



UNIVERSIDADE DA CORUÑA

Escola Politécnica Superior – Ferrol

TRABALLO FIN DE GRADO



**GRADO EN INGENIERÍA EN TECNOLOGÍAS
INDUSTRIALES**

Título:

**DISEÑO Y OPTIMIZACIÓN DE UNA ESTRUCTURA OFFSHORE
TIPO JACKET**

Autor:

D. XAIME RIVAS REY

Tutor:

D.ADOLFO LAMAS RODRÍGUEZ

Fecha:

JUNIO 2014



AGRADECIMIENTOS

En primer lugar, debo agradecer a mis padres el gran apoyo que me han brindado durante todos estos años, especialmente en esta etapa final del grado. Sin ellos todo esto no habría sido posible, espero que todo su esfuerzo se haya visto recompensado.

A mi hermana, que siempre me ha ayudado a sobrellevar los malos momentos, y a disfrutar los buenos.

A mis amigos que han vivido de primera mano estos difíciles años, y que a pesar no poder vernos tanto como nos hubiera gustado siempre me han apoyado y animado a avanzar, y con los que en la medida de lo posible he podido celebrar todos mis triunfos a lo largo de estos últimos años.

A toda la gente que he conocido durante mi paso por la universidad... en especial a los grandes amigos que me llevo, a pesar de no haber podido compartir con algunos de ellos esta última etapa, y a la gente que hizo muchísimo más llevadera mi paso por la Escuela... Hacen que recuerde con mucho cariño estos años.

Y por último, pero no menos importante, a mi tutor, por todo el apoyo en este proyecto, por las enseñanzas adquiridas, y sobre todo, por ayudarme a hacer lo imposible, conseguir acabar en el plazo previsto.



Índice General

i. *Memoria*

ii. *Presupuesto*



Memoria



Índice

Capítulo 1. Introducción	10
1.1 Definición del proyecto	11
1.2 Estructura del proyecto	12
Capítulo 2. Estado del arte	14
2.1 Situación del sector eólico. Eólica Marina	15
2.2 Plataformas de soporte de los molinos offshore	20
2.3 Jackets. Diseño de Jackets.	29
2.3.1 Patrón de los brazos	29
2.3.2 Cantidad de niveles de brazos:	31
2.3.3 Número de patas	32
2.3.4 Pieza de transición	32
2.3.5 Tipos de nudos	34
2.3.6 Resistencia del acero	34
2.3.7 Huella de la jacket	35
2.4 Tensión de Von Mises. Análisis a carga última (ULS)	37
2.5 Análisis a fatiga (FLS)	38
2.5.1 Elección del método de estudio	41
Capítulo 3. Modelado y análisis de la jacket	44
3.1 Diseño de la jacket a analizar	45
3.1.1 Dimensiones características de la jacket a analizar	45
3.2 Modelización tridimensional de la jacket	48
3.3 Análisis de la jacket	51
3.3.1 ANSYS Workbench	51
3.3.2 Estados límite a estudiar y cálculo de fuerzas y momentos	53
3.3.3 Mallado de la jacket	57
3.3.4 Resultados del análisis de la jacket	60
Capítulo 4. Modelado y Cálculo de fuerzas en el nudo A	64
4.1 Modelización del nudo más solicitado	65
4.2 Cálculo de las fuerzas en un nudo	68



4.2.1	Definición de superficies de corte	68
4.2.2	Definición de “probes”	69
Capítulo 5. Optimización del nudo A		73
5.1 Entorno de optimización – DesingXplorer		74
5.1.1	Método por optimización de objetivos (GDO)	75
5.1.2	Método de optimización directa	76
5.1.3	ASO (Adaptative Single Objective)	77
5.2 Optimización del nudo y resultados		78
5.2.1	Parámetros de los distintos nudos	78
5.2.2	Nudo peor y nudo mejor	80
5.2.3	Análisis de sensibilidad Manual	83
5.2.4	Función de costes de fabricación	86
5.2.5	Optimización del nudo (ASO)	88
5.2.5.1	Optimización minimizando la cantidad de material	88
5.2.5.2	Optimización minimizando los costes de fabricación	91
Capítulo 6. Conclusiones		96
Capítulo 7. Trabajo futuro		99
Capítulo 8. Referencias y bibliografía		102
8.1	Referencias	103
8.2	Bibliografía	105



Índice de ilustraciones

Ilustración 1. Evolución de la potencia mundial de eólica marina.	17
Ilustración 2. Partes principales de un molino offshore.	20
Ilustración 3. Tipos de "foundations" en función de la profundidad del lecho marino.	21
Ilustración 4. Estructura gravitatoria (Profundidad < 30 metros).	22
Ilustración 5. Estructura monopilote (Profundidad < 30 m).	22
Ilustración 6. Estructura tripilote (Profundidad < 30 m).	23
Ilustración 7. Estructura tipo jacket (40 < profundidad < 70 m).	25
Ilustración 8. Estructura tipo trípode (40 < Profundidad < 70 m).	25
Ilustración 9. Estructuras tipo para Profundidad > 80 m.	27
Ilustración 10. Ejemplo real de un molino offshore con plataforma flotante.	27
Ilustración 11. Uso de foundations actualmente.	28
Ilustración 12. Patrones de barras más usados en las jackets.	30
Ilustración 13. Comparativa de las ventajas (arriba) y desventajas (abajo) de los distintos patrones de brazos.	30
Ilustración 14. Diseño conceptual de una Jacket de 3 niveles (izquierda) y de 4 niveles (derecha).	31
Ilustración 15. Comparativa entre jackets de 3 y 4 patas.	32
Ilustración 16. Punto de intersección de los ejes de las patas y partes de una pieza de transición.	33
Ilustración 17. Nudos de fundición (izquierda) y soldado (derecha).	34
Ilustración 18. Huella de una jacket genérica de 4 patas. Vista en planta.	36
Ilustración 19. Ejemplo de rotura por fatiga en la unión soldada entre 2 railes.	39
Ilustración 20. Ejemplos de nudos típicos que sufren problemas a fatiga.	42
Ilustración 21. Diseño final de la jacket. Fuente: elaboración propia.	46
Ilustración 22. Perspectiva isométrica del diseño final de la jacket. Fuente: elaboración propia.	47
Ilustración 23. Modelo tridimensional de la jacket con Design Modeler.	48
Ilustración 24. Modelo tridimensional de la jacket a optimizar.	50
Ilustración 25. Herramientas de ANSYS Workbench.	52
Ilustración 26. Sistema de coordenadas para las cargas a estado límite último.	55
Ilustración 27. Vista completa de la jacket mallada.	58
Ilustración 28. Vista ampliada de la jacket mallada.	59
Ilustración 29. Vista ampliada 2 de la jacket mallada.	59
Ilustración 30. Análisis de estado límite último (ULS) de la jacket.	60
Ilustración 31. Resultados del análisis del estado límite a fatiga de la jacket.	61
Ilustración 32. Nudos a modelar y optimizar.	66
Ilustración 33. Modelo tridimensional del Nudo A.	67
Ilustración 34. Superficie de corte con la parte superior de la cuerda del Nudo A.	68
Ilustración 35. Fuerza resultante en el extremo superior de la cuerda del nudo A.	70
Ilustración 36. Momento resultante en el extremo superior de la cuerda del nudo A	71



<i>Ilustración 37. Partes principales de un nudo.</i>	<i>79</i>
<i>Ilustración 38. Nudo peor.</i>	<i>81</i>
<i>Ilustración 39. Nudo mejor.</i>	<i>82</i>
<i>Ilustración 40. Efecto del espesor de los injertos en Von Mises. Fuente: elaboración propia.</i>	<i>84</i>
<i>Ilustración 41. Efecto de la conicidad de los injertos superiores en Von Mises. Fuente: elaboración propia.</i>	<i>84</i>
<i>Ilustración 42. Efecto del espesor de la cuerda en Von Mises. Fuente: elaboración propia.</i>	<i>85</i>
<i>Ilustración 43. Efecto del espesor de la cuerda en Von Mises. Fuente: elaboración propia.</i>	<i>85</i>
<i>Ilustración 44. Esquema de un cilindro cónico.</i>	<i>87</i>
<i>Ilustración 45. Solución propuesta para la optimización de cantidad de material.</i>	<i>90</i>
<i>Ilustración 46. Resultado de la optimización minimizando el coste de fabricación.</i>	<i>93</i>





Capítulo 1. INTRODUCCIÓN

CONTENIDO

1.1 Definición del proyecto	11
1.2 Estructura del proyecto	12



1.1 DEFINICIÓN DEL PROYECTO

La misión de este proyecto consiste en el diseño y optimización de parte de una estructura de acero empleada como soporte para un generador eólico marino, y conocida como jacket. Actualmente, la jacket es la estructura con más perspectivas de crecimiento en los próximos años dentro del sector de la eólica marina. De cara al diseño de una de estas estructuras, la normativa actual exige que cumpla una serie de requisitos tanto a carga última como a fatiga y dado que la modelización y análisis de este tipo de esta estructura no es trivial, actualmente existen gran cantidad de ingenierías cuyo campo de trabajo gira entorno a dichos análisis.

Se propone en este proyecto de investigación y desarrollo, la resolución de un problema de optimización de diseño real. Se demostrará que los costes son un factor clave a la hora de diseñar elementos estructurales que presenten un coste de fabricación elevado. Para ello, se emplea una metodología de optimización aplicada al diseño de producto, a través de herramientas de tipo CAD (diseño) y CAE (análisis) como son SolidWorks y ANSYS. Dicha metodología se podrá aplicar para optimizar distintas partes de la jacket.

Dentro de los distintos componentes que conforman una jacket, la parte crítica en la misma son los nudos. Esto se debe al elevado coste de fabricación que tienen asociado. Este coste es tan elevado respecto a otras partes de la jacket por que requiere gran cantidad de soldadura manual, la cual necesita personal altamente cualificado, además de un tiempo de realización mucho mayor comparado con el de una soldadura automática.

Tal y como se comentará posteriormente, en la bibliografía existente sobre el diseño de estas uniones es clave el comportamiento de las mismas a carga última y a fatiga. A lo largo de este proyecto se emplearán ambas restricciones para optimizar el diseño de los nudos de una jacket en base a su coste de fabricación.



Existen numerosos diseños de jackets en la actualidad. En el presente proyecto se analizará un diseño que forma parte de un proyecto real. El mismo ha sido facilitado por una empresa del sector, junto con las cargas a las que esta está sometida.

Si bien el diseño de la jacket viene dado, ha sido necesario modelarlo en tres dimensiones para posteriormente hacer los análisis a carga última y a fatiga como exige la normativa vigente mediante el uso de herramientas de elementos finitos.

1.2 ESTRUCTURA DEL PROYECTO

El proyecto se divide en un total de ocho capítulos en los que principalmente se expone, como es habitual en los proyectos de Investigación y Desarrollo, el resumen de la situación actual de estado del arte del problema que nos ocupa, las especificaciones técnicas de la solución adoptada con su experimentación y resultados, y las conclusiones que se obtuvieron a lo largo de su realización.

De este manera, el capítulo dos se encarga de exponer la situación en la que se encuentra actualmente el problema que se trata de abordar. Por supuesto, también se exponen las bases teóricas que se emplearán a lo largo del proyecto.

Una vez explorado el marco teórico que nos ocupa, en el capítulo tres se realiza el análisis de jacket, identificando el nudo más solicitado a carga última y a fatiga para su posterior optimización.

En los capítulos cuatro y cinco, se expone la metodología diseñada para la optimización de cualquier nudo de la jacket, aplicándola para la optimización del diseño del nudo más solicitado de la jacket.

El balance general del proyecto, así como las líneas de investigación que se abren a través de él, se encuentran en los capítulos seis y siete de conclusiones y trabajo futuro.

El último capítulo se reserva para las referencias y la bibliografía.





Capítulo 2. ESTADO DEL ARTE

CONTENIDO

<i>2.1 Situación del sector eólico. Eólica Marina</i>	<i>15</i>
<i>2.2 Plataformas de soporte de los molinos offshore.....</i>	<i>20</i>
<i>2.3 Jackets. Diseño de las jackets</i>	<i>29</i>
<i>2.4 Tensión de Von Mises. Análisis a carga última (ULS)</i>	<i>37</i>
<i>2.5 Análisis a Fatiga (FLS).....</i>	<i>38</i>



Durante este capítulo se describen las bases teóricas y los conceptos que se tendrán en cuenta a lo largo del proyecto al hacer los análisis a carga última y a fatiga de la jacket y el desarrollo de la metodología de optimización para cualquiera de sus nudos, justificando la metodología adoptada en la resolución del problema. Por otro lado, también se hace una introducción sobre el estado actual y las perspectivas de futuro del sector eólico marino en los próximos años.

2.1 SITUACIÓN DEL SECTOR EÓLICO. EÓLICA MARINA

El viento está virtualmente en todas las partes de la tierra, aunque hay grandes diferencias en sus características según la zona considerada. Se estima que hay alrededor de 1000 TW en toda la superficie terrestre. Si solo se utilizara el 1 % de esta energía, y se considerara el factor de carga más bajo para las centrales eólicas (15-20 %), tendríamos una potencia instalada igual a la de todas las plantas de generación de electricidad que están actualmente en funcionamiento.

La capacidad de la energía eólica mundial se ha duplicado aproximadamente cada tres años y medio desde 1990. La capacidad total a finales de 2011 era de más de 238GW y la generación anual de electricidad alrededor de 377TWh, aproximadamente igual al consumo anual de electricidad de Australia. China, con aproximadamente 62GW, tiene la mayor capacidad instalada, mientras que Dinamarca, con más de 3 GW, tiene el nivel más alto per cápita, donde el viento supone alrededor del 20 % de la producción de electricidad.

En la siguiente tabla se resume la potencia instalada de los países que más invierten en energía eólica y la potencia instalada a nivel mundial. Se compara la situación más reciente de 2011 con la del año 1993 [1]:



Tabla 1. Potencia Instalada a nivel mundial. Fuente: Consejo Mundial de la Energía.

PAÍS	CAPACIDAD INSTALADA [GW]	
	2011	1993
China	62,4	0,015
Estados Unidos	46,9	1,8
Alemania	29,1	0,65
España	21,7	0,052
India	15,9	0,040
Resto del Mundo	62,1	-
Total	240,1	-

Los parques eólicos offshore tienen un gran potencial para convertirse en una importante fuente de energía en el futuro más próximo. Ya se han proyectado una gran cantidad de parques de potencias medias que rondan los 1000 MW y están esperando su aprobación para comenzar su instalación y puesta en marcha. Destaca el caso del Reino Unido, donde se ha proyectado para el horizonte de 2020, la instalación de parques eólicos que en conjunto tendrían una potencia total que rondaría los 20000 MW. Estos parques estarían a una distancia máxima de la costa de 100 Km y la profundidad media a la que estaría el lecho marino sería de entre 40 - 50 metros. Debido a la profundidad del lecho para los proyectos británicos, las subestructuras que soportarán los molinos serán en la gran mayoría de los casos jackets [2] [3].

La potencia total de eólica marina instalada a nivel mundial es de 6,6 GW, representando aproximadamente un 2% del total de la energía eólica instalada. Más del 90% de esta capacidad está instalada en el Norte de Europa, en el mar del Norte, en el mar Báltico y en el canal de la Mancha. El resto de instalaciones son mayoritariamente proyectos experimentales en la costa este de China. Destacan también las altas expectativas que tienen países como Japón, Corea, EEUU, Canadá, Taiwán e India respecto a instalación de parques offshore en sus costas.



En la siguiente gráfica se puede ver cuál ha sido la evolución de la potencia eólica marina instalada a nivel mundial, desde sus inicios en la década de los noventa hasta 2012 [3]:

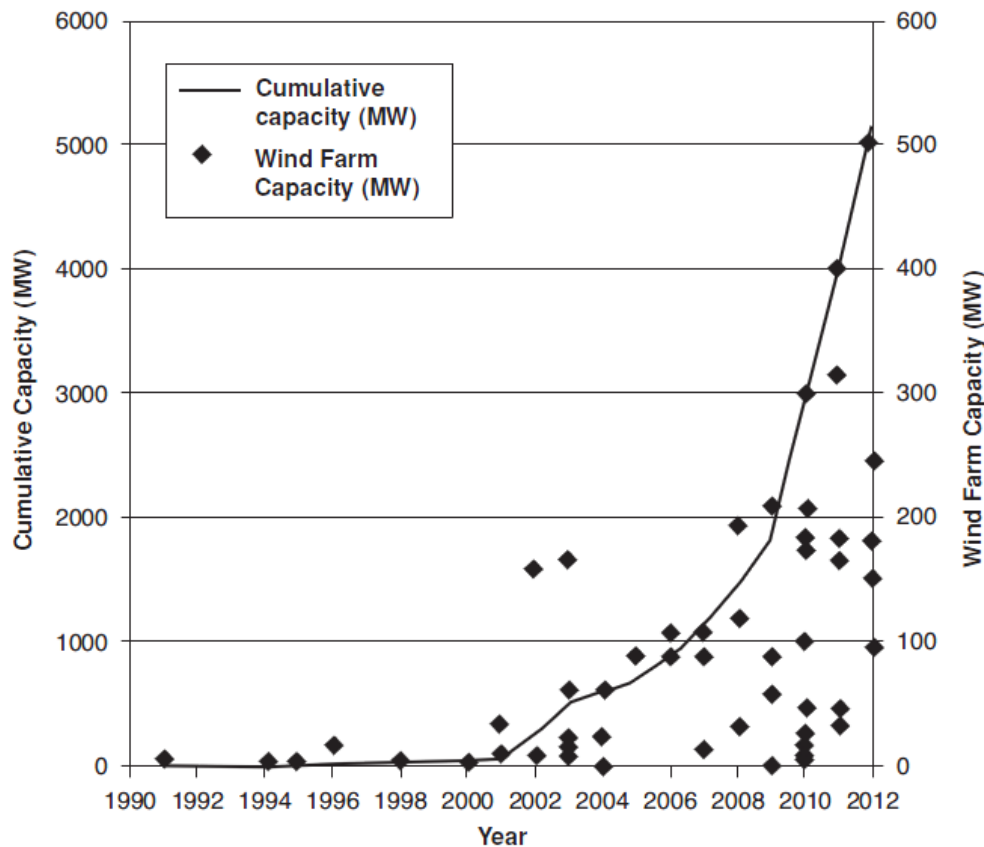


Ilustración 1. Evolución de la potencia mundial de eólica marina.

En el eje de abscisas se representa el tiempo en años, mientras que en el eje de ordenadas izquierdo se indica el valor de la capacidad acumulada en MW, dicha capacidad está representada con la curva de crecimiento exponencial. En el eje de ordenadas derecho se indica el valor de la capacidad instalada por granja eólica, las distintas granjas instaladas se representan a su vez con puntos.

Las predicciones más optimistas prevén que se podrían instalar hasta un total de 80 GW a nivel mundial en el horizonte de 2020, siendo Europa la dueña de tres cuartas



partes de dicha capacidad. La siguiente tabla muestra el actual reparto a nivel mundial de la capacidad total instalada [1]:

Tabla 2. Potencia eólica marina a nivel Mundial. Fuente: Consejo Mundial de la Energía.

PAÍS	2012 [MW]	Total [MW]
Reino Unido	854	2947,9
Dinamarca	46,8	921
China	127	389,6
Bélgica	185	379,5
Alemania	80	280,3
Holanda	0	246,8
Suecia	0	163,7
Finlandia	0	26,3
Japón	0,1	25,3
Irlanda	0	25,2
Corea	3	5
Noruega	0	2,3
Portugal	0	2

Las principales ventajas de los parques eólicos marinos con respecto a los parques en tierra son:

- Mayor velocidad del viento debido a la ausencia de obstáculos.
- Menor cantidad de turbulencias.
- Mayor área de barrido, pues los parques eólicos pueden ser de mayor tamaño.
- Menos restricciones ambientales.
- Otras ventajas a nivel de planificación y evolución a gran escala.

Frente a estas ventajas también hay que destacar el hecho de que los parques eólicos offshore necesitan un capital de inversión adicional respecto a los onshore, asociado con:

- El mayor coste de las subestructuras soporte.



- El mayor coste asociado con las redes de transporte de la energía y de conexión con la red eléctrica.
- El sobre coste asociado con la instalación de los molinos, pues está más limitado que en el caso terrestre y es más vulnerable frente a condiciones climatológicas adversas.
- Mayor coste asociado al mantenimiento de las instalaciones puesto que el acceso a determinadas partes está más limitado al estar estas sumergidas.

Sin embargo, la tendencia actual demuestra que en un futuro no muy lejano, la experiencia adquirida en el campo de la eólica marina permita obtener un ahorro significativo que abarate la instalación offshore obteniendo unos precios relativos iguales a los que tendría una instalación onshore de iguales características.



2.2 PLATAFORMAS DE SOPORTE DE LOS MOLINOS OFFSHORE

La estructura empleada para anclar los molinos eólicos al lecho marino se conoce en general como “foundation”, las que mayores perspectivas de futuro tienen actualmente. Todo molino eólico marino consta de una serie de elementos independientemente de donde vaya emplazado. En la siguiente ilustración podemos ver los dichos elementos:

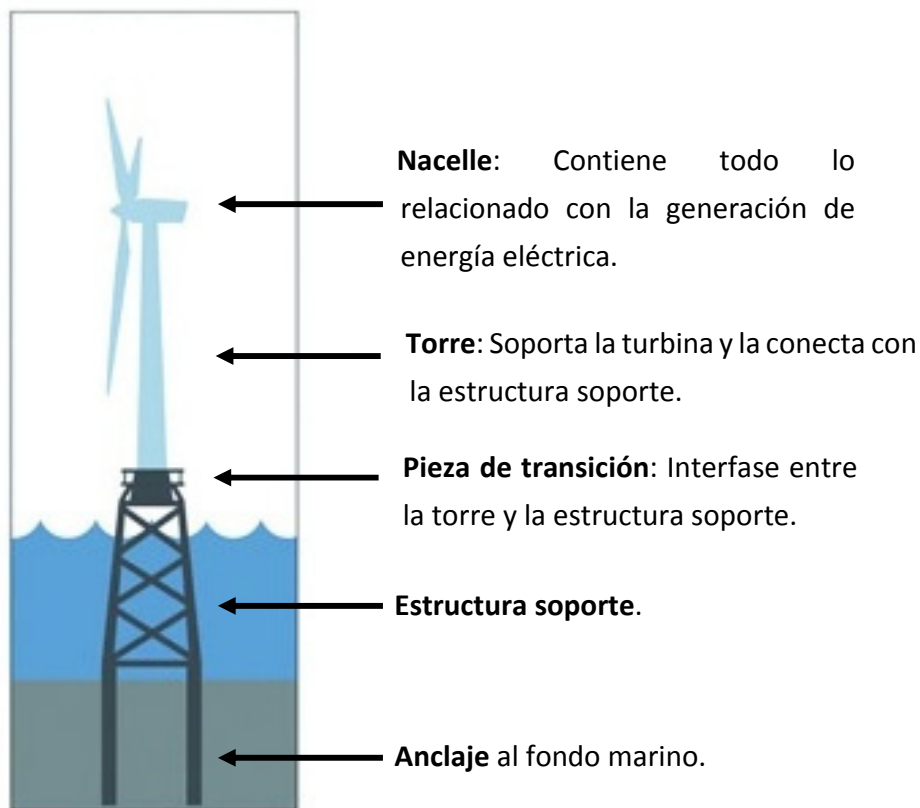


Ilustración 2. Partes principales de un molino offshore.

Existe una gran variedad de soluciones constructivas, principalmente función de la profundidad a la que se encuentra el fondo marino.



La clasificación más habitual es la que sigue:

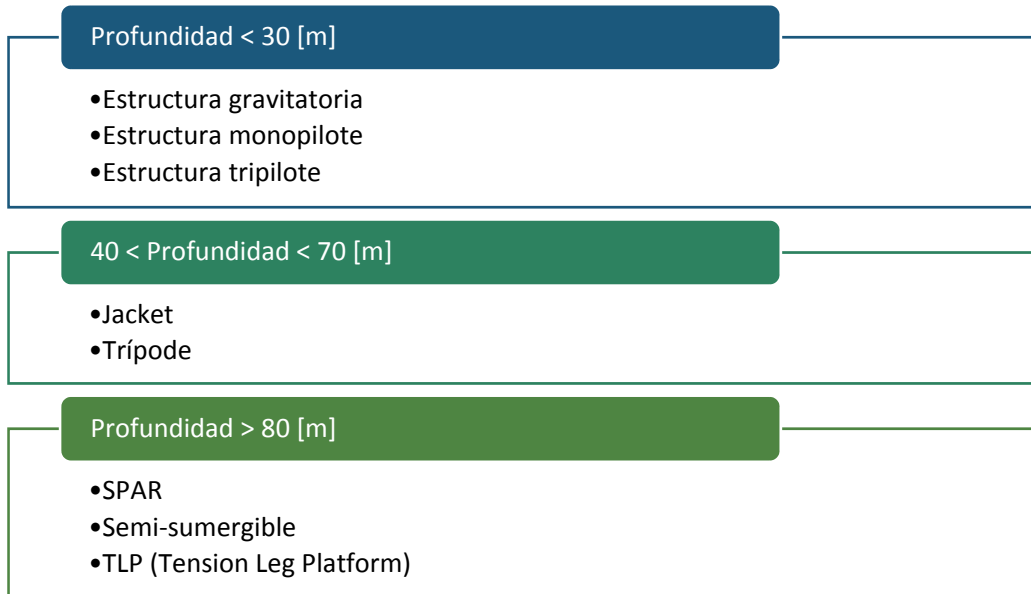


Ilustración 3. Tipos de "foundations" en función de la profundidad del lecho marino.

En las siguientes ilustraciones se pueden ver ejemplos para profundidades menores a los 30 metros:



Ilustración 4. Estructura gravitatoria (Profundidad < 30 metros).

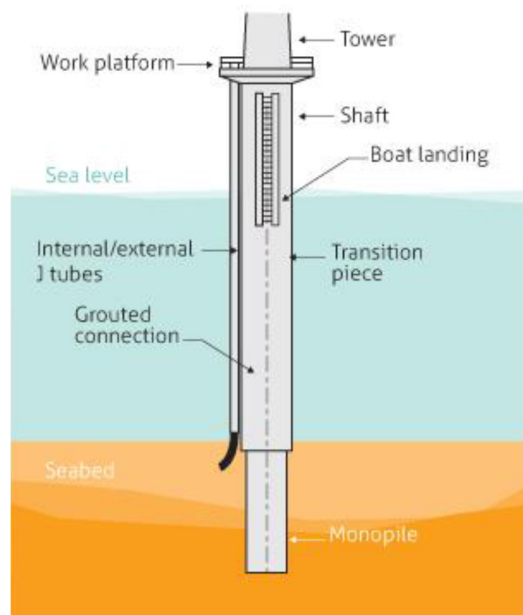


Ilustración 5. Estructura monopilote (Profundidad < 30 m).



Ilustración 6. Estructura tripilote (Profundidad < 30 m).

En la siguiente tabla se presenta una pequeña comparativa entre las estructuras monopilote y las gravatorias en lo referente a las fases de diseño, fabricación, logística, instalación y coste:

Tabla 3. Comparativa entre estructura gravatoria y monopilote.

PROFUNDIDAD < 30 [m]		
	MONOPILOTE	GRAVEDAD
Diseño	▪ Sencillo y ligero.	▪ Diseño más complicado.
	▪ Diseño de pieza de transición complicado.	▪ Pesada y rígida.
	▪ Material: acero.	▪ Material: hormigón.
Fabricación	▪ Fabricación en taller y ensamblaje final en puerto.	▪ Encofrado en puerto cerca del muelle.
Logística	▪ Transporte marítimo en flotación.	▪ Transporte marítimo en flotación o barcaza.
	▪ Botadura sencilla uso de grúas pequeñas tamaño.	▪ Botadura algo más complicada uso de grúas de medio tamaño.
Instalación	▪ Sencilla mediante martillo hidráulico.	▪ Sencilla mediante martillo hidráulico.



	▪ Uso de buques pequeños.	▪ Uso de remolcadores convencionales.
COSTE	▪ Coste bajo. La más barata entre las estructuras fijas.	▪ Coste bajo. Coste de fabricación superior al monopilote.
	▪ La instalación es lo más caro.	

Para profundidades de menos de 30 metros la geometría constructiva más interesante es sin lugar a dudas la de monopilote, pues aparte de ser la más económica es la que más facilidades presenta. Por este motivo es la cimentación más utilizada en las plataformas offshore de petróleo y gas además de en el sector de la eólica marina. Actualmente los parques eólicos que emplean la estructura de monopilote son los siguientes:

Tabla 4. Parques eólicos offshore con estructura monopilote.

PARQUE	PAÍS	OPERADOR	POTENCIA [MW]	MOLINOS
London Array Phase I	Reino Unido	DONG Wind (UK)	630	175
Greater Gabbard	Reino Unido	SSW Renewables	504	140
Sheringham Shoal	Reino Unido	SCIRA	316,8	88
Horns Rev 2	Dinamarca	DONG Energy	209,3	91
Belwind	Bélgica	Belwind	165	55

En las siguientes ilustraciones se pueden ver ejemplos para profundidades que oscilen entre los 40 y 70 metros:



Ilustración 7. Estructura tipo jacket (40 < profundidad < 70 m).



Ilustración 8. Estructura tipo trípode (40 < Profundidad < 70 m).



En la siguiente tabla se presenta una pequeña comparativa entre ambas tipologías en lo referente a las fases de diseño, fabricación, logística, instalación y el coste:

Tabla 5. Comparativa entre las estructuras tipo jacket y trípode.

40 < PROFUNDIDAD < 70 [m]		
	TRÍPODE	JACKET
Diseño	▪ Sencilla y ligera.	▪ La más adecuada para grandes profundidades.
	▪ Pocas soldaduras.	
	▪ Material: acero.	▪ Material: acero.
Fabricación	▪ Fabricación en taller y ensamblaje final en puerto si es necesario.	▪ Fabricación en taller y ensamblaje final en puerto si es necesario.
Logística	▪ Transporte mediante barcaza.	▪ Transporte mediante barcaza.
Instalación	▪ Estructura pilotada.	▪ Estructura pilotada.
	▪ Preparación del terreno para introducir pilotes.	▪ Preparación del terreno para introducir pilotes.
COSTE	▪ Coste alto. Coste inferior de fabricación que las jacket.	▪ Coste alto. Un poco más cara, debido a la gran cantidad de soldaduras

Cabe destacar que, si bien la jacket es un poco más cara, debido a la mayor cantidad de soldadura que se necesita para su fabricación, actualmente se está demostrando que es la mejor solución. Esto se debe a que la estructura de tipo trípode está teniendo muchos problemas de concentración de tensiones y de fatiga en las uniones de los brazos con el fuste que acortan su vida útil.

En las siguientes ilustraciones se pueden ver los tres tipos de estructura más comunes para profundidades mayores a los 80 metros y un ejemplo real de plataforma semi-sumergible:

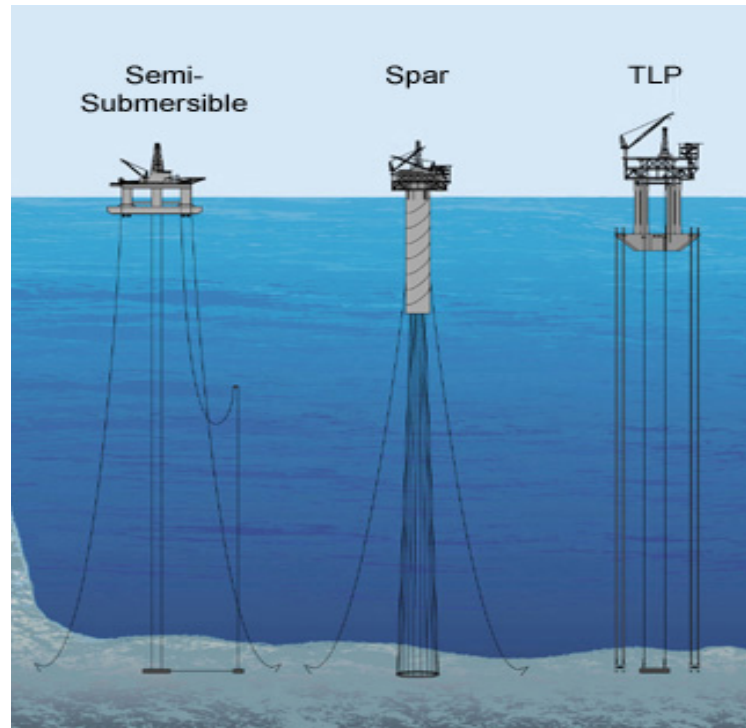


Ilustración 9. Estructuras tipo para Profundidad > 80 m.



Ilustración 10. Ejemplo real de un molino offshore con plataforma flotante.

Actualmente el uso de las plataformas en la eólica marina se distribuye de la siguiente forma [4]:

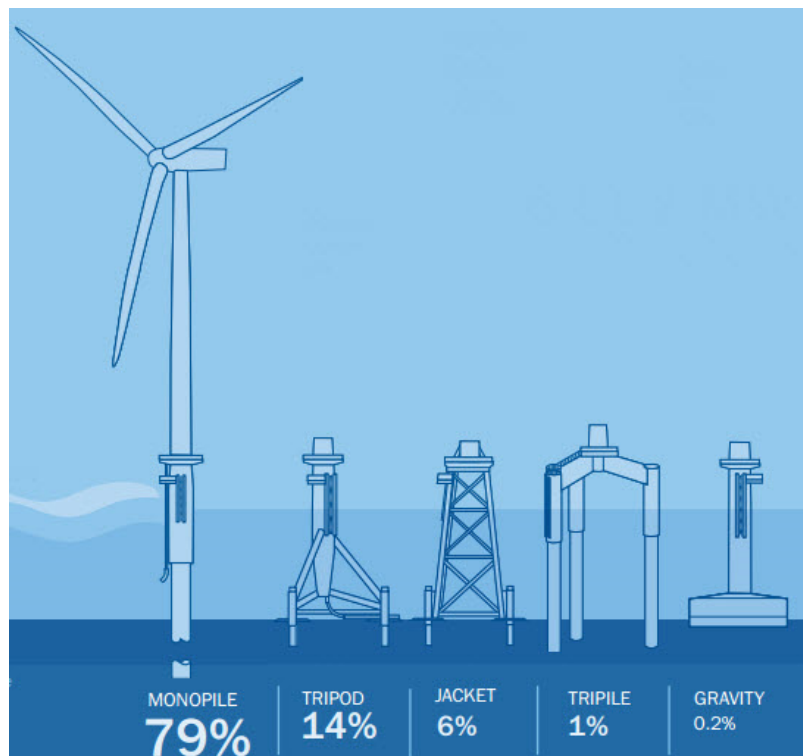


Ilustración 11. Uso de fundaciones actualmente.

Vemos que actualmente la estructura más usada es la de monopilote. Esto tiene sentido, puesto que los costes asociados al transporte de la energía son elevados y una forma de reducirlos a la hora de montar los primeros parques eólicos marinos fue situándolos cerca de la costa, esto hizo que las profundidades del lecho marino no superasen los 30 metros en la gran mayoría de parques eólicos que se han ido montando y por tanto la estructura empleada fuera la de monopilote, pues es la más económica.

Actualmente, en el Reino Unido se han proyectado una serie de granjas eólicas con una capacidad conjunta de unos 20 GW, capacidad que es el triple de la instalada actualmente (6,6 GW). Estos parques se van a instalar en zonas donde la profundidad media del lecho marino ronda los 40 - 50 metros y la estructura que van a emplear es la jacket, por lo que sus perspectivas de futuro son innegablemente muy prometedoras.



2.3 JACKETS. DISEÑO DE JACKETS.

Las perspectivas de futuro de las jackets son más que prometedoras, puesto que se ha proyectado la instalación de una serie de parques de eólica marina en el Reino Unido con una capacidad conjunta que es igual al triple de la capacidad actual. Debido a la gran inversión de capital que esto supone es un aspecto clave el disponer de una serie de herramientas para poder analizar los distintos diseños de las jackets y poder escoger en función de cada caso el diseño más adecuado para que cumpla con las restricciones de carga última y fatiga que exige la normativa actual.

Existen múltiples tipologías de jackets, siendo las variables más comunes donde se diferencian las siguientes:

- Patrón de los brazos
- Número de niveles de brazos
- Número de patas
- Geometría de la pieza de transición
- Longitud de los pilotes
- Método de pilotado (postpilotado o prepilotado)
- Tipos de nudos (Soldados o de función)
- Tipo de acero
- Método de fabricación de los tubos
- Huella de la jacket (superficie que abarca la parte inferior de las patas)

A continuación se presentan algunos de los diseños más comunes en la actualidad.

2.3.1 Patrón de los brazos

En la siguiente ilustración se resumen los principales patrones de brazos que se suelen emplear en eólica marina:

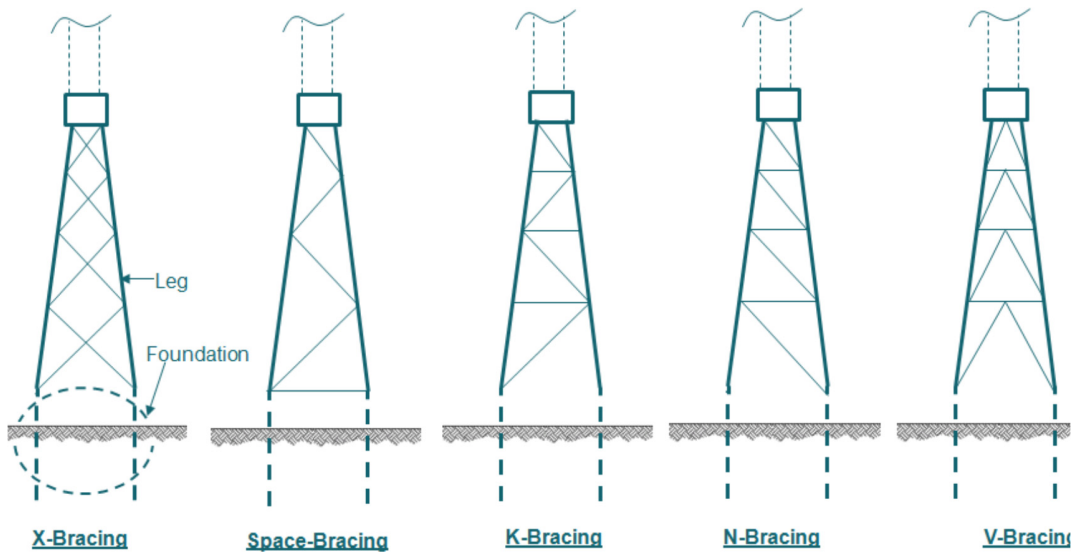


Ilustración 12. Patrones de barras más usados en las jackets.

En la siguiente ilustración se resumen las principales ventajas e inconvenientes que presenta estos patrones:

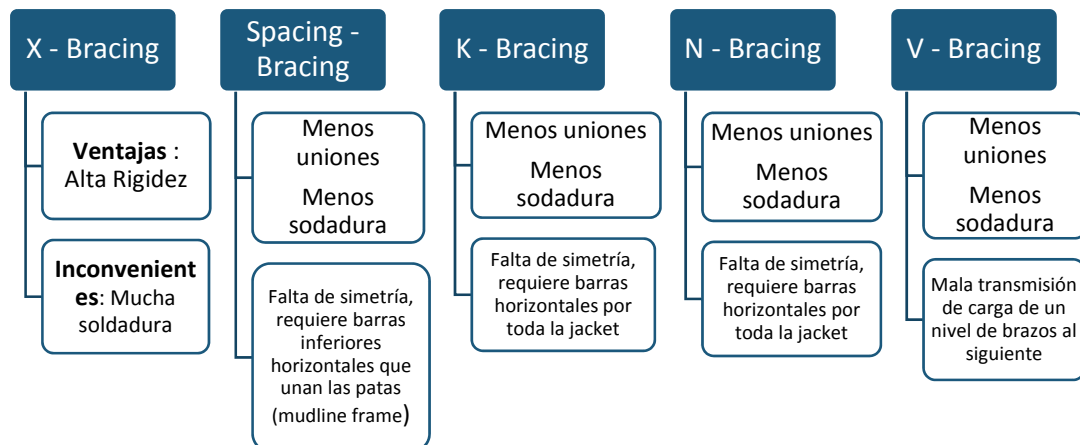


Ilustración 13. Comparativa de las ventajas (arriba) y desventajas (abajo) de los distintos patrones de brazos.



El patrón X-Bracing es el más usado, y no solo para las jackets en la eólica marina, sino para todo tipo de jackets offshore. Es el patrón más estudiado y con el que se tiene más experiencia. Normalmente los beneficios asociados a la mayor rigidez que ofrece respecto al resto de patrones superan los inconvenientes de una mayor cantidad de soldadura, que se puede corregir con diseños que eviten nudos muy complejos.

2.3.2 Cantidad de niveles de brazos:

Dependiendo de la altura que tenga la jacket en cada caso concreto se puede emplear distinto número de niveles de brazos. En los diseños actuales el número de niveles suele oscilar entre tres y cinco niveles. En la siguiente ilustración se pueden ver los diseños de jackets con tres y cuatro niveles:

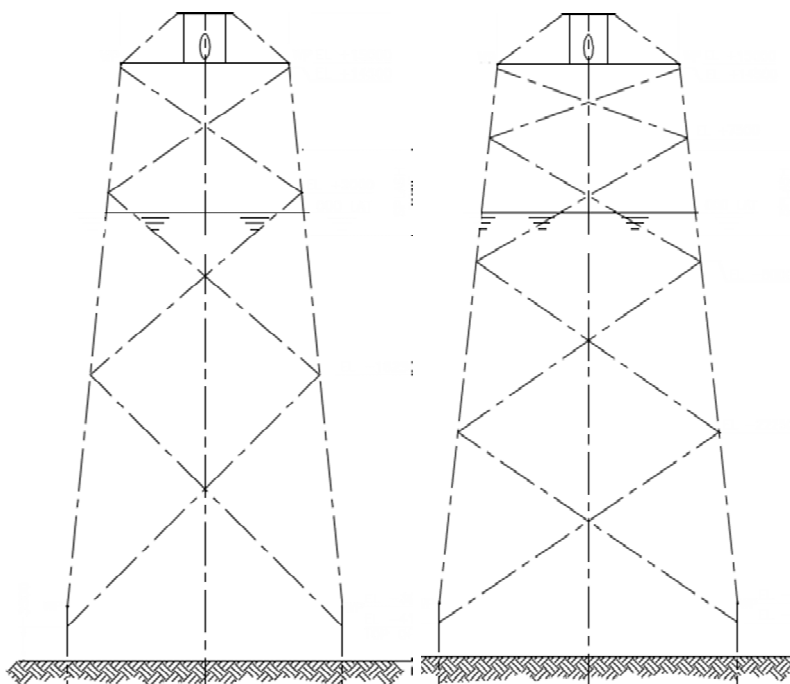


Ilustración 14. Diseño conceptual de una Jacket de 3 niveles (izquierda) y de 4 niveles (derecha).



2.3.3 Número de patas

Existen diseños que van desde tres patas hasta ocho. Por un lado, un diseño con muchas patas permite emplear tubos de dimensiones menores y por tanto con uso mas extendido, cosa que disminuye su coste. Por otro lado el uso de muchas patas también implica un mayor número de uniones soldadas.

En la siguiente tabla se compara una jacket de tres patas frente a una de cuatro:

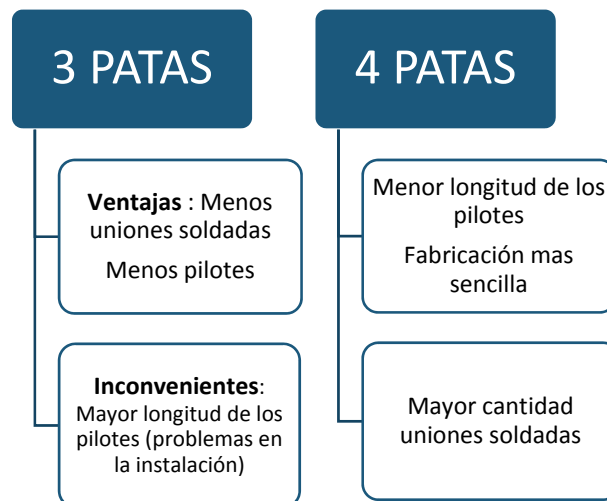


Ilustración 15. Comparativa entre jackets de 3 y 4 patas.

2.3.4 Pieza de transición

Es una parte muy importante en el diseño de la jacket. Cuanto menor sea su base mayor será el esfuerzo al que estarán sometidos los brazos de la pieza de transición, pues el momento generado por el giro de la turbina y el arrastre del viento es elevado. La base de la pieza de transición es la más castigada a fatiga por lo que es muy importante el tamaño que tiene.

El tamaño de dicha base va a venir íntimamente relacionado con el ángulo que forman entre sí las patas de la jacket y el punto de corte imaginario de sus ejes, puesto



que según sea el valor de este ángulo y el punto de intersección de sus ejes el tamaño de la base de la pieza de transición será mayor o menor.

En la siguientes ilustraciones podemos ver el punto de corte imaginario de los ejes de las patas y las partes principales de una pieza de transición:

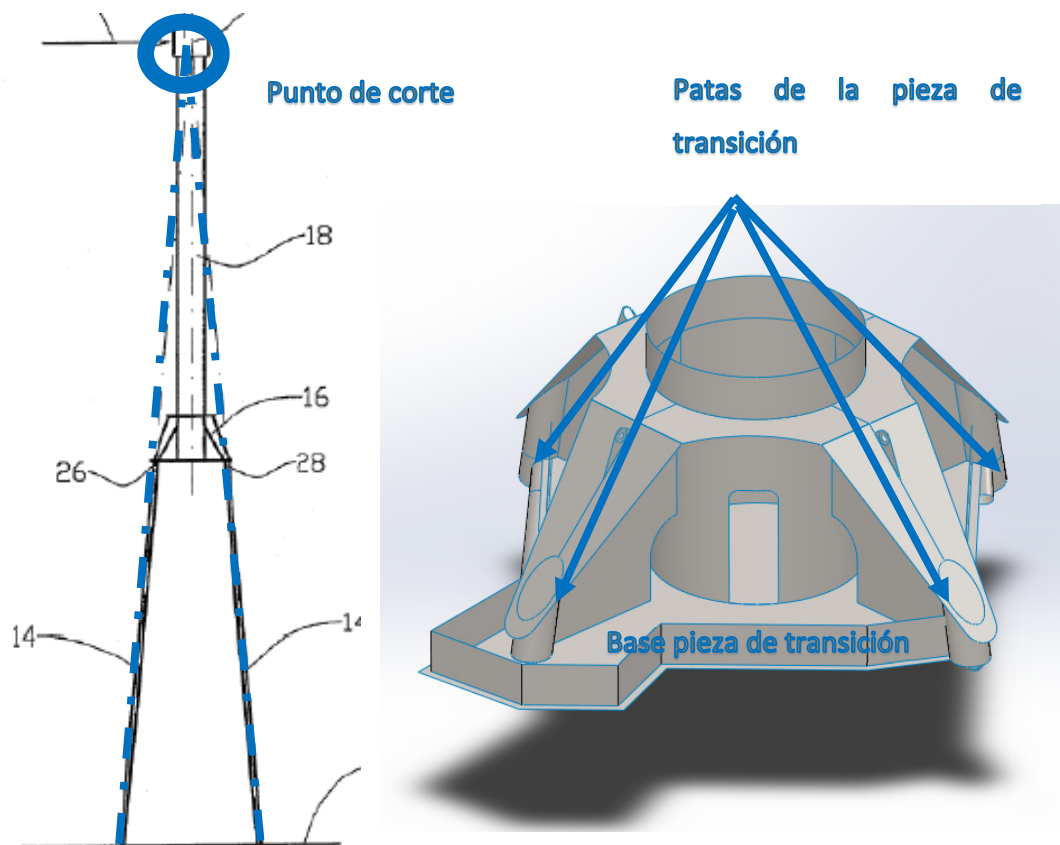


Ilustración 16. Punto de intersección de los ejes de las patas y partes de una pieza de transición.

En los diseños más actuales, los ejes de las patas se cortan en el centro del eje de la turbina, en el Nacelle. Esto es así porque teóricamente, para una carga de viento aplicada en el centro de la turbina, la carga resultante en las patas de la jacket minimiza la carga en las barras de la pieza de transición.



2.3.5 Tipos de nudos

Existen dos opciones para fabricar los nudos: fabricarlos mediante uniones soldadas de varios tubos u obtenerlos por fundición.



Ilustración 17. Nudos de fundición (izquierda) y soldado (derecha).

Los nudos soldados presentan más problemas a fatiga que los de fundición, pero son los que se emplean en la mayoría de los casos debido a la alta complejidad que conlleva fabricarlos mediante fundición, además de ser más baratos y permitir valores de más de 1,5 metros de diámetro para los tubos.

2.3.6 Resistencia del acero

Respecto al tipo de acero a emplear existen principalmente dos posibilidades [5]:

- Acero de resistencia normal (menor o igual a 355 [MPa]). Ejemplos: 355 NL, 355 ML, 355 G10 Z35.
- Acero de alta resistencia (mayor a 355 [MPa]). Pudiendo llegar a los 1300 [MPa].

Los aceros de elevada resistencia presentan mayores dificultades a la hora del soldado, puesto que normalmente es necesario un precalentamiento. Debido a esto, se



suele evitar su uso salvo que sea necesario. Según cada caso particular se debe valorar si merece la pena o no.

A modo de referencia, los proyectos desarrollados en la costa inglesa, en el mar del Norte, han empleado aceros de resistencia normal, puesto que las condiciones ambientales no son tan agresivas como para que merezca la pena emplear aceros de alta resistencia.

2.3.7 Huella de la jacket

La huella de la jacket hace referencia al tamaño que tiene la misma en su base. Cuanta más pequeña sea la huella de la jacket menor suele ser su peso, si bien es necesario un pilotaje de mayor profundidad. Por otro lado, las jackets con una huella mayor son más pesadas pero a cambio el pilotaje necesario es más corto. Para poder decidir el valor óptimo de la huella de una jacket es necesario hacer previamente un estudio geotécnico del terreno y en base a los resultados dimensionarla de la forma más conveniente.



En la siguiente imagen se puede ver la planta de una jacket con la huella de longitud genérica L indicada:

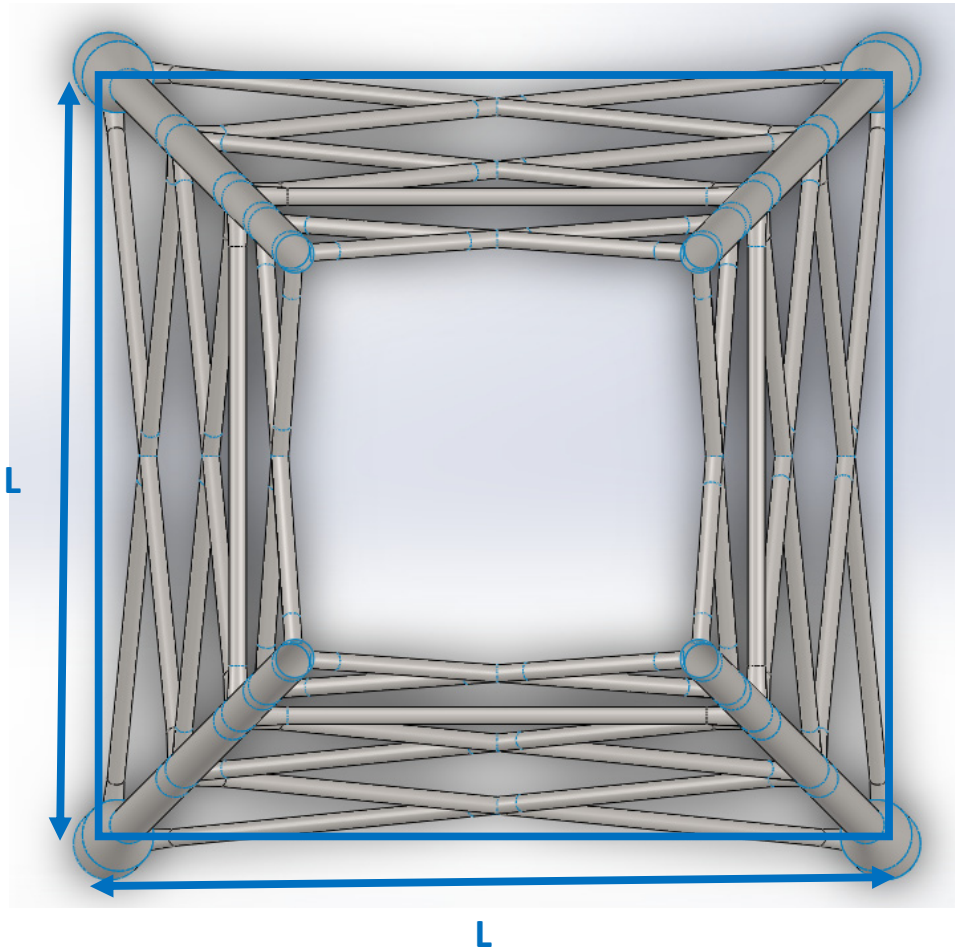


Ilustración 18. Huella de una jacket genérica de 4 patas. Vista en planta.

A modo de referencia, los tamaños típicos de la huella de las jackets empleadas en el mar de norte oscilan entre los 18 y los 26 metros.



2.4 TENSIÓN DE VON MISES. ANÁLISIS A CARGA ÚLTIMA (ULS)

Dado que uno de los análisis a los que se debe someter cualquier jacket consiste en un análisis de estado límite último, es decir a carga última, en este apartado se resume en que consiste la tensión de Von Mises, ya que es el parámetro a controlar a la hora de comprobar si una jacket cumple o no las restricciones de carga última.

La tensión de Von Mises es una magnitud física proporcional a la energía de distorsión. En ingeniería estructural se usa en el contexto de las teorías de fallo como un indicador de un buen diseño para materiales dúctiles.

La tensión de Von Mises se calcula a partir de las tensiones principales del tensor de tensiones para un punto de un sólido deformable, mediante la expresión:

$$\sigma_{VonMises} = \sqrt{\frac{(\sigma_1 - \sigma_2)^2 + (\sigma_2 - \sigma_3)^2 + (\sigma_3 - \sigma_1)^2}{2}}$$

Siendo σ_1, σ_2 y σ_3 las tensiones principales, y habiéndose obtenido la expresión a partir de la energía de distorsión.

La tensión de Von Mises y el criterio de fallo elástico asociado debe su nombre a Richard Edler von Mises (1913), que propuso que un material dúctil sufría fallo elástico cuando la energía de distorsión elástica rebasaba cierto valor.

Debido a esto, cuando se analicen los nudos de la jacket, para valorar si cumplen o no con las restricciones a carga última, se analizará el valor máximo de Von Mises en todo el nudo, no pudiendo superar un determinado valor. Esto se verá con más detalle en capítulos posteriores.



2.5 ANÁLISIS A FATIGA (FLS)

El otro análisis con el que se evalúa la calidad del diseño de una jacket es el análisis del estado límite a fatiga, exigiéndole que aguante una cantidad mínima de ciclos para asegurarse una vida media de la estructura que permita rentabilizar la inversión y ofrecer unos precios de la energía que puedan competir con el resto de fuentes de energía.

Desde muy antiguo se ha constatado que los materiales rompen más fácilmente bajo la acción de cargas variables que con cargas constantes. Es conocido que un metal puede fallar bajo ciclos suficientes de esfuerzo repetido, aun cuando el máximo esfuerzo aplicado sea considerablemente menor que la resistencia del material determinada por una prueba estática (límite de fluencia).

El fallo a fatiga se inicia en algún punto donde la concentración de esfuerzo es alta debido a la forma del elemento o alguna imperfección. Los agujeros a través del material, muescas en la superficie, defectos internos, tales como vacíos, grietas o inclusiones, o aun defectos menores causados por el ataque corrosivo en las fronteras de los granos, pueden ser fuentes del fallo a fatiga. Con esfuerzos repetidos, una micro grieta se inicia en uno de esos núcleos de fatiga y crece hasta que no quede metal sólido suficiente para soportar la carga. El resultado es una falla quebradiza de forma completa y repentina.

La característica más peligrosa del fallo por fatiga, es que se producen con deformaciones pequeñas del sistema estructural, incluso en materiales con comportamiento dúctil que, con carga estática, se deforman mucho antes de romper. Así pues, apenas hay indicios previos de que se va a producir una rotura por fatiga, a menos que se detecte la presencia de la grieta mediante algún sistema de inspección. Por otra parte, las grietas producidas por las tensiones de fatiga son generalmente finas y de difícil detección, aun cuando se encuentren próximas a producir la rotura de la pieza.



Ilustración 19. Ejemplo de rotura por fatiga en la unión soldada entre 2 railes.

Las grietas de fatiga suelen iniciarse en alguna fuente local de concentración de tensiones, preferentemente en la superficie de las piezas. En el caso de materiales con comportamiento dúctil sometidos a tensiones estáticas, el efecto de las muescas, entallas, etc. es relativamente poco importante cuando el nivel medio de tensión es bajo. En este caso, las tensiones plásticas localizadas en puntos cercanos a la fuente de concentración de tensión se liberan por deformación plástica. Por el contrario, en el caso de tensiones de fatiga el fenómeno de deslizamiento progresivo puede producir el aumento del tamaño de las grietas y finalmente la rotura de la pieza.

La fatiga tiene naturaleza estadística. Para la resistencia a la fatiga hay relativamente gran variación en el número de ciclos necesarios para causar el fallo a un nivel de esfuerzo máximo dado. Parte de la dispersión puede atribuirse a errores experimentales, como una mala alineación de la probeta o una determinación inexacta del valor del esfuerzo; pero lo que parece cierto es que la dispersión es una característica inherente del comportamiento de la fatiga [6].

En el caso de los metales se desprecia la influencia de la velocidad de variación de las tensiones, es decir que se supone que el daño por fatiga que se produce a una pieza en N ciclos es el mismo independientemente del tiempo que se tarde en alcanzar dicho número N. Esto no es estrictamente cierto, sin embargo esta hipótesis simplificativa se justifica por la baja histéresis que presentan los metales en el ciclo tensión-deformación;



es decir, pequeña energía generada en cada ciclo debido al rozamiento interno entre cristales y crecimiento de grieta. Por otra parte, los metales que se emplean en aplicaciones estructurales son a su vez muy buenos conductores del calor, por lo que esa energía se distribuye y disipa rápidamente, y a su vez sus propiedades mecánicas no se ven prácticamente afectadas por los pequeños incrementos de temperatura resultantes.

Hay tres teorías principales de estudio de la fatiga en función de las características que presente:

- Fatiga de altos ciclos o método de tensiones (*stress-life*)
- Fatiga de bajos ciclos o método de deformaciones (*strain-life*)
- Mecánica lineal de la fractura (MLF)

La mayoría de los elementos de sistemas mecánicos se diseñan para ciclos altos o para duración ilimitada (en el sentido de, supuestamente, infinita). Para ello se hace uso de las curvas $s-N$ (*stress – N^o ciclos*), que representan la vida prevista frente a la tensión aplicada para un material determinado, y generalmente, sometido a flexión rotativa.

Este modo de proceder es adecuado para valores de la tensión máxima relativamente reducidos, en comparación con la tensión de rotura, y las duraciones correspondientes se miden desde algunos miles de ciclos en adelante.

Existe una gran variedad en cuanto a los valores límite para usar un método de altos o bajos ciclos. Típicamente, se ha venido utilizando el análisis de tipo “Strain Life” para un número de ciclos relativamente bajo y altas tensiones, si bien también ofrece resultados muy buenos para un alto número de ciclos, cuando las tensiones son elevadas [7].

En los últimos treinta años se ha realizado un gran esfuerzo en la línea de predicción del comportamiento a fatiga mediante el estudio de la deformación, en lugar de la tensión. La teoría de fatiga con bajo número de ciclos o *fatiga de ciclos bajos (low-cycle fatigue)* estudia los fenómenos estrechamente relacionados con el comportamiento



elastoplástico de los materiales. Es un aspecto muy importante en el diseño de sistemas estructurales con alto nivel de tensión, como es el caso objeto de estudio.

Por otra parte, a veces es necesario realizar un estudio de fenómenos locales en fatiga, en los que el enfoque tensional clásico no es adecuado y se debe recurrir a modelos de deformación local, que complementan a los métodos tensionales. En el caso de la fatiga, la aplicación de técnicas de Mecánica de la Fractura permite conocer, con sus limitaciones, cómo evoluciona en el tiempo el crecimiento de grietas y por ello complementa muy eficazmente a los cálculos convencionales de duraciones y tensiones.

En ambos casos, alternativos al método habitual que emplea curvas s-N, la necesidad de disponer de valores muy precisos de las tensiones y deformaciones, así como de una serie de nuevas propiedades de los materiales, a veces difíciles de encontrar o de obtener, hacen que su utilización práctica rentable en la industria esté limitada a los casos citados: fatiga de ciclos bajos y análisis de fatiga en problemas locales.

2.5.1 Elección del método de estudio

La experiencia en el sector del petróleo y el gas, que lleva empleando las estructuras tipo jacket desde sus orígenes en 1947, dice que las zonas que más sufren a fatiga en una jacket son los nudos. Además en los últimos años, con el auge de la eólica marina se han hecho numerosos estudios relacionados con el tema que coinciden con que los nudos los elementos más castigados por la fatiga [8].

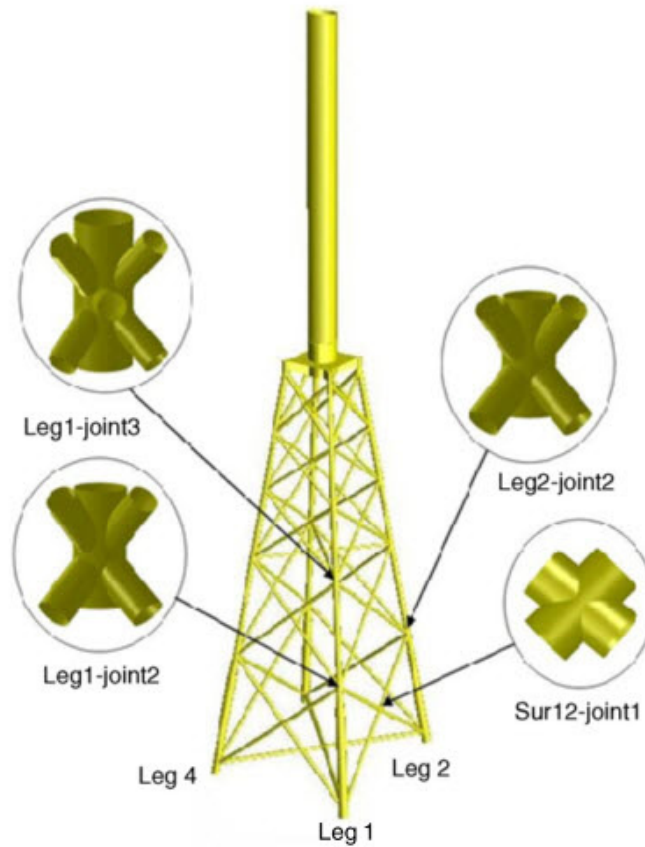


Ilustración 20. Ejemplos de nudos típicos que sufren problemas a fatiga.

Dado que las tensiones en los nudos son considerables, el método empleado será el de “Strain life” puesto que a pesar de que el número de ciclos (10^7) es un poco superior al típico, si las tensiones son elevadas, como es el caso el método de altas tensiones no sirve, mientras que el de bajas tensiones o “Strain life” proporciona resultados fiables.





Capítulo 3. MODELADO Y ANÁLISIS DE LA JACKET

CONTENIDO

<i>3.1 Diseño de la jacket a analizar.....</i>	<i>45</i>
<i>3.2 Modelización tridimensional de la jacket</i>	<i>48</i>
<i>3.3 Análisis de la jacket.....</i>	<i>51</i>



En este capítulo se analizará mediante la herramienta de elementos finitos ANSYS si la jacket cumple con las restricciones exigidas a carga última y a fatiga. Se comprobará que los nudos son la parte más solicitada de la jacket, quedando por tanto demostrado que es necesario optimizar su diseño.

3.1 DISEÑO DE LA JACKET A ANALIZAR

El diseño de la jacket cuyos nudos se optimizan en el presente proyecto viene dado por una empresa del sector. La empresa ha facilitado únicamente las dimensiones de la jacket, por lo que antes de analizarla, ha sido necesario hacer un modelo tridimensional de la misma.

3.1.1 Dimensiones características de la jacket a analizar

Las principales características de la jacket son las siguientes:

- 45 metros de altura, sin tener en cuenta la pieza de transición.
- 4 patas.
- Patrón X – bracing para los brazos.
- 3 niveles de brazos, con rigidizadores horizontales en la parte superior del nivel intermedio.
- Nudos de soldadura.
- Acero estructural 355 NL para toda la estructura excepto para los injertos donde se empleará acero estructural 355 G10 Z35.
- Huella de 23 metros.
- Turbina “Alstom Haliade 6 MW”.

En las siguientes imágenes puede verse un modelo, de realización propia, en tres dimensiones de la jacket:

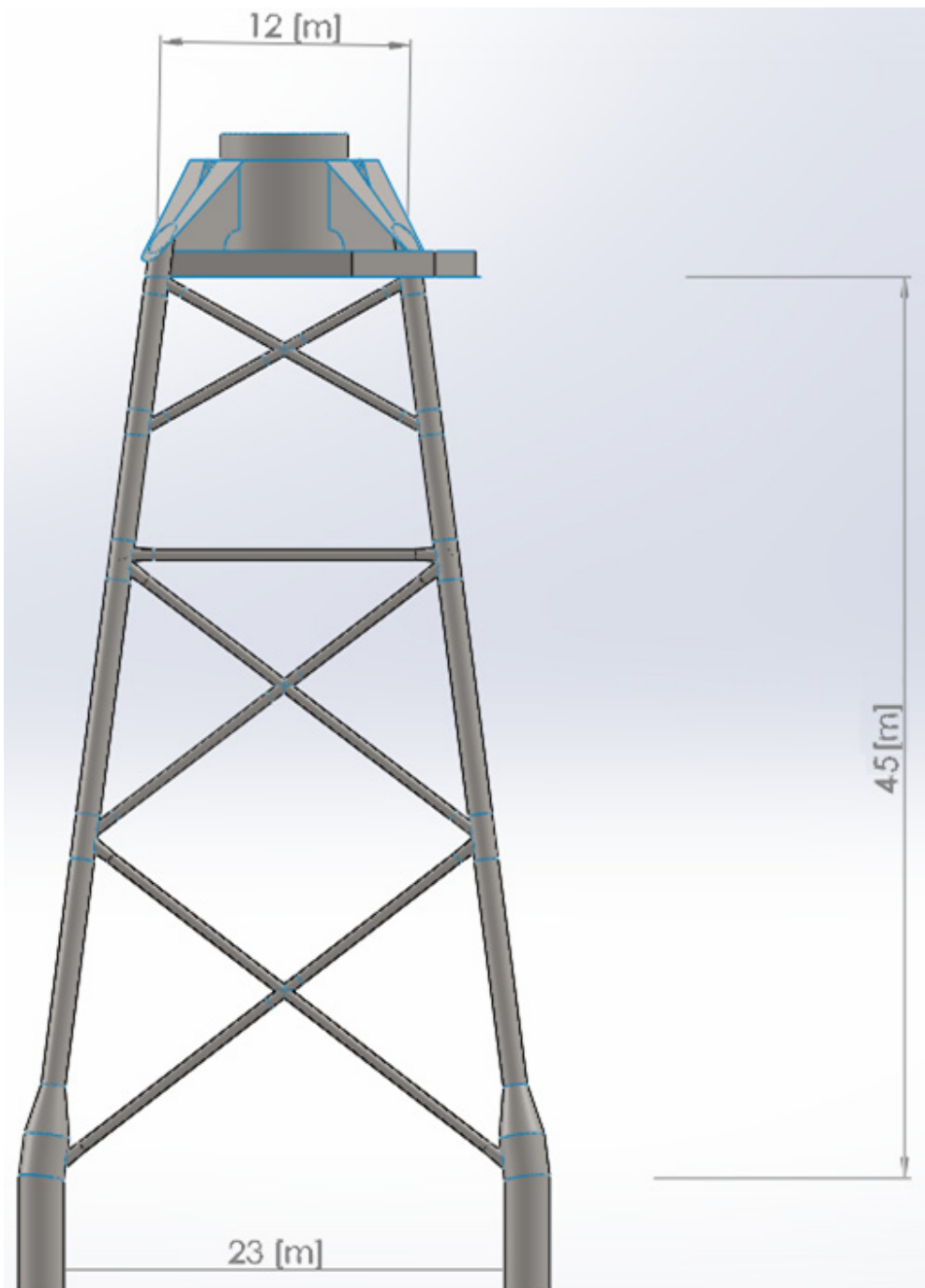


Ilustración 21. Diseño final de la jacket. Fuente: elaboración propia.

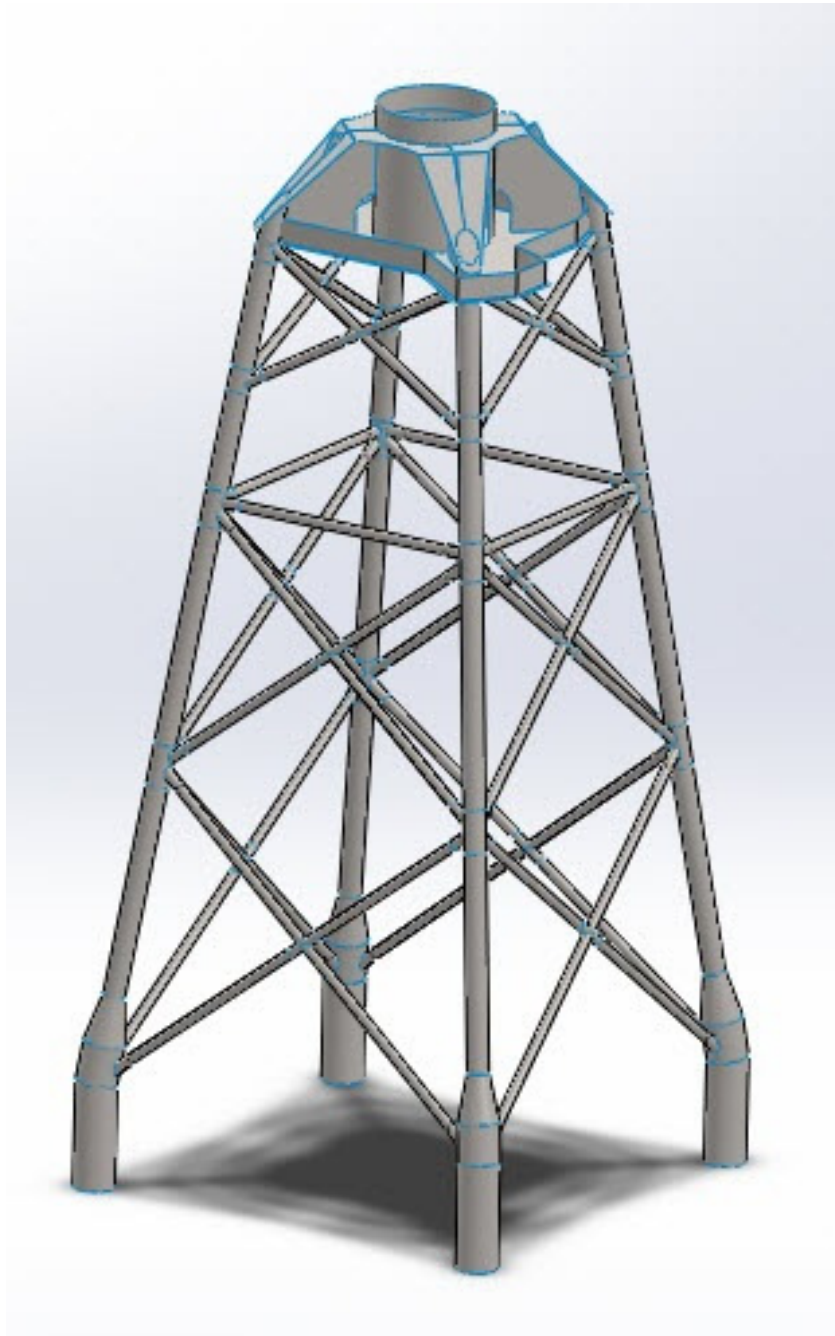


Ilustración 22. Perspectiva isométrica del diseño final de la jacket. Fuente: elaboración propia.



3.2 MODELIZACIÓN TRIDIMENSIONAL DE LA JACKET

Como se ha dicho, previo paso al análisis de la jacket a carga última y a fatiga, ha sido necesario realizar la modelización tridimensional de la misma, puesto que solo se disponía de sus planos. En primer lugar dicho modelo se hizo empleando el módulo de diseño de ANSYS 15.0 “*Design Modeler*”.

En la siguiente ilustración puede verse el modelo hecho con “*Design Modeler*” de la jacket:

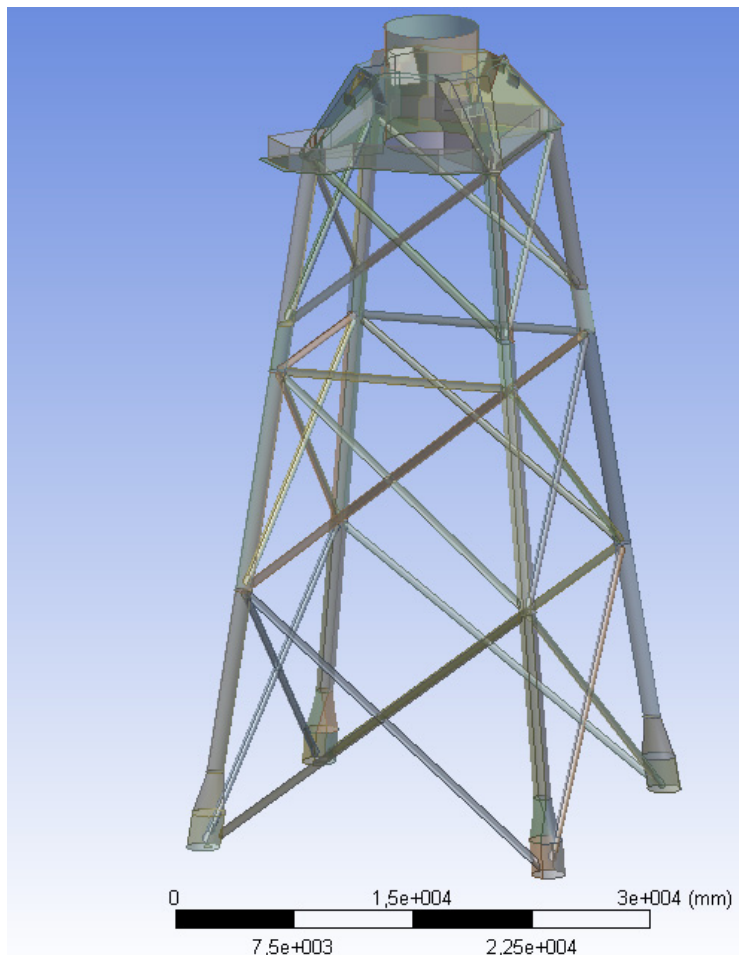


Ilustración 23. Modelo tridimensional de la jacket con Design Modeler.



Una vez hecho el modelo, se trató de realizar un análisis sencillo del mismo, para verificar que no se había cometido ningún error en el proceso de modelado. Este modelo no pudo ser simulado puesto que existían problemas en algunas partes complejas de la geometría, como por ejemplo la parte cónica de las patas, en su zona inferior. La falta de documentación y tutoriales respecto a la modelización de estructuras con formas similares a las de la jacket no facilitaron en gran medida la identificación de dichos problemas, siendo necesario desechar este modelo. Se trató de ir comprobando el modelo por bloques de piezas, pero debido a la gran cantidad de operaciones necesarias para modelar las más de 80 piezas de la jacket, esta tarea fue en vano.

Dado que ANSYS dispone de módulos de importación de geometrías para los formatos de diseño de las principales herramientas de modelado (SolidWorks, CATIA, ABAQUS...), se decidió emplear la herramienta CAD “SolidWorks 2014 SP.0” para la realización del modelo de la jacket. SolidWorks tiene una interfaz de usuario mucho más intuitiva. Esto sumado a la gran cantidad de tutoriales, facilitó enormemente la laboriosa tarea de modelización de las más de 80 piezas que conforman la jacket.

En la siguiente ilustración puede verse el modelo completo de la jacket junto con la pieza de transición. Todo ello modelado en SolidWorks, previa importación a ANSYS para su análisis a carga última y fatiga:

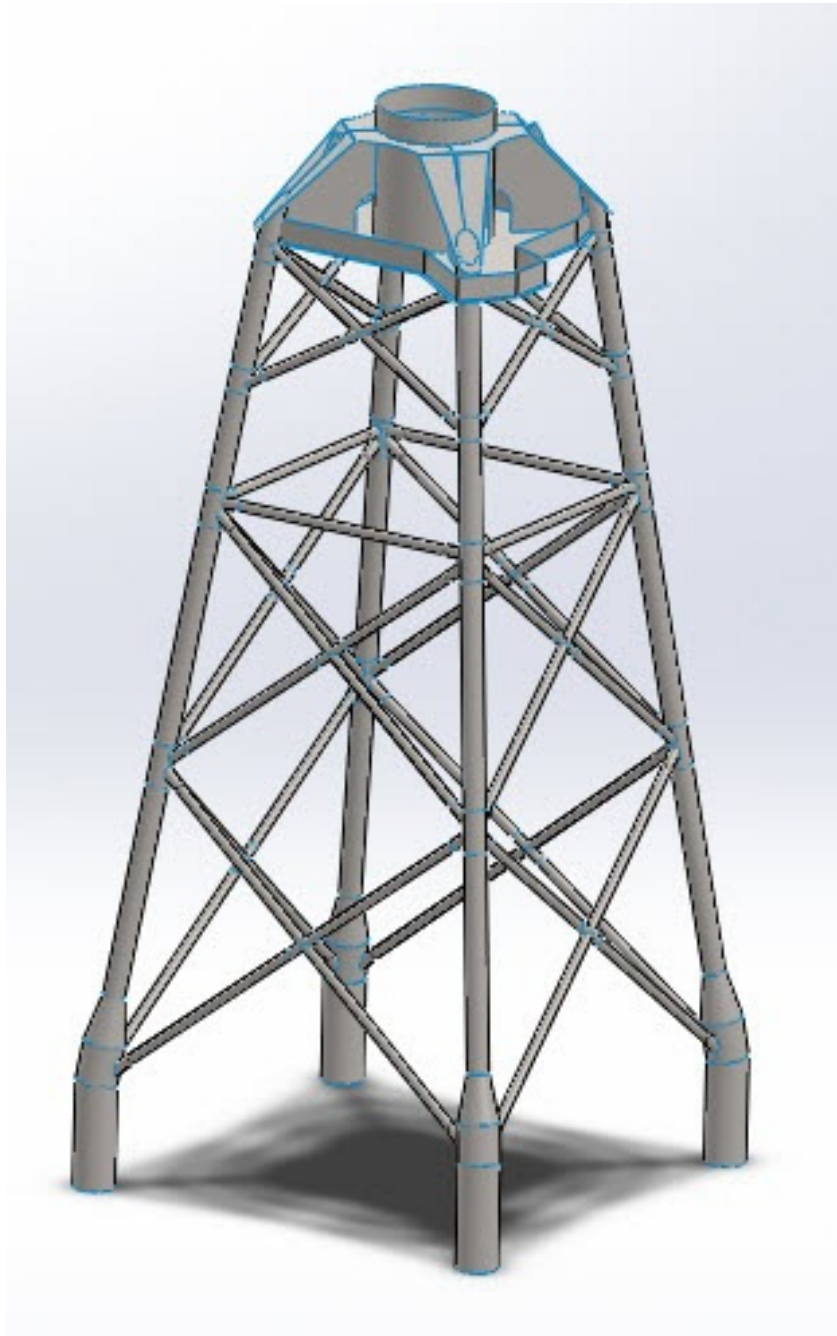


Ilustración 24. Modelo tridimensional de la jacket a optimizar.

En conclusión, para la modelización de elementos de geometría sencilla y con pocas piezas, el módulo de ANSYS “*Design Modeler*” puede ser suficiente, pero en cuanto el



modelo comienza a complicarse, siendo necesario por ejemplo definir la conicidad de algún elemento, como sucede en la zona inferior de las patas de la jacket el “*Design Modeler*” comienza a volverse demasiado complejo, y más aún cuando se quiere parametrizar parte del modelo. Para casos donde suceda esto o el número de piezas a modelar sea muy elevado, se recomienda el uso de otro software CAD como puede ser SolidWorks, CATIA o también ABAQUS puesto que el modelado es mucho más intuitivo y sencillo, ahorrándose tiempo y problemas innecesarios. La integración entre la mayoría de las herramientas CAD de modelado con ANSYS es impecable, siendo posible la importación de parámetros, características del material...

3.3 ANÁLISIS DE LA JACKET

3.3.1 ANSYS *Workbench*

Para el análisis tanto a carga última como a fatiga y para la posterior optimización de los nudos de la jacket, se ha empleado la herramienta de análisis de EF de ANSYS, “ANSYS *Workbench*”. Esta herramienta dispone de una serie de módulos que permiten muchos tipos de análisis, siendo únicamente necesario un modelo virtual de la estructura que se quiera estudiar. Los principales análisis que se pueden emplear son:

- Análisis estáticos de cargas
- Análisis dinámicos de cargas
- Análisis térmicos
- Análisis a fatiga
- Análisis electromagnéticos
- Análisis modales
- Análisis de vibración
- Análisis de Pandeo
- Análisis computacional de fluidos



En la siguiente ilustración puede verse la interfaz de ANSYS *Workbench* con los análisis indicados anteriormente:

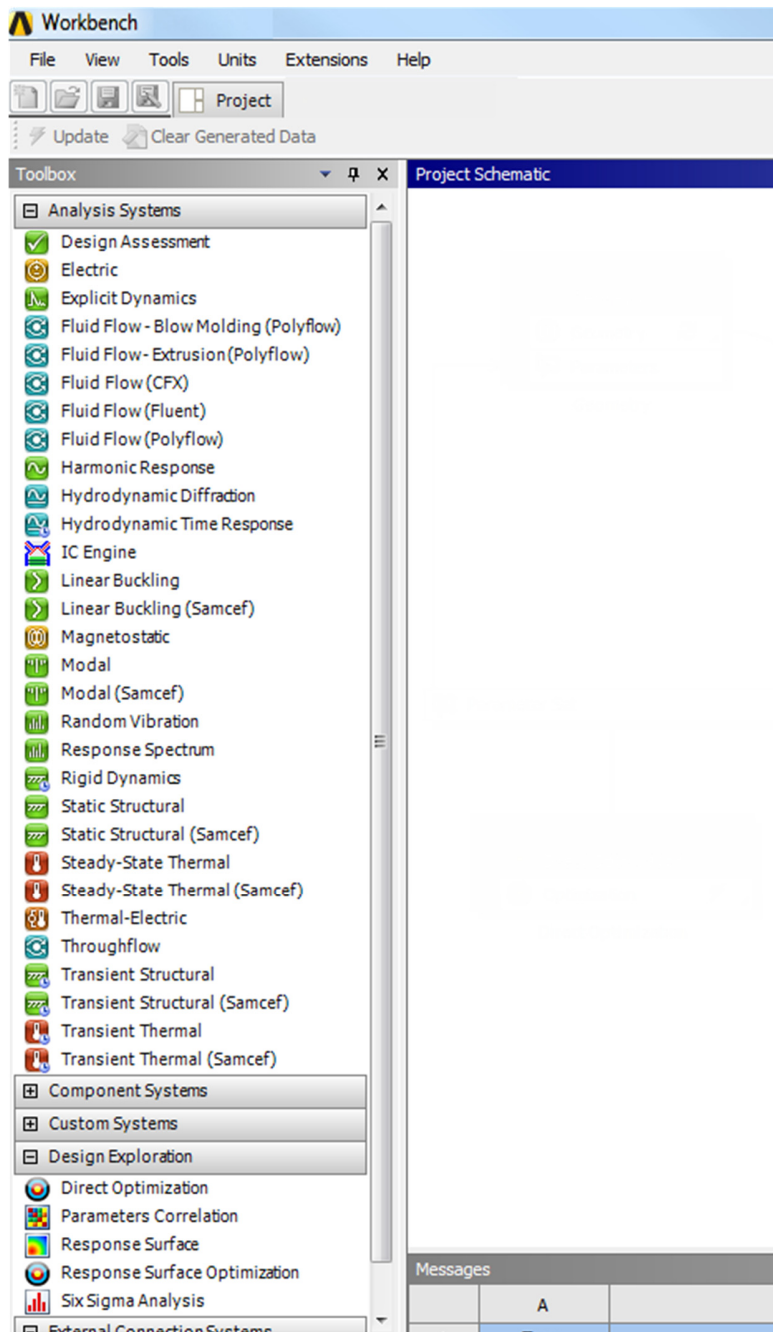


Ilustración 25. Herramientas de ANSYS Workbench.



3.3.2 Estados límite a estudiar y cálculo de fuerzas y momentos

Las cargas a las que está sometida la jacket a carga última y a fatiga han sido proporcionadas por la misma empresa que facilitó los planos de la jacket. Junto con estas cargas, la empresa incluye un resumen de la normativa en la que se ha basado para el cálculo de las mismas.

A continuación se pretende resumir dicho informe con el objetivo de indicar que ha tenido que tener en cuenta la empresa para el cálculo de las cargas y cual ha sido la normativa que ha tenido que emplear.

Las normativas que afectan al diseño de cualquier estructura para aplicaciones de eólica marina son las DNV (Det Norske Veritas) [9] [10]. Dichas normativas recogen el procedimiento general que ha de seguirse a la hora de diseñar cualquier estructura soporte para eólica offshore, como es la jacket en el caso que nos ocupa.

El procedimiento descrito para diseñar la estructura, pasa por dos análisis fundamentales:

- 1) Análisis ULS (Ultimate limit state, análisis de estado límite último). Con este tipo de análisis se comprueban los siguientes puntos:
 - a) Estrés máximo en la estructura
 - b) Pandeo
 - c) Concentración de estrés en uniones tubulares

- 2) Análisis FLS (Fatigue Limit State, Análisis de estado límite a fatiga). Con este tipo de análisis se comprueba que el material [11]:
 - a) Soporta el daño equivalente de las cargas proporcionadas por el fabricante de la turbina.
 - b) Control del factor de concentración de estrés. Se mide a partir del número de ciclos que soporta la estructura antes del fallo [12].



Análisis del estado límite último (ULS)

En este tipo de análisis lo que se controla es el valor de la tensión de Von Mises (apartado 2.4)37 en la estructura, no permitiendo que supere un determinado valor. El valor máximo que se permite para la tensión de Von Mises se calcula como:

$$\sigma_{MAX} = \frac{\sigma}{FS} \quad (1)$$

Siendo FS el factor de seguridad deseado y σ el límite elástico del material.

En este proyecto se ha exigido el valor más restrictivo de entre los usados para este tipo de elementos estructurales, por lo que el factor de seguridad sería de:

$$FS = 1,5$$

El límite elástico del material al ser este acero estructural 355, es de:

$$\sigma = 355 [MPa]$$

Por lo que el valor máximo que permitiremos que tenga la tensión de Von Mises, aplicando la ecuación (1) será de:

$$\sigma_{MAX} = \frac{355}{1,5} = 236 [MPa]$$

Siguiendo las indicaciones de la normativa DNV [9][10] las cargas que hay que considerar para hacer el cálculo de las cargas ULS son:

- Fuerzas ambientales (viento, oleaje, movimientos sísmicos...). Se ha empleado el valor de la fuerza que tiene una probabilidad de existir del 2 %, es decir, con un período de retorno de 50 años. La ola así es conocida comúnmente con el nombre de “La ola de los 50 años”.



- Cargas de viento anormales en la turbina, estas últimas las proporciona el fabricante de la turbina.

Los resultados que proporciona la empresa están dados respecto al siguiente sistema de coordenadas:

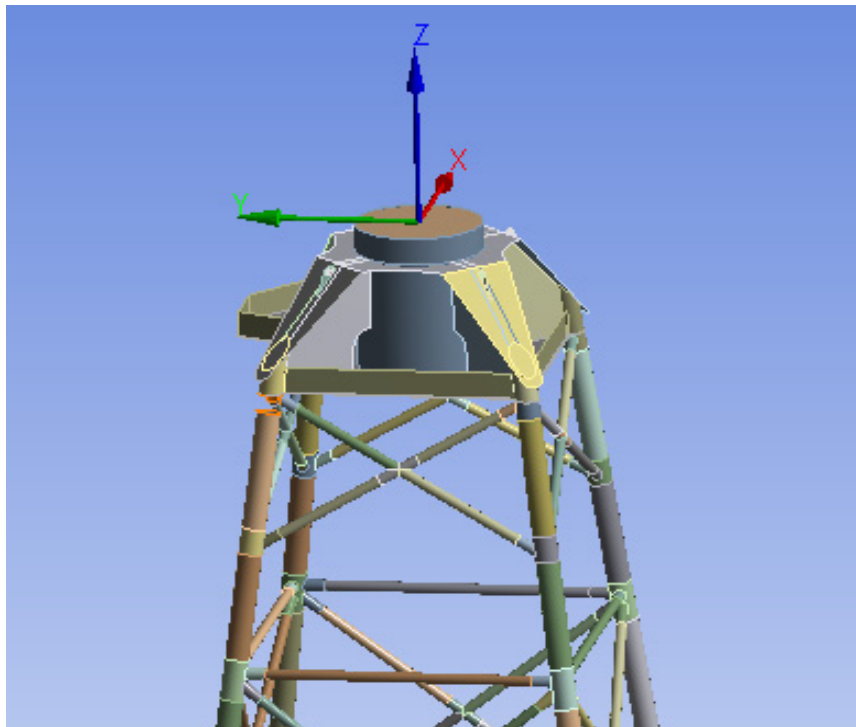


Ilustración 26. Sistema de coordenadas para las cargas a estado límite último.

Las fuerzas que facilitó la empresa han sido las siguientes:

Tabla 6. Fuerzas y momentos para el Estado límite último (ULS).

Fuerza o Momento	Valor	Unidades
F_x	1,708	[MN]
M_y	143,323	[MN.m]
M_z	13,638	[MN.m]



Análisis del estado límite a fatiga (FLS)

Al igual que para el cálculo de las cargas para el análisis ULS, la empresa tuvo que seguir las indicaciones de la normativa DNV [11], las fuerzas que emplearon en el cálculo son valores esperados obtenidos en base a un históricos de datos en las costas británicas.

Para su cálculo, han exigido una vida media para la jacket de 25 años. Teniendo en cuenta las características de la carga han calculado que eso supone que la jacket aguante un mínimo de 10^7 ciclos. A mayores sería necesario incluir un factor de seguridad.

Las cargas para este análisis están dadas respecto al mismo sistema de coordenadas que el indicado para el análisis del estado último indicado en la **Ilustración 26**.

Las fuerzas y momentos que facilita la empresa anteriormente citada tendrían los siguientes valores:

Tabla 7. Fuerzas y momentos para el análisis del estado límite a fatiga (FLS).

Fuerza o Momento	Valor	Unidades
F_x	0,505	[MN]
M_y	27,704	[MN.m]
M_z	4,120	[MN.m]

De cara a incluir un factor de seguridad a fatiga, lo que se hará será dado que las fuerzas a fatiga son menores que las fuerzas a carga última, suponer que todas las cargas a fatiga sean proporcionales a las de carga última.

El factor de proporcionalidad se calculará de la forma más restrictiva posible. Se podrían emplear el cociente entre la fuerza en el eje X a carga última y a fatiga, o entre alguno de los momentos. Dichas relaciones se presentan en la siguiente tabla:



Tabla 8. Factor de seguridad para fatiga.

Carga	Carga última (ULS)	Fatiga (FLS)	Relación
Fx	1,708	0,505	0,30
My	143,323	27,704	0,19
Mz	13,638	4,12	0,30

Para ser lo más restrictivos posibles nos quedamos con la relación mayor, pues así estaríamos mayorando las fuerzas que emplearemos para el análisis a fatiga. Si multiplicamos ahora las cargas a carga última por la relación de 0,30 que acabamos de calcular las fuerzas a emplear a fatiga que resultan son las siguientes, incluyendo un factor de seguridad bastante conservador:

Tabla 9. Cargas a fatiga con el factor de seguridad incluido.

Fuerza o Momento	Valor	Unidades
Fx	0,51598182	[MN]
My	43,29746	[MN.m]
Mz	4,12	[MN.m]

3.3.3 Mallado de la jacket

Dado que la jacket es una estructura muy grande, con más de 80 piezas, se hace imposible darle gran precisión a la malla con que se le aplica, puesto que su simple análisis con la malla más gruesa posible tarda un tiempo considerable para cada análisis (ULS y FLS). Se ha dado la precisión más alta posible dentro de las posibilidades computacionales que permitía el ordenador con que se han hecho los distintos análisis.

Cuando se analicen de forma individual el nudo más solicitado de la jacket, se podrá dar una precisión mayor para tener una malla de resolución óptima que nos de los mejores resultados posibles en los análisis a carga última y fatiga del nudo y que nos permita realizar una buena optimización.



En las siguientes imágenes pueden verse capturas de pantalla del mallado de la jacket:

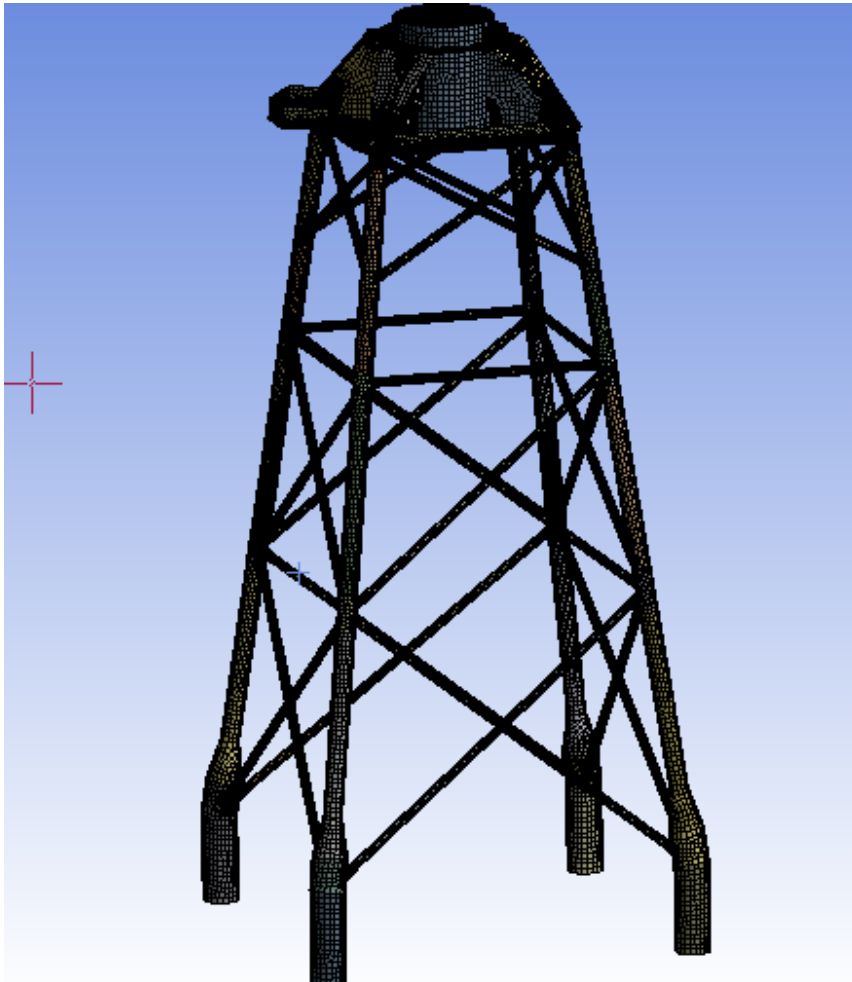


Ilustración 27. Vista completa de la jacket mallada.

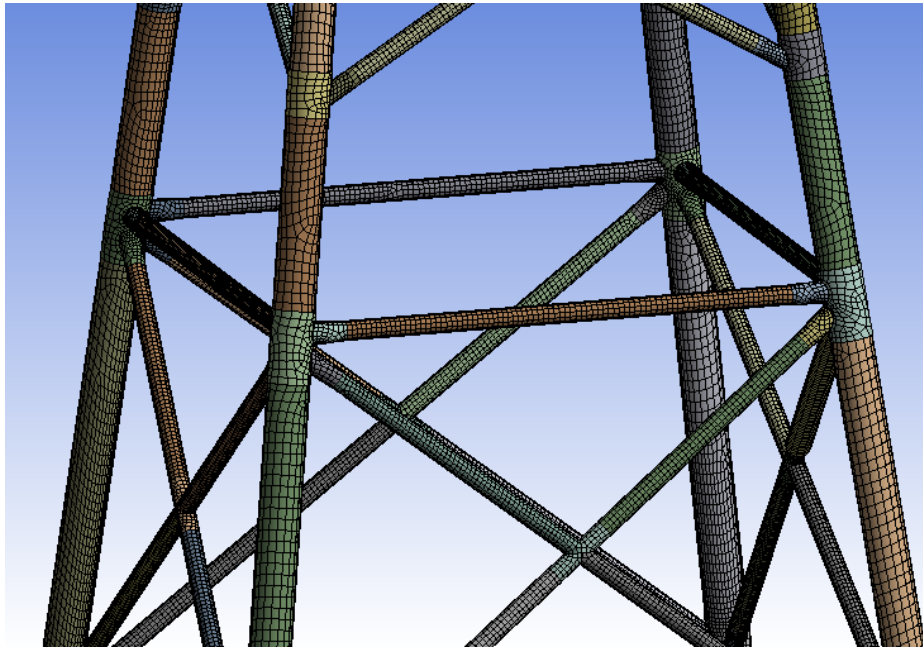


Ilustración 28. Vista ampliada de la jacket mallada.

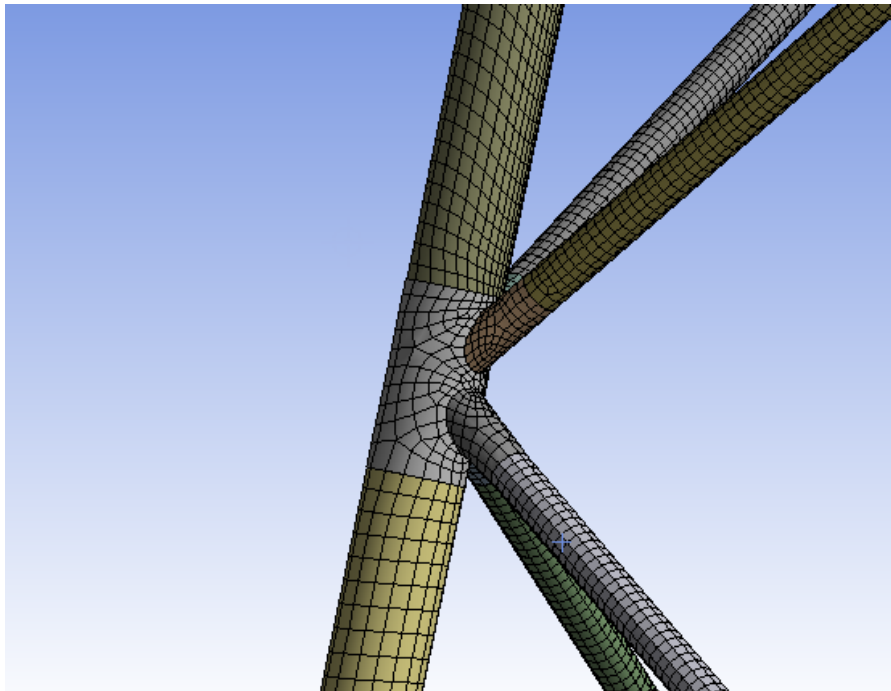


Ilustración 29. Vista ampliada 2 de la jacket mallada.



3.3.4 Resultados del análisis de la jacket

Si bien la modelización de la jacket se ha hecho con el programa CAD “SolidWorks”, el análisis de la misma se ha hecho con la herramienta CAE “ANSYS”, puesto que es una herramienta muy completa, de contrastada eficacia y muy empleada en el ámbito empresarial.

Análisis del estado límite último (ULS) de la jacket

Se puede apreciar en este análisis que existen principalmente 3 zonas problemáticas en las que la tensión supera el valor máximo permitido que hemos calculado anteriormente de 237 MPa. El valor máximo que se alcanza ronda los 355 MPa, es decir el límite elástico del material. Esto sucede para el Nudo A, en la zona de los injertos inferiores. Esto puede verse en la siguiente captura de pantalla del análisis en cuestión:

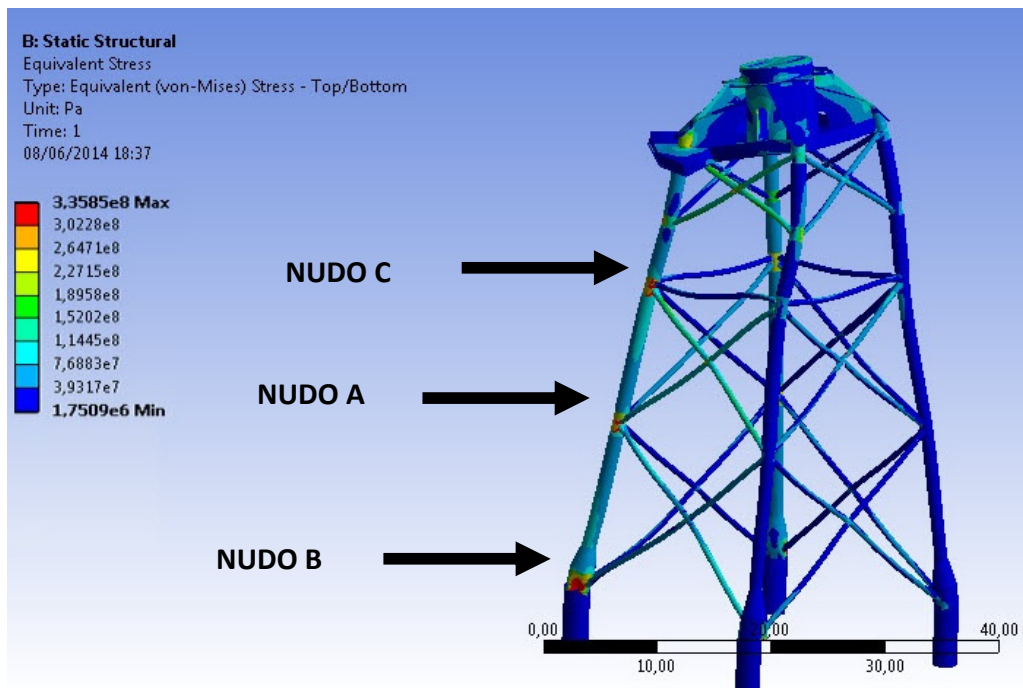


Ilustración 30. Análisis de estado límite último (ULS) de la jacket.



Análisis del estado límite a fatiga (FLS) de la jacket

Al igual que en el caso del análisis a fatiga, los nudos siguen siendo las partes de la jacket donde se generan los problemas. Los nudos problemáticos siguen siendo los mismos que en el caso anterior, estando todos con una vida útil inferior a la mínima (10^7 ciclos). Al igual que para el caso del análisis a carga última, el nudo que presenta mayores problemas a fatiga es el nudo A. Esto tiene sentido pues, al ser el que sufre mayores tensiones a carga última, también es el que más sufre a fatiga.

En la siguiente captura de pantalla del análisis puede verse lo ya comentado:

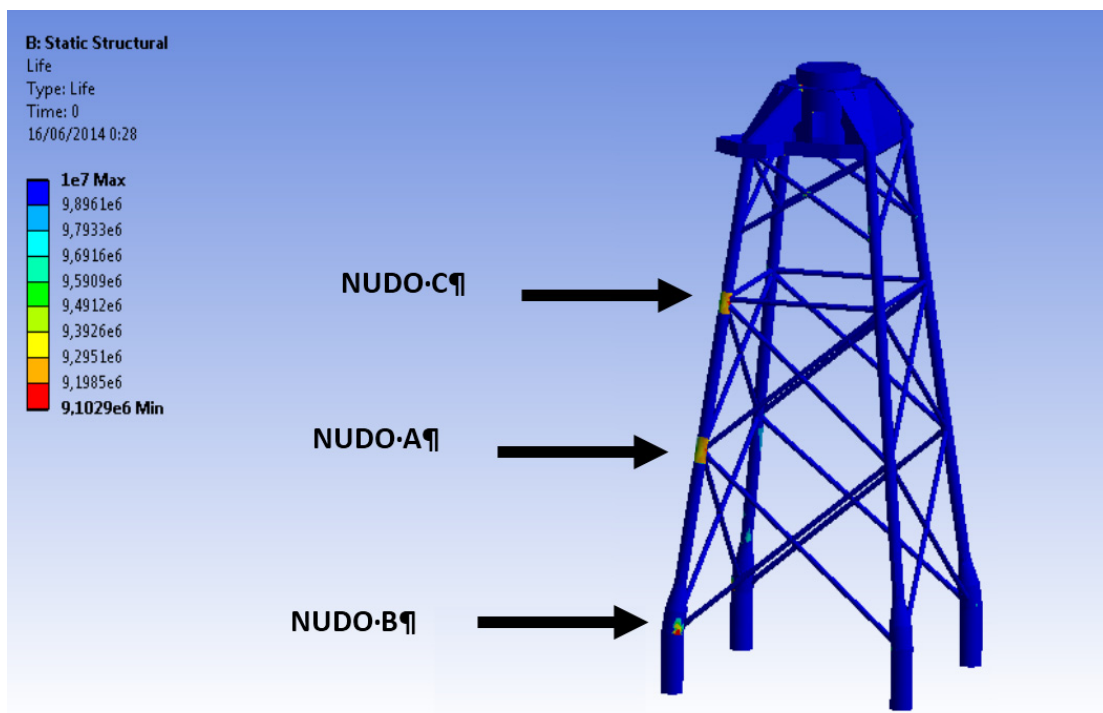


Ilustración 31. Resultados del análisis del estado límite a fatiga de la jacket.



A la vista de los resultados, se demuestra que es necesario optimizar el diseño de los nudos. Con este objetivo, se modelará por separado el nudo A, por ser el más problemático. Mediante la optimización del nudo A, se desarrollará una metodología de optimización que luego se podría extrapolar al resto de nudos. Con este fin el nudo que se optimizará se hará totalmente paramétrico. En la optimización de su diseño se buscará que cumpla con las exigencias a carga última y a fatiga y todo esto teniendo como objetivo la minimización de su coste de fabricación.





Capítulo 4. MODELADO Y CÁLCULO DE FUERZAS EN EL NUDO A

CONTENIDO

<i>4.1 Modelización del Nudo más solicitado</i>	65
<i>4.2 Cálculo de las fuerzas en un nudo.....</i>	68



Tras realizar el análisis de la jacket a carga última (ULS) y a fatiga (FLS), se evidencia la necesidad de optimizar el diseño de los nudos ya que, son la parte más solicitada de la jacket. En este proyecto se presentará una metodología de optimización para cualquier nudo de la estructura. Debido a que el diseño de los nudos estará completamente parametrizado, únicamente se hará la optimización para uno de ellos. El nudo que se optimizará es el nudo A, por ser el más solicitado. La metodología de optimización que se sigue en este proyecto sería extrapolable para cualquier otro nudo de la jacket.

4.1 MODELIZACIÓN DEL NUDO MÁS SOLICITADO

Para el modelado del nudo, teniendo en cuenta las limitaciones encontradas con el “*Design Modeler*” de ANSYS al modelar la jacket completa, se ha empleado directamente el SolidWorks, importando posteriormente el modelo a ANSYS. El modelo que se ha hecho es completamente paramétrico, por lo que si se quisiera emplear para hacer la optimización de cualquier otro nudo sería posible.

El nudo que se va a modelar es el nudo A, por ser el más solicitado, en la siguiente ilustración se identifica el citado nudo:

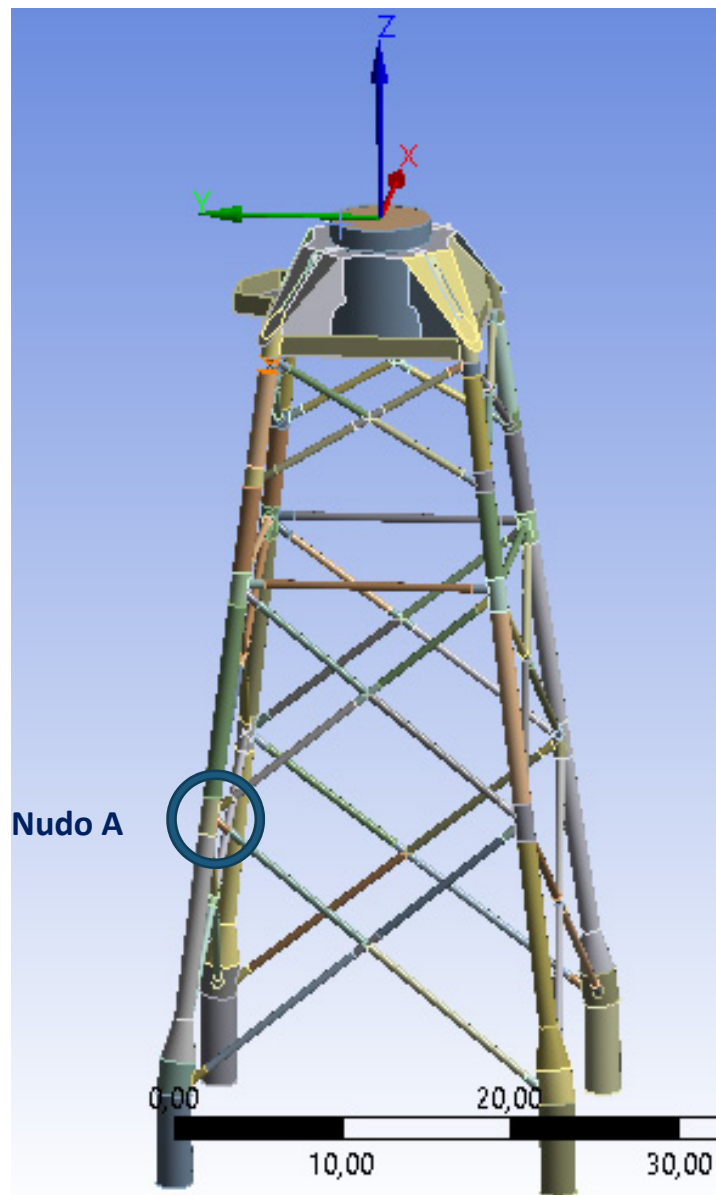


Ilustración 32. Nudos a modelar y optimizar.



En la siguiente ilustración puede verse el modelo tridimensional del nudo:

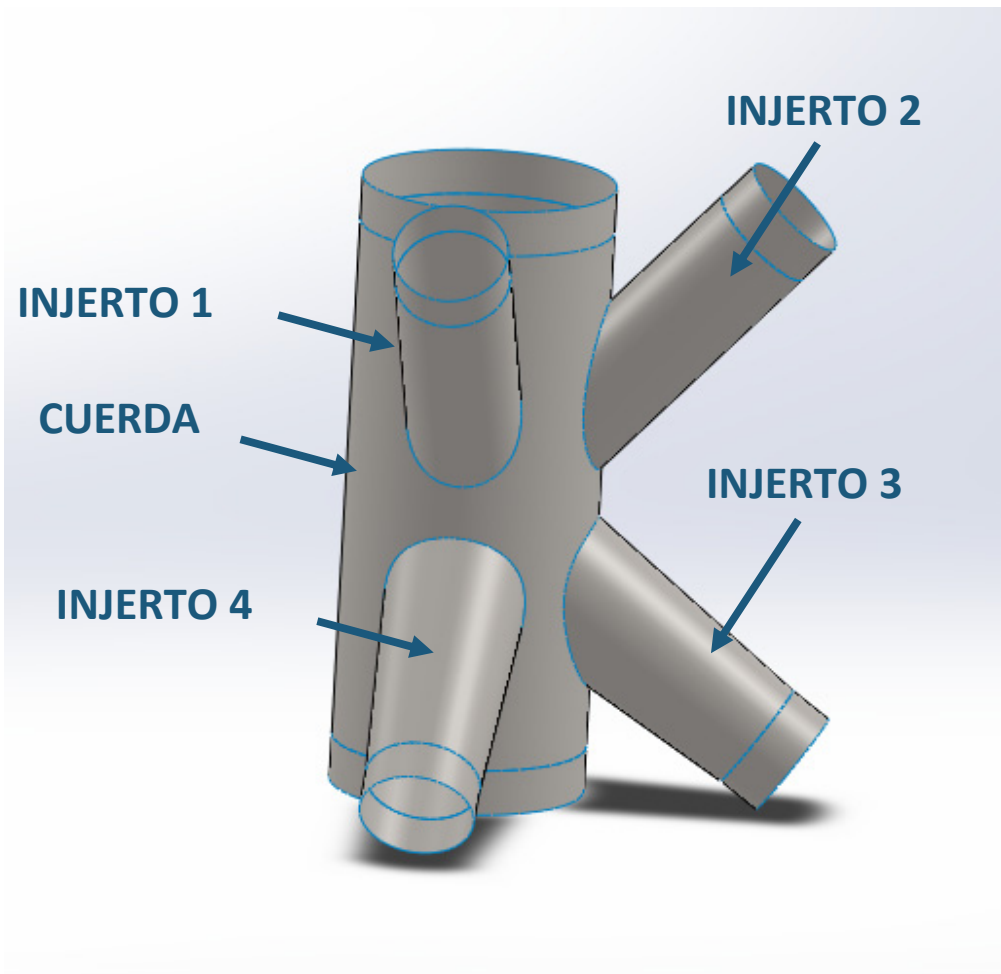


Ilustración 33. Modelo tridimensional del Nudo A.



4.2 CÁLCULO DE LAS FUERZAS EN UN NUDO

Ahora que tenemos el modelo del nudo, es necesario calcular las fuerzas que actúan sobre el mismo, tanto a carga última como a fatiga. Para hacer esto, tenemos que emplear de nuevo el modelo de la jacket que hemos usado con anterioridad. El proceso a seguir para cualquiera de los nudos sería el que se ha seguido para el nudo A, y que se detalla a continuación:

4.2.1 Definición de superficies de corte

En primer lugar es necesario definir una serie de superficies que estén en contacto con los extremos del nudo donde queremos obtener las fuerzas y momentos.

En la siguiente ilustración puede verse la superficie definida para calcular las fuerzas y momentos en la parte superior de la cuerda para el nudo A:

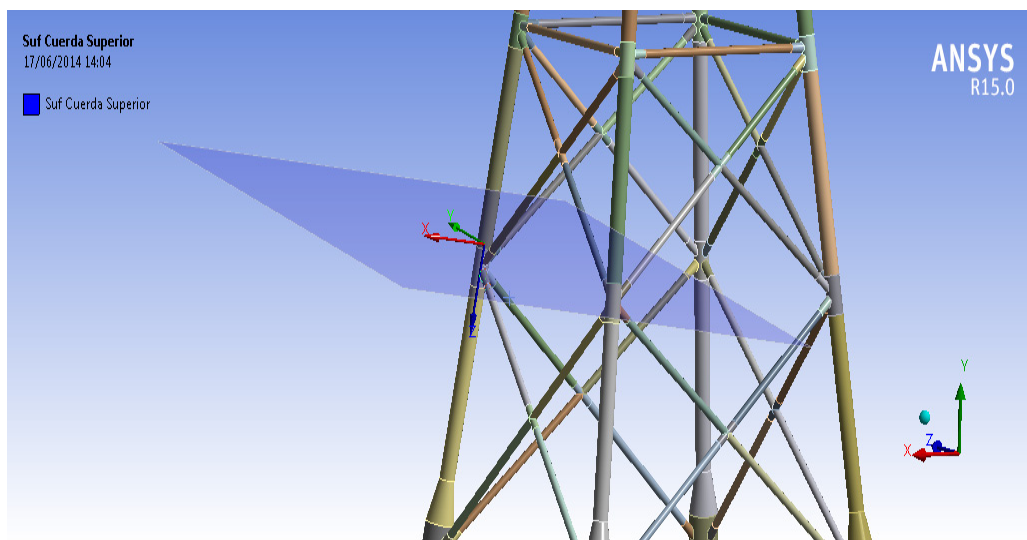


Ilustración 34. Superficie de corte con la parte superior de la cuerda del Nudo A.



Sería necesario definir 5 superficies más, para así poder calcular las fuerzas y momentos en el resto de extremos, que serían los siguientes:

- Extremo inferior de la cuerda
- Extremos de los 4 injertos

En resumen, sería necesario definir un total de 6 superficies:

- Dos para los dos extremos de la cuerda y las cuatro restantes para los cuatros injertos.

4.2.2 Definición de “probes”

Una vez se han definido todas las superficies en los extremos del nudo, es necesario introducir una herramienta de ANSYS conocido como “*Probe*”, o sonda en castellano. Esta herramienta nos permite calcular las fuerzas o momentos en el corte entre una superficie y los sólidos que se seleccionen.

Será necesario definir un total de 12 “*Probes*” ya que ANSYS solo nos permite calcular fuerzas o momentos por separado y por tanto no es posible calcular en el mismo *probe* la fuerza y el momento que actúan sobre el extremo donde esté definido. Se hace por tanto necesario definir el doble número de *probes* que de superficies.



En la siguiente ilustración puede verse que fuerza actúa sobre el extremo superior de la cuerda del nudo A:

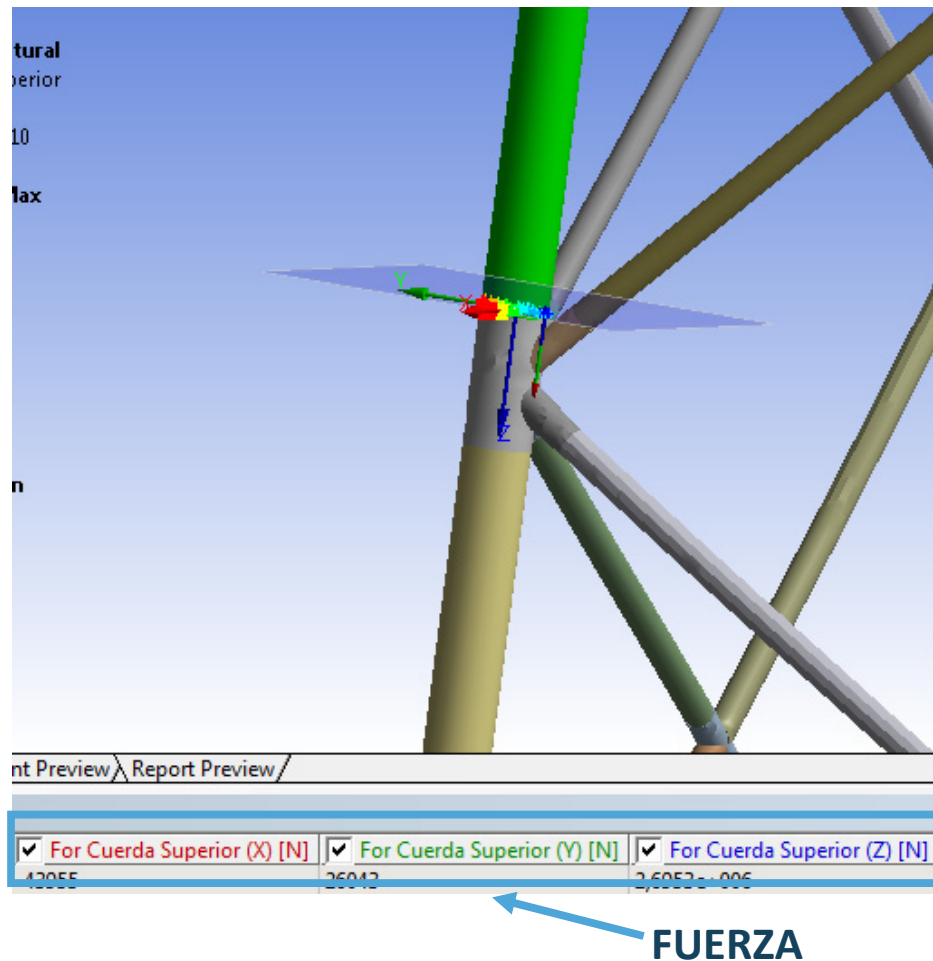
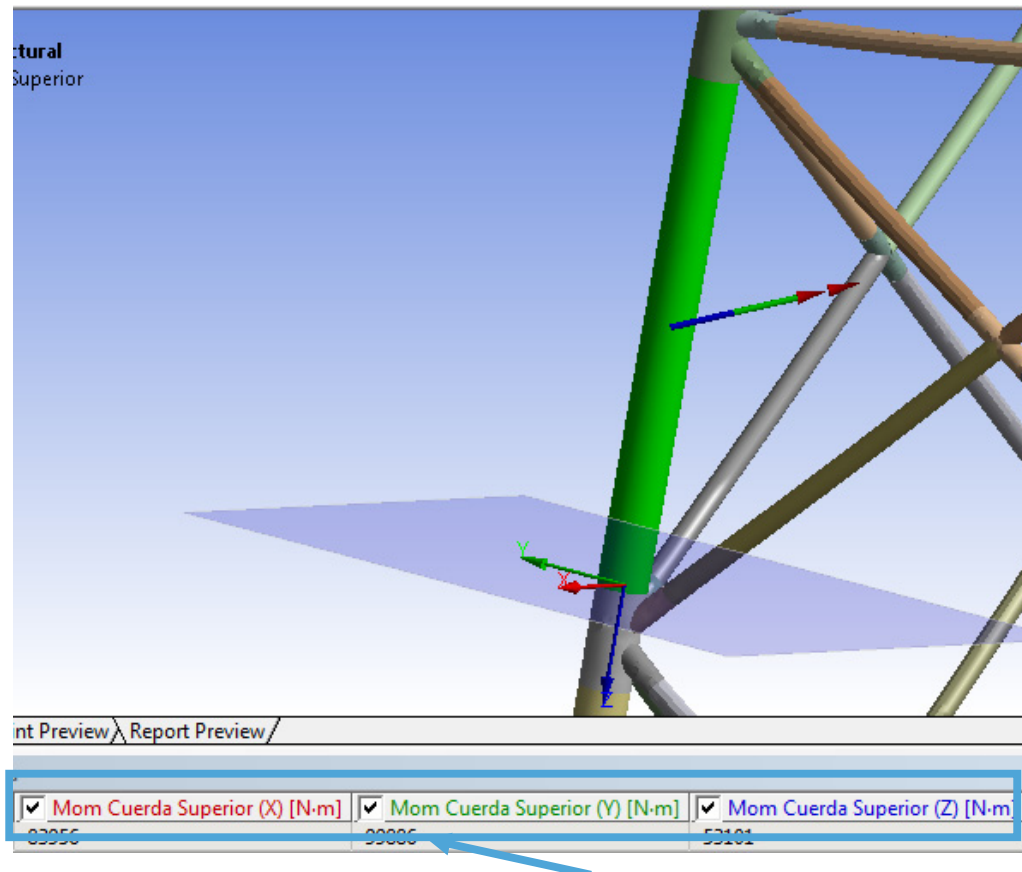


Ilustración 35. Fuerza resultante en el extremo superior de la cuerda del nudo A.

Se han definido 5 *Probes* más, análogos a este, para calcular el resto de fuerzas en los extremos de los tres nudos (A, B y C).



En la siguiente ilustración puede verse qué momento actúa sobre el extremo superior de la cuerda del nudo A:



MOMENTO

Ilustración 36. Momento resultante en el extremo superior de la cuerda del nudo A

Se han definido 5 *Probes* más, análogos a este, para calcular el resto de momentos en los extremos de los tres nudos (A, B y C).

Con estas fuerzas y momentos podemos analizar de forma independiente el nudo. Hay que destacar el hecho de que estas cargas ahora que las tenemos calculadas van a ser constantes independientemente de los cambios que hagamos en el nudo. Esto es así porque las fuerzas dependen del resto de la estructura, que no cambiará durante la optimización.





Capítulo 5. OPTIMIZACIÓN DEL NUDO A

CONTENIDO

<i>5.1 Entorno de optimización “DesignXplorer”</i>	<i>74</i>
<i>5.2 Optimización del nudo y resultados.....</i>	<i>78</i>



En este capítulo se optimizará el diseño del nudo A, el cual hemos modelado en el capítulo anterior. Se pondrán como restricción que se cumplan las exigencias a carga última (ULS) y a fatiga (FLS).

En primera instancia, se hará esta optimización sin tener en cuenta los costes de fabricación. Únicamente se tratará de minimizar el coste del material minimizando la masa del nudo. Posteriormente, se demostrará la importancia que tiene incluir los costes de fabricación en esta optimización, ya que son muy elevados y van a influir enormemente en el precio final de nudo y por ende en el precio final de la jacket. Se verá el ahorro económico que supone considerar los coste de fabricación y el grave error que se cometería en caso de no considerarlos [13] [14].

5.1 ENTORNO DE OPTIMIZACIÓN – DESINGXPLORER

En este apartado se explican las principales características de los métodos que nos proporciona ANSYS de cara a hacer la optimización del nudo. Se indicarán las principales características de cada uno de ellos.

El entorno *DesignXplorer* es una poderosa herramienta para diseñar y comprender la respuesta del análisis de piezas y ensamblajes. Empleando parámetros como lenguaje nos permite estudiar las respuestas estructurales y térmicas ante distintas situaciones y escoger la que mejor se adapte a nuestras necesidades.



Esta herramienta nos permite hacer 3 tipos de análisis [15]:

- Goal Driven Optimization (GDO), es decir método por optimización de objetivos. Este tipo de análisis se centra en el uso de superficies de respuesta.
- Optimización directa. Emplea métodos que van calculando distintos puntos de diseño y en base a como vayan evolucionando la función objetivo varia los parámetros de una u otra forma. Este tipo de optimización se basa en métodos de gradiente como el NLPQL o MISQP.
- ASO (Adaptative single objective). Es un método mixto que combina lo mejor de los métodos anteriores.

5.1.1 Método por optimización de objetivos (GDO)

Esté método nos permite llevar a cabo estudios de optimización basados en múltiples objetivos, considerando las incertidumbres en el diseño y uso del producto, y determinando cómo mejorar la fiabilidad del producto. Estas funciones se llevan a cabo mediante el uso de *superficies de respuesta*. Para la generación de dichas superficies se recurre al diseño de experimentos.

El diseño de experimentos (*DOE*) es una técnica empleada para determinar la localización de los puntos de muestreo. Hay varias versiones del diseño de experimentos en la bibliografía de la ingeniería. Todas estas técnicas tienen una característica en común: tratan de localizar los puntos de muestreo tales que el espacio de parámetros de entrada aleatorios sea explorado del modo más eficiente, u obtener la información requerida con un mínimo de puntos de muestreo. Estos puntos situados eficientemente no sólo reducirán el número necesario de dichos puntos, sino que también incrementan la precisión de la superficie de la respuesta que se deriva de los resultados de los mismos. Por defecto, el método determinístico emplea un diseño combinado central (*CCD*, *Central Composite Design*), que combina un punto central, puntos a lo largo del eje de



los parámetros de entrada, y los puntos determinados por un diseño factorial fraccionario.

El principal problema de limitarse a emplear una superficie de respuesta únicamente, reside en que una vez calculada dicha superficie ANSYS se olvida del modelo real y hace el cálculo del óptimo en dicha superficie, y en problemas donde existen varios óptimos locales debido a que el problema que se estudia no es lineal, como es el caso de los nudos que se quieren optimizar los resultados obtenidos nada tienen que ver con la realidad. Esto se debe a que la superficie que se calcula es incapaz de representar fielmente la función real a optimizar. Se comprobará más adelante que el problema no es de tipo lineal por lo que este método no sería válido.

5.1.2 Método de optimización directa

Este tipo de optimización emplea métodos de gradiente, por lo que si no se conoce un valor inicial cercano a la solución buscada puede que nos lleve a encontrar óptimos locales y para poder verificar los resultados sería necesario repetir el análisis variando el punto de partida si no, no existe forma alguna de comprobar si el resultado es el óptimo de la función o no. Dado que resolver varios de estos análisis es muy caro computacionalmente hablando, este tipo de optimización no será empleado de cara a la optimización de los nudos. Los métodos del gradiente que tiene implementados ANSYS para realizar este tipo de análisis serían el NLPQL (Non-Linear Programming by Quadratic Lagrangian) y el MISQP, que es una variante del algoritmo SQP (Sequential quadratic programming).



5.1.3 ASO (Adaptative Single Objective)

El método adaptativo por objetivo simple implementado por ANSYS es un método mixto que combina lo mejor de los anteriores métodos. Nos permite hacer una optimización por gradiente (de una sola variable y varias restricciones), que nos da resultados reales, consiguiendo escapar de los óptimos locales empleando información obtenida en base a una superficie de respuesta que calcula de forma dinámica en función de cómo esté evolucionando la función objetivo a optimizar.

Este es el método que se ha empleado para realizar la optimización de los nudos puesto que es el más completo y el que ofrece unos resultados de contrastada eficacia [15].



5.2 OPTIMIZACIÓN DEL NUDO Y RESULTADOS

En este apartado se verá la optimización del nudo, definiéndose una metodología que puede ser extrapolable a cualquier otro nudo de la estructura. En primer, lugar se verá el coste final del nudo en caso de que únicamente tratásemos de minimizar el coste de material, es decir, si únicamente quisiéramos minimizar la masa del nudo. Posteriormente, se repetirá la optimización incluyendo el coste de fabricación total. Se demostrará la importancia que tiene la incorporación de los costes de fabricación y se verá el error que se cometería en el caso de que no se incluyesen.

5.2.1 Parámetros de los distintos nudos

De cara a hacer la optimización del nudo A, necesitamos definir una serie de parámetros en la geometría del nudo. Geométricamente, en cualquier nudo se podría variar:

- Espesor de la cuerda. Un mayor espesor ayudaría a reducir posibles problemas de tensiones de Von Mises o de fatiga en caso de ser necesario.
- Espesor de los injertos. Al igual que en el caso de la cuerda, nos permitiría reducir posibles problemas tensionales y/o de fatiga.
- Conicidad de los injertos. En caso de que hubiese problemas de tensiones o fatiga, el aumentar la conicidad hace que tengamos una mayor superficie sobre la que se reparten las tensiones, minimizando así su valor máximo y pudiendo solucionar por tanto posibles problemas de tensiones y/o fatiga.

Hay que tener en cuenta que todas estas variables están sujetas a una serie de limitaciones:

- Todos los injertos de un nudo tendrán el mismo espesor, esto es así por motivos de simetría, no tendría sentido que cada injerto tuviera un espesor independiente, ya que los resultados que se obtienen para este nudo se extrapolan a los 3 nudos del mismo tipo.



- A la hora de definir la conicidad de los injertos en caso de que haya 4 injertos, se podrán variar de forma independiente la conicidad de los injertos superiores, que debe ser igual, y la conicidad de los injertos inferiores, que también deberá coincidir.

En la siguiente imagen se indican las distintas variables a las que se hace referencia para el nudo A:

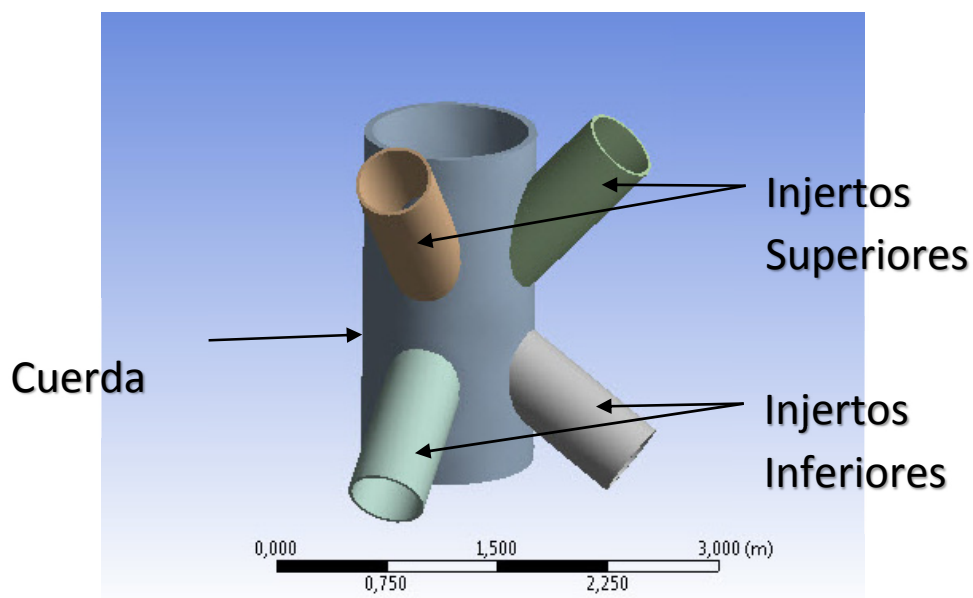


Ilustración 37. Partes principales de un nudo.

Los parámetros que podemos variar tienen unos valores límite, y que serían iguales para cualquier nudo. Dichos valores no se pueden superar ya sea por limitaciones técnicas o geométricas. En la siguiente tabla se resumen los intervalos de variación de cada parámetro:

Tabla 10. Valores límite de los parámetros.

Variable	Mínimo	Máximo
Espesor de la cuerda [mm]	56	60
Espesor de los injertos [mm]	25	30
Conicidad de los injertos [°]	0	4,4



La razón de ser de estos valores límite es la siguiente:

- **Espesor de la Cuerda:** El valor mínimo de la cuerda se establece en ese valor por que un valor menor haría que surgiesen problemas de concentración de tensiones en la cuerda, problema que con un espesor mayor o igual a 56 no existe. El valor máximo se establece en 60 mm por que la cuerda representa en torno al 60 % de la masa total del nudo por lo qué, permitirle tener un valor mucho mayor dispararía el valor de la masa total del nudo.
- **Espesor de los injertos:** se verá más adelante, pero la zona donde están localizados los mayores problemas en los análisis de carga última (ULS) y a fatiga (FLS) se localizan en los injertos, por lo que si para el valor que tienen actualmente presentan problemas, no tendría sentido permitirle tener un valor todavía menor. Con respecto al valor máximo, se limita el valor en 30 mm porque un valor mayor generaría problemas en el tratamiento térmico postsoldadura que se aplica a los nudos a la hora de ensamblarlos.
- **Conicidad de los injertos:** Por motivos geométricos, es imposible dar un espesor mayor a 4,4 grados. Si se diera un valor mayor los injertos estarían o bien en contacto entre sí o tan cerca que no se podrían soldar a la cuerda.

5.2.2 Nudo peor y nudo mejor

Antes de realizar la optimización del nudo en cuestión, se han analizado las dos configuraciones extremas posibles para el nudo. Se han comparado el nudo en las condiciones teóricamente más desfavorables, con los parámetros en sus valores mínimos (nudo “peor”) y el nudo que teóricamente es el mejor, estructuralmente hablando, con los parámetros en sus valores máximos (nudo “mejor”). El objetivo de esto es comprobar que dentro del rango de variación de los parámetros que hemos definido existe una solución que cumpla con nuestras restricciones para los análisis del estado límite último y estado límite a fatiga. Si no se cumpliesen dichas restricciones con el nudo “mejor” no tendría sentido hacer ninguna optimización pues no habría ninguna solución posible.



En resumen, se ha calculado el nudo a carga última y a fatiga para las dos situaciones límite:

Tabla 11. Parámetros para el nudo "peor" y "mejor".

Variable	Nudo peor	Nudo mejor
Espesor cuerda [mm]	25	30
Espesor Injerto [mm]	56	60
Conicidad Superior [°]	0	4,4
Conicidad Inferior[°]	0	4,4

En las siguientes ilustraciones pueden verse ambas configuraciones:

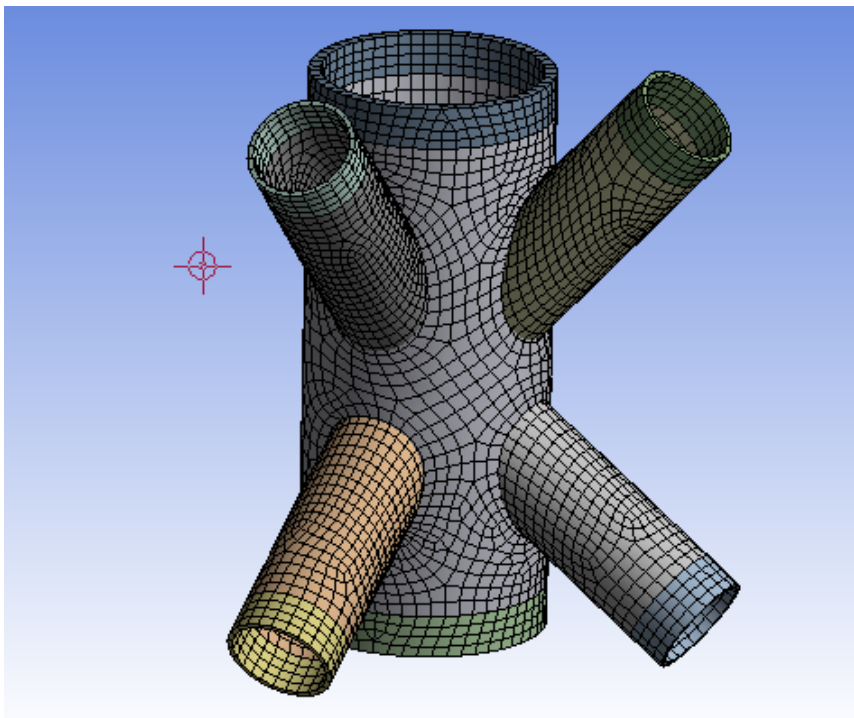


Ilustración 38. Nudo peor.

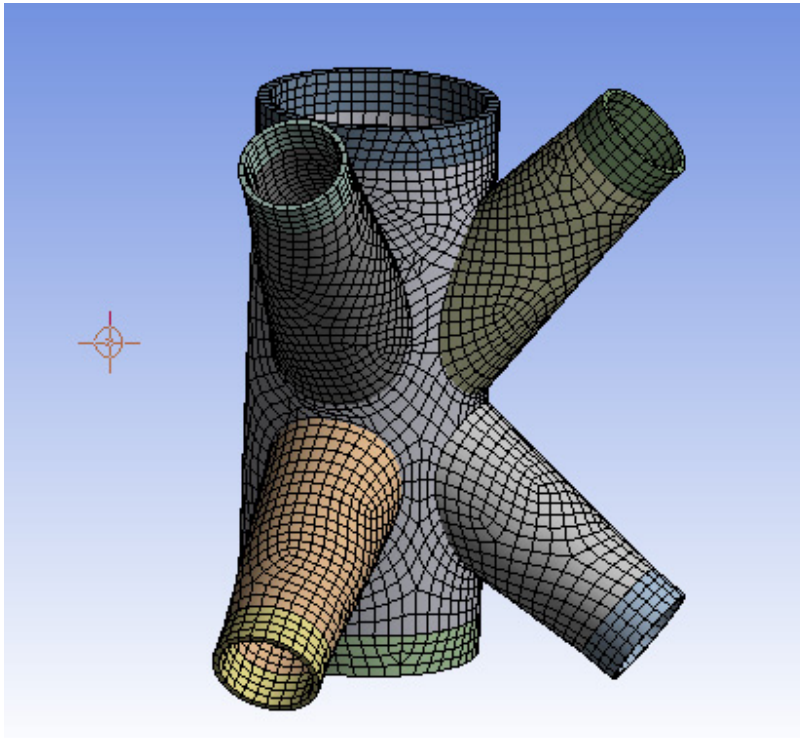


Ilustración 39. Nudo mejor.

En conclusión, con el objetivo de ver que efectivamente es posible cumplir las restricciones exigidas a carga última y a fatiga, se ha comparados los resultados de la configuración del nudo que teóricamente debería ser la mejor, al menos estructuralmente hablando, con la del nudo peor. Los resultados que se obtienen se resumen en la siguiente tabla:

Tabla 12. Resultados nudo peor y nudo mejor.

Resultados	Nudo peor	Nudo mejor	Restricciones
Von Mises (ULS) [Pa]	296,9E+6	168,6E+6	$\leq 236E+6$
Vida a fatiga [ciclos]	4,1E+6	1,5E+7	$\geq 1E+7$
Coste [€]	13.029,00 €	29.790,00 €	
Masa [kg]	4849,5	5425,8	



Podemos ver que efectivamente la solución más cara, es decir la de mayor espesor y conicidad (el nudo mejor), cumple con creces las restricciones a fatiga y a carga última. Podemos ver también que la diferencia entre precios es notablemente superior, llegando a duplicarse el coste de fabricación del nudo. Esto ya nos da una idea de lo que podría llegar a suponer el no incluir los costes de fabricación a la hora de optimizar.

5.2.3 Análisis de sensibilidad Manual

En aras de observar, de forma aproximada, el efecto que tiene cada parámetro en la optimización, se ha hecho un barrido manual variando un único parámetro mientras se ha dejado constante el resto. La variable que se ha controlado ha sido la tensión de Von Mises a carga última, puesto que con ella está relacionada también la vida a fatiga y además esto es un análisis que pretende darnos una visión aproximada del comportamiento de nuestro problema antes de optimizarlo. Esto se ha hecho para las cuatro variables del modelo, las cuales eran cuatro:

- Espesor de los injertos.
- Espesor de la cuerda.
- Conicidad de los injertos superiores.
- Conicidad de los injertos inferiores.



Los resultados que se han obtenido son los siguientes

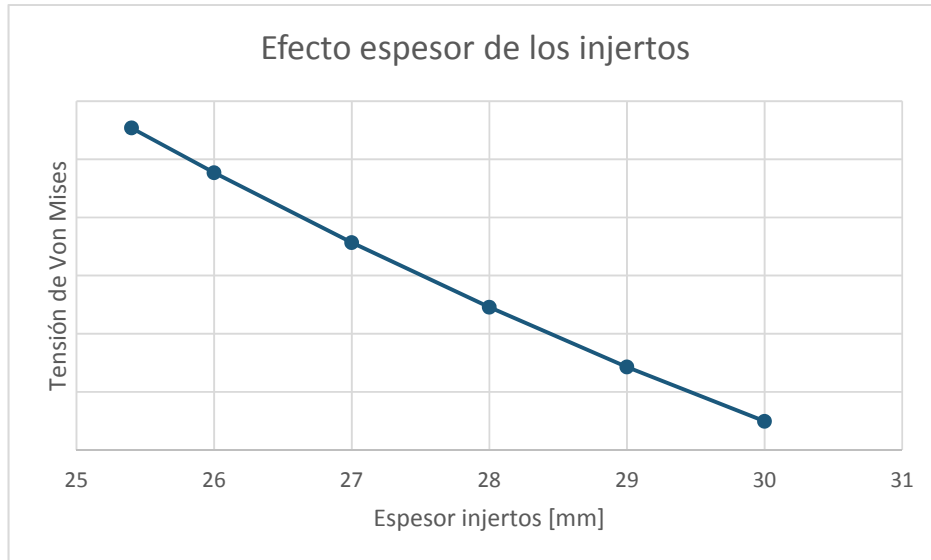


Ilustración 40. Efecto del espesor de los injertos en Von Mises. Fuente: elaboración propia.

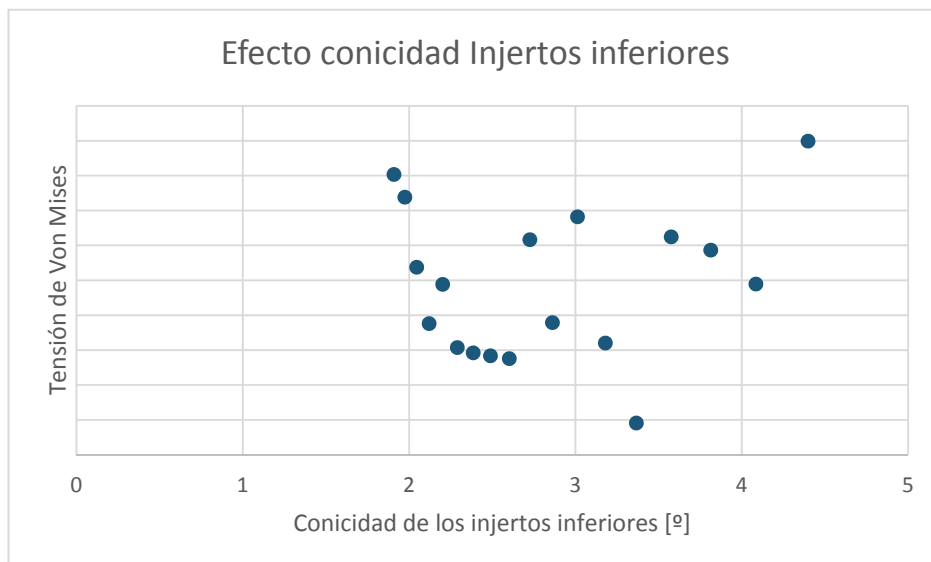


Ilustración 41. Efecto de la conicidad de los injertos superiores en Von Mises. Fuente: elaboración propia.

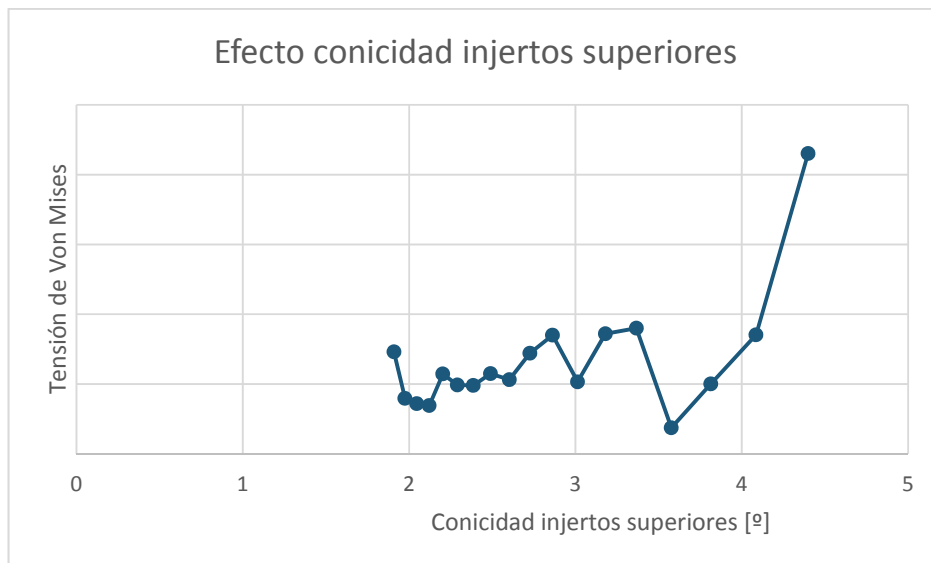


Ilustración 42. Efecto del espesor de la cuerda en Von Mises. Fuente: elaboración propia.

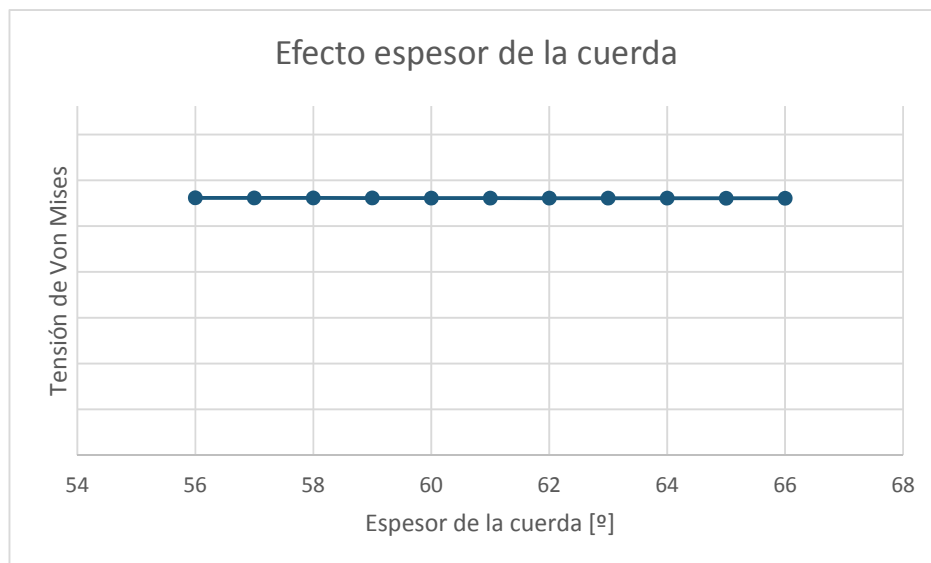


Ilustración 43. Efecto del espesor de la cuerda en Von Mises. Fuente: elaboración propia.



A la vista de estos resultados podemos sacar las siguientes conclusiones:

- El espesor de la cuerda no tiene efecto alguno en la tensión máxima de Von mises por lo que no es necesario incluirlo como una variable de la optimización. Esto supondrá un ahorro computacional muy significativo, puesto que así conseguimos tener una variable menos, pasando de cuatro variables a tres.
- El efecto de las conicidades no es lineal, por lo que queda demostrado, como se adelantó en el apartado 5.1 más atrás, que el uso aislado de superficies de respuesta o de métodos de gradiente para realizar la optimización en este caso no sirve y es por tanto necesario el uso del método mixto ASO (Adaptive single objective), descrito anteriormente.

5.2.4 Función de costes de fabricación

A la hora de calcular el coste total de un nudo, es necesario tener en cuenta varias fuentes de coste. En la siguiente ecuación pueden verse:

$$C_{Fabricación} = C_{Material} + C_{Soldadura\ total} \quad (2)$$

El primer término es el coste de material, se calcularía multiplicando la masa total del nudo por una ratio de €/kg de material. Para este caso se ha tomado como ratio de coste del material el valor de 0,77:

$$C_{Material} = 0,772 \cdot Masa_{total\ Nudo} \quad (3)$$

El segundo término sería el coste asociado a la soldadura manual que se necesita para ensamblar los distintos injertos a la cuerda. Este coste ha sido facilitado por la misma empresa que facilitó los planos de la jacket. El cálculo de este coste se hace a partir de la ecuación de un plano. El coste aumenta de forma lineal al aumentar por un lado el diámetro de los injertos y por otro lado al aumentar el espesor del tubo injerto. La ecuación de coste asociado a un único injerto sería la siguiente:



$$C_{Soldadura\ 1\ Injerto} = K \cdot 0,0452 \cdot Espesor_{injerto} \cdot (6,0435 \cdot Radio_{injerto} - 270,8) \quad (4)$$

La constante K tiene valor unitario en caso de que el injerto no tenga conicidad y tiene un valor de 2,5 en caso de que sea cónico. Esto es así porque el proceso de fabricación de un nudo cónico es más caro que el de uno cilíndrico, reflejándose dicho coste extra en esta constante de “penalización”.

El radio de los injertos en caso de ser cónicos se calcularía por trigonometría:

$$Radio = R_{mínimo} + Longitud_{Injerto} \cdot tg(\text{conicidad})$$

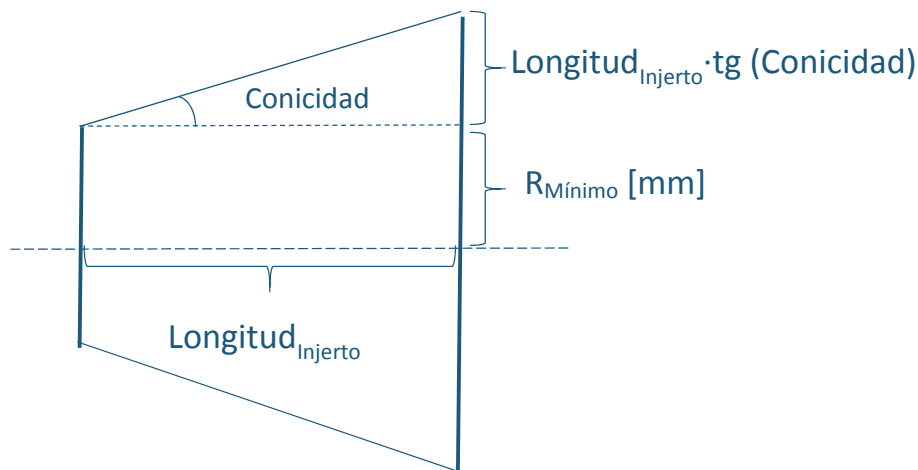


Ilustración 44. Esquema de un cilindro cónico.

Siendo el radio mínimo el que tienen los injertos cilíndricos. Si el injerto tiene conicidad se le suma cuanto ha aumentado el radio con respecto a ese radio mínimo que tendrá siempre.

Teniendo en cuenta todo esto, la ecuación para los costes de fabricación del nudo sería la siguiente:

$$C_{Fabricación} = C_{Material} + 2 \cdot C_{Injerto\ Inferior} + 2 \cdot C_{Injerto\ Superior} \quad (5)$$



5.2.5 Optimización del nudo (ASO)

Para la optimización del nudo se empleará el método de contrastada eficacia ASO (Adaptative Single Objective) [15]. Se harán dos optimizaciones. En la primera, se tendrá como objetivo la minimización de la cantidad de material empleada. Posteriormente se optimizará teniendo como objetivo la minimización del coste de fabricación total de nudo, demostrando el grave error que se cometería en caso de no hacerlo así.

5.2.5.1 Optimización minimizando la cantidad de material

En primer lugar, se tendrá como objetivo únicamente la minimización de la masa de material, es decir los costes de material, despreciando el resto de términos de la ecuación de costes del nudo vista en el apartado.5.2.45.2.4 más atrás (ecuación (5)) Esto se hace así puesto que en multitud de optimizaciones es el único criterio que se emplea a la hora de realizar la optimización [16] [17].

Las restricciones de la optimización son tres:

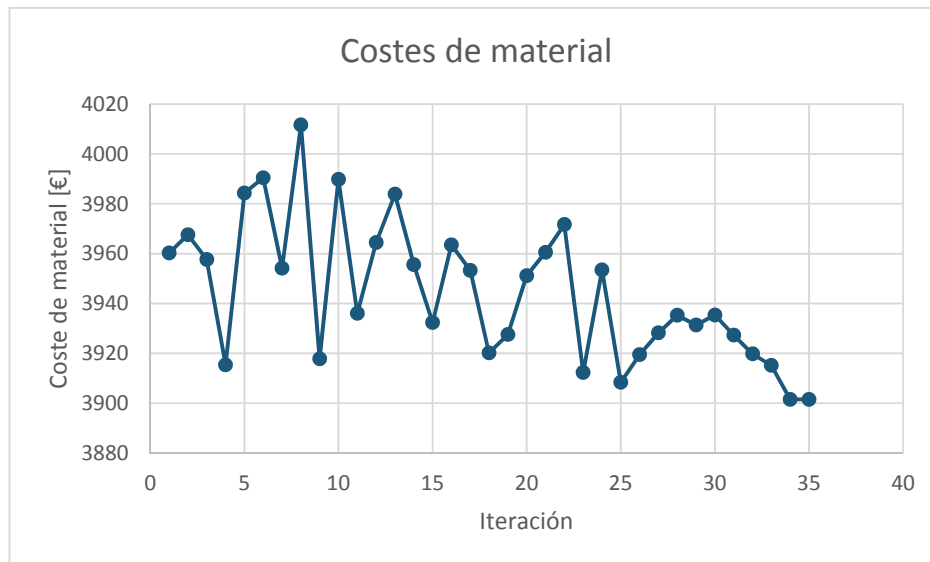
- El nudo debe tener la mínima masa posible.
- El nudo no puede tener una tensión de Von Mises Superior a 236 MPa (este valor se había calculado en el apartado 3.3.23.3.2 más atrás).
- El nudo debe aguantar un mínimo de 10^7 ciclos a fatiga (este valor se había calculado en el apartado 3.3.23.3.2 más atrás).

Los parámetros que puede variar el optimizador son tres:

- Espesor de los injertos
- Conicidad de los injertos superiores
- Conicidad de los injertos inferiores



En la siguiente gráfica se puede ver cómo van evolucionando los costes de material, que como se ha comentado en el apartado 5.2.4 más atrás (ecuación (3)) son simplemente el producto de la masa total del nudo por una ratio de €/kg de material:



Se ve cómo van disminuyendo los costes de material a medida que avanza el número de iteraciones. El resultado que nos propone el optimizador tras 35 iteraciones sería el siguiente:

Tabla 13. Configuración geométrica del nudo optimizado minimizando costes de material.

Variable	Configuración del nudo
Espesor cuerda [mm]	25,5
Conicidad Superior [°]	3,77
Conicidad Inferior[°]	4,32



Geoméricamente la solución que nos da el optimizador sería la que se ve en la siguiente ilustración:

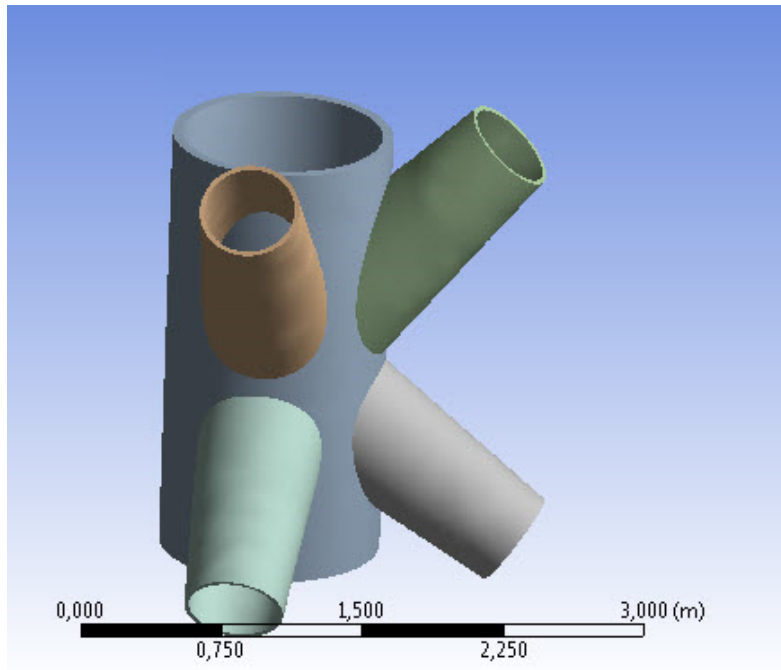


Ilustración 45. Solución propuesta para la optimización de cantidad de material.

Los resultandos a carga última y a fatiga para este nudo serían los que siguen:

Tabla 14. Resultados de la optimización minimizando únicamente el coste de material.

Resultados	Configuración del nudo
Von Mises (ULS) [Pa]	208,9E+6
Vida a fatiga [ciclos]	1,5E+7
Coste total de fabricación[€]	23.216,30 €
Masa [kg]	5129,8



Si comparamos estos resultados con los del nudo “mejor”, con máximo espesor y conicidad que calculamos en el apartado 5.2.2 más atrás, esta solución podría parecer a primera vista muy interesante:

Tabla 15. Comparativa Nudo optimizado por mínima masa y nudo mejor.

Variable	Nudo optimizado	Nudo mejor
Von Mises (ULS) [Pa]	208,9E+6	168,6E+6
Vida a fatiga [ciclos]	1,5E+7	1,5E+7
Coste total de fabricación[€]	23.216,30 €	29.790,00 €
Masa [kg]	5129,8	5425,8

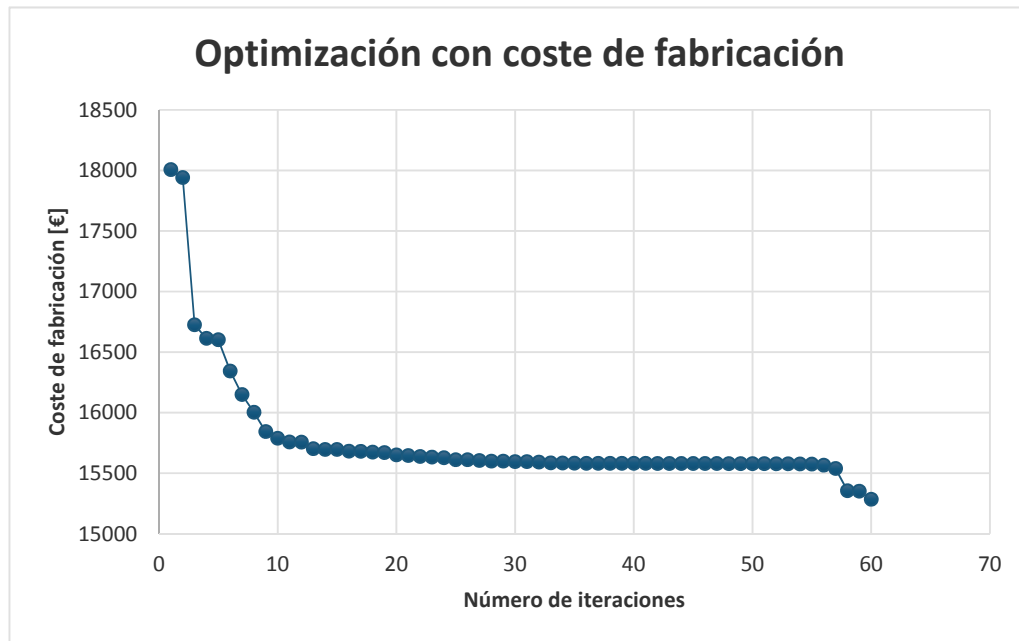
A priori esta solución pudiera parecer atractiva, puesto que con respecto al nudo mejor, el coste de fabricación es un 22% más barato y la masa del nudo es también menor, sin embargo, esta solución no es la solución óptima para la optimización del diseño del nudo.

5.2.5.2 Optimización minimizando los costes de fabricación

En este caso, la optimización está sujeta a las mismas restricciones de carga última y fatiga que en el caso anterior y los parámetros que el optimizador podrá variar son los mismos. La diferencia con la optimización anterior es que ahora se buscará minimizar los costes de fabricación, por lo que no solo se contabilizará lo que pese la estructura. La ecuación a minimizar es la número (5), la cual se definió en el apartado 5.2.4 más atrás.



En este caso la evolución del coste de fabricación a lo largo de la optimización es la siguiente:



Se aprecia cómo va convergiendo poco a poco hacia la solución de mínimo coste de fabricación. La solución que nos propone el optimizador en este caso es la siguiente:

Variable	Configuración del nudo
Espesor cuerda [mm]	27,6
Conicidad Superior [°]	0
Conicidad Inferior[°]	1,12



Geoméricamente esta solución sería la que se indica en la siguiente figura:

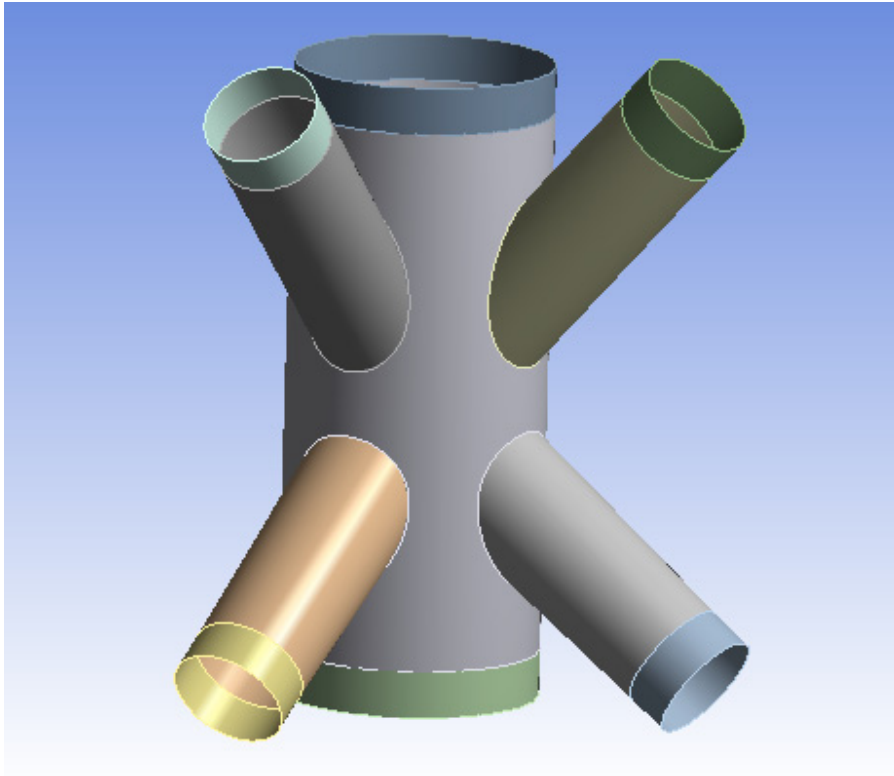


Ilustración 46. Resultado de la optimización minimizando el coste de fabricación.

Si comparamos los resultados del análisis a carga última y a fatiga y el coste de fabricación de este nudo con los del nudo optimizado anteriormente y el nudo “mejor” se puede ver claramente la diferencia de precio entre una solución y otra. Quedando demostrado por tanto la importancia que tiene la optimización del nudo en base a los costes de fabricación totales en vez de en base a los costes asociados a la cantidad de material empleado como se suele hacer en la mayoría de los casos.



En la siguiente tabla se presenta dicha comparativa:

Tabla 16. Comparativa de ambas optimizaciones respecto al nudo mejor.

Variable	Nudo mínimo coste de fabricación	Nudo mínima masa	Nudo mejor
Von Mises (ULS) [Pa]	235,8E+6	208,9E+6	168,6E+6
Vida a fatiga [ciclos]	1,14E+7	1,5E+7	1,5E+7
Coste total de fabricación[€]	15.589,38 €	23.216,30 €	29.790,00 €

La diferencia entre los costes de fabricación es muy elevada. Si se hubiera escogido como válidos los resultados para la optimización que únicamente tenía como objetivo minimizar la cantidad de material, es decir los costes de material, se habría pagado por cada nudo casi un 33 % más en comparación con el coste del nudo que fue optimizado minimizando los costes de fabricación.

Dado que en esta última optimización el algoritmo buscaba minimizar el coste, ha dejado en 0 la conicidad superior. Esto tiene sentido puesto que en la ecuación de los costes de fabricación totales, visto en el apartado 5.2.4 más atrás, se penalizaba el coste de la soldadura para un injerto cónico multiplicándolo por 2,5. Esta penalización hace que el algoritmo únicamente recurra a la conicidad cuando no queda más remedio. En la optimización anterior, como únicamente buscaba minimizar la cantidad de material empleado, la solución que nos daba el algoritmo tenía todos los injertos cónicos y de ahí esa gran diferencia en el coste final.

En conclusión, queda demostrado que los costes de fabricación son un factor clave a la hora de diseñar elementos estructurales que presenten un coste de fabricación elevado, como en este caso.





Capítulo 6. CONCLUSIONES



El objetivo de este proyecto era el diseño y optimización de parte de una jacket, teniendo en cuenta la importancia de los costes en estructuras donde los costes de fabricación son elevados. En primer lugar se analizó a carga última y a fatiga el diseño real de una jacket, identificando que la zona más solicitada de la misma era la de los nudos.

Identificado el problema en los nudos, se propuso una metodología para la optimización de los mismos, empleándola para optimizar el diseño del nudo más solicitado de la jacket.

Con el objetivo de demostrar la importancia que tiene la consideración de los costes de fabricación para la optimización de este tipo de estructura, se optimizó en primer lugar sin tener en cuenta los costes de fabricación, para posteriormente ver en que sobre coste se incurriría si se aceptasen como válidos los resultados de dicha optimización.

Si se hubiese dado por buena la primera optimización y se hubiese decidido fabricar, por ejemplo, 20 jackets. Considerando que cada jacket tiene 4 nudos como el optimizado, el sobre coste que se estaría cometiendo ascendería a un total de **610.537,60 €**. Teniendo en cuenta los elevados costes de inversión que tienen actualmente este tipo de proyectos, esta cantidad de dinero podría poner en tela de juicio la viabilidad del mismo en algunos casos.

En conclusión, se han cumplido los objetivos del proyecto. Se ha presentado una metodología para la optimización de cualquier nudo de una jacket. Se ha empleado dicha metodología para optimizar el diseño del nudo más solicitado de la misma tanto a carga última como a fatiga y por último, se ha demostrado la importancia que tiene la inclusión de los costes de fabricación en la optimización de este tipo de estructuras, donde dichos costes son elevados.





Capítulo 7. TRABAJO FUTURO



Las principales líneas de investigación que existen para la continuación de este trabajo son numerosas. Serían de especial interés por ejemplo las siguientes:

- Emplear la metodología desarrollada para el nudo optimizado en este proyecto para el resto de nudos. Mejorando aquellos donde no se cumplieran con las restricciones a fatiga y/o carga última exigidas y eliminado material en aquellos donde exista un sobredimensionamiento.
- Estudiar la posibilidad de eliminar los rigidizadores que están situados en la parte superior del nivel intermedio X bracing de la jacket.
- Parametrizar completamente la geometría de la jacket, haciendo posible que con un único modelo tridimensional, esta pudiera tener más o menos patas, una configuración de brazos u otra... El objetivo de esto sería generalizar el análisis a carga última y a fatiga que se ha empleado en este proyecto para identificar las zonas más solicitadas de la jacket y poder comparar de forma sencilla las distintas configuraciones de jackets ante distintas cargas. Pudiendo optimizar no solo una parte de la jacket como se hace en este proyecto, si no el diseño completo de la jacket.
- Integrar con ANSYS algoritmos metaheurísticos de optimización avanzados. El objetivo de esto sería realizar optimizaciones mucho más complejas. Esta línea de trabajo estaría conectada con la anterior, puesto que lo más probable es que los algoritmos que trae el propio ANSYS no fueran capaces de encontrar el óptimo cuando intentasen optimizar toda la jacket.
- También sería muy interesante tratar de hacer optimizaciones más complejas empleando varios ordenadores conectados en red, de forma que la potencia de cálculo fuese mucho mayor aunque se careciese de un supercomputador.

Ferrol, Junio de 2014

Fdo.:

Xaime Rivas Rey





Capítulo 8. REFERENCIAS Y BIBLIOGRAFÍA

CONTENIDO

6.1 Referencias	103
6.2 Bibliografía	105



8.1 REFERENCIAS

- [1] C. M. D. E. L. Énergie, P. Gadonneix, Y. D. Kim, K. Meyers, G. Ward, and C. Frei, “World Energy Resources 2013,” 2013.
- [2] A. R. Henderson, C. Morgan, B. Smith, H. C. Sorensen, R. J. Barthelmie, and B. Boesmans, “Offshore Wind Energy in Europe? A Review of the State-of-the-Art,” *Wind Energy*, vol. 6, no. 1, pp. 35–52, Jan. 2003.
- [3] T. Burton, N. Jenkins, D. Sharpe, and E. Bossanyi, *Wind energy handbook*. 2011.
- [4] E. W. E. Association, “The European offshore wind industry—key trends and statistics 1 st half 2013,” *EWEA, Brussels*, no. January, 2012.
- [5] T. Norsok, “NORSOK STANDARD Materials selection,” 2002.
- [6] R. Avilés, “*Análisis de fatiga en máquinas.*” Thomson, 2005.
- [7] B. R. Browell and A. Hancq, “Calculating and Displaying Fatigue Results The ANSYS Fatigue Module has a wide range of features for performing calculations and presenting analysis results . Table of Contents,” 2006.
- [8] W. Dong, T. Moan, and Z. Gao, “Long-term fatigue analysis of multi-planar tubular joints for jacket-type offshore wind turbine in time domain,” *Eng. Struct.*, vol. 33, no. 6, pp. 2002–2014, Jun. 2011.
- [9] D. N. Veritas, “DNV-OS-J101 Design of Offshore Wind Turbine Structures,” no. February, 2013.
- [10] D. N. Veritas, “DNV-OS-C101 Design of Offshore Steel Structures, General (LRFD method),” no. April, 2000.



- [11] D. N. Veritas, “DNV-RP-C203 Fatigue Design of Offshore Steel Structures,” no. October, 2012.
- [12] L. Tang, “Stress Concentration Factors for Partial Joint Penetration Plus welds for tubular joints,” 2010.
- [13] M. Kaufmann, D. Zenkert, and M. Åkermo, “Cost/weight optimization of composite prepreg structures for best draping strategy,” *Compos. Part A Appl. Sci. Manuf.*, vol. 41, no. 4, pp. 464–472, Apr. 2010.
- [14] T. Ashuri, M. B. Zaaier, J. R. R. a. Martins, G. J. W. van Bussel, and G. a. M. van Kuik, “Multidisciplinary design optimization of offshore wind turbines for minimum levelized cost of energy,” *Renew. Energy*, vol. 68, pp. 893–905, Aug. 2014.
- [15] T. D. Canonsburg, “ANSYS, Inc. Product Tutorials,” vol. 15317, no. October, pp. 724–746, 2012.
- [16] G. R. Fischer, T. Kipouros, and A. M. Savill, “Multi-objective optimisation of horizontal axis wind turbine structure and energy production using aerofoil and blade properties as design variables,” *Renew. Energy*, vol. 62, pp. 506–515, Feb. 2014.
- [17] R. Cazacu and L. Grama, “Steel Truss Optimization Using Genetic Algorithms and FEA,” *Procedia Technol.*, vol. 12, pp. 339–346, 2014.



8.2 BIBLIOGRAFÍA

- M. Aage, C., Allan, T.D., Carter, D.J.T., Lindgren, G. and Olagnon, *Oceans from Space: A Textbook for Offshore Engineers and Naval Architects*. France: Ifremer Repères Océans, 1998.
- International Energy Agency, “KEY WORLD ENERGY STATISTICS,” 2013.
- P.G. Forrest. *“Fatiga de los metales”*. Ed. Urmo. 1982.
- E. Madenci, I. Guven. *“The finite element method and applications in engineering using ANSYS”*. Springer. 2006.
- S. Moaveni. *“Finite element analysis. Theory and application with ANSYS”*. Prentice Hall. 1999
- Quesada. *“Empleo del método de los elementos finitos para la modelización del comportamiento a fatiga de elementos mecánicos”*. Tesis Doctoral. Universidad Carlos III de Madrid. 2005
- D. Logan, *A First Course in the Finite Element Method*. Cengage Learning, 2011





Presupuesto



Capítulo 1. Ingeniería

UNIDADES		DESCRIPCIÓN	PRECIO UNITARIO	TOTAL EUROS
450	HORAS	Ingeniería de análisis desarrollo de la optimización	50 €	22.500,00 €
TOTAL CAPÍTULO 1. INGENIERÍA				22.500,00 €

Capítulo 2. Software

UNIDADES		DESCRIPCIÓN	PRECIO UNITARIO	TOTAL EUROS
1	Ud.	SolidWorks Premium 2014 SP.1	6500 €	6.500,00 €
1	Ud.	ANSYS 15.0	15000 €	15.000,00 €
1	Ud.	Microsoft Office Professional Plus 2013	539 €	539,00 €
1	Ud.	Windows 8.1 Professional versión 64 bits	84 €	84,00 €
TOTAL CAPÍTULO 2. SOFTWARE				22.123,00 €

Capítulo 3. Hardware

UNIDADES		DESCRIPCIÓN	PRECIO UNITARIO	TOTAL EUROS
1	Ud.	Ordenador con procesador Intel Core™ i5 @2,80 GHz, Disco duro de 1,5 Tb, Pantalla TFT de 21", y accesorios	760 €	760,00 €
TOTAL CAPÍTULO 3. HARDWARE				760,00 €



Resumen por capítulos

Capítulo 1. Ingeniería.....	22.500,00 €
Capítulo 1. Software	21.123,00 €
Capítulo 1. Hardware.....	760,00 €

Importe de Ejecución Material..... 44.383,00 €

13% Gastos Generales..... 5.769,79 €

6% Beneficio Industrial..... 2.662,98 €

Importe de Ejecución 52.815,77 €

21 % IVA..... 11.091,32 €

Importe de Contrata 63.907,08 €

El importe de contrata es de sesenta y tres mil novecientos siete euros con 8 céntimos.

Ferrol, Junio de 2014

Fdo.:

Xaime Rivas Rey