

GRADO EN INGENIERÍA MECÁNICA
TRABAJO FIN DE GRADO

***DISEÑO DE UNA PLATFORMA FIJA TIPO
JACKET PARA UN AEROGENERADOR
OFFSHORE***

DOCUMENTO 1- MEMORIA

Alumno: Valtierra Martinez, Endika

Director: Marcos Rodríguez, Iñaki

Curso: 2018-2019

Fecha: 19-JUNIO-2019

ÍNDICE MEMORIA

1.	OBJETO	1
1.1.	INTRODUCCIÓN	1
1.2.	OBJETIVO DEL PROYECTO.....	1
1.3.	PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA	1
1.4.	SITUACIÓN ACTUAL DE LAS PLATAFORMAS.....	2
2.	ALCANCE.....	2
2.1.	ÁMBITO DE APLICACIÓN DEL PROYECTO	3
3.	ANTECEDENTES.....	4
3.1.	DISEÑO Y DIMENSIONADO PREVIO DEL SISTEMA DE PLATAFORMA OFFSHORE EN TÉRMINOS ENERGÉTICOS.....	4
3.1.1.	Localización	4
3.1.2.	Sistema de generación eólica	7
3.1.2.1.	Aerodinámica de la pala del aerogenerador.....	8
3.1.2.2.	Perfil aerodinámico	9
3.1.3.	Sistema de desalinización por osmosis inversa.....	10
3.1.4.	Sistema de electrólisis.....	11
3.1.5.	Sistema de licuefacción.....	11
3.1.6.	Sistema de almacenamiento	11
4.	NORMATIVAS Y REFERENCIAS.....	12
4.1.	DISPOSICIONES LEGALES Y NORMAS APLICADAS.....	12
4.1.1.	BS-EN-61400-1:2005 (IEC 61400-1)	12
4.1.2.	BS-EN-61400-3:2009 (IEC 61400-3)	12
4.1.3.	DNVGL-OS-B101 [5].....	13
4.1.4.	DNVGL-OS-C101 [5].....	13
4.1.5.	DNVGL-ST-0054 [5].....	14
4.1.6.	DNVGL-ST-0126 [5].....	15
4.1.7.	DNVGL-ST-0437 [5].....	16
4.1.8.	DNV-OS-J101 [5].....	17
4.1.9.	DNV-RP-C205 [5].....	19
4.1.10.	EN 10025	20
4.2.	PROGRAMAS DE CÁLCULO.....	26
4.2.1.	COMSOL Multiphysics [6].....	26
4.2.2.	Solid Edge [9].....	28
4.2.3.	AutoCAD [10].....	28

5.	DEFINICIONES Y ABREVIATURAS.....	29
6.	REQUISITOS DE DISEÑO	30
6.1.	DESCRIPCIÓN TÉCNICA.....	30
6.2.	DATOS DE PARTIDA DE LOS ELEMENTOS DE LA PLATAFORMA OFFSHORE	33
6.3.	CONDICIONES CLIMATOLÓGICAS Y DE EMPLAZAMIENTO	34
6.3.1.	Orografía del fondo marino	34
6.3.2.	Velocidad y dirección de viento	36
6.3.3.	Velocidad y dirección de las corrientes marinas	37
6.3.4.	Características del oleaje	37
6.4.	ESTADOS LÍMITE	39
6.5.	COMBINACIONES DE CARGAS.....	40
7.	ANÁLISIS DE SOLUCIONES	42
7.1.	ALTERNATIVAS EN EL SISTEMA DE ANCLAJE DE LA PLATAFORMA OFFSHORE.....	42
7.1.1.	Estructuras fijas.....	42
7.1.1.1.	Plataformas de Gravedad.....	42
7.1.1.2.	Plataformas Auto elevables o Jack-UPS	43
7.1.1.3.	Plataformas JACKET.....	44
7.1.1.4.	Plataformas Flexibles o Compliant.....	45
7.1.1.5.	Monopilote	46
7.1.2.	Estructuras flotantes.....	46
7.1.2.1.	Plataformas Semi sumergibles	47
7.1.2.2.	Plataformas de patas tensoras o TLP	47
7.1.2.3.	Plataformas SPAR.....	49
7.2.	CRITERIOS DE SELECCIÓN.....	50
7.2.1.	Profundidad.....	50
7.2.2.	Estabilidad.....	50
7.2.3.	Capacidad de carga	50
7.2.4.	Movilidad	50
7.2.5.	Resumen de los criterios de selección y alternativas	51
7.3.	SELECCIÓN DE LA ALTERNATIVA EN FUNCIÓN DE LOS CRITERIOS.....	52
8.	RESULTADOS FINALES	54
8.1.	SOLUCIÓN ADOPTADA	54
8.1.1.	Diseño preliminar del sistema de anclaje.....	59
8.1.2.	Diseño final del sistema de anclaje	60
8.2.	IMPLEMENTACIÓN DEL MODELO DE PLATAFORMA OFF-SHORE.....	62
8.2.1.	Pre-procesado	62
8.2.2.	Mallado	65

8.2.3.	Definición del problema físico y condiciones de contorno.....	67
8.2.4.	Configuración de los solvers.....	67
8.2.5.	Post-procesado.....	68
8.3.	RESULTADOS DE LAS SIMULACIONES.....	69
8.3.1.	Estado Límite Último de Rotura.....	69
8.3.2.	Estado Límite Último de Estabilidad.....	73
8.3.3.	Estado Límite de Servicio.....	76
9.	PLANIFICACIÓN.....	82
9.1.	FASES DEL PROYECTO.....	82
9.2.	HITOS.....	83
9.3.	DIAGRAMA DE GANTT.....	84
10.	CONCLUSIONES.....	84
11.	REFERENCIAS.....	85

ÍNDICE FIGURAS

Figura 3-1. Mapa de recorrido de buques	4
Figura 3-2. Posiciones elegidas	5
Figura 3-3. Ubicación elegida de la plataforma central	5
Figura 3-4. Altura del lecho marino GEBCO	6
Figura 3-5. Velocidad del viento IRENA.....	6
Figura 3-6. Aerogeneradores de eje horizontal y vertical	7
Figura 3-7. Fuerzas aerodinámicas.....	8
Figura 3-8. Sección de un perfil aerodinámico	9
Figura 4-1. Símbolos utilizados en EN10025: parte 2 – Aceros estructurales no aleados	21
Figura 4-2. Símbolos utilizados en EN10025: parte 3 - Aceros estructurales laminados de grano fino soldables normalizados	21
Figura 4-3. Símbolos utilizados en EN10025: parte 4 - Aceros estructurales laminados de grano fino soldables termoquímicamente	22
Figura 4-4. Símbolos utilizados en EN10025: parte 5 - Aceros estructurales con resistencia a la corrosión atmosférica mejorada	22
Figura 4-5. Símbolos utilizados en EN10025: parte 6 Producciones de láminas de aceros estructurales de alto rendimiento en condiciones de templado y revenido	23
Figura 4-6. Módulos disponibles en COMSOL Multiphysics.....	27
Figura 6-1. Partes de la estructura Jacket.....	30
Figura 6-2. Patrones típicos del entramado de barras	31
Figura 6-3. Aerogenerador ENERCON E141-EP4 real instalado onshore.....	33
Figura 6-4. Ubicación de la estructura Jacket.....	34
Figura 6-5. Detalle mapa de recorrido de buques cargueros [13].....	35
Figura 6-6. Profundidad lecho marino Canal de la Mancha.....	35
Figura 6-7. Detalle del perfil del lecho marino (Batimetría)	36
Figura 6-8. Gráfica de velocidades medias y máximas de viento	37
Figura 6-9. Gráfica de valores medios y máximos de altura significativa de ola.....	38
Figura 7-1. Plataforma fija por gravedad.....	42
Figura 7-2. Plataforma auto elevable.....	43

Figura 7-3. Estructura fija tipo Jacket	44
Figura 7-4. Plataformas flexibles o compliant.....	45
Figura 7-5. Monopilote.....	46
Figura 7-6. Plataforma semi sumergible	47
Figura 7-7. Plataforma TLP.....	48
Figura 7-8. Plataforma SPAR.....	49
Figura 8-1. Diseño en 3D del aerogenerador en Solid Edge	54
Figura 8-2. Entorno de trabajo en COMSOL.....	55
Figura 8-3. Mallado del aerogenerador y el cubo de aire	55
Figura 8-4. Mallado del aerogenerador	56
Figura 8-5. Reacciones en la base para velocidad nominal del viento	56
Figura 8-6. Reacciones en la base para velocidad de parada del aerogenerador	57
Figura 8-7. Reacciones en la base para velocidad extrema del viento	57
Figura 8-8. Diseño preliminar de la estructura.....	59
Figura 8-9. Diseño final de la estructura.....	61
Figura 8-10. Modelo estructura con volumen de agua.....	64
Figura 8-11. Modelo de la estructura Jacket	64
Figura 8-12. Mallado de la estructura y el volumen de agua.....	65
Figura 8-13. Mallado de la estructura Jacket.....	66
Figura 8-14. Detalle del mallado de la estructura Jacket.....	66
Figura 8-15. Tensiones de Von Misses en la estructura completa -Rotura-	69
Figura 8-16. Detalle de la pieza de transición -Rotura-	70
Figura 8-17. Detalle ampliado de la unión -Rotura-	71
Figura 8-18. Pieza de transición real	72
Figura 8-19. Velocidad del fluido en el volumen de control	72
Figura 8-20. Tensiones de Von Misses de la estructura -Estabilidad-	73
Figura 8-21. Detalle de la pieza de transición -Estabilidad-	74
Figura 8-22. Detalle ampliado de la unión -Estabilidad-	75
Figura 8-23. Desplazamiento en X de la estructura.....	76
Figura 8-24. Desplazamiento en Y de la estructura	77
Figura 8-25. Desplazamiento en Z de la estructura	78

Figura 8-26. Desplazamiento total de la estructura	79
Figura 8-27. Deformada de la estructura (desplazamiento total).....	80
Figura 8-28. Deformada de la estructura (desplazamiento total) más clara	81
Figura 9-1. Diagrama de Gantt.....	84

ÍNDICE TABLAS

Tabla 4-1. Norma EN10025: parte 2- Propiedades de los aceros estructurales no aleados	23
Tabla 4-2. Norma EN10025: Parte 3 - Propiedades de los aceros estructurales laminados de grano fino soldables normalizados	24
Tabla 4-3. Norma EN10025: parte 4 - Propiedades de los aceros estructurales laminados de grano fino soldables termoquímicamente	24
Tabla 4-4. Norma EN10025: parte 5 - Propiedades de los aceros estructurales con resistencia a la corrosión atmosférica mejorada	25
Tabla 4-5. Norma EN10025: parte 6 - Propiedades de las producciones de láminas de acero estructurales de alto rendimiento en condiciones de templado y revenido	25
Tabla 5-1. Tabla de definiciones	29
Tabla 5-2. Abreviaturas.....	29
Tabla 6-1. Tabla de velocidades máximas de viento	37
Tabla 6-2. Tabla de alturas significativas de ola, y período de recurrencia.....	38
Tabla 6-3. Tabla 4-2 de la Norma DNVGL-ST-0437 para los coeficientes de seguridad de las combinaciones.....	40
Tabla 7-1. Resumen de los criterios de selección de cada tipo de plataforma ...	51
Tabla 7-2. Evaluación de las alternativas en función de los criterios de selección	52
Tabla 8-1. Reacciones en la base del aerogenerador (Número escalar).....	57
Tabla 8-2. Tabla con los valores parametrizados.....	58
Tabla 8-3. Valores de los parámetros empleados.....	60
Tabla 8-4. Valores de los parámetros finales	62

1. OBJETO

1.1. *Introducción*

Mediante este proyecto se pretende diseñar la estructura fija tipo Jacket de una plataforma off-shore destinada a la producción de energía eólica mediante un aerogenerador de 5MW offshore. Gracias a la energía generada por varios aerogeneradores idénticos, se pretende suministrar energía eléctrica a otra plataforma destinada a la producción y el almacenamiento de hidrógeno para realizar operaciones de bunkering.

Para el diseño de la plataforma, se empleará la simulación por computadora, que es un método de estudio basado en modelos, el cual abarca una gran variedad de procesos, y es diseñado con la finalidad de imitar las operaciones y características de un sistema, en un tiempo determinado.

Con los resultados obtenidos, se tratará de dimensionar simplificadaamente cada elemento de la estructura.

1.2. *Objetivo del proyecto*

El objetivo de este proyecto es diseñar una plataforma off-shore (mar adentro) que sustentará un aerogenerador en la zona del canal de la Mancha en el Mar del Norte [1].

Para ello se analizarán los distintos tipos de plataformas existentes, decantándose por uno de ellos en función de diversos factores.

Teniendo en cuenta el tipo de plataforma elegida se analizarán las cargas existentes en la posición geográfica donde ésta se encuentra ubicada. Dichas cargas son: el viento, las corrientes marinas, y el peso del aerogenerador instalado sobre la estructura.

Para la comprobación del diseño de la estructura se hará uso de programas numéricos de elementos finitos, debido a la dificultad de los cálculos necesarios para la validación de la misma.

1.3. *Planteamiento del problema*

Actualmente, la legislación relacionada con las emisiones nocivas se está endureciendo cada vez más. Alrededor del 64% del consumo mundial del petróleo se debe al transporte de mercancías. Además, en torno al 90% del transporte a nivel mundial se realiza por mar. Teniendo en cuenta estos dos aspectos, queda clara la importancia de una actuación en este ámbito para contribuir a un sistema de transporte sostenible y respetuoso con el medio ambiente. En esta línea, son varios los países que han comenzado a sustituir el diésel por combustibles menos contaminantes como es el GNL (Gas Natural

Licuado) [2]. Una posible alternativa al problema propuesto podría ser el electrizar los buques cargueros mediante pilas de combustible de hidrógeno [3] y motores eléctricos. De esta forma, la generación de electricidad mediante pilas de combustible proporcionaría energía eléctrica a los motores eléctricos, que a su vez traccionarían las hélices, obteniendo únicamente agua como único subproducto de la reacción electroquímica necesaria para tal proceso [4].

Es por ello que se propone diseñar una plataforma offshore autosuficiente para la producción y almacenamiento de hidrógeno, destinada a operaciones de bunkering. De esta manera, la finalidad de este proyecto es el diseño de una estructura fija tipo Jacket para soportar uno de los aerogeneradores que alimentará a la plataforma de hidrógeno.

1.4. Situación actual de las plataformas

Las plataformas off-shore han ido ganando importancia los últimos años, ya sea por el tema abordado (energías renovables) como en la extracción de petróleo y gas.

La sustitución del combustible fósil por combustibles limpios, como viene a ser el Hidrógeno, es un tema que cada vez está más al día. La tecnología de los motores de combustión interna está llegando a su fin, evolucionando el mundo de los motores y sistemas de propulsión hacia una etapa más solidaria con el medio ambiente.

Las limitaciones para la instalación de nuevos parques eólicos en tierra es la causa de que este tipo de estructuras estén en auge. En el mar, se dispone de unas condiciones de viento más intensas y estables, además de provocar un menor impacto visual y acústico.

En el caso de la energía eólica offshore, son muchos los diseños creados para su colocación en el mar, trasladando al mar las tecnologías de tierra. Cabe decir, que el coste de diseño e instalación de este tipo de estructuras aumenta en aguas cada vez más profundas. Por ello, son muchos los países que, para cumplir este objetivo, han empezado a investigar sobre la implantación de plataformas flotantes en lugar de las fijas.

2. ALCANCE

Se trata de un proyecto ambicioso, por lo que en este objetivo únicamente se va a diseñar la estructura fija tipo Jacket para la sustentación de los aerogeneradores que alimentarán a la otra plataforma central con procesos de bunkering.

Para el diseño, se parte de una información detallada de los diferentes equipos que se han de instalar sobre la plataforma. Dicha información hace

referencia al volumen y al peso de los equipos. Es de especial interés obtener información del aerogenerador a instalar, dimensiones y pesos (VER ANEXO 1).

A continuación, se van a estudiar los diferentes sistemas de anclaje existentes para ver cuál de las soluciones es la más viable. Para su elección se tendrán en cuenta diferentes factores como son: la profundidad del lecho marino, las cargas que ha de soportar, la estabilidad y la movilidad.

Las cargas a considerar varían en función del emplazamiento elegido para la plataforma. Este proceso se lleva a cabo junto con la elección del tipo de plataforma a utilizar.

La normativa aplicable parte de las bases de la DNV (Det Norske Veritas) y de la IEC 61400 [5].

A la hora de realizar los cálculos, se va a hacer uso de un programa de elementos finitos, como es el COMSOL Multiphysics, debido a la complejidad de los cálculos [6].

Se ha de destacar que cosas quedan fuera del alcance de este proyecto:

- El cálculo de las zapatas/pilotes de la estructura al fondo marino (por ausencia de datos específicos del terreno).
- Resistencia de las uniones, soldaduras, etc.
- Estudios de oleaje, vibraciones, fatiga.
- Comprobación de la corrosión
- Comprobación de los esfuerzos por transporte e instalación

2.1. *Ámbito de aplicación del proyecto*

El principal ámbito de aplicación de este proyecto tiene sus cimientos en el sector de las energías renovables, aunque el objetivo principal es la aplicación de los conocimientos mecánicos obtenidos en el Grado de Ingeniería Mecánica.

Para la realización del proyecto, es necesario una serie de conocimientos sobre el principal tema abordado, EÓLICA OFFSHORE, así como conocimientos en resistencia de materiales, mecánica de fluidos, manejo de programas de Elementos Finitos, entre otros.

3. ANTECEDENTES

3.1. Diseño y dimensionado previo del sistema de plataforma offshore en términos energéticos

Como ya se ha comentado anteriormente, la base de este proyecto nace de otro en el cual se ha dimensionado una plataforma offshore en términos energéticos.

La finalidad de la plataforma es la generación y el almacenamiento de hidrógeno para poder repostar a buques cargueros (procesos de bunkering). Para ello es necesario realizar una serie de operaciones en cubierta que transformen el agua de mar en hidrógeno.

Las operaciones a realizar son las siguientes:

- Desalinización del agua de mar por ósmosis inversa
- Electrólisis del agua
- Licuado del hidrógeno
- Almacenamiento del hidrógeno

3.1.1. Localización

La plataforma central, con procesos de bunkering, se ha ubicado en las coordenadas geográficas (49° 21' 28,9" N, 5° 20' 45,7" O), en la zona del Canal de la Mancha.

Para la elección del emplazamiento de la misma, se ha escogido un buque carguero y se ha estudiado sus recorridos, para ver los lugares más transitados.



Figura 3-1. Mapa de recorrido de buques

Conocido el recorrido, se han escogido 6 posiciones diferentes por los que transita dicho buque carguero.



Figura 3-2. Posiciones elegidas

Conocidos dichos puntos, se han analizado las velocidades medias de viento en cada uno de los puntos seleccionados. El punto con mayor velocidad media ha sido el elegido para el posicionamiento inicial de la plataforma con procesos de bunkering.

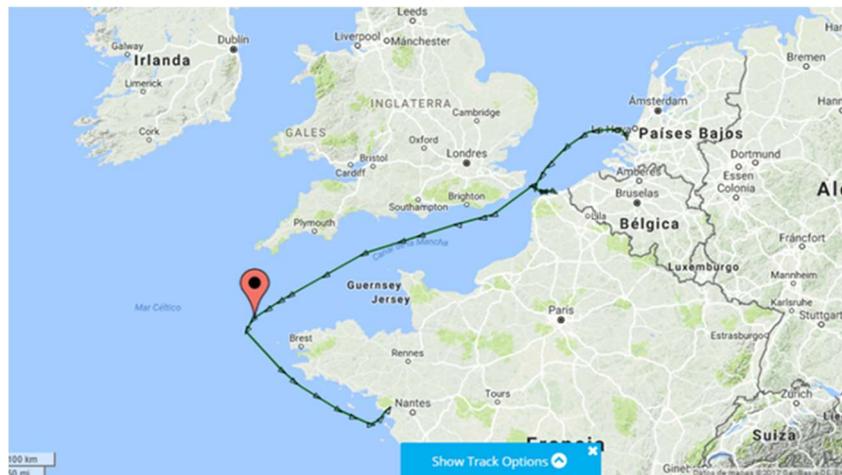


Figura 3-3. Ubicación elegida de la plataforma central

También se ha tenido en cuenta la altura al lecho marino del lugar, mediante la información recogida de la página GEBCO (General Bathymetric Chart of the Ocean) [7] se ha comprobado que el Canal de la Mancha no supera los 200m de profundidad máxima.

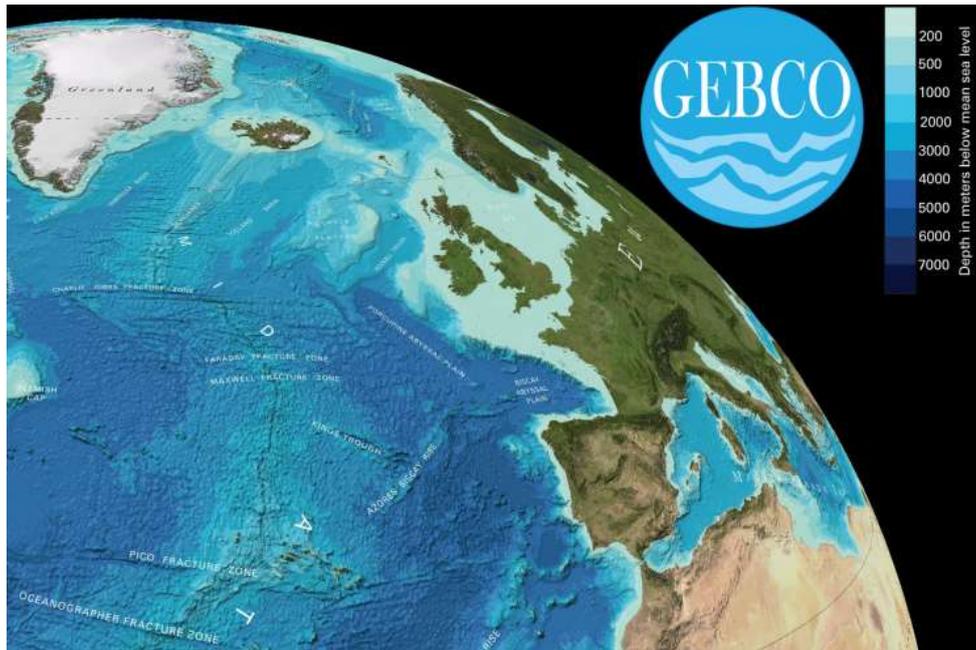


Figura 3-4. Altura del lecho marino GEBCO

Así mismo, se ha valorado la velocidad del viento en diferentes posiciones para obtener una velocidad de viento aceptable para la generación eólica. Para la obtención de los datos, se ha hecho uso de la página de IRENA (International Renewable Energy Agency) [8].

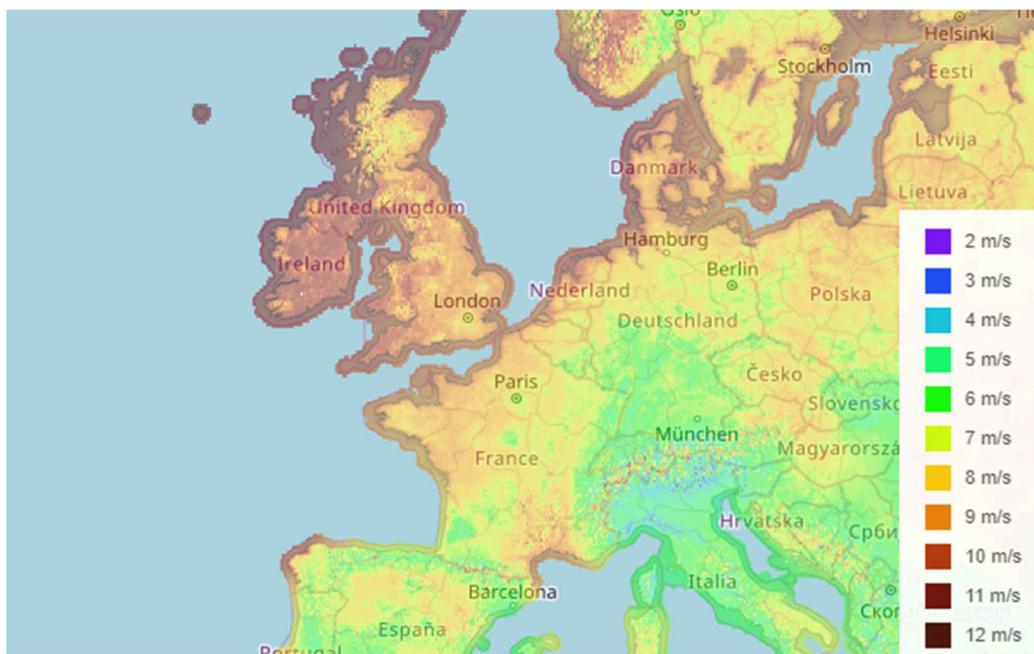


Figura 3-5. Velocidad del viento IRENA

3.1.2. Sistema de generación eólica

La energía eólica es la energía obtenida a partir del viento, es decir, la energía cinética de las masas de aire que es convertida en electricidad para las actividades humanas.

La energía eólica se transforma en energía eléctrica mediante un aerogenerador, que es un generador eléctrico activado por la acción del viento. La energía cinética del aire impacta contra las palas, las cuales proporcionan energía mecánica a un rotor que, a través de un sistema de transmisión mecánico, hace girar el rotor de un generador, el cual convierte la energía mecánica rotacional en energía eléctrica.

Existen diferentes tipos de aerogeneradores, dependiendo de su potencia, la disposición de su eje rotacional, el tipo de aerogenerador, número de palas, etc. Principalmente, pueden dividirse en dos grupos: los de eje vertical y los de eje horizontal. El aerogenerador de eje horizontal es considerado el más eficiente, y es el más utilizado en la actualidad.

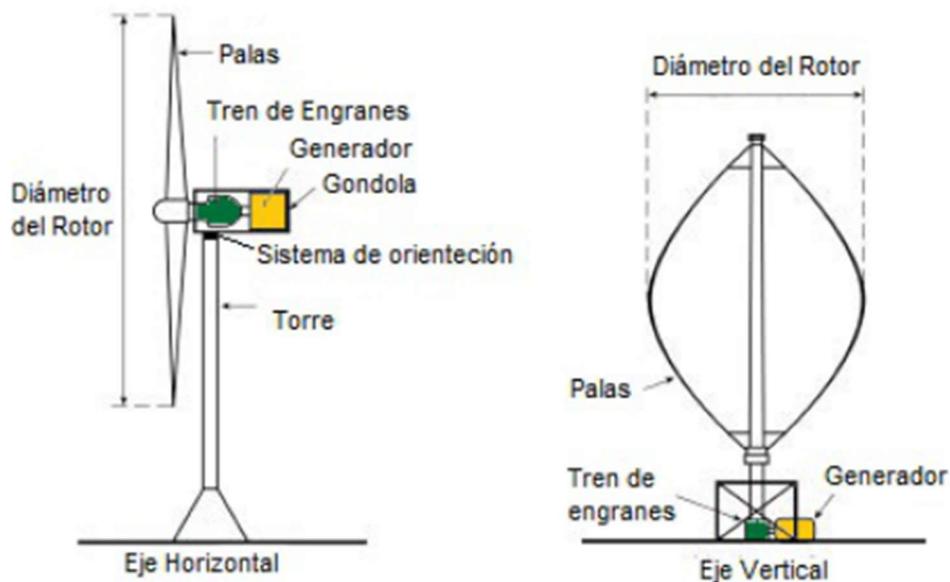


Figura 3-6. Aerogeneradores de eje horizontal y vertical

Nota: en el ANEXO 2 se explica en mayor profundidad las diferentes partes que componen un aerogenerador de eje horizontal.

3.1.2.1. Aerodinámica de la pala del aerogenerador

Un cuerpo situado en el seno de un fluido en movimiento experimenta dos fuerzas: una en la dirección del movimiento relativo del fluido respecto al objeto, llamada fuerza de arrastre (Drag) y otra en la dirección perpendicular a la anterior, llamada fuerza de sustentación (Lift). La fuerza total es la suma vectorial de ambas componentes.

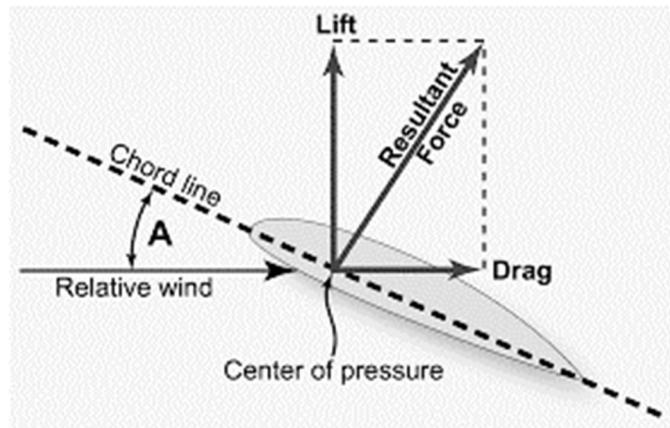


Figura 3-7. Fuerzas aerodinámicas

Los módulos de las fuerzas de arrastre (F_D) y de sustentación (F_L) se expresan según las siguientes fórmulas:

$$F_D = C_D \frac{\rho w^2}{2} A ; F_L = C_L \frac{\rho w^2}{2} A$$

Donde,

- w es la velocidad relativa entre el cuerpo y el fluido
- ρ es la densidad del fluido
- A corresponde al área característica del cuerpo, que es la proyección del área normal a la dirección del flujo.

Los coeficientes C_D y C_L son los coeficientes de arrastre y sustentación respectivamente. Dichos coeficientes dependen de la geometría del cuerpo, del ángulo de ataque y de la velocidad relativa. Estos coeficientes son experimentales.

La conversión de la energía cinética del viento en energía mecánica para el accionamiento del generador eléctrico del aerogenerador puede realizarse mediante dos tipos de aerogeneradores:

- Aerogeneradores de eje vertical: el par motor se obtiene esencialmente de la fuerza de arrastre.
- Aerogeneradores de eje horizontal: el par motor se obtiene principalmente de la fuerza de sustentación, ya que sus palas están compuestas mediante perfiles aerodinámicos.

3.1.2.2. Perfil aerodinámico

Un perfil aerodinámico es aquel en el que se generan distribuciones de presiones alrededor de su sección transversal, generando así, sustentación.

En un perfil alar (perfil aerodinámico) se distinguen las siguientes partes:

- Un borde de ataque enfrentado a la corriente, que debe ser redondeado, de forma lisa y suave (para poder actuar con elevado rendimiento a distintos ángulos de ataque).
- Un borde de fuga situado en el lado de sotavento, que debe de ser un borde afilado (para poder evitar turbulencias en la capa límite).
- La cuerda del perfil, una línea recta que une el borde de ataque con el de salida.

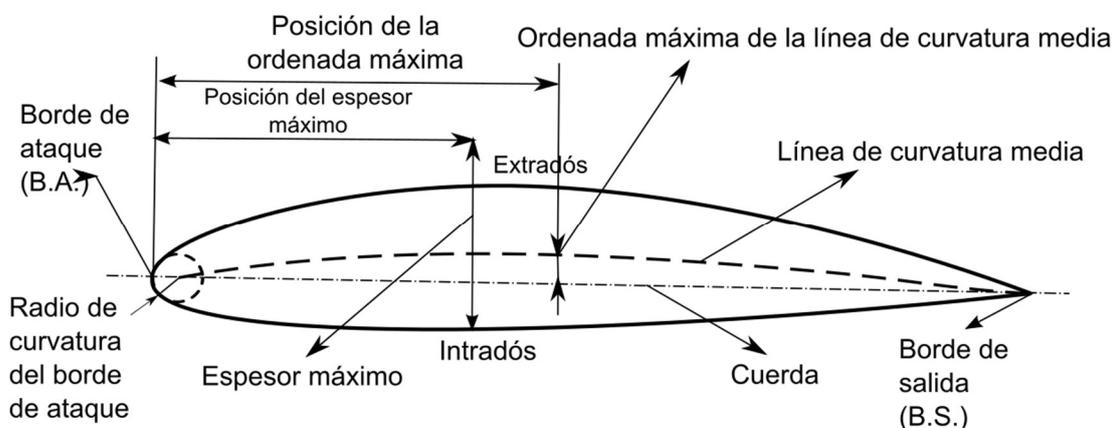


Figura 3-8. Sección de un perfil aerodinámico

Los dos bordes que definen el perfil se denominan, extradós la más convexa e intradós la menos convexa, pudiendo llegar a ser cóncava.

El ángulo de ataque α , es el ángulo formado por la dirección de la velocidad del fluido relativo al perfil w y la dirección de la cuerda.

El esesor máximo, definido por la distancia máxima entre extradós e intradós ofrece mayor resistencia aerodinámica al aumentar su grosor, pero permite una estructura más rígida.

Los coeficientes de sustentación C_L y arrastre C_D definen la fuerza de empuje que será capaz de ofrecer el perfil, y la resistencia aerodinámica que opone, respectivamente.

El principal objetivo de un perfil aerodinámico es el de crear una fuerza de sustentación, la cual será aprovechada en este caso para mover el eje de un generador eléctrico.

El empuje necesario se consigue enfrentando al perfil a una corriente de viento con un determinado ángulo (ángulo de ataque), de tal manera que el aire circule con diferentes velocidades por la superficie del perfil.

Aplicando la ecuación de Bernoulli, se observa que esta diferencia de velocidades origina una diferencia de presiones, la cual a lo largo de la superficie del perfil generará una fuerza ascendente (fuerza de sustentación). Por el contrario, también se produce otra fuerza indeseada, la de arrastre.

$$p_1 + \rho gh_1 + \frac{1}{2} \rho v_1^2 = p_2 + \rho gh_2 + \frac{1}{2} \rho v_2^2$$

Por situarse en la misma altura, $h_1 = h_2$:

$$p_1 + \rho gh_1 + \frac{1}{2} \rho v_1^2 = p_2 + \rho gh_2 + \frac{1}{2} \rho v_2^2$$

Operando:

$$\Delta p = \rho(v_2^2 - v_1^2)$$

Donde,

- p : presión en la superficie
- ρ : densidad del aire
- v : velocidad del aire
- g : constante gravitacional

3.1.3. Sistema de desalinización por osmosis inversa

El agua que generará el hidrógeno viene del mar, por lo tanto, se trata de un agua salada y que probablemente, contenga alguna otra sustancia. Para poder limpiar el agua de estas sales, se aplica un proceso de ósmosis inversa.

La ósmosis inversa es un tratamiento tecnológico, de los procesos existentes para la desalinización del agua, uno de los más efectivos. Es usado para obtención de un agua más limpia en múltiples casos: obtención de agua potable, diálisis, generación de energía, industria del papel, azúcar, usos agrícolas, etc.

El principio técnico de la ósmosis se basa en el equilibrio. Al ponerse en contacto dos fluidos con partículas disueltas en concentraciones diferentes, se mezclan ambos hasta lograr una concentración equivalente. Colocando una membrana semipermeable entre estos dos fluidos, el agua con menos concentración pasará a través de la membrana hacia el de mayor concentración, hasta equilibrarse.

Ahora bien, si se aplica una presión lo suficientemente elevada para vencer la presión osmótica se puede lograr la ósmosis inversa. Con este proceso

se consigue separar iones, moléculas y partículas más grandes que el agua potable.

Este proceso lleva a cabo un consumo de energía para poder vencer la presión osmótica.

3.1.4. Sistema de electrólisis

La electrólisis es el proceso que separa los elementos de un compuesto por medio de la electricidad, en este caso, separa el agua en hidrógeno y oxígeno.

Dentro de estos tipos se pueden diferenciar los electrolizadores unipolares o bipolares.

En una celda propiamente diseñada, el hidrógeno aparecerá en el cátodo, junto a otras moléculas de agua; y el oxígeno aparecerá en el ánodo, junto a otras moléculas de agua.

El cátodo se trata de un electrodo negativamente cargado, el cuál sufre un proceso de reducción, donde los electrones son bombardeados al agua. En cambio, el ánodo está positivamente cargado produciéndose un proceso de oxidación.

Las ecuaciones que rigen este fenómeno son:

- Reducción en el cátodo: $2H^+_{(aq)} + 2e^- \rightarrow H_{2(g)}$
- Oxidación en el ánodo: $2H_2O_{(l)} \rightarrow O_{2(g)} + 4H^+_{(aq)} + 4e^-$

3.1.5. Sistema de licuefacción

La licuefacción es el proceso por el cual un gas cambia de estado a líquido, por el aumento de presión y la disminución de la temperatura, llegando a una sobrepresión elevada.

Este proceso es necesario debido al gran volumen de gas que se obtendría, y la imposibilidad de almacenaje del mismo. Gracias a la licuefacción, se logra poder almacenarlo en forma líquida en un depósito, reduciendo considerablemente su volumen y pudiendo ser repostado a los buques cargueros (operaciones de bunkering).

3.1.6. Sistema de almacenamiento

Como ya se ha comentado, es necesario un depósito para almacenar el hidrógeno líquido. Dicho depósito debe de ser capaz de resistir bajas temperaturas.

El estado líquido del hidrógeno se logra manteniendo unas temperaturas por debajo de 20,3K (-252.3 °C). Para ello, comúnmente se utilizan depósitos tipo Dewar, los cuales son prácticamente adiabáticos y constan de una cámara de

vacío para evitar la transferencia de calor con el entorno tanto por conducción como por convección. Así mismo, disponen de un recubrimiento especial para evitar las pérdidas de calor por radiación.

4. NORMATIVAS Y REFERENCIAS

En este apartado del capítulo de normativas y referencias se explicarán todas las normas utilizadas para el desarrollo de este proyecto.

4.1. Disposiciones legales y normas aplicadas

4.1.1. BS-EN-61400-1:2005 (IEC 61400-1)

Nombre de la Norma: Wind turbines-Design requirements

Esta parte de IEC 61400 describe los requisitos mínimos de diseño para aerogeneradores y no está diseñada para ser utilizada como una especificación de diseño completa o manual de instrucciones.

Cualquiera de los requisitos de esta norma puede modificarse si se puede demostrar adecuadamente que la seguridad del sistema no se ve comprometida.

Esta parte de IEC 61400 especifica requisitos de diseño esenciales para garantizar la integridad de ingeniería de los aerogeneradores. Su propósito es proporcionar un nivel adecuado de protección contra daños de todos los peligros durante la vida útil planificada.

4.1.2. BS-EN-61400-3:2009 (IEC 61400-3)

Nombre de la Norma: Wind turbines-Design requirements for offshore wind turbines

Esta parte de IEC 61400 describe los requisitos mínimos de diseño para turbinas eólicas marinas y no debe utilizarse como una especificación de diseño completa o manual de instrucciones.

Cualquiera de los requisitos de esta norma puede modificarse si se puede demostrar adecuadamente que la seguridad del sistema no se ve comprometida.

Esta parte de IEC 61400 especifica requisitos adicionales para la evaluación de las condiciones externas en un sitio de turbinas eólicas marinas y especifica requisitos de diseño esenciales para garantizar la integridad de ingeniería de las turbinas eólicas marinas. Su propósito es proporcionar un nivel adecuado de protección contra daños de todos los peligros durante la vida útil planificada.

Esta norma se centra en la integridad de ingeniería de los componentes estructurales de una turbina eólica marina, pero también se ocupa de subsistemas como los mecanismos de control y protección, los sistemas eléctricos internos y los sistemas mecánicos.

Una turbina eólica se considerará como una turbina eólica marina si la estructura de soporte está sujeta a una carga hidrodinámica. Los requisitos de diseño especificados en esta norma no son necesariamente suficientes para garantizar la integridad de ingeniería de las turbinas eólicas marinas flotantes.

Esta norma es totalmente compatible con los requisitos de IEC 61400-1.

4.1.3. DNVGL-OS-B101 [5]

Nombre de la Norma: Offshore Standards-Metallic Materials

Esta norma proporciona principios, requisitos técnicos y orientación para los materiales metálicos que se utilizarán en la fabricación de estructuras en alta mar.

Los objetivos de esta estándar son:

- Proporcionar un estándar internacionalmente aceptable para la calidad de los materiales metálicos utilizados para la construcción y fabricación en alta mar, definiendo los requisitos mínimos para las especificaciones de los materiales, los procesos de tratamiento y las pruebas.
- Servir de documento de referencia contractual entre fabricantes, proveedores y compradores.
- Servir de guía para diseñadores, fabricantes, proveedores, compradores y reguladores.
- Especificar los procedimientos y requisitos para los materiales metálicos que se utilizarán en estructuras e instalaciones costa afuera sujetas a la certificación y clasificación DNV GL.

4.1.4. DNVGL-OS-C101 [5]

Nombre de la Norma: Offshore Standards: Design of Offshore Steel Structures

Esta norma offshore proporciona principios, requisitos técnicos y orientación para el diseño estructural de estructuras offshore. Es aplicable a todas las estructuras offshore metálicas.

DNVGL-OS-C101 es la parte general de los estándares offshore DNV GL para estructuras. Los principios de diseño y los requisitos generales se definen en esta norma. El estándar está destinado principalmente para ser utilizado en el diseño de una estructura donde existe un estándar de objeto de apoyo, pero

también se puede usar como un documento independiente par objetos donde no existe un estándar de objeto.

Los objetivos de esta norma son:

- Principios de diseño
- Categorización estructural
- Principios de selección e inspección de materiales.
- Cargas de diseño
- Análisis del efecto de las cargas
- Diseño de estructuras de acero y conexiones
- Protección contra la corrosión
- Diseño de cimentaciones

4.1.5. DNVGL-ST-0054 [5]

Nombre de la Norma: Transport and Installation of wind power plants

Esta norma proporciona principios generales de seguridad, requisitos y orientación para el transporte e instalación (T&I) de plantas de energía eólica en tierra y en alta mar.

El desarrollo del estándar se ha basado en la experiencia a largo plazo en DNV GL con estándares de emisión para ayudar a la industria de las turbinas eólicas a evolucionar. Debido a la importancia de las actividades en alta mar (principalmente debido a los costos intensivos de subestructuras, fundaciones y actividades en alta mar), la norma está orientada predominantemente hacia los T&I de los parques eólicos marinos.

La norma contiene requisitos para el diseño de activos (componentes) resultantes de la planificación de su transporte e instalación, así como requisitos para la ejecución de su transporte e instalación. Estos requisitos se incluyen como texto de orientación o por referencia a otras normas específicas.

El objetivo de la norma es proporcionar el enfoque que garantice la integridad estructural de los activos y componentes de la planta de energía eólica durante las operaciones de transporte, instalación y desmantelamiento.

Otros objetivos de esta norma son:

- Para servir como una guía para diseñadores, proveedores, compradores y reguladores para el diseño y la ejecución seguros de procedimientos de T&I basados en un enfoque basado en el riesgo.
- Para servir como un documento de referencia contractual entre proveedores y clientes.

La norma proporciona los requisitos destinados a garantizar la integridad estructural de los activos y componentes, incluidos:

- Requisitos para la planificación de T&I.
- Requisitos para la ejecución de T&I.
- Requisitos para evaluaciones y controles al finalizar T&I.

La norma puede aplicarse como parte de la base técnica para llevar a cabo una certificación DNV GL y para servicios de verificación.

La norma no establece los requisitos para el diseño y la fabricación de los recipientes de instalación, los dispositivos de elevación y el cierre de mar.

La norma es aplicable a la planificación, compilación y ejecución de los procedimientos de transporte e instalación y resume los aspectos esenciales de los T&I que se deben observar en las diferentes fases del proyecto.

4.1.6. DNVGL-ST-0126 [5]

Nombre de la Norma: Support Structures for Wind Turbines

Este documento constituye el estándar DNV GL para el diseño de estructuras de soporte de turbinas eólicas y el desarrollo se ha basado en una larga experiencia en DNV GL con estándares de emisión para ayudar a la industria de turbinas embolicas a avanzar. La norma tiene en cuenta las cuestiones de construcción, transporte, instalación e inspección en la medida necesaria en el contexto del diseño y los requisitos generales se definen en la norma. La norma se usará junto con otras normas relevantes.

La norma especifica principios y directrices generales para el diseño estructural de estructuras de soporte de aerogeneradores.

Los objetos de esta norma son:

- Proporcionar un nivel de seguridad internacionalmente aceptable mediante la definición de requisitos mínimos para estructuras y componentes estructurales (en combinación con los estándares de referencia, prácticas recomendadas, directrices, etc.).
- Servir como documento contractual entre proveedores y compradores relacionados con el diseño, la construcción, la instalación y la inspección en servicio.
- Servir de guía para diseñadores, proveedores, compradores y reguladores.
- Especificar procedimientos y requisitos para estructuras de soporte sujetas a certificación DNV GL.

- Servir como base para la verificación de las estructuras de soporte de turbinas eólicas para las cuales se contrata a DNV GL para realizar la verificación y certificación.

Este estándar de DNV GL para estructuras de soporte de turbinas eólicas ofrece enfoques de diseño pragmático y, por ejemplo, puede utilizarse para el diseño de torres de acero y hormigón; cimientos de hormigón basados en la gravedad, junto con cimientos de acero, como cimientos de pilotes.

Esta norma da requisitos para:

- Criterios de diseño
- Selección del material y grado de inspección
- Selección de las cargas de diseño y combinaciones de cargas
- Análisis de los efectos de carga
- Diseño estructural
- Protección frente a la corrosión
- Diseño geotécnico
- Conexiones enlechadas para estructuras de apoyo mar adentro
- Protección contra socavones para estructuras de soporte offshore.

También, contiene requisitos para materiales, ejecución, operaciones y mantenimiento (O&M) relacionados con el diseño. Esto se hace mediante la inclusión de, por ejemplo, referencias a materiales y estándares de ejecución.

4.1.7. DNVGL-ST-0437 [5]

Nombre de la Norma: Loads and Site Conditions for Wind Turbines

Esta norma DNV GL proporciona principios, requisitos técnicos y orientación para las cargas y las condiciones del sitio de los aerogeneradores.

El estándar contiene cinco secciones:

- 1) Proporciona una introducción y un contexto hacia otras normas y especificaciones de servicio de DNV GL y hacia otras normas de carga existentes.
- 2) Cubre las condiciones externas relevantes para las cargas de aerogeneradores. Las condiciones externas para los aerogeneradores en tierra con idénticas a las del IEC 61400-1, mientras que las condiciones marinas están cubiertas en profundidad en esta norma y se refieren en parte a IEC 61400-3.
- 3) Cubre las condiciones del sitio y los requisitos para determinar las condiciones de diseño específicas del sitio como parte de la base de diseño.

- 4) Cubre el cálculo de cargas, incluidas diferentes fuentes de carga, factores de seguridad, definiciones de casos de carga y evaluación de cargas.
- 5) Cubre los requisitos para las pruebas de tipo, en particular con respecto a la verificación de cargas de diseño mediante la comparación de simulaciones y mediciones.

Los objetivos de esta norma son:

- Proporcionar un nivel de seguridad internacionalmente aceptable definiendo los requisitos mínimos para la determinación de cargas de aerogeneradores (en combinación con los estándares de referencia, prácticas recomendadas, etc.).
- Servir como base de diseño para diseñadores, proveedores, compradores y autoridades.
- Especificar los requisitos para aerogeneradores y parques eólicos sujetos a la certificación DNV GL.

Esta norma es aplicable para la determinación de cargas de diseño para turbinas eólicas marinas montadas en el fondo y en la parte inferior, las condiciones relevantes del sitio también están dentro del alcance de esta norma. Para turbinas eólicas marinas flotantes, habrá que consultar la norma DNV-OS-J103. Cualquier referencia a los requisitos en alta mar está destinada solo para aerogeneradores en alta mar.

Tienen que cumplirse todos los requisitos aplicables en esta norma. Las desviaciones de estos requisitos, o la aplicación de medios alternativos para cumplir con estos requisitos, pueden ser aceptables, siempre que se pueda demostrar un nivel equivalente de seguridad y confiabilidad.

La norma es aplicable a todos los tipos de turbinas eólicas, sin embargo, es la más completa para turbinas eólicas de eje horizontal de dos o tres palas.

Esta norma contiene:

- Definición y teoría de las condiciones externas.
- Determinación de las condiciones de diseño específicas del sitio.
- Cálculo y evaluación de las cargas.
- Validación del modelo mediante medición de cargas y curva de potencia.

4.1.8. DNV-OS-J101 [5]

Nombre de la Norma: Design of Offshore Wind Turbine Structures

Esta norma para alta mar, proporciona principios, requisitos técnicos y orientación para el diseño, la construcción y la inspección en servicio de

estructuras de turbinas eólicas marinas, aquí definidas como las estructuras de soporte y cimientos para turbinas eólicas.

La norma no cubre el diseño de soporte y cimientos para subestaciones para parques eólicos, para ello se utilizará la norma DNV-OS-J201.

La norma ha sido escrita para su aplicación a nivel mundial. Las regulaciones nacionales y gubernamentales pueden incluir requisitos que exceden las disposiciones dadas por esta norma según el tamaño, tipo, ubicación y servicio previsto de la estructura de la turbina eólica.

Esta norma cumple con IEC 61400-3 y IEC 61400-22; sin embargo, los requisitos establecidos en esta norma pueden ser más estrictos que los establecidos en las normas IEC. Además, esta norma contiene la interpretación de DNV de los requisitos de IEC en los casos en los que ciertos requisitos de IEC necesitan aclaración.

La norma especifica principios y directrices para el diseño estructural de turbinas eólicas marinas.

Los objetivos de esta norma son:

- Proporcionar un nivel de seguridad internacionalmente aceptable definiendo los requisitos mínimos para estructuras y componentes estructurales (en combinación con las normas de referencia, prácticas recomendadas, directrices, etc.).
- Servir como un documento de referencia contractual entre proveedores y compradores relacionados con el diseño, construcción, instalación e inspección en servicio.
- Servir como una guía para diseñadores, proveedores, compradores y reguladores.
- Especificar procedimientos y requisitos para estructuras offshore sujetas a certificación DNV.
- Servir como base para la verificación de estructuras de aerogeneradores en alta mar, en las que se contrata a DNV para realizar la verificación.

La norma es aplicable a todo tipo de estructuras de soporte y bases para aerogeneradores marinos.

La norma es aplicable al diseño de normas completas, incluidas las subestructuras y los cimientos, pero excluyendo los componentes de las turbinas eólicas como las góndolas y los rotores.

La norma da los requisitos para:

- Criterios de diseño
- Selección de material y grado de inspección

- Cargas de diseño
- Análisis de efecto de carga
- Combinaciones de carga
- Diseño estructural
- Diseño de cimientos
- Protección contra la corrosión

4.1.9. DNV-RP-C205 [5]

Nombre de la Norma: Environmental conditions and Environmental Loads

Esta Práctica Recomendada (RP) proporciona una guía para el modelado, análisis y predicción de las condiciones ambientales, así como una guía para calcular las cargas ambientales que actúan sobre las estructuras. Las cargas están limitadas a las debidas al viento, las olas y la corriente. La RP se basa en el estado de la técnica en el modelado y análisis de condiciones ambientales y cargas y desarrollos técnicos en proyectos recientes de investigación y desarrollo, así como en la experiencia en diseño de proyectos recientes y el curso.

Los principios básicos aplicados en este RP están de acuerdo con las reglas más reconocidas y reflejan las prácticas de la industria y las últimas investigaciones.

El objetivo de este RP es proporcionar criterios de diseño racional y orientación para la evaluación de cargas en estructuras marinas sometidas a vientos, olas y cargas de corriente.

Las condiciones ambientales cubren fenómenos naturales, que pueden contribuir a daños estructurales, perturbaciones de operaciones o fallas de navegación. Los fenómenos más importantes para las estructuras marinas son:

- Viento
- Olas
- Corrientes
- mareas

Estos fenómenos están cubiertos en este RP.

Los fenómenos, que pueden ser importantes en casos específicos, pero no cubiertos por este RP incluyen:

- Hielo
- Terremotos
- Temperatura
- Condiciones del suelo
- Visibilidad

Los fenómenos ambientales suelen ser descritos por variables físicas de carácter estadístico. La descripción estadística debe revelar las condiciones extremas, así como las variaciones a largo y corto plazo. Si existe una base de datos simultánea confiable, los fenómenos ambientales se pueden describir mediante probabilidades conjuntas.

Los datos de diseño ambiental deben ser representativos de las áreas geográficas donde se ubicará la estructura o donde se llevará a cabo la operación. Para los buques y otras unidades móviles que operan en todo el mundo, los datos ambientales para áreas particularmente hostiles, como el Océano Atlántico Norte, pueden considerarse.

Los datos empíricos y estadísticos utilizados como base para la evaluación de la operación y el diseño deben cubrir un período de tiempo suficientemente largo. Para operaciones de duración limitada, se deben tener en cuenta las variaciones estacionales. Para datos meteorológicos y oceanográficos deben estar disponibles 20 años de grabaciones. Si el resto de datos es más corto, la incertidumbre climática debe incluirse en el análisis.

Las cargas ambientales son las cargas causadas por fenómenos ambientales.

Las cargas ambientales que se utilizarán para el diseño se basarán en datos ambientales para la ubicación y operación específica en cuestión, y se determinarán mediante el uso de métodos relevantes aplicables para la ubicación/operación, teniendo en cuenta el tipo de estructura, tamaño, forma y respuesta característica.

4.1.10. EN 10025

Nombre de la Norma: European Standard for Structural Steel

La norma EN-10025:2004 es la nueva norma europea para el acero estructural. Esta nueva norma se publica en seis partes y reúne estándares anteriores para producir un estándar para la mayoría de los productos de acero estructural. Las partes son:

- EN 10025-1 General technical delivery conditions
- EN 10025-2 Technical delivery conditions for non-alloy structural steels
- EN 10025-3 Technical delivery conditions for normalised weldable fine grain steels
- EN 10025-4 Technical delivery conditions for thermomechanically rolled weldable fine grain structural steels
- EN 10025-5 Technical delivery conditions for structural steels with improved atmospheric corrosion resistance

- EN 10025-6 Technical delivery conditions for flat products of high yield strength structural steels in the quenched and tempered condition

Los sistemas de designación utilizados en la nueva norma son similares, pero no idénticos a la norma anterior EN 10025:1993, por lo que la siguiente guía ha sido preparada para ayudar a compradores, especificadores, diseñadores y usuarios de acero.

Symbols used in EN 10025 : part 2 : 2004

Non-alloy structural steels

S...	Structural steel
E...	Engineering steel
.235...	Minimum yield strength (ReH) in MPa @ 16mm
...JR..	Longitudinal Charpy V-notch impacts 27 J @ +20°C
...J0..	Longitudinal Charpy V-notch impacts 27 J @ 0°C
...J2..	Longitudinal Charpy V-notch impacts 27 J @ -20°C
...K2..	Longitudinal Charpy V-notch impacts 40 J @ -20°C
...+AR	Supply condition as rolled
...+N	Supply condition normalised or normalised rolled
Customer options	
...C..	Grade suitable for cold forming
...Z..	Grade with improved properties perpendicular to the surface

Examples: S235JR+AR, S355K2C+N

Figura 4-1. Símbolos utilizados en EN10025: parte 2 – Aceros estructurales no aleados

Symbols used in EN 10025 : part 3 : 2004

Normalised/normalised rolled weldable fine grain structural steels

S...	Structural steel
.275...	Minimum yield strength (ReH) in MPa @ 16mm
...N..	Longitudinal Charpy V-notch impacts at a temperature not lower than -20°C
...NL..	Longitudinal Charpy V-notch impacts at a temperature not lower than -50°C
Customer options	
...Z..	Grade with improved properties perpendicular to the surface

Examples: S275N, S420NL Z35

Figura 4-2. Símbolos utilizados en EN10025: parte 3 - Aceros estructurales laminados de grano fino soldables normalizados

Symbols used in EN 10025 : part 4 : 2004
Thermomechanically rolled weldable fine grain structural steels

S...	Structural steel
.275...	Minimum yield strength (ReH) in MPa @ 16mm
...M..	Longitudinal Charpy V-notch impacts at a temperature not lower than -20°C
...ML..	Longitudinal Charpy V-notch impacts at a temperature not lower than -50°C
Customer options	
...Z..	Grade with improved properties perpendicular to the surface

Examples: S355M, S460ML Z25

Figura 4-3. Símbolos utilizados en EN10025: parte 4 - Aceros estructurales laminados de grano fino soldables termoquímicamente

Symbols used in EN 10025 : part 5 : 2004
Structural steels with improved atmospheric corrosion resistance – also known as weathering steels

S...	Structural steel
.355...	Minimum yield strength (ReH) in MPa @ 16mm
...J0..	Longitudinal Charpy V-notch impacts 27 J @ 0°C
...J2..	Longitudinal Charpy V-notch impacts 27 J @ -20°C
...K2..	Longitudinal Charpy V-notch impacts 40 J @ -20°C
...W..	Improved atmospheric corrosion resistance
...P..	Greater phosphorus content (grade S355 only)
...+AR	Supply condition as rolled
...+N	Supply condition normalised or normalised rolled
Customer options	
...Z..	Grade with improved properties perpendicular to the surface

Examples: S235J0W+AR, S355K2W+N Z25

Figura 4-4. Símbolos utilizados en EN10025: parte 5 - Aceros estructurales con resistencia a la corrosión atmosférica mejorada

Symbols used in EN 10025 : part 6 : 2004
Flat products of high yield strength structural steels
in the quenched and tempered condition

S...	Structural steel
.460...	Minimum yield strength (ReH) in MPa @ 16mm
...Q..	Longitudinal Charpy V-notch impacts at a temperature not lower than -20°C
...QL..	Longitudinal Charpy V-notch impacts at a temperature not lower than -40°C
...QL1..	Longitudinal Charpy V-notch impacts at a temperature not lower than -60°C
Customer options	
...Z..	Grade with improved properties perpendicular to the surface

Examples: S460Q, S690QL

Figura 4-5. Símbolos utilizados en EN10025: parte 6 Producciones de láminas de aceros estructurales de alto rendimiento en condiciones de templado y revenido

Las siguientes tablas muestran las calificaciones, las propiedades y las calificaciones equivalentes más cercanas de los estándares anteriores. Las designaciones de grado se explican en las páginas anteriores.

EN 10025 : part 2 : 2004 Non-alloy structural steels

Comparison between grades in EN 10025 : part 2 : 2004 and nearest equivalent versions in EN 10025 : 1993 and BS 4360 : 1990						
EN 10025 : part 2 : 2004				EN 10025 : 1993	BS 4360 : 1990	
Grade	Yield (ReH) min	Tensile (Rm)	Charpy V-notch longitudinal		Grade	Grade
	Strength at t = 16mm (MPa)		Temp (°C)	Energy (J) t = 16mm		
S185	185	290/510	-	-	S185	-
- ¹	235	360/510	-	-	S235	40A
S235JR ²			20	27	S235JRG1/G2	40B
S235J0			0	27	S235J0	40C
S235J2			-20	27	S235J2G3/G4	40D
- ¹	275	410/560	-	-	S275	43A
S275JR ²			20	27	S275JR	43B
S275J0			0	27	S275J0	43C
S275J2			-20	27	S275J2G3/G4	43D
- ¹	355	470/630	-	-	S355	50A
S355JR ²			20	27	S355JR	50B
S355J0			0	27	S355J0	50C
S355J2			-20	27	S355J2G3/G4	50D
S355K2			-20	40	S355K2G3/G4	50DD
E295	295	470/610	-	-	E295	-
S335	335	570/710	-	-	S335	-
E360	360	650/830	-	-	E360	-

1 MPa = 1 N/mm²

Notes

¹ For all products to be compliant with the EU Construction Products Directive (CPD 89/106/EC) the material must offer a guaranteed minimum impact performance. This has resulted in the removal of this grade from the standard, and the lowest grade now offered is the JR version for each yield strength variation.

Tabla 4-1. Norma EN10025: parte 2- Propiedades de los aceros estructurales no aleados

EN 10025 : part 3 : 2004 Normalised/normalised rolled weldable fine grain structural steels

Comparison between grades in EN 10025 : part 3 : 2004 and nearest equivalent versions in EN 10113 : part 2 : 1993 and BS 4360 : 1990					
EN 10025 : part 3 : 2004				EN 10113 : part 2 : 1993	
Grade	Yield (ReH) min	Tensile (Rm)	Charpy V-notch longitudinal		Grade
	Strength at t = 16mm (MPa)		Temp (°C)	Energy (J) t = 16mm	
S275N	275	370/510	-20	40	S275N
S275NL			-50	27	S275NL
S355N	355	470/630	-20	40	S355N
S355NL			-50	27	S355NL
S420N	420	520/680	-20	40	S420N
S420NL			-50	27	S420NL
S460N	460	550/720	-20	40	S460N
S460NL			-50	27	S460NL

1 MPa = 1 N/mm²

Tabla 4-2. Norma EN10025: Parte 3 - Propiedades de los aceros estructurales laminados de grano fino soldables normalizados

EN 10025 : part 4 : 2004 Thermomechanically rolled weldable fine grain structural steels

Comparison between grades in EN 10025 : part 4 : 2004 and nearest equivalent versions in EN 10113 : part 3 : 1993					
EN 10025 : part 4 : 2004				EN 10113 : part 3 : 1993	
Grade	Yield (ReH) min	Tensile (Rm)	Charpy V-notch longitudinal		Grade
	Strength at t = 16mm (MPa)		Temp (°C)	Energy (J) t = 16mm	
S275M	275	370/510	-20	40	S275M
S275ML			-50	27	S275ML
S355M	355	470/630	-20	40	S355M
S355ML			-50	27	S355ML
S420M	420	520/680	-20	40	S420M
S420ML			-50	27	S420ML
S460M	460	550/720	-20	40	S460M
S460ML			-50	27	S460ML

1 MPa = 1 N/mm²

Tabla 4-3. Norma EN10025: parte 4 - Propiedades de los aceros estructurales laminados de grano fino soldables termoquímicamente

EN 10025 : part 5 : 2004 Structural steels with improved atmospheric corrosion resistance - also known as weathering steels

Comparison between grades in EN 10025 : part 5 : 2004 and nearest equivalent versions in EN 10155 : 1993 and BS 4360 : 1990						
EN 10025 : part 5 : 2004				EN 10155 : 1993	BS 4360 : 1990	
Grade	Yield (Reh) min	Tensile (Rm)	Charpy V-notch longitudinal		Grade	Grade
	Strength at t = 16mm (MPa)		Temp (°C)	Energy (J) t = 16mm		
S235J0W	235	360/510	0	27	S235J0W	-
S235J2W			-20	27	S235J2W	-
S355J0WP	355	470/630	0	27	S355J0WP	WR50A
S355J2WP			-20	27	S355J2WP	-
S355J0W	355	470/630	0	27	S355J0W	WR50B
S355J2W			-20	27	S355J2W	WR50C
S355K2W			-20	40	S355K2W	WR50D

1 MPa = 1 N/mm²

Tabla 4-4. Norma EN10025: parte 5 - Propiedades de los aceros estructurales con resistencia a la corrosión atmosférica mejorada

EN 10025 : part 6 : 2004 Flat products of high yield strength structural steels in the quenched and tempered condition

Comparison between grades in EN 10025 : part 6 : 2004 and nearest equivalent versions in EN 10137 : part 2 : 1996 and BS 4360 : 1990						
EN 10025 : part 6 : 2004				EN 10137 : part 2 : 1996	BS 4360 : 1990	
Grade	Yield (Reh) min	Tensile (Rm)	Charpy V-notch longitudinal		Grade	Grade
	Strength at t = 16mm (MPa)		Temp (°C) ¹	Energy (J) t = 16mm		
S460Q	460	550/720	0	40	S460Q	-
S460QL			0	50	S460QL	-
S460QL1			0	60	S460QL1	55F
S500Q	500	590/770	0	40	S500Q	-
S500QL			0	50	S500QL	-
S500QL1			0	60	S500QL1	-
S550Q	550	640/820	0	40	S550Q	-
S550QL			0	50	S550QL	-
S550QL1			0	60	S550QL1	-
S620Q	620	700/890	0	40	S620Q	-
S620QL			0	50	S620QL	-
S620QL1			0	60	S620QL1	-
S690Q	690	770/940	0	40	S690Q	-
S690QL			0	50	S690QL	-
S690QL1			0	60	S690QL1	-
S890Q	890	940/1100	0	40	S890Q	-
S890QL			0	50	S890QL	-
S890QL1			0	60	S890QL1	-
S960Q	960	980/1150	0	40	S960Q	-
S960QL			0	50	S960QL	-

1 MPa = 1 N/mm²

Note

¹ Other impact temperatures can be specified.

Tabla 4-5. Norma EN10025: parte 6 - Propiedades de las producciones de láminas de acero estructurales de alto rendimiento en condiciones de templado y revenido

4.2. *Programas de cálculo*

En este proyecto, se han utilizado dos tipos de programas, uno de elementos finitos para la realización de los análisis, y otros dos de dibujo asistido por ordenador.

4.2.1. **COMSOL Multiphysics** [6]

COMSOL Multiphysics es una potente herramienta de modelado y análisis para prototipaje virtual de fenómenos físicos. El programa puede modelar virtualmente cualquier fenómeno físico que un ingeniero o científico pueda describir con ecuaciones diferenciales parciales, incluyendo transferencia de calor, movimiento de fluidos, electromagnetismo y mecánica estructural, entre otros, soportando la integración de problemas de diferentes campos multifísica.

Las prestaciones de multifísica integradas en COMSOL Multiphysics permiten al usuario modelar simultáneamente cualquier combinación de fenómenos. A través de estas prestaciones, el programa integra dos posibles formas de modelar (a través de aplicaciones predefinidas que permiten crear el modelo fijando las cantidades físicas que caracterizan el problema, y a través de las ecuaciones que modelan el problema) y permite combinarlas.

La estructura sobre la que COMSOL trabaja es un sistema de Ecuaciones Diferenciales Parciales, una descripción matemática de varios fenómenos físicos basados en las leyes de la ciencia.

COMSOL simplifica el desarrollo de aplicaciones del uso de la Biblioteca de modelos, que incorpora ejemplos de diversas áreas de aplicación. A través de ellos, los usuarios, sin necesidad de poseer profundos conocimientos en matemáticas o análisis numérico, podrán construir sus modelos.

Las prestaciones del modelado y simulación de COMSOL, junto con las librerías disponibles para él, lo convierten en una herramienta aplicable en un amplio abanico de áreas, entre las que se encuentran:

- Acústica, electromagnetismo, sistemas microelectromecánicos (MEMS), ingeniería de microondas, componentes de radiofrecuencia, dispositivos semiconductores, propagación de ondas.
- Reacciones químicas, difusión, dinámica de fluidos, fluidos en medios porosos, transferencia de calor, fenómenos de transporte.
- Mecánica de estructuras.
- Física, geofísica, óptica, mecánica cuántica.
- Sistemas de control.
- Modelado de componentes.
- Matemática aplicada.

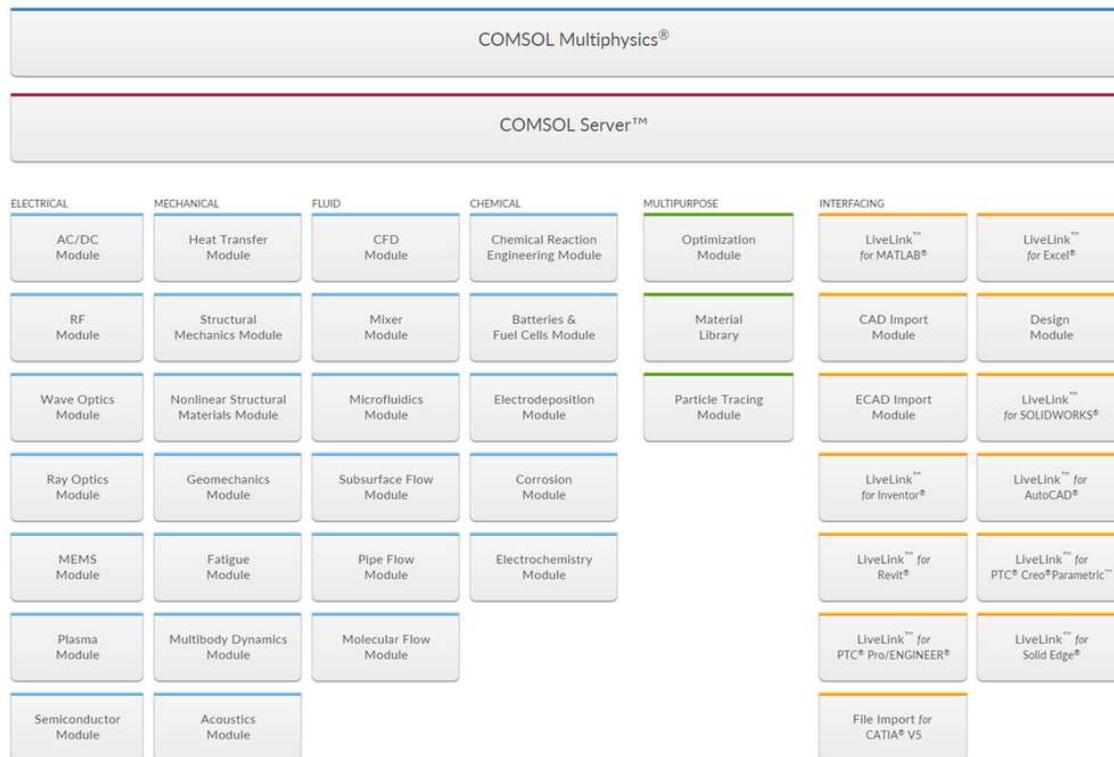


Figura 4-6. Módulos disponibles en COMSOL Multiphysics

Entre sus características se pueden encontrar:

- Interfaz gráfica “amigable” e interactiva para todas las etapas del proceso de modelado.
- Ilimitadas prestaciones de multifísica.
- Formulación general para un modelado rápido y sencillo de sistemas arbitrarios de Ecuaciones Diferenciales Parciales
- Multifísica multidimensional para modelado simultáneo de sistemas en 1D, 2D y 3D.
- Incorpora herramientas CAD para modelado sólido en 1D, 2D y 3D.
- Permite importar y reparar la geometría de archivos CAD en formato DXF y IGES. En particular, permite la importación de archivos creados en AutoCAD y CATIA.
- Generación automática y adaptativa de mallas, con un control explícito e interactivo sobre su tamaño.
- Extensa biblioteca de modelos que documentan y muestran más de 80 ejemplos resueltos.
- Disponibles los “solvers” más novedosos; entre ellos destacan, resolvedores iterativos para problemas estacionales lineales y no lineales, dependientes del tiempo, y de valores propios.
- Postprocesado interactivo que permite visualizar cualquier función de la solución.
- Integración total con MATLAB y sus toolboxes.

4.2.2. Solid Edge [9]

Solid Edge es un programa parametrizado de diseño asistido por computadora (CAD) de piezas tridimensionales. Permite el modelado de piezas de distintos materiales, doblado de chapas, ensamblaje de conjuntos soldadura, así como funciones de dibujo en plano para diseñadores y proyectistas.

Solid Edge es el único programa de diseño CAD 3D con el cual se puede diseñar de dos maneras distintas:

- Diseño por modelado tradicional, disponible en la mayoría de programas de diseño CAD.
- Diseño con la tecnología síncrona, desarrollada por SIEMENS y que consiste en poder diseñar y modificar con total libertad (sin árbol de operaciones) y sin limitaciones.

Entre las herramientas más destacadas que incluye Solid Edge se encuentran:

- Diseño generativo
- Ingeniería inversa
- Migración inteligente de archivos 3D
- Documentación técnica
- Flow Simulation
- Fabricación en Impresoras 3D
- Catchbook
- Un potente PDM para gestionar, organizar y administrar proyectos

4.2.3. AutoCAD [10]

Es un programa diseñado por Autodesk, una compañía estadounidense dedicada a la realización de platadormas de diseño. Las siglas CAD significan Computer Aid Design (diseño asistido por computadora).

AutoCAD trabaja mediante la utilización de imágenes de tipo vectorial, pero también es capaz de importar archivos de otros tipos como mapa de bits, lo que le permite al profesional lograr un mejor dinamismo y profundizar en su trabajo.

El programa utiliza un sistema de capas, lo que le permite una libertad de trabajo única a su operador, ya que, mediante su utilización, se podrá tener bien organizados los diferentes elementos que conforman la pieza o plano que el usuario se encuentre desarrollando.

AutoCAD incorpora el concepto de espacio modelo y espacio papel, lo que le permite separar las fases de diseño y dibujo en 2D y 3D, de las fases necesarias para la creación de planos a una escala específica.

El programa ofrece herramientas de diseño específicas para cada ámbito de la industria. En este sentido, los conjuntos de herramientas disponibles son:

- AutoCAD Arquitectura
- AutoCAD Electrical
- AutoCAD Map 3D
- AutoCAD Mechanical
- AutoCAD MEP
- AutoCAD plant 3D
- AutoCAD Raster Design
- Aplicación móvil AutoCAD
- Aplicación web AutoCAD

5. DEFINICIONES Y ABREVIATURAS

DEFINICIONES	
Offshore	Término procedente del inglés, que hace referencia a “en el mar, alejado de la costa”.
Onshore	Término procedente del inglés, que hace referencia a “en la tierra, dentro del país”.
Bunkering	Término procedente del inglés, que hace referencia a “el abastecimiento y repostaje de buques en el mar”.
Batimetría	Conjunto de técnicas para la medición de las profundidades del mar.
Orografía	Parte de la geología que se encarga del estudio, descripción y representación del relieve terrestre.

Tabla 5-1. Tabla de definiciones

ABREVIATURAS	
IEC	International Electrotechnical Commission
DNV	Det Norske Veritas
BS	British Standards
EN	European Standards

Tabla 5-2. Abreviaturas

6. REQUISITOS DE DISEÑO

6.1. Descripción técnica

Las estructuras tipo Jacket son muy frecuentes en la industria del petróleo y gas, aunque también es común verlas en la generación eólica offshore. En ellas se distinguen, principalmente, tres zonas: la cubierta, la estructura, y la cimentación.

- Cubierta: Zona en la que se realizan las operaciones en cubierta, ya sean operaciones de perforación (petróleo y gas), operaciones de creación y almacenaje de hidrógeno (renovables) u operaciones de generación eólica (eólica offshore). Pueden ser modulares o integradas.
- Torre: Entramado de barras que conforman la estructura de soporte, es la encargada de sostener la cubierta y resistir todas las cargas que se vean involucradas durante su vida útil, transmitiéndolas a la cimentación.
- Cimentación: Encargada de fijar la estructura al lecho marino, puede estar diseñada de varias maneras, generalmente, mediante pilotes (explicado más adelante).

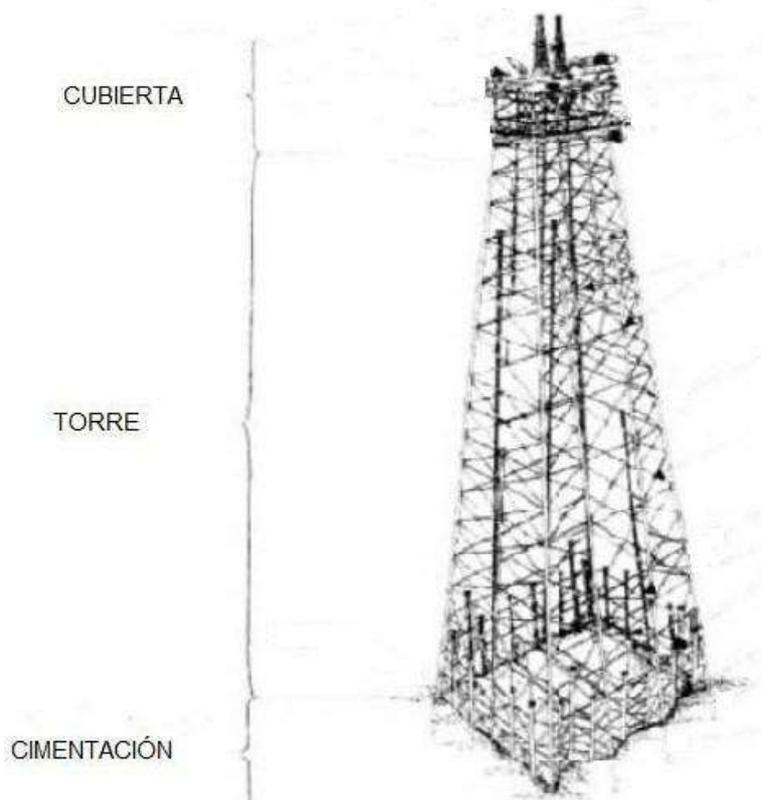


Figura 6-1. Partes de la estructura Jacket

Este tipo de estructuras suelen estar formadas por 3 o 4 columnas casi verticales, con un grado de conicidad. Están unidas, entre ellas, por una serie de entramado de barras, mediante un proceso de soldadura o mediante un sistema

de guías. Las uniones son las partes más débiles de la estructura, ya que son puntos de concentraciones de tensiones además de ser zonas que sufren a fatiga.

Por su carácter geométrico, al estar formadas por un entramado de barras, se convierten en estructuras rígidas y robustas, por lo que se pueden instalar aerogeneradores de grandes dimensiones y potencias. Gracias a las enormes dimensiones de la base es una solución estable para hacer frente a los grandes momentos que ésta padece. Además, las cargas de oleaje y corrientes son menores al haber una pequeña superficie de contacto, por tratarse de perfiles tubulares.

Los patrones más típicos del entramado de barras vienen detallados en la siguiente imagen.

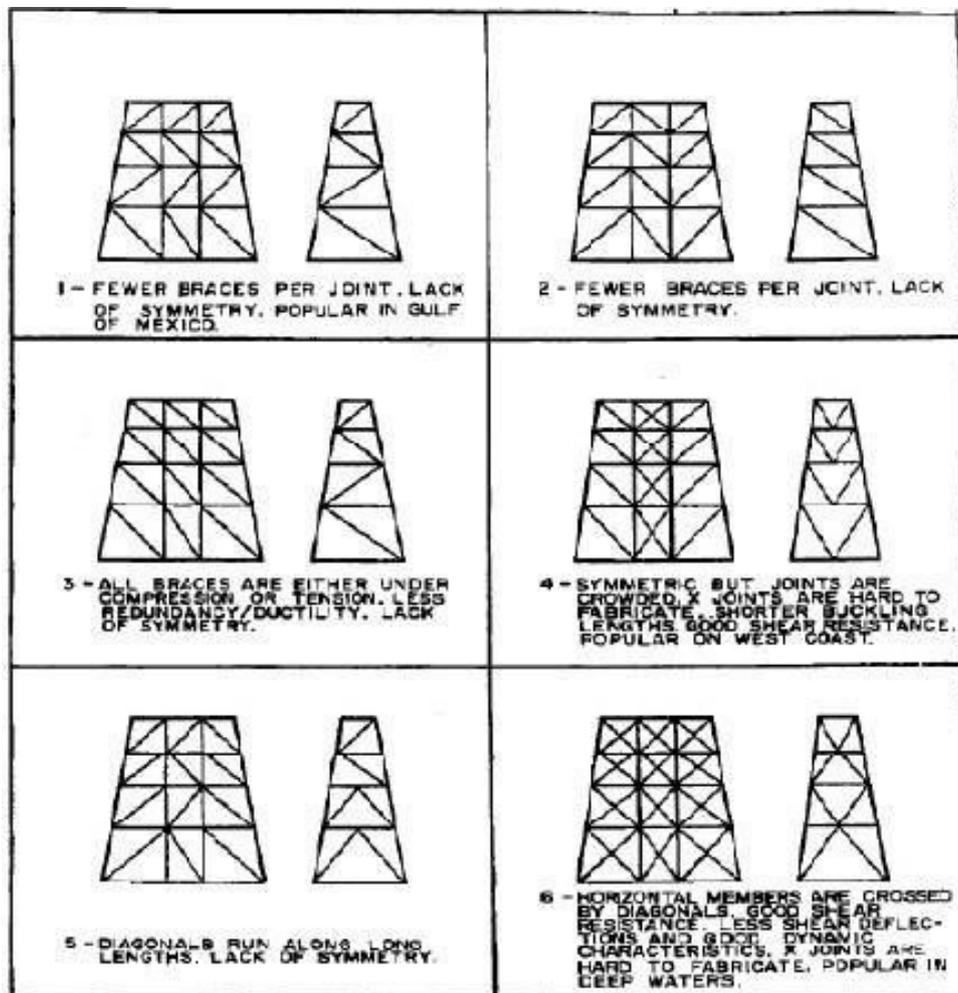


Figura 6-2. Patrones típicos del entramado de barras

El tipo 1 es el denominado patrón K, el cual presenta pocas barras conectándose en las uniones, algo que reduce costes de soldadura y montaje. Este tipo de configuración suele ser utilizado en lugares donde la solidez no sea importante y donde no se produzcan acciones sísmicas.

Los tipos 2 y 5 corresponden al patrón en V, que presentan pocas barras conectadas en las uniones y carecen de redundancia y simetría. Este patrón no suele utilizarse y, además, no es recomendado.

El tipo 3 hace referencia al patrón N, con características similares a los anteriores, tampoco es recomendado.

El tipo 4 es una mezcla de patrones V y X. Este tipo de configuración presenta simetría y redundancia y mejor ductilidad, la desventaja es el gran número de soldaduras a realizar en las uniones.

El tipo 6 es el patrón en X, un patrón con total simetría y redundancia. Es una configuración que presenta la mayor ductilidad y resiste mejor las acciones sísmicas.

Para este proyecto, se ha empleado el patrón en X, esperando la mejor respuesta de la estructura ante las cargas ambientales y del aerogenerador instalado, impidiendo una deformación excesiva para el correcto funcionamiento del generador.

Uno de los principales factores negativos que influyen en la resistencia estructural es la corrosión. Es por ello que se han de utilizar materiales y sistemas de protección contra este agente.

Este tipo de solución para la eólica offshore, solo es viable para profundidades bajas, no superior a 100 metros. Esto se debe a que, para la producción de energía eólica, es necesario instalar varios aerogeneradores. Mientras tanto, en la industria del petróleo y gas, es viable optar por este tipo de solución, ya que únicamente se instala una plataforma de perforación.

Existe una gran variedad de estructuras de este tipo, y es que, cada Jacket, se está diseñada para resistir esfuerzos que vienen determinados por la ubicación escogida para la instalación del mismo.

Otro de los puntos importantes de este tipo de estructura, es su sistema de anclaje, que es el encargado de inmovilizar y aguantar toda la estructura al lecho marino. Estos tipos de sistemas, están directamente relacionados con el tipo de lecho que se encuentra en el lugar de la ubicación. Dentro de estos tipos de anclajes se encuentran:

- Pre-apilado: este método consiste en insertar en el lecho marino tantos pilotes como columnas tenga la estructura de apoyo, antes de que ésta sea instalada. Para este caso, las columnas de la Jacket tendrán un diseño determinado para el correcto encaje entre el pilote y la columna. Una vez instalada sobre los pilotes, se tienen que unir perfectamente ambos elementos mediante cemento o soldadura.

- Post-apilado: en este caso, los pilotes se instalan después de colocar la estructura en el lecho marino. En la parte inferior de las columnas de la Jacket, se encuentran soldadas una serie de piezas guía para introducir los pilotes en el lecho marino.
- Sistema de succión: estos sistemas no son muy frecuentes. Su funcionamiento se basa en la succión del material del lecho marino para enterrar los pilotes.

6.2. *Datos de partida de los elementos de la plataforma offshore*

El aerogenerador utilizado para la generación eólica offshore ha sido el ENERCON E141-EP4 [11]. Se trata de un aerogenerador de eje horizontal, con una potencia de 4,2MW.

En el ANEXO 1 se muestran sus especificaciones técnicas, pero no aparece ningún dato sobre el peso del mismo. Es por ello que se han adoptado unos valores de peso significativos obtenidos de modelos similares al utilizado. El peso total considerado es de 570 toneladas.

En lo referente a las medidas de la máquina, el diámetro del rotor (de pala a pala) es de unos 141m, y la altura del eje de rotación del rotor se encuentra entre 129 - 158m. En cuanto a las dimensiones de la torre, se han analizado diversos modelos diferentes de aerogeneradores para obtener unas medidas significativas.

El régimen nominal de funcionamiento del aerogenerador se sitúa para una velocidad de viento de unos 15m/s, por el contrario, la velocidad de parada por seguridad se sitúa entre los valores 28 - 34m/s.



Figura 6-3. Aerogenerador ENERCON E141-EP4 real instalado onshore

6.3. Condiciones climatológicas y de emplazamiento

Las condiciones climatológicas y de emplazamiento son aspectos importantes a la hora de diseñar la plataforma, ya que los esfuerzos a soportar serán diferentes dependiendo del lugar. La altura al lecho marino es otro de los factores importantes relacionado con el emplazamiento de la plataforma, que está directamente relacionado con el coste de la instalación.

6.3.1. Orografía del fondo marino

El lugar elegido ($50^{\circ} 19' 42.19''$ N $1^{\circ} 57' 40''$ O), se sitúa en el Canal de la Mancha, cerca de la costa de Reino Unido. Esta posición se aleja de la posición inicial antes indicada, de la plataforma central con procesos de bunkering, puesto que, para esta nueva posición es más viable su fabricación e instalación.



Figura 6-4. Ubicación de la estructura Jacket

El lugar ha sido principalmente escogido por su alto tránsito de buques cargueros, ya que el objeto principal de la plataforma es realizar operaciones de bunkering. Así mismo, en dicho lugar la altura al lecho marino es de unos 50m, lo suficiente para emplear una estructura fija tipo Jacket y no ser demasiado costosa. Los datos de profundidad han sido obtenidos de la página EMODnet (European Marine Observation and Data network) [12].



Figura 6-5. Detalle mapa de recorrido de buques cargueros [13]

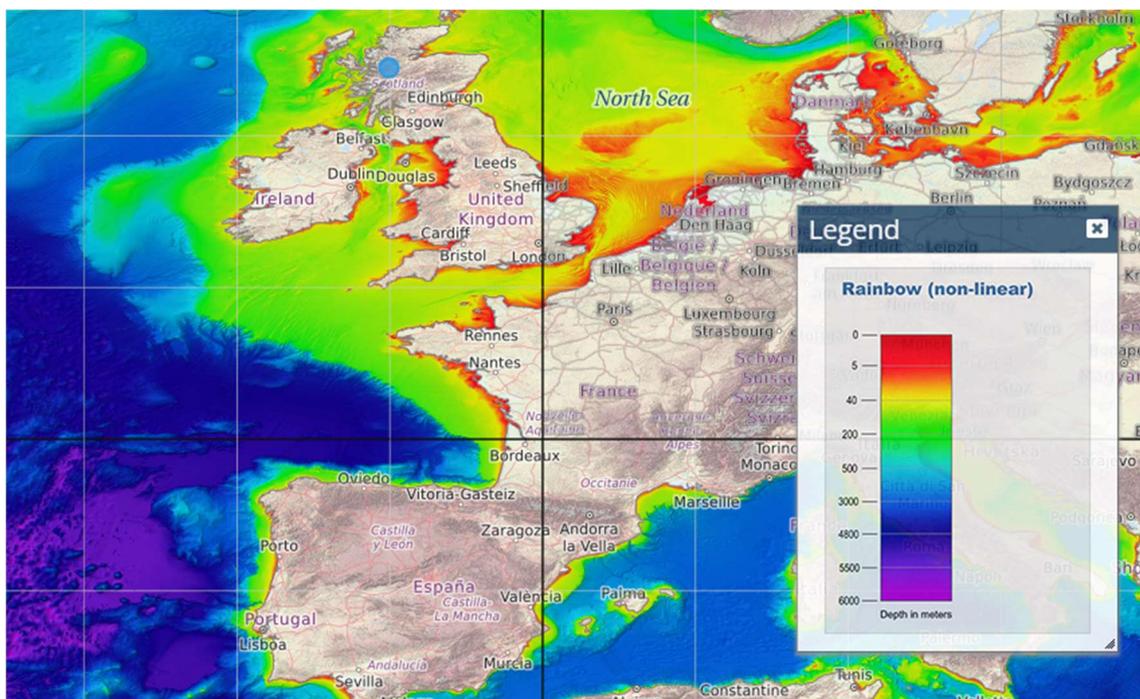


Figura 6-6. Profundidad lecho marino Canal de la Mancha

Se ha comprobado que, en las zonas cercanas al lugar de emplazamiento, la orografía del fondo marino es lo suficientemente plana para no aumentar los costes de instalación y de cimentación de la plataforma [12].

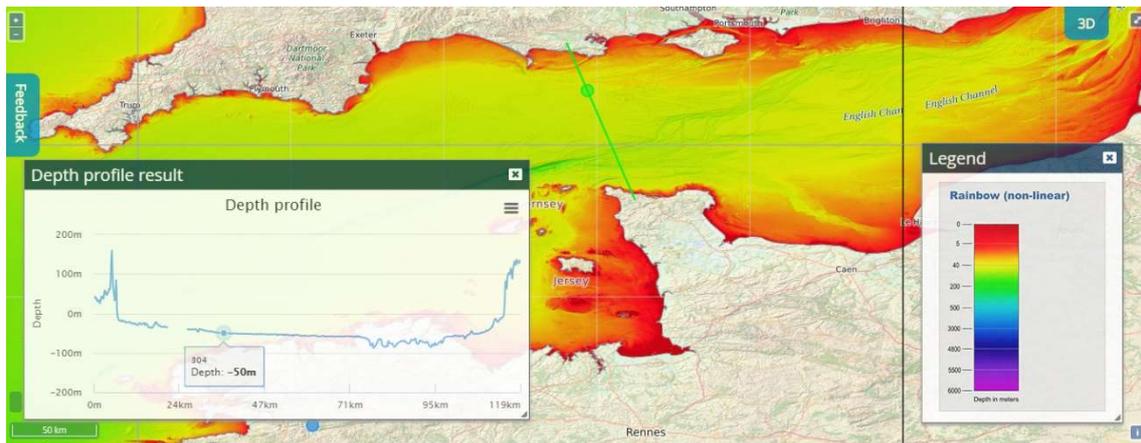


Figura 6-7. Detalle del perfil del lecho marino (Batimetría)

En lo referente a las propiedades del emplazamiento, tensión admisible en el terreno, cohesión, etc., no se han encontrado unos datos relevantes, por lo que este apartado queda fuera del alcance del proyecto.

6.3.2. Velocidad y dirección de viento

Para obtener datos válidos de velocidades del viento en el lugar indicado, se ha hecho uso de la página de Puertos del estado [14]. En dicha página, se han consultado los datos reales e históricos de las velocidades de viento en una boya cercana al emplazamiento real de la plataforma.

La norma BS-EN-61400-1 considera usar ciertos valores de vientos para el análisis de la estructura. Dichos valores corresponden con la velocidad de arranque del aerogenerador, la velocidad nominal a la cual funciona con regularidad, la velocidad de parada en caso de altas velocidades de viento, y la velocidad extrema histórica (que corresponde con condiciones accidentales).

La norma BS-EN-61400-1 recomienda usar valores máximos de velocidades de viento históricos, como mínimo de 50 años, como valor para el viento extremo en los cálculos.

Respecto a las velocidades nominales y de parada del aerogenerador, se obtienen de la hoja de especificaciones técnicas del propio aerogenerador, ver ANEXO 1.



Tabla 6-1. Tabla de velocidades máximas de viento

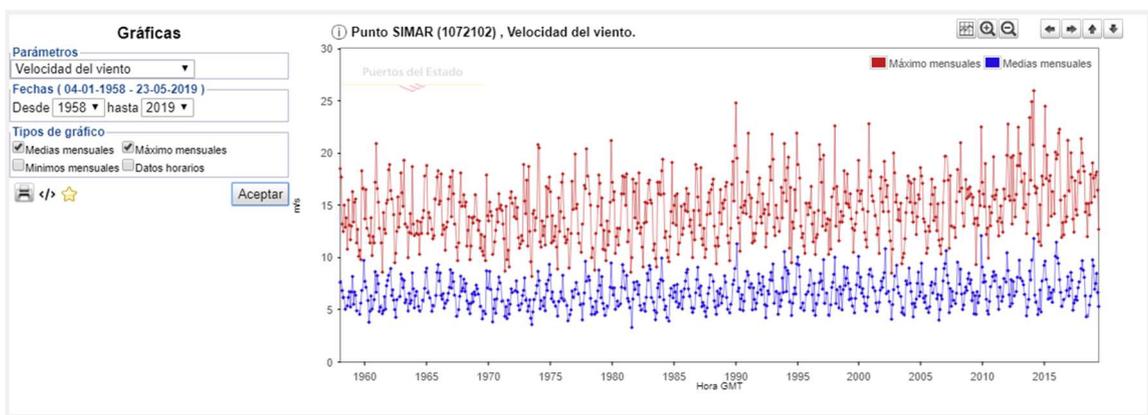


Figura 6-8. Gráfica de velocidades medias y máximas de viento

Por lo tanto, los valores de viento utilizados para los cálculos son:

- Viento nominal: 15m/s
- Viento de parada: 30m/s
- Viento histórico y/o extremo: 26m/s

6.3.3. Velocidad y dirección de las corrientes marinas

De igual manera, se ha consultado en la página de Puertos del estado [14] para obtener los valores de corriente del emplazamiento. Por lo tanto, el valor de corriente en la boya más cercano al lugar de emplazamiento ha dado un valor de 0,5m/s.

6.3.4. Características del oleaje

Análogamente, se pueden obtener los valores de altura significativa de ola y período de recurrencia para el análisis del oleaje en la misma página de Puertos del estado.

El estudio del oleaje queda fuera del alcance de este proyecto, aun así, los valores obtenidos han sido:



Tabla 6-2. Tabla de alturas significativas de ola, y período de recurrencia

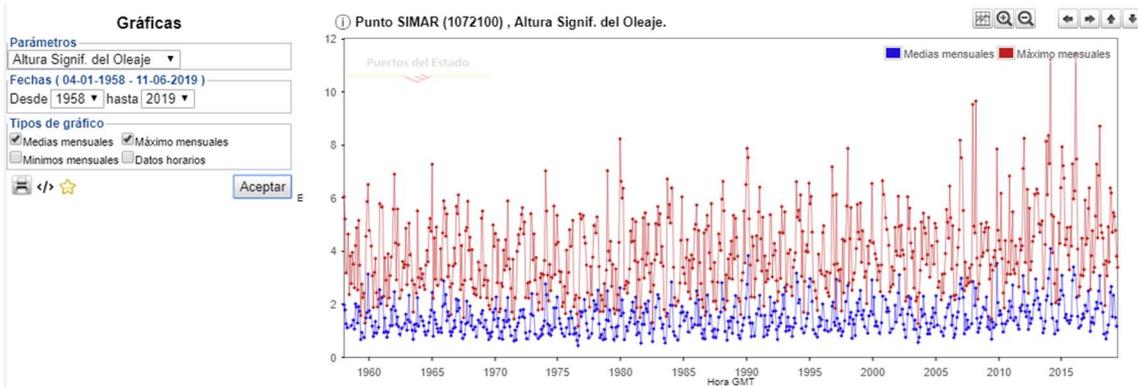


Figura 6-9. Gráfica de valores medios y máximos de altura significativa de ola

6.4. Estados límite

Para el análisis de la estructura, la norma DNVGL-ST-0126 Support structures for wind turbines considera realizar los siguientes estados límite:

- Estado límite último (ULS)
- Estado límite a fatiga (FLS)
- Estado límite accidental (ALS)
- Estado límite de servicio (SLS)

Para determinar los estados límite últimos (ULS) pone a disposición los siguientes ejemplos:

- Pérdida de resistencia estructural (por exceso de fluencia en ciertos puntos y exceso de pandeo)
- Fallo de componentes por rotura frágil
- Pérdida de equilibrio de la estructura, o parte de ella, considerada como un cuerpo rígido
- Fallo de componentes críticos de la estructura ocasionado por un exceso de resistencia última o una deformación excesiva de los elementos
- Transformación de la estructura en un mecanismo

Respecto al análisis de estado límite a fatiga (FLS):

- Daño acumulativo causado por la repetida acción de las cargas

En lo referente al estado límite de las cargas accidentales (ALS):

- Daño estructural causado por las cargas accidentales
- Resistencia última o daños estructurales
- Pérdida de la integridad estructural después de un daño local

Por último, para los análisis de estados límite de servicio (SLS):

- Deflexiones que alteren el efecto de las cargas actuantes
- Vibraciones excesivas que produzcan desconformidad o que afecten a los elementos no estructurales
- Vibraciones excesivas que afecten a la turbina y a la generación eólica
- Deformaciones o movimientos que excedan las limitaciones de los equipos
- Durabilidad
- Asentamientos diferenciales o de los cimientos que causen una inclinación intolerable de la turbina eólica
- Deformaciones inducidas por la temperatura

Conociendo estos casos, los estados a analizar para este proyecto son los siguientes:

- Rotura o pérdida de resistencia estructural por exceso de fluencia en ciertos puntos o pandeo (ULS)
- Pérdida de equilibrio de la estructura como cuerpo rígido (ULS)
- Deformaciones que alteren las limitaciones de los equipos (SLS)

6.5. Combinaciones de cargas

Para la realización de un estudio detallado del comportamiento de la estructura, DNV-GL exige que se realicen unas combinaciones de cargas para simular posibles casos que puedan generarse a lo largo de la vida útil de la estructura. Los coeficientes de seguridad recomendados se encuentran detallados en la Norma DNVGL-ST-0437 Loads and site conditions for wind turbines, Tabla 4.2.

Table 4-2 Partial safety factors for loads γ_f

Functional and environmental loads					Permanent loads*		
ULS		FLS	ALS	SLS	ULS		FLS, ALS, SLS
Normal	Abnormal				Favourable	Unfavourable	
N 1,35***	A 1,1	F 1,0	F 1,0	F 1,0	0,9**	1,1**	1,0

* Permanent loads include dead loads and pretension loads for the support structure design.
 For submerged sub-structures, for example a GBS placed on the seabed, the Permanent load is the total weight minus the buoyancy determined at the still water level
 ** Factors for permanent loads in ULS may be taken as 1,0 if appropriate measures are taken.
 *** For DLC 1.1 the partial load factor shall be $\gamma_f = 1,25$; for DLC 2.5 the partial load factor shall be $\gamma_f = 1,2$
 The following formulation according to IEC 61400-1, Table 3 may be applied:
 If for normal design situations the characteristic value of the load response $F_{gravity}$ due to gravity may be calculated for the design situation in question, and gravity is an unfavourable load, the partial load factor for combined loading from gravity and other sources may have the value

$$\gamma_f = 1,1 + \varphi\zeta^2 \text{ and } \varphi = \begin{cases} 0,15 & \text{for DLC 1.1} \\ 0,25 & \text{otherwise} \end{cases}$$

$$\zeta = \begin{cases} 1 - \left| \frac{F_{gravity}}{F_k} \right| & ; |F_{gravity}| \leq |F_k| \\ 0 & ; |F_{gravity}| > |F_k| \end{cases}$$

where F_k = characteristic value for loads

Tabla 6-3. Tabla 4-2 de la Norma DNVGL-ST-0437 para los coeficientes de seguridad de las combinaciones

Teniendo en cuenta los estados límite a utilizar, y a la tabla 4-2 de la norma DNVGL-ST-0437, las combinaciones de carga con sus coeficientes de seguridad que se van a aplicar en este proyecto son:

- Rotura (ULS)

$$1.1PP + 1.1PA + 1.35Vp + 1.35C$$

- Estabilidad (ULS)

$$0.9PP + 1.1PA + 1.35Vp + 1.35C$$

- Deformaciones (SLS)

$$1PP + 1PA + 1Vn + 1C$$

Siendo,

- PP: Peso propio de las barras de la estructura
- PA: Peso del aerogenerador
- Vp: Fuerza por el viento de parada del aerogenerador
- Vn: Fuerza del viento nominal
- C: Fuerza por la corriente marina

Se ha tenido en cuenta que, en la situación accidental, el valor de viento extremo es menor que el viento de parada del aerogenerador, y sabiendo que el coeficiente de seguridad del caso accidental es menor que para el caso de estado límite último, no se ha analizado ningún caso accidental.

También, para el estado límite de servicio, se ha analizado la estructura con la velocidad media del viento.

7. ANÁLISIS DE SOLUCIONES

7.1. Alternativas en el sistema de anclaje de la plataforma offshore

7.1.1. Estructuras fijas

Este tipo de estructuras se caracterizan por estar fijadas al fondo marino mediante incrustación o por gravedad. Son estructuras que se utilizan en pequeñas profundidades, no más de 300 metros. Se comportan como un cuerpo rígido y deben ser capaces de resistir todas las fuerzas dinámicas del ambiente.

Son las más utilizadas y las primeras que fueron construidas. Sin embargo, la limitación de este tipo de soportes es la profundidad a la que se instalan. Una alta profundidad hace que la inestabilidad aumente, siendo necesario aumentar las dimensiones para que pueda resistir; lo que provoca un gran coste innecesario en aguas profundas.

7.1.1.1. Plataformas de Gravedad

Estas estructuras carecen de sistema adicional de anclaje, ya que se unen al lecho marino mediante su propio peso. Generalmente se construyen de hormigón reforzado con acero.

Una de sus grandes ventajas es que sus costos de transporte e instalación no son muy elevados, en condiciones normales.

El inconveniente de este tipo de estructuras es la escasa viabilidad en aguas profundas, ya que el peso del conjunto se eleva exponencialmente con la profundidad, y su transporte y colocación se complican.

Estas estructuras no suelen utilizarse para profundidades superiores a los 300 metros.



Figura 7-1. Plataforma fija por gravedad

7.1.1.2. Plataformas Auto elevables o Jack-UPS

Son plataformas móviles que a la hora de operar se fijan en el lecho marino a través de unas patas que se extienden desde la propia plataforma. Una vez que ha extendido las patas, la plataforma se eleva por encima del nivel del mar y puede empezar a operar.

El principal ámbito de uso de este tipo de plataformas reside en la industria del petróleo, pudiendo realizar perforaciones de pozos exploratorios.

Son estructuras utilizadas en alturas en torno a los 130 metros. Son plataformas autónomas que pueden desplazarse y operar en fondos blandos, aunque entre sus desventajas se encuentra la posibilidad de haber un fallo en el sistema de elevación, así como la dificultad de ser remolcada.



Figura 7-2. Plataforma auto elevable

7.1.1.3. Plataformas JACKET

La característica principal de este tipo de plataformas es la estructura de revestimiento formada por tubos de acero. La estructura enrejada se fija al lecho marino mediante una serie de pilotes clavados en el fondo. Suelen dividirse por niveles, los cuales aumentan la estabilidad de la estructura frente a las fuerzas ocasionadas por las olas.

Una de las grandes ventajas que posee es que se puede construir en tierra y remolcarla al mar. Normalmente, se construyen en zonas cercanas a la costa, lo que facilita el transporte.

Este tipo de estructuras se suelen usar en alturas de mar no superiores a 100 metros para las plataformas de perforación, y de unos 50 metros para plataformas eólicas marinas.



Figura 7-3. Estructura fija tipo Jacket

7.1.1.4. Plataformas Flexibles o Compliant

Son plataformas similares a las plataformas Jacket, por estar construidas por tubos de acero con revestimiento y estructura trenzada. La principal diferencia respecto las Jackets es la capacidad de ceder ante las fuerzas ambientales.

Este tipo de estructuras están formadas por una torre angosta y flexible, permitiéndole soportar fuerzas laterales a través de oscilaciones. Gracias a esto, se logra una mayor estabilidad en fondos superiores a 400 metros, donde las Jackets necesitarían una sobredimensión innecesaria, pudiendo comprometer su seguridad frente a condiciones extremas.

Por lo tanto, este tipo de estructuras serán las únicas estructuras fijas que sería viable construir en aguas profundas.

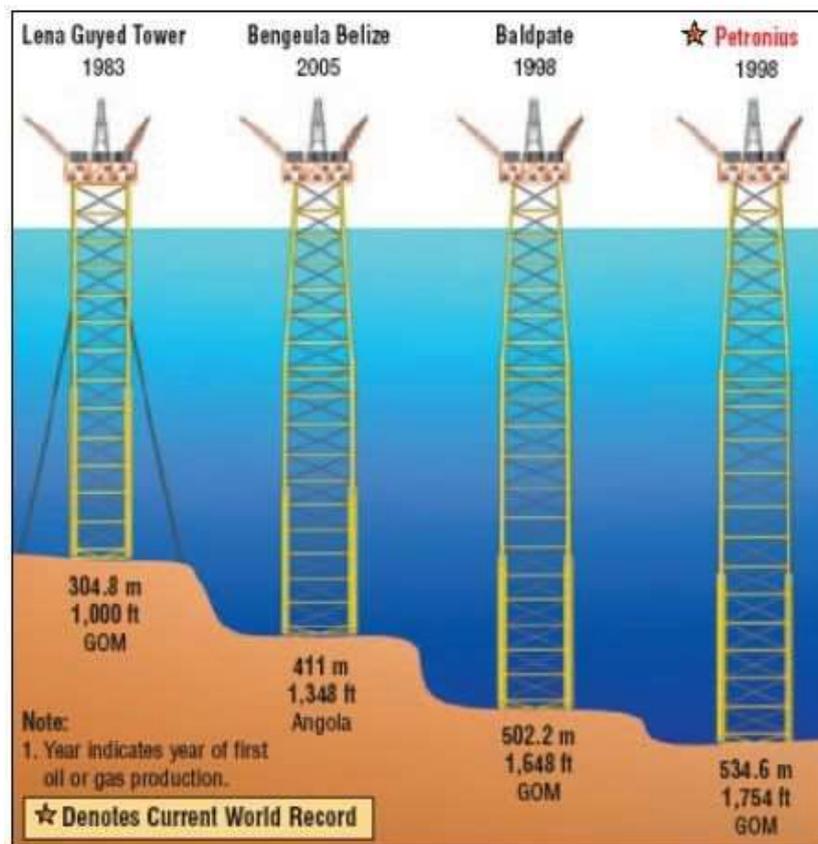


Figura 7-4. Plataformas flexibles o compliant

7.1.1.5. Monopilote

Este tipo de solución consta básicamente de un cilindro hueco apoyado en el fondo del mar. Sobre él va montada la pieza de transición y el aerogenerador.

Su simple estructura la hace muy versátil, aunque solo se utilizan en aguas muy poco profundas, de unos 20 o 30 metros máximo.



Figura 7-5. Monopilote

7.1.2. Estructuras flotantes

Con el tiempo, surgió la necesidad de construir plataformas en aguas superiores a 1000 metros, es por ello que nacieron las plataformas flotantes.

Este tipo de plataformas son más complejas que las fijas a la hora de diseñar, debido a la libertad de movimientos que el sistema flotante permite y a la interacción dinámica entre la plataforma y los sistemas de amarre.

La principal ventaja de este tipo de plataformas es la posibilidad de instalarlas en aguas profundas. Debido a su naturaleza, la facilidad del transporte las hace muy versátiles, además existe la posibilidad de reutilizarlas para su uso en otros lugares.

7.1.2.1. Plataformas Semi sumergibles

Estas estructuras están formadas por columnas, pontones y la cubierta, que soporta los principales equipos de perforación o producción.

Los flotadores son los encargados de generar el empuje necesario para mantener la flotabilidad de la instalación.

Las columnas contribuyen a la estabilidad de la plataforma evitando que esta vire.

Este tipo de plataformas pueden operar en profundidades entre los 60 y 3000 metros.



Figura 7-6. Plataforma semi sumergible

7.1.2.2. Plataformas de patas tensoras o TLP

Estas plataformas obtienen sus siglas del inglés Tension Leg Platform. Son similares a las plataformas semi sumergibles, pero estas están fondeadas mediante un sistema de tubos o cables de acero, denominados tendones, que son tensados mediante unos cilindros hidráulicos alojados en las columnas de la plataforma.

Básicamente, consisten en soportes flotantes anclados verticalmente, gracias a la flotabilidad de la plataforma, los elementos de anclaje se mantienen en tensión.

Una de las grandes ventajas es que los cables poseen una alta resistencia en su dirección axial, por lo que impide a la plataforma que se mueva en dirección vertical.

Su principal desventaja es la escasa capacidad de carga que puede llegar a soportar, ya que la tensión de los tirantes reduce la posibilidad de soportar grandes cargas.

Se pueden usar en profundidades entre 300 y 1500 metros.

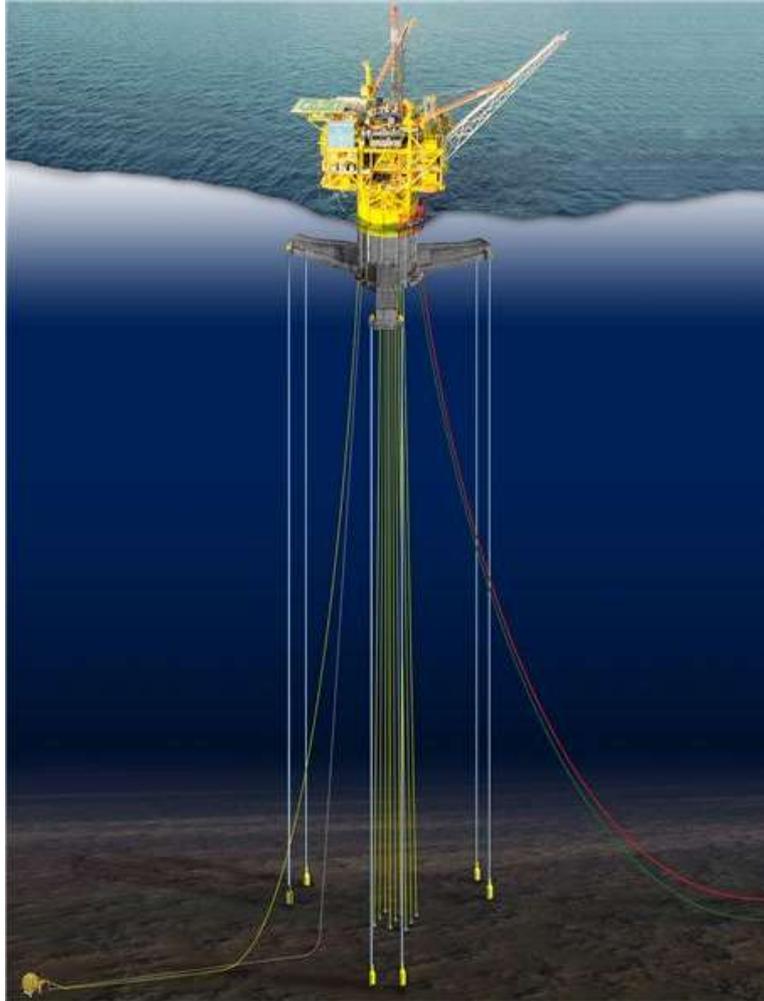


Figura 7-7. Plataforma TLP

7.1.2.3. Plataformas SPAR

Las plataformas SPAR son estructuras tubulares de gran diámetro y de entre 100-200 metros de longitud, que se fijan al lecho marino mediante catenarias o amarres tensionados.

La principal característica de este tipo de plataformas es su forma cilíndrica con lastre en la parte inferior, la cual le permite poseer una gran estabilidad respecto a los demás tipos de plataformas.

Debido al tamaño del calado de la plataforma, la fuerza del viento, de la corriente y de las olas, no consiguen desplazar significativamente el centro de rotación, posibilitando, de esta forma, una disminución de los efectos del oleaje y movimientos verticales.

El ámbito de aplicación de este tipo de plataformas las sitúa en aguas muy profundas, pudiendo llegar hasta más de 3000 metros.



Figura 7-8. Plataforma SPAR

7.2. Criterios de selección

7.2.1. Profundidad

La profundidad del lecho marino es un aspecto a considerar para la elección del tipo de plataforma, flotante o fija.

En general, a bajas profundidades, son las plataformas fijas las que reúnen las características necesarias para su selección, mientras que, en aguas más profundas, son las flotantes. Se ha de tener en cuenta que el rango de optimización económica sea el más adecuado.

En el caso estudiado, la profundidad a superar son 50 metros, por lo que una estructura fija es la más adecuada.

7.2.2. Estabilidad

Para la sustentación de los aerogeneradores offshore, la estabilidad es uno de los aspectos más importantes a considerar, ya que está directamente relacionado con el correcto funcionamiento del aerogenerador.

La estructura ha de ser lo suficientemente rígida para soportar los esfuerzos producidos por las cargas ambientales y evitar cierta deformación que impida el correcto funcionamiento del aerogenerador.

El rotor y las palas del aerogenerador han de estar perpendicularmente dispuestas respecto a la dirección de la corriente de viento, para maximizar el rendimiento de generación, y evitar sobreesfuerzos producidos por las turbulencias del viento.

7.2.3. Capacidad de carga

La capacidad de carga es un aspecto considerable dentro de los criterios de selección y de diseño, ya que la producción y el almacenamiento del hidrógeno conlleva un aumento de carga en la cubierta de la plataforma.

Dentro del alcance de este proyecto, este apartado no es muy importante, pues solamente se ha de diseñar con el objeto de soportar el peso del aerogenerador. De tratarse del diseño de una plataforma de producción o de perforación, este aspecto sería de gran interés analizarlo.

7.2.4. Movilidad

Dependiendo de la función principal que ha de tener la plataforma, la movilidad puede ser un aspecto a considerar. Por ejemplo, en plataformas de perforación, en función de los pozos que tendría que perforar, la movilidad es uno de los aspectos más importantes.

En el caso de estudio, la movilidad no influye en el tipo de plataforma a escoger, ya que, una vez instalado el aerogenerador offshore, se quedará en el emplazamiento escogido.

7.2.5. Resumen de los criterios de selección y alternativas

	Profundidad	Estabilidad	Capacidad de carga	Movilidad
De Gravedad	300m	Robustas	Bastante	Nada
Auto-elevables o Jack-Ups	130m	Estables	No mucho, por su mecanismo	Móviles
Jacket	100m	Estables y robustas	Bastante	Nada
Flexibles o Compliant	400m	Estables a gran profundidad	Normal	Nada
Monopilote	20-30m	Estables	Normal	Nada
Semi-sumergibles	60-3000m	Estable movimiento vertical	Bastante	Móviles
Patas tensoras o TLP	300-1500m	Estable movimiento vertical	Poca, por los cables tensores	Móviles
SPAR	3000m	Muy estables	Normal	Móviles

Tabla 7-1. Resumen de los criterios de selección de cada tipo de plataforma

7.3. Selección de la alternativa en función de los criterios

Para la elección de la alternativa más adecuada en función de los criterios de selección, se hace uso de una media ponderada de los mismos aplicados a cada alternativa.

Los criterios de selección se evaluarán del 1 al 4 en función de su importancia según los requisitos que se dan en el lugar de emplazamiento y las características del aerogenerador, y el valor de cada uno de ellos que se aplica a cada alternativa se realiza teniendo en cuenta las evaluaciones realizadas en la Tabla 7-1, asignando un valor de 1 a 10 en función de sus características.

Así la alternativa que mayor puntuación logre será de 100 puntos, en caso de que cumpla a la perfección cada uno de los criterios establecidos.

$$Puntuación = (4 \cdot 10 + 3 \cdot 10 + 2 \cdot 10 + 1 \cdot 10) = 100$$

	Profundidad	Estabilidad	Capacidad de carga	Movilidad	Media
Importancia	4	3	2	1	100
De Gravedad	6 6x4=24	7 7x3=21	7 7x2=14	0 0x1=0	$\Sigma=59$
Auto-elevables o Jack-Ups	5 5x4=20	6 6x3=18	4 4x2=8	6 6x1=6	$\Sigma=52$
Jacket	7 7x4=28	7 7x3=21	8 8x2=16	0 0x1=0	$\Sigma=65$
Flexibles o Compliant	4 4x4=16	7 7x3=21	5 5x2=10	0 0x1=0	$\Sigma=47$
Monopilote	4 4x4=16	6 6x3=18	5 5x2=10	0 0x1=0	$\Sigma=44$
Semi-sumergibles	3 3x4=12	5 5x3=15	7 7x2=14	6 6x1=6	$\Sigma=47$
Patas tensoras o TLP	3 3x4=12	5 5x3=15	4 4x2=8	6 6x1=6	$\Sigma=41$
SPAR	1 1x4=4	8 8x3=24	5 5x2=10	6 6x1=6	$\Sigma=44$

Tabla 7-2. Evaluación de las alternativas en función de los criterios de selección

La alternativa que tiene como resultado una mayor puntuación es la plataforma fija tipo Jacket con 65 puntos.

Observando la Tabla 7-2. las plataformas flotantes han obtenido menor puntuación que las fijas. Esto se debe a que se ha valorado el aspecto económico, y al tratarse de una profundidad de unos 50 metros, es inviable la instalación de plataformas flotantes.

En cuanto a la movilidad, las plataformas soporte de aerogeneradores no tienen por qué tener ninguna movilidad, por ello, se ha valorado muy poco la posibilidad de realizar desplazamientos una vez instaladas.

Para los requerimientos del emplazamiento y la propia finalidad de la estructura, que es la de sostener un aerogenerador, la estructura tipo Jacket es la mejor solución. Este tipo de estructuras encajan a la perfección dentro del rango de profundidad del emplazamiento. Son lo suficientemente estables para no interferir en el correcto funcionamiento del aerogenerador, y resisten perfectamente el peso propio del aerogenerador, así como sus cargas derivadas por el viento.

8. RESULTADOS FINALES

Conociendo lo que se ha comentado en el apartado 6.5. (combinaciones de cargas) del presente documento, se han analizado tres casos de carga, uno de rotura (ULS), otro de estabilidad (ULS), y otro de deflexión (SLS).

- Rotura (ULS)

$$1.1PP + 1.1PA + 1.35Vp + 1.35C$$

- Estabilidad (ULS)

$$0.9PP + 1.1PA + 1.35Vp + 1.35C$$

- Deformaciones (SLS)

$$1PP + 1PA + 1Vn + 1C$$

8.1. Solución adoptada

Para la resolución del modelo, se ha dividido la forma de calcularlo en dos apartados: el análisis del aerogenerador con las diferentes velocidades de viento, y el análisis de la estructura. El motivo por el cual se ha separado el modelo es el gran número de elementos finitos que comprenden el conjunto, aumentando la dificultad de cálculo y con ello, el tiempo.

Es por ello que se ha creado un modelo 3D en CAD del aerogenerador. Para su modelado, se ha descargado de GrabCad [15] un modelo de una pala de aerogenerador. Se ha construido el rotor, la góndola y la torre de acuerdo a la hoja de especificaciones del aerogenerador (ANEXO 1), aplicándole unas dimensiones razonables para el tipo de aerogenerador elegido.

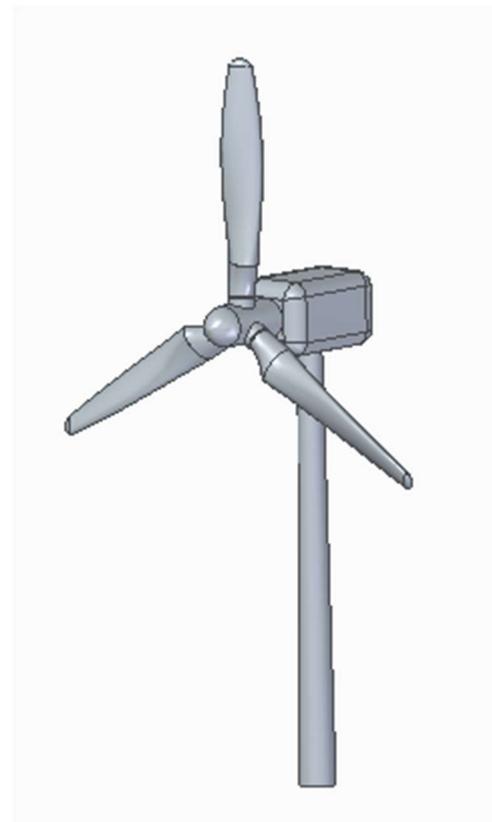


Figura 8-1. Diseño en 3D del aerogenerador en Solid Edge

El modelo creado es importado al programa de cálculo (COMSOL Multiphysics), al cual se le añaden sus condiciones de contorno y cargas.

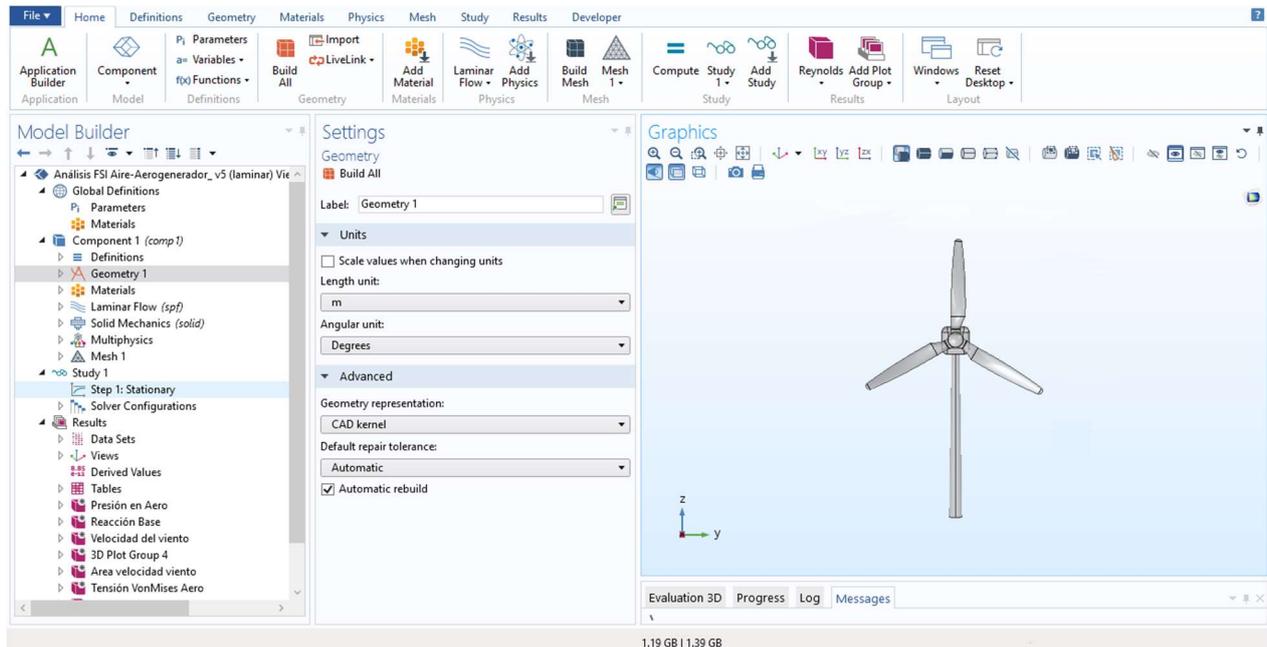


Figura 8-2. Entorno de trabajo en COMSOL

Es imprescindible la creación de un buen mallado, pues éste influye directamente en la calidad de los resultados y el tiempo empleado en el cálculo.

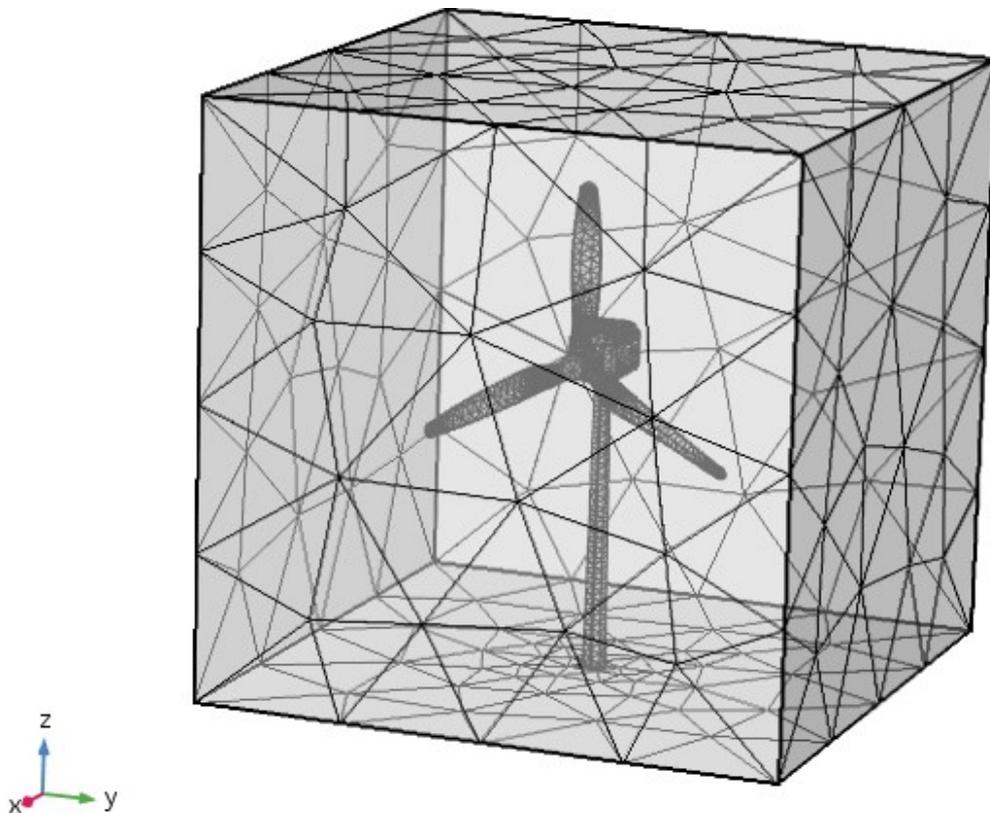


Figura 8-3. Mallado del aerogenerador y el cubo de aire



Figura 8-4. Mallado del aerogenerador

Después, es hora de configurar los "solvers" por los cuales el programa realiza sus comprobaciones.

Una vez compilado el programa, se obtienen los resultados del análisis en el post-procesado, siendo estos resultados, las reacciones y los momentos en la base del aerogenerador.

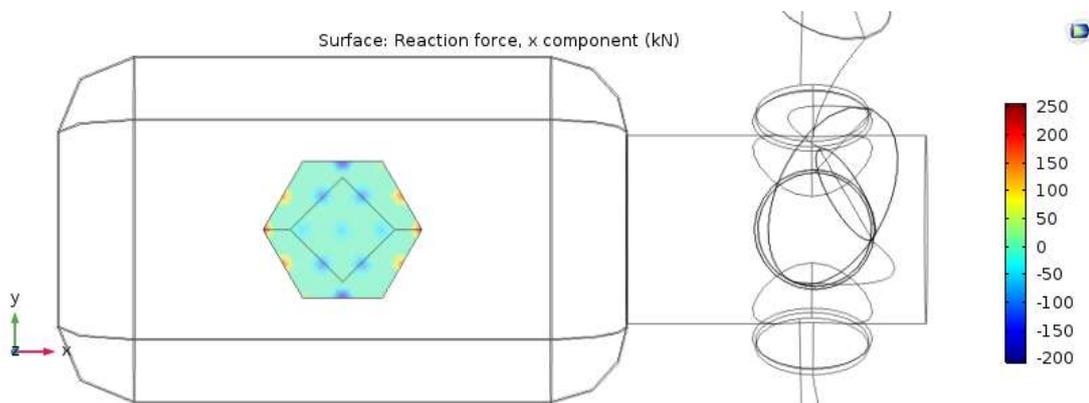


Figura 8-5. Reacciones en la base para velocidad nominal del viento

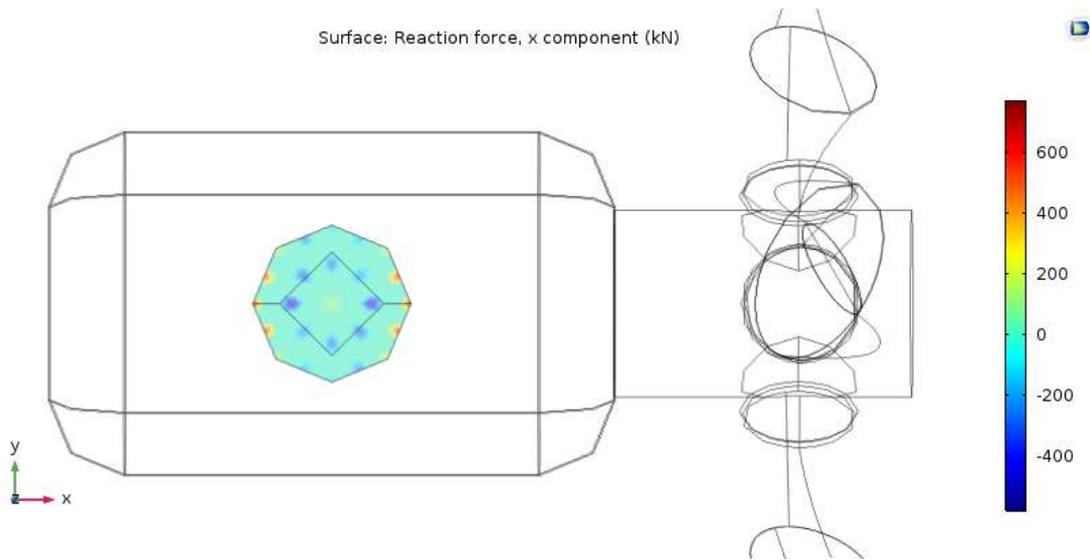


Figura 8-6. Reacciones en la base para velocidad de parada del aerogenerador

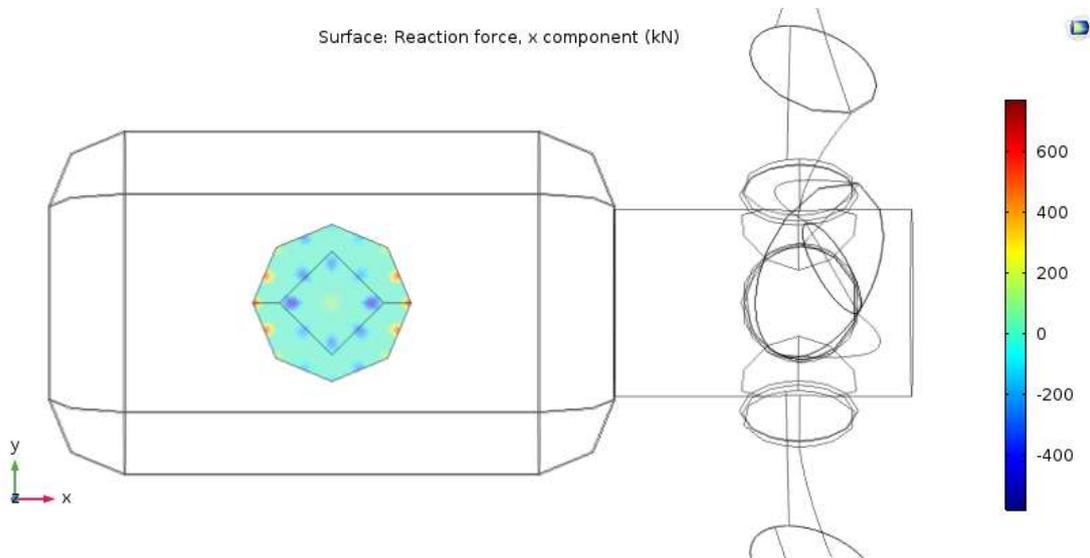


Figura 8-7. Reacciones en la base para velocidad extrema del viento

	Reacción en x [kN]	Momento en y [kN/m]
Velocidad nominal	301,380	26.506,167
Velocidad de parada	818,888	78.724,779
Velocidad extrema	615,121	59.136,486

Tabla 8-1. Reacciones en la base del aerogenerador (Número escalar)

Para la realización del modelo de la estructura, se ha optado por hacerlo directamente en COMSOL, de esta manera es posible la parametrización del modelo y con ello, una optimización a la hora de realizar cambios en la configuración de la estructura.

En la siguiente tabla se muestran los valores que han sido parametrizados en el modelo de la estructura.

Nombre	Descripción
Dpe	Diámetro exterior de los tubos principales
ep	Espesor de los tubos principales
Dhe	Diámetro exterior de los tubos horizontales
eh	Espesor de los tubos horizontales
Dde	Diámetro exterior de los tubos diagonales
ed	Espesor de los tubos diagonales
Dhre	Diámetro exterior de los tubos horizontales en la cabeza de la estructura
ehr	Espesor de los tubos horizontales en la cabeza de la estructura
Ddre	Diámetro exterior de las diagonales de atado en la cabeza de la estructura
edr	Espesor de los tubos diagonales de atado en la cabeza de la estructura
Drpe	Diagonal exterior de los tubos en la pieza de transición
epr	Espesor de los tubos diagonales de la pieza de transición
Debpt	Diámetro exterior de los tubos diagonales bajo pieza de transición
edbpt	Espesor de los tubos diagonales bajo la pieza de transición
er	Espesor de los rigidizadores internos
H	Altura de la estructura, hasta la pieza de transición
Hh1	Altura de los tubos horizontales inferiores
Hh2	Altura de los tubos horizontales medios
Hh3	Altura de los tubos horizontales superiores
B1	Anchura base inferior
B2	Anchura base superior
Dae	Diámetro exterior de la base del aerogenerador

Tabla 8-2. Tabla con los valores parametrizados

8.1.1. Diseño preliminar del sistema de anclaje

El diseño inicial de la estructura parte de una geometría sencilla, sin ningún tipo de rigidizador fuera de la estructura base. Se entiende por estructura base a la mostrada en la siguiente figura, compuesta por:

- Cuatro (4) tubos principales
- Cuatro (4) tubos horizontales por cada nivel
- Tres (3) niveles
- Ocho (8) tubos diagonales por cada nivel
- Cuatro (4) tubos en la cabeza de la estructura
- Dos (2) diagonales en la cabeza de la estructura
- Cuatro (4) tubos a modo de pieza de transición
- Un (1) tubo modelando la base del aerogenerador

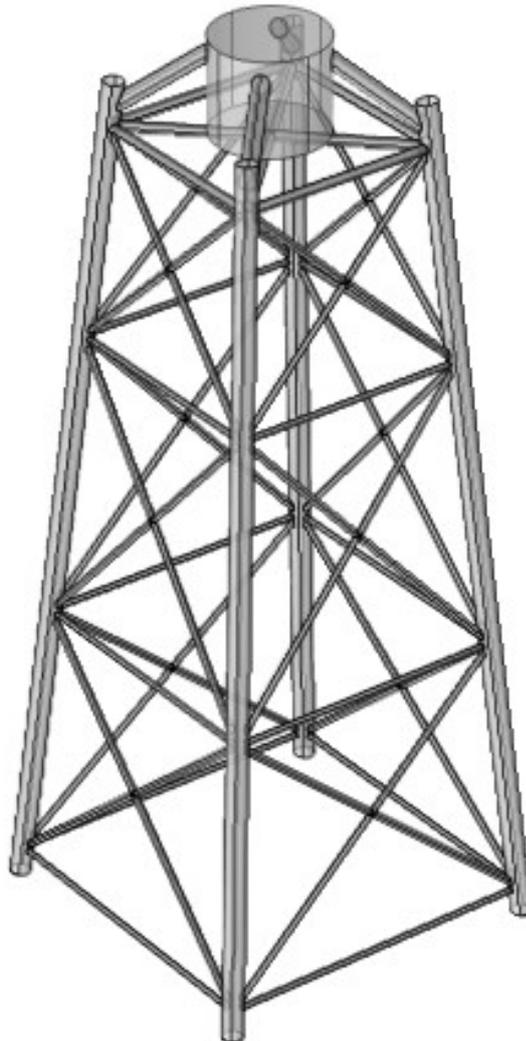


Figura 8-8. Diseño preliminar de la estructura

Las dimensiones de los distintos tubos se indican en la tabla a continuación:

Nombr e	Descripción	Valor [m]
Dpe	Diámetro exterior de los tubos principales	1,5
ep	Espesor de los tubos principales	0,04
Dhe	Diámetro exterior de los tubos horizontales	0,5
eh	Espesor de los tubos horizontales	0,03
Dde	Diámetro exterior de los tubos diagonales	0,5
ed	Espesor de los tubos diagonales	0,03
Dhre	Diámetro exterior de los tubos horizontales en la cabeza de la estructura	0,8
ehr	Espesor de los tubos horizontales en la cabeza de la estructura	0,04
Ddre	Diámetro exterior de las diagonales de atado en la cabeza de la estructura	0,8
edr	Espesor de los tubos diagonales de atado en la cabeza de la estructura	0,04
Drpe	Diagonal exterior de los tubos en la pieza de transición	1,2
epr	Espesor de los tubos diagonales de la pieza de transición	0,04
Debpt	Diámetro exterior de los tubos diagonales bajo pieza de transición	-
edbpt	Espesor de los tubos diagonales bajo la pieza de transición	-
er	Espesor de los rigidizadores internos	-
H	Altura de la estructura, hasta la pieza de transición	60
Hh1	Altura de los tubos horizontales inferiores	2
Hh2	Altura de los tubos horizontales medios	22
Hh3	Altura de los tubos horizontales superiores	44
B1	Anchura base inferior	25
B2	Anchura base superior	15
Dae	Diámetro exterior de la base del aerogenerador	8,2

Tabla 8-3. Valores de los parámetros empleados

8.1.2. Diseño final del sistema de anclaje

La configuración final de la estructura no dista mucho respecto al planteamiento inicial, no se ha variado la geometría básica, es decir, no se ha modificado su altura, ángulo de conicidad de sus tubos principales, ni el número de niveles.

Los que sí que se ha variado ha sido el área de las secciones transversales de los tubos estructurales, aumentándolas.

Por otra parte, ha sido necesaria la adición de algún elemento estructural adicional, como son los rigidizadores internos en los tubos principales, y rigidizadores externos en la cabeza de la estructura. Concretamente se ha añadido:

- Diez (10) rigidizadores internos por cada tubo principal

- Cuatro (4) rigidizadores externos a la cabeza de la estructura

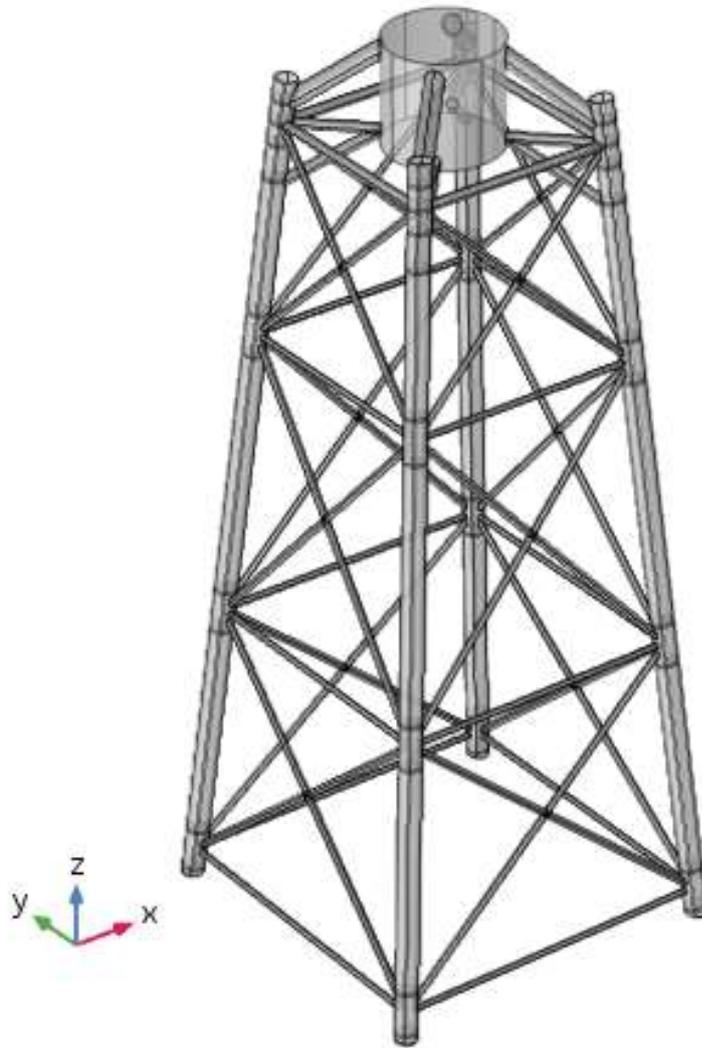


Figura 8-9. Diseño final de la estructura

A continuación, se muestran las dimensiones de los elementos estructurales de la configuración final:

Nombr e	Descripción	Valor [m]
Dpe	Diámetro exterior de los tubos principales	1,6
ep	Espesor de los tubos principales	0,05
Dhe	Diámetro exterior de los tubos horizontales	0,5
eh	Espesor de los tubos horizontales	0,03
Dde	Diámetro exterior de los tubos diagonales	0,5
ed	Espesor de los tubos diagonales	0,03
Dhre	Diámetro exterior de los tubos horizontales en la cabeza de la estructura	0,8
ehr	Espesor de los tubos horizontales en la cabeza de la estructura	0,04
Ddre	Diámetro exterior de las diagonales de atado en la cabeza de la estructura	0,8
edr	Espesor de los tubos diagonales de atado en la cabeza de la estructura	0,04
Drpe	Diagonal exterior de los tubos en la pieza de transición	1,3
epr	Espesor de los tubos diagonales de la pieza de transición	0,04
Debpt	Diámetro exterior de los tubos diagonales bajo pieza de transición	0,8
edbpt	Espesor de los tubos diagonales bajo la pieza de transición	0,04
er	Espesor de los rigidizadores internos	0,2
H	Altura de la estructura, hasta la pieza de transición	60
Hh1	Altura de los tubos horizontales inferiores	2
Hh2	Altura de los tubos horizontales medios	22
Hh3	Altura de los tubos horizontales superiores	44
B1	Anchura base inferior	25
B2	Anchura base superior	15
Dae	Diámetro exterior de la base del aerogenerador	8,2

Tabla 8-4. Valores de los parámetros finales

8.2. Implementación del modelo de plataforma off-shore

8.2.1. Pre-procesado

Como ya se ha comentado anteriormente, el modelo de la estructura se ha creado directamente en la interfaz de geometría del propio programa de cálculo, de esta forma ha sido posible una parametrización del modelo.

De esta forma, la configuración estructural del modelo parte de cuatro (4) tubos principales que se separan una distancia de 25m en cuadrado, anclados al suelo. Por la conicidad de la estructura, en la base superior cuenta con 15m de cubierta. La función principal de estos tubos es la de soportar la mayor parte de las cargas actuantes.

La altura desde la base inferior (suelo) hasta la base superior (cubierta) es de 60m, siendo superior a la altura del mar, 50m.

Se dispone de tres (3) niveles, siendo sus alturas al lecho marino de 2m, 22m, y 44m, respectivamente. Gracias a estos niveles, los tubos principales son capaces de mantener su disposición inicial, evitando así, una deformación excesiva a causa del pandeo.

Entre cada nivel y la cubierta superior, se disponen de cuatro (4) cruces formadas por dos (2) tubos en diagonal. La función de estas cruces es similar a la de los tubos dispuestos horizontalmente en los niveles, son capaces de mantener rígidos a los tubos principales.

En la cabeza de la estructura, se ha rigidizado añadiendo cuatro (4) tubos horizontales en cuadrado, y dos (2) tubos más en sus diagonales. La función de estos es la de rigidizar lo más posible la cabeza de la estructura para soportar los momentos que recibirá en su vida útil.

En lo referente a la pieza de transición, se ha introducido un cilindro macizo a modo de representar la base del aerogenerador, y que no influya en los cálculos de los elementos estructurales. De dicho cilindro, y hasta el final de los tubos principales, transcurren cuatro (4) tubos para transmitir las cargas inducidas en la base del aerogenerador a la propia estructura.

Por necesidades del análisis, ha sido necesario la adición de varios rigidizadores internos en los tubos principales, concretamente diez (10) por cada tubo. Dichos rigidizadores tienen la función de evitar una deformación excesiva de los tubos principales en las uniones donde se une con los tubos horizontales y diagonales. Por lo tanto, la ubicación de estos rigidizadores es en las inmediaciones de las uniones.

Adicionalmente, se han implementado otros cuatro (4) tubos para rigidizar la cabeza de la estructura. Estos tubos se han añadido por la incorrecta transmisión de los esfuerzos que se daba anteriormente en la estructura sin dichos tubos.

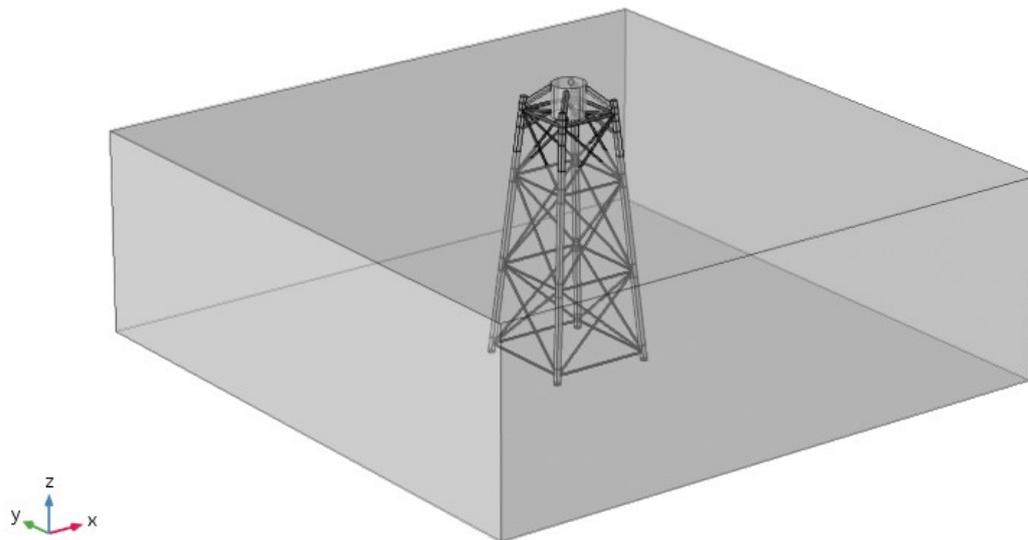


Figura 8-10. Modelo estructura con volumen de agua

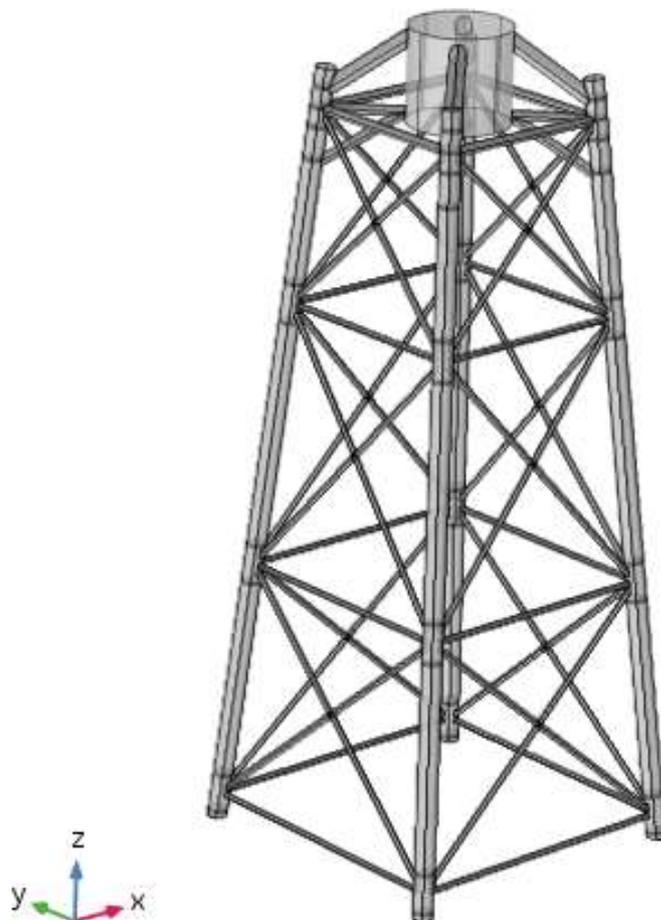


Figura 8-11. Modelo de la estructura Jacket

El programa es capaz de separar diferentes elementos en dominios, los cuales pueden ser agrupados, esta función es utilizada, en este caso, para especificar el tipo de material que simula cada dominio.

Existen varias agrupaciones que se han creado: Agua, Aire y Jacket, entre otras. Para el agua y el aire, el programa consta de una librería de materiales de los cuales se obtienen estos. Para el caso de la estructura Jacket, se ha seleccionado un acero estructural de dicha librería, el cual posee un módulo de Young de 200Gpa y un coeficiente de Poisson de 0,3. Para más información del acero escogido para la estructura consultar el ANEXO 3.

8.2.2. Mallado

En este apartado, ha sido clave la buena creación de la malla para el análisis. El programa COMSOL tiene la función de crear la malla automáticamente en función de la física a analizar.

El problema se ha dado por la imposibilidad de realizar un mallado automático por la geometría del modelo. Al tratarse de una estructura tubular, la malla automática no es capaz de mallar el pequeño espesor en comparación con la gran dimensión que tiene. Por esta razón se ha tenido que realizar un mallado manual.

Para el mallado manual, se ha optado por crear una malla con el tamaño de elemento grande en el fluido, y más pequeño en la estructura, refinándose en las zonas con variaciones de ángulos y espesores.

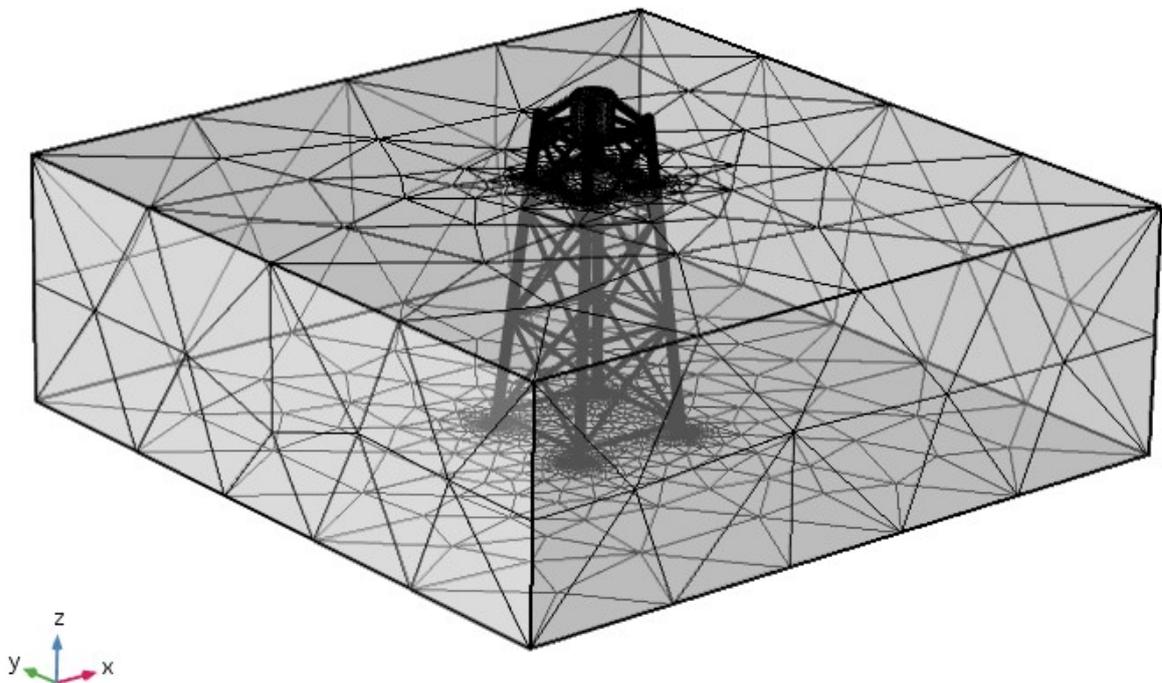


Figura 8-12. Mallado de la estructura y el volumen de agua

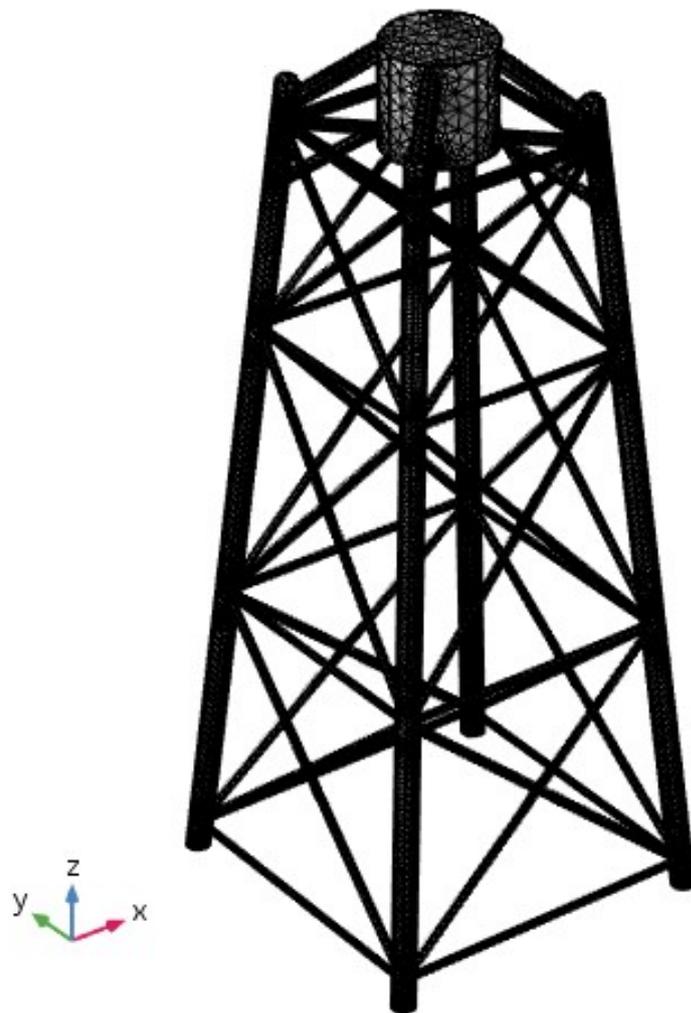


Figura 8-13. Mallado de la estructura Jacket

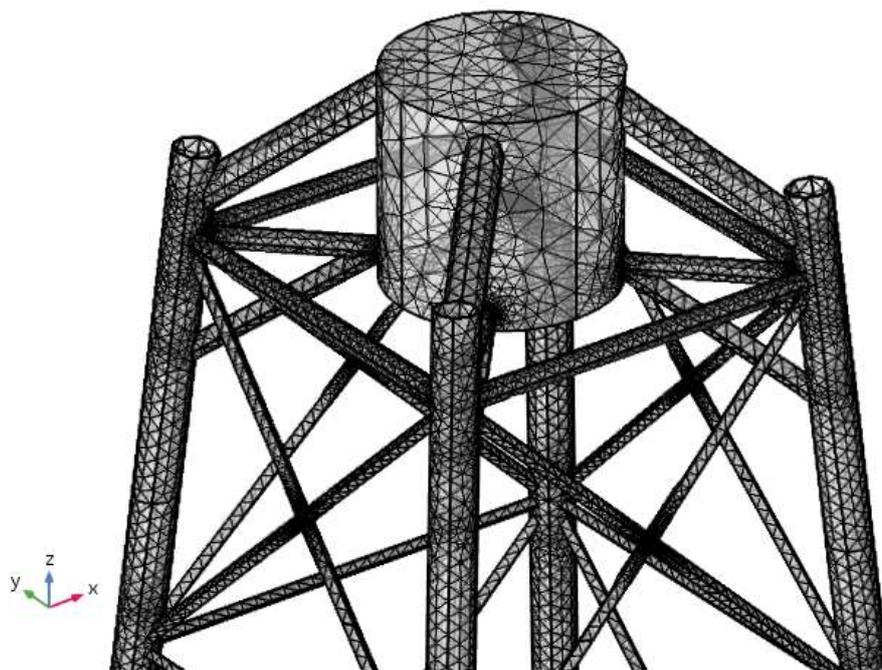


Figura 8-14. Detalle del mallado de la estructura Jacket

8.2.3. Definición del problema físico y condiciones de contorno

En este apartado se trata la física a estudiar, las cargas aplicadas y las condiciones de contorno que posee el modelo de la estructura.

El caso de estudio, se trata de una interacción fluido-estructura, en el cual un fluido (agua) impacta contra la estructura.

COMSOL posee un módulo el cual permite analizar el impacto de un fluido contra una estructura empotrada.

Se ha analizado el modelo en un estado estacionario, considerando las velocidades de viento y corriente constantes.

En el caso del modelo del aerogenerador, se ha impuesto un flujo laminar de aire impactando contra la superficie del aerogenerador. Mientras que, en el modelo de la estructura, es el agua el fluido que impacta contra la estructura.

Para introducir las cargas en la cabeza de la estructura, debidas al viento y el peso del aerogenerador, se ha analizado únicamente el modelo del aerogenerador (anteriormente comentado). Los resultados obtenidos se implementan en el modelo de la estructura como cargas puntuales y distribuidas en superficie. El peso del aerogenerador se ha introducido como una fuerza total distribuida en el cilindro que simula la base del aerogenerador. Para las cargas de viento, se ha introducido una carga puntual a modo de fuerza de reacción por el arrastre, y un par de fuerzas para simular el momento que genera el viento en la base del aerogenerador.

Gracias al programa multifísica, se ha modelado un cubo al cual se le aplican propiedades del fluido, por lo que únicamente se introduce la velocidad de la corriente marina (en el caso de la estructura) y velocidad de viento (en el caso del aerogenerador).

8.2.4. Configuración de los solvers

Para poder lograr una correcta resolución del modelo, es necesario utilizar los solvers correctos. COMSOL da la opción de realizar este paso de manera automática, aunque dependiendo del modelo y de cada caso, es mejor realizarlo manualmente.

En el caso de estudio, se ha configurado de tal manera que, el programa realice una serie de operaciones no lineales mediante una multimalla que represente el conjunto del modelo (estructura-fluido).

En concreto, se ha utilizado la función "Fully coupled", la cual acopla todas las variables para la resolución de las ecuaciones.

8.2.5. Post-procesado

En este último apartado, es donde el programa muestra los resultados a visualizar.

COMSOL da la opción de obtener una amplia serie de tipos de resultados, ya sean tablas, gráficas en 3D, 2D, 1D, en volumen, superficie, entre otros.

En lo referente a lo que se puede plotear, depende de la física utilizada; en este caso, se puede obtener resultados tanto del flujo laminar del fluido, como de las características mecánicas.

Para el caso de estudio, se han obtenido los siguientes gráficos generales:

- Gráfico 3D en la superficie de la estructura para las tensiones de Von Misses
- Gráfico 3D en la superficie de la estructura para los desplazamientos (deformada)
- Gráfico en 3D por capas del fluido para la velocidad del mismo

8.3. Resultados de las simulaciones

En este apartado se van a mostrar los diferentes resultados obtenidos de los análisis realizados en este proyecto sobre la estructura Jacket.

8.3.1. Estado Límite Último de Rotura

En este estudio se comprueba que las tensiones máximas no superen el límite de fluencia del material, para evitar una rotura no deseada. Por ello, se han obtenido unos gráficos en 3D de las tensiones de Von Mises para la estructura.

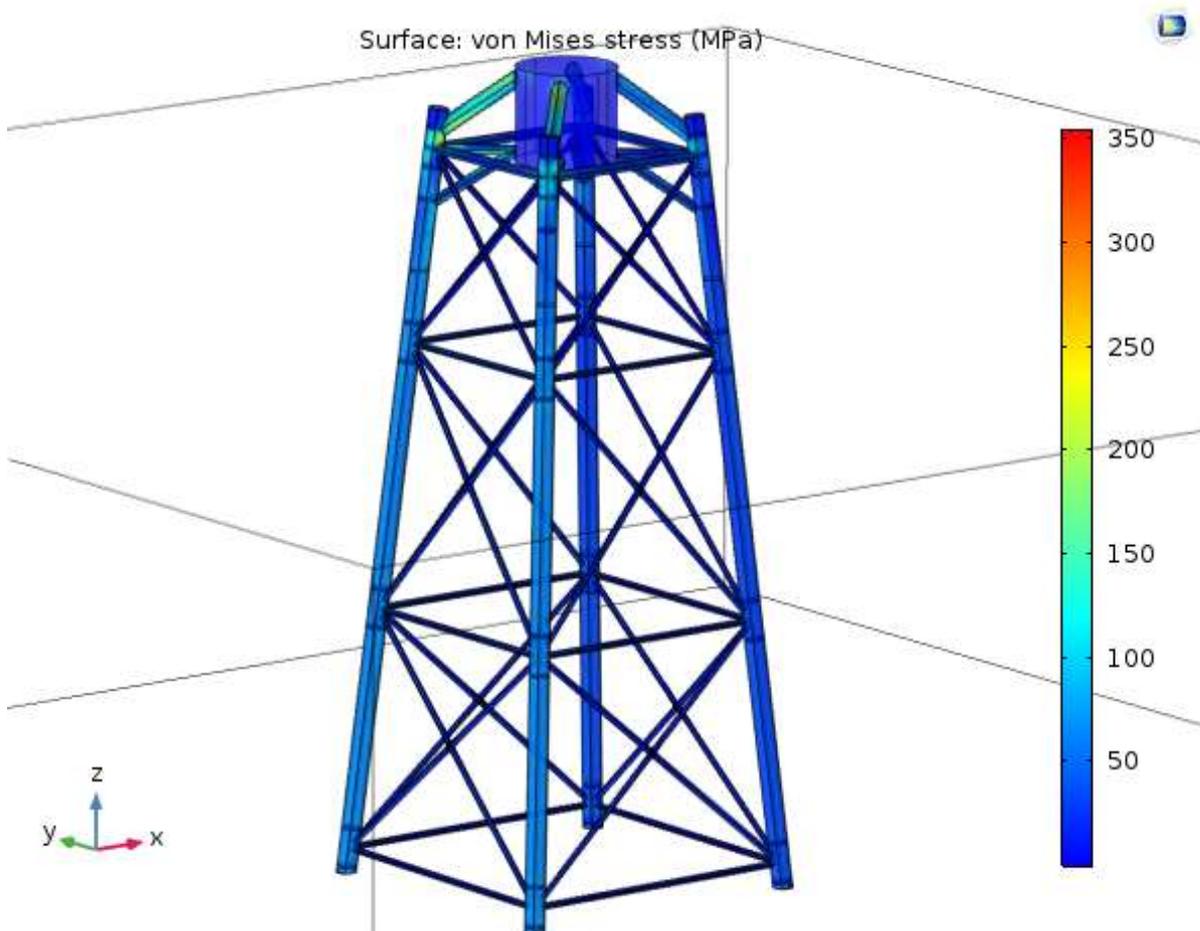


Figura 8-15. Tensiones de Von Mises en la estructura completa -Rotura-

Como se puede apreciar en la Figura 8-15. Las tensiones existentes por toda la estructura obtienen un valor medio de unos 100MPa. En las uniones se presentan las tensiones más elevadas, como era de esperar, por la presencia de ángulos agudos y aristas vivas.

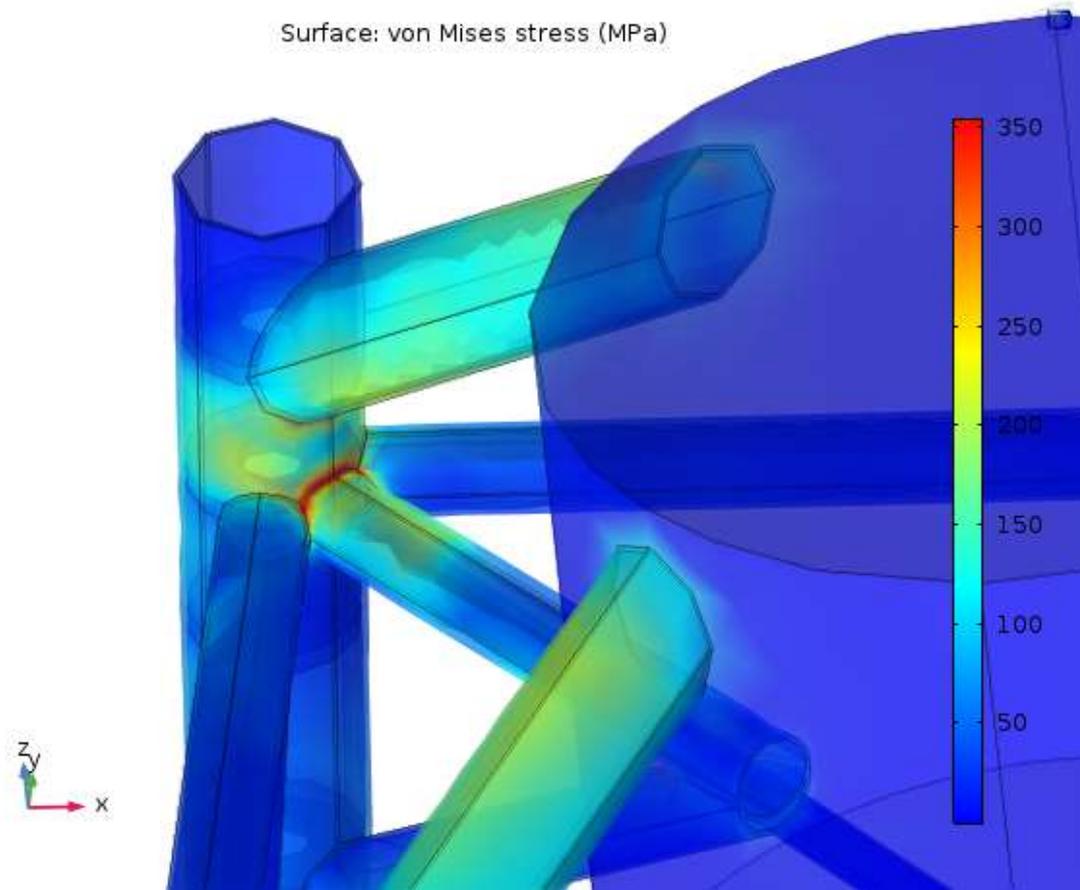


Figura 8-16. Detalle de la pieza de transición -Rotura-

En la Figura 8-16. se muestra en detalle la unión entre la estructura y el aerogenerador. La pieza de transición, formada por los cuatro tubos diagonales que conectan el aerogenerador a la estructura, se ha modelizado de una manera simplificada, resultando la aparición de elevadas tensiones en la unión de dos de los tubos que la conectan a la estructura.

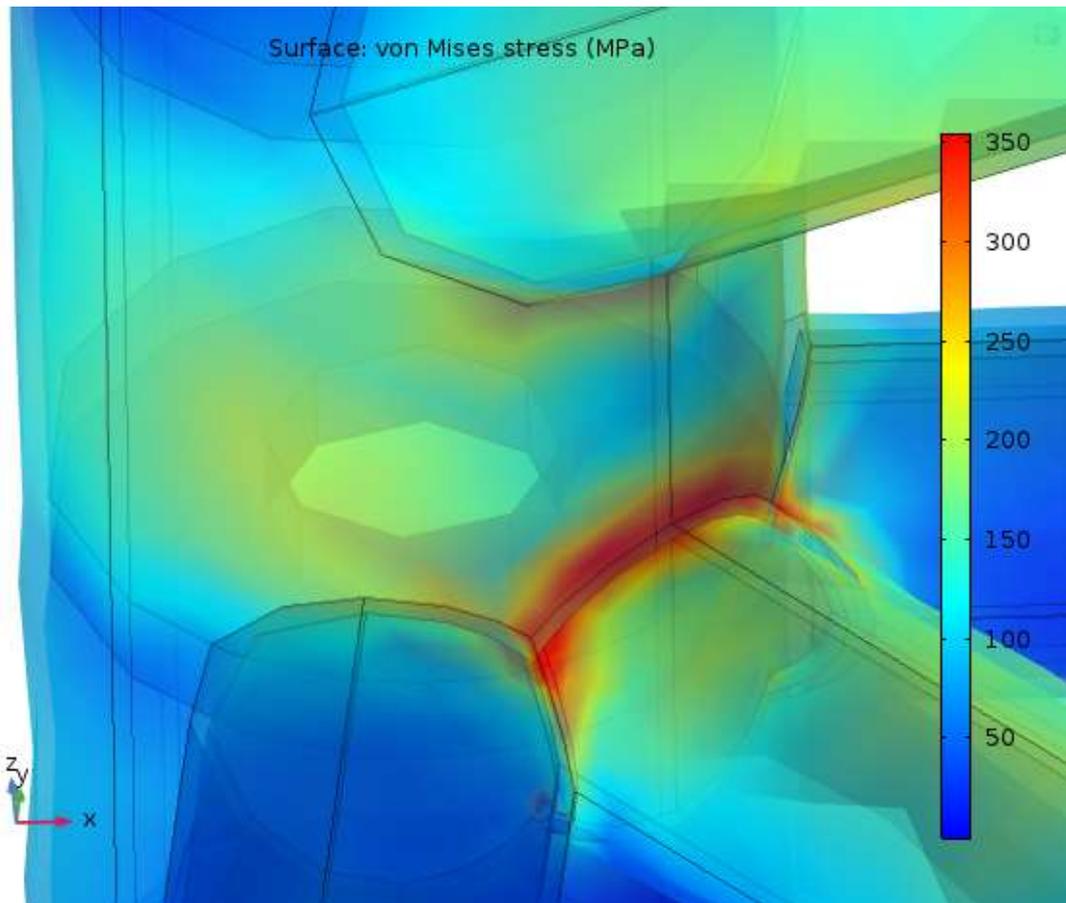


Figura 8-17. Detalle ampliado de la unión -Rotura-

En la zona de color rojo de la Figura 8-17. las tensiones que se producen superan los 1000MPa, llegando hasta los 1100MPa en un único punto. Esto se debe a la simplificada modelización de la pieza de transición, formada por los cuatro tubos. En esta unión, se intersectan varios tubos estructurales dando como resultado una arista viva y un punto, zonas de grandes concentraciones de tensiones. Aun así, la zona que plastificaría es de pequeño tamaño comparada con la estructura.

El aspecto real que tienen este tipo de piezas se puede ver en la siguiente fotografía real, perteneciente al parque eólico marino de Wikinger, Alemania, en el que ha tomado parte Iberdrola.

Ese tipo de piezas poseen una geometría muy compleja de modelar, y, seguramente, están llenas de rigidizadores internos capaces de soportar todos los esfuerzos.



Figura 8-18. Pieza de transición real

Con todas estas consideraciones, las tensiones repartidas por toda la estructura son inferiores al límite elástico del material, que son 355MPa, por lo que se obtienen unos resultados aceptables.

Como información adicional, se añade un gráfico con la velocidad del fluido circulando en el volumen de control. Se ha considerado la estructura introducida en un canal por el cual circula el fluido, por ello, se puede observar una disminución de la velocidad del fluido en las inmediaciones a las paredes.

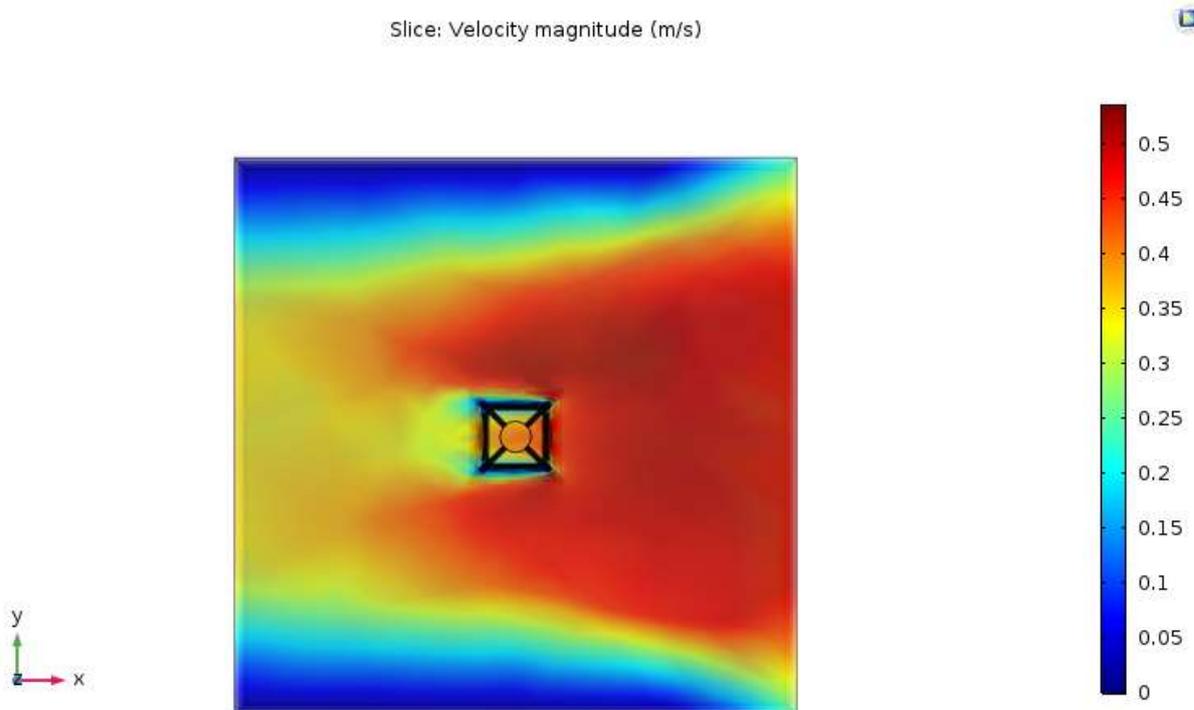


Figura 8-19. Velocidad del fluido en el volumen de control

8.3.2. Estado Límite Último de Estabilidad

En este análisis se comprueba que no se dé una pérdida de estabilidad estática de la estructura frente a las adversidades del entorno.

De la misma manera que en el anterior caso, se comprueban las tensiones obtenidas en el análisis.

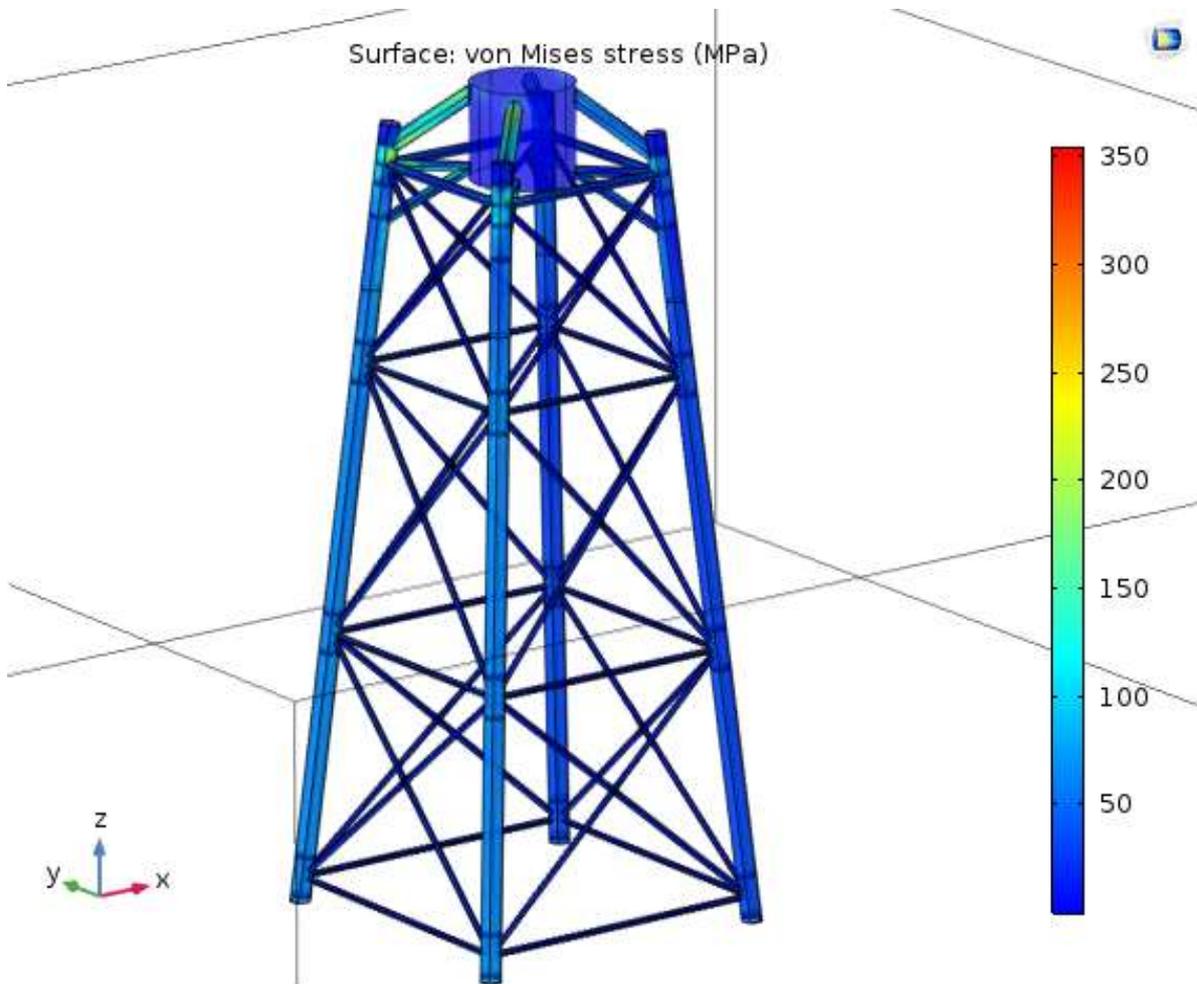


Figura 8-20. Tensiones de Von Mises de la estructura -Estabilidad-

Se comprueba que queda un caso parecido al anterior, en el cuál se obtienen unas tensiones de unos 100MPa alrededor de toda la estructura, menos en la unión superior.

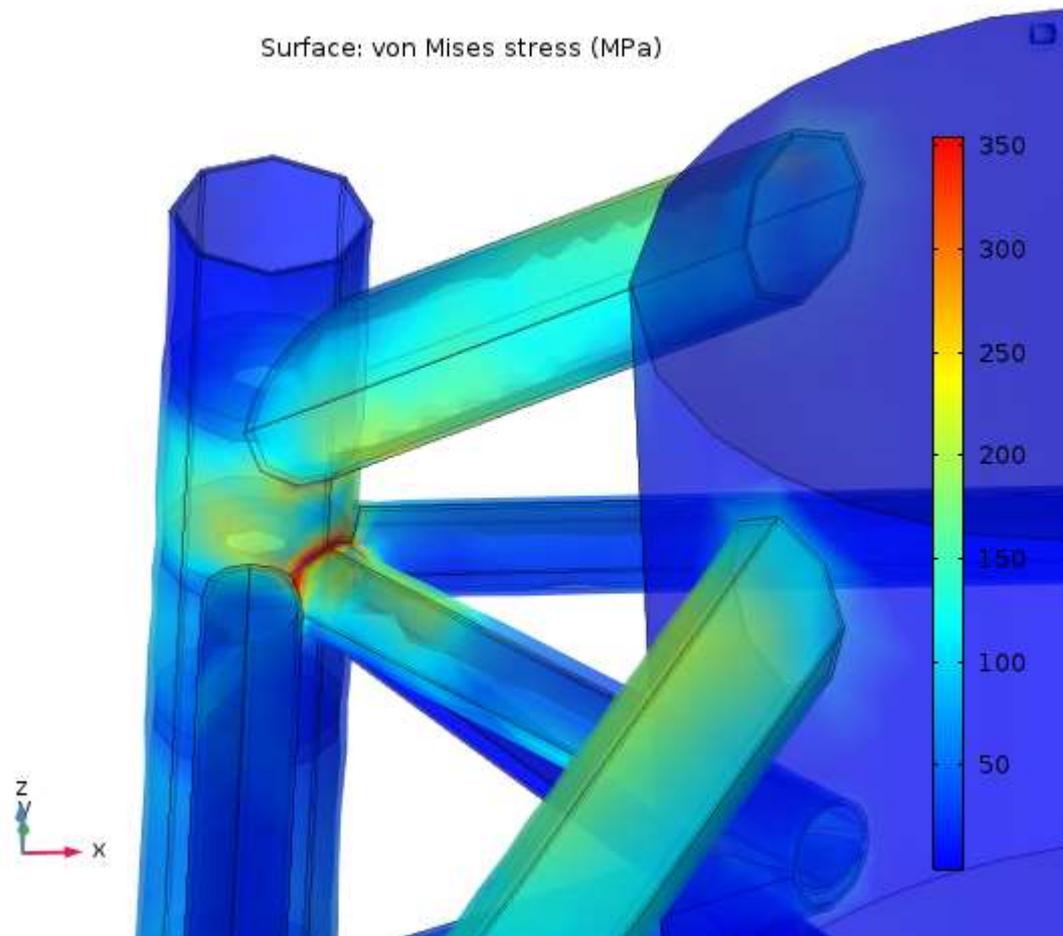


Figura 8-21. Detalle de la pieza de transición -Estabilidad-

De igual manera que el anterior análisis, en la parte superior de la estructura, se dan tensiones muy elevadas, del orden de 1000MPa. El principal problema proviene del modelo, el cuál posee cantos afilados y terminaciones interiores puntuales.

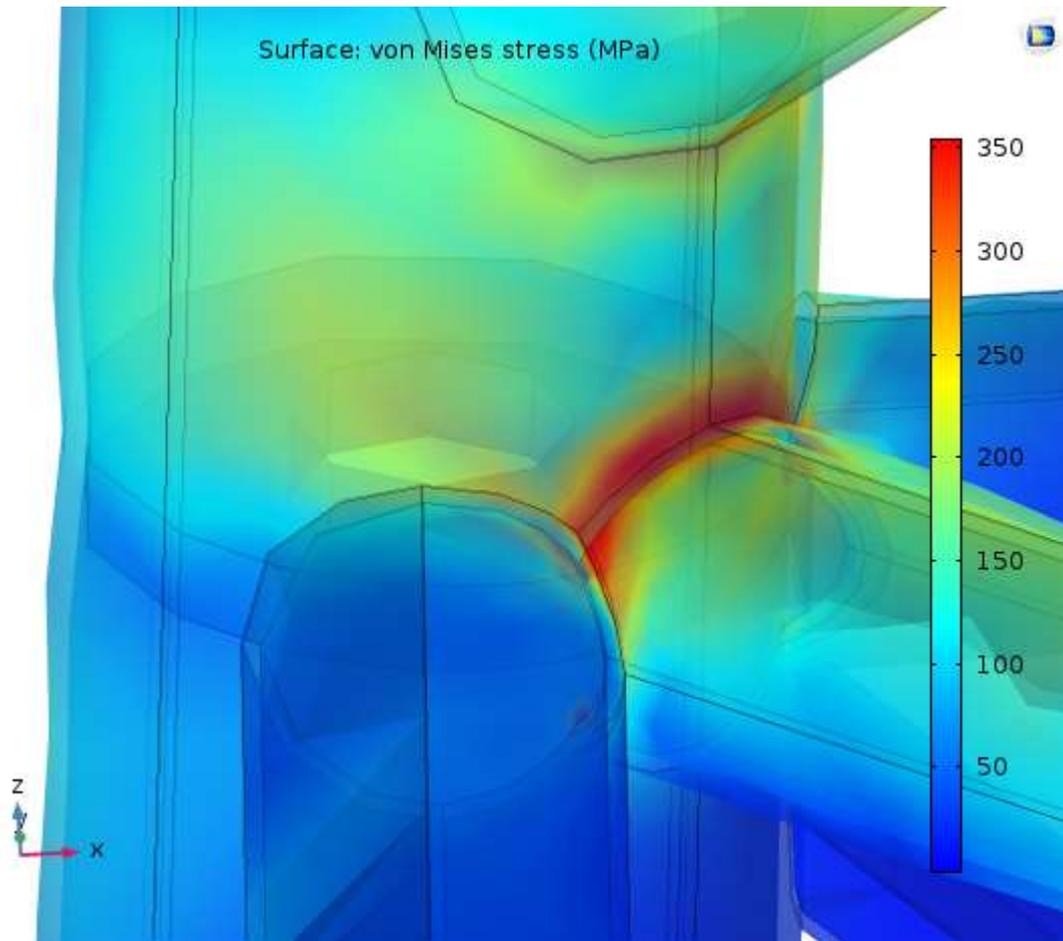


Figura 8-22. Detalle ampliado de la unión -Estabilidad-

Por seguir tratándose de una pequeña zona la que plastifica, se aceptan los resultados obtenidos.

8.3.3. Estado Límite de Servicio

En este último análisis, se estudian los desplazamientos que sufre la estructura, se comprueba que las deformaciones no interfieran en el correcto funcionamiento del aerogenerador.

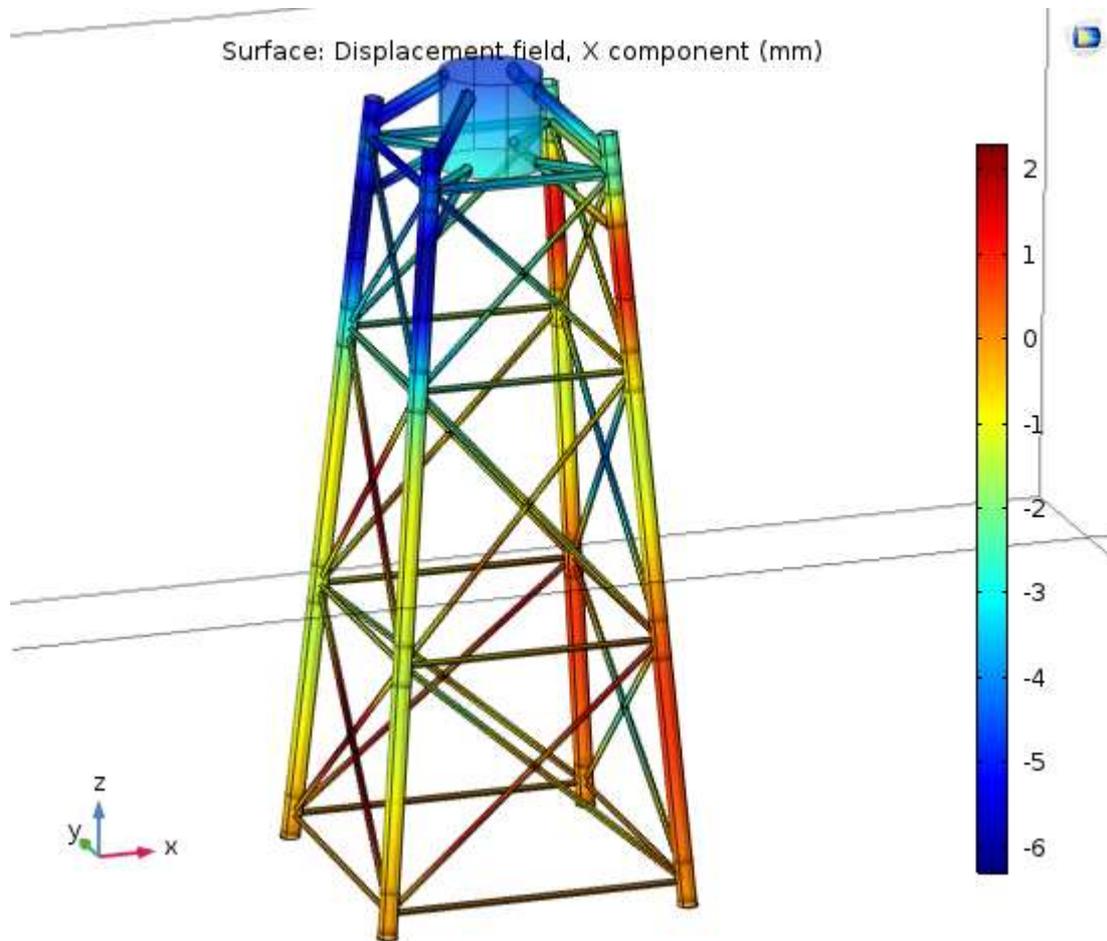


Figura 8-23. Desplazamiento en X de la estructura

Observando la Figura 8-23. se aprecian los desplazamientos en la dirección en la que circula la corriente de agua y la velocidad del viento. Los desplazamientos máximos se dan en la parte superior, con unos valores de 6mm.

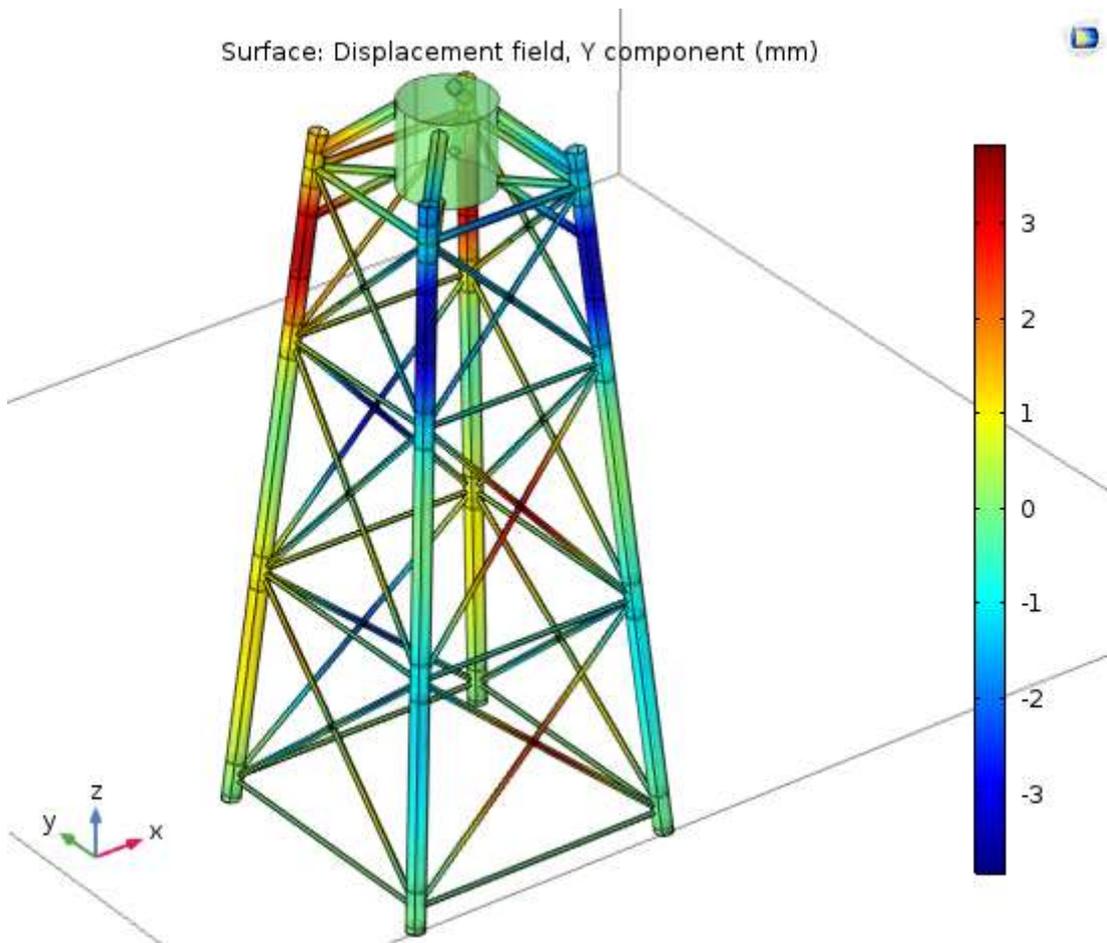


Figura 8-24. Desplazamiento en Y de la estructura

Para la dirección del eje Y, la mayor parte de la estructura posee desplazamientos simétricos, debidos, principalmente, a la acción de peso del aerogenerador. Por el peso, varias barras de la estructura se desplazan hacia afuera con un valor de 3-4mm.

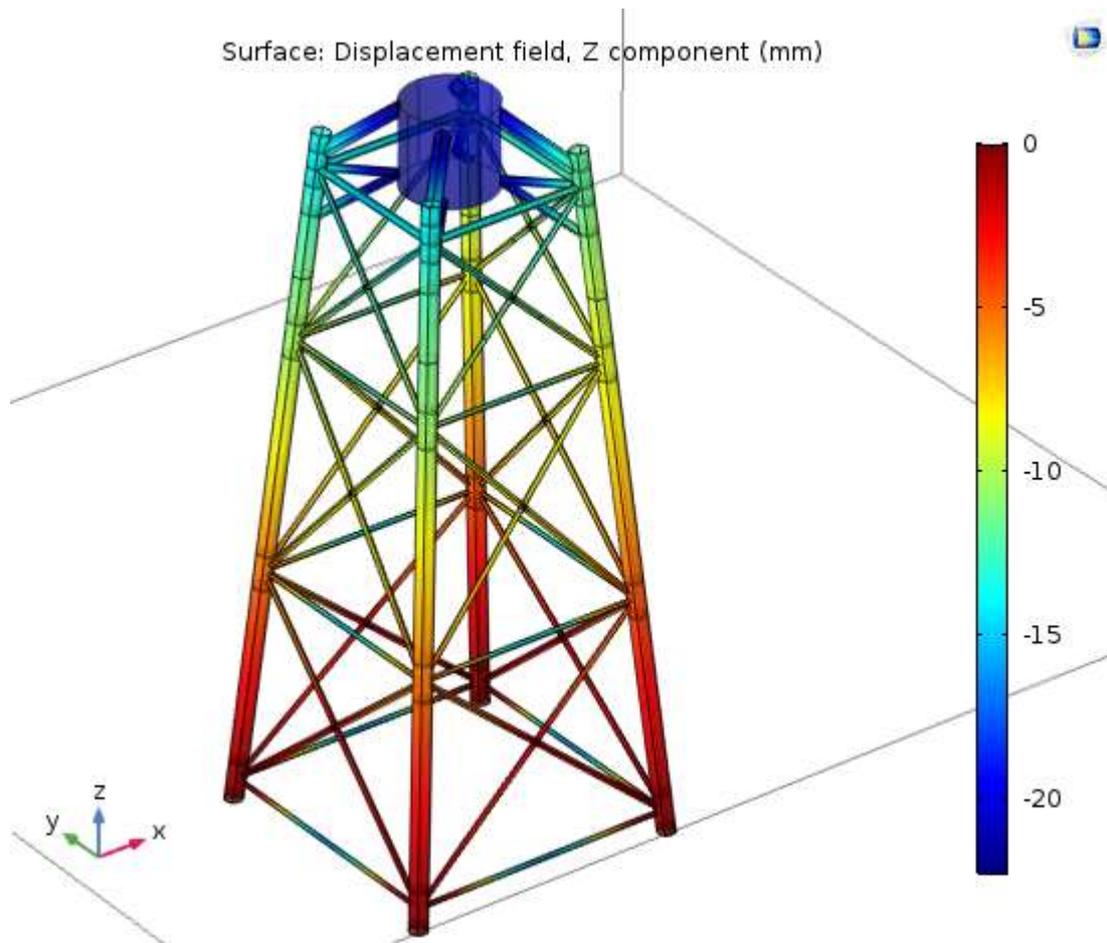


Figura 8-25. Desplazamiento en Z de la estructura

Por causa del enorme peso del aerogenerador, en el eje Z es donde más desplazamientos se pueden obtener. La base del aerogenerador, que coincide con la pieza de transición, se desplaza hacia abajo unos 20-22mm.

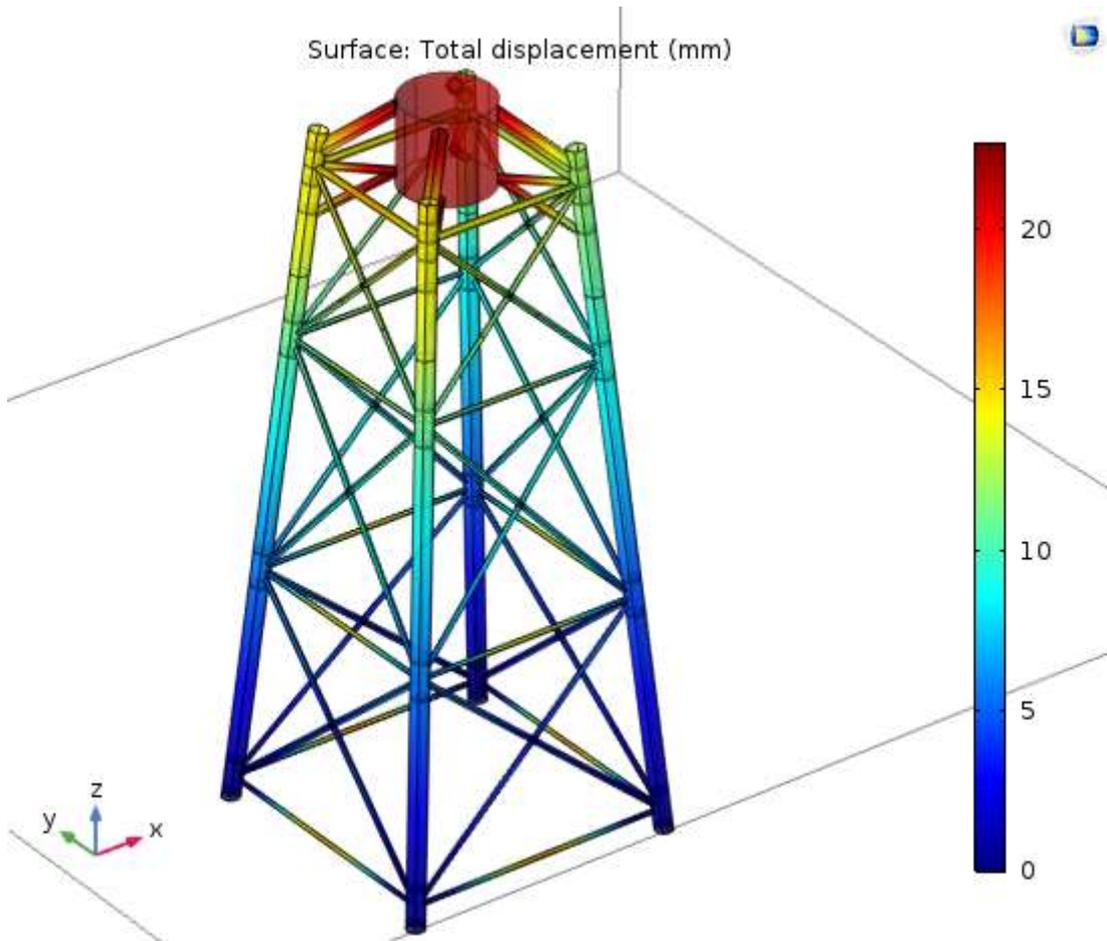


Figura 8-26. Desplazamiento total de la estructura

En la Figura 8-26. se pueden observar los desplazamientos totales que poseen todos los puntos de la estructura, dando como desplazamiento máximo unos 23mm en la parte superior de la pieza de transición.

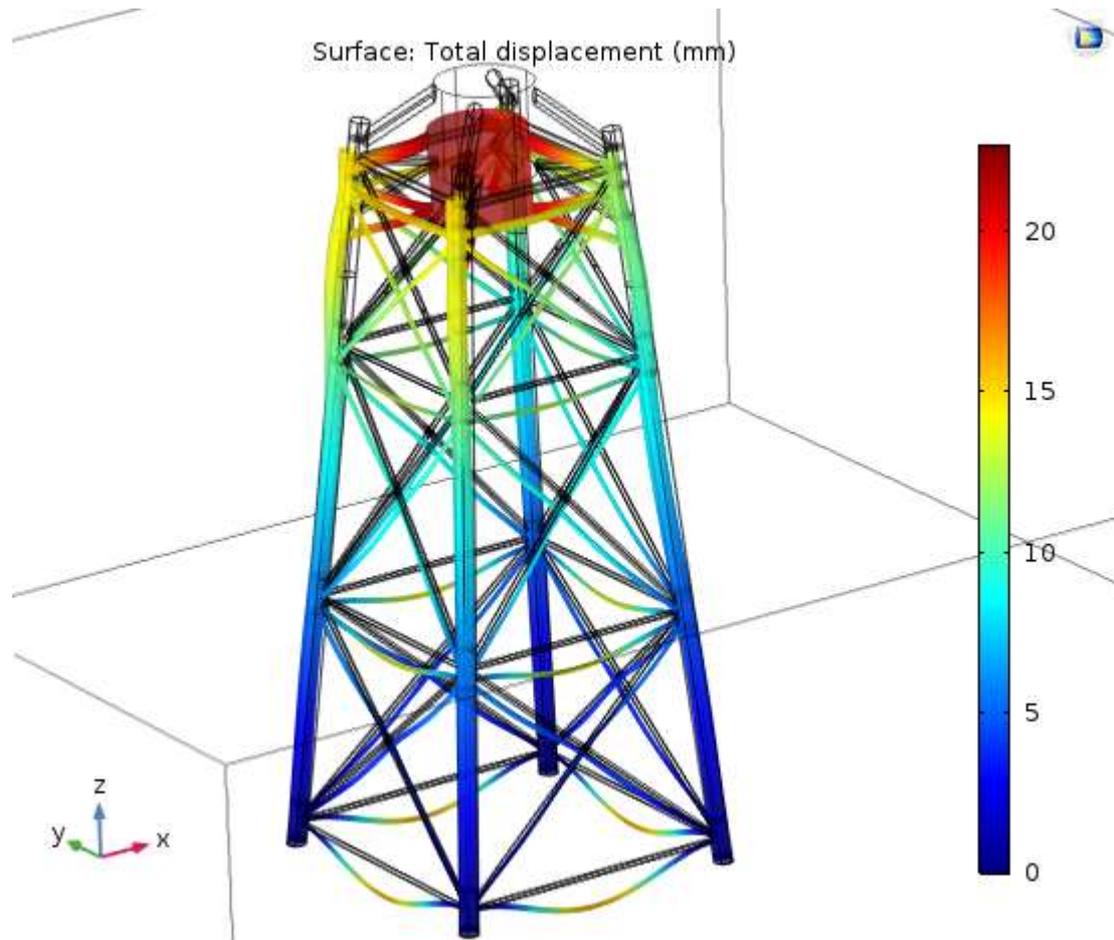


Figura 8-27. Deformada de la estructura (desplazamiento total)

En la figura 8-27. se muestra la deformada total de la estructura, la cuál coincide con los desplazamientos totales de la Figura 8-26.

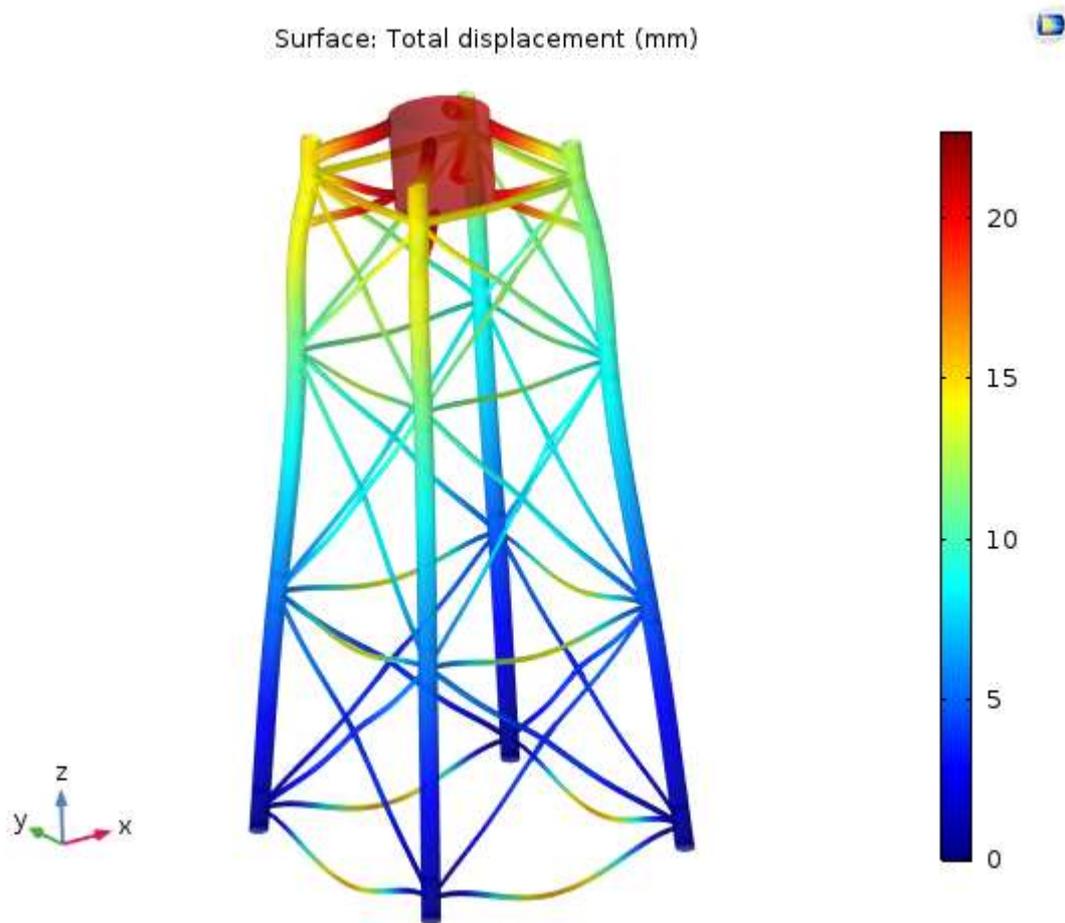


Figura 8-28. Desformada de la estructura (desplazamiento total) más clara

Para una mejor visualización de la estructura deformada, se ha retirado la referencia inicial de la estructura sin deformar, dando una vista más clara del resultado obtenido.

Según la Norma DNV-OS-J101, La deflexión máxima permitida para un correcto funcionamiento del aerogenerador no debe superar a $L/200$, siendo L la longitud de la barra.

$$\delta_{max} < \frac{L}{200}$$

Por lo que

$$22mm = \delta_{max} < \frac{L}{200} = \frac{15000mm}{200} = 75mm$$

A la vista de los resultados, se puede afirmar que las cargas actuantes en la estructura no interfieren en el correcto funcionamiento del aerogenerador.

9. PLANIFICACIÓN

9.1. Fases del proyecto

El proyecto ha sido estructurado en las siguientes fases:

- **Fase 1: Documentación**

En esta fase del proyecto se obtiene la información necesaria acerca de las características de las plataformas y las diferentes configuraciones empleadas en la actualidad en ellas.

Duración: 4 semanas.

- **Fase 2: Aprendizaje de manejo del software a emplear y creación de los modelos**

El programa COMSOL Multiphysics es un programa que abarca muchos campos en el ámbito de la multifísica, y para su manejo necesita de un periodo de reconocimiento y adaptación por parte del usuario. El aprendizaje de este software se comienza y se profundiza a la hora de la realización de los análisis.

Duración: 12 semanas.

- **Fase 3: Simulación del aerogenerador**

En esta fase del proyecto se simulará por separado un modelo de un aerogenerador tipo semejante al utilizado para el estudio. Se parte de un modelo en CAD y es exportado al programa de cálculo, para su análisis y obtención de los resultados.

Duración: 3 semanas.

- **Fase 4: Definición de las combinaciones de carga**

En esta fase del proyecto se eligen los diferentes parámetros que definen cada uno de los casos diferentes a simular, como son la velocidad el viento, la corriente marina, los pesos propios de las barras de la estructura, y el peso total del aerogenerador. A partir de este punto, se plantean las diferentes combinaciones de cargas existentes y se escogen aquellas en las que se obtienen unos casos más desfavorables.

Duración: 2 semanas.

- **Fase 5: Simulación de la estructura**

Simulación de cada uno de los casos elegidos y obtención de los valores de tensión y desplazamiento de todos los puntos.

Duración: 8 semanas.

- **Fase 6: Análisis de los resultados y evaluación de posibles mejoras**

En esta fase se analizan los resultados obtenidos fruto de las distintas simulaciones realizadas y el comportamiento de la estructura antes las diferentes combinaciones de cargas. En función de estos se plantea modificar la configuración del modelo o la implementación de ciertos elementos estructurales (rigidizadores, camisas, etc.) que sirvan como apoyo a la estructura base.

Duración: 3 semanas.

- **Fase 7: Redacción de los documentos**

En esta última fase se realizan todos y cada uno de los documentos de los que se compone el proyecto.

Duración: 2 semanas.

La duración total del proyecto es de 5 meses y 3 semanas.

9.2. Hitos

Los hitos que permitirán controlar la ejecución del proyecto son los siguientes:

HIT O	DESCRIPCIÓN	FECHA
H1	Finalización de aprendizaje de software	Semana 12
H2	Finalización de simulaciones	Semana 21
H3	Proyecto finalizado	Semana 23

9.3. Diagrama de Gantt.

A continuación, se muestra el diagrama de Gantt del proyecto.

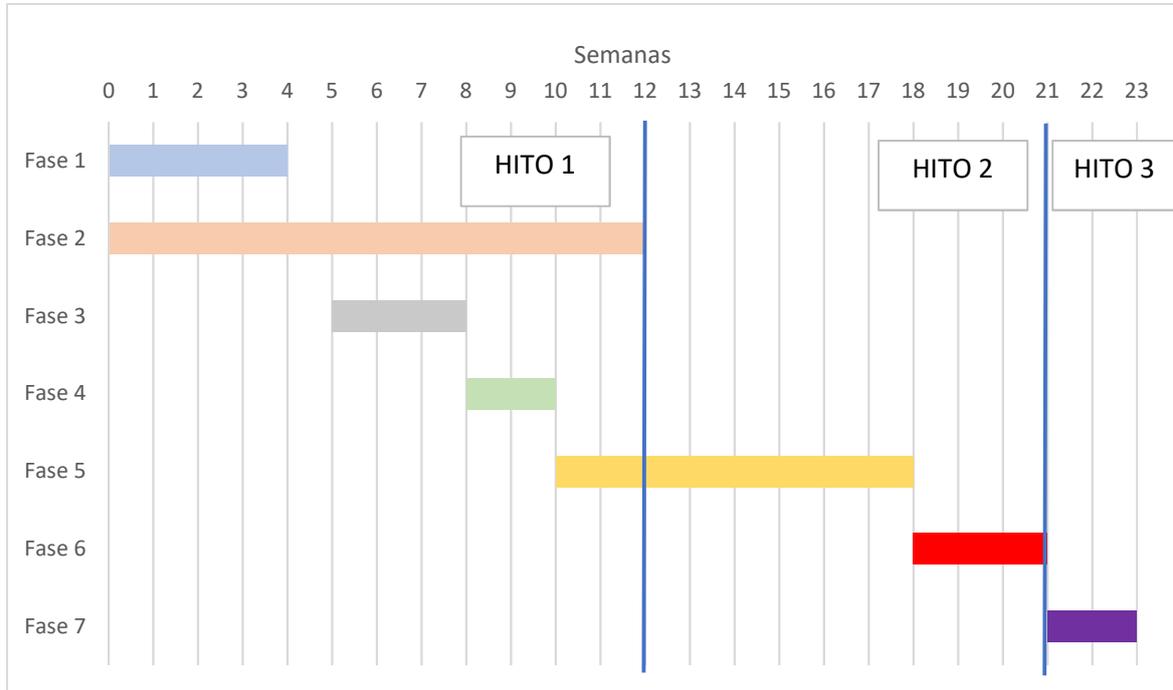


Figura 9-1. Diagrama de Gantt

10. CONCLUSIONES

Una vez finalizado el proyecto, cabe destacar la calidad de los resultados obtenidos. Por razones relativas al modelo, la pieza de transición no se ha modelado como en la realidad, por la simplificación de la pieza a cuatro únicos tubos, la concentración de tensiones ha distorsionado los resultados del análisis.

Es por ello que se definen varias líneas futuras posibles para la continuación de este proyecto. Estas líneas corresponden al correcto diseño de la pieza de transición; otros análisis como la fatiga, vibraciones, protección contra la corrosión; optimización del material empleado; estudio estadístico del oleaje; diseño y dimensionamiento de la cimentación; y análisis en profundidad de las uniones y soldaduras.

11. REFERENCIAS

- [1] S. Jalbi et al, "Dynamic design considerations for offshore wind turbine jackets supported on multiple foundations," Marine Structures, vol. 67, pp. 102631, 2019. . DOI: <https://doi.org/10.1016/j.marstruc.2019.05.009>.
- [2] T. He et al, "LNG cold energy utilization: Prospects and challenges," Energy, vol. 170, pp. 557-568, 2019. . DOI: <https://doi.org/10.1016/j.energy.2018.12.170>.
- [3] Asensio de Miguel, Francisco Javier, "Sistemas De Cogeneración Basados En Pilas De Combustible Tipo PEM. Modelado Y Optimización Orientada a La Maximización De La Eficiencia Energética." , 2017. <https://addi.ehu.es/handle/10810/30905>
- [4] J. J. de-Troya et al, "Analysing the possibilities of using fuel cells in ships," International Journal of Hydrogen Energy, vol. 41, (4), pp. 2853-2866, 2016. . DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2015.11.145>.
- [5] DNV, Available: <https://rules.dnvgl.com/servicedocuments/dnvgl/#!/industry/3/Energy>.
- [6] COMSOL, "Programa COMSOL Multiphysics," . <https://www.comsol.com/>
- [7] GEBCO, General Bathymetric Chart of the Oceans. <https://www.gebco.net/>
- [8] International Renewable Energy Agency. Global Atlas Gallery. Available: <https://irena.masdar.ac.ae/gallery/#gallery>.
- [9] SIEMENS, "SolidEdge," . <https://solidedge.siemens.com/es/>
- [10] Autodesk, "AutoCAD," . <https://www.autodesk.es/products/autocad/overview>
- [11] Aerogenerador E141-EP4. <https://en.wind-turbine-models.com/turbines/1297-enercon-e-141-ep4>
- [12] Mapa Batimetría. <http://portal.emodnet-bathymetry.eu/>
- [13] Mapa recorrido de buques. Available: <https://www.marinetraffic.com/en/ais/home/centerx:38.6/centery:55.7/zoom:3>.
- [14] Puertos del estado, datos en tiempo real, datos históricos. <http://www.puertos.es/es-es/oceanografia/Paginas/portus.aspx>
- [15] Modelos en CAD. Available: <https://grabcad.com/>.