obteniéndose la siguiente distribución:

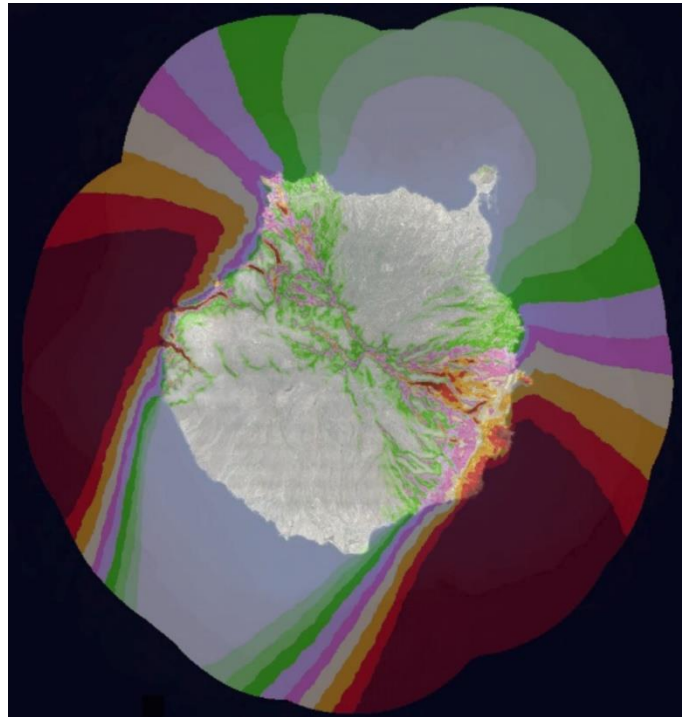


Figura AI-3: Recurso eólico a 80 metros [3].

Se observa claramente que las regiones con mayor recurso eólico se encuentran al oeste y al sureste de la isla.

## 2.3. Batimetría

El último aspecto de relevancia a tener en cuenta para seleccionar la ubicación idónea para la instalación del aerogenerador se trata de la batimetría, pues una gran profundidad de la lámina de agua limita las soluciones de cimentación por las que se puede optar. Dicha información también ha sido consultada en el visor web de GRAFCAN [3]. A continuación, se muestra una imagen de las isobatas en el sur de la isla de Gran Canaria; donde la isobata más alejada representa una profundidad de 50 metros.



Figura AI-4: Batimetría del sur de la isla de Gran Canaria [3].

De acuerdo con esta información, bajo la premisa de alejar el dispositivo lo máximo posible de la costa, se aprecia que la localización idónea se encuentra entre el sur y el suroeste de la isla. Además, cabe destacar que la costa del sureste presenta una mejor disposición frente a este criterio que la del oeste.

### 3. Ubicación seleccionada

#### 3.1. Criterio de selección

Para determinar la ubicación óptima para la instalación del aerogenerador marino se debe considerar toda la información detallada en el apartado 2. A continuación, se indican los criterios aplicados para decidir la ubicación definitiva:

1. De acuerdo con la zonificación del litoral de las Islas Canarias (Figura AI-2) se descartan las zonas de exclusión por considerarse que se afecta al medio marino o a otros usos de este recurso. Destacar que sí se consideran las zonas con condicionantes, ya que con un estudio de impacto ambiental positivo se permitiría su instalación.
2. Analizando el recurso eólico (Figura AI-3), se observa que de las opciones de las que se dispone, el sureste presenta el mayor potencial energético. Por este motivo, se opta por limitar la ubicación a esta área.

3. Se desea alejar el dispositivo de la costa lo máximo que sea posible. Sin embargo, únicamente se dispone de datos de profundidad hasta los 50 metros; estableciéndose ésta como límite para la ubicación. De este modo, se selecciona una ubicación situada al sureste de la isla de Gran Canaria donde se alcance la mayor distancia posible a la costa, pero se mantenga dentro de la región con mayor recurso eólico.

### 3.2. Identificación de la ubicación

Aplicando los criterios descritos en el apartado 3.1, se define la localización definitiva del aerogenerador marino. Siendo ésta la siguiente:

Tabla AI-1: Ubicación seleccionada.

Ubicación del aerogenerador marino	
<b>Latitud</b>	27° 45' 08,55" N
<b>Longitud</b>	15° 28' 34,55" O
<b>Profundidad de la lámina de agua</b>	49 metros
<b>Distancia a la costa</b>	4.314 metros

A continuación, se muestra dónde se encuentra dicha ubicación:

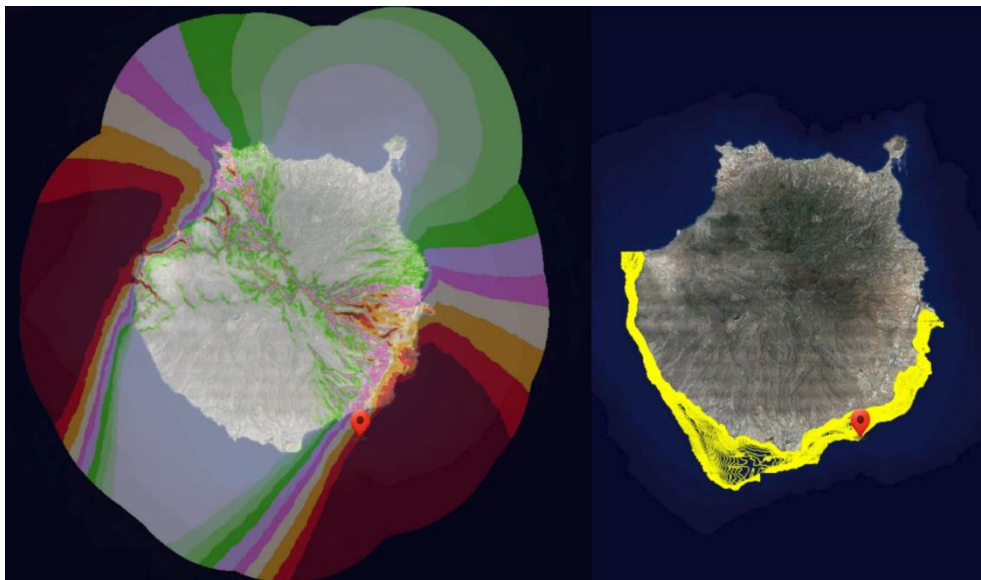


Figura AI-5: Ubicación seleccionada [3].

### 3.3. Condiciones ambientales

Para llevar a cabo el diseño de la cimentación de un aerogenerador se requiere de distintos datos de las características del lugar donde se encuentra; no solo las condiciones de viento para definir



la potencia eléctrica que se prevé que pueda suministrar, sino otras variables que afectan a la geometría de la cimentación y a las cargas a las que estará sometida.

### 3.3.1. Viento

Los datos de las condiciones de viento del lugar donde se encuentra un aerogenerador condicionan la potencia eléctrica que va a ser capaz de suministrar y las cargas a las que va a estar sometido. En primer lugar, se obtiene la velocidad media mensual, a través de los datos suministrados por Puertos del Estado [4]. Dado que no se dispone de una estación meteorológica en la ubicación seleccionada de donde se pueda extraer los datos necesarios; se emplea el conjunto SIMAR-44 que, a partir de un modelado numérico de alta resolución, estima las variables de viento y oleaje en diversas localizaciones a partir de los datos recogidos en puntos determinados.

De este modo, empleado los datos recogidos en tres puntos SIMAR que rodean a la ubicación del aerogenerador, se realiza una interpolación lineal de tres puntos para obtener el resultado en el lugar deseado. Dichos puntos de interpolación son:

Tabla AI-2: Ubicación de puntos SIMAR [4]

	<b>Ubicación seleccionada</b>	<b>Punto SIMAR (4037007)</b>	<b>Punto SIMAR (4038006)</b>	<b>Punto SIMAR (4036006)</b>
<b>Latitud</b>	27° 45' 08,55" N	27° 49' 48" N	27° 45' 00" N	27° 45' 00" N
<b>Longitud</b>	15° 28' 34,55" O	15° 25' 12" O	15° 19' 48" O	15° 30' 00" O

Las condiciones de viento, del año 2018, obtenidas de los puntos SIMAR son:

Tabla AI-3: Velocidad media del viento en los puntos SIMAR [4]

	<b>Punto SIMAR (4037007)</b>	<b>Punto SIMAR (4038006)</b>	<b>Punto SIMAR (4036006)</b>
<b>Enero</b>	7,53 m/s	9,16 m/s	7,81 m/s
<b>Febrero</b>	7,36 m/s	9,07 m/s	7,33 m/s
<b>Marzo</b>	7,50 m/s	8,70 m/s	7,54 m/s
<b>Abril</b>	9,10 m/s	10,28 m/s	6,35 m/s
<b>Mayo</b>	9,68 m/s	9,90 m/s	7,58 m/s
<b>Junio</b>	10,23 m/s	10,08 m/s	8,09 m/s
<b>Julio</b>	13,74 m/s	13,13 m/s	9,42 m/s
<b>Agosto</b>	11,64 m/s	11,97 m/s	6,74 m/s
<b>Septiembre</b>	9,97 m/s	9,81 m/s	8,44 m/s
<b>Octubre</b>	5,64 m/s	6,06 m/s	5,03 m/s

<b>Noviembre</b>	6,34 m/s	7,05 m/s	6,22 m/s
<b>Diciembre</b>	6,06 m/s	6,83 m/s	7,49 m/s
<b>Dirección predominante</b>	22,5°	22,5°	45°

A partir de estos datos, se estima se estima la velocidad media mensual en la ubicación seleccionada.

Tabla AI-4: Velocidad media del viento

	<b>Velocidad media del viento</b>
<b>Enero</b>	7,97 m/s
<b>Febrero</b>	7,55 m/s
<b>Marzo</b>	7,68 m/s
<b>Abril</b>	6,93 m/s
<b>Mayo</b>	7,93 m/s
<b>Junio</b>	8,40 m/s
<b>Julio</b>	10,01 m/s
<b>Agosto</b>	7,54 m/s
<b>Septiembre</b>	8,66 m/s
<b>Octubre</b>	5,18 m/s
<b>Noviembre</b>	6,33 m/s
<b>Diciembre</b>	7,36 m/s
<b>Media</b>	7,63 m/s
<b>Dirección predominante</b>	40°

Cabe destacar que todos estos datos se encuentran referenciados a una cota de 10 metros, por lo que es necesario extrapolarlos hasta la altura a la que se requiera. Para ello se emplea la ley exponencial recogida en la norma DNVGL-RP-C205 [5].

$$U(z) = U(H) \left( \frac{z}{H} \right)^\alpha$$

Ecuación AI-1

Siendo:

- $U$ : La velocidad del viento.
- $H$ : La altura de referencia.
- $z$ : La altura a la que se desea conocer la velocidad del viento.



- $\alpha$ : El exponente de la ley exponencial.

Consultando la misma normativa [5], se puede extraer la magnitud del exponente de la ley exponencial, así como el de la densidad del aire a utilizar:

- $\alpha = 0,12$ ; en mar abierto con olas.
- $\rho_{aire} = 1,226 \text{ kg/m}^3$ .

Finalmente, se requiere conocer el parámetro de forma de la distribución de Weibull ( $k$ ) que modeliza la frecuencia de las diferentes intensidades de viento. Para ello, se consulta la base de datos del Instituto Tecnológico de Canarias [6], donde se atribuye un valor de 1,853 en la ubicación seleccionada a una altura de 80 metros. Debido a que dicha variable no sufre grandes variaciones con la altitud, se considera igual a la altura de la góndola.

### 3.3.2. Oleaje

Para obtener los datos relativos al oleaje en la ubicación seleccionada se recurre a una estrategia similar a la empleada en el apartado 3.3.1. En este caso, se consulta en la web de Puertos del Estado [4] los parámetros característicos de la distribución de Weibull que rige la probabilidad de distintas alturas significativas de las olas. A partir de la distribución característica, se emplea la DNVGL-ST-0437 [7] para estimar las distintas alturas de las olas en los puntos SIMAR. Finalmente, se interpola para determinar dichas variables en la ubicación deseada.

La distribución de Weibull acumulada presenta la siguiente expresión:

$$F_{H_s}(h) = 1 - e^{-\left(\frac{h-\theta}{\lambda}\right)^k} \quad \text{Ecuación AI-2}$$

Siendo:

- $h$ : La altura significativa de la ola.
- $k$ : El parámetro de forma de la distribución.
- $\lambda$ : EL parámetro de escala de la distribución.
- $\theta$ : El parámetro de centrado de la distribución.

El valor de estos parámetros característicos en los distintos puntos SIMAR se muestra en la siguiente tabla:

Tabla AI-5: Parámetros de Weibull del oleaje en los puntos SIMAR [4].

	Punto SIMAR (4037007)	Punto SIMAR (4038006)	Punto SIMAR (4036006)
<b><i>k</i></b>	1,56	1,80	1,33
<b><i>λ</i></b>	0,58	1,22	0,47
<b><i>θ</i></b>	0,08	0,15	0,09

Una vez definidas las condiciones en los puntos de estudio, se procede al cálculo de la altura significativa y máxima de la ola con periodo de retorno de 1 año y 50 años. Para ello se emplea lo descrito en la norma DNVGL-ST-0437 [7]. Para estimar la altura significativa de la ola, se emplea la siguiente relación:

$$H_{S,max} = \theta + \lambda \sqrt[k]{-\ln\left(1 - \sqrt[2920]{F_{H_{S,max}}}\right)} \quad \text{Ecuación AI-3}$$

Donde  $F_{H_{S,max}}$  representa el cuantil de que se considera apropiado para definir el periodo de retorno de la ola. Se considera un cuantil del 80% para un periodo de retorno de 1 año y de 98% para un periodo de retorno de 50 años.

Por otro lado, se debe obtener también la altura máxima de la ola, que se evalúa a partir de la altura significativa:

$$H_{M,max} = H_{S,max} \sqrt{\frac{1}{2} \ln\left(\frac{3 \cdot 3600}{T_S}\right) + \frac{0,2886}{\sqrt{2 \ln\left(\frac{3 \cdot 3600}{T_S}\right)}}} \quad \text{Ecuación AI-4}$$

Siendo  $T_S$  el periodo de la ola significativa. La DNVGL-ST-0437 [7] propone un rango en el que se suele encontrar el periodo de una ola en función de su altura, que en el caso más desfavorable (un periodo más corto) se evalúa de la siguiente manera:

$$T_w = 11,1 \sqrt{\frac{H_w}{g}} \quad \text{Ecuación AI-5}$$

De este modo, se obtiene los datos característicos del oleaje en los tres puntos SIMAR:



Tabla AI-6: Datos del oleaje en los puntos SIMAR.

	Punto SIMAR (4037007)	Punto SIMAR (4038006)	Punto SIMAR (4036006)
$H_{S,1}$	2,532 m	4,406 m	2,640 m
$H_{M,1}$	5,110 m	8,740 m	5,321 m
$H_{S,50}$	2,914 m	4,975 m	3,112 m
$H_{M,50}$	5,856 m	9,830 m	6,240 m

A partir de estos datos, se estima se estiman las alturas características de las olas en la ubicación seleccionada.

Tabla AI-7: Datos del oleaje.

Altura de la ola	
$H_{S,1}$	2,859 m
$H_{M,1}$	5,744 m
$H_{S,50}$	3,340 m
$H_{M,50}$	6,680 m

Finalmente, se debe definir también la densidad del agua del mar. Debido a la falta de datos medido directamente, se emplea el valor recomendado por la DNVGL-RP-C205 [5]. Es este caso, para una temperatura de 20°C, se considera que el agua de mar presenta una densidad 1.024,7 kg/m<sup>3</sup>.

### 3.3.3. Nivel del mar

Los registros relativos al nivel del mar se obtienen nuevamente de Puertos del Estado [4]. Se consultan los datos del mareógrafo del Puerto de Las Palmas, obteniéndose los siguientes registros históricos desde el año 1992:

Tabla AI-8: Datos del nivel del mar [4].

	Nivel máximo	Nivel mínimo	Nivel medio
<b>Pleamar</b>	3,19 m	1,69 m	2,40 m
<b>Bajamar</b>	1,46 m	0,00 m	0,77 m
<b>Pleamar viva</b>	3,19 m	2,44 m	2,78 m
<b>Bajamar viva</b>	1,12 m	0,00 m	0,44 m
<b>Pleamar muerta</b>	2,58 m	2,69 m	2,00 m
<b>Bajamar muerta</b>	1,46 m	0,82 m	1,16 m



A partir de esta información, se toma como valor máximo del nivel del mar 3,19 metros.

### 3.3.4. Corrientes marinas

Para concluir con la caracterización del medio marino se debe definir la corriente de agua que puede circular. Para ello, se consultan los registros históricos de la Boya de Gran Canaria a través de Puertos del Estado [4].

Tabla AI-9: Datos de corrientes marinas [4].

Mes	Año	Velocidad de la corriente	Dirección
Enero	2003	0,711 m/s	194°
Febrero	2014	0,550 m/s	236°
Marzo	2018	1,105 m/s	116°
Abril	2013	0,585 m/s	199°
Mayo	2014	0,843 m/s	303°
Junio	2002	0,782 m/s	238°
Julio	2015	0,796 m/s	267°
Agosto	2013	0,960 m/s	230°
Septiembre	1997	0,827 m/s	256°
Octubre	2018	0,844 m/s	231°
Noviembre	2014	0,738 m/s	236°
Diciembre	2009	0,667 m/s	244°

Se observa que la mayor corriente marina registrada en dicha estación alcanzó una velocidad de 1,105 m/s. Por este motivo, y al no disponer de datos más cercanos a la ubicación seleccionada, se emplea este valor como la corriente que debe resistir la cimentación del aerogenerador.

### 3.3.5. Terreno

Existen muy pocos datos en cuanto a la caracterización del suelo. Para poder llevar a cabo el proyecto de forma rigurosa, sería necesario realizar un estudio geotécnico en la ubicación seleccionada para conocer las propiedades del suelo y cómo varían con la profundidad. Para el desarrollo de este trabajo, se emplean datos orientativos que permitan una primera aproximación al problema real.



La única información disponible procede del Ministerio para la Transición Ecológica del Gobierno de España [8], donde se cataloga el terreno sobre el que se cimenta el aerogenerador como arena fina.

Para estimar las propiedades de este tipo de suelo, se recurre a dos fuentes diferentes. En primer lugar, se consulta el libro *Muros de contención y muros de sótano* de José Calavera [9]. En el mismo, para el caso de arena compacta, se indica un peso específico de 20 kN/m<sup>3</sup> y un ángulo de rozamiento interno entre 35° y 45°. Destacar que, cuanto mayor sea el ángulo de rozamiento interno, más capacidad resistente presentará el sustrato; por lo que se toma el valor de 35° por ser más desfavorable.

Para conocer el módulo de elasticidad del suelo, se emplea la relación propuesta por Ohta y Goto [10], que describe experimentalmente cómo varía la velocidad de propagación de ondas de corte en arenas finas con la profundidad:

$$c_s(z) = 78,98 \cdot 1,260 \cdot z^{0,312} \quad \text{Ecuación AI-6}$$

De esto modo, y asumiendo un valor del módulo de Poisson de 0,35, se puede describir cómo varía el módulo de elasticidad con la profundidad:

$$E(z) = 2 \cdot \rho \cdot (1 + \nu) \cdot c_s(z)^2 \quad \text{Ecuación AI-7}$$

Para simplificar el problema, se caracteriza el terreno mediante un módulo de elasticidad constante con la profundidad, al que se le asigna el valor medio que toma dicha variable en los primeros 20 metros de profundidad. De este modo, se obtiene un valor de 217,72 MPa.

## 4. Referencias

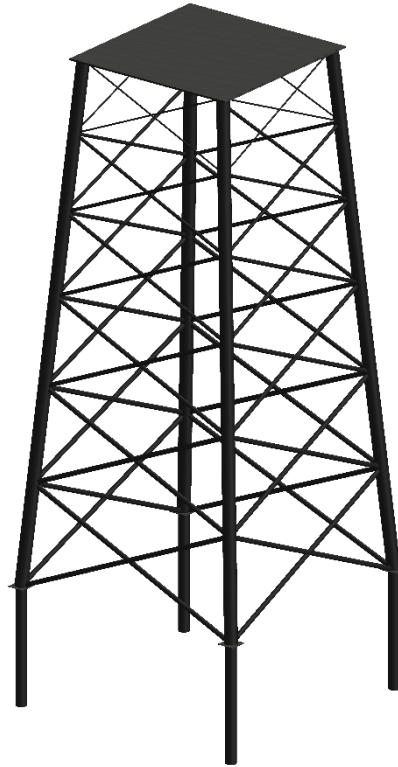
- [1] Ministerio de Industria, Turismo y Comercio, Ministerio de Medio Ambiente y Ministerio de Agricultura, Pesca y Alimentación, «Estudio Estratégico Ambiental del litoral español para la instalación de parques eólicos marinos.», 2009.
- [2] Instituto para la Diversificación y Ahorro de la Energía (IDAE), «Análisis del recurso. Atlas eólico de España.», Madrid, 2011.
- [3] GRAFCAN, [En línea]. Available: <https://www.grafcan.es/>. [Último acceso: Abril 2019].
- [4] Puertos del Estado, [En línea]. Available: <http://www.puertos.es/es-es>. [Último acceso: Abril 2019].
- [5] DNV GL Group, *DNVGL-RP-C205: Environmental conditions and environmental loads.*, 2017.

- [6] Instituto Tecnológico de Canarias, [En línea]. Available: <http://www.itccanarias.org/web/>. [Último acceso: Abril 2019].
- [7] DNV GL Group, *DNVGL-ST-0437: Loads and site conditions for wind turbines.*, 2016.
- [8] Ministerio para la Transición Ecológica. Gobierno de España., [En línea]. Available: <https://www.miteco.gob.es/es/>. [Último acceso: Abril 2019].
- [9] J. Calavera, Muros de contención y muros de sótano. (3ª ED.), Madrid: Intemac Ediciones, 2001.
- [10] Y. y. G. N. Ohta, «Empirical shear wave velocity equations in terms of characteristic soil indexes.» *Earthquake Engineering & Structural Dynamics*, vol. 6, nº 2, pp. 167-187, 1978.





## Anexo II: Selección del aerogenerador



Autor: *Román Quevedo Reina*

Tutor: *Juan José Aznárez González*

Tutor: *Guillermo Manuel Álamo Meneses*



## Contenido

Índice de tablas.....	87
Índice de figuras.....	89
1. Objeto.....	91
2. Características de los aerogeneradores.....	91
3. Comparación de los aerogeneradores.....	92
3.1. Criterio energético.....	92
3.2. Criterio estructural .....	95
3.3. Criterio económico.....	95
4. Conclusiones .....	96
5. Referencias.....	97





## Índice de tablas

Tabla AII-1: Características de los aerogeneradores.....	91
Tabla AII-2: Velocidad media del viento.....	93
Tabla AII-3: Rendimiento energético de los aerogeneradores.....	94
Tabla AII-4: Rentabilidad económica.....	96



## Índice de figuras

Figura AII-1: Curvas de potencia de los aerogeneradores. .... 92



## 1. Objeto

El objeto de este Anexo consiste en estudiar la viabilidad de diferentes aerogeneradores comerciales, desde un punto de vista energético, estructural y económico, para seleccionar el modelo más adecuado para ser instalado en la ubicación seleccionada en el documento Anexo I: Estudio del emplazamiento, y de acuerdo a las condiciones ambientales que en él se establecen.

## 2. Características de los aerogeneradores

El acceso a información acerca de aerogeneradores comerciales reales se encuentra bastante limitado, lográndose reunir únicamente una parte de ella. Para este proyecto, se ha recopilado la información a través de la página The Wind Power [1], estimando aquellos datos no obtenidos a partir de otros aerogeneradores similares.

Tabla AII-1: Características de los aerogeneradores.

Fabricante	CSR (China)	XEMC-Darwind (Países Bajos)	Senvion (Alemania)	Vestas (Dinamarca)	MHI Vestas Offshore (Dinamarca)
Nombre	WT5000-D128	XE128-5000	6.3M152	V164/8000	V164/9500
<b>P (kW)</b>	5.000	5.000	6.300	8.000	9.500
<b>Nº palas</b>	3	3	3	3	3
<b>D (m)</b>	128	128	152	164	164
<b>Abarrido (m<sup>2</sup>)</b>	12.868	12.868	18.146	21.125	21.125
<b>H<sub>gondola</sub> (m)</b>	90	140	124	140	140
<b>V<sub>acoplamiento</sub> (m/s)</b>	3,5	4	3,5	3,5	3,5
<b>V<sub>nominal</sub> (m/s)</b>	13	11,5	12	13	14
<b>V<sub>desconexión</sub> (m/s)</b>	25	25	30	25	25
<b>f<sub>rotor,min</sub> (min<sup>-1</sup>)</b>	6,02	6,02	6,4	4,8	4,70
<b>f<sub>rotor,max</sub> (min<sup>-1</sup>)</b>	13,02	15	10,11	12,1	10,16
<b>M<sub>rotor</sub> (t)</b>	122,654	126	156	203,01	221,19
<b>M<sub>gondola</sub> (t)</b>	208,614	206	350	375	390

A continuación, se muestra la curva de potencia de los aerogeneradores, necesaria para calcular su producción de energía eléctrica:

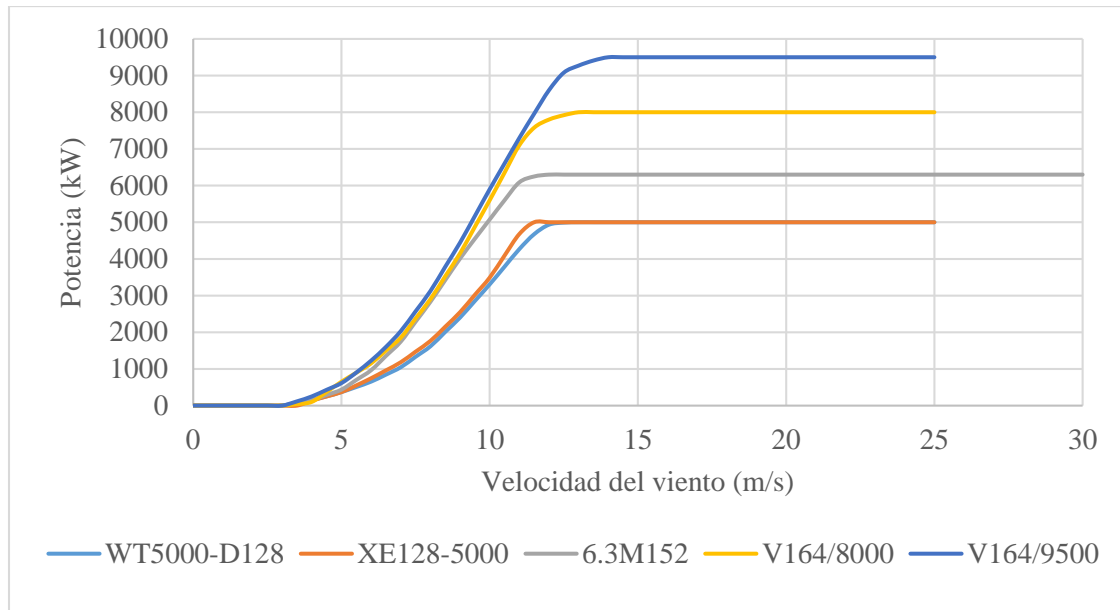


Figura AII-1: Curvas de potencia de los aerogeneradores.

### 3. Comparación de los aerogeneradores

#### 3.1. Criterio energético

La funcionalidad de un aerogenerador radica en la producción de energía eléctrica, por lo que es imprescindible analizar su capacidad de producción antes de acometer la gran inversión económica que éste supone.

En el estudio de la capacidad de producción energética de un aerogenerador se suelen emplear dos medidores, estrechamente relacionados, que permiten visualizar el mismo concepto desde dos puntos de vista diferentes.

$$FC = \frac{P_m}{P_N} \quad \text{Ecuación AII-1}$$

$$HE = \frac{P_m \cdot h_{\text{año}}}{P_N} \quad \text{Ecuación AII-2}$$

Siendo:

- $P_N$ : La potencia nominal del aerogenerador.
- $P_m$ : La potencia media que desarrolla el aerogenerador durante el tiempo de análisis. Depende de las condiciones de viento de la ubicación.
- $h_{\text{año}}$ : El número de horas que hay en un año (8760 horas).

- *FC*: El factor de capacidad. Mide la proporción de potencia que desarrolla el aerogenerador con respecto a la máxima que podría alcanzar en condiciones ideales.
- *HE*: Las horas equivalentes. Mide el número de horas que debe funcionar el aerogenerador a pleno rendimiento para producir la misma cantidad de energía que el caso de análisis.

Para calcular la potencia media desarrollada por el aerogenerador en dicha ubicación, se requiere conocer la distribución de velocidades del viento. Además, debido a la gran variabilidad que presenta a lo largo del año, se analiza para cada mes y se obtiene la media aritmética. A continuación, se muestra la velocidad media mensual a una altura de referencia de 10 metros:

Tabla AII-2: Velocidad media del viento.

	<b>Velocidad media del viento</b>
<b>Enero</b>	7,97 m/s
<b>Febrero</b>	7,55 m/s
<b>Marzo</b>	7,68 m/s
<b>Abril</b>	6,93 m/s
<b>Mayo</b>	7,93 m/s
<b>Junio</b>	8,40 m/s
<b>Julio</b>	10,01 m/s
<b>Agosto</b>	7,54 m/s
<b>Septiembre</b>	8,66 m/s
<b>Octubre</b>	5,18 m/s
<b>Noviembre</b>	6,33 m/s
<b>Diciembre</b>	7,36 m/s

De este modo, empleando la distribución de Weibull para caracterizar el viento, se puede definir la frecuencia de las distintas velocidades:

$$f_{viento}(U) = \frac{k}{\lambda} \left(\frac{U}{\lambda}\right)^{k-1} e^{-\left(\frac{U}{\lambda}\right)^k} \quad \text{Ecuación AII-3}$$

Donde:

- *v*: La velocidad del viento.
- $f_{viento}(U)$ : La frecuencia de aparición en función de la velocidad del viento.



- $k$ : El factor de forma de la distribución de Weibull. En esta ubicación toma el valor de 1,853.
- $\lambda$ : El factor de escala de la distribución de Weibull. Se obtiene a partir de:

$$\lambda = \frac{U_m}{\Gamma\left(1 + \frac{1}{k}\right)} \quad \text{Ecuación AII-4}$$

- $\Gamma$ : La función gamma.
- $U_m$ : La velocidad media del viento a la altura del eje del rotor. Se estima mediante:

$$U_m = U_{m,ref} \left(\frac{H_{rotor}}{H_{ref}}\right)^\alpha \quad \text{Ecuación AII-5}$$

- $U_{m,ref}$ : La velocidad media del viento a la altura de referencia.
- $H_{rotor}$ : La altura del eje del rotor.
- $H_{ref}$ : La altura de referencia, que son 10 metros.
- $\alpha$ : El exponente de la ley exponencial, se toma 0,12.

Por otro lado, la potencia media se determina por medio de la siguiente integral:

$$P_m = \int_0^{\infty} f_{viento}(U) \cdot P(U) dU \quad \text{Ecuación AII-6}$$

Siendo  $P(U)$  la potencia del aerogenerador en función del viento extraída de la curva de potencia. Debido al carácter de la misma, se suele evaluar numéricamente discretizando el dominio.

Finalmente, tras aplicar este procedimiento, se evalúa el factor de capacidad y las horas equivalentes de cada uno de los aerogeneradores descritos en el apartado 2.

Tabla AII-3: Rendimiento energético de los aerogeneradores.

Fabricante	CSR (China)	XEMC-Darwind (Países Bajos)	Senvion (Alemania)	Vestas (Dinamarca)	MHI Vestas Offshore (Dinamarca)
Nombre	WT5000-D128	XE128-5000	6.3M152	V164/8000	V164/9500
<b>P<sub>m</sub> (kW)</b>	2.741,86	2.881,06	3.901,23	4.578,40	5.196,15
<b>FC</b>	0,55	0,58	0,62	0,57	0,55
<b>HE (horas)</b>	4.803,74	5.047,62	5.424,57	5.013,35	4.791,40



### 3.2. Criterio estructural

Los distintos aerogeneradores presentan diferencias relevantes en cuanto a la geometría y las condiciones de funcionamiento, lo que supone grandes cambios en las cargas a considerar y en los límites de servicio. Por este motivo, la subestructura jacket necesaria para soportar cada aerogenerador debe adecuarse a las características de los mismo, no siendo viable su implementación en cualquier condición.

Para seleccionar el aerogenerador, se ejecutó el dimensionado y optimización de los cinco modelos propuestos en el apartado 2. En dicho cálculo, se alcanzó un diseño factible para dos de ellos:

- **XE128-5000** de XEMC-Darwind (Países Bajos).
- **6.3M152** de Senvion (Alemania).

El resto de modelos de aerogenerador propuestos no cumplen la comprobación a resonancia frente a las cargas variables derivadas del funcionamiento de la turbina. En todos los casos, se obtuvieron sistemas demasiado rígidos donde la frecuencia natural de sistema se ubica en el rango de frecuencia del paso de palas (3P). Para el dimensionado del soporte de dichos aerogeneradores se requeriría de un diseño más exhaustivo de la torre, modificando sus propiedades dinámicas.

### 3.3. Criterio económico

La comparación económica entre los dos aerogeneradores para los que se dispone de un diseño válido, se realiza analizando la rentabilidad de la inversión para un período de 20 años. A continuación, se detallan las consideraciones tenidas en cuenta:

- De acuerdo al alcance del presente proyecto, únicamente se considera el coste de la inversión para adquirir el aerogenerador y la subestructura jacket; obviando la instalación eléctrica y su obra civil asociada, que deben ser evaluadas en la siguiente fase.
- El precio de los aerogeneradores no se distribuye al público. Por ello, se establece el precio del mismo a partir de la información suministrada por BlommborgNEF [2]. Se estima un precio máximo de 0,71€/MW, tomándose dicho valor para este estudio.
- El coste de la subestructura jacket se evalúa a partir del presupuesto de este proyecto.
- Los ingresos para el primer año se estiman en función de la producción energética media del aerogenerador y del precio de mercado estimado para la electricidad de acuerdo a la Orden ETU/130/2017 [3]. Dicho precio se sitúa en 41,87 €/MWh.
- Los costes de mantenimiento del primer año se estiman en un 5% del coste total del conjunto aerogenerador-subestructura.



- Para considerar la inflación, se considera un Índice de Precios Industriales (IPRI) anual de 3,024%. Dicho valor se obtiene como la media de los últimos tres años a partir de los datos extraídos del INE [4].

Bajo dichas especificaciones, se calculan los beneficios previstos y la Tasa Interna de Retorno (TIR):

Tabla AII-4: Rentabilidad económica

<b>Fabricante</b>	<b>XEMC-Darwind (Países Bajos)</b>	<b>Senvion (Alemania)</b>
<b>Nombre</b>	<b>XE128-5000</b>	<b>6.3M152</b>
<b>C<sub>aerogenerador</sub></b>	3.550.000,00 €	4.473.000,00 €
<b>C<sub>subestructura</sub></b>	1.429.135,11 €	1.204.860,61 €
<b>C<sub>total</sub></b>	4.979.135,11 €	5.777.860,61 €
<b>I<sub>electricidad,1 año</sub></b>	1.056.718,98 €	1.410.812,05 €
<b>C<sub>mantenimiento</sub></b>	248.956,76 €	288.893,03 €
<b>B<sub>20 años</sub></b>	11.810.695,65 €	18.256.007,40 €
<b>TIR<sub>20 años</sub></b>	15,70%	19,72%

Para evaluar la rentabilidad de la inversión, se compara con las obligaciones del estado. Por medio de la web del Ministerio de Economía y Empresas [5], se consulta la última subasta de bonos del estado a 30 años (23/05/2019), siendo emitidos al 2,70%. Resulta evidente que el proyecto que se propone presenta mayor riesgo que la compra de deuda pública; no obstante, se prevé mayor rentabilidad de la inversión realizada además de un claro beneficio social y ambiental.

## 4. Conclusiones

La selección del aerogenerador se realiza tras analizar los cinco aerogeneradores disponibles bajo los tres criterios propuestos: energético, estructural y económico. Cabe destacar que, desde el punto de vista estructural, no es viable proponer un diseño estructural del jacket para el soporte de tres modelos, con la información de la que se dispone en esta fase. Por ello, se reduce el estudio a las opciones que quedan disponibles.

Finalmente, el aerogenerador seleccionado se trata del modelo 6.3M152 de la marca Senvion (Alemania); puesto que presenta, de forma notoria, un mayor rendimiento energético y económico que la otra alternativa de la que se dispone.

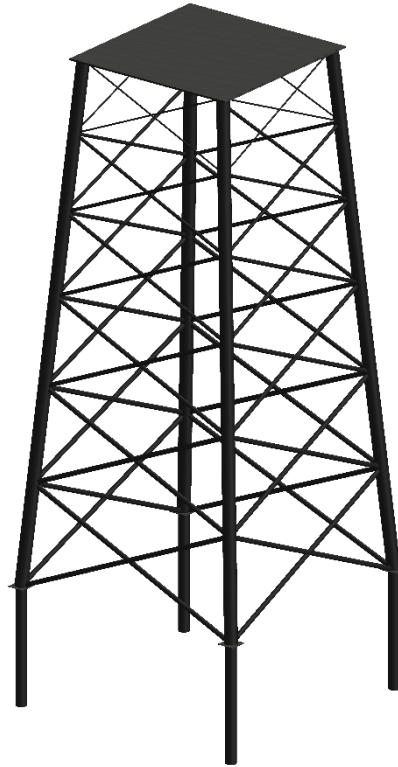
## 5. Referencias

- [1] The Wind Power, [En línea]. Available: [https://www.thewindpower.net/index\\_es.php](https://www.thewindpower.net/index_es.php). [Último acceso: Abril 2019].
- [2] BlommbergNEF, [En línea]. Available: <https://about.bnef.com/>. [Último acceso: Mayo 2019].
- [3] Ministerio de Energía, Turismo y Agenda Digital, *Orden ETU/130/2017, de 17 de febrero*, 2017.
- [4] Instituto Nacional de Estadística (INE), [En línea]. Available: <http://www.ine.es/welcome.shtml>. [Último acceso: Abril 2019].
- [5] Ministerio de Economía y Empresa, [En línea]. Available: <http://www.tesoro.es/>. [Último acceso: Mayo 2019].





## Anexo III: Resultados del cálculo estructural



Autor: *Román Quevedo Reina*

Tutor: *Juan José Aznárez González*

Tutor: *Guillermo Manuel Álamo Meneses*



---

## Contenido

Índice de tablas.....	103
1. Resúmenes .....	105
1.1. Resumen de la geometría .....	105
1.2. Resumen de las secciones .....	105
1.3. Resumen de las comprobaciones .....	106
2. Identificación de los elementos de cálculo de la estructura .....	107
2.1. Identificación de los nodos.....	107
2.2. Identificación de pilotes .....	109
2.3. Identificación de las barras.....	109
3. Comprobaciones de los pilotes.....	113
3.1. Comprobaciones ELU en pilotes .....	113
3.2. Comprobaciones ELU en el terreno.....	114
3.3. Comprobaciones ELF en los pilotes.....	115
4. Comprobaciones en las barras.....	116
4.1. Comprobaciones ELU en las barras .....	116
4.2. Comprobaciones ELF en las barras.....	139





## Índice de tablas

Tabla AIII-1: Resumen de la geometría.....	105
Tabla AIII-2: Resumen de las secciones.....	105
Tabla AIII-3: Resumen de las comprobaciones.....	106
Tabla AIII-4: Identificación de los nodos.....	107
Tabla AIII-5: Identificación de los pilotes.....	109
Tabla AIII-6: Identificación de las barras.....	109
Tabla AIII-7: Comprobaciones ELU en pilotes.....	113
Tabla AIII-8: Comprobaciones ELU en el terreno.....	114
Tabla AIII-9: Comprobaciones ELF en los pilotes.....	115
Tabla AIII-10: Comprobaciones ELU en las barras.....	116
Tabla AIII-11: Comprobaciones ELF en las barras.....	139



## 1. Resúmenes

### 1.1. Resumen de la geometría

Tabla AIII-1: Resumen de la geometría.

<b>Resumen de la geometría</b>	
Material	VL EW36 (S355)
Masa de la estructura (kg)	333.292,85
Número de secciones distintas	8
Altura del jacket (m)	57
Separación en la cima (m)	18
Separación en la base (m)	27
Número de pilotes	4
Longitud de pilotes (m)	13
Número de arriostramientos	6
Altura de la torre	124
Diámetro de la base (m)	6,96
Espesor de la base (mm)	164,6
Diámetro de la cima (m)	3,48
Espesor de la cima (mm)	82,3

### 1.2. Resumen de las secciones

Tabla AIII-2: Resumen de las secciones.

<b>ID sección</b>	<b>Diámetro (m)</b>	<b>Espesor (mm)</b>	<b>Total de longitudes (m)</b>	<b>Masa (kg)</b>
1	1,1680	20,0	52,0000	29.443,86
2	1,4000	25,0	229,4167	194.485,48
3	0,5080	12,5	227,3714	34.730,34
4	0,5080	10,0	212,5139	26.099,74
5	0,4570	10,0	198,6272	21.896,05
6	0,4064	8,0	185,6480	14.592,14
7	0,3556	6,3	173,5168	9.416,73
8	0,1683	4,0	162,1784	2.628,51



### 1.3. Resumen de las comprobaciones

Tabla AIII-3: Resumen de las comprobaciones.

<b>ELU</b>		
<b>Plastificación del material</b>	$\eta = 0,917 \leq 1$	Cumple
<b>Pandeo local del elemento</b>	$\eta = 0,973 \leq 1$	Cumple
<b>Pandeo global del elemento</b>	$\eta = 0,948 \leq 1$	Cumple
<b>Carga lateral sobre pilote</b>	$\eta = 0,976 \leq 1$	Cumple
<b>Momento flector excéntrico sobre pilote</b>	$\eta = 0,105 \leq 1$	Cumple
<b>Momento flector no excéntrico sobre pilote</b>	$\eta = 0,009 \leq 1$	Cumple
<b>ELS</b>		
<b>Giro de la plataforma</b>	$\text{Giro} = 0,239^\circ \leq 0,25^\circ$	Cumple
<b>Resonancia</b>	$f_{1P}/0,95 = 0,177 \leq f = 0,268 \leq f_{3P}/1,05 = 0,305$	Cumple
<b>ELF</b>		
<b>Número de ciclos</b>	$N_{\text{Oleaje}} = 2,010 \cdot 10^4 \leq N_R = 2,405 \cdot 10^5$	Cumple

## 2. Identificación de los elementos de cálculo de la estructura

### 2.1. Identificación de los nodos

Tabla AIII-4: Identificación de los nodos.

ID nodo	Coordenadas (m)		
	Eje x	Eje y	Eje z
1	13,5000	13,5000	0,0000
2	-13,5000	13,5000	0,0000
3	-13,5000	-13,5000	0,0000
4	13,5000	-13,5000	0,0000
5	12,6178	12,6178	11,1739
6	-12,6178	12,6178	11,1739
7	-12,6178	-12,6178	11,1739
8	12,6178	-12,6178	11,1739
9	11,7933	11,7933	21,6177
10	-11,7933	11,7933	21,6177
11	-11,7933	-11,7933	21,6177
12	11,7933	-11,7933	21,6177
13	11,0227	11,0227	31,3791
14	-11,0227	11,0227	31,3791
15	-11,0227	-11,0227	31,3791
16	11,0227	-11,0227	31,3791
17	10,3024	10,3024	40,5026
18	-10,3024	10,3024	40,5026
19	-10,3024	-10,3024	40,5026
20	10,3024	-10,3024	40,5026
21	9,6292	9,6292	49,0299
22	-9,6292	9,6292	49,0299
23	-9,6292	-9,6292	49,0299
24	9,6292	-9,6292	49,0299
25	9,0000	9,0000	57,0000
26	-9,0000	9,0000	57,0000
27	-9,0000	-9,0000	57,0000



ID nodo	Coordenadas (m)		
	Eje x	Eje y	Eje z
28	9,0000	-9,0000	57,0000
29	0,0000	13,0440	5,7757
30	-13,0440	0,0000	5,7757
31	0,0000	-13,0440	5,7757
32	13,0440	0,0000	5,7757
33	0,0000	12,1917	16,5722
34	-12,1917	0,0000	16,5722
35	0,0000	-12,1917	16,5722
36	12,1917	0,0000	16,5722
37	0,0000	11,3950	26,6633
38	-11,3950	0,0000	26,6633
39	0,0000	-11,3950	26,6633
40	11,3950	0,0000	26,6633
41	0,0000	10,6504	36,0949
42	-10,6504	0,0000	36,0949
43	0,0000	-10,6504	36,0949
44	10,6504	0,0000	36,0949
45	0,0000	9,9545	44,9102
46	-9,9545	0,0000	44,9102
47	0,0000	-9,9545	44,9102
48	9,9545	0,0000	44,9102
49	0,0000	9,3040	53,1495
50	-9,3040	0,0000	53,1495
51	0,0000	-9,3040	53,1495
52	9,3040	0,0000	53,1495

## 2.2. Identificación de pilotes

Tabla AIII-5: Identificación de los pilotes.

ID pilote	Nodo	ID sección	Diámetro (m)	Espesor (mm)	Longitud (m)
1	1	1	1,1680	20,0	13,0000
2	2	1	1,1680	20,0	13,0000
3	3	1	1,1680	20,0	13,0000
4	4	1	1,1680	20,0	13,0000

## 2.3. Identificación de las barras

Tabla AIII-6: Identificación de las barras.

ID barra	Nodo inicio	Nodo fin	ID sección	Diámetro (m)	Espesor (mm)	Longitud (m)
1	1	5	2	1,4000	25,0	11,2434
2	5	9	2	1,4000	25,0	10,5087
3	9	13	2	1,4000	25,0	9,8220
4	13	17	2	1,4000	25,0	9,1802
5	17	21	2	1,4000	25,0	8,5803
6	21	25	2	1,4000	25,0	8,0196
7	2	6	2	1,4000	25,0	11,2434
8	6	10	2	1,4000	25,0	10,5087
9	10	14	2	1,4000	25,0	9,8220
10	14	18	2	1,4000	25,0	9,1802
11	18	22	2	1,4000	25,0	8,5803
12	22	26	2	1,4000	25,0	8,0196
13	3	7	2	1,4000	25,0	11,2434
14	7	11	2	1,4000	25,0	10,5087
15	11	15	2	1,4000	25,0	9,8220
16	15	19	2	1,4000	25,0	9,1802
17	19	23	2	1,4000	25,0	8,5803
18	23	27	2	1,4000	25,0	8,0196
19	4	8	2	1,4000	25,0	11,2434
20	8	12	2	1,4000	25,0	10,5087
21	12	16	2	1,4000	25,0	9,8220



ID barra	Nodo inicio	Nodo fin	ID sección	Diámetro (m)	Espesor (mm)	Longitud (m)
22	16	20	2	1,4000	25,0	9,1802
23	20	24	2	1,4000	25,0	8,5803
24	24	28	2	1,4000	25,0	8,0196
25	1	29	3	0,5080	12,5	14,6907
26	2	29	3	0,5080	12,5	14,6907
27	5	29	3	0,5080	12,5	13,7307
28	6	29	3	0,5080	12,5	13,7307
29	2	30	3	0,5080	12,5	14,6907
30	3	30	3	0,5080	12,5	14,6907
31	6	30	3	0,5080	12,5	13,7307
32	7	30	3	0,5080	12,5	13,7307
33	3	31	3	0,5080	12,5	14,6907
34	4	31	3	0,5080	12,5	14,6907
35	7	31	3	0,5080	12,5	13,7307
36	8	31	3	0,5080	12,5	13,7307
37	4	32	3	0,5080	12,5	14,6907
38	1	32	3	0,5080	12,5	14,6907
39	8	32	3	0,5080	12,5	13,7307
40	5	32	3	0,5080	12,5	13,7307
41	5	33	4	0,5080	10,0	13,7307
42	6	33	4	0,5080	10,0	13,7307
43	9	33	4	0,5080	10,0	12,8335
44	10	33	4	0,5080	10,0	12,8335
45	6	34	4	0,5080	10,0	13,7307
46	7	34	4	0,5080	10,0	13,7307
47	10	34	4	0,5080	10,0	12,8335
48	11	34	4	0,5080	10,0	12,8335
49	7	35	4	0,5080	10,0	13,7307
50	8	35	4	0,5080	10,0	13,7307
51	11	35	4	0,5080	10,0	12,8335
52	12	35	4	0,5080	10,0	12,8335
53	8	36	4	0,5080	10,0	13,7307
54	5	36	4	0,5080	10,0	13,7307



<b>ID barra</b>	<b>Nodo inicio</b>	<b>Nodo fin</b>	<b>ID sección</b>	<b>Diámetro (m)</b>	<b>Espesor (mm)</b>	<b>Longitud (m)</b>
55	12	36	4	0,5080	10,0	12,8335
56	9	36	4	0,5080	10,0	12,8335
57	9	37	5	0,4570	10,0	12,8335
58	10	37	5	0,4570	10,0	12,8335
59	13	37	5	0,4570	10,0	11,9949
60	14	37	5	0,4570	10,0	11,9949
61	10	38	5	0,4570	10,0	12,8335
62	11	38	5	0,4570	10,0	12,8335
63	14	38	5	0,4570	10,0	11,9949
64	15	38	5	0,4570	10,0	11,9949
65	11	39	5	0,4570	10,0	12,8335
66	12	39	5	0,4570	10,0	12,8335
67	15	39	5	0,4570	10,0	11,9949
68	16	39	5	0,4570	10,0	11,9949
69	12	40	5	0,4570	10,0	12,8335
70	9	40	5	0,4570	10,0	12,8335
71	16	40	5	0,4570	10,0	11,9949
72	13	40	5	0,4570	10,0	11,9949
73	13	41	6	0,4064	8,0	11,9949
74	14	41	6	0,4064	8,0	11,9949
75	17	41	6	0,4064	8,0	11,2111
76	18	41	6	0,4064	8,0	11,2111
77	14	42	6	0,4064	8,0	11,9949
78	15	42	6	0,4064	8,0	11,9949
79	18	42	6	0,4064	8,0	11,2111
80	19	42	6	0,4064	8,0	11,2111
81	15	43	6	0,4064	8,0	11,9949
82	16	43	6	0,4064	8,0	11,9949
83	19	43	6	0,4064	8,0	11,2111
84	20	43	6	0,4064	8,0	11,2111
85	16	44	6	0,4064	8,0	11,9949
86	13	44	6	0,4064	8,0	11,9949
87	20	44	6	0,4064	8,0	11,2111

ID barra	Nodo inicio	Nodo fin	ID sección	Diámetro (m)	Espesor (mm)	Longitud (m)
88	17	44	6	0,4064	8,0	11,2111
89	17	45	7	0,3556	6,3	11,2111
90	18	45	7	0,3556	6,3	11,2111
91	21	45	7	0,3556	6,3	10,4785
92	22	45	7	0,3556	6,3	10,4785
93	18	46	7	0,3556	6,3	11,2111
94	19	46	7	0,3556	6,3	11,2111
95	22	46	7	0,3556	6,3	10,4785
96	23	46	7	0,3556	6,3	10,4785
97	19	47	7	0,3556	6,3	11,2111
98	20	47	7	0,3556	6,3	11,2111
99	23	47	7	0,3556	6,3	10,4785
100	24	47	7	0,3556	6,3	10,4785
101	20	48	7	0,3556	6,3	11,2111
102	17	48	7	0,3556	6,3	11,2111
103	24	48	7	0,3556	6,3	10,4785
104	21	48	7	0,3556	6,3	10,4785
105	21	49	8	0,1683	4,0	10,4785
106	22	49	8	0,1683	4,0	10,4785
107	25	49	8	0,1683	4,0	9,7938
108	26	49	8	0,1683	4,0	9,7938
109	22	50	8	0,1683	4,0	10,4785
110	23	50	8	0,1683	4,0	10,4785
111	26	50	8	0,1683	4,0	9,7938
112	27	50	8	0,1683	4,0	9,7938
113	23	51	8	0,1683	4,0	10,4785
114	24	51	8	0,1683	4,0	10,4785
115	27	51	8	0,1683	4,0	9,7938
116	28	51	8	0,1683	4,0	9,7938
117	24	52	8	0,1683	4,0	10,4785
118	21	52	8	0,1683	4,0	10,4785
119	28	52	8	0,1683	4,0	9,7938
120	25	52	8	0,1683	4,0	9,7938

### 3. Comprobaciones de los pilotes

#### 3.1. Comprobaciones ELU en pilotes

Tabla AIII-7: Comprobaciones ELU en pilotes.

ID pilote	hipótesis	Plastificación			Pandeo local		
		S (MPa)	$f_{yd}$ (MPa)	$\eta$	S (MPa)	$f_{yd}$ (MPa)	$\eta$
1	1	267,77	322,73	0,830	268,04	302,63	0,886
1	2	136,72	322,73	0,424	133,52	263,87	0,506
1	3	141,94	322,73	0,440	142,19	266,18	0,534
1	4	61,91	322,73	0,192	62,15	256,22	0,243
1	5	45,18	322,73	0,140	44,59	276,52	0,161
1	Envolvente	267,77	322,73	0,830	268,04	302,63	0,886
2	1	44,88	322,73	0,139	45,15	296,45	0,152
2	2	15,72	322,73	0,049	15,72	219,16	0,072
2	3	57,18	322,73	0,177	56,94	287,49	0,198
2	4	12,05	322,73	0,037	12,23	224,21	0,055
2	5	9,34	322,73	0,029	8,80	212,16	0,041
2	Envolvente	57,18	322,73	0,177	56,94	287,49	0,198
3	1	55,18	322,73	0,171	55,44	284,95	0,195
3	2	17,44	322,73	0,054	17,59	223,02	0,079
3	3	52,85	322,73	0,164	52,61	293,50	0,179
3	4	15,08	322,73	0,047	15,29	235,92	0,065
3	5	16,62	322,73	0,051	16,81	230,23	0,073
3	Envolvente	55,18	322,73	0,171	55,44	284,95	0,195
4	1	276,39	322,73	0,856	276,66	303,75	0,911
4	2	143,22	322,73	0,444	139,98	260,48	0,537
4	3	145,95	322,73	0,452	146,20	263,60	0,555
4	4	67,15	322,73	0,208	67,38	253,94	0,265
4	5	58,55	322,73	0,181	58,78	255,85	0,230
4	Envolvente	276,39	322,73	0,856	276,66	303,75	0,911

### 3.2. Comprobaciones ELU en el terreno

Tabla AIII-8: Comprobaciones ELU en el terreno.

ID pilote	hipótesis	Carga lateral			Flector excéntrico			Flector sin excentricidad		
		F (kN)	FR (kN)	$\eta$	M (kNm)	MR (kNm)	$\eta$	M (kNm)	MR (kNm)	$\eta$
1	1	1.750,85	1.912,13	0,916	1.024,29	10.478,12	0,098	110,20	25.976,39	0,004
1	2	1.149,47	1.952,21	0,589	351,88	10.252,89	0,034	44,50	25.976,39	0,002
1	3	1.159,91	1.967,79	0,589	232,92	10.166,20	0,023	38,83	25.976,39	0,001
1	4	620,65	1.993,59	0,311	36,98	10.110,98	0,004	10,78	25.976,39	0,000
1	5	259,92	1.950,63	0,133	82,38	10.261,74	0,008	62,63	25.976,39	0,002
1	Envolvente	1.750,85	1.912,13	0,916	1.024,29	10.478,12	0,098	110,20	25.976,39	0,004
2	1	144,90	1.873,47	0,077	125,39	10.698,31	0,012	148,61	25.976,39	0,006
2	2	323,89	1.982,63	0,163	42,86	10.572,22	0,004	42,80	25.976,39	0,002
2	3	566,92	1.987,65	0,285	39,07	10.056,32	0,004	17,21	25.976,39	0,001
2	4	198,97	1.940,68	0,103	76,64	10.317,37	0,007	55,90	25.976,39	0,002
2	5	181,21	1.951,31	0,093	56,59	10.257,95	0,006	44,16	25.976,39	0,002
2	Envolvente	566,92	1.987,65	0,285	125,39	10.698,31	0,012	148,61	25.976,39	0,006
3	1	294,03	1.921,59	0,153	152,36	10.424,71	0,015	232,85	25.976,39	0,009
3	2	309,11	1.997,82	0,155	25,08	10.330,93	0,002	71,16	25.976,39	0,003
3	3	472,81	1.986,68	0,238	35,59	10.061,66	0,004	42,15	25.976,39	0,002
3	4	205,38	1.972,99	0,104	34,09	10.137,35	0,003	69,61	25.976,39	0,003
3	5	254,64	1.971,88	0,129	44,16	10.143,48	0,004	29,35	25.976,39	0,001
3	Envolvente	472,81	1.986,68	0,238	152,36	10.424,71	0,015	232,85	25.976,39	0,009
4	1	1.865,65	1.911,31	0,976	1.102,36	10.482,77	0,105	26,90	25.976,39	0,001
4	2	1.303,47	1.955,24	0,667	372,19	10.236,02	0,036	23,35	25.976,39	0,001
4	3	1.268,81	1.970,79	0,644	229,31	10.149,56	0,023	21,77	25.976,39	0,001
4	4	708,28	1.997,48	0,355	55,06	10.144,09	0,005	21,72	25.976,39	0,001
4	5	590,36	1.993,17	0,296	47,11	10.132,10	0,005	19,65	25.976,39	0,001
4	Envolvente	1.865,65	1.911,31	0,976	1.102,36	10.482,77	0,105	26,90	25.976,39	0,001

### 3.3. Comprobaciones ELF en los pilotes

Tabla AIII-9: Comprobaciones ELF en los pilotes.

ID pilote	hipótesis	Ciclos que recibe	Ciclos que resiste	$\eta$
1	1	$2,010 \cdot 10^4$	$5,973 \cdot 10^5$	0,034
1	2	$1,191 \cdot 10^3$	$4,553 \cdot 10^6$	0,000
1	3	$1,418 \cdot 10^4$	$4,248 \cdot 10^6$	0,003
1	4	$1,191 \cdot 10^3$	$4,888 \cdot 10^8$	0,000
1	5	$1,191 \cdot 10^3$	$2,376 \cdot 10^9$	0,000
1	Envolvente	$2,010 \cdot 10^4$	$5,973 \cdot 10^5$	0,034
2	1	$2,010 \cdot 10^4$	$2,073 \cdot 10^9$	0,000
2	2	$1,191 \cdot 10^3$	$2,950 \cdot 10^{11}$	0,000
2	3	$1,418 \cdot 10^4$	$7,508 \cdot 10^8$	0,000
2	4	$1,191 \cdot 10^3$	$1,405 \cdot 10^{12}$	0,000
2	5	$1,191 \cdot 10^3$	$3,592 \cdot 10^{12}$	0,000
2	Envolvente	$1,418 \cdot 10^4$	$7,508 \cdot 10^8$	0,000
3	1	$2,010 \cdot 10^4$	$7,445 \cdot 10^8$	0,000
3	2	$1,191 \cdot 10^3$	$2,079 \cdot 10^{11}$	0,000
3	3	$1,418 \cdot 10^4$	$1,119 \cdot 10^9$	0,000
3	4	$1,191 \cdot 10^3$	$5,174 \cdot 10^{11}$	0,000
3	5	$1,191 \cdot 10^3$	$2,784 \cdot 10^{11}$	0,000
3	Envolvente	$2,010 \cdot 10^4$	$7,445 \cdot 10^8$	0,000
4	1	$2,010 \cdot 10^4$	$5,432 \cdot 10^5$	0,037
4	2	$1,191 \cdot 10^3$	$3,957 \cdot 10^6$	0,000
4	3	$1,418 \cdot 10^4$	$3,911 \cdot 10^6$	0,004
4	4	$1,191 \cdot 10^3$	$3,271 \cdot 10^8$	0,000
4	5	$1,191 \cdot 10^3$	$6,730 \cdot 10^8$	0,000
4	Envolvente	$2,010 \cdot 10^4$	$5,432 \cdot 10^5$	0,037



## 4. Comprobaciones en las barras

### 4.1. Comprobaciones ELU en las barras

Tabla AIII-10: Comprobaciones ELU en las barras.

ID barra	hipótesis	Plastificación			Pandeo local			Pandeo global
		S (MPa)	$f_{yd}$ (MPa)	$\eta$	S (MPa)	$f_{yd}$ (MPa)	$\eta$	$\eta$
1	1	176,06	322,73	0,546	176,33	304,07	0,580	0
1	2	180,23	322,73	0,558	180,50	304,02	0,594	0
1	3	284,52	322,73	0,882	284,79	304,20	0,936	0
1	4	169,63	322,73	0,526	169,90	303,91	0,559	0
1	5	172,27	322,73	0,534	172,54	303,94	0,568	0
1	Envolvente	284,52	322,73	0,882	284,79	304,20	0,936	0
2	1	148,18	322,73	0,459	148,39	304,08	0,488	0
2	2	163,08	322,73	0,505	163,29	303,99	0,537	0
2	3	269,93	322,73	0,836	270,14	304,02	0,889	0
2	4	145,16	322,73	0,450	145,37	303,94	0,478	0
2	5	161,56	322,73	0,501	161,77	304,13	0,532	0
2	Envolvente	269,93	322,73	0,836	270,14	304,02	0,889	0
3	1	142,82	322,73	0,443	142,98	303,58	0,471	0
3	2	156,15	322,73	0,484	156,30	303,30	0,515	0
3	3	262,40	322,73	0,813	262,55	303,69	0,865	0
3	4	137,61	322,73	0,426	137,76	302,87	0,455	0
3	5	153,73	322,73	0,476	153,88	303,81	0,507	0
3	Envolvente	262,40	322,73	0,813	262,55	303,69	0,865	0
4	1	139,70	322,73	0,433	139,79	303,55	0,461	0
4	2	153,18	322,73	0,475	153,28	303,25	0,505	0
4	3	259,84	322,73	0,805	259,94	303,65	0,856	0
4	4	133,59	322,73	0,414	133,69	302,69	0,442	0
4	5	149,98	322,73	0,465	150,07	303,81	0,494	0
4	Envolvente	259,84	322,73	0,805	259,94	303,65	0,856	0
5	1	137,14	322,73	0,425	137,14	302,19	0,454	0
5	2	149,11	322,73	0,462	149,16	302,90	0,492	0
5	3	256,28	322,73	0,794	256,30	303,43	0,845	0

ID barra	hipótesis	Plastificación			Pandeo local			Pandeo global
		S (MPa)	$f_{yd}$ (MPa)	$\eta$	S (MPa)	$f_{yd}$ (MPa)	$\eta$	$\eta$
5	4	128,07	322,73	0,397	128,11	302,10	0,424	0
5	5	148,96	322,73	0,462	148,44	301,88	0,492	0
5	Envolvente	256,28	322,73	0,794	256,30	303,43	0,845	0
6	1	146,69	322,73	0,455	146,69	303,64	0,483	0
6	2	160,20	322,73	0,496	160,20	303,45	0,528	0
6	3	276,90	322,73	0,858	276,86	303,75	0,911	0
6	4	129,54	322,73	0,401	129,51	302,90	0,428	0
6	5	160,56	322,73	0,498	160,56	302,13	0,531	0
6	Envolvente	276,90	322,73	0,858	276,86	303,75	0,911	0
7	1	41,39	322,73	0,128	41,67	302,81	0,138	0
7	2	32,82	322,73	0,102	33,10	302,41	0,109	0
7	3	129,68	322,73	0,402	129,41	308,69	0,419	0
7	4	47,17	322,73	0,146	47,44	303,32	0,156	0
7	5	29,52	322,73	0,091	29,74	302,70	0,098	0
7	Envolvente	129,68	322,73	0,402	129,41	308,69	0,419	0
8	1	40,31	322,73	0,125	40,52	302,36	0,134	0
8	2	27,70	322,73	0,086	27,91	302,15	0,092	0
8	3	113,52	322,73	0,352	113,32	308,68	0,367	0
8	4	45,61	322,73	0,141	45,82	303,16	0,151	0
8	5	28,60	322,73	0,089	28,81	302,27	0,095	0
8	Envolvente	113,52	322,73	0,352	113,32	308,68	0,367	0
9	1	31,95	322,73	0,099	32,10	296,18	0,108	0
9	2	20,02	322,73	0,062	20,13	295,18	0,068	0
9	3	105,86	322,73	0,328	105,71	308,64	0,343	0
9	4	38,19	322,73	0,118	38,24	301,58	0,127	0
9	5	19,33	322,73	0,060	19,49	298,44	0,065	0
9	Envolvente	105,86	322,73	0,328	105,71	308,64	0,343	0
10	1	30,72	322,73	0,095	30,79	290,81	0,106	0
10	2	19,57	322,73	0,061	19,63	288,26	0,068	0
10	3	105,28	322,73	0,326	105,19	308,60	0,341	0
10	4	38,54	322,73	0,119	38,52	294,57	0,131	0



ID barra	hipótesis	Plastificación			Pandeo local			Pandeo global
		S (MPa)	f <sub>yd</sub> (MPa)	η	S (MPa)	f <sub>yd</sub> (MPa)	η	η
10	5	17,82	322,73	0,055	16,80	266,93	0,063	0
10	Envolvente	105,28	322,73	0,326	105,19	308,60	0,341	0
11	1	30,14	322,73	0,093	30,13	290,64	0,104	0
11	2	18,02	322,73	0,056	17,98	273,21	0,066	0
11	3	104,61	322,73	0,324	104,56	308,69	0,339	0
11	4	38,59	322,73	0,120	38,64	289,13	0,134	0
11	5	18,46	322,73	0,057	18,46	258,43	0,071	0
11	Envolvente	104,61	322,73	0,324	104,56	308,69	0,339	0
12	1	28,77	322,73	0,089	28,77	288,62	0,100	0
12	2	17,93	322,73	0,056	17,93	276,05	0,065	0
12	3	115,67	322,73	0,358	115,67	308,65	0,375	0
12	4	39,59	322,73	0,123	38,95	287,71	0,135	0
12	5	19,05	322,73	0,059	19,05	261,93	0,073	0
12	Envolvente	115,67	322,73	0,358	115,67	308,65	0,375	0
13	1	53,78	322,73	0,167	54,05	303,62	0,178	0
13	2	43,12	322,73	0,134	43,40	302,76	0,143	0
13	3	113,36	322,73	0,351	113,09	308,67	0,366	0
13	4	57,39	322,73	0,178	57,66	303,27	0,190	0
13	5	53,13	322,73	0,165	53,40	303,35	0,176	0
13	Envolvente	113,36	322,73	0,351	113,09	308,67	0,366	0
14	1	45,82	322,73	0,142	46,03	303,62	0,152	0
14	2	31,79	322,73	0,099	32,00	302,85	0,106	0
14	3	111,23	322,73	0,345	111,02	308,63	0,360	0
14	4	49,53	322,73	0,153	49,74	303,60	0,164	0
14	5	34,06	322,73	0,106	34,27	302,35	0,113	0
14	Envolvente	111,23	322,73	0,345	111,02	308,63	0,360	0
15	1	32,87	322,73	0,102	33,01	303,15	0,109	0
15	2	21,33	322,73	0,066	21,46	302,54	0,071	0
15	3	104,21	322,73	0,323	104,06	308,49	0,337	0
15	4	39,55	322,73	0,123	39,67	303,61	0,131	0
15	5	23,68	322,73	0,073	23,83	294,30	0,081	0



ID barra	hipótesis	Plastificación			Pandeo local			Pandeo global
		S (MPa)	f <sub>yd</sub> (MPa)	η	S (MPa)	f <sub>yd</sub> (MPa)	η	η
15	Envolvente	104,21	322,73	0,323	104,06	308,49	0,337	0
16	1	30,66	322,73	0,095	30,21	280,40	0,108	0
16	2	19,38	322,73	0,060	18,17	270,99	0,067	0
16	3	104,99	322,73	0,325	104,89	308,47	0,340	0
16	4	38,75	322,73	0,120	38,62	292,94	0,132	0
16	5	20,65	322,73	0,064	20,47	269,74	0,076	0
16	Envolvente	104,99	322,73	0,325	104,89	308,47	0,340	0
17	1	31,01	322,73	0,096	31,05	275,54	0,113	0
17	2	18,98	322,73	0,059	19,02	265,90	0,072	0
17	3	104,67	322,73	0,324	104,62	308,26	0,339	0
17	4	38,96	322,73	0,121	39,01	285,60	0,137	0
17	5	20,11	322,73	0,062	19,49	258,62	0,075	0
17	Envolvente	104,67	322,73	0,324	104,62	308,26	0,339	0
18	1	31,27	322,73	0,097	31,27	272,09	0,115	0
18	2	19,48	322,73	0,060	19,48	262,16	0,074	0
18	3	115,42	322,73	0,358	115,42	308,68	0,374	0
18	4	42,50	322,73	0,132	42,50	284,68	0,149	0
18	5	19,47	322,73	0,060	19,47	263,25	0,074	0
18	Envolvente	115,42	322,73	0,358	115,42	308,68	0,374	0
19	1	178,65	322,73	0,554	178,92	304,02	0,589	0
19	2	191,45	322,73	0,593	191,72	304,08	0,630	0
19	3	295,79	322,73	0,917	296,06	304,19	0,973	0
19	4	182,90	322,73	0,567	183,17	304,03	0,602	0
19	5	197,54	322,73	0,612	197,81	303,87	0,651	0
19	Envolvente	295,79	322,73	0,917	296,06	304,19	0,973	0
20	1	150,93	322,73	0,468	151,09	303,73	0,497	0
20	2	166,16	322,73	0,515	166,37	303,91	0,547	0
20	3	271,78	322,73	0,842	271,99	304,03	0,895	0
20	4	147,63	322,73	0,457	147,84	303,92	0,486	0
20	5	163,84	322,73	0,508	163,99	304,09	0,539	0
20	Envolvente	271,78	322,73	0,842	271,99	304,03	0,895	0



ID barra	hipótesis	Plastificación			Pandeo local			Pandeo global
		S (MPa)	f <sub>yd</sub> (MPa)	η	S (MPa)	f <sub>yd</sub> (MPa)	η	η
21	1	144,83	322,73	0,449	144,99	303,56	0,478	0
21	2	158,81	322,73	0,492	158,96	303,65	0,524	0
21	3	265,16	322,73	0,822	265,31	303,92	0,873	0
21	4	140,07	322,73	0,434	140,22	303,40	0,462	0
21	5	159,00	322,73	0,493	159,16	303,23	0,525	0
21	Envolvente	265,16	322,73	0,822	265,31	303,92	0,873	0
22	1	140,45	322,73	0,435	140,55	303,47	0,463	0
22	2	154,12	322,73	0,478	154,21	303,52	0,508	0
22	3	260,78	322,73	0,808	260,88	303,86	0,859	0
22	4	134,50	322,73	0,417	134,60	303,15	0,444	0
22	5	153,60	322,73	0,476	153,70	302,83	0,508	0
22	Envolvente	260,78	322,73	0,808	260,88	303,86	0,859	0
23	1	136,59	322,73	0,423	136,52	302,50	0,451	0
23	2	149,06	322,73	0,462	148,90	303,17	0,491	0
23	3	256,30	322,73	0,794	256,24	303,59	0,844	0
23	4	127,70	322,73	0,396	127,74	302,61	0,422	0
23	5	150,39	322,73	0,466	150,38	302,66	0,497	0
23	Envolvente	256,30	322,73	0,794	256,24	303,59	0,844	0
24	1	146,48	322,73	0,454	146,48	303,12	0,483	0
24	2	160,59	322,73	0,498	160,59	303,57	0,529	0
24	3	277,20	322,73	0,859	277,20	304,02	0,912	0
24	4	128,97	322,73	0,400	128,41	301,76	0,426	0
24	5	159,63	322,73	0,495	159,63	303,73	0,526	0
24	Envolvente	277,20	322,73	0,859	277,20	304,02	0,912	0
25	1	208,67	322,73	0,647	208,94	306,10	0,683	0,812
25	2	178,04	322,73	0,552	178,31	305,87	0,583	0,767
25	3	188,53	322,73	0,584	188,80	305,87	0,617	0,807
25	4	200,63	322,73	0,622	200,90	305,89	0,657	0,907
25	5	147,26	322,73	0,456	147,53	306,14	0,482	0,561
25	Envolvente	208,67	322,73	0,647	208,94	306,10	0,683	0,907
26	1	228,43	322,73	0,708	228,70	306,28	0,747	0,909

ID barra	hipótesis	Plastificación			Pandeo local			Pandeo global
		S (MPa)	f <sub>yd</sub> (MPa)	η	S (MPa)	f <sub>yd</sub> (MPa)	η	η
26	2	168,52	322,73	0,522	168,79	306,31	0,551	0,690
26	3	176,19	322,73	0,546	176,46	306,32	0,576	0,719
26	4	172,19	322,73	0,534	172,46	306,32	0,563	0,690
26	5	139,27	322,73	0,432	139,00	308,69	0,450	0,480
26	Envolvente	228,43	322,73	0,708	228,70	306,28	0,747	0,909
27	1	191,59	322,73	0,594	191,80	306,00	0,627	0,768
27	2	123,76	322,73	0,383	123,55	308,69	0,400	0,479
27	3	130,20	322,73	0,403	130,41	306,33	0,426	0,513
27	4	142,01	322,73	0,440	141,80	308,69	0,459	0,450
27	5	143,98	322,73	0,446	143,77	308,64	0,466	0,489
27	Envolvente	191,59	322,73	0,594	191,80	306,00	0,627	0,768
28	1	210,25	322,73	0,651	210,46	306,24	0,687	0,872
28	2	163,27	322,73	0,506	163,48	306,31	0,534	0,687
28	3	165,00	322,73	0,511	165,21	306,35	0,539	0,687
28	4	186,58	322,73	0,578	186,79	306,40	0,610	0,808
28	5	144,37	322,73	0,447	144,58	305,93	0,473	0,524
28	Envolvente	210,25	322,73	0,651	210,46	306,24	0,687	0,872
29	1	105,33	322,73	0,326	105,06	308,68	0,340	0,344
29	2	116,60	322,73	0,361	116,33	308,69	0,377	0,375
29	3	123,17	322,73	0,382	122,90	308,69	0,398	0,379
29	4	147,81	322,73	0,458	147,54	308,69	0,478	0,482
29	5	156,95	322,73	0,486	157,22	306,30	0,513	0,609
29	Envolvente	156,95	322,73	0,486	157,22	306,30	0,513	0,609
30	1	70,82	322,73	0,219	71,09	305,40	0,233	0,310
30	2	112,03	322,73	0,347	112,30	306,04	0,367	0,445
30	3	106,87	322,73	0,331	107,14	305,92	0,350	0,413
30	4	144,76	322,73	0,449	145,03	306,08	0,474	0,561
30	5	189,92	322,73	0,588	190,19	306,00	0,622	0,851
30	Envolvente	189,92	322,73	0,588	190,19	306,00	0,622	0,851
31	1	105,86	322,73	0,328	106,07	306,29	0,346	0,427
31	2	117,84	322,73	0,365	118,05	306,03	0,386	0,443



ID barra	hipótesis	Plastificación			Pandeo local			Pandeo global
		S (MPa)	f <sub>yd</sub> (MPa)	η	S (MPa)	f <sub>yd</sub> (MPa)	η	η
31	3	116,33	322,73	0,360	116,54	305,96	0,381	0,427
31	4	148,96	322,73	0,462	149,17	305,97	0,488	0,561
31	5	167,15	322,73	0,518	167,36	306,38	0,546	0,731
31	Envolvente	167,15	322,73	0,518	167,36	306,38	0,546	0,731
32	1	74,36	322,73	0,230	74,13	308,24	0,240	0,216
32	2	115,05	322,73	0,357	114,84	308,63	0,372	0,389
32	3	121,66	322,73	0,377	121,45	308,63	0,394	0,371
32	4	146,81	322,73	0,455	146,61	308,63	0,475	0,500
32	5	144,96	322,73	0,449	144,75	308,69	0,469	0,418
32	Envolvente	146,81	322,73	0,455	146,61	308,63	0,475	0,500
33	1	204,50	322,73	0,634	204,77	306,33	0,668	0,813
33	2	158,76	322,73	0,492	159,03	306,29	0,519	0,674
33	3	164,97	322,73	0,511	165,25	306,29	0,540	0,685
33	4	160,78	322,73	0,498	161,06	306,32	0,526	0,657
33	5	133,85	322,73	0,415	134,12	305,98	0,438	0,469
33	Envolvente	204,50	322,73	0,634	204,77	306,33	0,668	0,813
34	1	218,40	322,73	0,677	218,67	306,39	0,714	0,850
34	2	177,13	322,73	0,549	177,40	306,32	0,579	0,730
34	3	188,45	322,73	0,584	188,72	306,34	0,616	0,769
34	4	198,03	322,73	0,614	198,30	306,30	0,647	0,864
34	5	142,65	322,73	0,442	142,92	306,15	0,467	0,558
34	Envolvente	218,40	322,73	0,677	218,67	306,39	0,714	0,864
35	1	215,68	322,73	0,668	215,89	305,77	0,706	0,863
35	2	152,78	322,73	0,473	152,99	306,11	0,500	0,637
35	3	156,82	322,73	0,486	157,03	306,17	0,513	0,651
35	4	172,95	322,73	0,536	173,16	306,19	0,566	0,766
35	5	141,23	322,73	0,438	141,44	306,03	0,462	0,521
35	Envolvente	215,68	322,73	0,668	215,89	305,77	0,706	0,863
36	1	186,00	322,73	0,576	186,21	306,23	0,608	0,739
36	2	123,36	322,73	0,382	122,58	306,24	0,400	0,478
36	3	132,42	322,73	0,410	132,63	306,25	0,433	0,515

ID barra	hipótesis	Plastificación			Pandeo local			Pandeo global
		S (MPa)	f <sub>yd</sub> (MPa)	η	S (MPa)	f <sub>yd</sub> (MPa)	η	η
36	4	152,49	322,73	0,473	152,28	308,66	0,493	0,447
36	5	130,15	322,73	0,403	129,94	308,64	0,421	0,439
36	Envolvente	186,00	322,73	0,576	186,21	306,23	0,608	0,739
37	1	100,07	322,73	0,310	100,34	306,22	0,328	0,427
37	2	113,04	322,73	0,350	113,31	306,15	0,370	0,455
37	3	118,90	322,73	0,368	119,17	306,06	0,389	0,481
37	4	147,51	322,73	0,457	147,79	306,18	0,483	0,589
37	5	197,36	322,73	0,612	197,64	306,39	0,645	0,874
37	Envolvente	197,36	322,73	0,612	197,64	306,39	0,645	0,874
38	1	64,06	322,73	0,199	64,34	305,94	0,210	0,224
38	2	96,42	322,73	0,299	96,15	308,69	0,311	0,329
38	3	98,44	322,73	0,305	98,71	305,86	0,323	0,347
38	4	127,11	322,73	0,394	126,84	308,69	0,411	0,434
38	5	158,98	322,73	0,493	159,25	306,32	0,520	0,633
38	Envolvente	158,98	322,73	0,493	159,25	306,32	0,520	0,633
39	1	89,19	322,73	0,276	88,98	308,67	0,288	0,278
39	2	98,52	322,73	0,305	98,31	308,64	0,319	0,335
39	3	94,23	322,73	0,292	94,02	308,61	0,305	0,303
39	4	131,87	322,73	0,409	131,66	308,63	0,427	0,445
39	5	137,29	322,73	0,425	137,08	308,67	0,444	0,479
39	Envolvente	137,29	322,73	0,425	137,08	308,67	0,444	0,479
40	1	79,11	322,73	0,245	79,32	305,74	0,259	0,319
40	2	111,09	322,73	0,344	111,30	305,98	0,364	0,443
40	3	116,99	322,73	0,362	117,20	306,03	0,383	0,480
40	4	142,61	322,73	0,442	142,82	305,93	0,467	0,563
40	5	178,15	322,73	0,552	178,36	306,37	0,582	0,798
40	Envolvente	178,15	322,73	0,552	178,36	306,37	0,582	0,798
41	1	192,54	322,73	0,597	192,75	304,50	0,633	0,757
41	2	154,34	322,73	0,478	154,55	304,16	0,508	0,678
41	3	160,40	322,73	0,497	160,61	304,19	0,528	0,695
41	4	183,49	322,73	0,569	183,70	304,13	0,604	0,836

ID barra	hipótesis	Plastificación			Pandeo local			Pandeo global
		S (MPa)	f <sub>yd</sub> (MPa)	η	S (MPa)	f <sub>yd</sub> (MPa)	η	η
41	5	153,93	322,73	0,477	154,14	304,76	0,506	0,590
41	Envolvente	192,54	322,73	0,597	192,75	304,50	0,633	0,836
42	1	216,23	322,73	0,670	216,44	304,86	0,710	0,894
42	2	160,13	322,73	0,496	160,34	304,83	0,526	0,667
42	3	168,65	322,73	0,523	168,86	304,86	0,554	0,701
42	4	161,87	322,73	0,502	162,08	304,84	0,532	0,660
42	5	147,83	322,73	0,458	147,63	308,69	0,478	0,530
42	Envolvente	216,23	322,73	0,670	216,44	304,86	0,710	0,894
43	1	178,50	322,73	0,553	178,65	304,27	0,587	0,738
43	2	118,56	322,73	0,367	118,41	308,69	0,384	0,443
43	3	119,36	322,73	0,370	119,24	305,01	0,391	0,483
43	4	143,13	322,73	0,443	142,97	308,68	0,463	0,410
43	5	159,30	322,73	0,494	159,15	308,61	0,516	0,570
43	Envolvente	178,50	322,73	0,553	178,65	304,27	0,587	0,738
44	1	204,60	322,73	0,634	204,45	308,57	0,663	0,830
44	2	151,59	322,73	0,470	151,74	304,90	0,498	0,657
44	3	152,12	322,73	0,471	152,27	305,00	0,499	0,652
44	4	176,26	322,73	0,546	176,41	305,03	0,578	0,776
44	5	152,85	322,73	0,474	153,01	304,30	0,503	0,567
44	Envolvente	204,60	322,73	0,634	204,45	308,57	0,663	0,830
45	1	107,72	322,73	0,334	107,51	308,65	0,348	0,376
45	2	119,74	322,73	0,371	119,53	308,69	0,387	0,414
45	3	118,28	322,73	0,366	118,07	308,69	0,382	0,415
45	4	153,44	322,73	0,475	153,23	308,69	0,496	0,533
45	5	149,59	322,73	0,464	149,80	304,76	0,492	0,610
45	Envolvente	153,44	322,73	0,475	153,23	308,69	0,496	0,610
46	1	73,84	322,73	0,229	74,05	303,33	0,244	0,302
46	2	120,95	322,73	0,375	121,16	304,61	0,398	0,491
46	3	122,39	322,73	0,379	122,60	304,48	0,403	0,516
46	4	154,92	322,73	0,480	155,13	304,69	0,509	0,619
46	5	178,22	322,73	0,552	178,43	304,25	0,586	0,810

ID barra	hipótesis	Plastificación			Pandeo local			Pandeo global
		S (MPa)	f <sub>yd</sub> (MPa)	η	S (MPa)	f <sub>yd</sub> (MPa)	η	η
46	Envolvente	178,22	322,73	0,552	178,43	304,25	0,586	0,810
47	1	110,57	322,73	0,343	110,72	304,85	0,363	0,453
47	2	125,87	322,73	0,390	126,03	304,37	0,414	0,495
47	3	131,27	322,73	0,407	131,42	304,31	0,432	0,507
47	4	160,58	322,73	0,498	160,73	304,33	0,528	0,625
47	5	160,66	322,73	0,498	160,81	305,01	0,527	0,713
47	Envolvente	160,66	322,73	0,498	160,73	304,33	0,528	0,713
48	1	75,86	322,73	0,235	75,71	308,27	0,246	0,220
48	2	123,39	322,73	0,382	123,24	308,60	0,399	0,438
48	3	121,34	322,73	0,376	121,19	308,58	0,393	0,433
48	4	159,51	322,73	0,494	159,36	308,61	0,516	0,568
48	5	140,42	322,73	0,435	140,27	308,69	0,454	0,404
48	Envolvente	159,51	322,73	0,494	159,36	308,61	0,516	0,568
49	1	197,46	322,73	0,612	197,66	304,83	0,648	0,805
49	2	153,75	322,73	0,476	153,96	304,74	0,505	0,660
49	3	161,67	322,73	0,501	161,88	304,77	0,531	0,686
49	4	153,11	322,73	0,474	153,32	304,80	0,503	0,625
49	5	143,53	322,73	0,445	143,32	308,69	0,464	0,521
49	Envolvente	197,46	322,73	0,612	197,66	304,83	0,648	0,805
50	1	198,58	322,73	0,615	198,79	305,01	0,652	0,786
50	2	152,45	322,73	0,472	152,66	304,75	0,501	0,645
50	3	159,24	322,73	0,493	159,45	304,74	0,523	0,663
50	4	180,94	322,73	0,561	181,15	304,85	0,594	0,798
50	5	143,82	322,73	0,446	144,03	304,70	0,473	0,554
50	Envolvente	198,58	322,73	0,615	198,79	305,01	0,652	0,798
51	1	202,33	322,73	0,627	202,48	304,27	0,665	0,826
51	2	141,28	322,73	0,438	141,43	304,41	0,465	0,594
51	3	143,65	322,73	0,445	143,80	304,48	0,472	0,602
51	4	162,40	322,73	0,503	162,56	304,59	0,534	0,717
51	5	147,18	322,73	0,456	147,33	304,23	0,484	0,542
51	Envolvente	202,33	322,73	0,627	202,48	304,27	0,665	0,826



ID barra	hipótesis	Plastificación			Pandeo local			Pandeo global
		S (MPa)	f <sub>yd</sub> (MPa)	η	S (MPa)	f <sub>yd</sub> (MPa)	η	η
52	1	178,70	322,73	0,554	178,55	308,64	0,579	0,702
52	2	120,82	322,73	0,374	120,67	308,62	0,391	0,433
52	3	120,24	322,73	0,373	120,13	304,81	0,394	0,477
52	4	154,97	322,73	0,480	154,82	308,64	0,502	0,400
52	5	149,39	322,73	0,463	149,24	308,61	0,484	0,540
52	Envolvente	178,70	322,73	0,554	178,55	308,64	0,579	0,702
53	1	93,14	322,73	0,289	93,35	304,74	0,306	0,397
53	2	111,51	322,73	0,346	111,72	304,64	0,367	0,438
53	3	110,11	322,73	0,341	110,29	304,45	0,362	0,434
53	4	147,53	322,73	0,457	147,74	304,77	0,485	0,577
53	5	180,65	322,73	0,560	180,86	305,02	0,593	0,810
53	Envolvente	180,65	322,73	0,560	180,86	305,02	0,593	0,810
54	1	80,56	322,73	0,250	80,35	308,69	0,260	0,273
54	2	113,70	322,73	0,352	113,50	308,69	0,368	0,388
54	3	117,63	322,73	0,364	117,42	308,69	0,380	0,391
54	4	146,57	322,73	0,454	146,36	308,69	0,474	0,504
54	5	148,25	322,73	0,459	148,46	304,86	0,487	0,601
54	Envolvente	148,25	322,73	0,459	148,46	304,86	0,487	0,601
55	1	99,67	322,73	0,309	99,52	308,65	0,322	0,332
55	2	116,54	322,73	0,361	116,39	308,57	0,377	0,411
55	3	119,40	322,73	0,370	119,25	308,55	0,387	0,421
55	4	153,44	322,73	0,475	153,29	308,60	0,497	0,543
55	5	143,43	322,73	0,444	143,28	308,67	0,464	0,415
55	Envolvente	153,44	322,73	0,475	153,29	308,60	0,497	0,543
56	1	81,43	322,73	0,252	81,58	304,01	0,268	0,318
56	2	113,40	322,73	0,351	113,55	304,25	0,373	0,440
56	3	112,24	322,73	0,348	112,39	304,14	0,370	0,425
56	4	148,55	322,73	0,460	148,70	304,22	0,489	0,577
56	5	159,25	322,73	0,493	159,40	305,00	0,523	0,723
56	Envolvente	159,25	322,73	0,493	159,40	305,00	0,523	0,723
57	1	162,32	322,73	0,503	162,47	305,36	0,532	0,628



ID barra	hipótesis	Plastificación			Pandeo local			Pandeo global
		S (MPa)	f <sub>yd</sub> (MPa)	η	S (MPa)	f <sub>yd</sub> (MPa)	η	η
57	2	130,09	322,73	0,403	130,25	305,10	0,427	0,558
57	3	135,04	322,73	0,418	135,19	305,13	0,443	0,571
57	4	154,77	322,73	0,480	154,92	305,10	0,508	0,690
57	5	150,50	322,73	0,466	150,65	305,68	0,493	0,566
57	Envolvente	162,32	322,73	0,503	162,47	305,36	0,532	0,690
58	1	187,34	322,73	0,580	187,49	305,69	0,613	0,766
58	2	139,12	322,73	0,431	139,27	305,65	0,456	0,572
58	3	147,23	322,73	0,456	147,38	305,64	0,482	0,607
58	4	139,24	322,73	0,431	139,39	305,65	0,456	0,554
58	5	141,53	322,73	0,439	141,69	305,51	0,464	0,508
58	Envolvente	187,34	322,73	0,580	187,49	305,69	0,613	0,766
59	1	145,68	322,73	0,451	145,78	305,17	0,478	0,584
59	2	95,20	322,73	0,295	95,11	308,69	0,308	0,360
59	3	99,74	322,73	0,309	99,84	305,75	0,327	0,397
59	4	121,86	322,73	0,378	121,77	308,69	0,394	0,323
59	5	154,73	322,73	0,479	154,64	308,65	0,501	0,535
59	Envolvente	154,73	322,73	0,479	154,64	308,65	0,501	0,584
60	1	170,09	322,73	0,527	169,99	308,60	0,551	0,670
60	2	126,36	322,73	0,392	126,45	305,65	0,414	0,535
60	3	125,09	322,73	0,388	125,19	305,71	0,410	0,524
60	4	148,69	322,73	0,461	148,79	305,79	0,487	0,638
60	5	152,25	322,73	0,472	152,34	305,27	0,499	0,554
60	Envolvente	170,09	322,73	0,527	169,99	308,60	0,551	0,670
61	1	96,20	322,73	0,298	96,05	308,67	0,311	0,328
61	2	111,22	322,73	0,345	111,07	308,69	0,360	0,383
61	3	113,06	322,73	0,350	112,91	308,69	0,366	0,388
61	4	143,42	322,73	0,444	143,27	308,69	0,464	0,499
61	5	128,50	322,73	0,398	128,65	305,62	0,421	0,511
61	Envolvente	143,42	322,73	0,444	143,27	308,69	0,464	0,511
62	1	72,61	322,73	0,225	72,77	305,09	0,239	0,300
62	2	116,28	322,73	0,360	116,43	305,58	0,381	0,457



ID barra	hipótesis	Plastificación			Pandeo local			Pandeo global
		S (MPa)	f <sub>yd</sub> (MPa)	η	S (MPa)	f <sub>yd</sub> (MPa)	η	η
62	3	115,64	322,73	0,358	115,79	305,49	0,379	0,464
62	4	150,23	322,73	0,466	150,39	305,62	0,492	0,582
62	5	147,67	322,73	0,458	147,82	305,18	0,484	0,655
62	Envolvente	150,23	322,73	0,466	150,39	305,62	0,492	0,655
63	1	103,52	322,73	0,321	103,62	305,63	0,339	0,405
63	2	121,53	322,73	0,377	121,63	305,31	0,398	0,460
63	3	122,05	322,73	0,378	122,14	305,22	0,400	0,461
63	4	156,67	322,73	0,485	156,77	305,28	0,514	0,589
63	5	130,81	322,73	0,405	130,91	305,48	0,429	0,566
63	Envolvente	156,67	322,73	0,485	156,77	305,28	0,514	0,589
64	1	75,28	322,73	0,233	75,19	308,47	0,244	0,258
64	2	119,78	322,73	0,371	119,68	308,64	0,388	0,413
64	3	120,83	322,73	0,374	120,74	308,63	0,391	0,419
64	4	155,15	322,73	0,481	155,06	308,64	0,502	0,542
64	5	118,94	322,73	0,369	118,85	308,69	0,385	0,317
64	Envolvente	155,15	322,73	0,481	155,06	308,64	0,502	0,542
65	1	168,41	322,73	0,522	168,56	305,63	0,552	0,683
65	2	132,15	322,73	0,409	132,30	305,60	0,433	0,556
65	3	139,03	322,73	0,431	139,18	305,58	0,455	0,579
65	4	130,46	322,73	0,404	130,62	305,64	0,427	0,516
65	5	137,42	322,73	0,426	136,59	305,53	0,447	0,488
65	Envolvente	168,41	322,73	0,522	168,56	305,63	0,552	0,683
66	1	166,51	322,73	0,516	166,66	305,69	0,545	0,655
66	2	128,64	322,73	0,399	128,79	305,56	0,421	0,536
66	3	133,81	322,73	0,415	133,96	305,52	0,438	0,550
66	4	152,99	322,73	0,474	153,14	305,62	0,501	0,665
66	5	140,95	322,73	0,437	141,10	305,55	0,462	0,528
66	Envolvente	166,51	322,73	0,516	166,66	305,69	0,545	0,665
67	1	167,77	322,73	0,520	167,86	305,13	0,550	0,664
67	2	117,48	322,73	0,364	117,58	305,25	0,385	0,476
67	3	119,09	322,73	0,369	118,00	305,31	0,386	0,476

ID barra	hipótesis	Plastificación			Pandeo local			Pandeo global
		S (MPa)	f <sub>yd</sub> (MPa)	η	S (MPa)	f <sub>yd</sub> (MPa)	η	η
67	4	136,68	322,73	0,424	136,78	305,39	0,448	0,584
67	5	146,71	322,73	0,455	146,81	305,24	0,481	0,524
67	Envolvente	167,77	322,73	0,520	167,86	305,13	0,550	0,664
68	1	143,64	322,73	0,445	143,54	308,65	0,465	0,562
68	2	100,65	322,73	0,312	100,55	308,64	0,326	0,342
68	3	99,46	322,73	0,308	99,55	305,54	0,326	0,383
68	4	131,27	322,73	0,407	131,18	308,66	0,425	0,316
68	5	146,31	322,73	0,453	146,21	308,64	0,474	0,511
68	Envolvente	146,31	322,73	0,453	146,21	308,64	0,474	0,562
69	1	85,77	322,73	0,266	85,92	305,49	0,281	0,360
69	2	109,15	322,73	0,338	109,30	305,50	0,358	0,424
69	3	110,00	322,73	0,341	110,15	305,46	0,361	0,427
69	4	143,68	322,73	0,445	143,83	305,60	0,471	0,554
69	5	151,64	322,73	0,470	151,79	305,75	0,496	0,668
69	Envolvente	151,64	322,73	0,470	151,79	305,75	0,496	0,668
70	1	73,98	322,73	0,229	73,82	308,69	0,239	0,256
70	2	105,46	322,73	0,327	105,31	308,69	0,341	0,365
70	3	105,91	322,73	0,328	105,76	308,69	0,343	0,369
70	4	138,63	322,73	0,430	138,48	308,69	0,449	0,481
70	5	127,98	322,73	0,397	128,13	305,71	0,419	0,511
70	Envolvente	138,63	322,73	0,430	138,48	308,69	0,449	0,511
71	1	87,00	322,73	0,270	86,91	308,63	0,282	0,284
71	2	110,50	322,73	0,342	110,41	308,62	0,358	0,379
71	3	110,02	322,73	0,341	109,92	308,59	0,356	0,368
71	4	147,79	322,73	0,458	147,69	308,64	0,479	0,517
71	5	117,26	322,73	0,363	117,16	308,67	0,380	0,335
71	Envolvente	147,79	322,73	0,458	147,69	308,64	0,479	0,517
72	1	81,25	322,73	0,252	81,35	305,11	0,267	0,311
72	2	113,50	322,73	0,352	113,59	305,25	0,372	0,433
72	3	115,08	322,73	0,357	115,18	305,19	0,377	0,441
72	4	148,14	322,73	0,459	148,24	305,22	0,486	0,561



ID barra	hipótesis	Plastificación			Pandeo local			Pandeo global
		S (MPa)	f <sub>yd</sub> (MPa)	η	S (MPa)	f <sub>yd</sub> (MPa)	η	η
72	5	133,40	322,73	0,413	133,50	305,78	0,437	0,586
72	Envolvente	148,14	322,73	0,459	148,24	305,22	0,486	0,586
73	1	163,11	322,73	0,505	163,21	304,46	0,536	0,627
73	2	122,35	322,73	0,379	122,45	304,12	0,403	0,525
73	3	126,50	322,73	0,392	126,60	304,13	0,416	0,524
73	4	148,13	322,73	0,459	148,23	304,16	0,487	0,672
73	5	181,10	322,73	0,561	181,20	305,03	0,594	0,675
73	Envolvente	181,10	322,73	0,561	181,20	305,03	0,594	0,675
74	1	197,55	322,73	0,612	197,65	305,08	0,648	0,813
74	2	147,16	322,73	0,456	147,26	305,01	0,483	0,623
74	3	156,78	322,73	0,486	156,88	305,02	0,514	0,673
74	4	144,64	322,73	0,448	144,74	304,98	0,475	0,557
74	5	176,08	322,73	0,546	176,18	305,00	0,578	0,650
74	Envolvente	197,55	322,73	0,612	197,65	305,08	0,648	0,813
75	1	147,03	322,73	0,456	147,08	304,32	0,483	0,610
75	2	102,00	322,73	0,316	101,95	308,69	0,330	0,382
75	3	100,34	322,73	0,311	100,39	305,03	0,329	0,421
75	4	127,44	322,73	0,395	127,39	308,69	0,413	0,325
75	5	191,46	322,73	0,593	189,05	304,64	0,621	0,685
75	Envolvente	191,46	322,73	0,593	189,05	304,64	0,621	0,685
76	1	176,85	322,73	0,548	176,80	308,56	0,573	0,677
76	2	124,63	322,73	0,386	124,58	308,59	0,404	0,529
76	3	131,72	322,73	0,408	131,67	308,60	0,427	0,503
76	4	146,08	322,73	0,453	146,13	304,99	0,479	0,641
76	5	187,28	322,73	0,580	185,46	304,55	0,609	0,682
76	Envolvente	187,28	322,73	0,580	185,46	304,55	0,609	0,682
77	1	105,96	322,73	0,328	105,86	308,66	0,343	0,371
77	2	132,14	322,73	0,409	132,04	308,69	0,428	0,471
77	3	132,64	322,73	0,411	132,54	308,69	0,429	0,476
77	4	174,78	322,73	0,542	174,69	308,69	0,566	0,630
77	5	134,69	322,73	0,417	134,79	304,94	0,442	0,553

ID barra	hipótesis	Plastificación			Pandeo local			Pandeo global
		S (MPa)	f <sub>yd</sub> (MPa)	η	S (MPa)	f <sub>yd</sub> (MPa)	η	η
77	Envolvente	174,78	322,73	0,542	174,69	308,69	0,566	0,630
78	1	89,47	322,73	0,277	89,57	304,64	0,294	0,374
78	2	138,29	322,73	0,429	138,39	305,04	0,454	0,547
78	3	139,01	322,73	0,431	139,11	304,94	0,456	0,561
78	4	180,08	322,73	0,558	180,18	305,07	0,591	0,702
78	5	139,84	322,73	0,433	139,94	304,30	0,460	0,628
78	Envolvente	180,08	322,73	0,558	180,18	305,07	0,591	0,702
79	1	112,46	322,73	0,348	112,51	304,81	0,369	0,436
79	2	143,33	322,73	0,444	143,38	304,55	0,471	0,545
79	3	145,85	322,73	0,452	145,89	304,47	0,479	0,556
79	4	187,17	322,73	0,580	187,21	304,56	0,615	0,716
79	5	124,52	322,73	0,386	124,51	304,76	0,409	0,546
79	Envolvente	187,17	322,73	0,580	187,21	304,56	0,615	0,716
80	1	95,99	322,73	0,297	95,94	308,55	0,311	0,338
80	2	144,75	322,73	0,449	144,70	308,65	0,469	0,513
80	3	145,04	322,73	0,449	144,99	308,64	0,470	0,517
80	4	189,77	322,73	0,588	189,72	308,65	0,615	0,682
80	5	118,18	322,73	0,366	118,14	308,69	0,383	0,323
80	Envolvente	189,77	322,73	0,588	189,72	308,65	0,615	0,682
81	1	176,49	322,73	0,547	176,59	304,84	0,579	0,738
81	2	137,37	322,73	0,426	137,47	304,90	0,451	0,591
81	3	146,97	322,73	0,455	147,07	304,88	0,482	0,635
81	4	133,71	322,73	0,414	133,81	304,92	0,439	0,513
81	5	172,81	322,73	0,535	172,91	305,01	0,567	0,635
81	Envolvente	176,49	322,73	0,547	176,59	304,84	0,579	0,738
82	1	166,65	322,73	0,516	166,75	304,84	0,547	0,650
82	2	121,92	322,73	0,378	122,02	304,71	0,400	0,517
82	3	126,30	322,73	0,391	126,40	304,67	0,415	0,523
82	4	147,73	322,73	0,458	147,82	304,79	0,485	0,654
82	5	172,72	322,73	0,535	172,82	305,04	0,567	0,648
82	Envolvente	172,72	322,73	0,535	172,82	305,04	0,567	0,654



ID barra	hipótesis	Plastificación			Pandeo local			Pandeo global
		S (MPa)	f <sub>yd</sub> (MPa)	η	S (MPa)	f <sub>yd</sub> (MPa)	η	η
83	1	171,80	322,73	0,532	171,85	304,22	0,565	0,748
83	2	119,87	322,73	0,371	119,92	304,37	0,394	0,481
83	3	122,50	322,73	0,380	122,45	308,65	0,397	0,472
83	4	141,02	322,73	0,437	141,07	304,57	0,463	0,592
83	5	183,51	322,73	0,569	182,90	304,56	0,601	0,669
83	Envolvente	183,51	322,73	0,569	182,90	304,56	0,601	0,748
84	1	141,56	322,73	0,439	141,61	304,73	0,465	0,579
84	2	99,93	322,73	0,310	99,88	308,63	0,324	0,333
84	3	99,27	322,73	0,308	99,32	304,82	0,326	0,386
84	4	131,84	322,73	0,409	131,79	308,65	0,427	0,334
84	5	181,89	322,73	0,564	181,84	308,65	0,589	0,651
84	Envolvente	181,89	322,73	0,564	181,84	308,65	0,589	0,651
85	1	93,89	322,73	0,291	93,99	304,89	0,308	0,397
85	2	130,20	322,73	0,403	130,29	305,00	0,427	0,511
85	3	129,92	322,73	0,403	130,01	304,96	0,426	0,511
85	4	173,35	322,73	0,537	173,44	305,07	0,569	0,677
85	5	143,44	322,73	0,444	143,54	304,97	0,471	0,642
85	Envolvente	173,35	322,73	0,537	173,44	305,07	0,569	0,677
86	1	89,06	322,73	0,276	88,96	308,68	0,288	0,318
86	2	129,04	322,73	0,400	128,94	308,69	0,418	0,462
86	3	130,77	322,73	0,405	130,68	308,69	0,423	0,470
86	4	170,06	322,73	0,527	169,96	308,69	0,551	0,613
86	5	132,51	322,73	0,411	132,60	305,01	0,435	0,536
86	Envolvente	170,06	322,73	0,527	169,96	308,69	0,551	0,613
87	1	98,51	322,73	0,305	98,47	308,63	0,319	0,325
87	2	137,01	322,73	0,425	136,96	308,64	0,444	0,480
87	3	137,03	322,73	0,425	136,98	308,62	0,444	0,477
87	4	182,45	322,73	0,565	182,41	308,65	0,591	0,653
87	5	114,77	322,73	0,356	114,73	308,67	0,372	0,331
87	Envolvente	182,45	322,73	0,565	182,41	308,65	0,591	0,653
88	1	96,69	322,73	0,300	96,74	304,45	0,318	0,371

ID barra	hipótesis	Plastificación			Pandeo local			Pandeo global
		S (MPa)	f <sub>yd</sub> (MPa)	η	S (MPa)	f <sub>yd</sub> (MPa)	η	η
88	2	137,36	322,73	0,426	137,40	304,58	0,451	0,522
88	3	137,78	322,73	0,427	137,82	304,50	0,453	0,519
88	4	181,92	322,73	0,564	181,97	304,54	0,598	0,693
88	5	128,22	322,73	0,397	128,27	305,02	0,421	0,567
88	Envolvente	181,92	322,73	0,564	181,97	304,54	0,598	0,693
89	1	171,45	322,73	0,531	171,50	303,36	0,565	0,678
89	2	116,70	322,73	0,362	116,74	302,93	0,385	0,486
89	3	127,24	322,73	0,394	127,22	308,66	0,412	0,453
89	4	144,36	322,73	0,447	144,41	303,03	0,477	0,662
89	5	228,04	322,73	0,707	228,09	303,94	0,750	0,863
89	Envolvente	228,04	322,73	0,707	228,09	303,94	0,750	0,863
90	1	218,98	322,73	0,679	219,02	304,08	0,720	0,939
90	2	165,23	322,73	0,512	165,28	304,18	0,543	0,733
90	3	177,74	322,73	0,551	177,78	304,18	0,584	0,822
90	4	160,02	322,73	0,496	159,21	304,17	0,523	0,580
90	5	230,27	322,73	0,714	230,31	304,08	0,757	0,917
90	Envolvente	230,27	322,73	0,714	230,31	304,08	0,757	0,939
91	1	151,76	322,73	0,470	151,76	303,27	0,500	0,656
91	2	111,41	322,73	0,345	111,41	308,56	0,361	0,412
91	3	105,74	322,73	0,328	105,74	304,04	0,348	0,474
91	4	137,89	322,73	0,427	137,89	308,69	0,447	0,435
91	5	247,25	322,73	0,766	247,25	303,80	0,814	0,948
91	Envolvente	247,25	322,73	0,766	247,25	303,80	0,814	0,948
92	1	185,57	322,73	0,575	185,57	308,52	0,601	0,639
92	2	133,52	322,73	0,414	133,52	308,56	0,433	0,479
92	3	143,10	322,73	0,443	143,10	308,59	0,464	0,505
92	4	145,56	322,73	0,451	145,56	303,94	0,479	0,655
92	5	242,59	322,73	0,752	238,67	303,64	0,786	0,912
92	Envolvente	242,59	322,73	0,752	238,67	303,64	0,786	0,912
93	1	119,27	322,73	0,370	118,05	303,99	0,388	0,427
93	2	163,07	322,73	0,505	162,57	304,19	0,534	0,600



ID barra	hipótesis	Plastificación			Pandeo local			Pandeo global
		S (MPa)	f <sub>yd</sub> (MPa)	η	S (MPa)	f <sub>yd</sub> (MPa)	η	η
93	3	164,86	322,73	0,511	164,81	308,68	0,534	0,607
93	4	216,65	322,73	0,671	215,86	304,12	0,710	0,808
93	5	146,93	322,73	0,455	146,97	304,12	0,483	0,607
93	Envolvente	216,65	322,73	0,671	215,86	304,12	0,710	0,808
94	1	113,26	322,73	0,351	113,31	304,12	0,373	0,462
94	2	170,06	322,73	0,527	170,10	304,01	0,560	0,671
94	3	168,65	322,73	0,523	168,70	304,11	0,555	0,655
94	4	224,15	322,73	0,695	224,19	303,98	0,738	0,883
94	5	130,10	322,73	0,403	130,15	303,21	0,429	0,572
94	Envolvente	224,15	322,73	0,695	224,19	303,98	0,738	0,883
95	1	128,33	322,73	0,398	128,33	303,82	0,422	0,492
95	2	177,21	322,73	0,549	177,21	303,68	0,584	0,676
95	3	175,42	322,73	0,544	175,42	303,53	0,578	0,662
95	4	235,84	322,73	0,731	235,84	303,65	0,777	0,904
95	5	116,88	322,73	0,362	116,88	304,01	0,384	0,507
95	Envolvente	235,84	322,73	0,731	235,84	303,65	0,777	0,904
96	1	120,69	322,73	0,374	120,69	308,61	0,391	0,425
96	2	178,22	322,73	0,552	178,22	308,66	0,577	0,647
96	3	181,26	322,73	0,562	181,26	308,65	0,587	0,662
96	4	235,28	322,73	0,729	235,28	308,66	0,762	0,867
96	5	117,07	322,73	0,363	117,07	308,70	0,379	0,363
96	Envolvente	235,28	322,73	0,729	235,28	308,66	0,762	0,867
97	1	194,86	322,73	0,604	194,91	303,86	0,641	0,858
97	2	151,27	322,73	0,469	151,32	304,00	0,498	0,674
97	3	164,46	322,73	0,510	164,50	303,96	0,541	0,763
97	4	144,85	322,73	0,449	144,90	304,04	0,477	0,531
97	5	227,46	322,73	0,705	227,50	304,07	0,748	0,905
97	Envolvente	227,46	322,73	0,705	227,50	304,07	0,748	0,905
98	1	174,31	322,73	0,540	174,36	303,73	0,574	0,685
98	2	117,09	322,73	0,363	117,14	303,52	0,386	0,495
98	3	124,24	322,73	0,385	124,19	308,69	0,402	0,462



ID barra	hipótesis	Plastificación			Pandeo local			Pandeo global
		S (MPa)	f <sub>yd</sub> (MPa)	η	S (MPa)	f <sub>yd</sub> (MPa)	η	η
98	4	144,93	322,73	0,449	144,97	303,65	0,477	0,650
98	5	220,22	322,73	0,682	220,27	304,03	0,724	0,839
98	Envolvente	220,22	322,73	0,682	220,27	304,03	0,724	0,839
99	1	179,28	322,73	0,556	179,28	303,06	0,592	0,746
99	2	125,17	322,73	0,388	125,17	303,24	0,413	0,529
99	3	127,66	322,73	0,396	127,66	308,62	0,414	0,473
99	4	150,16	322,73	0,465	150,16	303,54	0,495	0,647
99	5	237,99	322,73	0,737	234,64	303,63	0,773	0,895
99	Envolvente	237,99	322,73	0,737	234,64	303,63	0,773	0,895
100	1	145,01	322,73	0,449	145,01	303,73	0,477	0,610
100	2	104,72	322,73	0,324	104,72	302,51	0,346	0,444
100	3	110,66	322,73	0,343	110,66	302,69	0,366	0,501
100	4	130,58	322,73	0,405	130,58	308,64	0,423	0,393
100	5	238,44	322,73	0,739	238,44	303,82	0,785	0,907
100	Envolvente	238,44	322,73	0,739	238,44	303,82	0,785	0,907
101	1	114,54	322,73	0,355	114,59	304,15	0,377	0,477
101	2	165,83	322,73	0,514	165,88	304,04	0,546	0,672
101	3	168,39	322,73	0,522	168,44	304,06	0,554	0,689
101	4	219,76	322,73	0,681	219,81	304,00	0,723	0,883
101	5	138,66	322,73	0,430	138,71	303,93	0,456	0,622
101	Envolvente	219,76	322,73	0,681	219,81	304,00	0,723	0,883
102	1	111,70	322,73	0,346	111,74	304,12	0,367	0,425
102	2	162,29	322,73	0,503	162,34	304,20	0,534	0,606
102	3	165,05	322,73	0,511	165,09	304,20	0,543	0,643
102	4	213,99	322,73	0,663	214,04	304,16	0,704	0,800
102	5	147,09	322,73	0,456	147,14	304,15	0,484	0,620
102	Envolvente	213,99	322,73	0,663	214,04	304,16	0,704	0,800
103	1	114,72	322,73	0,355	114,72	303,97	0,377	0,399
103	2	168,15	322,73	0,521	168,13	303,87	0,553	0,601
103	3	169,90	322,73	0,526	169,90	303,79	0,559	0,617
103	4	226,57	322,73	0,702	224,62	303,78	0,739	0,824



ID barra	hipótesis	Plastificación			Pandeo local			Pandeo global
		S (MPa)	f <sub>yd</sub> (MPa)	η	S (MPa)	f <sub>yd</sub> (MPa)	η	η
103	5	107,15	322,73	0,332	107,15	308,66	0,347	0,355
103	Envolvente	226,57	322,73	0,702	224,62	303,78	0,739	0,824
104	1	121,71	322,73	0,377	121,71	303,57	0,401	0,479
104	2	175,95	322,73	0,545	175,95	303,71	0,579	0,691
104	3	178,95	322,73	0,554	178,95	303,64	0,589	0,716
104	4	232,74	322,73	0,721	232,74	303,67	0,766	0,908
104	5	127,48	322,73	0,395	127,48	303,68	0,420	0,546
104	Envolvente	232,74	322,73	0,721	232,74	303,67	0,766	0,908
105	1	27,60	322,73	0,086	27,60	306,25	0,090	0,271
105	2	26,30	322,73	0,081	26,30	306,27	0,086	0,251
105	3	18,84	322,73	0,058	18,84	308,67	0,061	0,106
105	4	33,55	322,73	0,104	33,55	306,13	0,110	0,511
105	5	25,69	322,73	0,080	25,69	306,26	0,084	0,224
105	Envolvente	33,55	322,73	0,104	33,55	306,13	0,110	0,511
106	1	37,75	322,73	0,117	37,75	306,25	0,123	0,501
106	2	37,72	322,73	0,117	37,72	306,22	0,123	0,510
106	3	45,83	322,73	0,142	45,83	306,20	0,150	0,716
106	4	33,86	322,73	0,105	33,86	308,69	0,110	0,151
106	5	35,56	322,73	0,110	35,56	306,22	0,116	0,433
106	Envolvente	45,83	322,73	0,142	45,83	306,20	0,150	0,716
107	1	32,06	322,73	0,099	32,06	306,28	0,105	0,383
107	2	32,55	322,73	0,101	32,55	306,27	0,106	0,391
107	3	40,41	322,73	0,125	40,41	306,28	0,132	0,564
107	4	28,84	322,73	0,089	28,84	308,69	0,093	0,086
107	5	30,04	322,73	0,093	30,04	306,27	0,098	0,321
107	Envolvente	40,41	322,73	0,125	40,41	306,28	0,132	0,564
108	1	23,26	322,73	0,072	23,26	306,28	0,076	0,191
108	2	22,48	322,73	0,070	22,48	306,26	0,073	0,177
108	3	22,63	322,73	0,070	22,63	308,69	0,073	0,069
108	4	39,45	322,73	0,122	39,45	306,29	0,129	0,562
108	5	21,18	322,73	0,066	21,18	306,20	0,069	0,161

ID barra	hipótesis	Plastificación			Pandeo local			Pandeo global
		S (MPa)	f <sub>yd</sub> (MPa)	η	S (MPa)	f <sub>yd</sub> (MPa)	η	η
108	Envolvente	39,45	322,73	0,122	39,45	306,29	0,129	0,562
109	1	26,44	322,73	0,082	26,44	306,24	0,086	0,205
109	2	26,30	322,73	0,082	26,30	306,29	0,086	0,149
109	3	39,02	322,73	0,121	39,02	308,66	0,126	0,122
109	4	69,96	322,73	0,217	69,96	305,72	0,229	0,350
109	5	26,04	322,73	0,081	26,04	306,24	0,085	0,199
109	Envolvente	69,96	322,73	0,217	69,96	305,72	0,229	0,350
110	1	27,82	322,73	0,086	27,82	306,24	0,091	0,238
110	2	25,93	322,73	0,080	25,93	306,20	0,085	0,204
110	3	37,34	322,73	0,116	37,34	308,67	0,121	0,117
110	4	68,62	322,73	0,213	68,62	305,78	0,224	0,401
110	5	25,58	322,73	0,079	25,58	306,26	0,084	0,178
110	Envolvente	68,62	322,73	0,213	68,62	305,78	0,224	0,401
111	1	20,74	322,73	0,064	20,74	306,26	0,068	0,146
111	2	20,31	322,73	0,063	20,31	306,11	0,066	0,112
111	3	35,54	322,73	0,110	35,54	308,59	0,115	0,096
111	4	43,82	322,73	0,136	43,82	305,34	0,144	0,220
111	5	20,47	322,73	0,063	20,47	306,01	0,067	0,102
111	Envolvente	43,82	322,73	0,136	43,82	305,34	0,144	0,220
112	1	20,56	322,73	0,064	20,56	306,11	0,067	0,120
112	2	20,49	322,73	0,063	20,49	308,62	0,066	0,077
112	3	36,06	322,73	0,112	36,06	308,61	0,117	0,096
112	4	43,28	322,73	0,134	43,28	305,25	0,142	0,186
112	5	21,52	322,73	0,067	21,52	308,61	0,070	0,108
112	Envolvente	43,28	322,73	0,134	43,28	305,25	0,142	0,186
113	1	37,39	322,73	0,116	37,39	306,23	0,122	0,477
113	2	37,77	322,73	0,117	37,77	306,21	0,123	0,493
113	3	45,77	322,73	0,142	45,77	306,19	0,149	0,701
113	4	35,05	322,73	0,109	35,05	308,68	0,114	0,126
113	5	37,14	322,73	0,115	37,14	306,21	0,121	0,466
113	Envolvente	45,77	322,73	0,142	45,77	306,19	0,149	0,701



ID barra	hipótesis	Plastificación			Pandeo local			Pandeo global
		S (MPa)	f <sub>yd</sub> (MPa)	η	S (MPa)	f <sub>yd</sub> (MPa)	η	η
114	1	29,65	322,73	0,092	29,65	306,24	0,097	0,311
114	2	28,01	322,73	0,087	28,01	306,18	0,091	0,282
114	3	20,24	322,73	0,063	20,24	306,22	0,066	0,144
114	4	34,68	322,73	0,107	34,68	306,15	0,113	0,542
114	5	25,92	322,73	0,080	25,92	306,24	0,085	0,233
114	Envolvente	34,68	322,73	0,107	34,68	306,15	0,113	0,542
115	1	23,99	322,73	0,074	23,99	306,10	0,078	0,216
115	2	22,92	322,73	0,071	22,92	306,05	0,075	0,193
115	3	21,52	322,73	0,067	21,52	308,70	0,070	0,083
115	4	40,12	322,73	0,124	40,12	306,16	0,131	0,566
115	5	20,61	322,73	0,064	20,61	306,15	0,067	0,151
115	Envolvente	40,12	322,73	0,124	40,12	306,16	0,131	0,566
116	1	30,93	322,73	0,096	30,93	306,15	0,101	0,356
116	2	31,76	322,73	0,098	31,76	306,13	0,104	0,373
116	3	39,62	322,73	0,123	39,62	306,17	0,129	0,546
116	4	29,00	322,73	0,090	29,00	308,70	0,094	0,087
116	5	30,78	322,73	0,095	30,78	306,04	0,101	0,348
116	Envolvente	39,62	322,73	0,123	39,62	306,17	0,129	0,546
117	1	37,23	322,73	0,115	37,23	306,21	0,122	0,513
117	2	39,31	322,73	0,122	39,31	306,23	0,128	0,593
117	3	55,35	322,73	0,172	55,35	306,23	0,181	0,942
117	4	71,19	322,73	0,221	71,19	305,78	0,233	0,645
117	5	41,36	322,73	0,128	41,36	306,18	0,135	0,640
117	Envolvente	71,19	322,73	0,221	71,19	305,78	0,233	0,942
118	1	37,43	322,73	0,116	37,43	306,26	0,122	0,515
118	2	38,66	322,73	0,120	38,66	306,26	0,126	0,581
118	3	53,57	322,73	0,166	53,57	306,25	0,175	0,894
118	4	69,18	322,73	0,214	69,18	305,78	0,226	0,608
118	5	38,93	322,73	0,121	38,93	306,26	0,127	0,585
118	Envolvente	69,18	322,73	0,214	69,18	305,78	0,226	0,894
119	1	32,09	322,73	0,099	32,09	305,87	0,105	0,405

ID barra	hipótesis	Plastificación			Pandeo local			Pandeo global
		S (MPa)	f <sub>yd</sub> (MPa)	η	S (MPa)	f <sub>yd</sub> (MPa)	η	η
119	2	33,59	322,73	0,104	33,59	305,87	0,110	0,449
119	3	46,67	322,73	0,145	46,67	305,72	0,153	0,645
119	4	45,02	322,73	0,140	45,02	305,19	0,148	0,416
119	5	33,61	322,73	0,104	33,61	305,95	0,110	0,451
119	Envolvente	46,67	322,73	0,145	46,67	305,72	0,153	0,645
120	1	31,99	322,73	0,099	31,99	305,96	0,105	0,405
120	2	33,91	322,73	0,105	33,91	305,97	0,111	0,458
120	3	46,83	322,73	0,145	46,83	305,80	0,153	0,645
120	4	44,83	322,73	0,139	44,83	305,31	0,147	0,418
120	5	35,43	322,73	0,110	35,43	305,93	0,116	0,495
120	Envolvente	46,83	322,73	0,145	46,83	305,80	0,153	0,645

## 4.2. Comprobaciones ELF en las barras

Tabla AIII-11: Comprobaciones ELF en las barras.

ID barra	hipótesis	Ciclos que recibe	Ciclos que resiste	η
1	1	2,010 · 10 <sup>4</sup>	5,997 · 10 <sup>8</sup>	0,000
1	2	1,191 · 10 <sup>3</sup>	8,994 · 10 <sup>8</sup>	0,000
1	3	1,418 · 10 <sup>4</sup>	9,050 · 10 <sup>8</sup>	0,000
1	4	1,191 · 10 <sup>3</sup>	6,071 · 10 <sup>8</sup>	0,000
1	5	1,191 · 10 <sup>3</sup>	6,599 · 10 <sup>8</sup>	0,000
1	Envolvente	2,010 · 10 <sup>4</sup>	5,997 · 10 <sup>8</sup>	0,000
2	1	2,010 · 10 <sup>4</sup>	4,151 · 10 <sup>10</sup>	0,000
2	2	1,191 · 10 <sup>3</sup>	3,854 · 10 <sup>10</sup>	0,000
2	3	1,418 · 10 <sup>4</sup>	4,331 · 10 <sup>10</sup>	0,000
2	4	1,191 · 10 <sup>3</sup>	5,555 · 10 <sup>10</sup>	0,000
2	5	1,191 · 10 <sup>3</sup>	7,588 · 10 <sup>10</sup>	0,000
2	Envolvente	2,010 · 10 <sup>4</sup>	4,151 · 10 <sup>10</sup>	0,000
3	1	2,010 · 10 <sup>4</sup>	6,641 · 10 <sup>11</sup>	0,000
3	2	1,191 · 10 <sup>3</sup>	1,042 · 10 <sup>12</sup>	0,000
3	3	1,418 · 10 <sup>4</sup>	1,230 · 10 <sup>12</sup>	0,000



ID barra	hipótesis	Ciclos que recibe	Ciclos que resiste	$\eta$
3	4	$1,191 \cdot 10^3$	$5,837 \cdot 10^{11}$	0,000
3	5	$1,191 \cdot 10^3$	$2,876 \cdot 10^{11}$	0,000
3	Envolvente	$2,010 \cdot 10^4$	$6,641 \cdot 10^{11}$	0,000
4	1	$2,010 \cdot 10^4$	$2,164 \cdot 10^{11}$	0,000
4	2	$1,191 \cdot 10^3$	$1,020 \cdot 10^{12}$	0,000
4	3	$1,418 \cdot 10^4$	$1,123 \cdot 10^{12}$	0,000
4	4	$1,191 \cdot 10^3$	$5,045 \cdot 10^{11}$	0,000
4	5	$1,191 \cdot 10^3$	$4,613 \cdot 10^{11}$	0,000
4	Envolvente	$2,010 \cdot 10^4$	$2,164 \cdot 10^{11}$	0,000
5	1	$2,010 \cdot 10^4$	$8,997 \cdot 10^{10}$	0,000
5	2	$1,191 \cdot 10^3$	$5,148 \cdot 10^{11}$	0,000
5	3	$1,418 \cdot 10^4$	$5,187 \cdot 10^{11}$	0,000
5	4	$1,191 \cdot 10^3$	$2,543 \cdot 10^{11}$	0,000
5	5	$1,191 \cdot 10^3$	$3,055 \cdot 10^{11}$	0,000
5	Envolvente	$2,010 \cdot 10^4$	$8,997 \cdot 10^{10}$	0,000
6	1	$2,010 \cdot 10^4$	$6,254 \cdot 10^{10}$	0,000
6	2	$1,191 \cdot 10^3$	$3,981 \cdot 10^{11}$	0,000
6	3	$1,418 \cdot 10^4$	$3,556 \cdot 10^{11}$	0,000
6	4	$1,191 \cdot 10^3$	$2,494 \cdot 10^{11}$	0,000
6	5	$1,191 \cdot 10^3$	$3,927 \cdot 10^{11}$	0,000
6	Envolvente	$2,010 \cdot 10^4$	$6,254 \cdot 10^{10}$	0,000
7	1	$2,010 \cdot 10^4$	$1,347 \cdot 10^9$	0,000
7	2	$1,191 \cdot 10^3$	$7,506 \cdot 10^8$	0,000
7	3	$1,418 \cdot 10^4$	$8,312 \cdot 10^8$	0,000
7	4	$1,191 \cdot 10^3$	$4,868 \cdot 10^8$	0,000
7	5	$1,191 \cdot 10^3$	$5,740 \cdot 10^8$	0,000
7	Envolvente	$1,418 \cdot 10^4$	$8,312 \cdot 10^8$	0,000
8	1	$2,010 \cdot 10^4$	$3,708 \cdot 10^{10}$	0,000
8	2	$1,191 \cdot 10^3$	$1,117 \cdot 10^{11}$	0,000
8	3	$1,418 \cdot 10^4$	$1,089 \cdot 10^{11}$	0,000
8	4	$1,191 \cdot 10^3$	$7,301 \cdot 10^{10}$	0,000
8	5	$1,191 \cdot 10^3$	$8,148 \cdot 10^{10}$	0,000
8	Envolvente	$2,010 \cdot 10^4$	$3,708 \cdot 10^{10}$	0,000

ID barra	hipótesis	Ciclos que recibe	Ciclos que resiste	$\eta$
9	1	$2,010 \cdot 10^4$	$5,220 \cdot 10^{11}$	0,000
9	2	$1,191 \cdot 10^3$	$4,976 \cdot 10^{11}$	0,000
9	3	$1,418 \cdot 10^4$	$5,150 \cdot 10^{11}$	0,000
9	4	$1,191 \cdot 10^3$	$2,550 \cdot 10^{11}$	0,000
9	5	$1,191 \cdot 10^3$	$2,631 \cdot 10^{11}$	0,000
9	Envolvente	$2,010 \cdot 10^4$	$5,220 \cdot 10^{11}$	0,000
10	1	$2,010 \cdot 10^4$	$2,309 \cdot 10^{11}$	0,000
10	2	$1,191 \cdot 10^3$	$4,199 \cdot 10^{11}$	0,000
10	3	$1,418 \cdot 10^4$	$4,390 \cdot 10^{11}$	0,000
10	4	$1,191 \cdot 10^3$	$2,212 \cdot 10^{11}$	0,000
10	5	$1,191 \cdot 10^3$	$2,643 \cdot 10^{11}$	0,000
10	Envolvente	$2,010 \cdot 10^4$	$2,309 \cdot 10^{11}$	0,000
11	1	$2,010 \cdot 10^4$	$1,218 \cdot 10^{11}$	0,000
11	2	$1,191 \cdot 10^3$	$2,209 \cdot 10^{11}$	0,000
11	3	$1,418 \cdot 10^4$	$2,256 \cdot 10^{11}$	0,000
11	4	$1,191 \cdot 10^3$	$1,160 \cdot 10^{11}$	0,000
11	5	$1,191 \cdot 10^3$	$1,449 \cdot 10^{11}$	0,000
11	Envolvente	$2,010 \cdot 10^4$	$1,218 \cdot 10^{11}$	0,000
12	1	$2,010 \cdot 10^4$	$1,144 \cdot 10^{11}$	0,000
12	2	$1,191 \cdot 10^3$	$2,546 \cdot 10^{11}$	0,000
12	3	$1,418 \cdot 10^4$	$2,498 \cdot 10^{11}$	0,000
12	4	$1,191 \cdot 10^3$	$1,357 \cdot 10^{11}$	0,000
12	5	$1,191 \cdot 10^3$	$1,870 \cdot 10^{11}$	0,000
12	Envolvente	$2,010 \cdot 10^4$	$1,144 \cdot 10^{11}$	0,000
13	1	$2,010 \cdot 10^4$	$2,158 \cdot 10^9$	0,000
13	2	$1,191 \cdot 10^3$	$8,797 \cdot 10^8$	0,000
13	3	$1,418 \cdot 10^4$	$1,012 \cdot 10^9$	0,000
13	4	$1,191 \cdot 10^3$	$6,165 \cdot 10^8$	0,000
13	5	$1,191 \cdot 10^3$	$6,602 \cdot 10^8$	0,000
13	Envolvente	$1,418 \cdot 10^4$	$1,012 \cdot 10^9$	0,000
14	1	$2,010 \cdot 10^4$	$3,559 \cdot 10^{10}$	0,000
14	2	$1,191 \cdot 10^3$	$1,162 \cdot 10^{11}$	0,000
14	3	$1,418 \cdot 10^4$	$1,265 \cdot 10^{11}$	0,000



ID barra	hipótesis	Ciclos que recibe	Ciclos que resiste	$\eta$
14	4	$1,191 \cdot 10^3$	$7,304 \cdot 10^{10}$	0,000
14	5	$1,191 \cdot 10^3$	$1,030 \cdot 10^{11}$	0,000
14	Envolvente	$2,010 \cdot 10^4$	$3,559 \cdot 10^{10}$	0,000
15	1	$2,010 \cdot 10^4$	$2,533 \cdot 10^{11}$	0,000
15	2	$1,191 \cdot 10^3$	$5,654 \cdot 10^{11}$	0,000
15	3	$1,418 \cdot 10^4$	$5,345 \cdot 10^{11}$	0,000
15	4	$1,191 \cdot 10^3$	$3,018 \cdot 10^{11}$	0,000
15	5	$1,191 \cdot 10^3$	$5,737 \cdot 10^{11}$	0,000
15	Envolvente	$2,010 \cdot 10^4$	$2,533 \cdot 10^{11}$	0,000
16	1	$2,010 \cdot 10^4$	$1,488 \cdot 10^{11}$	0,000
16	2	$1,191 \cdot 10^3$	$8,013 \cdot 10^{11}$	0,000
16	3	$1,418 \cdot 10^4$	$9,267 \cdot 10^{11}$	0,000
16	4	$1,191 \cdot 10^3$	$5,353 \cdot 10^{11}$	0,000
16	5	$1,191 \cdot 10^3$	$4,658 \cdot 10^{11}$	0,000
16	Envolvente	$2,010 \cdot 10^4$	$1,488 \cdot 10^{11}$	0,000
17	1	$2,010 \cdot 10^4$	$8,664 \cdot 10^{10}$	0,000
17	2	$1,191 \cdot 10^3$	$4,086 \cdot 10^{11}$	0,000
17	3	$1,418 \cdot 10^4$	$4,697 \cdot 10^{11}$	0,000
17	4	$1,191 \cdot 10^3$	$2,943 \cdot 10$	0,000
17	5	$1,191 \cdot 10^3$	$2,419 \cdot 10^{11}$	0,000
17	Envolvente	$2,010 \cdot 10^4$	$8,664 \cdot 10^{10}$	0,000
18	1	$2,010 \cdot 10^4$	$8,007 \cdot 10^{10}$	0,000
18	2	$1,191 \cdot 10^3$	$4,385 \cdot 10^{11}$	0,000
18	3	$1,418 \cdot 10^4$	$4,947 \cdot 10^{11}$	0,000
18	4	$1,191 \cdot 10^3$	$3,327 \cdot 10^{11}$	0,000
18	5	$1,191 \cdot 10^3$	$3,196 \cdot 10^{11}$	0,000
18	Envolvente	$2,010 \cdot 10^4$	$8,007 \cdot 10^{10}$	0,000
19	1	$2,010 \cdot 10^4$	$3,217 \cdot 10^8$	0,000
19	2	$1,191 \cdot 10^3$	$6,770 \cdot 10^8$	0,000
19	3	$1,418 \cdot 10^4$	$5,143 \cdot 10^8$	0,000
19	4	$1,191 \cdot 10^3$	$5,289 \cdot 10^8$	0,000
19	5	$1,191 \cdot 10^3$	$6,235 \cdot 10^8$	0,000
19	Envolvente	$2,010 \cdot 10^4$	$3,217 \cdot 10^8$	0,000



ID barra	hipótesis	Ciclos que recibe	Ciclos que resiste	$\eta$
20	1	$2,010 \cdot 10^4$	$3,545 \cdot 10^{10}$	0,000
20	2	$1,191 \cdot 10^3$	$2,553 \cdot 10^{10}$	0,000
20	3	$1,418 \cdot 10^4$	$2,732 \cdot 10^{10}$	0,000
20	4	$1,191 \cdot 10^3$	$3,158 \cdot 10^{10}$	0,000
20	5	$1,191 \cdot 10^3$	$3,911 \cdot 10^{10}$	0,000
20	Envolvente	$2,010 \cdot 10^4$	$3,545 \cdot 10^{10}$	0,000
21	1	$2,010 \cdot 10^4$	$1,301 \cdot 10^{12}$	0,000
21	2	$1,191 \cdot 10^3$	$1,075 \cdot 10^{12}$	0,000
21	3	$1,418 \cdot 10^4$	$1,288 \cdot 10^{12}$	0,000
21	4	$1,191 \cdot 10^3$	$5,580 \cdot 10^{11}$	0,000
21	5	$1,191 \cdot 10^3$	$6,174 \cdot 10^{11}$	0,000
21	Envolvente	$2,010 \cdot 10^4$	$1,301 \cdot 10^{12}$	0,000
22	1	$2,010 \cdot 10^4$	$4,495 \cdot 10^{11}$	0,000
22	2	$1,191 \cdot 10^3$	$1,039 \cdot 10^{12}$	0,000
22	3	$1,418 \cdot 10^4$	$1,097 \cdot 10^{12}$	0,000
22	4	$1,191 \cdot 10^3$	$5,102 \cdot 10^{11}$	0,000
22	5	$1,191 \cdot 10^3$	$5,893 \cdot 10^{11}$	0,000
22	Envolvente	$2,010 \cdot 10^4$	$4,495 \cdot 10^{11}$	0,000
23	1	$2,010 \cdot 10^4$	$1,626 \cdot 10^{11}$	0,000
23	2	$1,191 \cdot 10^3$	$4,963 \cdot 10^{11}$	0,000
23	3	$1,418 \cdot 10^4$	$5,283 \cdot 10^{11}$	0,000
23	4	$1,191 \cdot 10^3$	$2,531 \cdot 10^{11}$	0,000
23	5	$1,191 \cdot 10^3$	$2,944 \cdot 10^{11}$	0,000
23	Envolvente	$2,010 \cdot 10^4$	$1,626 \cdot 10^{11}$	0,000
24	1	$2,010 \cdot 10^4$	$1,034 \cdot 10^{11}$	0,000
24	2	$1,191 \cdot 10^3$	$3,697 \cdot 10^{11}$	0,000
24	3	$1,418 \cdot 10^4$	$3,571 \cdot 10^{11}$	0,000
24	4	$1,191 \cdot 10^3$	$2,271 \cdot 10^{11}$	0,000
24	5	$1,191 \cdot 10^3$	$2,936 \cdot 10^{11}$	0,000
24	Envolvente	$2,010 \cdot 10^4$	$1,034 \cdot 10^{11}$	0,000
25	1	$2,010 \cdot 10^4$	$2,894 \cdot 10^5$	0,069
25	2	$1,191 \cdot 10^3$	$6,255 \cdot 10^5$	0,002
25	3	$1,418 \cdot 10^4$	$5,664 \cdot 10^5$	0,025



ID barra	hipótesis	Ciclos que recibe	Ciclos que resiste	$\eta$
25	4	$1,191 \cdot 10^3$	$5,818 \cdot 10^5$	0,002
25	5	$1,191 \cdot 10^3$	$2,500 \cdot 10^6$	0,000
25	Envolvente	$2,010 \cdot 10^4$	$2,894 \cdot 10^5$	0,069
26	1	$2,010 \cdot 10^4$	$2,642 \cdot 10^5$	0,076
26	2	$1,191 \cdot 10^3$	$6,849 \cdot 10^5$	0,002
26	3	$1,418 \cdot 10^4$	$6,005 \cdot 10^5$	0,024
26	4	$1,191 \cdot 10^3$	$5,453 \cdot 10^5$	0,002
26	5	$1,191 \cdot 10^3$	$2,746 \cdot 10^6$	0,000
26	Envolvente	$2,010 \cdot 10^4$	$2,642 \cdot 10^5$	0,076
27	1	$2,010 \cdot 10^4$	$2,607 \cdot 10^5$	0,077
27	2	$1,191 \cdot 10^3$	$8,334 \cdot 10^5$	0,001
27	3	$1,418 \cdot 10^4$	$7,324 \cdot 10^5$	0,019
27	4	$1,191 \cdot 10^3$	$7,076 \cdot 10^5$	0,002
27	5	$1,191 \cdot 10^3$	$2,393 \cdot 10^6$	0,000
27	Envolvente	$2,010 \cdot 10^4$	$2,607 \cdot 10^5$	0,077
28	1	$2,010 \cdot 10^4$	$2,405 \cdot 10^5$	0,084
28	2	$1,191 \cdot 10^3$	$5,880 \cdot 10^5$	0,002
28	3	$1,418 \cdot 10^4$	$5,388 \cdot 10^5$	0,026
28	4	$1,191 \cdot 10^3$	$5,257 \cdot 10^5$	0,002
28	5	$1,191 \cdot 10^3$	$2,822 \cdot 10^6$	0,000
28	Envolvente	$2,010 \cdot 10^4$	$2,405 \cdot 10^5$	0,084
29	1	$2,010 \cdot 10^4$	$5,659 \cdot 10^6$	0,004
29	2	$1,191 \cdot 10^3$	$3,809 \cdot 10^6$	0,000
29	3	$1,418 \cdot 10^4$	$4,752 \cdot 10^6$	0,003
29	4	$1,191 \cdot 10^3$	$2,710 \cdot 10^6$	0,000
29	5	$1,191 \cdot 10^3$	$6,194 \cdot 10^5$	0,002
29	Envolvente	$2,010 \cdot 10^4$	$5,659 \cdot 10^6$	0,004
30	1	$2,010 \cdot 10^4$	$9,138 \cdot 10^6$	0,002
30	2	$1,191 \cdot 10^3$	$3,739 \cdot 10^6$	0,000
30	3	$1,418 \cdot 10^4$	$4,492 \cdot 10^6$	0,003
30	4	$1,191 \cdot 10^3$	$2,596 \cdot 10^6$	0,000
30	5	$1,191 \cdot 10^3$	$6,342 \cdot 10^5$	0,002
30	Envolvente	$1,418 \cdot 10^4$	$4,492 \cdot 10^6$	0,003

ID barra	hipótesis	Ciclos que recibe	Ciclos que resiste	$\eta$
31	1	$2,010 \cdot 10^4$	$5,505 \cdot 10^6$	0,004
31	2	$1,191 \cdot 10^3$	$3,988 \cdot 10^6$	0,000
31	3	$1,418 \cdot 10^4$	$4,853 \cdot 10^6$	0,003
31	4	$1,191 \cdot 10^3$	$2,881 \cdot 10^6$	0,000
31	5	$1,191 \cdot 10^3$	$5,668 \cdot 10^5$	0,002
31	Envolvente	$2,010 \cdot 10^4$	$5,505 \cdot 10^6$	0,004
32	1	$2,010 \cdot 10^4$	$8,850 \cdot 10^6$	0,002
32	2	$1,191 \cdot 10^3$	$3,494 \cdot 10^6$	0,000
32	3	$1,418 \cdot 10^4$	$3,964 \cdot 10^6$	0,004
32	4	$1,191 \cdot 10^3$	$2,336 \cdot 10^6$	0,001
32	5	$1,191 \cdot 10^3$	$7,470 \cdot 10^5$	0,002
32	Envolvente	$1,418 \cdot 10^4$	$3,964 \cdot 10^6$	0,004
33	1	$2,010 \cdot 10^4$	$2,564 \cdot 10^5$	0,078
33	2	$1,191 \cdot 10^3$	$6,492 \cdot 10^5$	0,002
33	3	$1,418 \cdot 10^4$	$5,728 \cdot 10^5$	0,025
33	4	$1,191 \cdot 10^3$	$4,768 \cdot 10^5$	0,002
33	5	$1,191 \cdot 10^3$	$2,717 \cdot 10^6$	0,000
33	Envolvente	$2,010 \cdot 10^4$	$2,564 \cdot 10^5$	0,078
34	1	$2,010 \cdot 10^4$	$3,023 \cdot 10^5$	0,067
34	2	$1,191 \cdot 10^3$	$6,278 \cdot 10^5$	0,002
34	3	$1,418 \cdot 10^4$	$5,700 \cdot 10^5$	0,025
34	4	$1,191 \cdot 10^3$	$5,762 \cdot 10^5$	0,002
34	5	$1,191 \cdot 10^3$	$2,340 \cdot 10^6$	0,001
34	Envolvente	$2,010 \cdot 10^4$	$3,023 \cdot 10^5$	0,067
35	1	$2,010 \cdot 10^4$	$2,449 \cdot 10^5$	0,082
35	2	$1,191 \cdot 10^3$	$5,789 \cdot 10^5$	0,002
35	3	$1,418 \cdot 10^4$	$5,296 \cdot 10^5$	0,027
35	4	$1,191 \cdot 10^3$	$5,023 \cdot 10^5$	0,002
35	5	$1,191 \cdot 10^3$	$2,469 \cdot 10^6$	0,000
35	Envolvente	$2,010 \cdot 10^4$	$2,449 \cdot 10^5$	0,082
36	1	$2,010 \cdot 10^4$	$2,608 \cdot 10^5$	0,077
36	2	$1,191 \cdot 10^3$	$8,163 \cdot 10^5$	0,001
36	3	$1,418 \cdot 10^4$	$7,148 \cdot 10^5$	0,020



ID barra	hipótesis	Ciclos que recibe	Ciclos que resiste	$\eta$
36	4	$1,191 \cdot 10^3$	$6,348 \cdot 10^5$	0,002
36	5	$1,191 \cdot 10^3$	$2,402 \cdot 10^6$	0,000
36	Envolvente	$2,010 \cdot 10^4$	$2,608 \cdot 10^5$	0,077
37	1	$2,010 \cdot 10^4$	$4,649 \cdot 10^6$	0,004
37	2	$1,191 \cdot 10^3$	$3,903 \cdot 10^6$	0,000
37	3	$1,418 \cdot 10^4$	$4,514 \cdot 10^6$	0,003
37	4	$1,191 \cdot 10^3$	$2,396 \cdot 10^6$	0,000
37	5	$1,191 \cdot 10^3$	$6,319 \cdot 10^5$	0,002
37	Envolvente	$2,010 \cdot 10^4$	$4,649 \cdot 10^6$	0,004
38	1	$2,010 \cdot 10^4$	$3,517 \cdot 10^7$	0,001
38	2	$1,191 \cdot 10^3$	$3,931 \cdot 10^6$	0,000
38	3	$1,418 \cdot 10^4$	$4,669 \cdot 10^6$	0,003
38	4	$1,191 \cdot 10^3$	$2,622 \cdot 10^6$	0,000
38	5	$1,191 \cdot 10^3$	$5,604 \cdot 10^5$	0,002
38	Envolvente	$1,418 \cdot 10^4$	$4,669 \cdot 10^6$	0,003
39	1	$2,010 \cdot 10^4$	$4,442 \cdot 10^6$	0,005
39	2	$1,191 \cdot 10^3$	$3,565 \cdot 10^6$	0,000
39	3	$1,418 \cdot 10^4$	$4,021 \cdot 10^6$	0,004
39	4	$1,191 \cdot 10^3$	$2,376 \cdot 10^6$	0,001
39	5	$1,191 \cdot 10^3$	$6,905 \cdot 10^5$	0,002
39	Envolvente	$2,010 \cdot 10^4$	$4,442 \cdot 10^6$	0,005
40	1	$2,010 \cdot 10^4$	$8,441 \cdot 10^6$	0,002
40	2	$1,191 \cdot 10^3$	$3,850 \cdot 10^6$	0,000
40	3	$1,418 \cdot 10^4$	$4,536 \cdot 10^6$	0,003
40	4	$1,191 \cdot 10^3$	$2,433 \cdot 10^6$	0,000
40	5	$1,191 \cdot 10^3$	$5,373 \cdot 10^5$	0,002
40	Envolvente	$1,418 \cdot 10^4$	$4,536 \cdot 10^6$	0,003
41	1	$2,010 \cdot 10^4$	$3,454 \cdot 10^5$	0,058
41	2	$1,191 \cdot 10^3$	$8,161 \cdot 10^5$	0,001
41	3	$1,418 \cdot 10^4$	$7,560 \cdot 10^5$	0,019
41	4	$1,191 \cdot 10^3$	$7,099 \cdot 10^5$	0,002
41	5	$1,191 \cdot 10^3$	$2,154 \cdot 10^6$	0,001
41	Envolvente	$2,010 \cdot 10^4$	$3,454 \cdot 10^5$	0,058

ID barra	hipótesis	Ciclos que recibe	Ciclos que resiste	$\eta$
42	1	$2,010 \cdot 10^4$	$3,162 \cdot 10^5$	0,064
42	2	$1,191 \cdot 10^3$	$8,243 \cdot 10^5$	0,001
42	3	$1,418 \cdot 10^4$	$6,934 \cdot 10^5$	0,020
42	4	$1,191 \cdot 10^3$	$6,089 \cdot 10^5$	0,002
42	5	$1,191 \cdot 10^3$	$2,473 \cdot 10^6$	0,000
42	Envolvente	$2,010 \cdot 10^4$	$3,162 \cdot 10^5$	0,064
43	1	$2,010 \cdot 10^4$	$2,981 \cdot 10^5$	0,067
43	2	$1,191 \cdot 10^3$	$1,044 \cdot 10^6$	0,001
43	3	$1,418 \cdot 10^4$	$9,057 \cdot 10^5$	0,016
43	4	$1,191 \cdot 10^3$	$8,261 \cdot 10^5$	0,001
43	5	$1,191 \cdot 10^3$	$1,864 \cdot 10^6$	0,001
43	Envolvente	$2,010 \cdot 10^4$	$2,981 \cdot 10^5$	0,067
44	1	$2,010 \cdot 10^4$	$2,697 \cdot 10^5$	0,075
44	2	$1,191 \cdot 10^3$	$6,718 \cdot 10^5$	0,002
44	3	$1,418 \cdot 10^4$	$6,167 \cdot 10^5$	0,023
44	4	$1,191 \cdot 10^3$	$5,995 \cdot 10^5$	0,002
44	5	$1,191 \cdot 10^3$	$2,166 \cdot 10^6$	0,001
44	Envolvente	$2,010 \cdot 10^4$	$2,697 \cdot 10^5$	0,075
45	1	$2,010 \cdot 10^4$	$5,589 \cdot 10^6$	0,004
45	2	$1,191 \cdot 10^3$	$3,457 \cdot 10^6$	0,000
45	3	$1,418 \cdot 10^4$	$4,410 \cdot 10^6$	0,003
45	4	$1,191 \cdot 10^3$	$2,470 \cdot 10^6$	0,000
45	5	$1,191 \cdot 10^3$	$6,775 \cdot 10^5$	0,002
45	Envolvente	$2,010 \cdot 10^4$	$5,589 \cdot 10^6$	0,004
46	1	$2,010 \cdot 10^4$	$9,082 \cdot 10^6$	0,002
46	2	$1,191 \cdot 10^3$	$3,270 \cdot 10^6$	0,000
46	3	$1,418 \cdot 10^4$	$3,892 \cdot 10^6$	0,004
46	4	$1,191 \cdot 10^3$	$2,163 \cdot 10^6$	0,001
46	5	$1,191 \cdot 10^3$	$7,277 \cdot 10^5$	0,002
46	Envolvente	$1,418 \cdot 10^4$	$3,892 \cdot 10^6$	0,004
47	1	$2,010 \cdot 10^4$	$4,816 \cdot 10^6$	0,004
47	2	$1,191 \cdot 10^3$	$2,956 \cdot 10^6$	0,000
47	3	$1,418 \cdot 10^4$	$3,641 \cdot 10^6$	0,004



ID barra	hipótesis	Ciclos que recibe	Ciclos que resiste	$\eta$
47	4	$1,191 \cdot 10^3$	$2,102 \cdot 10^6$	0,001
47	5	$1,191 \cdot 10^3$	$6,488 \cdot 10^5$	0,002
47	Envolvente	$2,010 \cdot 10^4$	$4,816 \cdot 10^6$	0,004
48	1	$2,010 \cdot 10^4$	$8,186 \cdot 10^6$	0,002
48	2	$1,191 \cdot 10^3$	$2,751 \cdot 10^6$	0,000
48	3	$1,418 \cdot 10^4$	$3,213 \cdot 10^6$	0,004
48	4	$1,191 \cdot 10^3$	$1,824 \cdot 10^6$	0,001
48	5	$1,191 \cdot 10^3$	$8,602 \cdot 10^5$	0,001
48	Envolvente	$1,418 \cdot 10^4$	$3,213 \cdot 10^6$	0,004
49	1	$2,010 \cdot 10^4$	$3,047 \cdot 10^5$	0,066
49	2	$1,191 \cdot 10^3$	$7,010 \cdot 10^5$	0,002
49	3	$1,418 \cdot 10^4$	$6,188 \cdot 10^5$	0,023
49	4	$1,191 \cdot 10^3$	$5,075 \cdot 10^5$	0,002
49	5	$1,191 \cdot 10^3$	$2,186 \cdot 10^6$	0,001
49	Envolvente	$2,010 \cdot 10^4$	$3,047 \cdot 10^5$	0,066
50	1	$2,010 \cdot 10^4$	$3,569 \cdot 10^5$	0,056
50	2	$1,191 \cdot 10^3$	$8,167 \cdot 10^5$	0,001
50	3	$1,418 \cdot 10^4$	$7,557 \cdot 10^5$	0,019
50	4	$1,191 \cdot 10^3$	$7,072 \cdot 10^5$	0,002
50	5	$1,191 \cdot 10^3$	$1,991 \cdot 10^6$	0,001
50	Envolvente	$2,010 \cdot 10^4$	$3,569 \cdot 10^5$	0,056
51	1	$2,010 \cdot 10^4$	$2,741 \cdot 10^5$	0,073
51	2	$1,191 \cdot 10^3$	$6,653 \cdot 10^5$	0,002
51	3	$1,418 \cdot 10^4$	$6,102 \cdot 10^5$	0,023
51	4	$1,191 \cdot 10^3$	$5,796 \cdot 10^5$	0,002
51	5	$1,191 \cdot 10^3$	$1,911 \cdot 10^6$	0,001
51	Envolvente	$2,010 \cdot 10^4$	$2,741 \cdot 10^5$	0,073
52	1	$2,010 \cdot 10^4$	$2,919 \cdot 10^5$	0,069
52	2	$1,191 \cdot 10^3$	$1,019 \cdot 10^6$	0,001
52	3	$1,418 \cdot 10^4$	$8,754 \cdot 10^5$	0,016
52	4	$1,191 \cdot 10^3$	$7,421 \cdot 10^5$	0,002
52	5	$1,191 \cdot 10^3$	$1,841 \cdot 10^6$	0,001
52	Envolvente	$2,010 \cdot 10^4$	$2,919 \cdot 10^5$	0,069

ID barra	hipótesis	Ciclos que recibe	Ciclos que resiste	$\eta$
53	1	$2,010 \cdot 10^4$	$4,389 \cdot 10^6$	0,005
53	2	$1,191 \cdot 10^3$	$3,137 \cdot 10^6$	0,000
53	3	$1,418 \cdot 10^4$	$3,650 \cdot 10^6$	0,004
53	4	$1,191 \cdot 10^3$	$2,023 \cdot 10^6$	0,001
53	5	$1,191 \cdot 10^3$	$7,363 \cdot 10^5$	0,002
53	Envolvente	$2,010 \cdot 10^4$	$4,389 \cdot 10^6$	0,005
54	1	$2,010 \cdot 10^4$	$8,766 \cdot 10^6$	0,002
54	2	$1,191 \cdot 10^3$	$3,258 \cdot 10^6$	0,000
54	3	$1,418 \cdot 10^4$	$3,835 \cdot 10^6$	0,004
54	4	$1,191 \cdot 10^3$	$2,097 \cdot 10^6$	0,001
54	5	$1,191 \cdot 10^3$	$5,998 \cdot 10^5$	0,002
54	Envolvente	$1,418 \cdot 10^4$	$3,835 \cdot 10^6$	0,004
55	1	$2,010 \cdot 10^4$	$4,100 \cdot 10^6$	0,005
55	2	$1,191 \cdot 10^3$	$2,878 \cdot 10^6$	0,000
55	3	$1,418 \cdot 10^4$	$3,296 \cdot 10^6$	0,004
55	4	$1,191 \cdot 10^3$	$1,871 \cdot 10^6$	0,001
55	5	$1,191 \cdot 10^3$	$8,063 \cdot 10^5$	0,001
55	Envolvente	$2,010 \cdot 10^4$	$4,100 \cdot 10^6$	0,005
56	1	$2,010 \cdot 10^4$	$7,529 \cdot 10^6$	0,003
56	2	$1,191 \cdot 10^3$	$2,875 \cdot 10^6$	0,000
56	3	$1,418 \cdot 10^4$	$3,330 \cdot 10^6$	0,004
56	4	$1,191 \cdot 10^3$	$1,839 \cdot 10^6$	0,001
56	5	$1,191 \cdot 10^3$	$6,216 \cdot 10^5$	0,002
56	Envolvente	$1,418 \cdot 10^4$	$3,330 \cdot 10^6$	0,004
57	1	$2,010 \cdot 10^4$	$6,077 \cdot 10^5$	0,033
57	2	$1,191 \cdot 10^3$	$1,448 \cdot 10^6$	0,001
57	3	$1,418 \cdot 10^4$	$1,330 \cdot 10^6$	0,011
57	4	$1,191 \cdot 10^3$	$1,278 \cdot 10^6$	0,001
57	5	$1,191 \cdot 10^3$	$2,311 \cdot 10^6$	0,001
57	Envolvente	$2,010 \cdot 10^4$	$6,077 \cdot 10^5$	0,033
58	1	$2,010 \cdot 10^4$	$5,265 \cdot 10^5$	0,038
58	2	$1,191 \cdot 10^3$	$1,440 \cdot 10^6$	0,001
58	3	$1,418 \cdot 10^4$	$1,217 \cdot 10^6$	0,012



ID barra	hipótesis	Ciclos que recibe	Ciclos que resiste	$\eta$
58	4	$1,191 \cdot 10^3$	$1,076 \cdot 10^6$	0,001
58	5	$1,191 \cdot 10^3$	$2,729 \cdot 10^6$	0,000
58	Envolvente	$2,010 \cdot 10^4$	$5,265 \cdot 10^5$	0,038
59	1	$2,010 \cdot 10^4$	$5,598 \cdot 10^5$	0,036
59	2	$1,191 \cdot 10^3$	$1,979 \cdot 10^6$	0,001
59	3	$1,418 \cdot 10^4$	$1,729 \cdot 10^6$	0,008
59	4	$1,191 \cdot 10^3$	$1,453 \cdot 10^6$	0,001
59	5	$1,191 \cdot 10^3$	$1,990 \cdot 10^6$	0,001
59	Envolvente	$2,010 \cdot 10^4$	$5,598 \cdot 10^5$	0,036
60	1	$2,010 \cdot 10^4$	$4,982 \cdot 10^5$	0,040
60	2	$1,191 \cdot 10^3$	$1,208 \cdot 10^6$	0,001
60	3	$1,418 \cdot 10^4$	$1,114 \cdot 10^6$	0,013
60	4	$1,191 \cdot 10^3$	$1,070 \cdot 10^6$	0,001
60	5	$1,191 \cdot 10^3$	$2,206 \cdot 10^6$	0,001
60	Envolvente	$2,010 \cdot 10^4$	$4,982 \cdot 10^5$	0,040
61	1	$2,010 \cdot 10^4$	$8,670 \cdot 10^6$	0,002
61	2	$1,191 \cdot 10^3$	$3,872 \cdot 10^6$	0,000
61	3	$1,418 \cdot 10^4$	$4,870 \cdot 10^6$	0,003
61	4	$1,191 \cdot 10^3$	$2,789 \cdot 10^6$	0,000
61	5	$1,191 \cdot 10^3$	$1,195 \cdot 10^6$	0,001
61	Envolvente	$1,418 \cdot 10^4$	$4,870 \cdot 10^6$	0,003
62	1	$2,010 \cdot 10^4$	$3,849 \cdot 10^7$	0,001
62	2	$1,191 \cdot 10^3$	$3,503 \cdot 10^6$	0,000
62	3	$1,418 \cdot 10^4$	$4,168 \cdot 10^6$	0,003
62	4	$1,191 \cdot 10^3$	$2,347 \cdot 10^6$	0,001
62	5	$1,191 \cdot 10^3$	$1,346 \cdot 10^6$	0,001
62	Envolvente	$1,418 \cdot 10^4$	$4,168 \cdot 10^6$	0,003
63	1	$2,010 \cdot 10^4$	$6,346 \cdot 10^6$	0,003
63	2	$1,191 \cdot 10^3$	$3,082 \cdot 10^6$	0,000
63	3	$1,418 \cdot 10^4$	$3,960 \cdot 10^6$	0,004
63	4	$1,191 \cdot 10^3$	$2,203 \cdot 10^6$	0,001
63	5	$1,191 \cdot 10^3$	$1,165 \cdot 10^6$	0,001
63	Envolvente	$1,418 \cdot 10^4$	$3,960 \cdot 10^6$	0,004



ID barra	hipótesis	Ciclos que recibe	Ciclos que resiste	$\eta$
64	1	$2,010 \cdot 10^4$	$9,287 \cdot 10^6$	0,002
64	2	$1,191 \cdot 10^3$	$2,950 \cdot 10^6$	0,000
64	3	$1,418 \cdot 10^4$	$3,511 \cdot 10^6$	0,004
64	4	$1,191 \cdot 10^3$	$1,975 \cdot 10^6$	0,001
64	5	$1,191 \cdot 10^3$	$1,514 \cdot 10^6$	0,001
64	Envolvente	$1,418 \cdot 10^4$	$3,511 \cdot 10^6$	0,004
65	1	$2,010 \cdot 10^4$	$5,128 \cdot 10^5$	0,039
65	2	$1,191 \cdot 10^3$	$1,229 \cdot 10^6$	0,001
65	3	$1,418 \cdot 10^4$	$1,075 \cdot 10^6$	0,013
65	4	$1,191 \cdot 10^3$	$8,857 \cdot 10^5$	0,001
65	5	$1,191 \cdot 10^3$	$2,388 \cdot 10^6$	0,000
65	Envolvente	$2,010 \cdot 10^4$	$5,128 \cdot 10^5$	0,039
66	1	$2,010 \cdot 10^4$	$6,267 \cdot 10^5$	0,032
66	2	$1,191 \cdot 10^3$	$1,450 \cdot 10^6$	0,001
66	3	$1,418 \cdot 10^4$	$1,332 \cdot 10^6$	0,011
66	4	$1,191 \cdot 10^3$	$1,278 \cdot 10^6$	0,001
66	5	$1,191 \cdot 10^3$	$2,304 \cdot 10^6$	0,001
66	Envolvente	$2,010 \cdot 10^4$	$6,267 \cdot 10^5$	0,032
67	1	$2,010 \cdot 10^4$	$5,028 \cdot 10^5$	0,040
67	2	$1,191 \cdot 10^3$	$1,196 \cdot 10^6$	0,001
67	3	$1,418 \cdot 10^4$	$1,101 \cdot 10^6$	0,013
67	4	$1,191 \cdot 10^3$	$1,034 \cdot 10^6$	0,001
67	5	$1,191 \cdot 10^3$	$2,035 \cdot 10^6$	0,001
67	Envolvente	$2,010 \cdot 10^4$	$5,028 \cdot 10^5$	0,040
68	1	$2,010 \cdot 10^4$	$5,411 \cdot 10^5$	0,037
68	2	$1,191 \cdot 10^3$	$1,842 \cdot 10^6$	0,001
68	3	$1,418 \cdot 10^4$	$1,642 \cdot 10^6$	0,009
68	4	$1,191 \cdot 10^3$	$1,327 \cdot 10^6$	0,001
68	5	$1,191 \cdot 10^3$	$1,928 \cdot 10^6$	0,001
68	Envolvente	$2,010 \cdot 10^4$	$5,411 \cdot 10^5$	0,037
69	1	$2,010 \cdot 10^4$	$6,285 \cdot 10^6$	0,003
69	2	$1,191 \cdot 10^3$	$3,594 \cdot 10^6$	0,000
69	3	$1,418 \cdot 10^4$	$4,265 \cdot 10^6$	0,003



ID barra	hipótesis	Ciclos que recibe	Ciclos que resiste	$\eta$
69	4	$1,191 \cdot 10^3$	$2,371 \cdot 10^6$	0,001
69	5	$1,191 \cdot 10^3$	$1,347 \cdot 10^6$	0,001
69	Envolvente	$1,418 \cdot 10^4$	$4,265 \cdot 10^6$	0,003
70	1	$2,010 \cdot 10^4$	$3,819 \cdot 10^7$	0,001
70	2	$1,191 \cdot 10^3$	$3,623 \cdot 10^6$	0,000
70	3	$1,418 \cdot 10^4$	$4,312 \cdot 10^6$	0,003
70	4	$1,191 \cdot 10^3$	$2,335 \cdot 10^6$	0,001
70	5	$1,191 \cdot 10^3$	$1,047 \cdot 10^6$	0,001
70	Envolvente	$1,418 \cdot 10^4$	$4,312 \cdot 10^6$	0,003
71	1	$2,010 \cdot 10^4$	$5,436 \cdot 10^6$	0,004
71	2	$1,191 \cdot 10^3$	$2,998 \cdot 10^6$	0,000
71	3	$1,418 \cdot 10^4$	$3,560 \cdot 10^6$	0,004
71	4	$1,191 \cdot 10^3$	$1,982 \cdot 10^6$	0,001
71	5	$1,191 \cdot 10^3$	$1,441 \cdot 10^6$	0,001
71	Envolvente	$1,418 \cdot 10^4$	$3,560 \cdot 10^6$	0,004
72	1	$2,010 \cdot 10^4$	$8,994 \cdot 10^6$	0,002
72	2	$1,191 \cdot 10^3$	$3,093 \cdot 10^6$	0,000
72	3	$1,418 \cdot 10^4$	$3,668 \cdot 10^6$	0,004
72	4	$1,191 \cdot 10^3$	$2,006 \cdot 10^6$	0,001
72	5	$1,191 \cdot 10^3$	$1,116 \cdot 10^6$	0,001
72	Envolvente	$1,418 \cdot 10^4$	$3,668 \cdot 10^6$	0,004
73	1	$2,010 \cdot 10^4$	$5,793 \cdot 10^5$	0,035
73	2	$1,191 \cdot 10^3$	$1,514 \cdot 10^6$	0,001
73	3	$1,418 \cdot 10^4$	$1,434 \cdot 10^6$	0,01
73	4	$1,191 \cdot 10^3$	$1,202 \cdot 10^6$	0,001
73	5	$1,191 \cdot 10^3$	$1,273 \cdot 10^6$	0,001
73	Envolvente	$2,010 \cdot 10^4$	$5,793 \cdot 10^5$	0,035
74	1	$2,010 \cdot 10^4$	$4,847 \cdot 10^5$	0,041
74	2	$1,191 \cdot 10^3$	$1,305 \cdot 10^6$	0,001
74	3	$1,418 \cdot 10^4$	$1,172 \cdot 10^6$	0,012
74	4	$1,191 \cdot 10^3$	$1,066 \cdot 10^6$	0,001
74	5	$1,191 \cdot 10^3$	$1,400 \cdot 10^6$	0,001
74	Envolvente	$2,010 \cdot 10^4$	$4,847 \cdot 10^5$	0,041

ID barra	hipótesis	Ciclos que recibe	Ciclos que resiste	$\eta$
75	1	$2,010 \cdot 10^4$	$5,738 \cdot 10^5$	0,035
75	2	$1,191 \cdot 10^3$	$1,974 \cdot 10^6$	0,001
75	3	$1,418 \cdot 10^4$	$1,713 \cdot 10^6$	0,008
75	4	$1,191 \cdot 10^3$	$1,485 \cdot 10^6$	0,001
75	5	$1,191 \cdot 10^3$	$1,046 \cdot 10^6$	0,001
75	Envolvente	$2,010 \cdot 10^4$	$5,738 \cdot 10^5$	0,035
76	1	$2,010 \cdot 10^4$	$5,059 \cdot 10^5$	0,040
76	2	$1,191 \cdot 10^3$	$1,241 \cdot 10^6$	0,001
76	3	$1,418 \cdot 10^4$	$1,143 \cdot 10^6$	0,012
76	4	$1,191 \cdot 10^3$	$1,103 \cdot 10^6$	0,001
76	5	$1,191 \cdot 10^3$	$1,146 \cdot 10^6$	0,001
76	Envolvente	$2,010 \cdot 10^4$	$5,059 \cdot 10^5$	0,040
77	1	$2,010 \cdot 10^4$	$6,342 \cdot 10^6$	0,003
77	2	$1,191 \cdot 10^3$	$2,066 \cdot 10^6$	0,001
77	3	$1,418 \cdot 10^4$	$2,597 \cdot 10^6$	0,005
77	4	$1,191 \cdot 10^3$	$1,434 \cdot 10^6$	0,001
77	5	$1,191 \cdot 10^3$	$1,205 \cdot 10^6$	0,001
77	Envolvente	$1,418 \cdot 10^4$	$2,597 \cdot 10^6$	0,005
78	1	$2,010 \cdot 10^4$	$6,279 \cdot 10^6$	0,003
78	2	$1,191 \cdot 10^3$	$1,941 \cdot 10^6$	0,001
78	3	$1,418 \cdot 10^4$	$2,360 \cdot 10^6$	0,006
78	4	$1,191 \cdot 10^3$	$1,316 \cdot 10^6$	0,001
78	5	$1,191 \cdot 10^3$	$1,373 \cdot 10^6$	0,001
78	Envolvente	$1,418 \cdot 10^4$	$2,360 \cdot 10^6$	0,006
79	1	$2,010 \cdot 10^4$	$4,760 \cdot 10^6$	0,004
79	2	$1,191 \cdot 10^3$	$1,679 \cdot 10^6$	0,001
79	3	$1,418 \cdot 10^4$	$2,114 \cdot 10^6$	0,007
79	4	$1,191 \cdot 10^3$	$1,197 \cdot 10^6$	0,001
79	5	$1,191 \cdot 10^3$	$1,223 \cdot 10^6$	0,001
79	Envolvente	$1,418 \cdot 10^4$	$2,114 \cdot 10^6$	0,007
80	1	$2,010 \cdot 10^4$	$4,772 \cdot 10^6$	0,004
80	2	$1,191 \cdot 10^3$	$1,574 \cdot 10^6$	0,001
80	3	$1,418 \cdot 10^4$	$1,932 \cdot 10^6$	0,007



ID barra	hipótesis	Ciclos que recibe	Ciclos que resiste	$\eta$
80	4	$1,191 \cdot 10^3$	$1,069 \cdot 10^6$	0,001
80	5	$1,191 \cdot 10^3$	$1,569 \cdot 10^6$	0,001
80	Envolvente	$1,418 \cdot 10^4$	$1,932 \cdot 10^6$	0,007
81	1	$2,010 \cdot 10^4$	$4,773 \cdot 10^5$	0,042
81	2	$1,191 \cdot 10^3$	$1,260 \cdot 10^6$	0,001
81	3	$1,418 \cdot 10^4$	$1,085 \cdot 10^6$	0,013
81	4	$1,191 \cdot 10^3$	$9,350 \cdot 10^5$	0,001
81	5	$1,191 \cdot 10^3$	$1,312 \cdot 10^6$	0,001
81	Envolvente	$2,010 \cdot 10^4$	$4,773 \cdot 10^5$	0,042
82	1	$2,010 \cdot 10^4$	$6,003 \cdot 10^5$	0,033
82	2	$1,191 \cdot 10^3$	$1,507 \cdot 10^6$	0,001
82	3	$1,418 \cdot 10^4$	$1,414 \cdot 10^6$	0,010
82	4	$1,191 \cdot 10^3$	$1,208 \cdot 10^6$	0,001
82	5	$1,191 \cdot 10^3$	$1,259 \cdot 10^6$	0,001
82	Envolvente	$2,010 \cdot 10^4$	$6,003 \cdot 10^5$	0,033
83	1	$2,010 \cdot 10^4$	$5,110 \cdot 10^5$	0,039
83	2	$1,191 \cdot 10^3$	$1,244 \cdot 10^6$	0,001
83	3	$1,418 \cdot 10^4$	$1,146 \cdot 10^6$	0,012
83	4	$1,191 \cdot 10^3$	$1,108 \cdot 10^6$	0,001
83	5	$1,191 \cdot 10^3$	$1,059 \cdot 10^6$	0,001
83	Envolvente	$2,010 \cdot 10^4$	$5,110 \cdot 10^5$	0,039
84	1	$2,010 \cdot 10^4$	$5,566 \cdot 10^5$	0,036
84	2	$1,191 \cdot 10^3$	$1,967 \cdot 10^6$	0,001
84	3	$1,418 \cdot 10^4$	$1,702 \cdot 10^6$	0,008
84	4	$1,191 \cdot 10^3$	$1,425 \cdot 10^6$	0,001
84	5	$1,191 \cdot 10^3$	$1,045 \cdot 10^6$	0,001
84	Envolvente	$2,010 \cdot 10^4$	$5,566 \cdot 10^5$	0,036
85	1	$2,010 \cdot 10^4$	$4,742 \cdot 10^6$	0,004
85	2	$1,191 \cdot 10^3$	$1,955 \cdot 10^6$	0,001
85	3	$1,418 \cdot 10^4$	$2,391 \cdot 10^6$	0,006
85	4	$1,191 \cdot 10^3$	$1,316 \cdot 10^6$	0,001
85	5	$1,191 \cdot 10^3$	$1,401 \cdot 10^6$	0,001
85	Envolvente	$1,418 \cdot 10^4$	$2,391 \cdot 10^6$	0,006

ID barra	hipótesis	Ciclos que recibe	Ciclos que resiste	$\eta$
86	1	$2,010 \cdot 10^4$	$6,927 \cdot 10^6$	0,003
86	2	$1,191 \cdot 10^3$	$1,982 \cdot 10^6$	0,001
86	3	$1,418 \cdot 10^4$	$2,430 \cdot 10^6$	0,006
86	4	$1,191 \cdot 10^3$	$1,316 \cdot 10^6$	0,001
86	5	$1,191 \cdot 10^3$	$1,099 \cdot 10^6$	0,001
86	Envolvente	$1,418 \cdot 10^4$	$2,430 \cdot 10^6$	0,006
87	1	$2,010 \cdot 10^4$	$4,060 \cdot 10^6$	0,005
87	2	$1,191 \cdot 10^3$	$1,604 \cdot 10^6$	0,001
87	3	$1,418 \cdot 10^4$	$1,977 \cdot 10^6$	0,007
87	4	$1,191 \cdot 10^3$	$1,086 \cdot 10^6$	0,001
87	5	$1,191 \cdot 10^3$	$1,529 \cdot 10^6$	0,001
87	Envolvente	$1,418 \cdot 10^4$	$1,977 \cdot 10^6$	0,007
88	1	$2,010 \cdot 10^4$	$5,021 \cdot 10^6$	0,004
88	2	$1,191 \cdot 10^3$	$1,643 \cdot 10^6$	0,001
88	3	$1,418 \cdot 10^4$	$1,992 \cdot 10^6$	0,007
88	4	$1,191 \cdot 10^3$	$1,092 \cdot 10^6$	0,001
88	5	$1,191 \cdot 10^3$	$1,210 \cdot 10^6$	0,001
88	Envolvente	$1,418 \cdot 10^4$	$1,992 \cdot 10^6$	0,007
89	1	$2,010 \cdot 10^4$	$4,935 \cdot 10^5$	0,041
89	2	$1,191 \cdot 10^3$	$1,238 \cdot 10^6$	0,001
89	3	$1,418 \cdot 10^4$	$1,214 \cdot 10^6$	0,012
89	4	$1,191 \cdot 10^3$	$1,055 \cdot 10^6$	0,001
89	5	$1,191 \cdot 10^3$	$6,354 \cdot 10^5$	0,002
89	Envolvente	$2,010 \cdot 10^4$	$4,935 \cdot 10^5$	0,041
90	1	$2,010 \cdot 10^4$	$3,950 \cdot 10^5$	0,051
90	2	$1,191 \cdot 10^3$	$1,039 \cdot 10^6$	0,001
90	3	$1,418 \cdot 10^4$	$1,017 \cdot 10^6$	0,014
90	4	$1,191 \cdot 10^3$	$1,003 \cdot 10^6$	0,001
90	5	$1,191 \cdot 10^3$	$6,645 \cdot 10^5$	0,002
90	Envolvente	$2,010 \cdot 10^4$	$3,950 \cdot 10^5$	0,051
91	1	$2,010 \cdot 10^4$	$5,810 \cdot 10^5$	0,035
91	2	$1,191 \cdot 10^3$	$1,888 \cdot 10^6$	0,001
91	3	$1,418 \cdot 10^4$	$1,600 \cdot 10^6$	0,009



ID barra	hipótesis	Ciclos que recibe	Ciclos que resiste	$\eta$
91	4	$1,191 \cdot 10^3$	$1,465 \cdot 10^6$	0,001
91	5	$1,191 \cdot 10^3$	$5,161 \cdot 10^5$	0,002
91	Envolvente	$2,010 \cdot 10^4$	$5,810 \cdot 10^5$	0,035
92	1	$2,010 \cdot 10^4$	$4,896 \cdot 10^5$	0,041
92	2	$1,191 \cdot 10^3$	$1,259 \cdot 10^6$	0,001
92	3	$1,418 \cdot 10^4$	$1,160 \cdot 10^6$	0,012
92	4	$1,191 \cdot 10^3$	$1,137 \cdot 10^6$	0,001
92	5	$1,191 \cdot 10^3$	$5,327 \cdot 10^5$	0,002
92	Envolvente	$2,010 \cdot 10^4$	$4,896 \cdot 10^5$	0,041
93	1	$2,010 \cdot 10^4$	$3,575 \cdot 10^6$	0,006
93	2	$1,191 \cdot 10^3$	$9,882 \cdot 10^5$	0,001
93	3	$1,418 \cdot 10^4$	$1,278 \cdot 10^6$	0,011
93	4	$1,191 \cdot 10^3$	$6,919 \cdot 10^5$	0,002
93	5	$1,191 \cdot 10^3$	$1,129 \cdot 10^6$	0,001
93	Envolvente	$1,418 \cdot 10^4$	$1,278 \cdot 10^6$	0,011
94	1	$2,010 \cdot 10^4$	$3,198 \cdot 10^6$	0,006
94	2	$1,191 \cdot 10^3$	$9,591 \cdot 10^5$	0,001
94	3	$1,418 \cdot 10^4$	$1,195 \cdot 10^6$	0,012
94	4	$1,191 \cdot 10^3$	$6,672 \cdot 10^5$	0,002
94	5	$1,191 \cdot 10^3$	$1,196 \cdot 10^6$	0,001
94	Envolvente	$1,418 \cdot 10^4$	$1,195 \cdot 10^6$	0,012
95	1	$2,010 \cdot 10^4$	$2,624 \cdot 10^6$	0,008
95	2	$1,191 \cdot 10^3$	$8,059 \cdot 10^5$	0,001
95	3	$1,418 \cdot 10^4$	$1,037 \cdot 10^6$	0,014
95	4	$1,191 \cdot 10^3$	$5,630 \cdot 10^5$	0,002
95	5	$1,191 \cdot 10^3$	$1,289 \cdot 10^6$	0,001
95	Envolvente	$1,418 \cdot 10^4$	$1,037 \cdot 10^6$	0,014
96	1	$2,010 \cdot 10^4$	$2,511 \cdot 10^6$	0,008
96	2	$1,191 \cdot 10^3$	$7,841 \cdot 10^5$	0,002
96	3	$1,418 \cdot 10^4$	$9,722 \cdot 10^5$	0,015
96	4	$1,191 \cdot 10^3$	$5,372 \cdot 10^5$	0,002
96	5	$1,191 \cdot 10^3$	$1,643 \cdot 10^6$	0,001
96	Envolvente	$1,418 \cdot 10^4$	$9,722 \cdot 10^5$	0,015

ID barra	hipótesis	Ciclos que recibe	Ciclos que resiste	$\eta$
97	1	$2,010 \cdot 10^4$	$3,874 \cdot 10^5$	0,052
97	2	$1,191 \cdot 10^3$	$9,966 \cdot 10^5$	0,001
97	3	$1,418 \cdot 10^4$	$9,687 \cdot 10^5$	0,015
97	4	$1,191 \cdot 10^3$	$9,597 \cdot 10^5$	0,001
97	5	$1,191 \cdot 10^3$	$6,456 \cdot 10^5$	0,002
97	Envolvente	$2,010 \cdot 10^4$	$3,874 \cdot 10^5$	0,052
98	1	$2,010 \cdot 10^4$	$5,173 \cdot 10^5$	0,039
98	2	$1,191 \cdot 10^3$	$1,258 \cdot 10^6$	0,001
98	3	$1,418 \cdot 10^4$	$1,083 \cdot 10^6$	0,013
98	4	$1,191 \cdot 10^3$	$9,734 \cdot 10^5$	0,001
98	5	$1,191 \cdot 10^3$	$6,334 \cdot 10^5$	0,002
98	Envolvente	$2,010 \cdot 10^4$	$5,173 \cdot 10^5$	0,039
99	1	$2,010 \cdot 10^4$	$5,014 \cdot 10^5$	0,040
99	2	$1,191 \cdot 10^3$	$1,278 \cdot 10^6$	0,001
99	3	$1,418 \cdot 10^4$	$1,179 \cdot 10^6$	0,012
99	4	$1,191 \cdot 10^3$	$1,190 \cdot 10^6$	0,001
99	5	$1,191 \cdot 10^3$	$5,157 \cdot 10^5$	0,002
99	Envolvente	$2,010 \cdot 10^4$	$5,014 \cdot 10^5$	0,040
100	1	$2,010 \cdot 10^4$	$5,653 \cdot 10^5$	0,036
100	2	$1,191 \cdot 10^3$	$2,104 \cdot 10^6$	0,001
100	3	$1,418 \cdot 10^4$	$1,788 \cdot 10^6$	0,008
100	4	$1,191 \cdot 10^3$	$1,581 \cdot 10^6$	0,001
100	5	$1,191 \cdot 10^3$	$5,147 \cdot 10^5$	0,002
100	Envolvente	$2,010 \cdot 10^4$	$5,653 \cdot 10^5$	0,036
101	1	$2,010 \cdot 10^4$	$2,983 \cdot 10^6$	0,007
101	2	$1,191 \cdot 10^3$	$9,713 \cdot 10^5$	0,001
101	3	$1,418 \cdot 10^4$	$1,213 \cdot 10^6$	0,012
101	4	$1,191 \cdot 10^3$	$6,693 \cdot 10^5$	0,002
101	5	$1,191 \cdot 10^3$	$1,157 \cdot 10^6$	0,001
101	Envolvente	$1,418 \cdot 10^4$	$1,213 \cdot 10^6$	0,012
102	1	$2,010 \cdot 10^4$	$3,539 \cdot 10^6$	0,006
102	2	$1,191 \cdot 10^3$	$9,836 \cdot 10^5$	0,001
102	3	$1,418 \cdot 10^4$	$1,221 \cdot 10^6$	0,012



ID barra	hipótesis	Ciclos que recibe	Ciclos que resiste	$\eta$
102	4	$1,191 \cdot 10^3$	$6,671 \cdot 10^5$	0,002
102	5	$1,191 \cdot 10^3$	$1,112 \cdot 10^6$	0,001
102	Envolvente	$1,418 \cdot 10^4$	$1,221 \cdot 10^6$	0,012
103	1	$2,010 \cdot 10^4$	$2,476 \cdot 10^6$	0,008
103	2	$1,191 \cdot 10^3$	$7,863 \cdot 10^5$	0,002
103	3	$1,418 \cdot 10^4$	$9,895 \cdot 10^5$	0,014
103	4	$1,191 \cdot 10^3$	$5,417 \cdot 10^5$	0,002
103	5	$1,191 \cdot 10^3$	$1,677 \cdot 10^6$	0,001
103	Envolvente	$1,418 \cdot 10^4$	$9,895 \cdot 10^5$	0,014
104	1	$2,010 \cdot 10^4$	$2,584 \cdot 10^6$	0,008
104	2	$1,191 \cdot 10^3$	$7,944 \cdot 10^5$	0,001
104	3	$1,418 \cdot 10^4$	$9,967 \cdot 10^5$	0,014
104	4	$1,191 \cdot 10^3$	$5,430 \cdot 10^5$	0,002
104	5	$1,191 \cdot 10^3$	$1,325 \cdot 10^6$	0,001
104	Envolvente	$1,418 \cdot 10^4$	$9,967 \cdot 10^5$	0,014
105	1	$2,010 \cdot 10^4$	$7,909 \cdot 10^{12}$	0,000
105	2	$1,191 \cdot 10^3$	$6,018 \cdot 10^{12}$	0,000
105	3	$1,418 \cdot 10^4$	$7,124 \cdot 10^{12}$	0,000
105	4	$1,191 \cdot 10^3$	$4,321 \cdot 10^{12}$	0,000
105	5	$1,191 \cdot 10^3$	$6,343 \cdot 10^{13}$	0,000
105	Envolvente	$2,010 \cdot 10^4$	$7,909 \cdot 10^{12}$	0,000
106	1	$2,010 \cdot 10^4$	$5,580 \cdot 10^{12}$	0,000
106	2	$1,191 \cdot 10^3$	$5,824 \cdot 10^{12}$	0,000
106	3	$1,418 \cdot 10^4$	$7,575 \cdot 10^{12}$	0,000
106	4	$1,191 \cdot 10^3$	$4,290 \cdot 10^{12}$	0,000
106	5	$1,191 \cdot 10^3$	$7,407 \cdot 10^{13}$	0,000
106	Envolvente	$2,010 \cdot 10^4$	$5,580 \cdot 10^{12}$	0,000
107	1	$2,010 \cdot 10^4$	$1,397 \cdot 10^{13}$	0,000
107	2	$1,191 \cdot 10^3$	$2,690 \cdot 10^{13}$	0,000
107	3	$1,418 \cdot 10^4$	$2,396 \cdot 10^{13}$	0,000
107	4	$1,191 \cdot 10^3$	$1,991 \cdot 10^{13}$	0,000
107	5	$1,191 \cdot 10^3$	$2,520 \cdot 10^{15}$	0,000
107	Envolvente	$2,010 \cdot 10^4$	$1,397 \cdot 10^{13}$	0,000



ID barra	hipótesis	Ciclos que recibe	Ciclos que resiste	$\eta$
108	1	$2,010 \cdot 10^4$	$3,039 \cdot 10^{13}$	0,000
108	2	$1,191 \cdot 10^3$	$6,065 \cdot 10^{13}$	0,000
108	3	$1,418 \cdot 10^4$	$5,926 \cdot 10^{13}$	0,000
108	4	$1,191 \cdot 10^3$	$6,281 \cdot 10^{13}$	0,000
108	5	$1,191 \cdot 10^3$	$2,551 \cdot 10^{14}$	0,000
108	Envolvente	$2,010 \cdot 10^4$	$3,039 \cdot 10^{13}$	0,000
109	1	$2,010 \cdot 10^4$	$1,314 \cdot 10^{13}$	0,000
109	2	$1,191 \cdot 10^3$	$4,598 \cdot 10^{13}$	0,000
109	3	$1,418 \cdot 10^4$	$3,268 \cdot 10^{13}$	0,000
109	4	$1,191 \cdot 10^3$	$2,983 \cdot 10^{13}$	0,000
109	5	$1,191 \cdot 10^3$	$5,398 \cdot 10^{12}$	0,000
109	Envolvente	$2,010 \cdot 10^4$	$1,314 \cdot 10^{13}$	0,000
110	1	$2,010 \cdot 10^4$	$8,404 \cdot 10^{12}$	0,000
110	2	$1,191 \cdot 10^3$	$6,306 \cdot 10^{13}$	0,000
110	3	$1,418 \cdot 10^4$	$4,219 \cdot 10^{13}$	0,000
110	4	$1,191 \cdot 10^3$	$3,586 \cdot 10^{13}$	0,000
110	5	$1,191 \cdot 10^3$	$6,073 \cdot 10^{12}$	0,000
110	Envolvente	$2,010 \cdot 10^4$	$8,404 \cdot 10^{12}$	0,000
111	1	$2,010 \cdot 10^4$	$1,928 \cdot 10^{14}$	0,000
111	2	$1,191 \cdot 10^3$	$1,443 \cdot 10^{14}$	0,000
111	3	$1,418 \cdot 10^4$	$1,279 \cdot 10^{14}$	0,000
111	4	$1,191 \cdot 10^3$	$9,144 \cdot 10^{13}$	0,000
111	5	$1,191 \cdot 10^3$	$1,150 \cdot 10^{14}$	0,000
111	Envolvente	$1,418 \cdot 10^4$	$1,279 \cdot 10^{14}$	0,000
112	1	$2,010 \cdot 10^4$	$4,008 \cdot 10^{14}$	0,000
112	2	$1,191 \cdot 10^3$	$4,205 \cdot 10^{14}$	0,000
112	3	$1,418 \cdot 10^4$	$5,894 \cdot 10^{14}$	0,000
112	4	$1,191 \cdot 10^3$	$7,626 \cdot 10^{14}$	0,000
112	5	$1,191 \cdot 10^3$	$5,045 \cdot 10^{13}$	0,000
112	Envolvente	$2,010 \cdot 10^4$	$4,008 \cdot 10^{14}$	0,000
113	1	$2,010 \cdot 10^4$	$6,212 \cdot 10^{12}$	0,000
113	2	$1,191 \cdot 10^3$	$5,940 \cdot 10^{12}$	0,000
113	3	$1,418 \cdot 10^4$	$6,634 \cdot 10^{12}$	0,000



ID barra	hipótesis	Ciclos que recibe	Ciclos que resiste	$\eta$
113	4	$1,191 \cdot 10^3$	$4,556 \cdot 10^{12}$	0,000
113	5	$1,191 \cdot 10^3$	$5,479 \cdot 10^{13}$	0,000
113	Envolvente	$2,010 \cdot 10^4$	$6,212 \cdot 10^{12}$	0,000
114	1	$2,010 \cdot 10^4$	$5,713 \cdot 10^{12}$	0,000
114	2	$1,191 \cdot 10^3$	$6,823 \cdot 10^{12}$	0,000
114	3	$1,418 \cdot 10^4$	$8,433 \cdot 10^{12}$	0,000
114	4	$1,191 \cdot 10^3$	$5,446 \cdot 10^{12}$	0,000
114	5	$1,191 \cdot 10^3$	$7,608 \cdot 10^{13}$	0,000
114	Envolvente	$2,010 \cdot 10^4$	$5,713 \cdot 10^{12}$	0,000
115	1	$2,010 \cdot 10^4$	$1,873 \cdot 10^{13}$	0,000
115	2	$1,191 \cdot 10^3$	$3,871 \cdot 10^{13}$	0,000
115	3	$1,418 \cdot 10^4$	$3,937 \cdot 10^{13}$	0,000
115	4	$1,191 \cdot 10^3$	$2,809 \cdot 10^{13}$	0,000
115	5	$1,191 \cdot 10^3$	$1,353 \cdot 10^{15}$	0,000
115	Envolvente	$2,010 \cdot 10^4$	$1,873 \cdot 10^{13}$	0,000
116	1	$2,010 \cdot 10^4$	$1,849 \cdot 10^{13}$	0,000
116	2	$1,191 \cdot 10^3$	$3,916 \cdot 10^{13}$	0,000
116	3	$1,418 \cdot 10^4$	$4,109 \cdot 10^{13}$	0,000
116	4	$1,191 \cdot 10^3$	$4,156 \cdot 10^{13}$	0,000
116	5	$1,191 \cdot 10^3$	$3,590 \cdot 10^{14}$	0,000
116	Envolvente	$2,010 \cdot 10^4$	$1,849 \cdot 10^{13}$	0,000
117	1	$2,010 \cdot 10^4$	$1,569 \cdot 10^{13}$	0,000
117	2	$1,191 \cdot 10^3$	$4,782 \cdot 10^{13}$	0,000
117	3	$1,418 \cdot 10^4$	$4,630 \cdot 10^{13}$	0,000
117	4	$1,191 \cdot 10^3$	$3,959 \cdot 10^{13}$	0,000
117	5	$1,191 \cdot 10^3$	$9,682 \cdot 10^{12}$	0,000
117	Envolvente	$2,010 \cdot 10^4$	$1,569 \cdot 10^{13}$	0,000
118	1	$2,010 \cdot 10^4$	$1,016 \cdot 10^{13}$	0,000
118	2	$1,191 \cdot 10^3$	$4,325 \cdot 10^{13}$	0,000
118	3	$1,418 \cdot 10^4$	$3,821 \cdot 10^{13}$	0,000
118	4	$1,191 \cdot 10^3$	$2,891 \cdot 10^{13}$	0,000
118	5	$1,191 \cdot 10^3$	$7,001 \cdot 10^{12}$	0,000
118	Envolvente	$2,010 \cdot 10^4$	$1,016 \cdot 10^{13}$	0,000

ID barra	hipótesis	Ciclos que recibe	Ciclos que resiste	$\eta$
119	1	$2,010 \cdot 10^4$	$1,093 \cdot 10^{14}$	0,000
119	2	$1,191 \cdot 10^3$	$2,068 \cdot 10^{14}$	0,000
119	3	$1,418 \cdot 10^4$	$1,734 \cdot 10^{14}$	0,000
119	4	$1,191 \cdot 10^3$	$1,265 \cdot 10^{14}$	0,000
119	5	$1,191 \cdot 10^3$	$1,142 \cdot 10^{14}$	0,000
119	Envolvente	$2,010 \cdot 10^4$	$1,093 \cdot 10^{14}$	0,000
120	1	$2,010 \cdot 10^4$	$6,789 \cdot 10^{14}$	0,000
120	2	$1,191 \cdot 10^3$	$6,533 \cdot 10^{14}$	0,000
120	3	$1,418 \cdot 10^4$	$7,582 \cdot 10^{14}$	0,000
120	4	$1,191 \cdot 10^3$	$8,420 \cdot 10^{14}$	0,000
120	5	$1,191 \cdot 10^3$	$7,685 \cdot 10^{13}$	0,000
120	Envolvente	$2,010 \cdot 10^4$	$6,789 \cdot 10^{14}$	0,000

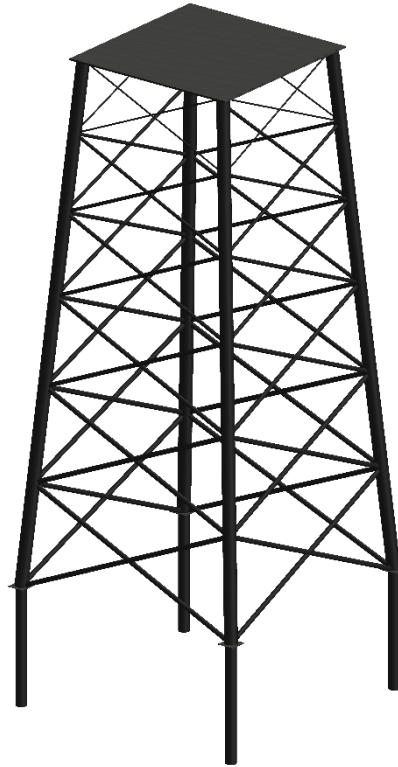




UNIVERSIDAD DE LAS PALMAS DE GRAN CANARIA  
Escuela de Ingenierías Industriales y Civiles

Diseño de una estructura tipo Jacket multipilotada para soporte  
de un aerogenerador marino en la isla de Gran Canaria

## Planos



Autor: *Román Quevedo Reina*

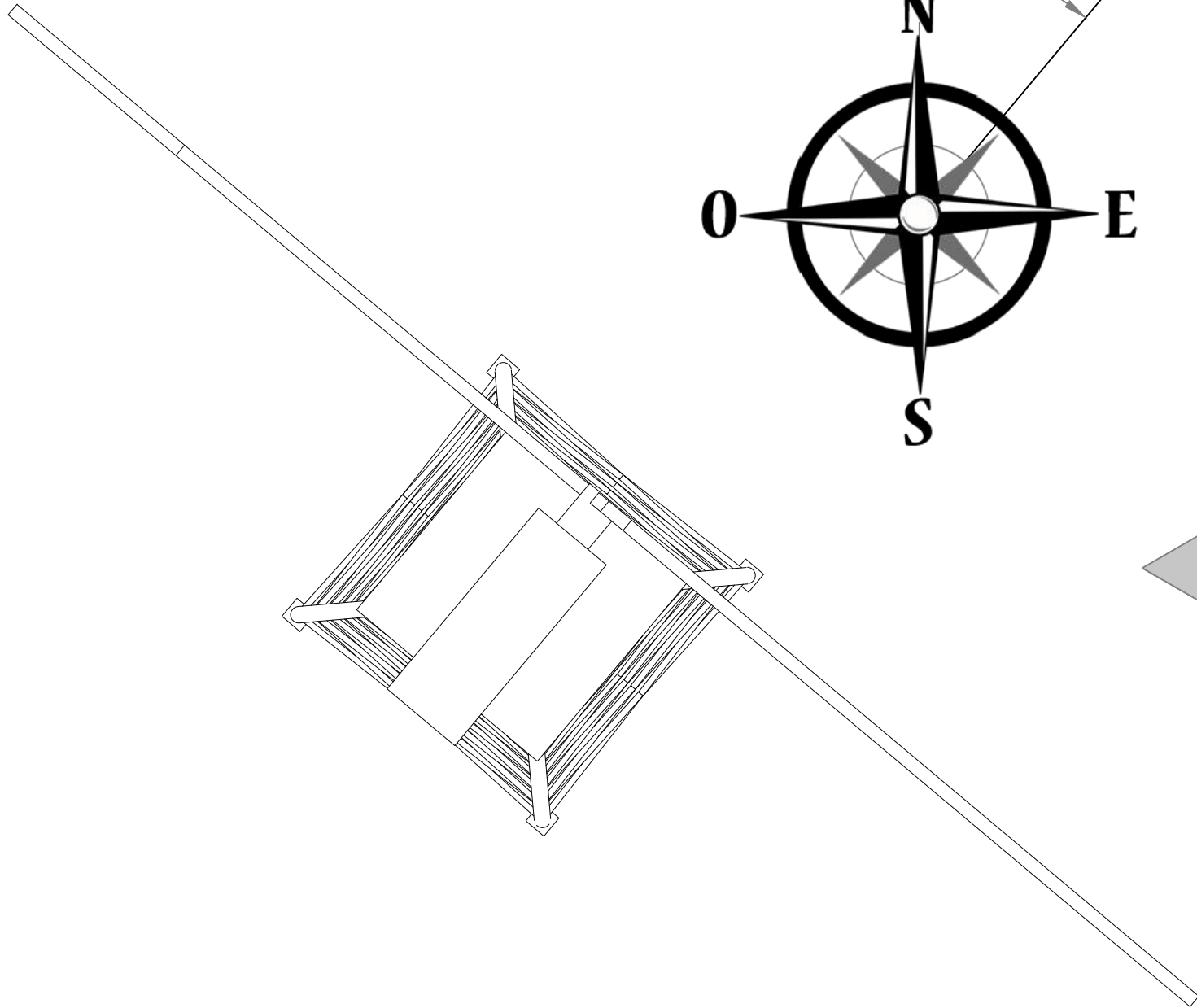
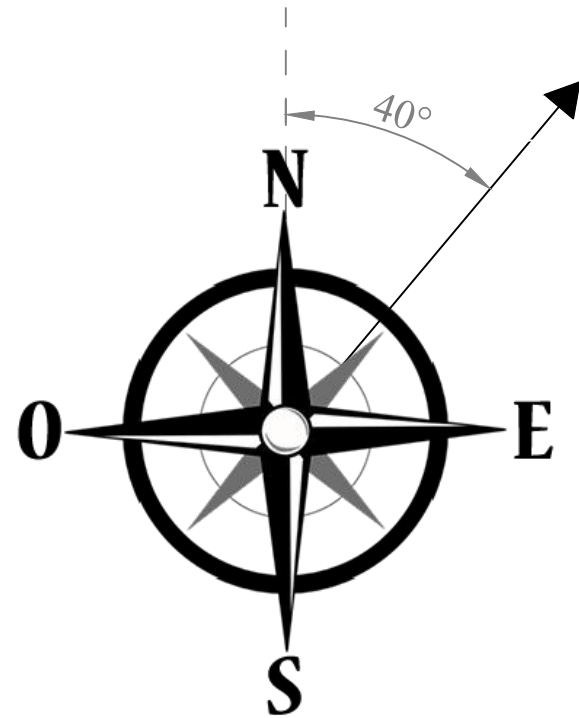
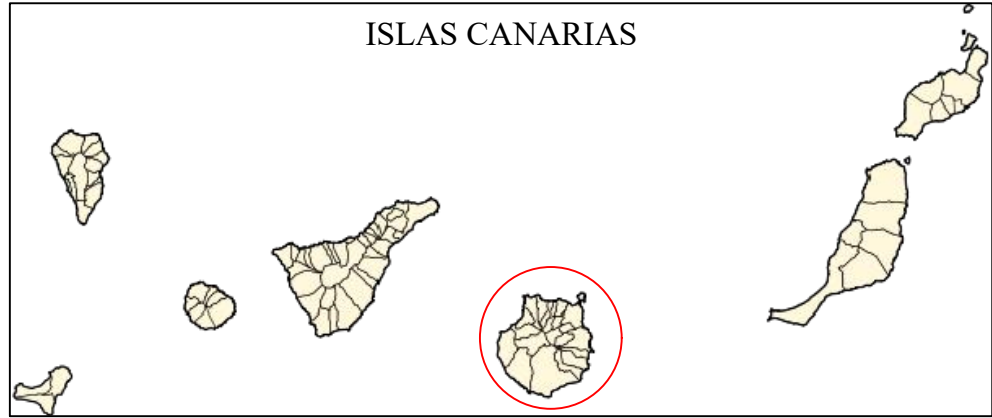
Tutor: *Juan José Aznárez González*

Tutor: *Guillermo Manuel Álamo Meneses*

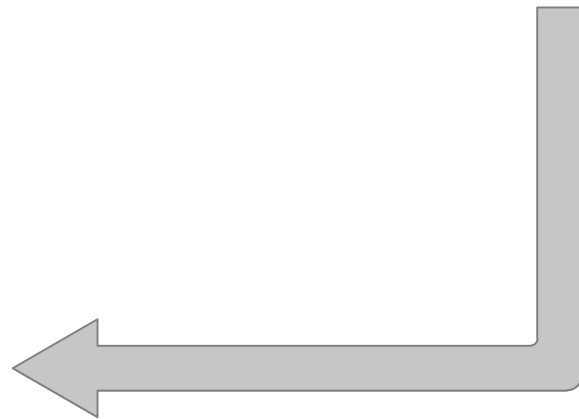


## Contenido

Situación y Emplazamiento .....	167
Alzado .....	169
Definición de los elementos estructurales .....	171



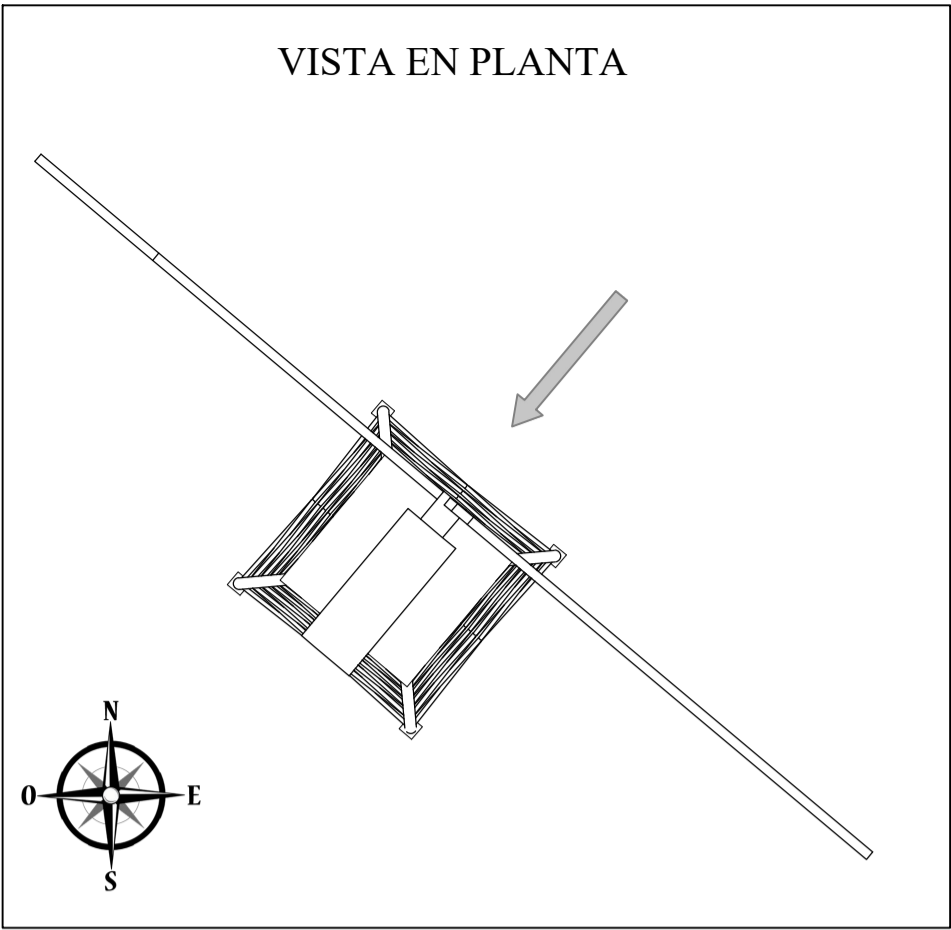
EMPLAZAMIENTO	
Latitud	27° 45' 08,55" N
Longitud	15° 28' 34,55" O
Profundidad	49 metros
Distancia a la costa	4.314 metros



PROYECTO	DISEÑO DE UNA ESTRUCTURA TIPO JACKET MULTIPILOTADA PARA SOPORTE DE UN AEROGENERADOR MARINO EN LA ISLA DE GRAN CANARIA		
PLANO	SITUACIÓN Y EMPLAZAMIENTO		
PETICIONARIO	ESCUELA DE INGENIERÍAS INDUSTRIALES Y CIVILES DE LA UNIVERSIDAD DE LAS PALMAS DE GRAN CANARIA		
AUTOR	ROMÁN QUEVEDO REINA	ESCALA: VARIAS	NÚMERO: 1/3
FIRMA		FECHA: 06/2019	FORMATO: A3



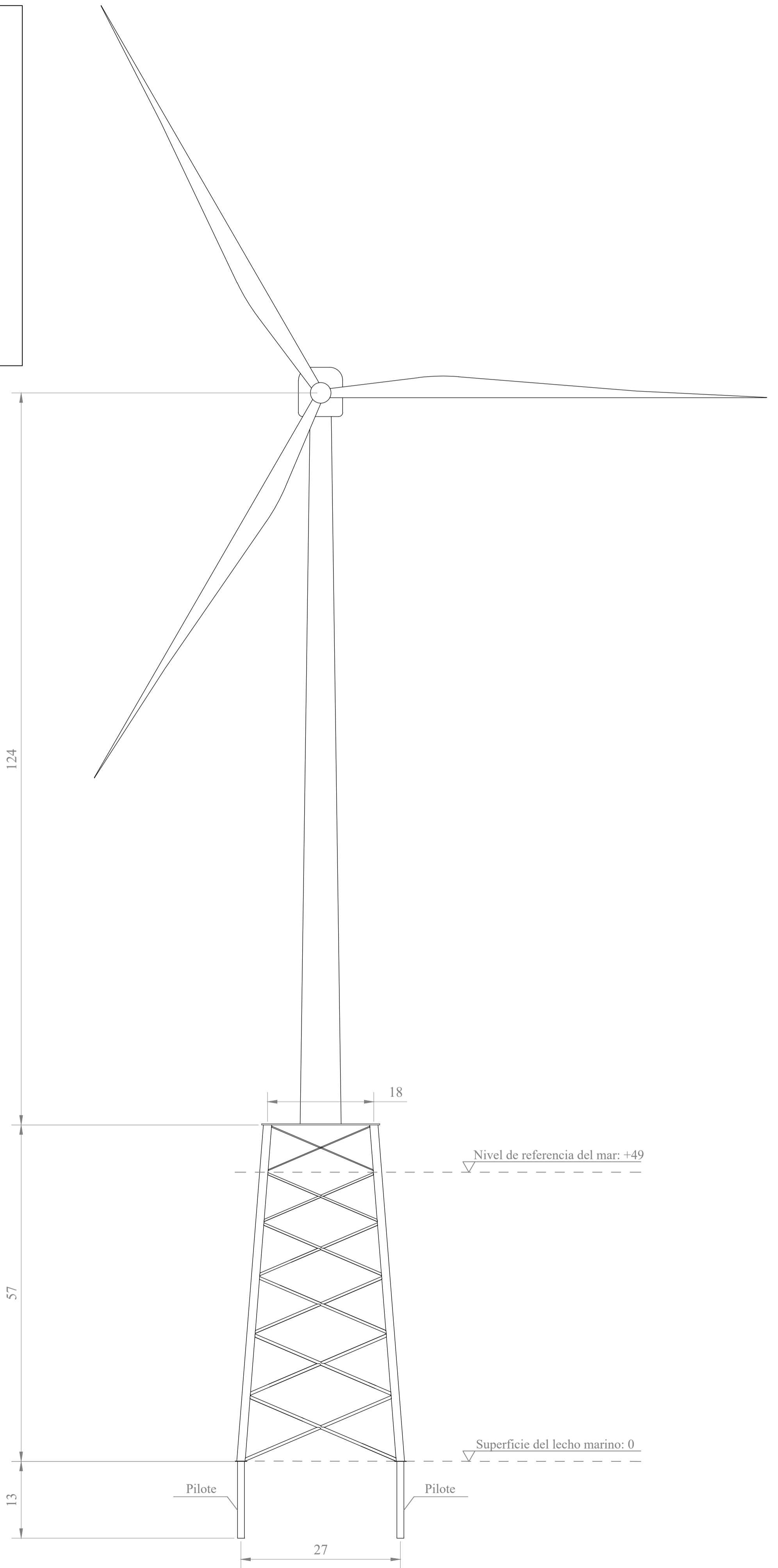
VISTA EN PLANTA



**Estructura Jacket multipilotada**

Acero laminado VL EW36 (S355)  
Secciones circulares de pared delgada  
Uniones soldadas

Cotas en metros

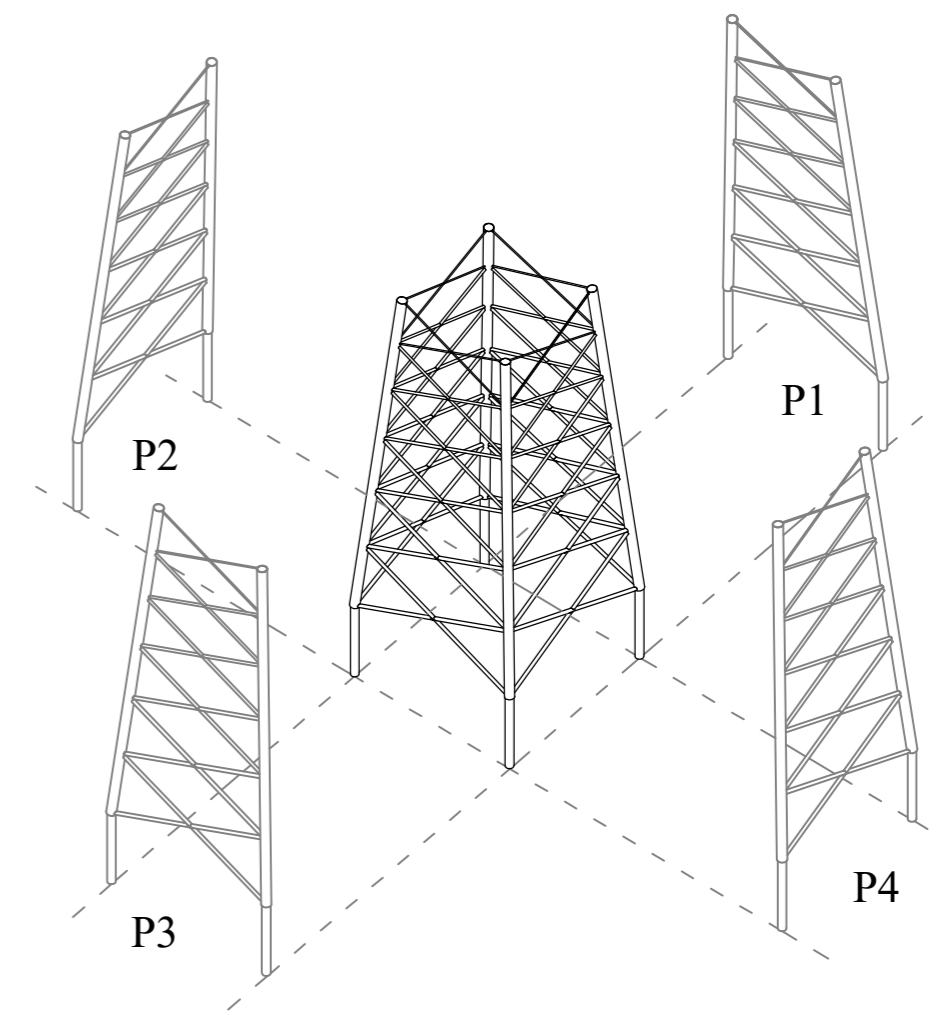
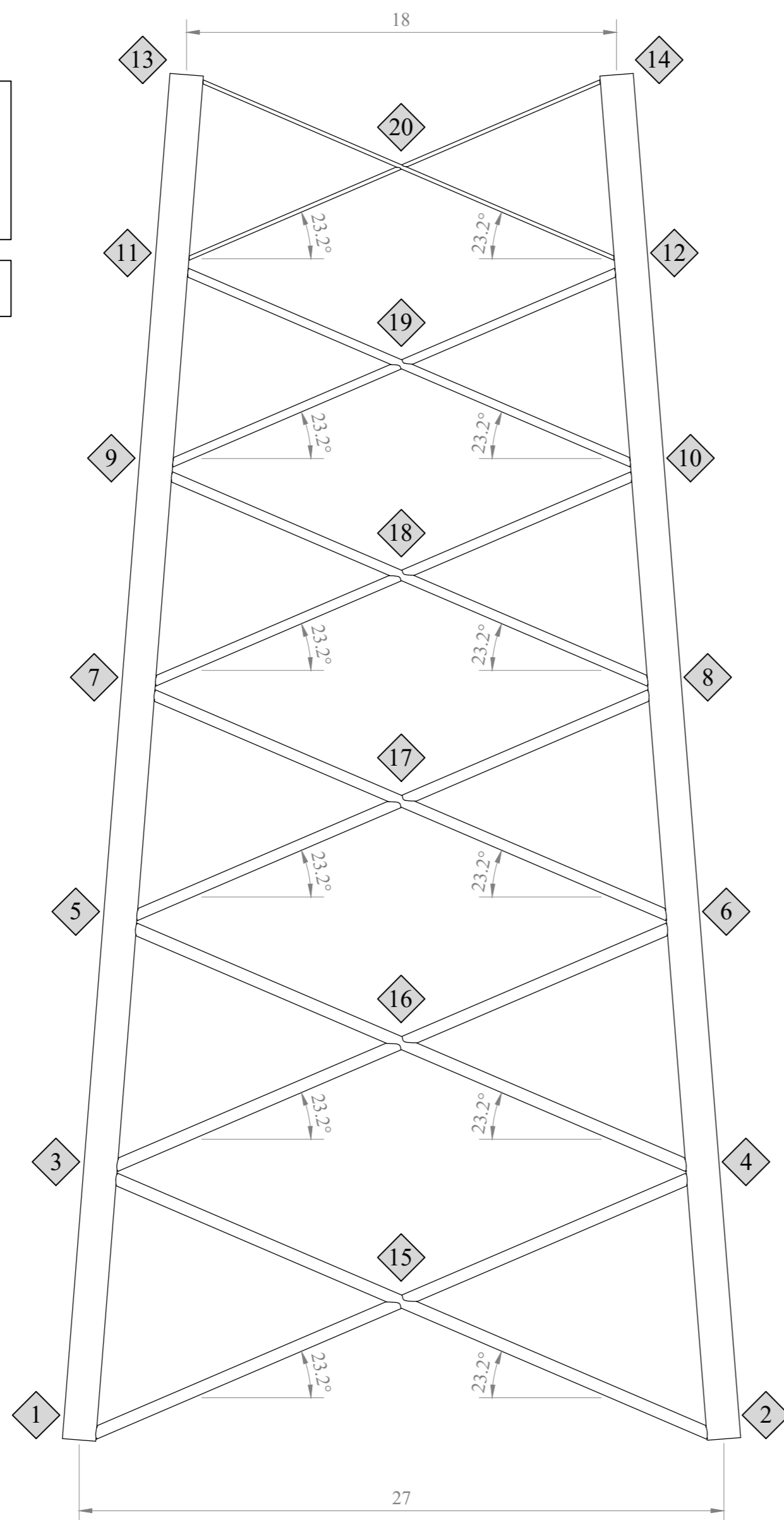


Barra	Diámetro (mm)	Espesor (mm)	Longitud (m)
Pilotes	1.168,0	20,0	13,0000

PROYECTO	DISEÑO DE UNA ESTRUCTURA TIPO JACKET MULTIPILOTADA PARA SOPORTE DE UN AEROGENERADOR MARINO EN LA ISLA DE GRAN CANARIA		
PLANO	ALZADO		
PETICIONARIO	ESCUELA DE INGENIERÍAS INDUSTRIALES Y CIVILES DE LA UNIVERSIDAD DE LAS PALMAS DE GRAN CANARIA		
AUTOR	ROMÁN QUEVEDO REINA	ESCALA:	NÚMERO:
FIRMA		FECHA:	FORMATO:
		06/2019	A2

**Estructura Jacket multipilotada**  
 Acero laminado VL EW36 (S355)  
 Secciones circulares de pared delgada  
 Uniones soldadas

P1 , P2, P3 y P4 iguales



Barra	Diámetro (mm)	Espesor (mm)	Longitud (m)
1-13	1.400,0	25,0	57,3542
2-14	1.400,0	25,0	57,3542
2-3	508,0	12,5	28,4214
1-15	508,0	12,5	14,6907
15-4	508,0	12,5	13,7307
4-5	508,0	10,0	26,5642
3-16	508,0	10,0	13,7307
16-6	508,0	10,0	12,8335
6-7	457,0	10,0	24,8284
5-17	457,0	10,0	12,8335
17-8	457,0	10,0	11,9949
8-9	406,4	8,0	23,2060
7-18	406,4	8,0	11,9949
18-10	406,4	8,0	11,2111
10-11	355,6	6,3	21,6896
9-19	355,6	6,3	11,2111
19-12	355,6	6,3	10,4785
12-13	168,3	4,0	20,2723
11-20	168,3	4,0	10,4785
20-14	168,3	4,0	9,7938

Cotas en metros

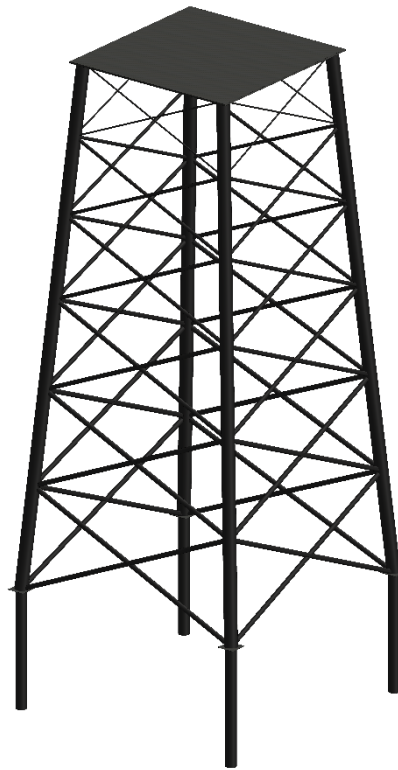
PROYECTO	DISEÑO DE UNA ESTRUCTURA TIPO JACKET MULTIPILOTADA PARA SOPORTE DE UN AEROGENERADOR MARINO EN LA ISLA DE GRAN CANARIA		
PLANO	DEFINICIÓN DE LOS ELEMENTOS ESTRUCTURALES		
PETICIONARIO	ESCUELA DE INGENIERÍAS INDUSTRIALES Y CIVILES DE LA UNIVERSIDAD DE LAS PALMAS DE GRAN CANARIA		
AUTOR	ROMÁN QUEVEDO REINA	ESCALA: 1:200	NÚMERO: 3/3
FIRMA		FECHA: 06/2019	FORMATO: A2



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

Diseño de una estructura tipo Jacket multipilotada para soporte  
de un aerogenerador marino en la isla de Gran Canaria

# Mediciones y Presupuesto



Autor: *Román Quevedo Reina*

Tutor: *Juan José Aznárez González*

Tutor: *Guillermo Manuel Álamo Meneses*



## Contenido

Resumen del presupuesto .....	177
Presupuesto .....	179
Mediciones .....	183
Precios descompuestos .....	189
Cuadro de precios 1 .....	193
Cuadro de precios 2 .....	195
Precios unitarios .....	197



# RESUMEN DE PRESUPUESTO

CAPITULO	RESUMEN	EUROS	%
01	ESTRUCTURA.....	1.015.946,33	98,67
02	GESTIÓN DE RESIDUOS.....	974,06	0,09
03	CONTROL DE CALIDAD Y ENSAYOS.....	12.677,28	1,23
<b>TOTAL EJECUCIÓN MATERIAL</b>		<b>1.029.597,67</b>	
13,00% Gastos generales.....		133.847,70	
6,00% Beneficio industrial.....		61.775,86	
SUMA DE G.G. y B.I.		195.623,56	
6,50% I.G.I.C.....		79.639,38	
<b>TOTAL PRESUPUESTO CONTRATA</b>		<b>1.304.860,61</b>	
<b>TOTAL PRESUPUESTO GENERAL</b>		<b>1.304.860,61</b>	

Asciende el presupuesto general a la expresada cantidad de UN MILLÓN TRESCIENTOS CUATRO MIL OCHOCIENTOS SESENTA EUROS con SESENTA Y UN CÉNTIMOS

Gran Canaria, a 01 de junio de 2019.

El promotor

La dirección facultativa





# PRESUPUESTO

CÓDIGO	RESUMEN	CANTIDAD	PRECIO	IMPORTE
<b>CAPÍTULO 01 ESTRUCTURA</b>				
01.01	<b>kg Perfil tubular normalizado de acero VL EW36 (S355)</b> Perfil tubular de acero laminado en caliente VL EW36 (S355), según norma internacional DNVGL-OS-B101; de diámetro entre 168,3 mm y 1.168,0 mm y espesor entre 4,0 mm y 20 mm, según norma UNE-EN 10210-2.	141.256,41	1,32	186.458,46
01.02	<b>kg Perfil tubular bajo demanda de acero VL EW36 (S355)</b> Perfil tubular de acero laminado en caliente VL EW36 (S355), según norma internacional DNVGL-OS-B101; fabricado bajo demanda de diámetro 1.400,0 mm y 25,0 mm de espesor.	203.457,39	1,59	323.497,25
01.03	<b>Ud. Transporte de perfiles de acero</b> Transporte de los perfiles tubulares de acero desde el lugar de fabricación hasta el astillero donde se ejecute el montaje de la subestructura jacket. Incluye todas las etapas del transporte, tanto el terrestre como el marítimo; y aranceles de entrada.	1,00	177.382,80	177.382,80
01.04	<b>m Soldadura a tope (MIG/MAG) con aporte de material</b> Soldadura (MIG/MAG) por arco eléctrico bajo gas protector con aporte de material mediante electrodo consumible de acero. Incluye corte del perfil tubular, preparación de bordes y medios axiliares.	350,92	166,87	58.558,02
01.05	<b>Ud. Protección catódica</b> Protección catódica a base de ánodo de zinc completamente instalado y probado.	120,00	33,13	3.975,60
01.06	<b>Ud. Transporte e instalación de la subestructura</b> Transporte e instalación completa de la subestructura jacket, ya montada, desde el astillero hasta la ubicación definitiva.	1,00	266.074,20	266.074,20
<b>TOTAL CAPÍTULO 01 ESTRUCTURA.....</b>				<b>1.015.946,33</b>

# PRESUPUESTO

CÓDIGO	RESUMEN	CANTIDAD	PRECIO	IMPORTE
<b>CAPÍTULO 02 GESTIÓN DE RESIDUOS</b>				
02.01	t Retirada de residuos de acero, dist. máx. 20km Retirada de residuos de acero en asillero situado a una distancia máxima de 20 km, formada por: carga, transporte y descarga en almacén. Medido el peso en bascula puesto en almacén.			
		11,43	85,22	974,06
	<b>TOTAL CAPÍTULO 02 GESTIÓN DE RESIDUOS.....</b>			<b>974,06</b>

# PRESUPUESTO

CÓDIGO	RESUMEN	CANTIDAD	PRECIO	IMPORTE
<b>CAPÍTULO 03 CONTROL DE CALIDAD Y ENSAYOS</b>				
03.01	<b>Ud. Control soldaduras, examen visual</b> Examen visual para control de la ejecución de soldaduras en estructuras metálicas, según UNE 7470; incluso emisión del informe.	188,00	13,31	2.502,28
03.02	<b>Ud. Ensayo soldaduras, líquidos penetrantes</b> Ensayo y reconocimiento de cordón de soldadura, realizado con líquidos penetrantes, según UNE 7419-78; incluso emisión del informe.	50,00	27,12	1.356,00
03.03	<b>Ud. Ensayo soldaduras, ultrasonidos</b> Examen de cordón de soldadura, realizado con ultrasonidos, según UNE 14613-79; incluso emisión del informe.	50,00	176,38	8.819,00
<b>TOTAL CAPÍTULO 03 CONTROL DE CALIDAD Y ENSAYOS.....</b>				<b>12.677,28</b>
<b>TOTAL.....</b>				<b>1.029.597,67</b>



# MEDICIONES

CÓDIGO RESUMEN UDS LONGITUD ANCHURA ALTURA PARCIALES CANTIDAD

## CAPÍTULO 01 ESTRUCTURA

### 01.01 kg Perfil tubular normalizado de acero VL EW36 (S355)

Perfil tubular de acero laminado en caliente VL EW36 (S355), según norma internacional DNVGL-OS-B101; de diámetro entre 168,3 mm y 1.168,0 mm y espesor entre 4,0 mm y 20 mm, según norma UNE-EN 10210-2.

	N	LONGITUD	Ø mm	ESP. mm	
Pilotes	4	13,00	1.168,00	20,00	29.443,86
Arriostamiento N1	8	15,00	508,00	12,50	18.329,66
Arriostamiento N1	8	14,00	508,00	12,50	17.107,68
Arriostamiento N2	8	14,00	508,00	10,00	13.755,20
Arriostamiento N2	8	13,00	508,00	10,00	12.772,69
Arriostamiento N3	8	13,00	457,00	10,00	11.464,64
Arriostamiento N3	8	12,00	457,00	10,00	10.582,74
Arriostamiento N4	16	12,00	406,40	8,00	15.091,42
Arriostamiento N5	8	12,00	355,60	6,30	5.209,91
Arriostamiento N5	8	11,00	355,60	6,30	4.775,75
Arriostamiento N6	8	11,00	168,30	4,00	1.426,26
Arriostamiento N6	8	10,00	168,30	4,00	1.296,60

141.256,41

### 01.02 kg Perfil tubular bajo demanda de acero VL EW36 (S355)

Perfil tubular de acero laminado en caliente VL EW36 (S355), según norma internacional DNVGL-OS-B101; fabricado bajo demanda de diámetro 1.400,0 mm y 25,0 mm de espesor.

	N	LONGITUD	Ø mm	ESP. mm	
Soportes principales	16	15,00	1.400,00	25,00	203.457,39

203.457,39

### 01.03 Ud. Transporte de perfiles de acero

Transporte de los perfiles tubulares de acero desde el lugar de fabricación hasta el astillero donde se ejecute el montaje de la subestructura jacket. Incluye todas las etapas del transporte, tanto el terrestre como el marítimo; y aranceles de entrada.

1,00

### 01.04 m Soldadura a tope (MIG/MAG) con aporte de material

Soldadura (MIG/MAG) por arco eléctrico bajo gas protector con aporte de material mediante electrodo consumible de acero. Incluye corte del perfil tubular, preparación de bordes y medios axiliares.

	N	LONGITUD	
Unión longitudinal de barras de soporte principal	12	4,40	52,80
Unión base soporte principal	4	4,41	17,64
Unión pilote en cabeza	4	3,67	14,68
Arriostamiento N1: Unión longitudinal de barras	4	1,60	6,40
Arriostamiento N1: Unión trasversal de barras	8	2,96	23,68
Arriostamiento N1: Unión inferior a soporte principal	8	1,65	13,20
Arriostamiento N1: Unión superior a soporte principal	8	1,61	12,88
Arriostamiento N2: Unión longitudinal de barras	4	1,60	6,40
Arriostamiento N2: Unión trasversal de barras	8	2,96	23,68
Arriostamiento N2: Unión inferior a soporte principal	8	1,65	13,20
Arriostamiento N2: Unión superior a soporte principal	8	1,61	12,88

# MEDICIONES

CÓDIGO	RESUMEN	UDS	LONGITUD	ANCHURA	ALTURA	PARCIALES	CANTIDAD
	Arriostramiento N3: Unión longitudinal de barras	4	1,44			5,76	
	Arriostramiento N3: Unión trasversal de barras	8	2,66			21,28	
	Arriostramiento N3: Unión inferior a soporte principal	8	1,48			11,84	
	Arriostramiento N3: Unión superior a soporte principal	8	1,45			11,60	
	Arriostramiento N4: Unión longitudinal de barras	4	1,28			5,12	
	Arriostramiento N4: Unión trasversal de barras	8	2,36			18,88	
	Arriostramiento N4: Unión inferior a soporte principal	8	1,32			10,56	
	Arriostramiento N4: Unión superior a soporte principal	8	1,29			10,32	
	Arriostramiento N5: Unión longitudinal de barras	4	1,12			4,48	
	Arriostramiento N5: Unión trasversal de barras	8	2,07			16,56	
	Arriostramiento N5: Unión inferior a soporte principal	8	1,16			9,28	
	Arriostramiento N5: Unión superior a soporte principal	8	1,13			9,04	
	Arriostramiento N6: Unión longitudinal de barras	4	0,53			2,12	
	Arriostramiento N6: Unión trasversal de barras	8	0,98			7,84	
	Arriostramiento N6: Unión inferior a soporte principal	8	0,56			4,48	
	Arriostramiento N6: Unión superior a soporte principal	8	0,54			4,32	
							350,92
<b>01.05</b>	<b>Ud. Protección catódica</b>						
	Protección catódica a base de ánodo de zinc completamente instalado y probado.						120,00
<b>01.06</b>	<b>Ud. Transporte e instalación de la subestructura</b>						
	Transporte e instalación completa de la subestructura jacket, ya montada, desde el astillero hasta la ubicación definitiva.						1,00

# MEDICIONES

CÓDIGO RESUMEN UDS LONGITUD ANCHURA ALTURA PARCIALES CANTIDAD

## CAPÍTULO 02 GESTIÓN DE RESIDUOS

02.01

t Retirada de residuos de acero, dist. máx. 20km

Retirada de residuos de acero en astillero situado a una distancia máxima de 20 km, formada por: carga, transporte y descarga en almacén. Medido el peso en bascula puesto en almacén.

Acero para soportes principales	0,001	203,46
Acero para pilotes y elementos de arriostamiento	0,001	141,26
Acero necesario para la estructura	-0,001	-333,29

11,43

# MEDICIONES

CÓDIGO	RESUMEN	UDS	LONGITUD	ANCHURA	ALTURA	PARCIALES	CANTIDAD
<b>CAPÍTULO 03 CONTROL DE CALIDAD Y ENSAYOS</b>							
03.01	<b>Ud. Control soldaduras, examen visual</b>						
	Examen visual para control de la ejecución de soldaduras en estructuras metálicas, según UNE 7470; incluso emisión del informe.						
	Unión longitudinal de barras de soporte principal	12					12
	Unión base soporte principal	4					4
	Unión pilote en cabeza	4					4
	Arriostramiento N1: Unión longitudinal de barras	4					4
	Arriostramiento N1: Unión trasversal de barras	8					8
	Arriostramiento N1: Unión inferior a soporte principal	8					8
	Arriostramiento N1: Unión superior a soporte principal	8					8
	Arriostramiento N2: Unión longitudinal de barras	4					4
	Arriostramiento N2: Unión trasversal de barras	8					8
	Arriostramiento N2: Unión inferior a soporte principal	8					8
	Arriostramiento N2: Unión superior a soporte principal	8					8
	Arriostramiento N3: Unión longitudinal de barras	4					4
	Arriostramiento N3: Unión trasversal de barras	8					8
	Arriostramiento N3: Unión inferior a soporte principal	8					8
	Arriostramiento N3: Unión superior a soporte principal	8					8
	Arriostramiento N4: Unión longitudinal de barras	4					4
	Arriostramiento N4: Unión trasversal de barras	8					8
	Arriostramiento N4: Unión inferior a soporte principal	8					8
	Arriostramiento N4: Unión superior a soporte principal	8					8
	Arriostramiento N5: Unión longitudinal de barras	4					4
	Arriostramiento N5: Unión trasversal de barras	8					8
	Arriostramiento N5: Unión inferior a soporte principal	8					8
	Arriostramiento N5: Unión superior a soporte principal	8					8
	Arriostramiento N6: Unión longitudinal de barras	4					4
	Arriostramiento N6: Unión trasversal de barras	8					8
	Arriostramiento N6: Unión inferior a soporte principal	8					8
	Arriostramiento N6: Unión superior a soporte principal	8					8
							188,00



## MEDICIONES

CÓDIGO	RESUMEN	UDS	LONGITUD	ANCHURA	ALTURA	PARCIALES	CANTIDAD
03.02	<b>Ud. Ensayo soldaduras, líquidos penetrantes</b> Ensayo y reconocimiento de cordón de soldadura, realizado con líquidos penetrantes, según UNE 7419-78; incluso emisión del informe.						50,00
03.03	<b>Ud. Ensayo soldaduras, ultrasonidos</b> Examen de cordón de soldadura, realizado con ultrasonidos, según UNE 14613-79; incluso emisión del informe.						50,00



# CUADRO DE DESCOMPUESTOS

CÓDIGO	CANTIDAD UD	RESUMEN	PRECIO	SUBTOTAL	IMPORTE
<b>CAPÍTULO 01 ESTRUCTURA</b>					
<b>01.01</b>	<b>kg</b>	<b>Perfil tubular normalizado de acero VL EW36 (S355)</b>			
		Perfil tubular de acero laminado en caliente VL EW36 (S355), según norma internacional DNVGL-OS-B101; de diámetro entre 168,3 mm y 1.168,0 mm y espesor entre 4,0 mm y 20 mm, según norma UNE-EN 10210-2.			
P01	1,000 kg	Perfil tubular normalizado de acero VL EW36 (S355)	1,32	1,32	
<b>TOTAL PARTIDA .....</b>					<b>1,32</b>
Asciende el precio total de la partida a la mencionada cantidad de UN EUROS con TREINTA Y DOS CÉNTIMOS					
<b>01.02</b>	<b>kg</b>	<b>Perfil tubular bajo demanda de acero VL EW36 (S355)</b>			
		Perfil tubular de acero laminado en caliente VL EW36 (S355), según norma internacional DNVGL-OS-B101; fabricado bajo demanda de diámetro 1.400,0 mm y 25,0 mm de espesor.			
P02	1,000 kg	Perfil tubular bajo demanda de acero VL EW36 (S355)	1,59	1,59	
<b>TOTAL PARTIDA .....</b>					<b>1,59</b>
Asciende el precio total de la partida a la mencionada cantidad de UN EUROS con CINCUENTA Y NUEVE CÉNTIMOS					
<b>01.03</b>	<b>Ud.</b>	<b>Transporte de perfiles de acero</b>			
		Transporte de los perfiles tubulares de acero desde el lugar de fabricación hasta el astillero donde se ejecute el montaje de la subestructura jacket. Incluye todas las etapas del transporte, tanto el terrestre como el marítimo; y aranceles de entrada.			
Sin descomposición					
<b>TOTAL PARTIDA .....</b>					<b>177.382,80</b>
Asciende el precio total de la partida a la mencionada cantidad de CIENTO SETENTA Y SIETE MIL TRESCIENTOS OCHENTA Y DOS EUROS con OCHENTA CÉNTIMOS					
<b>01.04</b>	<b>m</b>	<b>Soldadura a tope (MIG/MAG) con aporte de material</b>			
		Soldadura (MIG/MAG) por arco eléctrico bajo gas protector con aporte de material mediante electrodo consumible de acero. Incluye corte del perfil tubular, preparación de bordes y medios auxiliares.			
O01	2,170 h	Oficial 1ª Soldador	16,45	35,70	
O02	2,170 h	Ayudante Soldador	15,68	34,03	
M01	1,085 h	Grúa flotante 1.000 t.	82,20	89,19	
%5	5,000 %	Material auxiliar	158,90	7,95	
<b>TOTAL PARTIDA .....</b>					<b>166,87</b>
Asciende el precio total de la partida a la mencionada cantidad de CIENTO SESENTA Y SEIS EUROS con OCHENTA Y SIETE CÉNTIMOS					
<b>01.05</b>	<b>Ud.</b>	<b>Protección catódica</b>			
		Protección catódica a base de ánodo de zinc completamente instalado y probado.			
O01	0,154 h	Oficial 1ª Soldador	16,45	2,53	
O02	0,154 h	Ayudante Soldador	15,68	2,41	
P03	1,000 Ud.	Ánodo de zinc	22,67	22,67	
%20	20,000 %	Equipos y medios auxiliares	27,60	5,52	
<b>TOTAL PARTIDA .....</b>					<b>33,13</b>
Asciende el precio total de la partida a la mencionada cantidad de TREINTA Y TRES EUROS con TRECE CÉNTIMOS					
<b>01.06</b>	<b>Ud.</b>	<b>Transporte e instalación de la subestructura</b>			
		Transporte e instalación completa de la subestructura jacket, y a montada, desde el astillero hasta la ubicación definitiva.			
Sin descomposición					
<b>TOTAL PARTIDA .....</b>					<b>266.074,20</b>
Asciende el precio total de la partida a la mencionada cantidad de DOSCIENTOS SESENTA Y SEIS MIL SETENTA Y CUATRO EUROS con VEINTE CÉNTIMOS					

# CUADRO DE DESCOMPUESTOS

CÓDIGO	CANTIDAD UD	RESUMEN	PRECIO	SUBTOTAL	IMPORTE
<b>CAPÍTULO 02 GESTIÓN DE RESIDUOS</b>					
02.01	t	<b>Retirada de residuos de acero, dist. máx. 20km</b>			
		Retirada de residuos de acero en astillero situado a una distancia máxima de 20 km, formada por: carga, transporte y descarga en almacén. Medido el peso en bascula puesto en almacén.			
M02	0,020 h	Pala carg.cadenas 50 CV/0,60m3	30,86	0,62	
M03	0,200 h	Camión basculante 4x2 10t.	25,07	5,01	
P04	1,000 t	Residuos de acero	79,59	79,59	
<b>TOTAL PARTIDA.....</b>					<b>85,22</b>

Asciende el precio total de la partida a la mencionada cantidad de OCHENTA Y CINCO EUROS con VEINTIDOS CÉNTIMOS

# CUADRO DE DESCOMPUESTOS

CÓDIGO	CANTIDAD UD	RESUMEN	PRECIO	SUBTOTAL	IMPORTE
--------	-------------	---------	--------	----------	---------

## CAPÍTULO 03 CONTROL DE CALIDAD Y ENSAYOS

<b>03.01</b>		<b>Ud. Control soldaduras, examen visual</b>			
		Examen visual para control de la ejecución de soldaduras en estructuras metálicas, según UNE 7470; incluso emisión del informe.			
P05	1,000 Ud.	Examen visual del cordón de soldadura	11,09	11,09	
%20	20,000 %	Equipos y medios auxiliares	11,10	2,22	
<b>TOTAL PARTIDA.....</b>					<b>13,31</b>

Asciende el precio total de la partida a la mencionada cantidad de TRECE EUROS con TREINTA Y UN CÉNTIMOS

<b>03.02</b>		<b>Ud. Ensayo soldaduras, líquidos penetrantes</b>			
		Ensayo y reconocimiento de cordón de soldadura, realizado con líquidos penetrantes, según UNE 7419-78; incluso emisión del informe.			
P06	1,000 Ud.	Ensayo soldadura, líquidos penetrantes	19,36	19,36	
%40	40,000 %	Equipos y medios auxiliares	19,40	7,76	
<b>TOTAL PARTIDA.....</b>					<b>27,12</b>

Asciende el precio total de la partida a la mencionada cantidad de VEINTISIETE EUROS con DOCE CÉNTIMOS

<b>03.03</b>		<b>Ud. Ensayo soldaduras, ultrasonidos</b>			
		Examen de cordón de soldadura, realizado con ultrasonidos, según UNE 14613-79; incluso emisión del informe.			
P07	1,000 Ud.	Ensayo de soldaduras mediante ultrasonidos	146,98	146,98	
%20	20,000 %	Equipos y medios auxiliares	147,00	29,40	
<b>TOTAL PARTIDA.....</b>					<b>176,38</b>

Asciende el precio total de la partida a la mencionada cantidad de CIENTO SETENTA Y SEIS EUROS con TREINTA Y OCHO CÉNTIMOS



# CUADRO DE PRECIOS 1

Nº	CÓDIGO	UD	RESUMEN	PRECIO EN LETRA	IMPORTE
0001	01.01	kg	Perfil tubular de acero laminado en caliente VL EW36 (S355), según norma internacional DNVGL-OS-B101; de diámetro entre 168,3 mm y 1.168,0 mm y espesor entre 4,0 mm y 20 mm, según norma UNE-EN 10210-2.		1,32
				UN EUROS con TREINTA Y DOS CÉNTIMOS	
0002	01.02	kg	Perfil tubular de acero laminado en caliente VL EW36 (S355), según norma internacional DNVGL-OS-B101; fabricado bajo demanda de diámetro 1.400,0 mm y 25,0 mm de espesor.		1,59
				UN EUROS con CINCUENTA Y NUEVE CÉNTIMOS	
0003	01.03	Ud.	Transporte de los perfiles tubulares de acero desde el lugar de fabricación hasta el astillero donde se ejecute el montaje de la subestructura jacket. Incluye todas las etapas del transporte, tanto el terrestre como el marítimo; y aranceles de entrada.		177.382,80
				CIENTO SETENTA Y SIETE MIL TRESCIENTOS OCHENTA Y DOS EUROS con OCHENTA CÉNTIMOS	
0004	01.04	m	Soldadura (MIG/MAG) por arco eléctrico bajo gas protector con aporte de material mediante electrodo consumible de acero. Incluye corte del perfil tubular, preparación de bordes y medios auxiliares.		166,87
				CIENTO SESENTA Y SEIS EUROS con OCHENTA Y SIETE CÉNTIMOS	
0005	01.05	Ud.	Protección catódica a base de ánodo de zinc completamente instalado y probado.		33,13
				TREINTA Y TRES EUROS con TRECE CÉNTIMOS	
0006	01.06	Ud.	Transporte e instalación completa de la subestructura jacket, ya montada, desde el astillero hasta la ubicación definitiva.		266.074,20
				DOSCIENTOS SESENTA Y SEIS MIL SETENTA Y CUATRO EUROS con VEINTE CÉNTIMOS	
0007	02.01	t	Retirada de residuos de acero en astillero situado a una distancia máxima de 20 km, formada por: carga, transporte y descarga en almacén. Medido el peso en bascula puesto en almacén.		85,22
				OCHENTA Y CINCO EUROS con VEINTIDOS CÉNTIMOS	
0008	03.01	Ud.	Examen visual para control de la ejecución de soldaduras en estructuras metálicas, según UNE 7470; incluso emisión del informe.		13,31
				TRECE EUROS con TREINTA Y UN CÉNTIMOS	
0009	03.02	Ud.	Ensayo y reconocimiento de cordón de soldadura, realizado con líquidos penetrantes, según UNE 7419-78; incluso emisión del informe.		27,12
				VEINTISIETE EUROS con DOCE CÉNTIMOS	
0010	03.03	Ud.	Examen de cordón de soldadura, realizado con ultrasonidos, según UNE 14613-79; incluso emisión del informe.		176,38
				CIENTO SETENTA Y SEIS EUROS con TREINTA Y OCHO CÉNTIMOS	





## CUADRO DE PRECIOS 2

Nº	CÓDIGO	UD	RESUMEN	IMPORTE
0001	01.01	kg	Perfil tubular de acero laminado en caliente VL EW36 (S355), según norma internacional DNVGL-OS-B101; de diámetro entre 168,3 mm y 1.168,0 mm y espesor entre 4,0 mm y 20 mm, según norma UNE-EN 10210-2.	
			Resto de obra y materiales.....	1,32
			<b>TOTAL PARTIDA.....</b>	<b>1,32</b>
0002	01.02	kg	Perfil tubular de acero laminado en caliente VL EW36 (S355), según norma internacional DNVGL-OS-B101; fabricado bajo demanda de diámetro 1.400,0 mm y 25,0 mm de espesor.	
			Resto de obra y materiales.....	1,59
			<b>TOTAL PARTIDA.....</b>	<b>1,59</b>
0003	01.03	Ud.	Transporte de los perfiles tubulares de acero desde el lugar de fabricación hasta el astillero donde se ejecute el montaje de la subestructura jacket. Incluye todas las etapas del transporte, tanto el terrestre como el marítimo; y aranceles de entrada.	
			Sin descomposición	
			<b>TOTAL PARTIDA.....</b>	<b>177.382,80</b>
0004	01.04	m	Soldadura (MIG/MAG) por arco eléctrico bajo gas protector con aporte de material mediante electrodo consumible de acero. Incluye corte del perfil tubular, preparación de bordes y medios axiliares.	
			Mano de obra.....	69,73
			Maquinaria.....	89,19
			Resto de obra y materiales.....	7,95
			<b>TOTAL PARTIDA.....</b>	<b>166,87</b>
0005	01.05	Ud.	Protección catódica a base de ánodo de zinc completamente instalado y probado.	
			Mano de obra.....	4,94
			Resto de obra y materiales.....	28,19
			<b>TOTAL PARTIDA.....</b>	<b>33,13</b>
0006	01.06	Ud.	Transporte e instalación completa de la subestructura jacket, ya montada, desde el astillero hasta la ubicación definitiva.	
			Sin descomposición	
			<b>TOTAL PARTIDA.....</b>	<b>266.074,20</b>
0007	02.01	t	Retirada de residuos de acero en astillero situado a una distancia máxima de 20 km, formada por: carga, transporte y descarga en almacén. Medido el peso en balanza puesto en almacén.	
			Maquinaria.....	5,63
			Resto de obra y materiales.....	79,59
			<b>TOTAL PARTIDA.....</b>	<b>85,22</b>
0008	03.01	Ud.	Examen visual para control de la ejecución de soldaduras en estructuras metálicas, según UNE 7470; incluso emisión del informe.	
			Resto de obra y materiales.....	13,31
			<b>TOTAL PARTIDA.....</b>	<b>13,31</b>
0009	03.02	Ud.	Ensayo y reconocimiento de cordón de soldadura, realizado con líquidos penetrantes, según UNE 7419-78; incluso emisión del informe.	
			Resto de obra y materiales.....	27,12
			<b>TOTAL PARTIDA.....</b>	<b>27,12</b>

**CUADRO DE PRECIOS 2**

<b>Nº CÓDIGO</b>	<b>UD RESUMEN</b>	<b>IMPORTE</b>
0010 03.03	Ud. Examen de cordón de soldadura, realizado con ultrasonidos, según UNE 14613-79; incluso emisión del informe.	
	Resto de obra y materiales .....	176,38
	<b>TOTAL PARTIDA.....</b>	<b>176,38</b>

# LISTADO DE MATERIALES VALORADO (Pres)

CÓDIGO	CANTIDAD UD	RESUMEN	PRECIO	IMPORTE
M01	380,748 h	Grúa flotante 1.000 t	82,20	31.297,50
			<b>Grupo M01.....</b>	<b>31.297,50</b>
M02	0,229 h	Pala carg.cadenas 50 CV/0,60m3	30,86	7,05
			<b>Grupo M02.....</b>	<b>7,05</b>
M03	2,286 h	Camión basculante 4x2 10t.	25,07	57,31
			<b>Grupo M03.....</b>	<b>57,31</b>
O01	779,976 h	Oficial 1ª Soldador	16,45	12.830,61
			<b>Grupo O01.....</b>	<b>12.830,61</b>
O02	779,976 h	Ayudante Soldador	15,68	12.230,03
			<b>Grupo O02.....</b>	<b>12.230,03</b>
P01	141.256,410 kg	Perfil tubular normalizado de acero VL EW36 (S355)	1,32	186.458,46
			<b>Grupo P01.....</b>	<b>186.458,46</b>
P02	203.457,390 kg	Perfil tubular bajo demanda de acero VL EW36 (S355)	1,59	323.497,25
			<b>Grupo P02.....</b>	<b>323.497,25</b>
P03	120,000 Ud.	Ánodo de zinc	22,67	2.720,40
			<b>Grupo P03.....</b>	<b>2.720,40</b>
P04	11,430 t	Residuos de acero	79,59	909,71
			<b>Grupo P04.....</b>	<b>909,71</b>
P05	188,000 Ud.	Examen visual del cordón de soldadura	11,09	2.084,92
			<b>Grupo P05.....</b>	<b>2.084,92</b>
P06	50,000 Ud.	Ensayo soldadura, líquidos penetrantes	19,36	968,00
			<b>Grupo P06.....</b>	<b>968,00</b>
P07	50,000 Ud.	Ensayo de soldaduras mediante ultrasonidos	146,98	7.349,00
			<b>Grupo P07.....</b>	<b>7.349,00</b>
<b>Resumen</b>				
				<hr/>
Mano de obra.....				25.062,45
Materiales.....				523.987,75
Maquinaria.....				31.362,91
Otros.....				449.184,57
<b>TOTAL.....</b>				<b>580.410,25</b>