



UNIVERSIDAD DE LA CORUÑA

Escuela Politécnica Superior. Ferrol

TRABAJO FIN DE GRADO



GRADO EN INGENIERÍA EN TECNOLOGÍAS INDUSTRIALES

Título:

**CÁLCULO DEL VOLUMEN DE SOLDADURA
DE UNA JACKET**

Autor:

D. NICOLÁS HEREDIA GARCÍA

Tutor:

D. ADOLFO LAMAS RODRÍGUEZ

Fecha:

JUNIO 2014



Índice general:

Memoria

Presupuesto



Memoria



Índice

Capítulo 1. Introducción	7
1.1. Definición del proyecto	8
1.2. Estructura del proyecto	10
Capítulo 2. Antecedentes	12
2.1. Características de la eólica offshore.....	13
2.2. Mercado actual y perspectivas de crecimiento	16
2.3. Estado actual de la tecnología	21
2.4. Problemas y retos técnicos aún por resolver.....	27
Capítulo 3. Objeto del proyecto	29
3.1. Objeto del proyecto	30
Capítulo 4. Solución propuesta.....	32
4.1. Descripción de los tipos de soldadura existentes en una jacket.....	33
4.2. Método inicial conocido para el cálculo del volumen de soldadura en tubos injertos....	40
4.3. Problemática del método inicial de cálculo en tubos injertos de igual diámetro.....	49
4.4. Desarrollo de un método gráfico para el caso de injertos	53
4.4.1. Automatización del cálculo del volumen de soldadura en injertos.....	53
4.4.2. Desarrollo de modelos para el cálculo de la soldadura en SolidWorks.....	56
4.4.3. Evolución en los modelos de SolidWorks.....	68
4.5. Comparación de los métodos gráficos frente al analítico y comprobación de la exactitud de ambos.....	69
4.6. Interfaz del programa para la introducción de datos.....	78
4.7. Cálculo del volumen de soldadura empleado en una jacket completa.....	91
Capítulo 5. Verificación de la viabilidad de la aplicación del cutback a tubos de igual diámetro.....	97
5.1. Importancia de la aplicación del cutback	98
5.2. Análisis de tensiones en los modelos de x-bracing para diferentes ángulos de cutback	102
Capítulo 6. Simulación del proceso constructivo de una jacket.....	110
6.1. Introducción.....	111
6.2. Modelo de simulación ExtendSim.....	118
6.3. Resultados de la simulación.....	124
Capítulo 7. Futuras líneas de investigación	128



7.1. Futuras líneas de investigación	129
Bibliografía	131



Capítulo 1. Introducción

Contenido

- 1.1. Definición del proyectopág. 8
- 1.2. Estructura del proyectopág. 10



1.1. Definición del proyecto

La misión de este proyecto consiste en el desarrollo de una herramienta automatizada para el cálculo del volumen de soldadura necesario en la construcción de una estructura de acero, conocida como jacket. La finalidad de esta estructura es servir de soporte para la instalación de un aerogenerador eólico en medio marino.

El sistema de cálculo de soldadura se implementa por medio de varios programas informáticos, de gran aplicación en ingeniería, como son Microsoft Office Excel y SolidWorks. El resultado del proyecto será un archivo Excel que contará con todas las comodidades posibles para introducir los parámetros de una jacket determinada y a través de un botón de comando mandar las instrucciones necesarias al SolidWorks para que retorne el valor del volumen de soldadura utilizado. Para conseguir esta interacción entre aplicaciones es necesario utilizar el entorno de programación VBA (Visual Basic for Applications) presente en Excel y la API (Application Programming Interface) de SolidWorks.

El motivo principal que ha impulsado el desarrollo de este proyecto es la necesidad de las empresas del sector de llevar a cabo un presupuesto ajustado del coste total en el que incurren al fabricar en serie una determinada cantidad de jackets. En relación a esto la importancia del volumen de soldadura radica precisamente en que a través de él se puede estimar, de manera fiable, el tiempo total necesario para realizar el ensamblado de la estructura y el coste total de realización del mismo, ya que estas tres variables son directamente proporcionales.

De acuerdo con lo anterior, cabe señalar que la soldadura es la principal actividad en el proceso de construcción de estas estructuras de acero, y por tanto, el proceso más importante desde el punto de vista económico, llegando a suponer más de un 35% del total. Por ello, todo lo que sea profundizar en el conocimiento sobre la soldadura aplicada a estos casos supone una ventaja competitiva de la empresa en cuestión, que utilice estos conocimientos, con respecto a las demás.

Aparte de realizar el cálculo del volumen de soldadura de una jacket se ha intentado darle al proyecto un enfoque más general, de modo que no se limita únicamente a la parte técnica del cálculo de la soldadura sino que además partiendo de la herramienta desarrollada se ha conseguido optimizar el volumen de soldadura para injertos de igual diámetro mediante la aplicación de un recorte a la soldadura definido por un ángulo conocido como cutback. Hay que tener en cuenta que si se disminuye demasiado el volumen de soldadura se pueden provocar concentraciones excesivas de tensiones que llevarían al fallo de la estructura. Por tanto, el criterio de decisión empleado en la optimización es un análisis de elementos finitos (FEM) realizado desde el programa de análisis SolidWorks Simulation, de habitual utilización para este tipo de cálculos.



Para demostrar la importancia del cálculo del volumen de soldadura se ha llevado a cabo a partir del mismo la simulación y optimización del proceso de producción de jackets en un complejo industrial, mediante el programa ExtendSim. Gracias a ello se pudieron identificar los cuellos de botella del proceso, se estimó que instalaciones era necesario ampliar, cuantas estaciones de soldadura había que habilitar para conseguir un rendimiento óptimo y, en fin, todas las acciones necesarias para garantizar el cumplimiento de la programación de tareas, y por tanto una entrega a tiempo de las estructuras. La importancia de entre la simulación del proceso industrial y el cálculo de la soldadura es que para llevar a cabo la simulación es totalmente necesario conocer el tiempo que se tarda en realizar las operaciones de soldadura , lo cual puede estimarse fácilmente a partir del volumen como ya se ha dicho anteriormente.

En cuanto a las limitaciones del proyecto hay que apuntar que el cálculo del volumen de soldadura se ha llevado a cabo únicamente para una serie de configuraciones de jacket determinadas de las que se disponía de los planos de diseño pero de las que no se tenía datos reales del volumen de soldadura puesto que eran diseños no fabricados todavía. Otra posible mejora sería sustituir esta herramienta que utiliza al mismo tiempo SolidWorks y Excel por otra íntegramente programada en un determinado entorno, como por ejemplo Visual Studio. Por último, en cuanto a la optimización del volumen de soldadura hay que tener en cuenta que solo se ha llevado a cabo para un nudo particular y no para todos los nudos de la jacket. Para conseguir esto último sería necesario estimar todas las fuerzas que actúan sobre cada uno de los nudos de la jacket, lo cual podría dar lugar perfectamente a otro trabajo de fin de grado. Aun así, conocido el procedimiento de optimización para un nudo es sencillo extrapolarlo a los demás.



1.2. Estructura del proyecto

El proyecto se estructurará en 2 apartados diferenciados: Memoria y presupuesto.

La memoria se estructurará en 10 capítulos en los que se describirán todos los datos relacionados con el proyecto, desde los antecedentes hasta la solución a los problemas planteados, pasando por toda la evolución en la realización del proyecto.

- En el capítulo 1 se describe de forma genérica el proyecto y se explica su estructura.
- En el capítulo 2 se describe brevemente el marco general del proyecto, la eólica offshore, atendiendo a su situación en la actualidad y los retos futuros. También se abordan las investigaciones previas sobre el problema a solucionar.
- En el capítulo 3 se plantean los objetivos y el alcance del proyecto.
- El capítulo 4 es el apartado central del proyecto y en él se explican las soluciones propuestas y se describe la evolución del proyecto.
- En el capítulo 5 es una parte adicional del proyecto que describe el proceso seguido para la optimización del volumen de soldadura en uno de los nudos de la jacket.
- En el capítulo 6 se explica el modelo de simulación del proceso constructivo de una jacket aprovechando la herramienta de cálculo desarrollada anteriormente.
- En el capítulo 7 se exploran las posibles mejoras e incorporaciones que se podrían realizar en el proyecto y en el ámbito de la construcción de jackets.
- Al final de la memoria se incluye un apartado de bibliografía y de anejos.

Se realiza además un presupuesto desglosado del coste de realización del proyecto.



Capítulo 2. Antecedentes

Contenido

2.1. Características de la eólica offshore.....	pág.13
2.2. Mercado actual y perspectivas de crecimiento.....	pág.16
2.3. Estado actual de la tecnología.....	pág.21
2.4. Problemas y retos técnicos aún por resolver.....	pág.27



2.1. Características de la eólica offshore

En la actualidad, gracias a las mejoras tecnológicas en todos los campos que han venido sucediéndose en las últimas décadas, se dispone de gran cantidad de sistemas y herramientas que permiten que numerosas fuentes de energía sean potencialmente aprovechables. Entre ellas destacan por su menor impacto ambiental las llamadas energías renovables, que reciben este nombre debido a que por sus características pueden considerarse virtualmente inagotables ya sea por la inmensa cantidad de energía que contienen, o porque son capaces de regenerarse por medios naturales.

Una de estas fuentes de energía renovable es la energía eólica. Esta, está presente en las corrientes de aire provocadas por el calentamiento del Sol de grandes masas de aire, lo que da origen a un gradiente de presiones y como consecuencia al movimiento del aire.

Ya desde la antigüedad se ha venido utilizando la energía del viento en el provecho del ser humano. Primero fueron los antiguos molinos de viento cuya principal función era la de moler diferentes tipos de granos, un trabajo que de realizarse a mano hubiera resultado mucho más duro y laborioso. Posteriormente se utilizaron también para abatanar prendas, para el bombeo de agua y para el corte de la madera en aserraderos. En la época de la Revolución Industrial pasaron a formar parte de las acerías sirviendo como fuelle para avivar el fuego con el que se fundían las piezas de metal.



Figura 1: Antiguo molino de viento en Achicourt (Francia)
(Fuente: <http://es.wikipedia.org/>)

Actualmente esos antiguos molinos han evolucionado mucho en cuanto a diseño y aprovechamiento. Actualmente todos los usos anteriores han sido sustituidos por uno en particular, la generación de energía eléctrica. Esto se debe a que la electricidad es una forma de energía muy útil para el ser humano y a partir de ella puede realizar multitud de trabajos. Estos molinos de viento modernos se conocen como aerogeneradores y suelen tener la apariencia que se muestra en la figura 2. Cuanto más grande es el aerogenerador más cantidad de energía es capaz de extraer. Para que su aprovechamiento sea rentable, estos aparatos se ponen en zonas donde soplan vientos de gran intensidad, por ejemplo en zonas costeras.



Figura 2: Aerogenerador moderno
(Fuente: www.xatakaciencia.com)

Cuando los aerogeneradores se encuentran en tierra firme, la energía que aprovechan se suele denominar como eólica “onshore” mientras que cuando el aprovechamiento se realiza en el medio marino el término adecuado es eólica “offshore”.

Normalmente los aerogeneradores, sea en tierra o en el mar, no se construyen de forma aislada sino que se agrupan varios de ellos en las zonas de grandes vientos para aprovechar las economías de escala. A estos grupos se les conoce, en español, como parques eólicos o también es muy usual utilizar el término anglosajón “wind farms”.



Figura 3: Parque eólico offshore (Fuente: <http://www.evwind.com/>)



Figura 4: Parque eólico onshore (Fuente: <http://estoefisica.blogspot.com.es/>)

Sin duda alguna la eólica onshore cuenta con las tecnologías más maduras en el campo de las energías renovables y el coste de la electricidad generada en esas instalaciones puede competir actualmente con la producida mediante combustibles fósiles como el carbón o el petróleo. Sin embargo esta experiencia y madurez en lo relativo a la eólica onshore no se extrapola en su mayor parte a la eólica offshore debido a las características excepcionales que presenta esta técnica, al estar situados los aerogeneradores en un medio más hostil que obliga a los mismos a tener unos cimientos mucho más robustos para soportar el envite de las olas y los fuertes vientos.



A continuación se hace una recopilación de las ventajas e inconvenientes que presenta la energía eólica offshore frente a la energía eólica onshore [1]:

Ventajas

En el mar no existen obstáculos que puedan reducir la velocidad del viento. Esto favorece la circulación del viento a mayores velocidades y con mayor predictibilidad.

La producción de electricidad es más estable y un 20% superior a la producida en tierra con los mismos medios.

Hay menos turbulencia ambiental, lo que hace que disminuya la fatiga de un aerogenerador y consecuentemente aumente su vida útil.

Se dispone de enormes espacios donde colocar aerogeneradores, lo que ofrece la posibilidad de instalar parques mucho más grandes que en tierra.

Reduce el impacto visual sobre el paisaje, al encontrarse más alejados de los núcleos urbanos.

Esta lejanía también hace que el ruido deje de suponer un problema, por lo que se puede aumentar la velocidad punta de pala, con la correspondiente disminución de su peso y de las estructuras, haciendo posible una reducción del coste de fabricación.

Inconvenientes

La evaluación del recurso eólico es más compleja y mucho más cara que en tierra.

No existen infraestructuras eléctricas que conecten, las áreas con mayores recursos eólicos en mitad del mar, con los centros de consumo.

Los costes de la cimentación y de las redes eléctricas de estas instalaciones encarecen la tecnología offshore.

Es mucho más complicado acceder y trabajar en medio el mar.

Los costes y dificultades aumentan en función se adentran en la profundidad marina.

Las máquinas requieren más separación entre ellas, lo que implica un aumento de la inversión. Esto se debe a que la baja rugosidad del mar hace que las turbulencias se propaguen más rápidamente y la estela de las máquinas influya en otras, disminuyendo así la vida útil.

2.2. Mercado actual y perspectivas de crecimiento

Debido a la creciente demanda de energía a nivel mundial, algo que no hará sino incrementarse en un futuro cercano, como se puede observar en la figura 5, es lógico suponer que la energía eólica offshore tendrá una cuota de mercado en aumento, si consigue superar los retos técnicos que requiere su utilización.

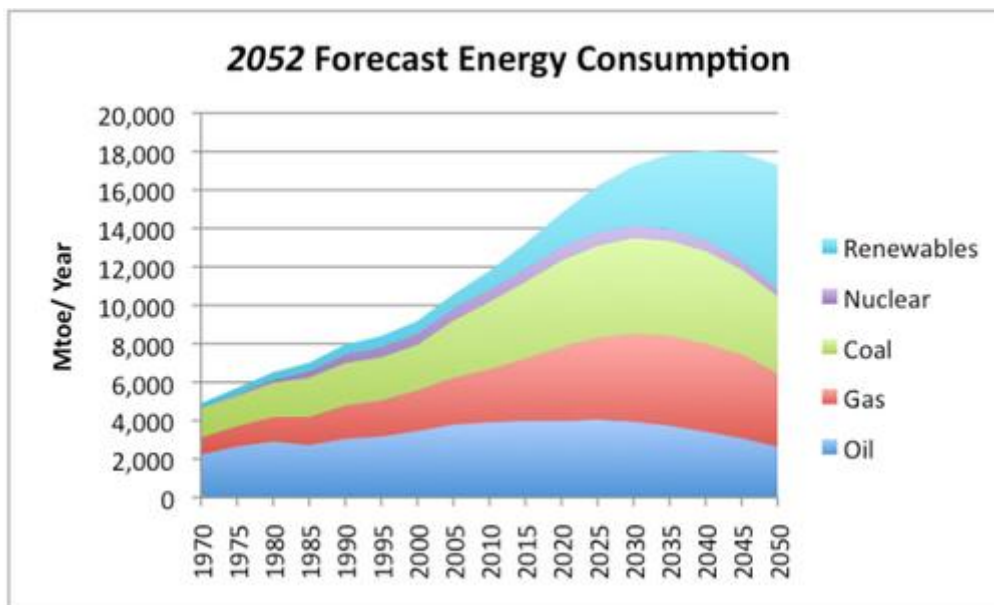


Figura 5: Mercado mundial de consumo de energía por tipo (Fuente: <http://www.2052.info/>)

En particular, Europa es el líder mundial en construcción de instalaciones eólicas offshore con 1200MW de potencia instalado, fundamentalmente en el mar del Norte [2]. Sin embargo se prevé que este número aumente rápidamente en los próximos años gracias a la apuesta fuerte de la política comunitaria por este tipo de energías, por medio de marcos regulatorios favorables y ayudas al desarrollo y a la implantación. De hecho ya en 2012 este sector emplea a unas 58000 personas y se prevé que este número vaya en aumento. Puede crear un considerable crecimiento económico que beneficie a la sociedad en su conjunto y en particular a las zonas costeras y a otras industrias del sector marítimo. De hecho el aprovechamiento de la energía eólica offshore es uno de los sectores marítimos que más crece actualmente. La capacidad instalada se prevé que llegue hasta los 40 GW en el 2020, es decir, unas 8 veces mayor que en la actualidad, suministrando el 4% de la energía eléctrica que se consume en Europa. Para 2030 su capacidad podría estar en torno a los 150 GW aportando un 14% de la electricidad consumida [3]. Para que esto suceda, sin embargo, es necesario que se mantengan las ayudas económicas y fiscales a las empresas que apuesten por esta tecnología y que el marco legislativo siga siendo favorable de modo que por ejemplo no resulte complejo alquilar una porción de terreno marítimo para situar allí los aerogeneradores. Actualmente existen estructuras hasta una profundidad de 40 – 50 m. Es necesario seguir innovando para poder situar aerogeneradores a una profundidad mayor para



poder aprovechar mejor las zonas de fuertes vientos. Para que se cumplan las previsiones dadas anteriormente es imprescindible conseguir una serie de hitos en diferentes campos [4]:

Recomendaciones políticas:

- Un marco legislativo estable y un compromiso vinculante hacia el desarrollo de las energías renovables.
- Una estrategia industrial cohesiva y clara guiando el desarrollo de la energía eólica offshore.
- Agilización de trámites burocráticos para poner en marcha este tipo de proyectos.
- Apoyo por parte de las instituciones y de la población en general.
- Fuerte colaboración entre los distintos jugadores y en ocasiones competidores para fomentar los proyectos conjuntos. El intercambio de experiencia e información es crucial y beneficiaría a todas las partes interesadas.
- Nuevos estándares específicos para los sistemas offshore que permita una mayor rapidez en la construcción y la revisión.
- Un acceso al crédito y a la financiación suficiente teniendo en cuenta el riesgo que presentan este tipo de instalaciones punteras.

Recomendaciones económicas

- Los puertos deberán modernizarse para tener suficiente espacio para acomodar los buques de instalación y almacenar los materiales y las piezas de repuesto.
- Sistemas que se auto instalen deben ser desarrollados para minimizar los costes de instalación.
- Se deberán llevar a cabo cursos para la formación de profesionales en la materia para remediar la escasez actual de los mismos.

Recomendaciones técnicas

- Modelado de herramientas y códigos numéricos que simulen el comportamiento de la estructura completa deben ser desarrollados y validados para mejorar el diseño.
- El diseño de las turbinas eólicas y su tamaño debe ser optimizado para las condiciones marítimas.
- Es necesario disponer de sistemas de control robustos.
- Debe realizarse una mayor investigación de los tipos de anclajes y soportes que se pueden utilizar.
- Nuevas técnicas de medida y aparatos deben ser desarrollados para evaluar las condiciones del viento y de las olas en los parques eólicos.
- Nuevos ensayos a pequeña y a gran escala para comprobar la validez y las ventajas de las diferentes técnicas existentes.



Como la zona de Europa es pionera en este tipo de energías limpias el estudio y los datos se centran en esta zona, suponiéndose que en caso de que la tecnología siga adelante con éxito otras zonas se sumaran al mercado.

En Europa, desde el año 2000 la energía eólica offshore no ha parado de crecer. Todos los años han ido poniéndose en funcionamiento nuevas turbinas hasta alcanzar en el año 2012 la cifra de 1662 turbinas instaladas, con una potencia que asciende a los 5 GW, dividida en 55 parques eólicos situados en 10 países europeos. Ese año, 2012, el último del que se tienen datos, los parques eólicos offshore produjeron 18 TWh, una energía suficiente para abastecer 5 millones de hogares. La energía eólica offshore representa actualmente el 10% de las nuevas instalaciones de energía eólica, si bien se prevé que esta cifra aumente en un futuro cercano al comprobarse la viabilidad de ese tipo de aprovechamiento de energía. La mayoría de los proyectos offshore (3.2 GW de potencia o lo que es lo mismo, un 65% del total de la potencia instalada en Europa) están situados en el mar del Norte [5]. El resto se reparte a partes iguales entre el Océano Atlántico y el Mar Báltico. Actualmente no existen parques eólicos en el Mar Mediterráneo porque las aguas son profundas y las acuales subestructuras comerciales están limitadas a unos 40 o 50 metros. Esto limita las posibilidades de explotar la eólica offshore en el Mediterráneo.

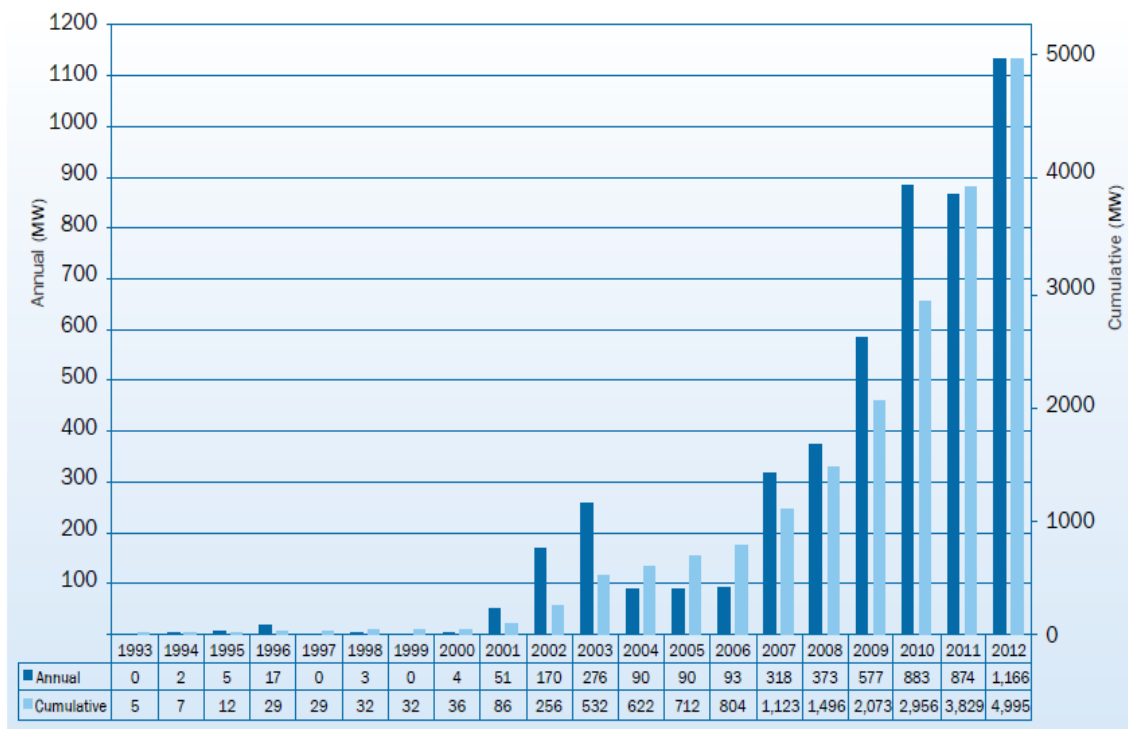


Figura 6: Potencia anual y acumulativa instalada en parques eólicos offshore en el año 2012 en Europa (Fuente: EWEA)

En el 2012 la profundidad media de los parques eólicos offshore fue de 22 m. Por su parte la distancia media a la costa se situó en 29 km. Está claro que esa profundidad media y esa distancia a la costa se irán incrementando poco a poco en los sucesivas instalaciones que se vayan llevando a cabo. En relacion a esto ya hay proyectos

anunciados que se sitúan a 200 km de la costa y a una profundidad de 215 m. Al mismo tiempo que la tendencia se mueve hacia aguas profundas, en el caso de turbinas, se tiende a fabricarlas cada vez más grandes pasando de 3.6 MW en 2011 a 4 MW en 2012. Así mismo en ese año se anunciaron 38 nuevos modelos de turbinas de los cuales solo 9 tenían una capacidad inferior a los 5 MW [6]. Esto se explica sencillamente por el hecho de que el coste de instalación de los aerogeneradores y su posterior mantenimiento es mucho mayor si se realiza en suelo marino. Además en ese caso, al ser un medio más hostil, con mayores vientos y con el empuje de las olas, los cimientos cobran especial importancia y es necesario realizarlos con mayor resistencia y mayor factor de seguridad. Por todo ello se intenta fabricar máquinas que sean capaces de generar mayor cantidad de energía, lo que equivale a aumentar el tamaño de la turbina y las hélices del aerogenerador.

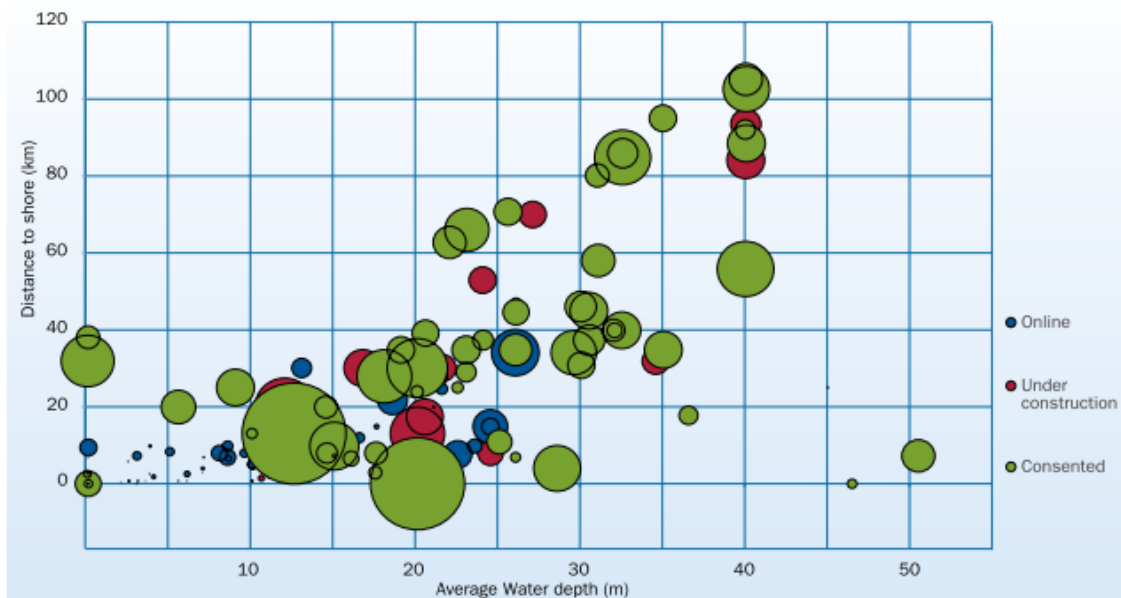
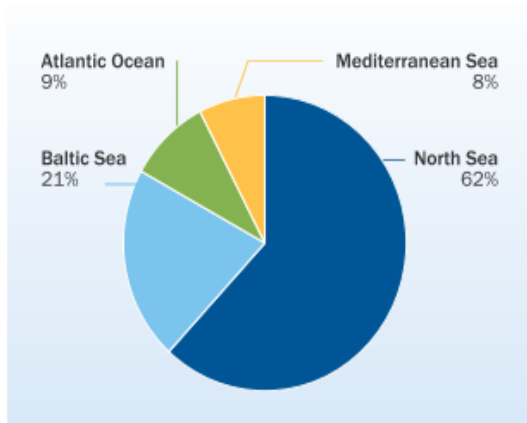


Figura 7: Profundidad media de los parques eólicos offshore frente a su distancia a la costa, tanto para parques en funcionamiento como en construcción y proyectados. Las burbujas representan la capacidad total del parque. (Fuente: EWEA)

En 2020 la eólica offshore representará el 30% de las nuevas instalaciones anuales del mercado eólico. En esa fecha la mayoría de las instalaciones seguirá estando en el Mar del Norte mientras que irán desarrollándose poco a poco instalaciones en otros lugares hasta quedar una configuración como la que se muestra en la figura 8.



El Mar del Norte mientras que irán desarrollándose poco a poco instalaciones en otros lugares hasta quedar una configuración como la que se muestra en la figura 8.

Figura 8: Proyectos en fase de planificación en las diferentes cuencas marítimas en Europa (Fuente: EWEA)



En 2030 la potencia instalada llegará hasta los 150 GW y en 2050 alcanzará los 460 GW, lo que supondrá el 50% del total de la energía eólica. Este exponencial crecimiento se logrará a través de los nuevos diseños de anclajes para la eólica offshore en aguas profundas, del aumento de la potencia de los aerogeneradores y del abaratamiento de los costes por razones de economías de escala [7].

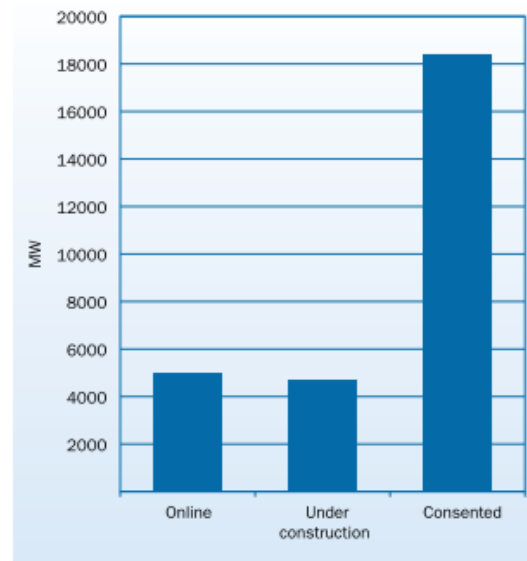


Figura 9: Proyectos de eólica offshore en funcionamiento, en construcción y en fase de planificación (Fuente: EWEA)

2.3. Estado actual de la tecnología

Actualmente la eólica onshore es una tecnología ya madura, con unos costes de generación reducidos. Su hermana, la eólica offshore se nutre de estos conocimientos, pero tiene ciertas particularidades que la convierten en un gran reto ingenieril a la hora de aprovechar esa energía. En cuanto a las turbinas cabe destacar que no presentan variaciones notables con respecto a los aerogeneradores terrestres, únicamente se diferencian en que su tamaño es mayor para conseguir aumentar su potencia. En el caso de la eólica offshore el elemento fundamental es la subestructura que soporta la turbina y la sujeta al fondo marino para evitar que el viento o las olas arrastren el aparato y lo inutilicen. Existen diferentes tipos de subestructuras comerciales actualmente, y los criterios básicos de selección son:

1. La profundidad del emplazamiento.
2. El tipo de lecho marino.
3. El oleaje y la velocidad del viento existente en la zona.
4. Los movimientos del fondo marino.
5. La existencia de corrientes marinas.
6. La actividad sísmica de la zona.

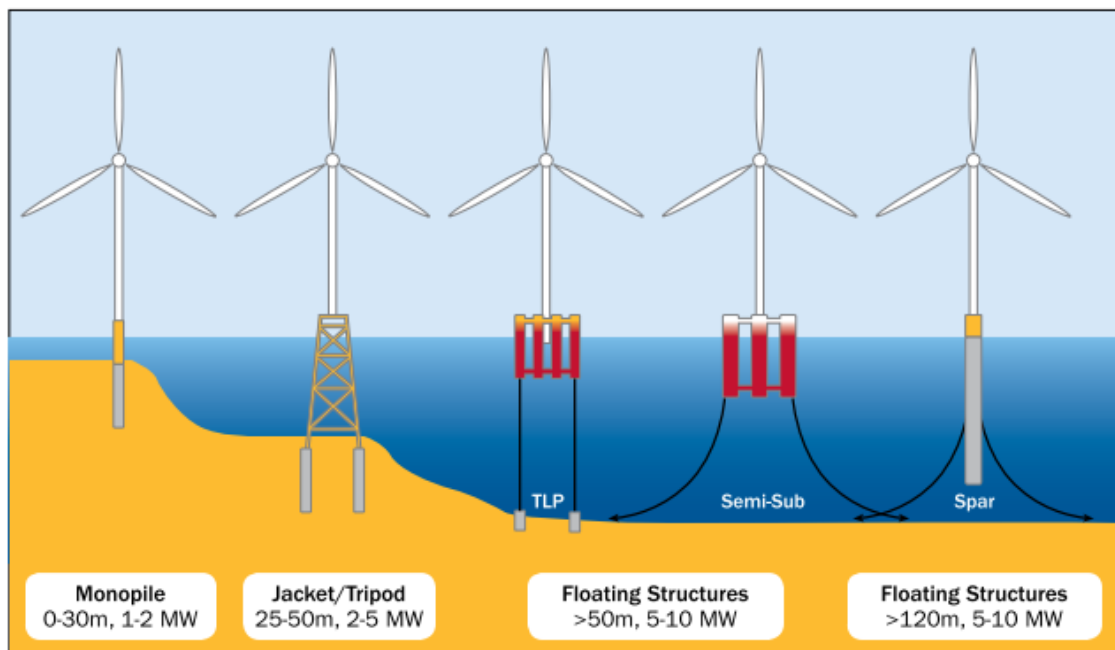
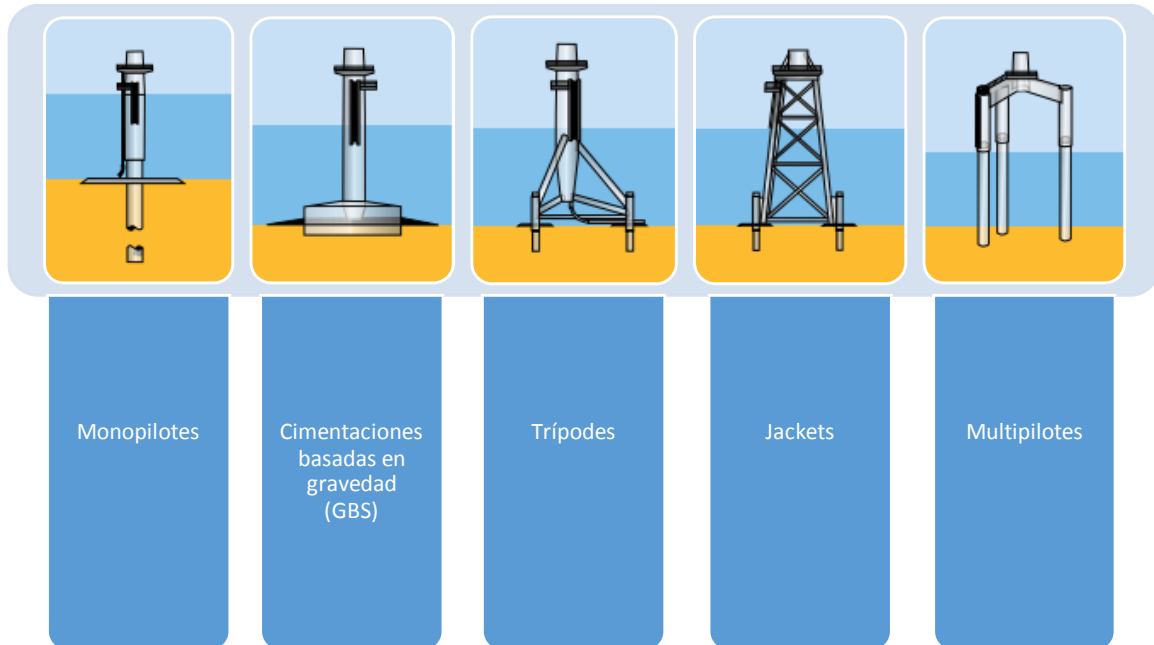


Figura 10: Tipos de subestructuras offshore en función de la profundidad del fondo marino (Fuente: EWEA)

Como se puede ver en la figura 10 se distinguen entre aquellas subestructuras que están fijadas al fondo marino y las subestructuras flotantes sujetadas mediante cables. Las primeras son las que se encuentran comercializadas actualmente mientras que las plataformas flotantes se encuentran aún en etapas de investigación y ensayos, aunque a gran distancia de la costa se mantienen como la única opción viable.

En el caso de las estructuras fijas existen una gran variedad de ellas. La diferencia básica entre ellas radica en la intensidad de los esfuerzos que pueden soportar, que provocará que a determinadas profundidades o en determinados lugares por la especial virulencia del viento y de las olas algunas sean válidas y otras no. A continuación se muestra un esquema de los principales tipos de subestructuras:



Actualmente las más utilizadas son en primer lugar la estructura monopilote y a continuación la cimentación basada en gravedad. Esto se debe a que se trata de las estructuras más simples y menos costosas además con una instalación bastante sencilla. Poco a poco van aumentando las estructuras tipo jacket que son muy conocidas en sectores como el gas o el petróleo y que aguantan mayores profundidades [8].

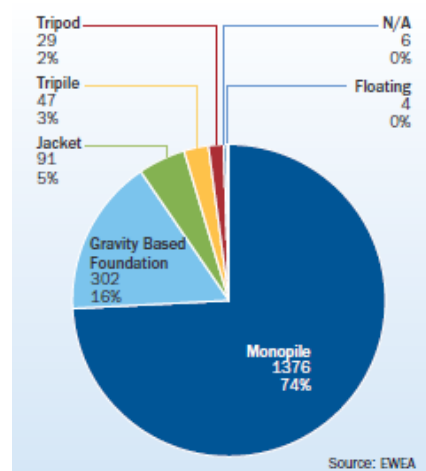


Figura 11: Cantidades instaladas de cada tipo de subestructura offshore (Fuente: EWEA)

Las principales características de cada tipo de subestructura son las siguientes:

	PROFUNDIDAD < 30m		40 m < PROFUNDIDAD < 70m	
	MONOPILOTE	GRAVEDAD	TRIPODE	JACKET
Diseño	<ul style="list-style-type: none"> Sencillo y ligero. Diseño de pieza de transición complicada. Material: acero. 	<ul style="list-style-type: none"> Diseño mas complicado. Pesada y rígida. Material: hormigón. 	<ul style="list-style-type: none"> Sencilla y ligera. Pocas soldaduras. Material: acero. 	<ul style="list-style-type: none"> La mas adecuada para grandes profundidades. Material: acero.
Fabricación	<ul style="list-style-type: none"> Fabricación en taller y ensamblaje final en puerto. 	<ul style="list-style-type: none"> Encofrado en puerto cerca del muelle. 	<ul style="list-style-type: none"> Fabricación en taller y ensamblaje final en puerto si es necesario. 	<ul style="list-style-type: none"> Fabricación en taller y ensamblaje final en puerto si es necesario.
Logística	<ul style="list-style-type: none"> Transporte marítimo en flotación. Botadura sencilla uso de grúas pequeñas tamaño. 	<ul style="list-style-type: none"> Transporte marítimo en flotación o barcaza. Botadura algo mas complicada uso de grúas de medio tamaño. 	<ul style="list-style-type: none"> Transporte mediante barcaza. 	<ul style="list-style-type: none"> Transporte mediante barcaza.
Instalación	<ul style="list-style-type: none"> Sencilla mediante martillo hidráulico. Uso de buques pequeños. 	<ul style="list-style-type: none"> Sencilla mediante martillo hidráulico. Uso de remolcadores convencionales. 	<ul style="list-style-type: none"> Estructura pilotada. Preparación del terreno para introducir pilotes. 	<ul style="list-style-type: none"> Estructura pilotada. Preparación del terreno para introducir pilotes.
COSTE TOTAL	<ul style="list-style-type: none"> Coste bajo. La mas barata entre las estructuras fijas. La instalación es lo mas caro. 	<ul style="list-style-type: none"> Coste bajo. Coste de fabricación superior al monopilote. 	<ul style="list-style-type: none"> Coste alto. Coste inferior de fabricación que las jacket. 	<ul style="list-style-type: none"> Coste alto. La mas cara. Fabricación cara debido a la gran cantidad de soldaduras

Este proyecto se va a centrar en las plataformas tipo jacket, cuya demanda está en aumento notable debido a su coste reducido en relación con otras subestructuras y a su notable estabilidad y resistencia.



Figura 12: Parque eólico Thornton Bank (Fuente: Asociación de Industriales Metalúrgicos de Galicia, ASIME)

La jacket es el mejor concepto de subestructura fija para calados elevados en el sector eólico offshore. Se trata de una estructura de celosía desarrollada por el sector petrolífero y gasista para la explotación de estos recursos en suelo marino y es sin duda la más utilizada en este ámbito.

Entre las características básicas de una jacket cabe destacar que están siempre fabricadas en acero y se componen de tres o cuatro patas principales, conectadas entre sí por arriostramientos. Todos los elementos son tubulares excepto los de la pieza de transición donde pueden encontrarse diferentes tipos de diseños

Todos los miembros están conectados mediante uniones tubulares de tipo:

- Unión pata-brazos: forma K.
- Unión pata –brazo superior e inferior: forma Y.
- Unión brazo-brazo: forma X.

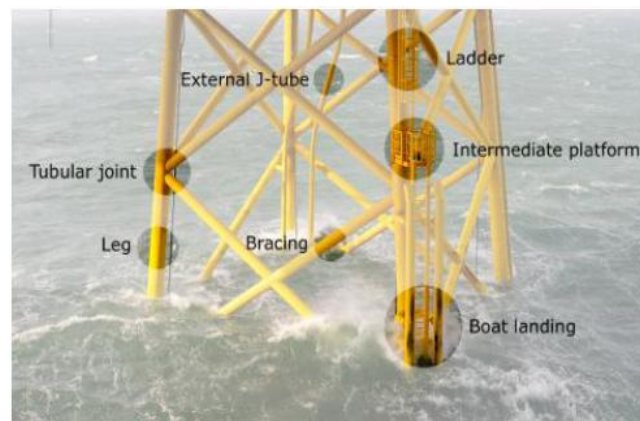


Figura 13: Vista de las diferentes uniones soldadas existentes en una jacket (Fuente: ASIME)

Todas las uniones son soldadas, y por ello, debido a la gran cantidad de las mismas, el coste de fabricación es elevado. Las uniones sufren mucha fatiga por lo que sus soldaduras deben ser diseñadas mediante análisis de fatiga. Una posible solución al problema de fatiga de los nodos es la fabricación de nodos de fundición (cast nodes) aunque su coste es muy elevado actualmente [9].

En cuanto a la pieza de transición, al igual que en el monopilote, la pieza de transición en una estructura jacket es muy importante. A diferencia de las piezas de transición de los monopilotes, no tienen que nivelar la estructura. Incluye una plataforma de trabajo debajo de la torre del aerogenerador. Las dimensiones aproximadas de las PT actuales son:

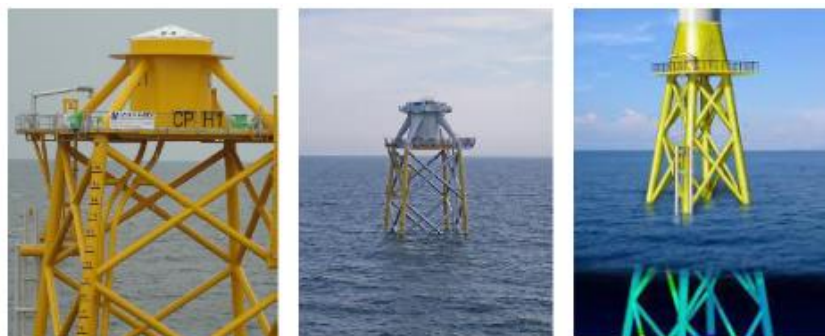


Figura 14: Diferentes tipos de piezas de transición (Fuente: ASIME)

Existen diferentes prototipos para estas estructuras, aunque sus diseños son generalmente celosamente guardados por las empresas constructoras.



Figura 15: Diseño de jacket tipo Quattropod (Fuente: ASIME)



Figura 16: Diseño de jacket tipo Hochtief (Fuente: ASIME)



Figura 17: Diseño de jacket tipo Atkins/BiFab (Fuente: ASIME)



Figura 18: Diseño de jacket tipo Twisted (Fuente: ASIME)

En cuanto a la fabricación de las jackets hay que señalar que la gran cantidad de soldadura manual que necesita esta subestructura para unir todas las uniones tubulares aumenta de manera importante su coste. Además el coste de fabricación de la pieza de transición es también elevado. Su transporte hasta el emplazamiento solo puede realizarse a través de barcaza [10].



Figura 19: Transporte de las jackets (Fuente: ASIME)

Actualmente estas estructuras están ya en fase de fabricación en serie. Esto supone que las empresas miran al mínimo detalle para conseguir resultados óptimos. Una tarea fundamental es cuantificar el coste en el que van a incurrir por la fabricación de la jacket. Ésta al estar conformada principalmente por tubos es necesario gran cantidad de soldadura para formarla lo que convierte a esta etapa de soldado en la fundamental del proceso. Es por ello que se necesita calcular el volumen de soldadura que se va a emplear. Esta tarea es compleja ya que los injertos aún determinado ángulo conforman una curva de soldadura difícil de predecir y de calcular analíticamente.



2.4. Problemas y retos técnicos aún por resolver

En el ámbito de las jackets existen aún una serie de retos por resolver, a pesar de ser unas estructuras muy utilizadas desde hace tiempo en el sector gasista y petrolero, como ya se comentó antes.

Los principales retos serían:

- Optimización del diseño de la jacket para tratar de disminuir su peso. Ésta podría hacerse bien mediante la renovación del diseño o mediante la modificación de la conicidad de los tubos de forma que tuviesen un diámetro menor en aquellas zonas donde las tensiones no supusieran un problema.
- Cálculo del volumen de soldadura necesario para su fabricación. Este parámetro es muy importante desde el punto de vista de la fabricación ya que proporciona una estimación de los costes en los que se incurre en el montaje de la jacket y del tiempo necesario para llevar a cabo toda la soldadura necesaria.
- Mejora de técnicas de protección frente a la corrosión en un ambiente hostil como el marino, durante largos periodos de tiempo.
- Solución de problemas relacionados con la fatiga, que se produce en la estructura, y muy especialmente en los nudos con forma de x por las continuas y variables tensiones inducidas por el viento y las olas [11].
- Análisis de jacket bajo cargas extremas y variables como acciones sísmicas u olas de gran tamaño [12].
- Análisis de sensibilidad de los cimientos de la subestructura ante cargas sísmicas.
- Control de la vibración generada en la subestructura debido a las cargas que actúan sobre ella.
- Identificación y cuantificación de daños en la estructura para comprobar su seguridad y estabilidad [13].



Capítulo 3. Objeto del proyecto

Contenido

3.1. Objeto del proyecto	pág.30
--------------------------------	--------



3.1. Objeto del proyecto

El objeto de este proyecto es establecer un método de cálculo del volumen de soldadura necesario para la construcción de una jacket que sea lo más preciso posible. El método se programará para diferentes diseños de jackets. También se dispone de datos sobre el volumen real que fue necesario emplear para fabricar determinados tipos de uniones soldadas por lo que se podrá comprobar si la herramienta arroja valores suficientemente exactos.

Así mismo, el presente proyecto también tiene por objeto otorgar al autor el título de Graduado en Ingeniería en Tecnologías Industriales, una vez presentado y defendido en la Escuela Politécnica Superior de Ferrol. El proyecto se ha desarrollado con la colaboración del Grupo Integrado de Ingeniería (GII) de la Universidad de La Coruña.

Los objetivos a alcanzar en el proyecto son los siguientes:

- La herramienta de cálculo debe disponer de una interfaz gráfica para la introducción de datos sencilla y agradable en la interacción con el usuario, y que facilite su tarea siendo lo más automática posible.
- Debe estimar un volumen mínimo y máximo posible para la construcción de la jacket que será función de las tolerancias en los parámetros de la soldadura.
- Debe disponer de la posibilidad de realizar el cálculo del volumen necesario para una única unión soldada, que podrá ser de diferentes clases.
- Tendrá que dar la posibilidad de exportar los datos obtenidos a otro archivo Excel a fin de poder comprobar su concordancia con la realidad.
- Será necesario que disponga de varias precisiones de cálculo a elegir por el usuario en base a su necesidad de rapidez o precisión.
- El método de cálculo, en el caso de injertos, incluirá la posibilidad de realizar recortes en la soldadura con el objetivo de ahorrar soldadura.
- La herramienta planteará la posibilidad de realizar el cálculo de una manera gráfica por medio de SolidWorks, método más preciso pero más lento, y de una manera analítica cuya principal ventaja es la rapidez.
- Además de la herramienta se hará un estudio de optimización de la soldadura tratando de disminuir el volumen al mínimo sin que ello suponga una concentración de esfuerzos demasiado grande. El criterio de decisión será por tanto un análisis de elementos finitos.
- Por último, a partir de los datos de soldadura obtenidos por la herramienta, se realizará una simulación del proceso constructivo de una jacket.



Capítulo 4. Solución propuesta

Contenido

4.1. Descripción de los tipos de soldadura existentes en una jacket.....	pág.33
4.2. Método inicial conocido para el cálculo del volumen de soldadura en tubos injertos.....	pág.40
4.3. Problemática del método inicial de cálculo en tubos injertos de igual diámetro.....	pág.49
4.4. Desarrollo de un método gráfico para el caso de injertos.....	pág.53
4.4.1. Automatización del cálculo del volumen de soldadura en injertos.....	pág.53
4.4.2. Modelos para el cálculo de la soldadura en SolidWorks.....	pág.56
4.4.2.1. Modelo de cálculo en 2D.....	pág.58
4.4.2.2. Modelo de cálculo intermedio 2D-3D.....	pág.62
4.4.2.3. Modelo de cálculo en 3D.....	pág.66
4.4.3. Evolución en los modelos de SolidWorks.....	pág.68
4.5. Comparación del método gráfico frente al analítico y comprobación de la exactitud de ambos.....	pág.69
4.6. Desarrollo de una interfaz gráfica en Excel para la introducción de datos.....	pág.78
4.7. Cálculo del volumen de soldadura empleado en una jacket completa.....	pág.91

4.1. Descripción de los tipos de soldadura existentes en una jacket

Una jacket está compuesta casi en su totalidad, a excepción del elemento superior, la transition piece, y algún otro elemento auxiliar, por tubos. Estos tubos es necesario soldarlos entre sí para que conformen una estructura sólida. Si se analizan los planos de una jacket cualquiera se puede deducir que existen tres tipos de soldadura:

El primer tipo es una soldadura de tipo lineal, que se efectúa para conformar el tubo a partir de una chapa doblada. Esta soldadura se puede realizar de forma automática mediante un robot de soldadura ya que no entraña una dificultad excesiva al no presentar trayectorias complejas. Por ello, el cálculo del volumen de soldadura que supone tampoco es complejo y se puede estimar de forma analítica con suficiente precisión. Para ello, como es habitual en este campo, hay que observar primeramente la sección de la soldadura, ver sus límites y aproximar esa sección a una forma geométrica más o menos simple. En el caso de la figura 23, si cortásemos el tubo de forma transversal se obtendría una imagen como la siguiente:



Figura 20: Tubo con soldadura marcada en rojo (Fuente: Propia)

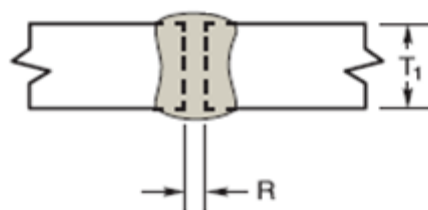


Figura 21: Sección de la soldadura típica de un tubo (Fuente: Wikipedia)

Como se puede observar, la sección de la figura 24 es parecida a un rectángulo, por lo que su volumen se puede estimar como:

$$V_{sold.} = L \cdot R \cdot T_1 \quad [1]$$

Donde L es la longitud del tubo, R el entrehierro y T1 el espesor del tubo.

En cualquier soldadura siempre queda un reborde cuya forma es bastante variable y dependiente del tipo de soldador que la ha llevado a cabo. Es por ello que se suele incluir en el cálculo del volumen un coeficiente de corrección por sobreespesores, conocido como k, al que en el proyecto presente se le asocia un valor de 1,06. Así pues la ecuación (1.1) quedaría como:

$$V_{sold.correg.} = V_{sold.} \cdot k = L \cdot R \cdot T_1 \cdot k \quad [2]$$

Otro tipo de soldadura que aparece es la soldadura orbital, utilizada para uniones a tope, y que se realiza entre los extremos de dos tubos. Obviamente en el caso de la jacket van a existir multitud de soldaduras de este estilo hasta coseguir formar esa estructura de gran tamaño. En estos casos, debido a que tanto el cabezal de soldadura orbital como el componente permanecen estacionarios y sólo el electrodo viaja alrededor de la soldadura, este sistema es idealmente adecuado para la automatización. Las soldadoras automáticas no sólo producen una soldadura de calidad superior más consistente que los operadores manuales, si no que logran un costo más bajo y con una mayor productividad.



Figura 22: Recreación en SolidWorks de la soldadura orbital (en rojo) (Fuente: Propia)



Figura 23: Robot de soldadura preparado para soldadura orbital (Revista de Metalurgia)

Figura 24: Tubos armados y preparados para ser soldados de forma orbital (Revista de Metalurgia)



Figura 25: Aspecto de la soldadura orbital realizada a los tubos de la figura 27 (Fuente: Revista de Metalurgia)

En la soldadura orbital es típico que las secciones varíen en función de la preparación de bordes empleada, y por tanto, el volumen también será diferente. El tipo de sección que se presentó en el caso de la soldadura lineal también se puede utilizar en este caso, suponiendo que L es igual al perímetro del tubo ($2\pi R$). Sin embargo no es una preparación de bordes muy utilizada en estos casos ya que al haber menor cantidad de soldadura pueden presentarse problemas de apariciones de grietas y falta de cohesión de la soldadura. También en los casos que se presentan a continuación se aplican coeficientes de corrección para tener en cuenta los rebordes generados en la soldadura. Como en el caso anterior, el coeficiente k será igual a 1,06.

En la herramienta de cálculo que se desarrollará se incluirán todas las preparaciones de bordes que se presentan a continuación para que el usuario tenga mayores posibilidades de elección. Sin embargo, por defecto para las uniones orbitales de las jackets se utiliza la soldadura “Single side welding” sin tacón.

- ❖ Tipo de soldadura “Single side welding” sin tacón. La sección tiene forma de trapecio con la base mayor hacia el lado exterior, que es donde se suelda para permitir una mejor penetración de la soldadura. Es un tipo de soldadura muy utilizado debido a sus buenas prestaciones y facilidad de preparación de bordes. No se aplica soldadura de repaso por el interior del tubo.

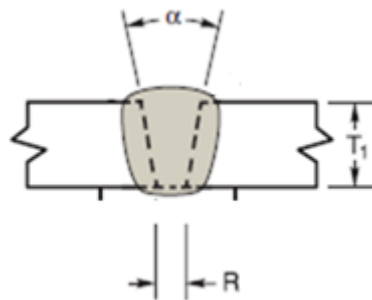


Figura 26: Sección de la soldadura SSW sin tacón (Fuente: www.monografias.com)

$$V_{sold.} = 2\pi r_b \cdot \left[(T_1^2 \cdot \tan(\alpha / 2) + T_1 \cdot R) \right] \quad [3]$$

Con corrección de sobreespesores:

$$V_{sold.correg.} = V_{sold} \cdot k = 2\pi r_b \cdot \left[(T_1^2 \cdot \tan(\alpha / 2) + T_1 \cdot R) \right] \cdot k \quad [4]$$

Donde r_b es el radio exterior del tubo, T_1 el espesor del tubo, α el ángulo del chaflán y R el entrehierro o distancia entre las superficies enfrentadas que se van a soldar. k ya se ha comentado su significado y $V_{sold.correg.}$ es el volumen final obtenido al corregir sobreespesores.

- ❖ Tipo de soldadura “Single side welding” con tacón. La sección tiene forma de trapecio inicialmente, para terminar en una forma rectangular. A esa parte final donde no se realiza chaflán, se le denomina tacón.

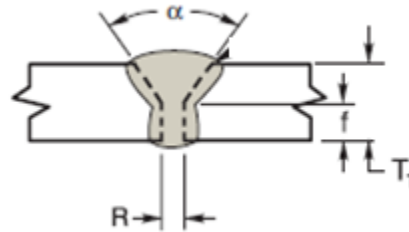


Figura 27: Sección de la soldadura SSW con tacón (Fuente: www.monografias.com)

$$V_{sold.} = 2\pi r_b \cdot \left[(T_1 - f)^2 \cdot \tan(\alpha / 2) + T_1 \cdot R \right] \quad [5]$$

$$V_{sold.correg.} = V_{sold} \cdot k = 2\pi r_b \cdot \left[(T_1 - f)^2 \cdot \tan(\alpha / 2) + T_1 \cdot R \right] \cdot k \quad [6]$$

Donde f es la longitud del tacón y los demás parámetros ya se han explicado antes.

- ❖ Tipo de soldadura “Double side welding” con tacón. La sección tiene forma de pajarita. Su principal inconveniente es que se debe soldar por ambos lados y la zona interior puede ser un tanto inaccesible para el operario. En este caso el tacón se encuentra en el centro de las superficies a soldar.

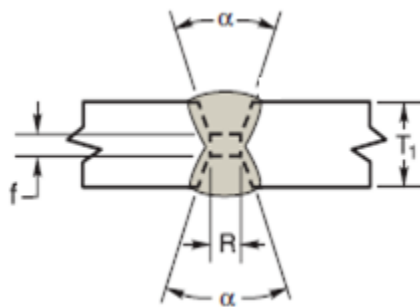


Figura 28: Sección de la soldadura DSW con tacón central (Fuente: www.monografias.com)

$$V_{sold.} = 2\pi r_b \cdot \left[\frac{1}{2} \cdot (T_1 - f)^2 \cdot \tan(\alpha / 2) + T_1 \cdot R \right] \quad [7]$$

$$V_{sold.correg.} = V_{sold} \cdot k = 2\pi r_b \cdot \left[\frac{1}{2} \cdot (T_1 - f)^2 \cdot \tan(\alpha / 2) + T_1 \cdot R \right] \cdot k \quad [8]$$

Donde todos los parámetros se han comentado antes.

- ❖ Tipo de soldadura “Double side welding” con tacón y ángulos chaflanes distintos. Es parecida a la anterior pero con unos ángulos de chaflán diferentes en el interior y en el exterior.

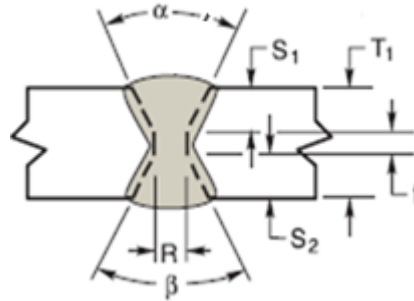


Figura 29: Sección de la soldadura DSW con tacón central y ángulos distintos (Fuente: www.monografias.com)

$$V_{sold.} = 2\pi r_b \cdot \left[\frac{1}{4} \cdot (T_1 - f)^2 \cdot \tan(\alpha / 2) + \frac{1}{4} \cdot (T_1 - f)^2 \cdot \tan(\beta / 2) + T_1 \cdot R \right] \quad [9]$$

$$V_{sold.correg.} = V_{sold} \cdot k = 2\pi r_b \cdot \left[\frac{1}{4} \cdot (T_1 - f)^2 \cdot \tan(\alpha / 2) + \frac{1}{4} \cdot (T_1 - f)^2 \cdot \tan(\beta / 2) + T_1 \cdot R \right] \cdot k \quad [10]$$

Por último existe en la jacket la soldadura de injertos, utilizada para realizar las conexiones entre los tubos y conseguir así la estructura de celosía. En este tipo de soldadura un tubo, conocido como brazo, se suelda sobre otro, la cuerda, con un ángulo de inclinación determinado.

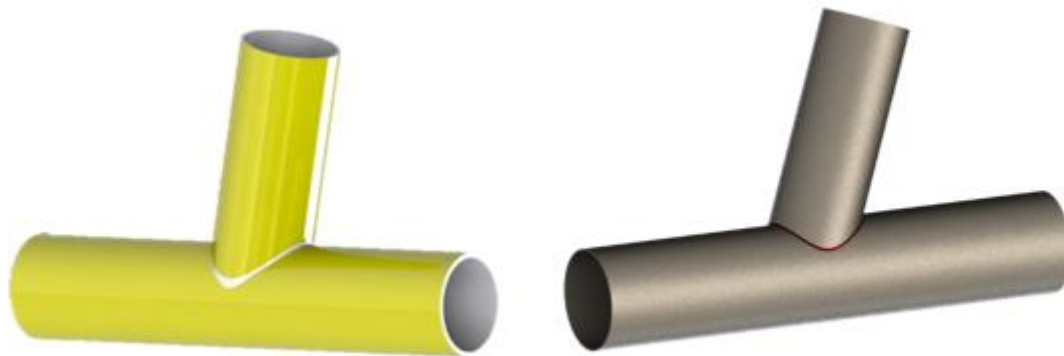


Figura 30: Modelos de SolidWorks de la soldadura de injertos (Fuente: Propia)

Este tipo de uniones son las más complicadas ya que la trayectoria de la soldadura es compleja y depende en gran medida de los diámetros del tubo injerto (brazo) y del tubo pasante (cuerda) así como del ángulo de inclinación de uno respecto al otro (θ). Por ello la soldadura ha de realizarse manualmente, lo que implica mayores costes y mayor tiempo de procesamiento.

En la siguiente figura se puede ver un modelo realizado en SolidWorks de este tipo de soldadura, aislada del brazo y de la cuerda. Se puede apreciar a simple vista la dificultad de caracterizar esta soldadura mediante un procedimiento analítico. Típicamente se suele denominar a esta soldadura con el término anglosajón “saddle”, que significa silla de montar, debido a su notable parecido con la misma:



Figura 31: Recreación de una soldadura de injertos (Fuente: Propia)

Hay que señalar que no existe una ecuación analítica que determine el volumen de soldadura en estos casos ya que depende de múltiples variables y la geometría de la sección es compleja y difícilmente aproximable mediante figuras geométricas sencillas, como se puede ver en la figura 34.

La preparación de bordes en el tubo injerto es también complicada en estos casos y tiene que ir realizándose poco a poco por tramos. Se muestra a continuación el proceso en imágenes de fabricación de un nudo en un taller.

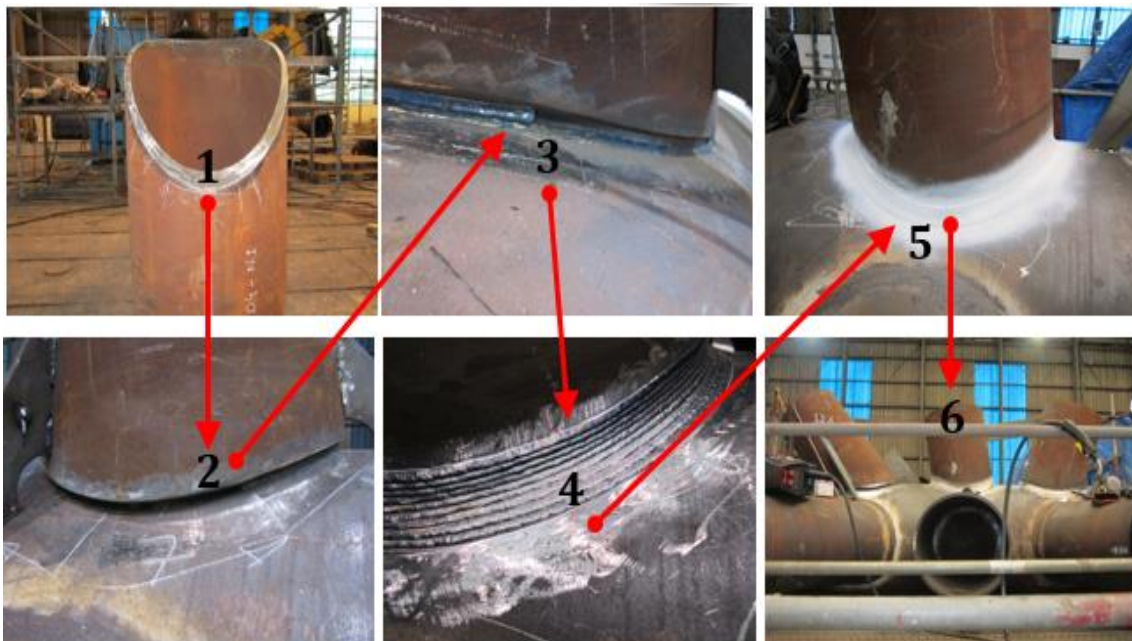


Figura 32: Realización de la soldadura de injertos en taller (Fuente: FEVE)

Paso 1º: Realizar la preparación de bordes del tubo injerto o brazo.

Paso 2º: Armado. Colocación del tubo injerto en la posición adecuada para realizar la soldadura.

Paso 3º: Soldadura del cordón de raíz.

Paso 4º: Soldadura de los cordones de relleno.

Paso 5º: Tratamiento superficial y reposo de la soldadura.

Paso 6º: Repetición del proceso para los demás injertos

Observando más al detalle la soldadura de un tubo injerto en el taller ver como la soldadura está realizada aplicando diversas pasadas y no de una sola vez. Esto es complejo de modelizar por lo que al realizar las estimaciones de este volumen de soldadura se multiplicarán los resultados obtenidos por un coeficiente de sobreespesores, k , que también se aplica al resto de soldaduras pero en este caso de valor 1,15 debido a que el volumen de sobreespesores es mayor.



Figura 33: Soldadura practicada en un injerto en taller (Fuente: FEVE)

Caracterizar este tipo de soldadura es no obstante imprescindible para lograr calcular el volumen de soldadura de la jacket completa de manera fiable ya que ésta suele contener una cantidad de soldaduras de injertos del orden de 50. En el siguiente apartado se explica de forma detallada el método que inicialmente se conocía para calcular este tipo de injertos y que posteriormente ha tenido que ser mejorado por problemas de simplificaciones excesivas.



4.2. Método inicial conocido para el cálculo del volumen de soldadura en tubos injertos

Este método puede implementarse con éxito en una hoja de cálculo y produce estimaciones razonables en el caso de tubos de diferente diámetro, por supuesto siempre mayor la cuerda que el brazo. El procedimiento de cálculo está en consonancia con la norma Germanischer Lloyd 2005. La Germanischer Lloyd SE es una sociedad de clasificación que actúa como supervisor técnico en los proyectos del sector marítimo, bien sean barcos, plataformas de gas, plataformas petrolíferas o instalaciones industriales y además parque eólicos. Su misión es proveer a las empresas de una serie de normas que aseguren la calidad y la seguridad de las instalaciones que se desarrollan. Las empresas utilizan estas normas y adecúan sus procesos de fabricación a las mismas para de esta manera tener una garantía frente a contratiempos que puedan ocurrir.

Las hipótesis principales de referencia para realizar el cálculo del volumen con este método son las siguientes:

- El volumen de soldadura corresponde a la unión de tubulares T, K, Y, sin repaso por interior del tubo.
- El volumen de soldadura se obtendrá mediante las áreas de soldadura definidas en la norma GL Wind 2005.
- El ser un modelo numérico deberá ser validado por resultados experimentales, añadiendo los coeficientes necesarios para su ajuste con el proceso real de soldadura.
- El modelo de estimación, una vez correlacionado con valores experimentales, se considera una aproximación para realizar análisis comparativos entre diferentes opciones, sin poder considerar el volumen final obtenido como valor definitivo.

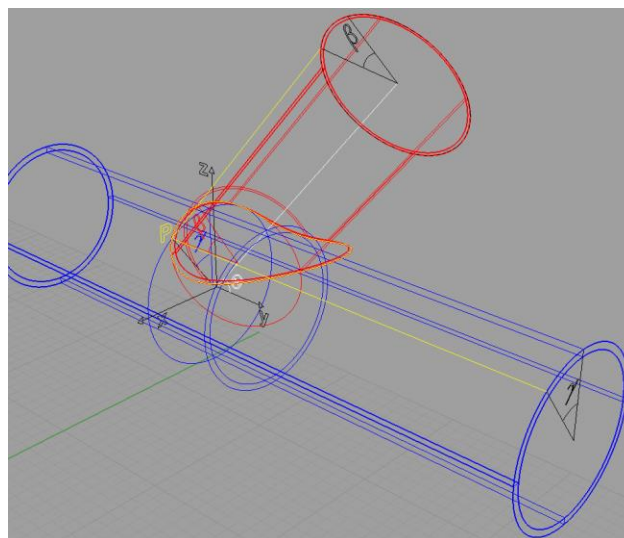


Figura 34: Sistemas de referencia utilizados para caracterizar la intersección de los dos cilindros

La base del análisis es determinar el ángulo de soldadura de cada una de las generatrices del brazo con la cuerda. El brazo se corta y se prepara el borde y se suelda sobre la cuerda sin cortar. Dicho ángulo determina la cantidad de soldadura en cada uno de los planos. Se parte de la curva intersección exterior de los tubulares, ésta se puede definir geoméricamente a partir del ángulo de giro (β) sobre el brazo y la relación con el ángulo de giro (γ) sobre la cuerda, obteniéndose las coordenadas (x, y, z) para un punto P.

Relación entre β y γ para puntos de la intersección:

$$R_c \text{sen}(\gamma) = r_b \text{sen}(\beta) \quad [11]$$

Donde:

R_c : Radio de la cuerda.

r_b : Radio del brazo.

θ : Angulo entre los dos tubulares (brazo y cuerda).

Coordenadas del punto P en la curva intersección:

$$x = r_b \text{sen}(\beta) \quad [12]$$

$$y = \frac{R_c \cos(\gamma)}{\tan(\theta)} - \frac{r_b \cos(\beta)}{\text{sen}(\theta)} \quad [13]$$

$$z = R_c \cos(\theta) \quad [14]$$

Conocidas las coordenadas de la intersección, se establece como plano de soldadura el formado por la directriz del brazo y su eje, y que pasa por el punto P en cada caso, (π) en la figura.

En ese plano de soldadura se define el vector perpendicular a la directriz del brazo y el vector perpendicular a la cuerda. En blanco en la figura 38.

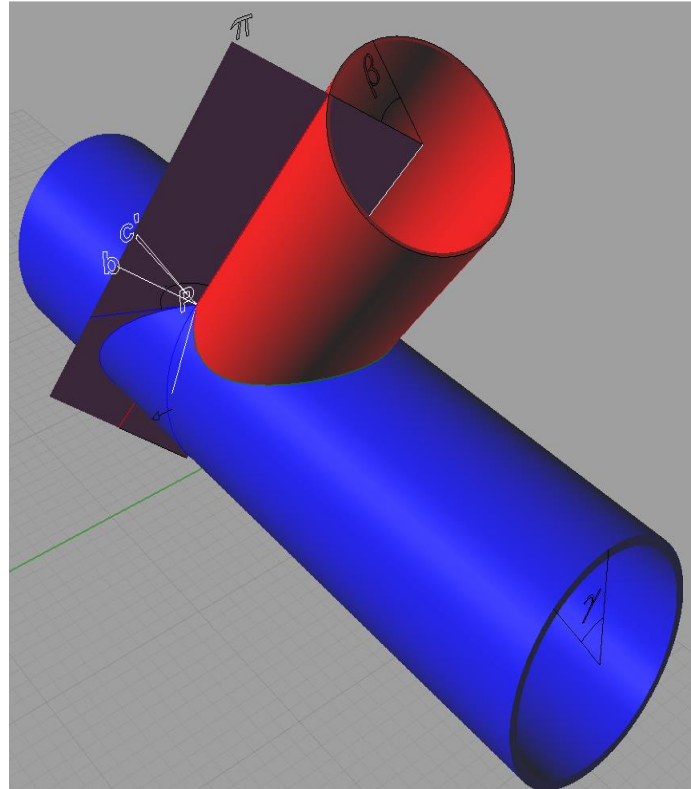


Figura 35: Plano π de soldadura

Vector (en el plano de soldadura) perpendicular a la directriz del brazo:

$$\vec{b} = (\text{sen}(\beta), -\cos(\beta) \cdot \text{sen}(\theta), \cos(\beta) \cdot \cos(\theta)) \quad [15]$$

Vector director del plano de tangencia a la cuerda

$$\vec{c} = (\text{sen}(\gamma), 0, \cos(\gamma)) \quad [16]$$

Vector (en el plano de soldadura) perpendicular a la cuerda:

$$\vec{c}' = (\vec{\pi} \times \vec{c}) \times \vec{\pi} \quad [17]$$



Figura 36: Vectores en el plano de soldadura

El ángulo (α) (según se define en la norma) en la soldadura entre el brazo y la cuerda es igual al ángulo suplementario al que forman los vectores b y c' .

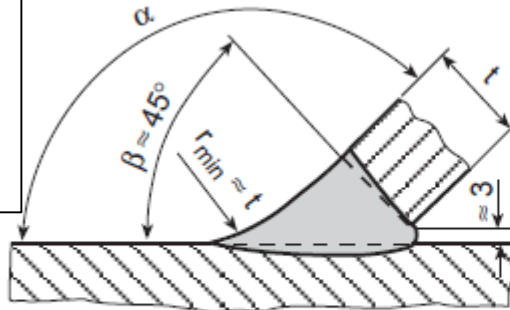
$$\alpha = \left(\frac{-\vec{b} \cdot \vec{c}'}{\|\vec{b}\| \cdot \|\vec{c}'\|} \right) \quad [18]$$

Una vez conocido el ángulo entre el brazo y la cuerda en la soldadura se define el área de soldadura.

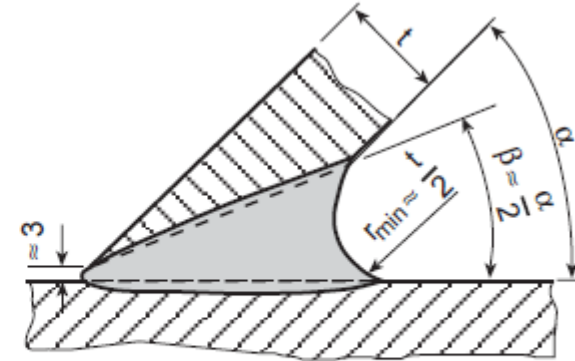


Áreas de soldadura según la norma GL2005 [15]

AREA A
Ángulo entre braced y can $\alpha > 130^\circ$
Ángulo del cordón $\beta = 45^\circ$
Radio mínimo soldadura tangente al can igual al espesor del braced.
Altura unión exterior-interior = 3 mm



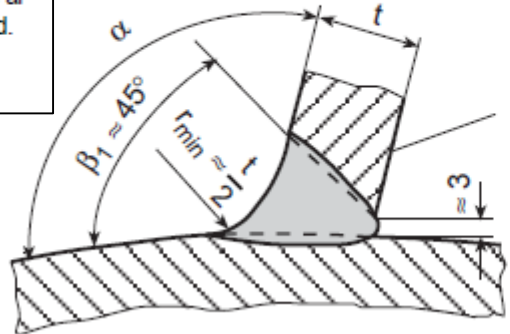
AREA D
Ángulo entre braced y can $\alpha \leq 60^\circ$
Ángulo del cordón $\beta = \alpha/2$
Radio mínimo soldadura tangente al can igual a 1/2 espesor del braced.
Gap de 3 mm



Area A
 $\alpha > 130^\circ$

Area D
 $\alpha \leq 60^\circ$

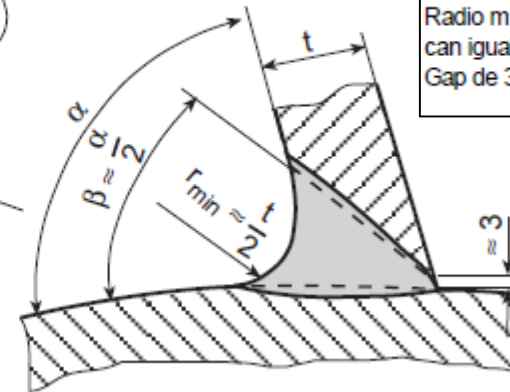
AREA B
Ángulo entre braced y can $90^\circ < \alpha < 130^\circ$
Ángulo del cordón $\beta_1 = 45^\circ$
Radio mínimo soldadura tangente al can igual a 1/2 espesor del braced.
Gap de 3 mm



Area B
 $90^\circ < \alpha \leq 130^\circ$

Area C
 $60^\circ < \alpha \leq 90^\circ$

AREA C
Ángulo entre braced y can $60^\circ < \alpha < 90^\circ$
Ángulo del cordón $\beta = \alpha/2$
Radio mínimo soldadura tangente al can igual a 1/2 espesor del braced.
Gap de 3 mm



Conocida el área de soldadura definida por la normativa, se aproxima por medio de áreas sencillas, para cada uno de los casos.

Área A: $\alpha > 130^\circ$

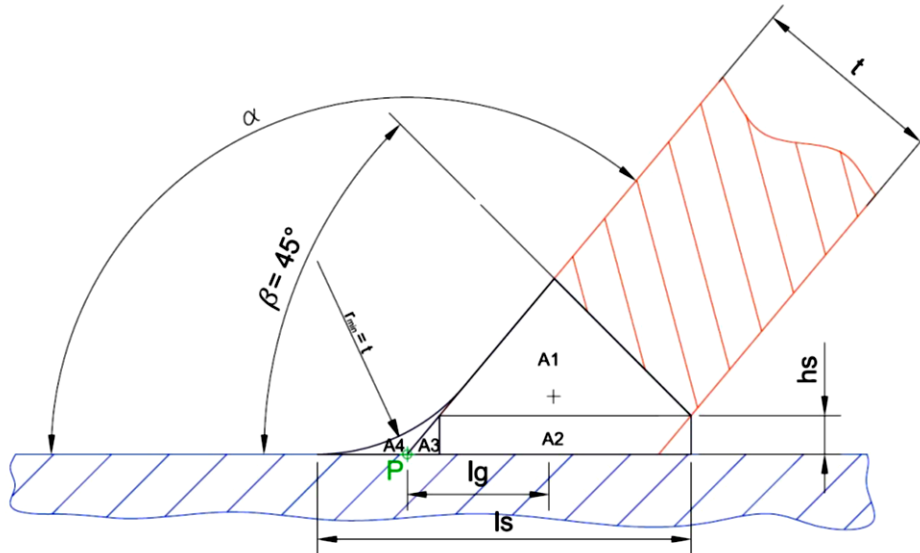


Figura 37: Área tipo A

$$A1 = \frac{t^2}{2} \cdot \left(\frac{1}{\tan(180 - \alpha)} - \tan(\beta_s - (180 - \alpha)) \right) \quad [19]$$

$$A2 = h_s \cdot \frac{t}{\text{sen}(180 - \alpha)} \quad [20]$$

$$A3 = \frac{h_s}{2} \cdot \frac{h_s}{\tan(180 - \alpha)} \quad [21]$$

$$A4 = \frac{1}{2} \cdot \left(\frac{r_{\min}}{\tan(\alpha/2)} \right)^2 \cdot \text{sen}(180 - \alpha) - \left(\pi \cdot r_{\min}^2 \cdot \frac{(180 - \alpha)}{360} - r_{\min}^2 \cdot \frac{1}{2} \text{sen}(180 - \alpha) \right) \quad [22]$$

$$A_{TOTAL} = A1 + A2 + A3 + A4 \quad [23]$$

También se define para cada área de soldadura, l_s una estimación total de la longitud de soldadura sobre la cuerda, y l_g la distancia horizontal del punto medio aproximado del área de soldadura respecto al punto de referencia (P).

$$l_s = \frac{t}{\text{sen}(\alpha)} + \frac{h_s}{\tan(180 - \alpha)} + \frac{r_{\min}}{\tan(\alpha/2)} \quad [24]$$

$$l_g = \frac{1}{2} \cdot \left(\frac{t}{\text{sen}(\alpha)} + \frac{h_s}{\tan(180 - \alpha)} \right) \quad [25]$$

Area B: $90 < \alpha < 130^\circ$

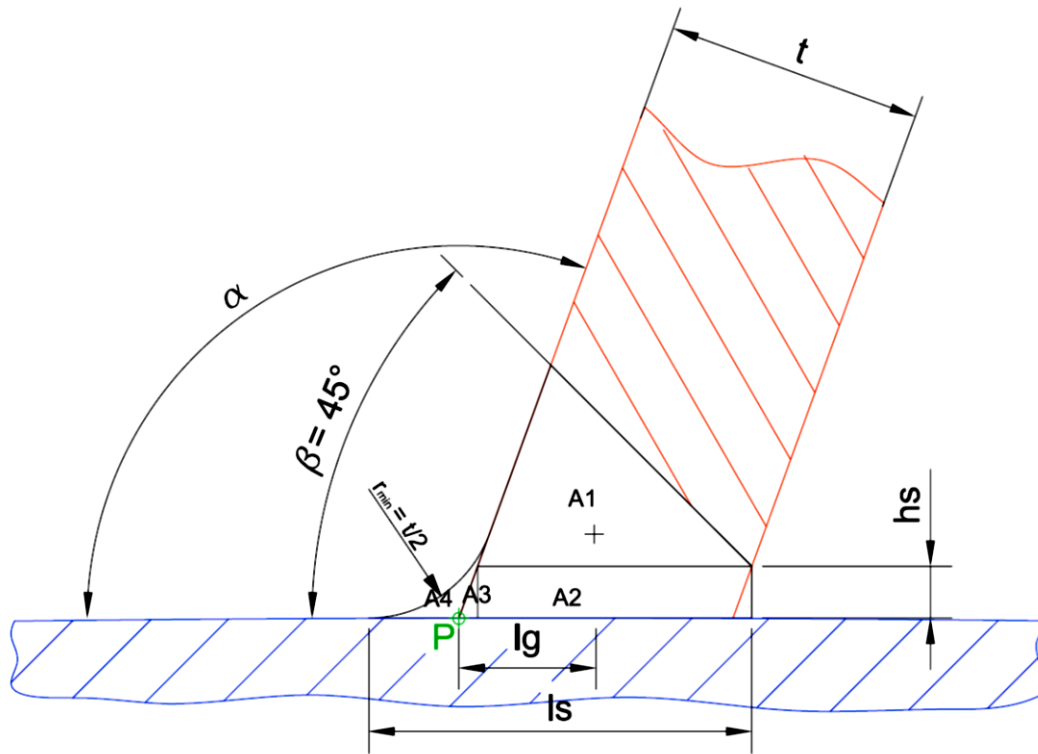


Figura 38: Área tipo B

$$A1 = \frac{t^2}{2} \cdot \left(\frac{1}{\tan(180-\alpha)} - \tan(\beta_s - (180-\alpha)) \right) \quad [26]$$

$$A2 = h_s \cdot \frac{t}{\text{sen}(180-\alpha)} \quad [27]$$

$$A3 = \frac{h_s}{2} \cdot \frac{h_s}{\tan(180-\alpha)} \quad [28]$$

$$A4 = \frac{1}{2} \cdot \left(\frac{r_{\min}}{\tan(\alpha/2)} \right)^2 \cdot \text{sen}(180-\alpha) - \left(\pi \cdot r_{\min}^2 \cdot \frac{(180-\alpha)}{360} - r_{\min}^2 \cdot \frac{1}{2} \text{sen}(180-\alpha) \right) \quad [29]$$

$$A_{TOTAL} = A1 + A2 + A3 + A4 \quad [30]$$

Se define para el área de soldadura B, l_s y l_g :

$$l_s = \frac{t}{\text{sen}(\alpha)} + \frac{h_s}{\tan(180-\alpha)} + \frac{r_{\min}}{\tan(\alpha/2)} \quad [31]$$

$$l_g = \frac{1}{2} \cdot \left(\frac{t}{\text{sen}(\alpha)} \right) \quad [32]$$

Área C: $60^\circ < \alpha < 90^\circ$

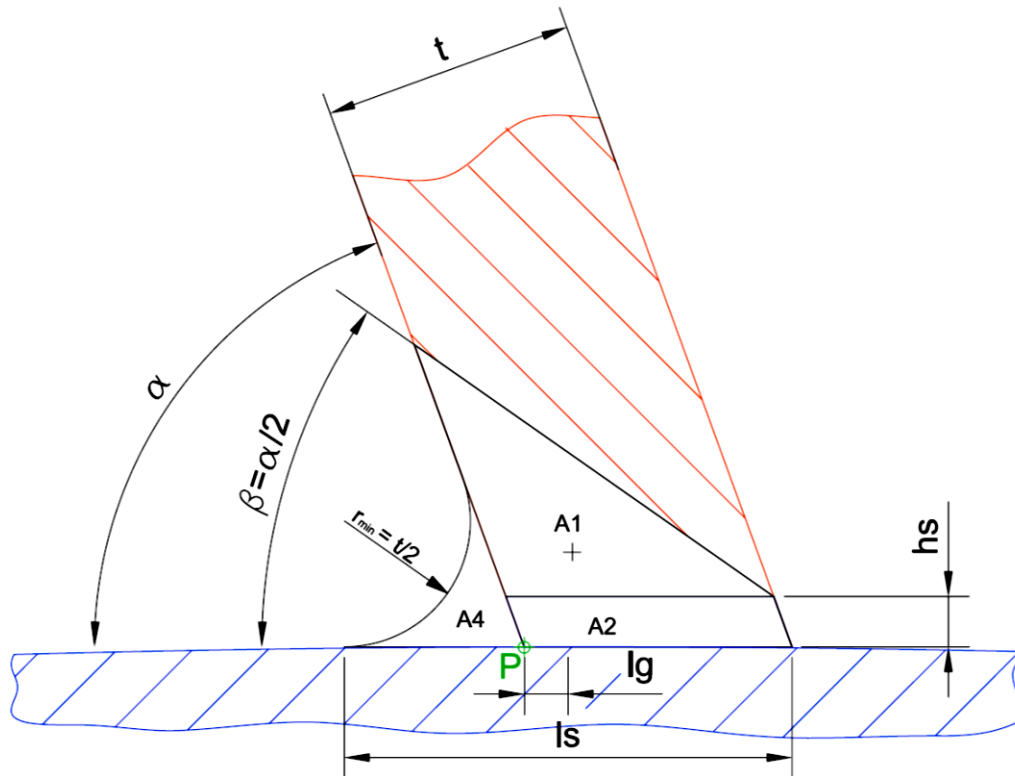


Figura 39: Área de soldadura tipo C

$$A1 = \frac{t^2}{2} \cdot (\tan(90 - \alpha + \beta_s) - \tan(90 - \alpha)) \quad [33]$$

$$A2 = h_s \cdot \frac{t}{\cos(90 - \alpha)} \quad [34]$$

$$A3 = 0 \quad [35]$$

$$A4 = \frac{1}{2} \cdot \left(\frac{r_{\min}}{\tan(\alpha/2)} \right)^2 \cdot \text{sen}(180 - \alpha) - \left(\pi \cdot r_{\min}^2 \cdot \frac{(180 - \alpha)}{360} - r_{\min}^2 \cdot \frac{1}{2} \text{sen}(180 - \alpha) \right) \quad [36]$$

$$A_{TOTAL} = A1 + A2 + A3 + A4 \quad [37]$$

Se define l_s y l_g para el área tipo C:

$$l_s = \frac{t}{\cos(90 - \alpha)} + \frac{r_{\min}}{\tan(\alpha/2)} \quad [38]$$

$$l_g = \frac{1}{2} \cdot \left(\frac{t}{\cos(90 - \alpha)} - \frac{r_{\min}}{\tan(\alpha/2)} \right) \quad [39]$$

Área D: $\alpha \leq 60^\circ$

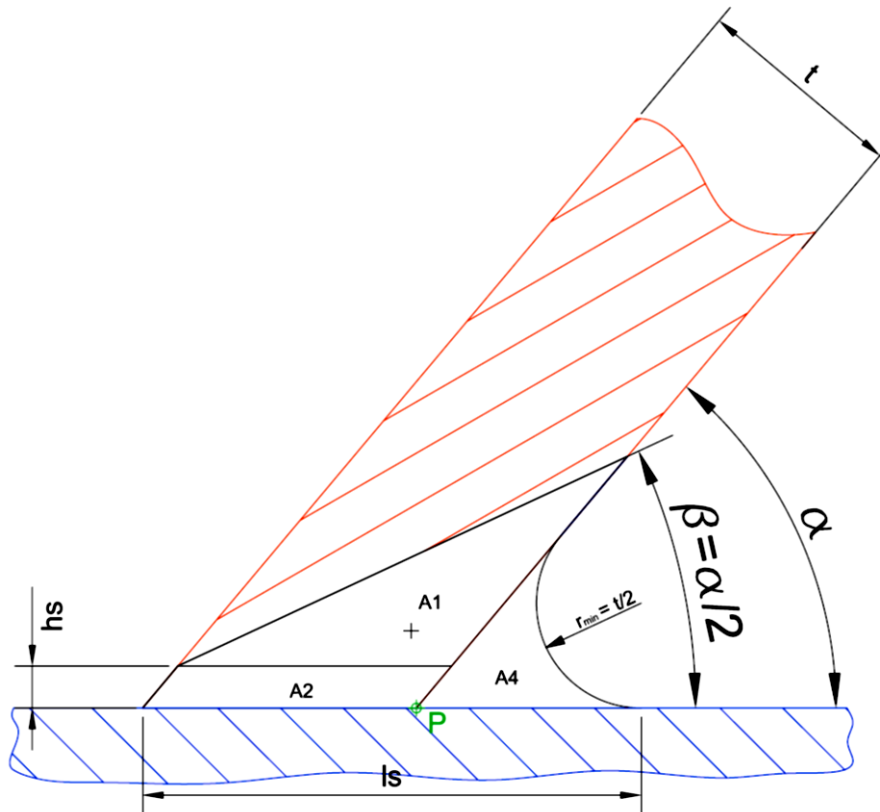


Figura 40: Área de soldadura tipo D

$$A1 = \frac{t^2}{2} \cdot (\tan(90 - \alpha + \beta_s) - \tan(90 - \alpha)) \quad [40]$$

$$A2 = h_s \cdot \frac{t}{\cos(90 - \alpha)} \quad [41]$$

$$A3 = 0 \quad [42]$$

$$A4 = \frac{1}{2} \cdot \left(\frac{r_{\min}}{\tan(\alpha/2)} \right)^2 \cdot \text{sen}(180 - \alpha) - \left(\pi \cdot r_{\min}^2 \cdot \frac{(180 - \alpha)}{360} - r_{\min}^2 \cdot \frac{1}{2} \text{sen}(180 - \alpha) \right) \quad [43]$$

$$A_{TOTAL} = A1 + A2 + A3 + A4 \quad [44]$$

Se define l_s y l_g para el área tipo D:

$$l_s = \frac{t}{\cos(90 - \alpha)} + \frac{r_{\min}}{\tan(\alpha/2)} \quad [45]$$

$$l_g = 0 \quad [46]$$

Una vez establecido el cálculo del área de soldadura en función del ángulo entre un tubular (brazo) y el otro (cuerda), se obtiene el volumen total de soldadura de la unión por medio de una integración por puntos de estas áreas a lo largo de la curva de intersección.

El volumen de soldadura en un tramo entre dos puntos consecutivos de la unión de tubulares P_n y P_{n+1} , se estima:

1. Hallando la posición del punto medio del área de soldadura en cada punto:

$$\overrightarrow{Pg_n} = \vec{P}_n + \overrightarrow{lg_n} \quad [47]$$

$$\overrightarrow{Pg_{n+1}} = \vec{P}_{n+1} + \overrightarrow{lg_{n+1}} \quad [48]$$

2. Hallando la distancia entre esos dos nuevos puntos:

$$\overrightarrow{Pg_n Pg_{n+1}} = \sqrt{(Pg_n^x - Pg_{n+1}^x)^2 + (Pg_n^y - Pg_{n+1}^y)^2 + (Pg_n^z - Pg_{n+1}^z)^2} \quad [49]$$

3. Hallando el área media de ese volumen, como la media del área de soldadura correspondiente al punto P_n y la correspondiente al punto P_{n+1} .

$$A_M = \frac{A_n + A_{n+1}}{2} \quad [50]$$

4. El volumen total de soldadura para el tramo es igual al producto de la distancia entre puntos y el área media.

$$V = \overrightarrow{Pg_n Pg_{n+1}} \cdot A_M \quad [51]$$

Este proceso se repite a lo largo de la curva intersección de los tubulares, obteniéndose el volumen total de soldadura. Para conseguir optimizar el resultado se va aumentando el número de puntos, haciendo la integral más precisa. Los valores que suelen tomarse como precisión son el de 5° , el de 1° y el de $0,1^\circ$.

Se realiza esta aproximación de las áreas medias para evitar realizar la integral del volumen para cada uno de elementos diferenciales, lo que complicaría en exceso el análisis.

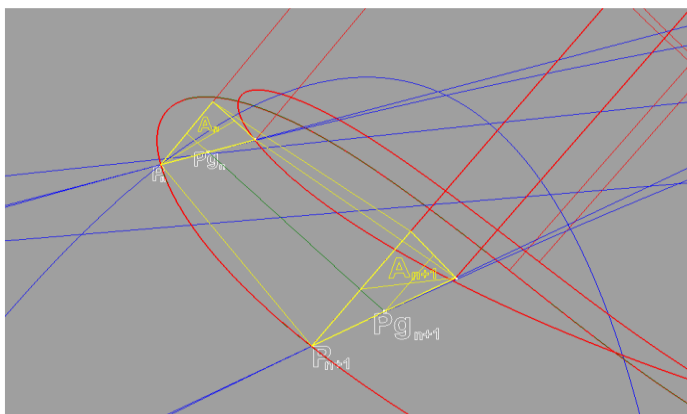


Figura 41: Esquema del cálculo de un volumen diferencial entre dos planos de soldadura contiguos



4.3. Problemática del método inicial de cálculo en tubos injertos de igual diámetro

El principal problema del método explicado anteriormente radica en que realiza la simplificación de que la soldadura se apoya sobre una sección recta de la cuerda, lo cual es falso, ya que la sección de la cuerda siempre tendrá una curvatura al tratarse de un tubo. Con esta simplificación el método inicial consigue descomponer el área de soldadura en formas geométricas simples, sencillas de calcular por relaciones trigonométricas, como se ha visto en el apartado anterior.

Sin embargo esta suposición supone un error importante en injertos de tubos cuyo diámetro es el mismo o muy parecido, en las zonas cercanas a $\beta=90^\circ$. Se recuerda que β es el ángulo que forma el plano de soldadura con respecto al plano que pasa por los ejes x y z. En estos casos es cuando α tiende a 180° . Este valor de α provoca que el área de soldadura tienda a infinito en el método analítico. Al no poder además estimar el porcentaje de error cometido, ya que no se disponía de otras formas de calcular el volumen de soldadura se consideró importante desarrollar nuevas herramientas que no presentasen el error anterior y fueran precisas en todos los casos.

El error se puede observar en las figuras que se presentan más abajo. Si se corta un injerto ya soldado, en el que brazo y cuerda tienen el mismo diámetro, por medio del plano de soldadura cerca de $\beta=90^\circ$ la vista de la sección dejada por ese corte sería parecida a la que se ve en la figura 45. Si se aproxima la vista de la sección se puede ver como la parte inferior de la soldadura, que se apoya en la cuerda tiene una curvatura considerable al seguir el perfil de la cuerda (figura 46). Si se hiciese la aproximación que se sugiere en el método analítico, las líneas que representan la parte superior e inferior de la soldadura nunca se cortarían, como se puede ver en la figura 47, lo que daría lugar a un área infinita que provoca el fallo del método analítico en estos casos y su inadecuación a la realidad.

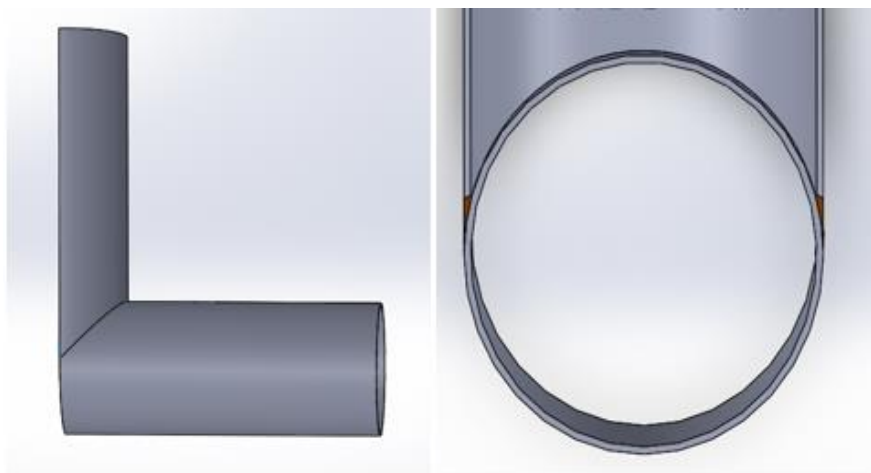


Figura 42: Corte del injerto en $\beta=90^\circ$

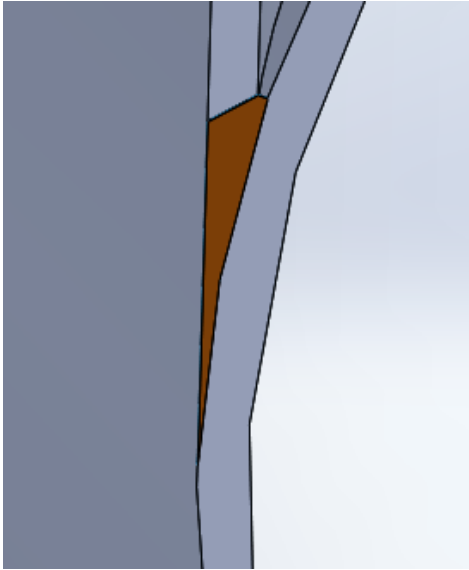


Figura 43: Área de soldadura real

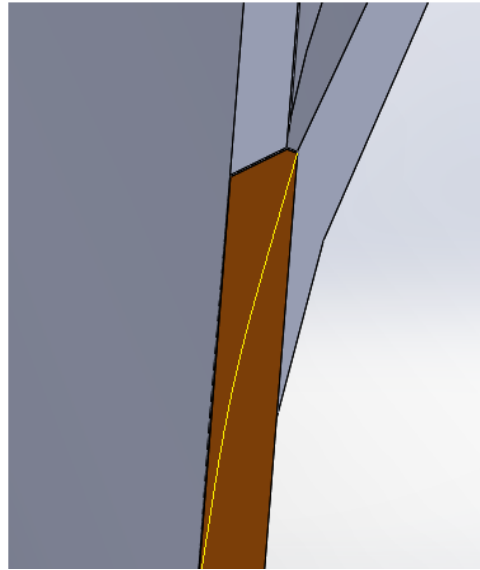


Figura 44: Área de soldadura simulada por el método analítico

Se presenta a continuación una tabla donde se muestra la diferencia entre las áreas del método analítico y las áreas del método gráfico que se desarrolla más adelante. La intención es mostrar como las áreas del método analítico toman valores disparatados e incluso en $\beta=90^\circ$ infinitos.

Tabla 1: Comparación áreas método analítico frente a método 2D

β	α (°)	Area (mm ²)	Area SolidWorks (mm ²)
0,0	105,00	243,67	328,20
5,0	105,35	243,30	328,21
10,0	106,43	242,33	325,46
15,0	108,29	241,11	321,48
20,0	111,02	240,33	317,27
25,0	114,73	241,19	314,27
30,0	119,47	245,59	313,41
35,0	125,25	256,38	316,33
40,0	131,91	285,58	334,18
45,0	139,09	319,70	345,84
50,0	146,30	378,35	366,29
55,0	153,07	471,64	397,73
60,0	159,07	614,26	443,08
65,0	164,17	830,16	506,44
70,0	168,42	1164,67	593,42
75,0	171,94	1721,35	710,51
80,0	174,92	2810,74	860,10
85,0	177,55	5992,39	1027,06
90,0	180,00	#¡DIV/0!	1027,01
95,0	172,63	1895,43	1027,01
100,0	165,23	894,44	844,08
105,0	157,74	575,26	687,29

110,0	150,16	425,38	565,64
115,0	142,49	343,53	475,61
120,0	134,74	296,80	411,93
125,0	126,98	260,90	364,93
130,0	119,31	245,38	339,46
135,0	111,86	240,33	331,27
140,0	104,76	243,92	340,20
145,0	98,18	254,99	366,61
150,0	92,26	272,51	410,76
155,0	87,10	284,46	292,23
160,0	82,79	290,68	296,80
165,0	79,40	297,17	301,29
170,0	76,96	302,76	304,86
175,0	75,49	306,54	307,10
180,0	75,00	307,86	307,86

Para continuar utilizando el método analítico el procedimiento habitual que se usaba en un taller de la zona era el de disminuir el radio del injerto a un 98% del radio del tubo pasante de forma que se obtuviesen valores “razonables”. Sin embargo esta aproximación no se sustenta en una base científica por lo que es necesario desarrollar nuevos métodos de cálculo más precisos y seguros.

Por otra parte una vez vista la sección correcta de la soldadura también se puede apreciar que su tamaño es inusualmente extenso. Esto se produce por las condiciones geométricas en esa zona ($\alpha=180^\circ$). En muchas ocasiones se puede aplicar en esa zona un corte a la soldadura, definido por el ángulo cutback, que normalmente se encuentra entre los 10° y los 30° . En la figura 48 puede observarse como se reduce la zona de soldadura, en oscuro, al aplicarle un ángulo cutback de 10° .

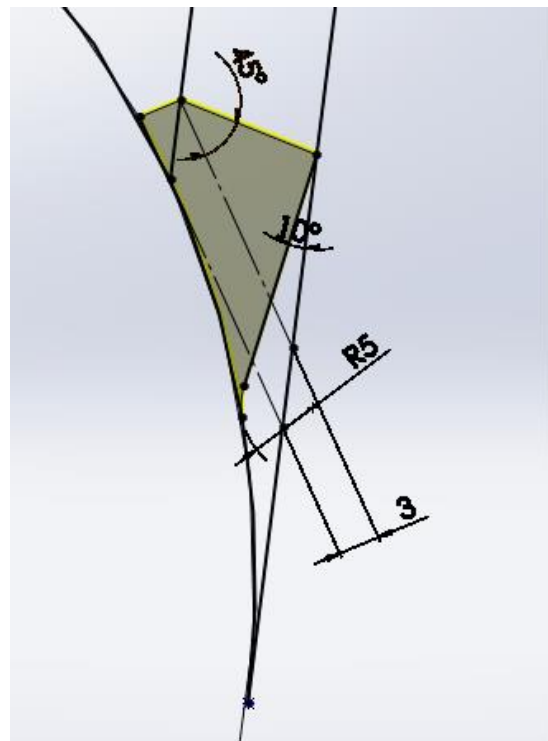


Figura 45: Sección con cutback de 10°

Mientras que el método analítico no tiene en cuenta la posibilidad de aplicar este ángulo, el método gráfico a desarrollar si lo va a tener en cuenta. Existen varias configuraciones posibles para aplicar el recorte de la soldadura en esa zona. En el método gráfico se usará el caso 4 por ser el más parecido a un caso real en taller donde siempre se realiza un reborde a la soldadura.

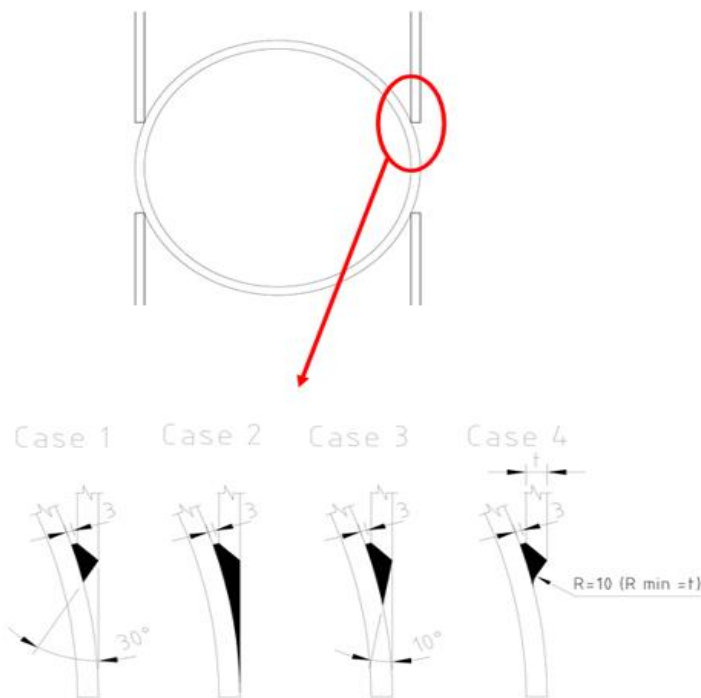


Figura 46: Casos que se pueden dar cuando $\beta=90^\circ$

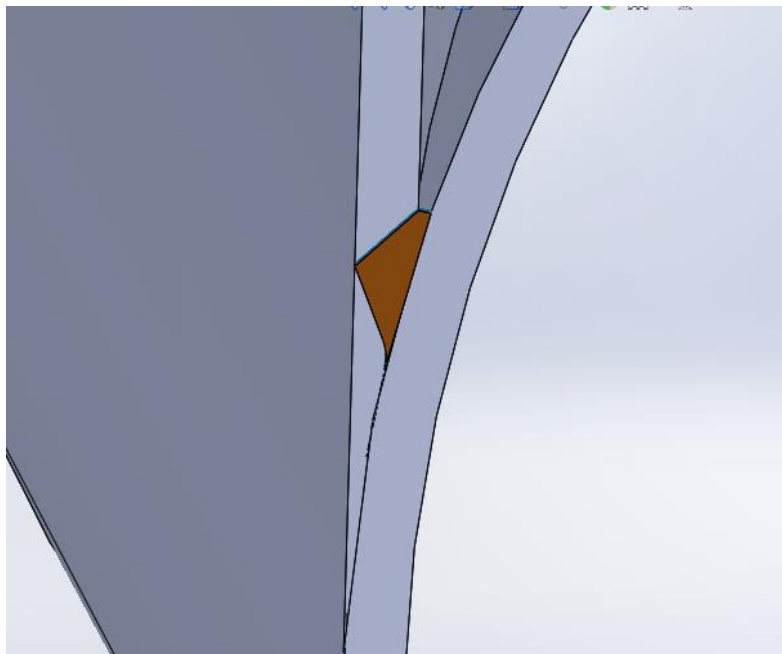


Figura 47: Área con cutback igual a 30° y con reborde



4.4. Desarrollo de un método gráfico para el caso de injertos

Para solucionar los problemas del modelo analítico se considera la posibilidad de desarrollar un método gráfico, mediante el programa de CAD conocido como SolidWorks, que vaya recreando las secciones de soldadura hasta obtener el volumen total de la misma. Se trata de un método que debe ser automático, en el que las secciones de soldadura se deben ir manipulando según las condiciones impuestas por el ángulo α , ángulo entre cuerda y brazo, que a su vez depende de β , ángulo que forma el plano de soldadura con respecto al origen de coordenadas cilíndricas.

Para llevar a cabo este procedimiento se utilizan dos programas informáticos, Microsoft Office Excel y SolidWorks. El Excel actuará como programa base donde se introducirán los datos de partida, se realizarán las operaciones de cálculo, se mandarían los comandos adecuado al SolidWorks y se imprimirían los resultados. Todo ello se hará mediante la creación de un proyecto vba en el módulo de programación que posee Excel. Por su parte en el SolidWorks se dibujarán las áreas de soldadura y se exportará el valor de su superficie al Excel. Otra forma de hacerlo en el SolidWorks que no implica la creación de áreas es el método 3D, en el cual se corta la pieza por los límites de la soldadura para obtener directamente el volumen, sin necesidad de calcular distancias entre centros geométricos de superficie como en los otros casos.

4.4.1. Automatización del cálculo del volumen de soldadura en injertos

Para realizar la automatización del cálculo del volumen de soldadura lo primero es preparar un Excel con todas las celdas de entrada necesarias para que el usuario pueda indicar los parámetros necesarios para el cálculo. En principio, en el caso de soldaduras a tope los parámetros que pueden ser necesarios son:

- Radio exterior del brazo (r_b)
- Espesor del brazo (T_1)
- Entrehierro (R)
- Tacón (f)
- Ángulo chaflán exterior (α)
- Ángulo chaflán interior (β)

No es necesario siempre indicar el ángulo del chaflán interior, sólo en el caso de que exista y sea diferente al exterior.

Mientras, en el caso de la soldadura de injertos, los parámetros requeridos para el cálculo son:

- Radio exterior del tubo injerto (r_b)
- Espesor del tubo injerto (t_b)



- Radio exterior del tubo pasante (tc)
- Ángulo entre directrices (Θ)
- GAP entre tubulares (hs)
- Ángulo Cut Back (cut_back)
- Ángulo del chaflán (beta_s)
- Radio del reborde de la soldadura (rmin)
- Precisión del cálculo (5,1 o 0,1º)
- Ángulo alpha por encima del cual se aplica el Cut Back (aplica_cutback)

A su vez también se determinaron unas celdas de salida para la impresión del volumen de soldadura final. A ese volumen final calculado se le aplica siempre un factor de sobreespesores, de valor 1,15, en el caso de injertos que aumenta el volumen final en un 15%, y de 1,06 en el caso de la soldadura a tope. La inclusión de este coeficiente se debe a que el cálculo del volumen se realiza atendiendo únicamente a criterios geométricos pero en la realidad siempre se producen imperfecciones, rebordes, etc, que provocan un aumento del consumible utilizado para soldar. Hay que señalar que este valor es necesario validarlo experimentalmente, con datos reales. En este proyecto se ha hecho esta validación, ya que se disponía del volumen de soldadura necesario para fabricar determinados nudos en K y en X para una jacket. Aun así es necesario mantener este factor de corrección actualizado con los datos más recientes que se tengan. Esta labor recae sobre el usuario del programa, que se supone, pertenecerá a una empresa dedicada a la fabricación de estas subestructuras y tendrá por tanto un historial de datos.

Por último para desarrollar este método gráfico de cálculo se implementó en el Excel un código vba que comunicaba este programa con el modelo de SolidWorks correspondiente, modificaba los parámetros del modelo, extraía los datos necesarios de SolidWorks y calculaba, ya en Excel, el volumen diferencias entre dos áreas de soldadura hasta conseguir el volumen total. El diagrama de flujo de todo el proceso que se realiza en la herramienta para conseguir el volumen de soldadura en un injerto es el siguiente:

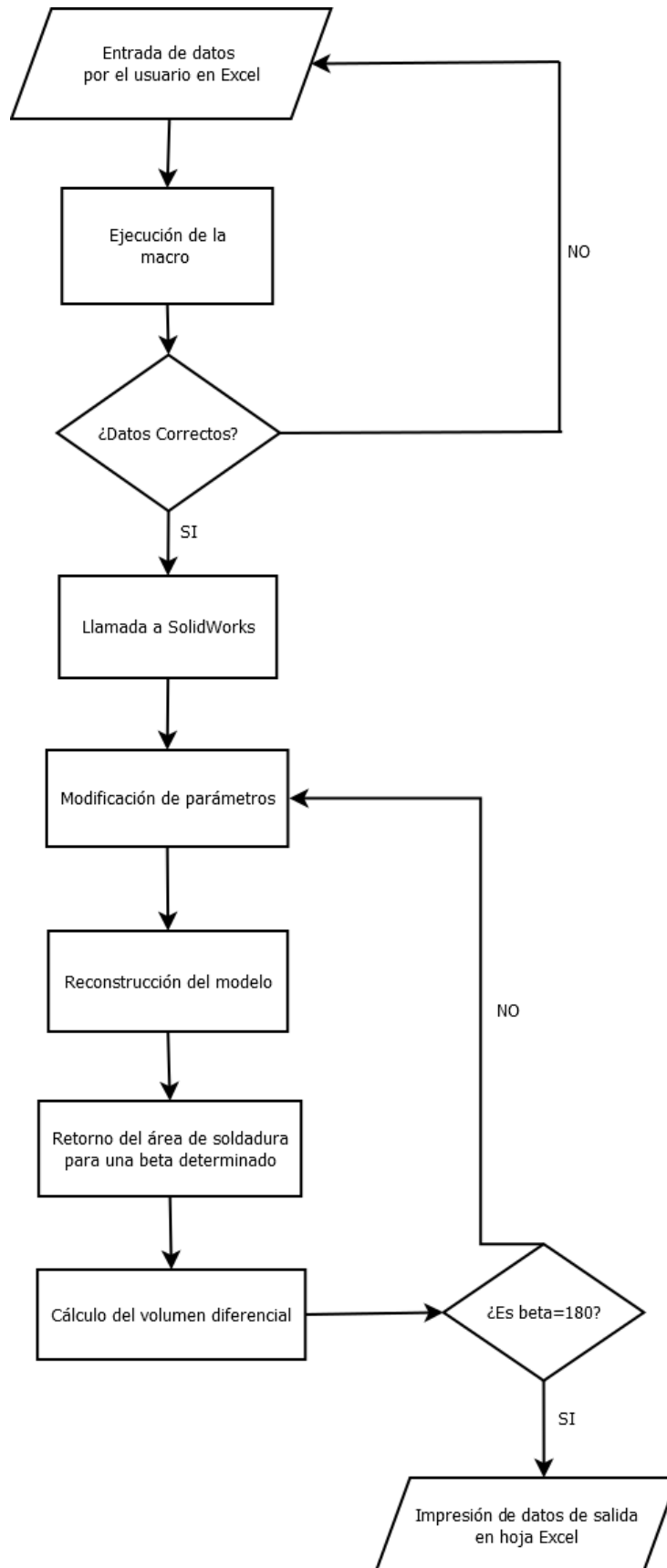


Figura 48: Diagrama de proceso del cálculo del volumen de soldadura (Fuente: Propia)

4.4.2. Desarrollo de modelos para el cálculo de la soldadura en SolidWorks

Para conseguir calcular el volumen de soldadura en SolidWorks se probaron diversos modelos. El primero de ellos es un modelo íntegramente en 2 dimensiones, el segundo modelo combina el 2D con el 3D y el último realiza el cálculo íntegramente en 3D.

En los dos primeros modelos se construye el área de soldadura a través de un croquis que se va modificando según aumenta el ángulo beta según los criterios de la norma GL2005. Los pasos seguidos para conseguir dibujar el área de la sección son los siguientes:

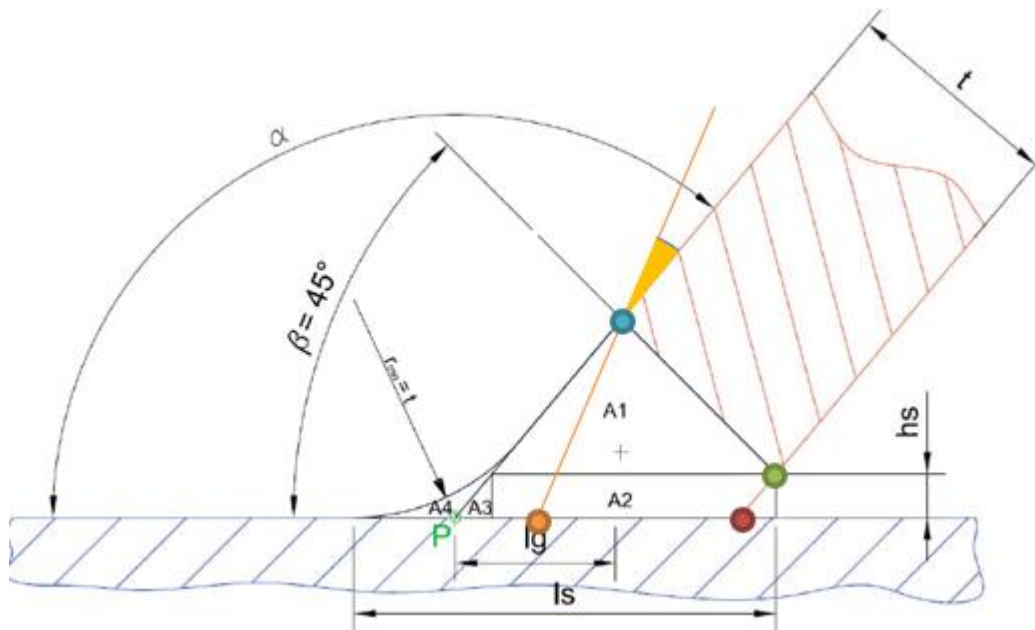


Figura 49: Dibujo del área de la sección de la soldadura (Fuente: Propia)

Preparación de bordes:

- Desde el punto de intersección interior de la cuerda con el brazo (el punto rojo) se traza una recta tangente a la superficie exterior de la cuerda.
- Se genera una recta paralela a la recta anterior y una distancia h_s . Se obtiene el punto verde.
- Se hace el chaflán a beta grados de la recta generada en el apartado b)
- Desde el punto azul se traza la recta naranja teniendo en cuenta el ángulo cut-back. Si el cut-back es cero, el punto naranja coincide con P.
- El punto naranja es el punto de intersección de la recta naranja con la superficie exterior de la cuerda
- Se traza la tangente a la superficie exterior de la cuerda que pasa por el punto naranja
- El ángulo alpha es el ángulo que forman la recta naranja y la recta trazada en f).
- El arco del área A4 es tangente a la línea naranja y a la recta trazada en f).



- i. Entre el punto naranja y el punto rojo hay una curva.

El ángulo α es el ángulo entre la recta trazada en a) y la superficie exterior del brazo.

El modelo 3D únicamente necesita dibujar la recta que pasa por el punto verde y el azul para calcular el volumen.



4.4.2.1. Modelo de cálculo en 2D

Para realizar el modelo en 2 dimensiones es necesario primeramente caracterizar la intersección entre cuerda y brazo para cualquier punto. Esta intersección es una elipse que varía con el ángulo β . Cuando $\beta=0$ se estira hasta el infinito y se convierte en dos líneas paralelas y en $\beta=90$ esa elipse es en realidad un círculo.

Para situar además el punto verde de la figura, que es donde comienza la preparación de bordes del injerto, que está a una cierta distancia h_s de la intersección entre cuerda y brazo, se traza otra elipse que difiera de la de la intersección una distancia h_s . La parametrización de esas elipses, con el fin de poder dibujarlas en el SolidWorks, se realiza de la siguiente forma:

Se dibuja una elipse con eje mayor (E_M) y eje menor (E_m) que representa el corte del cilindro con el plano de soldadura. Las ecuaciones de esta elipse son:

$$E_M = D_{eb} / \cos(\alpha_{ebNe}) \quad [52]$$

$$E_m = D_{eb} \quad [53]$$

Donde D_{eb} es el diámetro exterior del cilindro base y α_{eb} ángulo entre el eje del cilindro base y el vector normal al plano de la elipse.

Sobre esta elipse se dibuja otra con ejes mayor y menor coincidentes pero de distinto tamaño (elipse aumentada). Se incrementan los ejes en 2 veces el espesor indicado en la preparación de bordes para ese ángulo concreto.

$$E'_M = E_M + 2 \cdot e / \cos(\alpha_{ebNe}) \quad [54]$$

$$E'_m = E_m + 2 \cdot e \quad [55]$$

Esto nos alejará la intersección entre cilindros aproximadamente la distancia 'e' correspondiente al espesor, también conocido h_s .

Este modelo no representa exactamente el lugar geométrico de los puntos que distan una distancia constante de una elipse, porque la figura resultante no sería una elipse sino algo más complejo pero el error por aproximarlos a otra elipse se ha visto que es de menos del 1% así que parece una solución razonable.

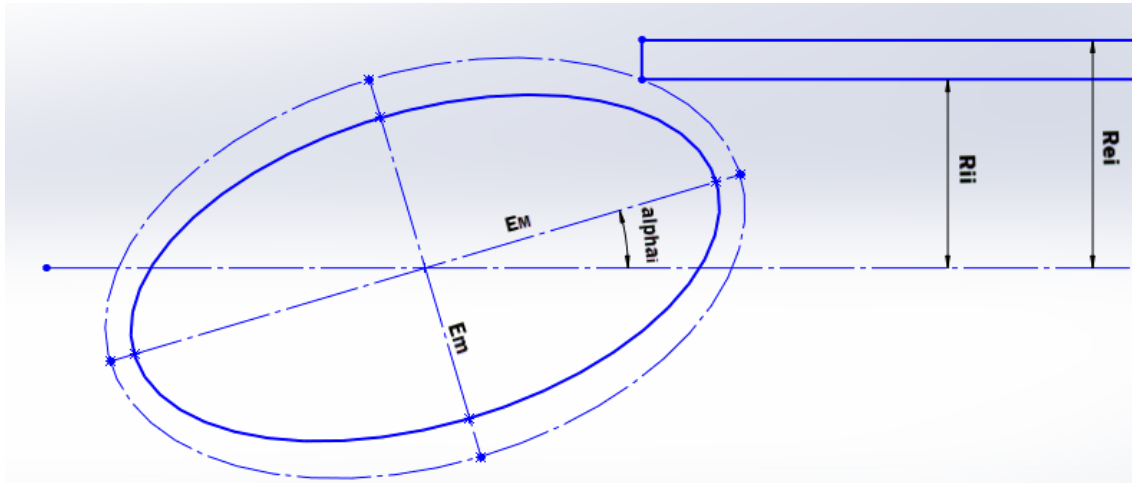


Figura 50: Representación de las elipses paramétricas (Fuente: Propia)

A continuación se dibuja una recta que pase por el centro de la elipse y que forme un ángulo $\alpha_{EM,Ei}$ con el eje mayor de la elipse. Esta recta representa el eje del cilindro incidente. Paralelas a esta recta y a una distancia R_{ii} (radio interior del cilindro incidente) y R_{ei} (radio exterior del cilindro incidente) se dibujan otras dos rectas que representan las paredes interior y exterior del cilindro. El corte de la pared interior del cilindro con la elipse aumentada dará el punto interior del cilindro incidente a partir del que se define la preparación de bordes en esa sección.

Para definir la anterior construcción necesitamos los siguientes parámetros:

Θ : Ángulo entre el eje del cilindro base y del cilindro incidente.

β : Ángulo que define el semiplano de soldadura y que se mide sobre un corte transversal del cilindro incidente. Vale 0 cuando el semiplano de soldadura contiene a los ejes de los 2 cilindros y al ángulo α_i .

Deb, Dib: Diámetros exterior e interior del cilindro base.

α_{ebNe} : Ángulo entre el eje del cilindro base y el vector normal al plano de la elipse.

$$\cos(\alpha_{ebNe}) = \text{sen}(\alpha_i) \cdot \text{sen}(\beta) \quad [56]$$

Para obtener el eje mayor de la elipse se necesita α_{ebNe} , que define lo oblicuo que es el corte del cilindro.

$$E_M = D_{eb} / \cos(\alpha_{ebNe})$$

E_m : El eje menor coincide siempre con el diámetro exterior del cilindro base. $E_m = Deb$

$\alpha_{EM,Ei}$: El ángulo entre el eje mayor de la elipse y el eje del cilindro incidente.

$$\cos(\alpha_{EM,Ei}) = -\cos(\alpha_i) / \sqrt{\cos(\beta)^2 + \cos(\alpha_i)^2 \sin(\beta)^2} \quad [57]$$



Una vez se tiene parametrizada la elipse se introducen en SolidWorks todas las ecuaciones necesarias para modificar la elipse y los croquis de soldadura.

Para esos datos la elipse se va modificando de la siguiente forma:

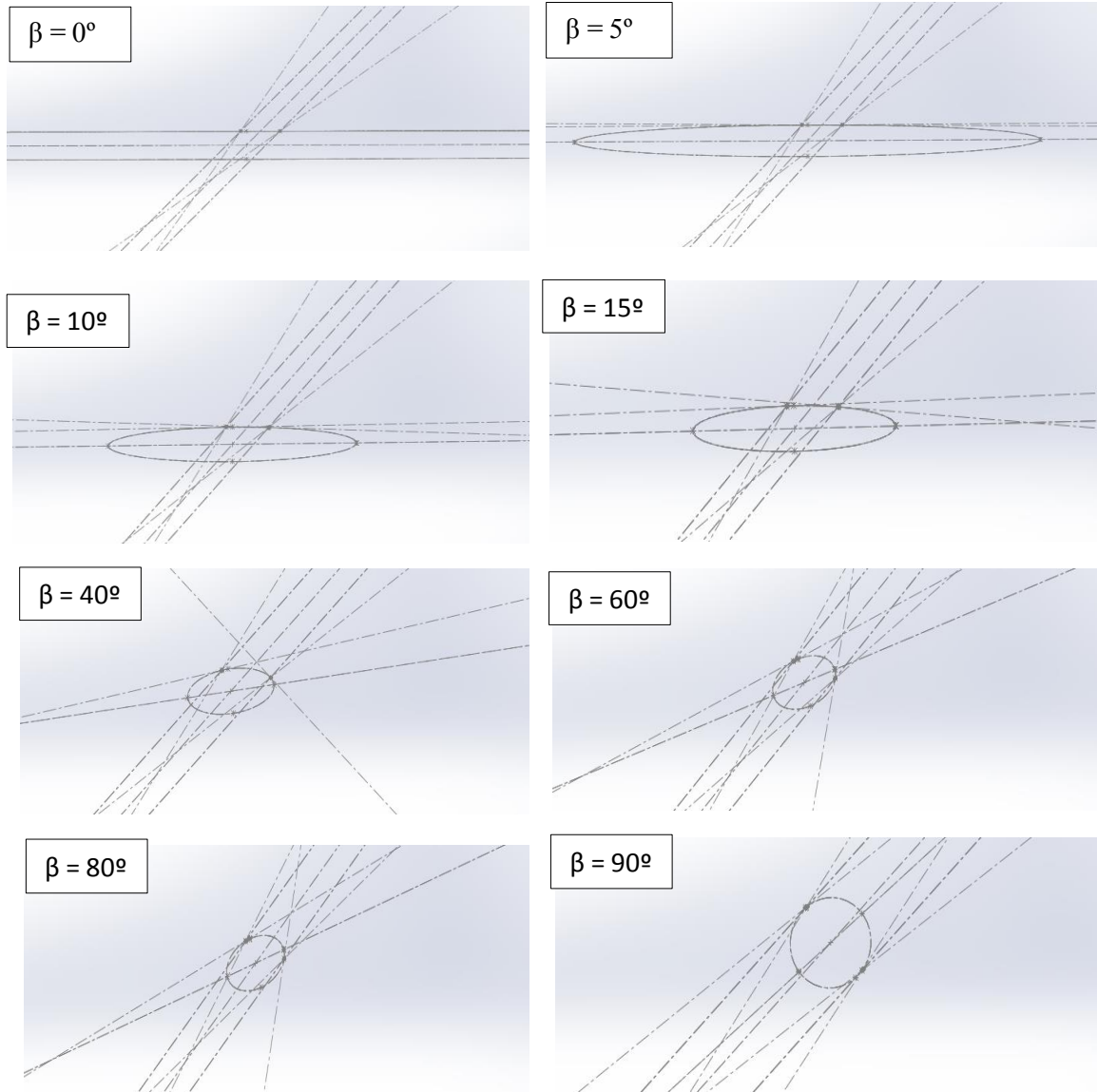


Figura 51: Fotos de la elipse que caracteriza la intersección de la cuerda con el plano de soldadura (Fuente: Propia)

Hay que señalar que en $\beta=0$ existe una singularidad ya que la elipse debe tender a infinito y convertirse en dos líneas paralelas. Esto, no lo soporta el SolidWorks y es necesario crear un modelo particular para este caso, que aparte de lo comentado es igual al anterior. Mientras tanto las áreas de soldadura tomarían las siguientes formas:

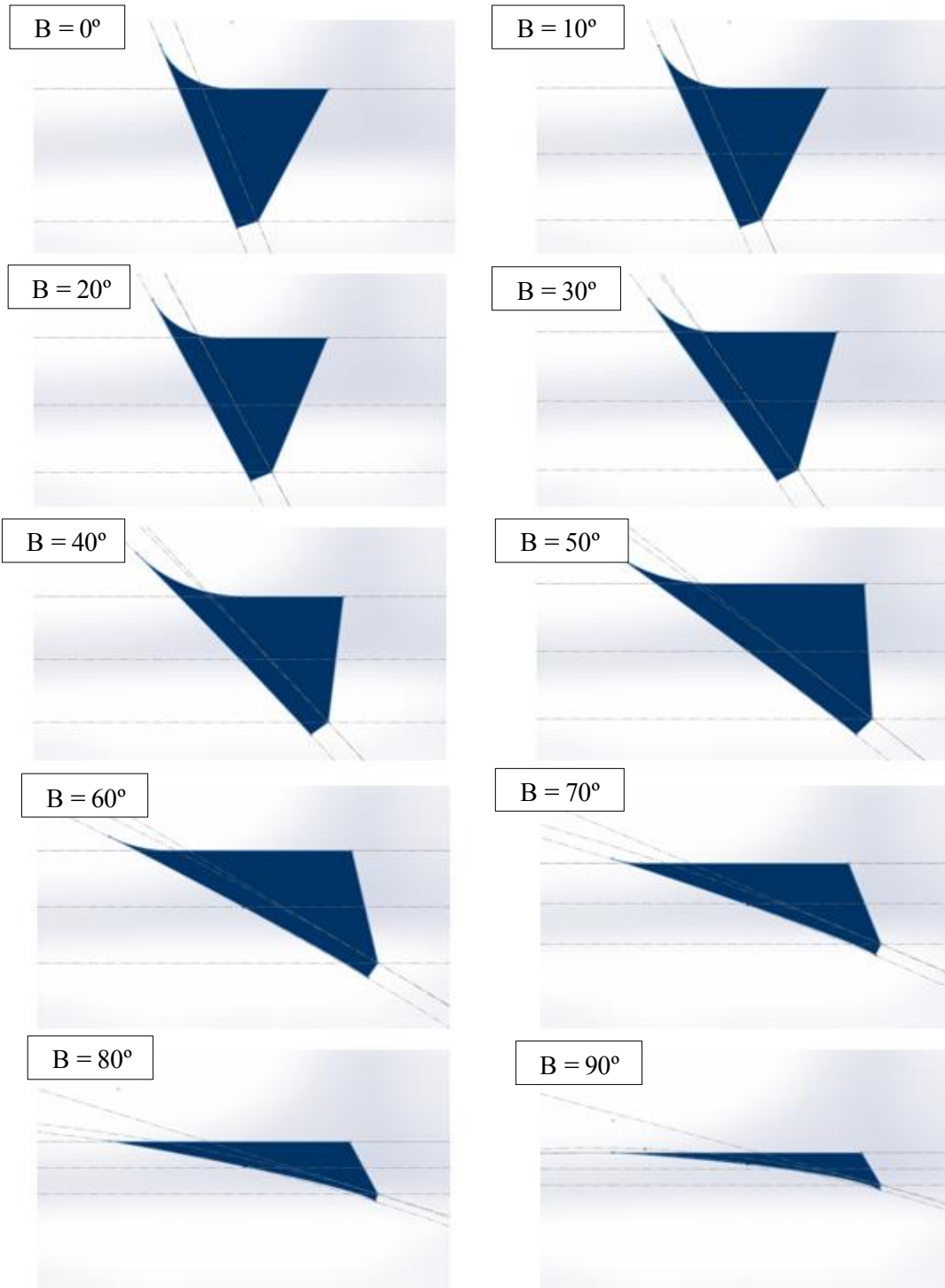


Figura 52: Fotos de las áreas de soldadura (Fuente: Propia)

4.4.2.2. Modelo de cálculo intermedio 2D-3D

Este modelo es una evolución del anterior, ya que aprovecha en mayor medida la potencia del software 3D. En lugar de parametrizar la elipse la idea es obtener el injerto en 3D y sobre él dibujar el plano de soldadura, de acuerdo a la definición, e ir cortando con este plano el injerto para diferentes ángulos de beta. De esta manera se genera la elipse sin necesidad de parametrizarla. Es además un método mucho más gráfico y permite mayor precisión de cálculo. Recordemos que la precisión en este caso está relacionada con la distancia entre un ángulo beta y el siguiente. Este modelo permite obtener directamente el ángulo de inclinación sin necesidad de recurrir a cálculos vectoriales, mediante la fórmula del método analítico, y se puede saber también cuál es la distancia entre los centroides de áreas de soldadura contiguas. Sin embargo sigue dibujando las secciones del área de soldadura para cada caso en 2D, por ello recibe el nombre que se muestra en el título.

A continuación se muestra una recreación de los distintos valores que iría tomando el plano de soldadura en función del ángulo beta. En la figura se muestran varios planos dibujados aunque en el modelo de cálculo solo habría uno, que iría girando en torno al eje del cilindro injerto.

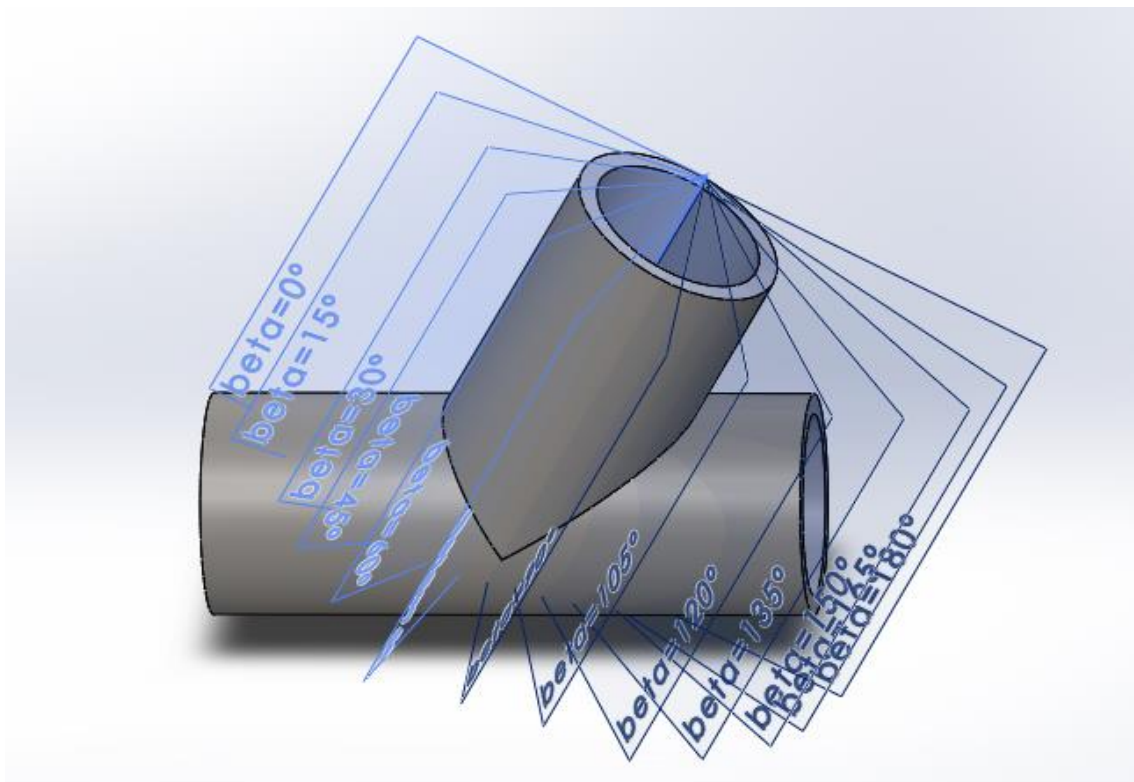


Figura 53: Rotación del plano de soldadura sobre el injerto (Fuente: Propia)

Como se ha dicho anteriormente el plano iría cortando a los dos sólidos, cuerda y brazo, generando una sección sobre la cual se puede dibujar el área de soldadura:

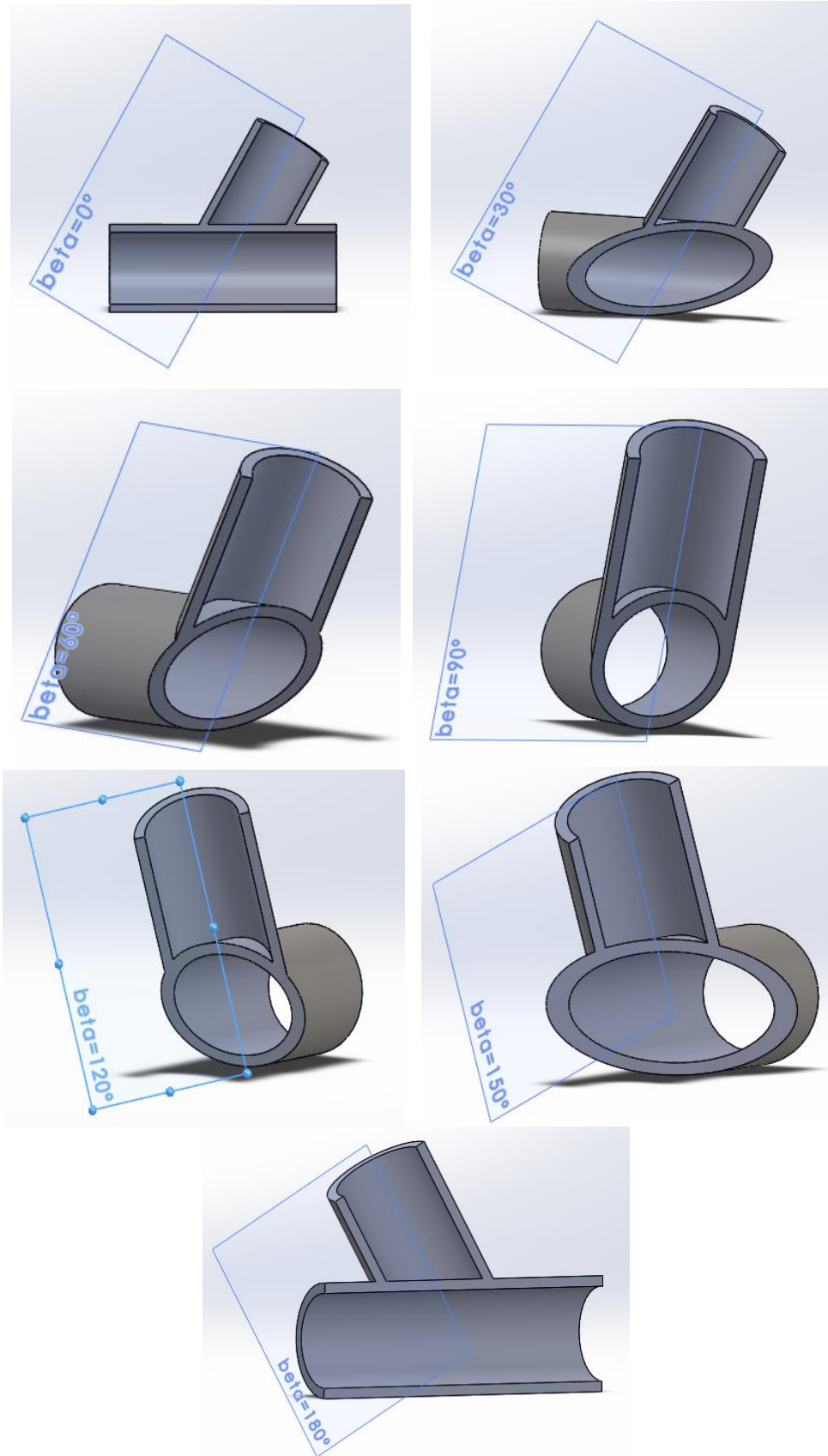


Figura 54: Cortes por diferentes planos de soldadura (Fuente: Propia)

Una vez se llega a 180° no es necesario continuar ya que debido a las simetrías de la pieza la soldadura entre 0 y 180° será la misma que exista entre 180 y 360° por lo que para agilizar el proceso de cálculo se multiplica por dos para obtener el volumen total.

En la siguiente figura se puede ver el área de soldadura para un caso concreto y como se apoya esa área sobre la curva generada como resultado de cortar el injerto por el plano de soldadura.

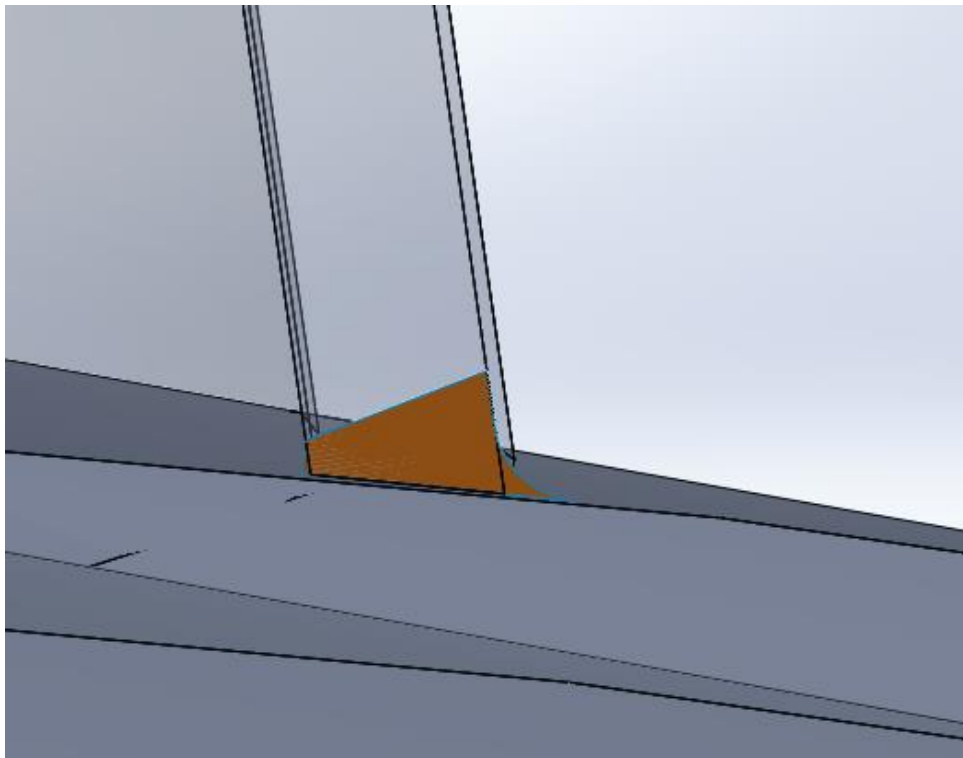
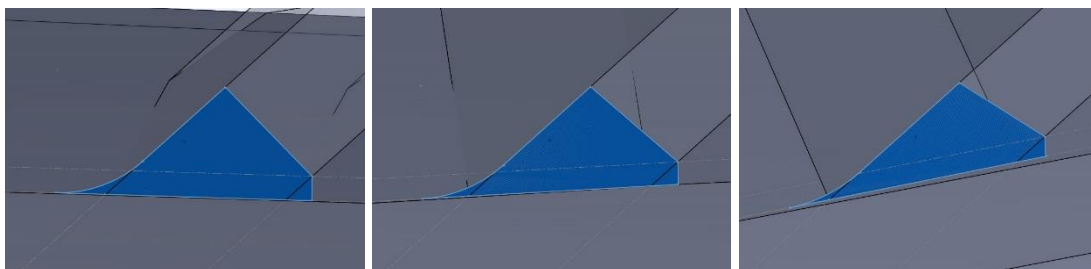


Figura 55: Área de soldadura dibujada sobre el corte creado por el plano de soldadura (Fuente: Propia)

Las ecuaciones que se utilizan para modificar el área de soldadura son muy parecidas al caso en 2D pero sin incluir las ecuaciones de la elipse ya que no son necesarias.

Por último hay que señalar que durante el cálculo automático de las áreas de soldadura se incluye la opción de que el programa saque una foto a cada área y las guarde en una carpeta con el objetivo de que el usuario pueda comprobar si el área generada tiene un aspecto razonable o por el contrario se trata de un error del programa. Se muestran a continuación algunas fotos tomadas para un caso en particular:



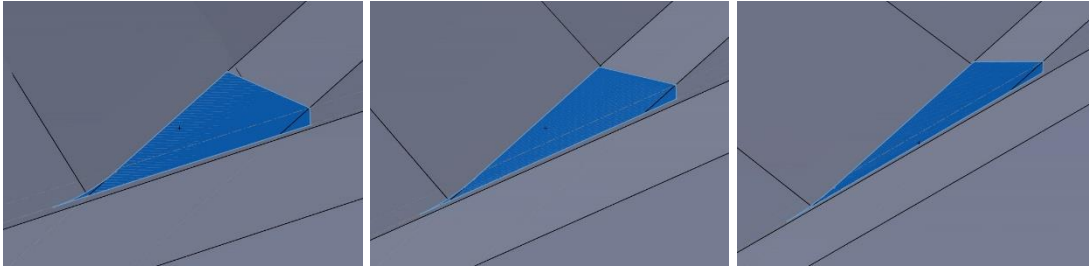


Figura 56: Áreas de soldadura dadas por el modelo intermedio (Fuente: Propia)

4.4.2.3. Modelo de cálculo en 3D

Por último el modelo más avanzado, y más preciso, con diferencia es el modelo 3D. En él el cálculo del volumen de soldadura se realiza generándolo en 3D y no calculando las áreas para unos ángulos β determinados. Esto se consigue gracias a un croquis que va girando con un plano de soldadura y se va modificando y marcando la preparación de bordes del tubo injerto. Luego se corta por esa preparación y se obtiene el volumen de la pieza generada por debajo del tubo injerto, que no es sino la soldadura. Se exporta el volumen de esa pieza y ya se ha realizado el cálculo. El proceso, también automático, se realiza los siguientes pasos:

1. Primeramente se hace un redondeo en la arista que marca el límite exterior de la soldadura para simular ese reborde en la soldadura que disminuye la concentración de tensiones.

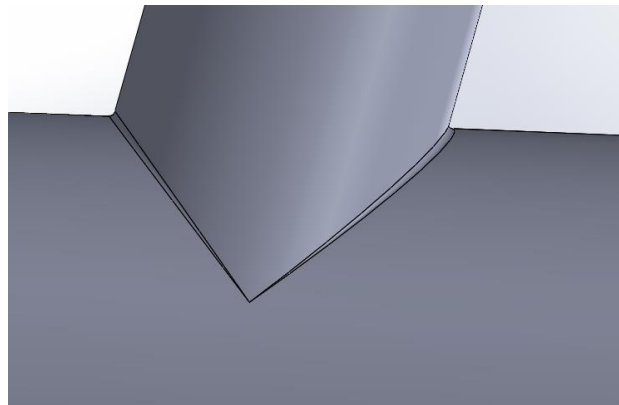


Figura 57: Tubo con reborde de soldadura (Fuente: Propia)

2. A continuación, para determinados beta, igual que en los casos anteriores, se marca la línea superior de la soldadura, que queda definida por el ángulo del chaflán que se realiza en el tubo injerto. Está relacionado con la preparación de bordes.

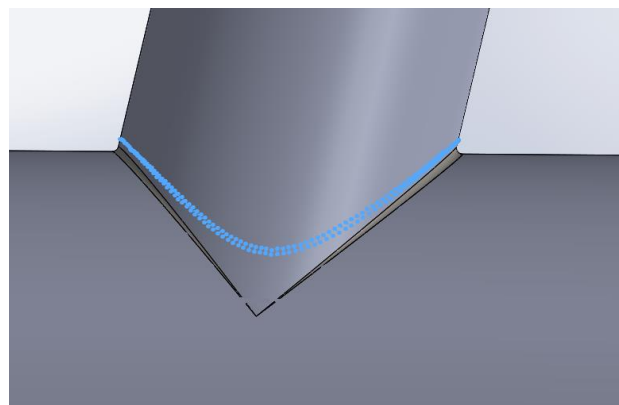


Figura 58: Marcado del chaflán en el tubo injerto (Fuente: Propia)



3. Después se genera una superficie a través de las líneas que se han marcado en el paso 2.

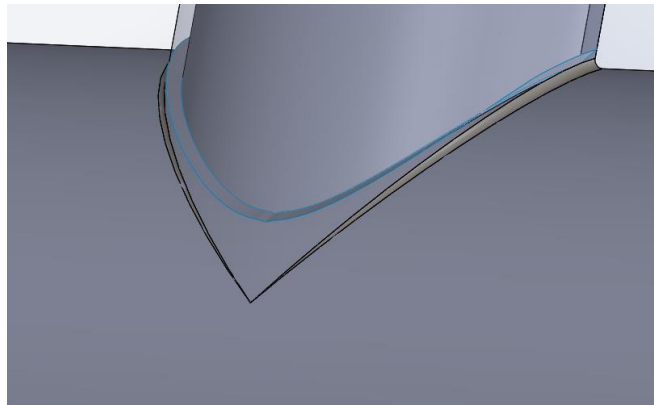


Figura 59: Creación de una superficie por los puntos marcados (Fuente: Propia)

4. Posteriormente se corta con esa superficie para separar la soldadura con respecto al tubo injerto.

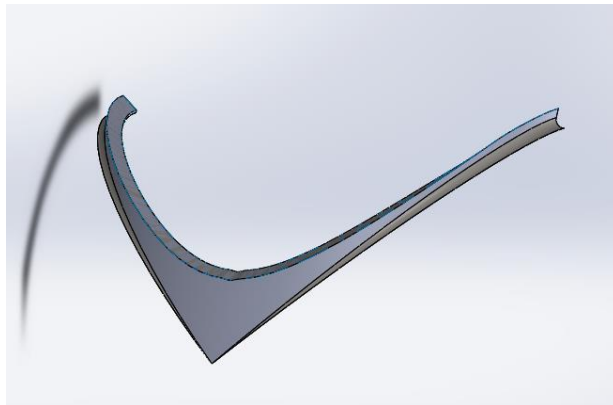


Figura 60: Mitad del volumen de soldadura del injerto (Fuente: Propia)

5. Una vez se tiene esa soldadura se importa su volumen a la hoja Excel desde donde se controla el proceso, multiplicándose por dos para obtener el volumen total.



4.4.3. Evolución en los modelos de SolidWorks

Se observa una clara evolución en los modelos diseñados pasando del 2D al 3D de forma que se aprovecha en mayor medida la potencia del programa SolidWorks. Es muy importante señalar que los métodos 2D e intermedio calculan un volumen diferencial realizando la media de dos áreas contiguas y multiplicando esa área por la distancia entre centros geométricos de dichas áreas. Esta simplificación supone cometer un error ya que por un lado se está haciendo que el área diferencial sea siempre la misma cuando en la realidad no lo es y por otro lado se está multiplicando por una distancia en línea recta cuando realmente el volumen va variando a raíz de la curva incidente. Este error que puede no resultar excesivo para un volumen diferencial, al sumar todos esos volúmenes para obtener el total, sí que se podría considerar un error a tener en cuenta.

En el caso 3D sin embargo este error no se produce ya que se dibuja el volumen de soldadura directamente, sin necesidad de realizar secciones de soldadura por lo que es un método mucho más exacto. Además por la sencillez de las operaciones necesarias para hacer la automatización también se trata de un método más rápido de cálculo aunque sin llegar al extremo del método analítico.

Hay que tener en cuenta que todos los métodos presentados hasta ahora se basan únicamente en condicionantes geométricos por lo que el volumen obtenido es necesario corregirlo para que se adecue al valor real. Esto es así porque en la realidad siempre existen sobreespesores no tenidos en cuenta en los métodos. Además en el caso real la soldadura se realiza en varias pasadas por lo que siempre quedan mayores irregularidades que han de ser tenidas en cuenta. Para ello se introduce un factor de corrección sobre el volumen que debe ser validado experimentalmente, y que de hecho se ha realizado en este proyecto, en el que se contaban con datos reales.



4.5. Comparación de los métodos gráficos frente al analítico y comprobación de la exactitud de ambos

Como desde un principio ya se conoce el fallo del que adolece el modelo analítico, es decir, que el valor del volumen que arroja tiende a infinito cuando los tubos injerto y pasante tienen el mismo diámetro se va a comprobar si realmente aun aplicando la corrección del diámetro injerto al 98% los valores siguen siendo demasiado elevados. Para ello, con el programa diseñado en Excel, se calculó por medio de todos los métodos el volumen de soldadura para diferentes diámetros del tubo injerto hasta llegar a un valor de 500 mm de diámetro, que es el punto en el que injerto y tubo pasante tienen el mismo diámetro (no se aplica cutback en este caso). Los resultados se muestran en la tabla y la gráfica siguientes:

Tabla 2: Volumen de soldadura para diferentes métodos y radios de injerto

Radio tubo injerto	Método analítico	Método 2D	Método intermedio	Método 3D
	Volumen (cm ³)			
0	0	0	0	0
50	89,11	92,23	89,35	87,39
100	185,67	191,29	188,21	183,33
150	281,18	288,52	284,93	276,34
200	378,25	386,52	382,01	367,49
250	480,41	488,63	482,66	461,03
300	595,2	602,17	591,45	560,83
350	729,21	731,77	721,28	668,67
400	904,25	899,32	879,29	807,01
450	1197,85	1136,23	1116,02	990,31
460	1294,51	1207,06	1185,22	1052,91
470	1421,62	1292,85	1269,62	1107,7
480	1605,61	1402,33	1377,71	1196,64
490	1930,21	1555,57	1530,74	1320,53
500	1930,21	1871,7	1839,5	1494,04

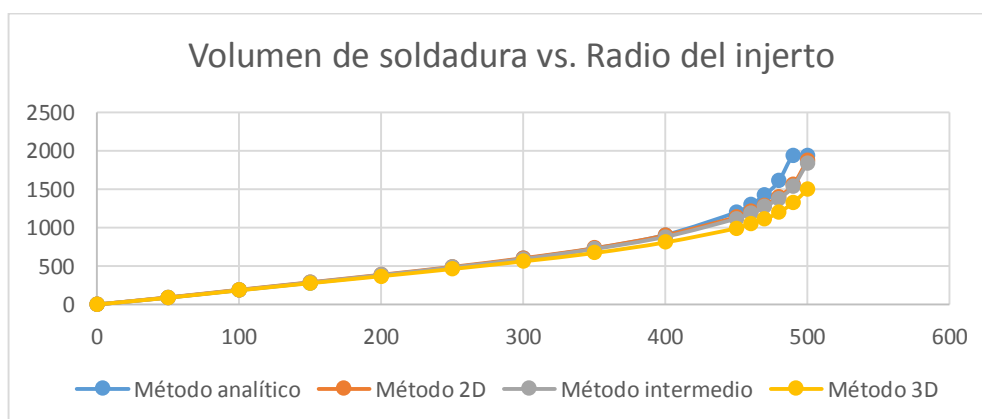


Figura 61: Gráfica volumen de soldadura frente a tiempo para los diferentes métodos (Fuente: Propia)



Puede observarse como el método analítico comienza a dar resultados de volumen excesivamente grandes a partir, más o menos de los 450 mm de diámetro para el tubo injerto. Mientras tanto el método 2D y el método Intermedio muestran un comportamiento muy similar en todo el tramo de valores. Ello se debe a que ambos están basados en el mismo concepto de cálculo de áreas. Por su parte el método 3D muestra una tendencia a obtener valores de volumen menores que el resto de los métodos, a partir de que el radio del injerto supera la mitad del radio del tubo pasante. Por lo que se ha explicado hasta ahora en relación a los modelos puede intuirse que el modelo 3D es el más preciso, debido a la forma en que se lleva a cabo el cálculo. Se puede por tanto dejar constancia que para el caso de diámetros iguales, a pesar de la corrección, el método analítico no arroja resultados válidos. Con el método 2D e Intermedio tampoco se obtienen buenos resultados.

Se calcula la diferencia en % en volumen entre los diversos modelos:

Método analítico vs. Método 3D

$$\frac{V_{analit.} - V_{3D}}{V_{3D}} = 29,19\%$$

Método analítico vs. Método 2D

$$\frac{V_{analit.} - V_{2D}}{V_{2D}} = 3,13\%$$

Método analítico vs. Método Intermedio

$$\frac{V_{analit.} - V_{Interm.}}{V_{Interm.}} = 4,93\%$$

Método 2D vs. Método 3D

$$\frac{V_{2D} - V_{3D}}{V_{3D}} = 25,28\%$$

Método Intermedio vs. Método 3D

$$\frac{V_{Interm.} - V_{3D}}{V_{3D}} = 23,12\%$$

Método Intermedio vs. Método 2D

$$\frac{V_{2D} - V_{Interm.}}{V_{Interm.}} = 1,75\%$$

Se presentan también las mismas tablas y gráficos para las horas operario y el coste de la soldadura:



Tabla 3: Horas de soldadura para diferentes métodos y radios de injerto

	Método analítico	Método 2D	Método intermedio	Método 3D
Radio tubo injerto	Horas operario (h)			
0	0	0	0	0
50	6,61	6,84	6,62	6,48
100	13,77	14,18	13,96	13,60
150	20,86	21,39	21,13	20,50
200	28,05	28,66	28,33	27,25
250	35,63	36,24	35,79	34,19
300	44,14	44,66	43,86	41,59
350	54,08	54,27	53,49	49,58
400	67,06	66,25	65,21	59,84
450	88,84	84,26	82,76	73,44
460	96,00	89,52	87,90	78,08
470	105,43	95,88	94,15	82,14
480	119,07	104,00	102,18	88,74
490	143,15	115,36	113,52	97,93
500	143,15	138,80	136,41	110,80

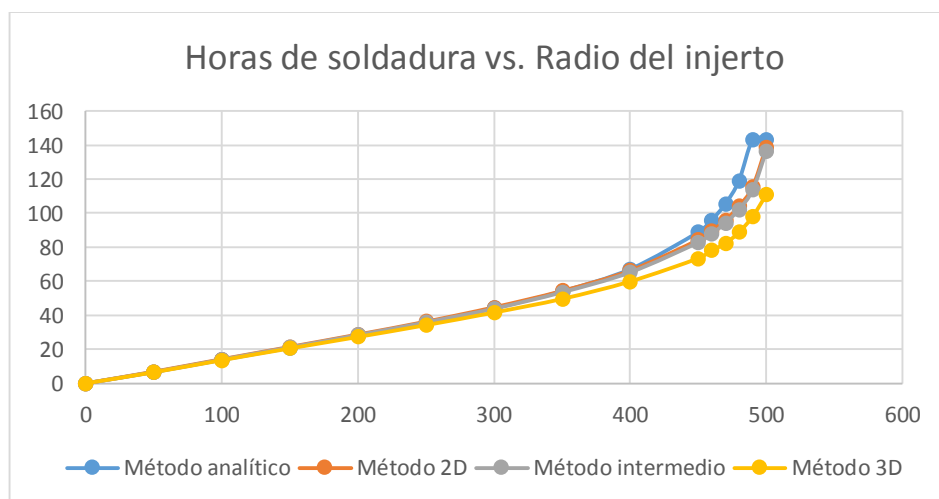


Figura 62: Horas de soldadura necesarias frente al diámetro del injerto

Al ser las horas necesarias para soldar directamente proporcionales al volumen de soldadura, la gráfica de horas y de volúmenes es muy similar.

Tabla 4: Coste de soldadura para diferentes métodos y radios de injerto

	Método analítico	Método 2D	Método intermedio	Método 3D
Radio tubo injerto	Coste (€)			
0	0	0	0	0
50	469,56	485,66	470,31	460,07
100	977,90	1007,17	991,08	965,47
150	1481,11	1519,17	1500,16	1455,51
200	1991,67	2035,54	2011,42	1935,34
250	2529,98	2573,14	2541,69	2427,60



300	3134,15	3171,43	3114,40	2953,47
350	3839,96	3853,84	3798,27	3521,07
400	4762,26	4705,83	4630,62	4249,56
450	6308,48	5983,74	5876,97	5215,03
460	6816,85	6356,77	6241,93	5544,89
470	7486,80	6808,77	6685,92	5833,09
480	8455,23	7385,14	7255,67	6301,91
490	10165,26	8191,91	8060,99	6954,34
500	10165,26	9856,62	9686,94	7867,89

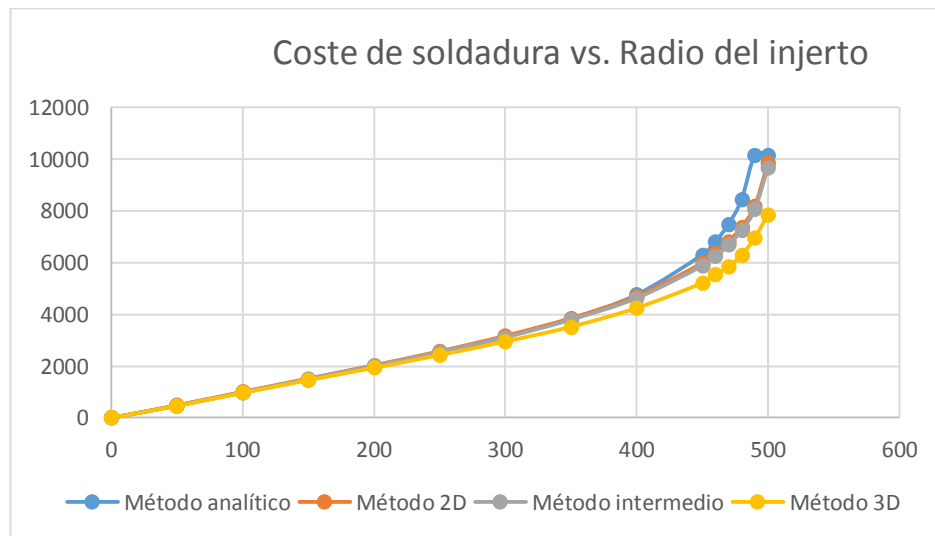


Figura 63: Coste de la soldadura frente al radio del injerto

En el caso del coste, la gráfica también es muy similar a la del volumen ya que también son directamente proporcionales. Es importante resaltar que para el caso de diámetros iguales la diferencia en euros del coste presupuestado por el método analítico y el método 3D es de 2297,37 €. Esto supone un cambio importante, sobre todo en el caso de jackets construidas a partir de tubos del mismo diámetro. Por ejemplo en la jacket tipo 4 existen 28 injertos de este tipo por lo que la diferencia entre el presupuesto dado por el método analítico y el método 3D podría llegar a:

$$Dif. \text{costes}_{anal.vs.3D} = 2297,37 \cdot 28 = 64326,36 \text{ €}$$

Este dinero, de haberse conocido esta diferencia podría haberse aprovechado de otra manera en la empresa en cuestión. Sobre todo en el caso de que se quiera realizar una producción en serie de jackets esta diferencia de costes es muy acusada. Obviamente la diferencia de costes no tiene porqué ser siempre tan elevada, esto dependerá de las características del injerto. En el caso anterior, aparte del radio de 500 mm de la cuerda el ángulo de inclinación entre tubulares era 70° y el espesor de ambos tubos 20 mm.

Ahora van a validarse los modelos mediante datos reales tomados de la soldadura de varios injertos.



Nudo 1

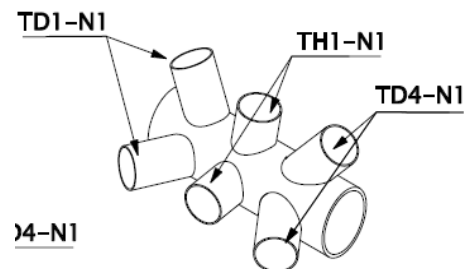


Tabla 5: Comparativa de volúmenes de soldadura calculados mediante diferentes métodos frente al real

Plano N°	Soldadura N°	Radio cuerda	Radio Brazo	Espesor Cuerda	Espesor Brazo	Ángulo inclinación del injerto	Volumen de soldadura método analítico	Volumen soldadura método 2D	Volumen soldadura método Intermedio	Volumen soldadura método 3D	Volumen soldadura real
NUDO 1	TD1-NI	500	305	50	20	68	536,74	545,9	534,53	501,73	534,79
NUDO 1	TH1-N1	500	305	50	20	81	495,64	501,02	496,38	480,02	499,51
NUDO 1	TD4-N1	500	305	50	20	49	665,47	747,9	698,7	588,03	669,62
NUDO 1	TD1-NI-H3	500	305	50	20	68	536,74	545,9	534,53	501,73	534,79
NUDO 1	TH1-NI-H2	500	305	50	20	81	495,64	501,02	496,38	480,02	499,51
NUDO 1	TD4-N1-H1	500	305	50	20	49	665,47	747,9	698,7	588,03	669,62

Tabla 6: Comparativa de horas de soldadura de los diferentes métodos frente al real

Horas de soldadura método analítico	Horas de soldadura método 2D	Horas de soldadura método Intermedio	Horas de soldadura método 3D	Horas de soldadura real
33,72	34,30	33,58	31,53	22,5
31,14	31,48	31,19	30,16	16,7
41,81	46,99	43,90	36,95	32,4
33,72	34,30	33,58	31,53	28,3
31,14	31,48	31,19	30,16	30,8
41,81	46,99	43,90	36,95	40,1



Nudo 2

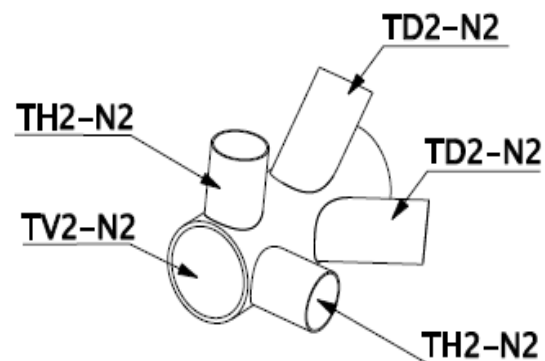


Tabla 7: Comparativa de volúmenes de soldadura calculados mediante diversos métodos frente al real en el nudo 2

Plano N°	Soldadura N°	Radio cuerda	Radio Brazo	Espesor Cuerda	Espesor Brazo	Ángulo inclinación del injerto	Volumen de soldadura método analítico	Volumen soldadura método 2D	Volumen soldadura método Intermedio	Volumen soldadura método 3D	Volumen soldadura real
NUDO 2	N2-1 (TH2-N2)	500	305	50	20	81	495,64	501,02	496,38	480,02	499,51
NUDO 2	N2-2 (TD2-N2)	500	305	50	20	48	675,65	767,71	712,97	594,64	679,56
NUDO 2	N2-3	500	305	50	20	81	495,64	501,02	496,38	480,02	499,51
NUDO 2	N2-4	500	305	50	20	48	675,65	767,71	712,97	594,64	679,56

Tabla 8: Comparativa de horas de soldadura calculadas mediante diversos métodos frente al tiempo real en el nudo 2

Horas de soldadura método analítico	Horas de soldadura método 2D	Horas de soldadura método Intermedio	Horas de soldadura método 3D	Horas de soldadura real
31,14	31,48	31,19	30,16	32
42,45	48,24	44,8	37,36	48
31,14	31,48	31,19	30,16	32
42,45	48,24	44,8	37,36	48



Nudo 3

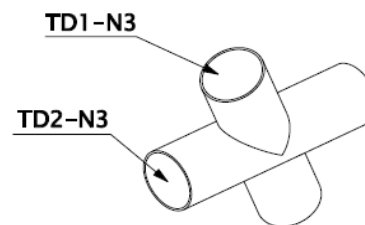


Tabla 9: Comparativa de volúmenes calculados por diferentes métodos frente al real en el nudo 3

NUDO 3	Soldadura Nº	Radio cuerda	Radio Brazo	Espesor Cuerda	Espesor Brazo	Ángulo inclinación del injerto	Volumen soldadura método 2D	Volumen soldadura método Intermedio	Volumen soldadura método 3D	Volumen soldadura real
NUDO 3	N3-1	305	305	20	20	65	662,19	624,46	595,46	580
NUDO 3	N3-2	305	305	20	20	65	662	624,46	595,76	580

Tabla 10: Comparativas de horas de soldadura frente a las reales

Horas de soldadura método 2D	Horas de soldadura método Intermedio	Horas de soldadura método 3D	Horas de soldadura real
41,61	39,23	37,82	35,5
41,61	39,23	37,82	45,5

Nota: En este caso no se puede utilizar el método analítico para el cálculo ya que al nudo 3 se le aplico un cutback de 20º y, como ya se comentó antes, este método no contempla ese parámetro.



En el caso del nudo 1 puede verse como el método analítico proporciona unos cálculos bastantes exactos, debido sobre todo a que los radios de los tubos injertos estaban bastante por debajo del radio de la cuerda, zona donde el método es bastante exacto. Hay que tener no obstante que estos valores se han calculado sin aplicar sobreespesores del 15% para cualquiera de los métodos por lo que en el caso de hacerlo el método analítico proporcionaría resultados sistemáticamente por encima del valor real. Igual pasaría en el caso del método 2D, en el que además llama la atención el valor del volumen en el caso TD4-N1 y TD4-N1-H1 que se alejan bastante del valor real. En el caso del método intermedio arroja resultados parecidos al método en 2D pero algo menos elevados. Puede observarse que el ángulo del injerto en los casos en los que parecen fallar estos dos métodos es un ángulo bastante inclinado por lo que se puede determinar que esos modelos no funcionan bien con ese tipo de ángulos. Por su parte el método 3D es el que a priori parece obtener mejores resultados. Puede verse como en todos los casos subestimo el valor del volumen, lo cual es un buen signo porque todos los modelos que se incluyen en el proyecto se basan en consideraciones únicamente geométricas y no incluyen en su cálculo sobreespesores de soldadura. Al aplicarle ese 15% de sobreespesores al método 3D pasa a estimar el volumen de soldadura de forma bastante acertada.

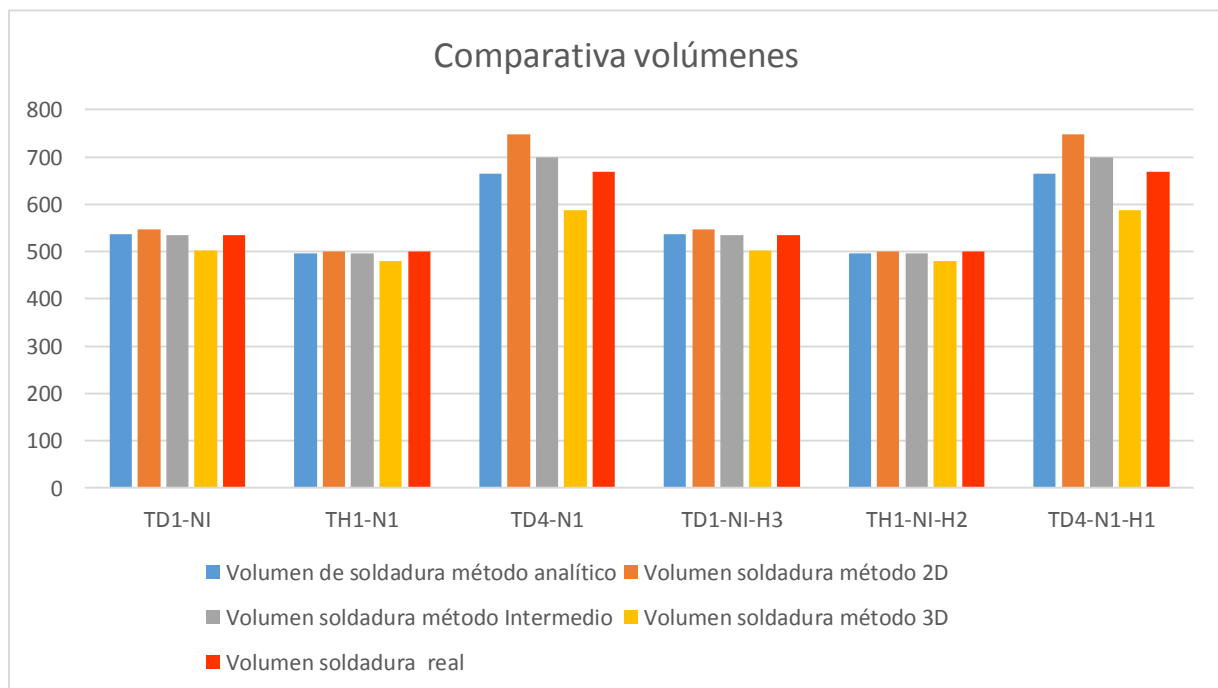


Figura 64: Comparativa de los volúmenes obtenidos por los diferentes métodos y el volumen real (Fuente: Propia)

El caso del nudo 2 es bastante similar al primer caso. Los modelos se comportan de forma parecida y la gráfica de comparativa de volúmenes es igual al caso anterior. En el caso del nudo 3 sin embargo puede observarse como los métodos gráficos se acercan al valor real en mucha mayor proporción. Ello se debe a que son más exactos en estos puntos y también a



que en estos métodos puede aplicarse el cutback a diferencia del método analítico, y al nudo real sí que se le aplicó ese cutback.

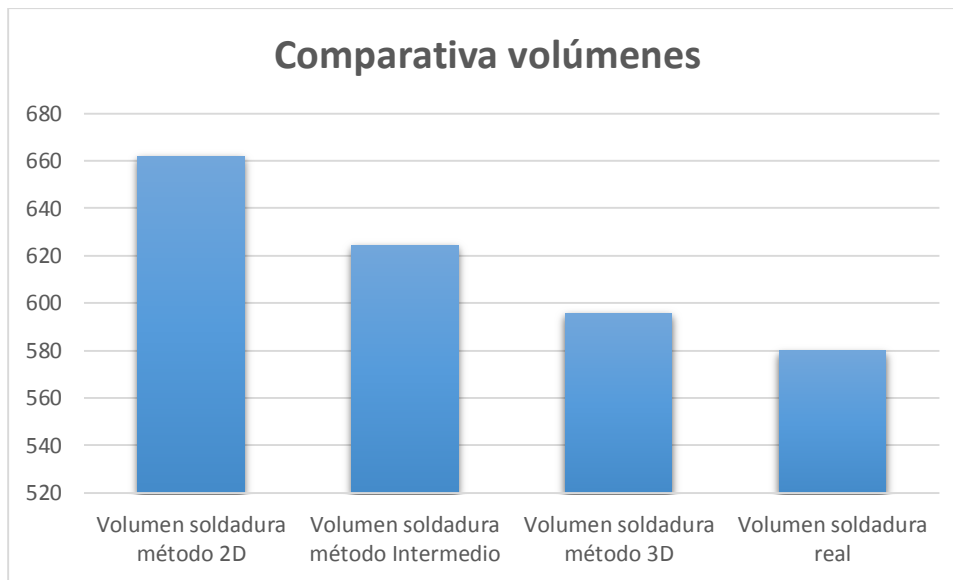


Figura 65: Comparativa de volúmenes de los métodos con el real (Fuente: Propia)



4.6. Interfaz del programa para la introducción de datos

La interfaz se desarrolló con el fin de simplificar en la medida de lo posible el proceso de definición de la jacket y el cálculo del volumen de soldadura, empleando componentes gráficos que facilitasen la visualización de datos. Hay que señalar que no se trata de una aplicación en sí ya que va montada sobre el programa Microsoft Excel. La ventaja de esto es que a la vez que se personaliza la herramienta se puede utilizar toda la potencia del software desarrollado por Microsoft.

Con esta herramienta es posible obtener el volumen de soldadura necesario para fabricar 6 tipos distintos de jackets, cuyo esquema se detalla en el propio Excel, o bien calcular un nudo o una soldadura en particular de la que se quiera tener información. Todo ello se hace a través de controles de formulario y botones de comando que agilizan el proceso. Se insertó una ventana de resultados para conocer el volumen de soldadura total empleado, las horas necesarias para conseguir ese volumen de soldadura y el coste que supone la soldadura, teniendo en consideración exclusivamente las horas operario empleadas y el coste de los materiales consumibles. En la herramienta existen, como se ha dicho, varias posibilidades de cálculo. Por un lado puede realizarse el cálculo del volumen necesario para fabricar una jacket entera teniendo en cuenta la soldadura longitudinal que se necesita para conformar los tubos, la soldadura orbital utilizada para unir los extremos de los tubos y la soldadura necesaria en los injertos. Estos volúmenes de soldadura se tratan por separado ya que el coste que implican es diferente, ya que en el caso de los dos primeros tipos la soldadura se realiza automáticamente mediante un robot, lo que supone una reducción en el tiempo y en el coste del trabajo realizado. En el caso de los injertos, por su elevada complejidad únicamente es posible llevarlos a cabo a mano por lo que el coste que implican es mayor, y así se tiene en cuenta en la herramienta. Se pueden calcular 5 tipos distintos de soldadura a tope, dependiendo si se realiza repaso por el interior del tubo o no. En cuanto a las jackets se nombran como tipo 1, tipo 2, tipo 3, tipo 4, tipo 5 y tipo 6 y cada una de ellas tiene su propia hoja de Excel dentro de la herramienta para configurar sus dimensiones. Es posible elegir el método a emplear para el cálculo en el caso de injertos o del volumen de la jacket (ya que contiene injertos), el resto de casos como puede ser la soldadura lineal o la soldadura a tope tienen unas fórmulas de cálculo muy sencillas y que ofrecen buenas aproximaciones. También se puede elegir la precisión de cálculo con la que se quiere hacer el cálculo en el caso de los injertos. Una precisión alta equivale a ir variando beta de $0,1^\circ$ en $0,1^\circ$, una precisión media equivale a una variación de 1° en beta y por último una precisión baja supone una variación de beta de 5° .

A continuación se muestra el aspecto que presenta la herramienta programada en vba.



Herramienta para el cálculo del volumen de soldadura de una jacket

Ubicación archivos

Configuración jacket

Coste total de la soldadura

Calcular volumen de soldadura de la jacket

Forma de resolución

- Método gráfico 2D
- Método gráfico 2D-3D
- Método gráfico 3D
- Método analítico

Precisión de cálculo

- Baja (5°)
- Media (1°)
- Alta (0,1°)

Incluir tolerancias de soldadura en el análisis

Resultados

Volumen de soldadura total:
1235,02cm³

Horas requeridas para la soldadura
77,6h

Coste de la soldadura (c.horas operario+c.consumibles)
5552,39euros

Calcular volumen de soldadura de unión en particular (pulsar sobre el esquema que más se asemeje a la soldadura requerida)

-
-
-
-
-
-

Generar informe de los cálculos realizados

Figura 66: Vista de la interfaz del programa (Fuente: Propia)

Los componentes de introducción de datos presentes en la aplicación son de tres tipos:

Editores para variables numéricas

Cuadros desplegables para la selección de una opción de la lista

Casillas de selección de una opción

La mayoría de ellos se encuentran en un principio ocultos en formularios que se desplegan al pulsar un determinado botón de comando. Si se quisiese calcular el volumen de soldadura de una soldadura en concreto los pasos que se seguirían serían estos:

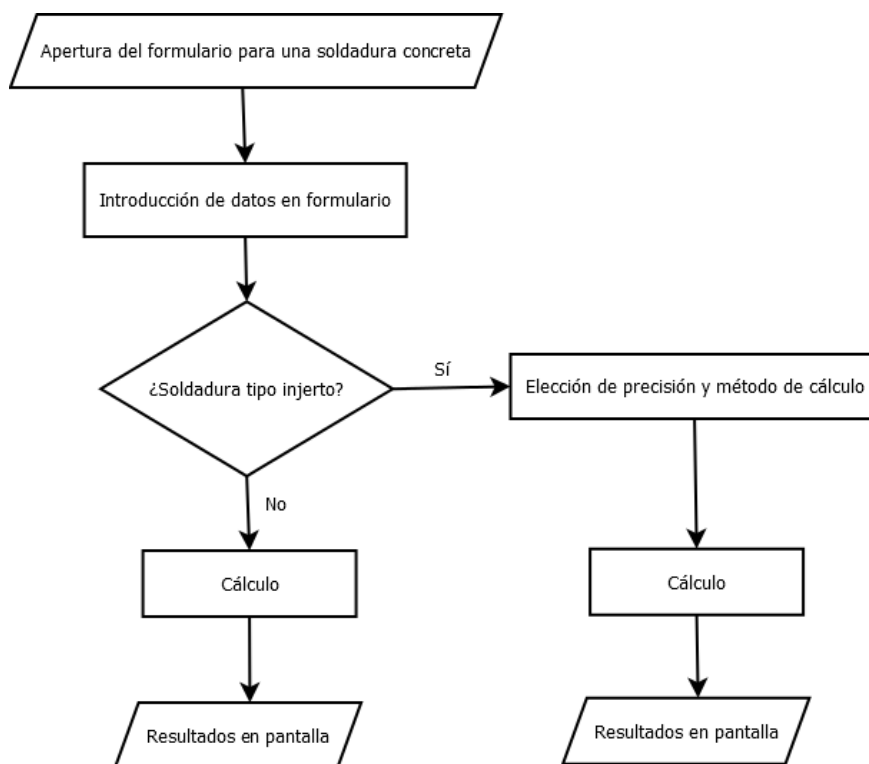


Figura 67: Diagrama de proceso de utilización de la herramienta (Fuente: Propia)

En caso de que el usuario introdujese valores incorrectos o no numéricos el programa mandaría una señal de error. De entre el cálculo de soldaduras sueltas, a excepción de la soldadura de tipo 6 todas las demás se hacen de forma analítica debido a su sencillez.

Para calcular el volumen de soldadura de una jacket los pasos son algo más complejos. Primeramente se comprueban los archivos, posteriormente se abre el formulario de configuración de jacket y se elige una de ellas. En caso de no elegir ninguna el programa tampoco dejará ejecutar más adelante la macro de cálculo del volumen de la jacket. Además es necesario escoger el tipo de método a utilizar para el cálculo y la precisión. Todas esas casillas de opción se encuentran en la parte inferior izquierda del programa.



A continuación se muestra el diagrama de bloques del proceso de cálculo del volumen de soldadura de la jacket:

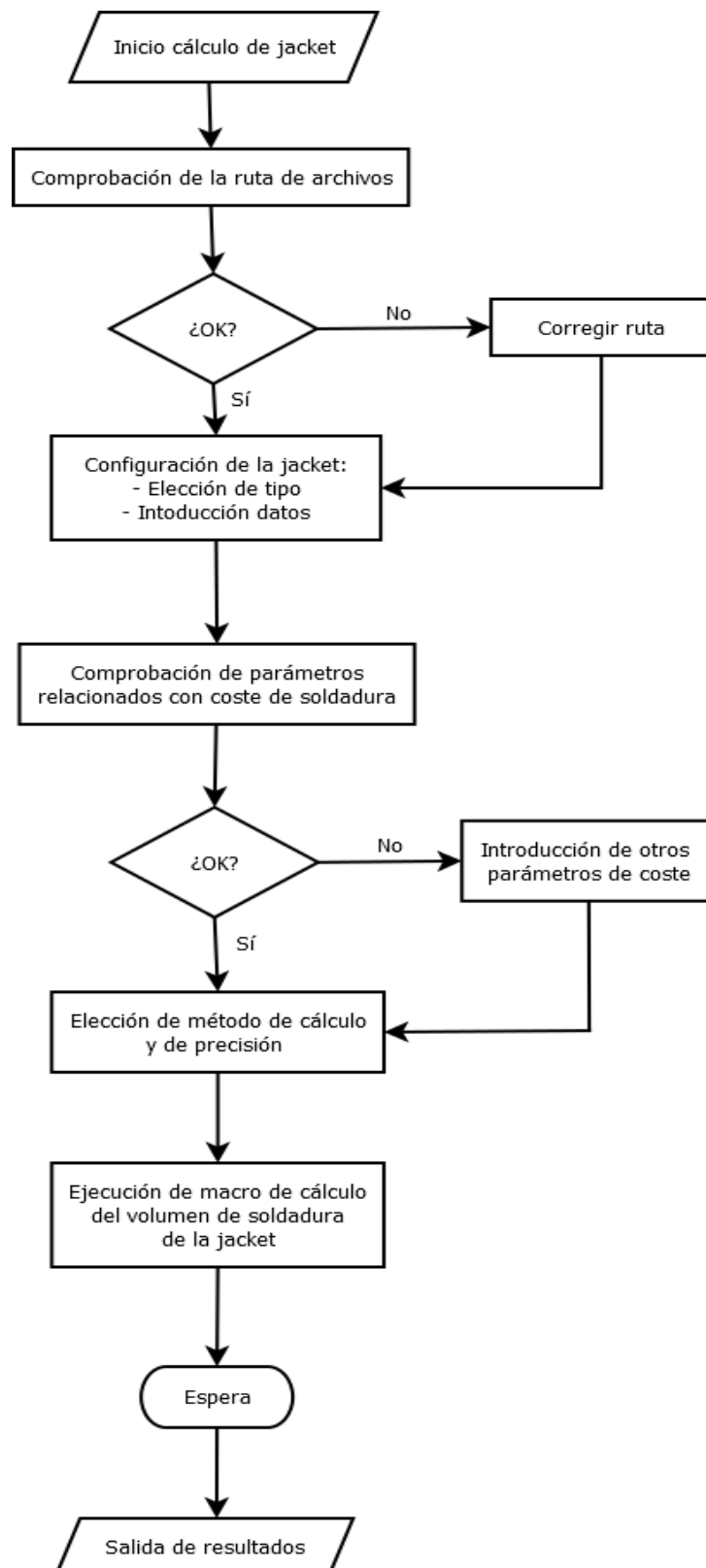


Figura 68: Diagrama de proceso del cálculo del volumen de la jacket

La primera pestaña que se configuró en la herramienta es el botón que muestra la ubicación de los archivos:

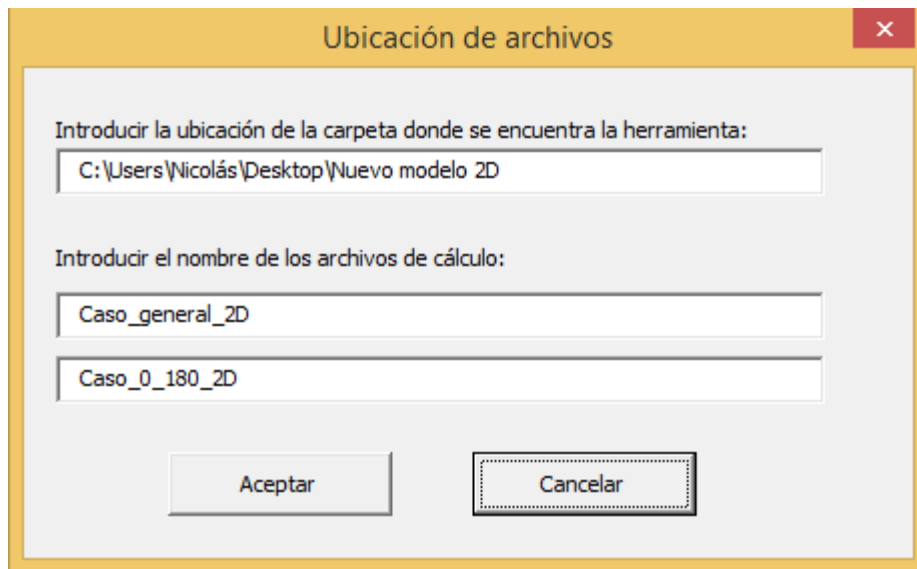


Figura 69: Formulario de ubicación de archivos (Fuente: Propia)

Es una ventana importante y que debe comprobarse siempre, ya que si no los métodos gráficos no funcionarían. La misión de esta pestaña es señalar donde se encuentran los archivos SolidWorks para que la herramienta los utilice cuando sea necesario. En principio está preparada para leer automáticamente la ubicación de los archivos una vez iniciado el Excel. Esto se hace mediante una macro que se ejecuta nada más iniciar el programa. En caso de que el usuario tenga deshabilitadas las macros el proceso fallará y deberá habilitar las macros y cambiar la ubicación a mano o bien cerrar y volver a abrir el programa. No se debe modificar el nombre de los archivos de SolidWorks ni se deben separar de la carpeta donde se encuentra la herramienta ya que esto produciría un error inevitablemente.

A este primer formulario se accede a través del botón de comando que se encuentra en la esquina superior izquierda del programa y que recibe el nombre de “Ubicación archivos”.

Una vez abierto este formulario el siguiente paso es clicar en el botón “Configuración Jacket” que se encuentra justo debajo del que se acaba de comentar. Inmediatamente se abre el formulario y se presenta una lista de opciones con diferentes tipos de jackets posibles para calcular su volumen de soldadura. Estas jackets están numeradas del 1 al 6. Al clicar sobre la lista las imágenes de las jacket van cambiando para ayudar a decidir al usuario cual es la jacket que más se asemeja a su diseño. Es necesario señalar que existen multitud de diseños posibles para jackets y es imposible incluirlos todos. Es por ello que se deja una opción, la última de la lista, vacía, para que el usuario pueda introducir los parámetros de la jacket a su gusto. No obstante esto supone que el usuario tendría que acceder al código vba y programar las instrucciones necesarias para el

cálculo del volumen de soldadura, con el resto del programa como guía , algo que podría resultar bastante tedioso, sobre todo si no se conoce el programa.

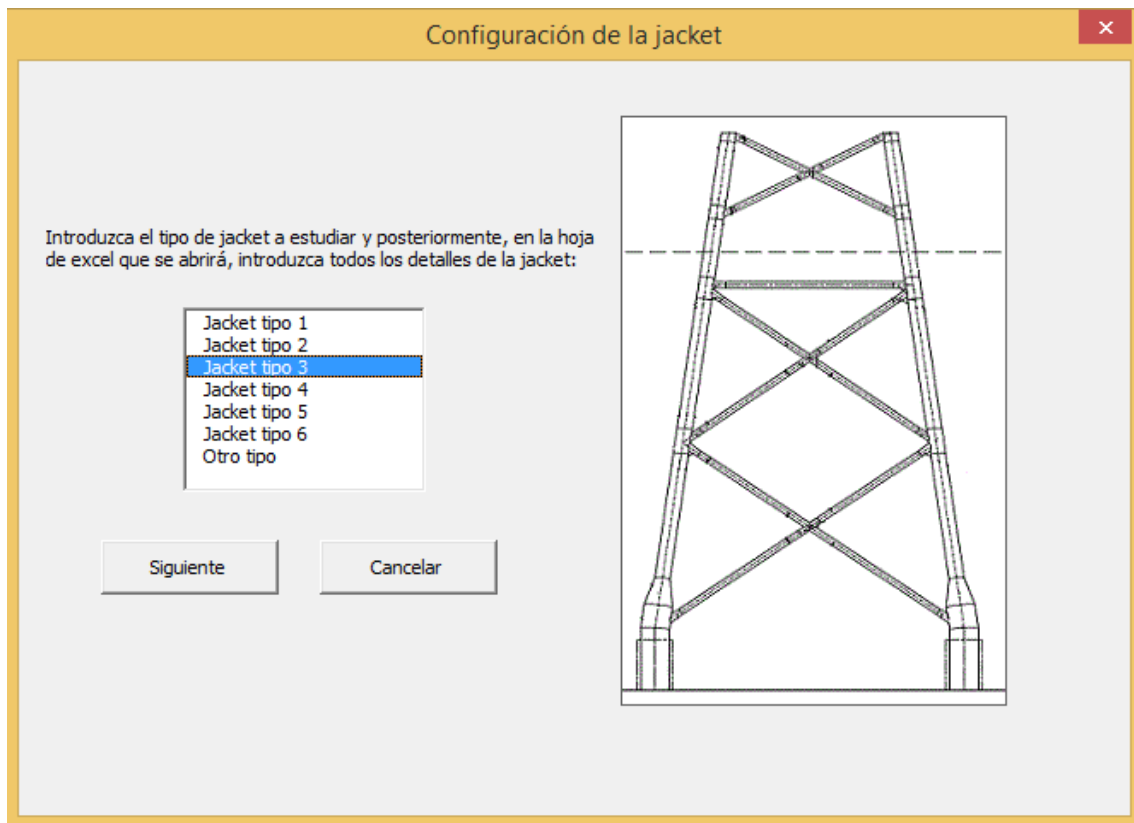


Figura 70: Formulario de configuración de la jacket (Fuente: Propia)

Una vez se selecciona la jacket deseada y se le da al botón de aceptar, se abre una hoja de Excel preparada para que el usuario indique las medidas exactas de cada nudo de la jacket así como las dimensiones de los tubulares, y en fin, todo lo que es de relevancia para el cálculo del volumen. Esta hoja tiene apartados específicos para depositar allí el volumen de soldadura necesario para cada nudo, así como casillas para realizar la suma de todos los volúmenes de cada apartado y por último una casilla que indica el volumen total de la jacket. La razón de esto es que al finalizar el cálculo el usuario puede acudir a esta hoja y ver todos los volúmenes individualmente y observar si hay alguno discordante con los demás. Es una posible forma de corrección de errores. Podría coger los parámetros de este nudo y calcularlos por separado mediante la propia herramienta, eligiendo el método de cálculo que se utilizó anteriormente y ver si realmente el volumen es aquel que se indica o bien por ejemplo es un fallo del SolidWorks.

Una vez el usuario ha introducido los parámetros necesarios de la jacket, el siguiente paso es establecer todo lo relacionado con el coste de la soldadura. Para ello debe entrar en la pestaña del coste de la soldadura a través del botón "Coste total de la soldadura" que se encuentra debajo del botón que se acaba de comentar. En el formulario que aparece a continuación se introducen los datos a partir de los cuales se va a calcular las horas necesarias para realizar toda la soldadura y el coste que ello implica.



Parámetro	Valor
Ratio hilo macizo [cordón de raíz] (kg/cm ³):	0,0037
Ratio hilo tubular [cordón de relleno] (kg/cm ³):	0,026
Porcentaje de repaso sobre horas de soldadura(%):	3
Porcentaje de montaje sobre el total de horas de mano de obra(%):	30
Ratio euros/kg de material consumible:	4,7
Incremento por corriente, gas, etc(%):	60
[Soldadura manual] Ratio hora operario/volumen de soldadura (h/cm ³):	0,072
[Soldadura automática] Ratio hora operario/volumen de soldadura (h/cm ³):	0,0046
Ratio coste/ hora operario (euros/h):	68

Figura 71: Formulario del coste de la soldadura (Fuente: Propia)

Los parámetros que es necesario introducir son:

Ratio hilo macizo: Es el cordón que se utiliza como base de la soldadura. Esta ratio sería la densidad del hilo multiplicada por su porcentaje del volumen total de soldadura que representa.

Ratio hilo tubular: Es el cordón que se utiliza para rellenar el resto de la soldadura. Su significado es el mismo que el anterior.

Porcentaje de repaso sobre horas de soldadura: Es el tiempo en el que se corrigen pequeños detalles y defectos que se hayan podido observar en la soldadura.

Porcentaje de montaje: Representa el tiempo de armado, es decir, el tiempo que tardan los operarios en colocar los tubulares en posición adecuada para la soldadura y con sus bordes preparados.

Ratio euros/kg de material consumible: Se trata del precio del material que se utiliza.



Incremento por corriente, gas, etc.: El utilizar gas, como el Nitrógeno o el Argón para evitar la oxidación de la soldadura encarece su precio en una cierta cantidad.

Ratio hora operario/volumen de soldadura manual: Es un indicador del tiempo que se tarda en soldar un determinado volumen. Evidentemente la soldadura manual es más costosa en tiempo que la soldadura automática.

Ratio hora operario/volumen de soldadura automática: Esta soldadura la realiza un robot por lo que se lleva a cabo en menos tiempo, es decir, que se necesitan menos horas para conseguir el mismo volumen de soldadura depositado sobre la pieza.

Ratio coste por hora operario: Este es el coste que se imputa a la mano de obra que está soldando la pieza, manejando el robot, o realizando el armado de los tubulares.

Se incluye un botón para restablecer los valores iniciales por si acaso el usuario los cambia y luego quiere volver atrás. Se dan unos valores de referencia tomados experimentalmente.

A partir de esos valores recogidos, se calcula como se ha dicho antes, las horas necesarias para realizar la soldadura y el coste asociado a la misma mediante el siguiente procedimiento:

1. Cuantificación de la cantidad de volumen de soldadura que se deposita en la jacket de forma manual. Depende del tipo de jacket.
2. Cuantificación de la cantidad de volumen de soldadura que se deposita en la jacket de forma automática mediante robot de soldadura. Depende del tipo de jacket.
3. Cálculo de las horas de soldadura mediante la siguiente ecuación:

$$\begin{aligned} \text{Horas}_{\text{Soldadura}} &= \left[\text{Volumen}_{\text{Manual}} \cdot R(h / \text{cm}^3)_{\text{Manual}} + \text{Volumen}_{\text{Automát.}} \cdot R(h / \text{cm}^3)_{\text{Automát.}} \right] \cdot \\ &\cdot \left(1 + \frac{\% \text{Increm.}_{\text{repaso}}}{100} \right) \end{aligned}$$

[58]

4. Cálculo del coste de la soldadura mediante la ecuación:

$$\text{Coste} = \text{Horas} \cdot P(\text{€} / \text{h}) + \left[\text{Volumen} \cdot R_{\text{hilos}}(\text{kg} / \text{cm}^3) \cdot P(\text{€} / \text{kg}) \right] \cdot \left(1 + \frac{\% \text{Increm.}_{\text{gases}}}{100} \right)$$

[59]

Es necesario reseñar que en el cálculo de las horas de soldadura se ha tenido únicamente en cuenta el tiempo de soldado, sin incluir el armado, operación complementaria de la soldadura. En caso de querer saber el tiempo que se tardaría en realizar la operación conjunta se dividiría el tiempo de soldadura obtenido entre 0,7 ya que el armado representa un 30% con respecto al tiempo total de armado más soldado.



Una vez configurado el coste de la soldadura se elige el método de cálculo en las casillas de selección de la parte inferior izquierda. Se puede escoger entre cuatro opciones diferentes, 3 formas gráficas y la analítica, todas ellas explicadas anteriormente. Sólo se puede elegir una de ellas a la vez.

Por último, en la esquina inferior izquierda se sitúan las casillas de opción de la precisión del cálculo. Estas casillas tienen asociado una macro cada una que al pulsar sobre ellas se produce la actualización en todas las hojas de configuración de las jackets. Es decir, no depende de la configuración de jacket que se haya elegido si no que modifica todas las casillas a la vez. Las precisiones vienen dadas en función del ángulo β , ángulo del plano de soldadura con respecto al origen. Este plano puede variar de 5° en 5° , de 1° en 1° , o de $0,1^\circ$ en $0,1^\circ$. Cuanto menor es el paso del plano más se aumenta la precisión, hasta un límite obviamente. Un método impreciso lo seguirá siendo aunque se elija la precisión más ajustada. Hay que tener en cuenta que si se pasa de 5° a 1° en precisión, se multiplica el tiempo de cálculo por 5 y si se pasa de 1° de precisión a $0,1^\circ$ de precisión se multiplica el tiempo de cálculo por 10. Los consejos del desarrollador de este programa en cuanto a que precisiones utilizar para cada caso son las siguientes:

- Método analítico: Precisión de $0,1^\circ$.
- Método 2D: Precisión de 1° .
- Método intermedio: Precisión de 1° .
- Método 3D: Precisión de 5°

Llama la atención que el método 3D se realice con la precisión menor. Eso es porque este método no se basa en el cálculo de áreas y por tanto el hecho de disminuir el paso del plano de soldadura no aumenta su precisión.

Por último quedan dos casillas a marcar o no en función de las preferencias del usuario. La primera de ellas se encuentra justo debajo del botón de cálculo del volumen de soldadura de la jacket. Esta casilla se marca si el usuario quiere que en el cálculo del volumen se incluyan las tolerancias de la soldadura. En caso de marcarla, al finalizar el cálculo se dará un valor máximo y un valor mínimo para el volumen de soldadura, para las horas y para el coste. Los parámetros que se tienen en cuenta a la hora de incluir las tolerancias son el GAP entre tubulares y el ángulo del chaflán. El GAP entre tubulares es la distancia a la que se sitúa un tubo del otro (en el caso de injerto se conoce como h_s y en el caso de soldaduras a tope o lineales como R). Esta distancia en el caso de injertos varía entre 3 y 6 mm mientras que en el caso de soldadura a tope varía entre 6 y 8 mm. Es posible cambiar en la herramienta estas tolerancias en función de las especificaciones técnicas requeridas. Por su parte el ángulo chaflán (β_s), varía en el caso de injertos entre 45° y 55° y en el caso de soldadura a tope entre 40° y 60° . Obviamente existen más tolerancias en el diseño, como podrían ser los diámetros del tubo injerto y del tubo pasante o la inclinación entre tubulares pero su variación no influye de forma tan importante en el volumen ya que entre otras cosas presenten tolerancias estrechas para poder encajar unas piezas con otras.

La segunda casilla se encuentra en la esquina inferior derecha del programa y es donde el usuario indica si el programa debe generar un informe de los resultados obtenidos. En este informe, que sería una hoja Excel, depositada en la misma carpeta que la herramienta y con el nombre de “informe” se presenta al lado de cada tipo de soldadura el volumen de material empleado y al final la suma de todos los volúmenes.

Una vez configuradas todas las pestañas del programa se pulsa en el botón “Calcular volumen de soldadura de la jacket”, y se espera hasta obtener el volumen de soldadura, así como las horas necesarias para soldar y el coste de esa soldadura en la ventana de resultados.



Figura 72: Botón que ejecuta la macro del cálculo del volumen de soldadura de la jacket (Fuente: Propia)

El resultado del cálculo aparece en un cuadro de texto en el propio programa a la vista del usuario. Tiene el siguiente aspecto:

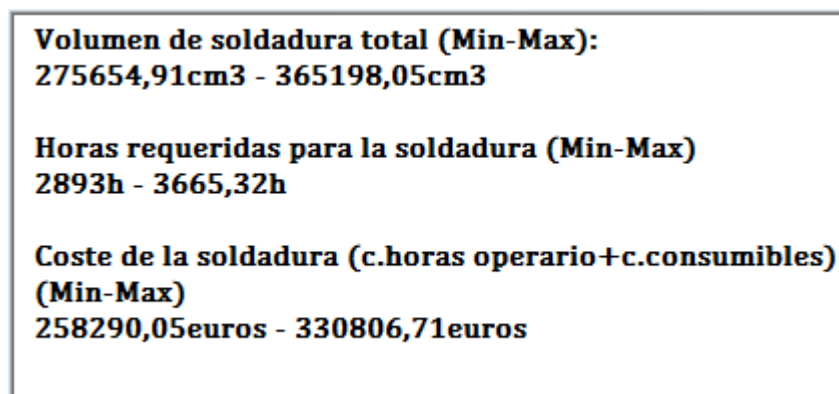


Figura 73: Ventana de resultados del programa (Fuente: Propia)

Este es el caso en el que se ha marcado la casilla de cálculo de tolerancias. Primero se indican los volúmenes de soldadura máximo y mínimo. A continuación el rango de horas requeridas para la soldadura y por último el rango de costes.

Toca comentar por último los formularios y pestañas dedicadas en la herramienta para el cálculo únicamente de una soldadura determinada en lugar de toda una jacket. Existen diversas posibilidades:

- **Soldadura a tope por un único lado sin preparación de bordes**

El formulario para calcular este tipo de soldadura es el que se muestra a continuación y se basa en la Ecuación [2].

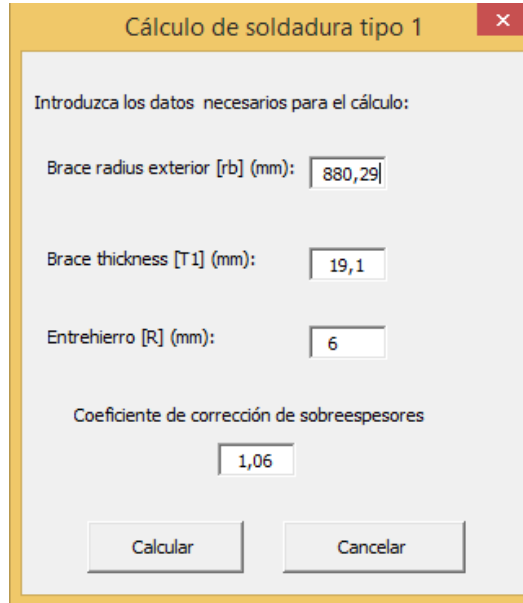


Figura 74: Formulario de soldadura tipo 1

- **Soldadura a tope por un único lado con preparación de bordes**

El formulario para calcular este tipo de soldadura es el que se muestra continuación y se basa en la Ecuación [4].

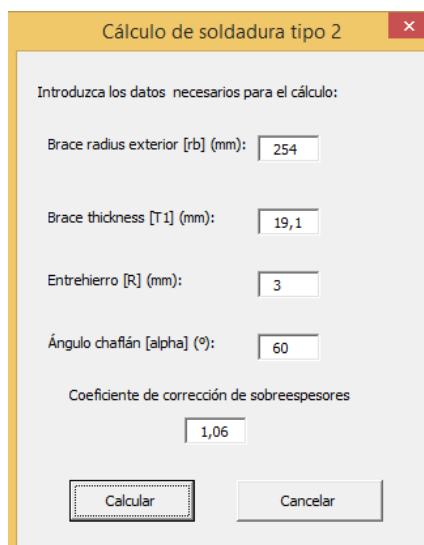


Figura 75: Formulario de soldadura tipo 2



- **Soldadura a tope por un único lado con tacón**

El formulario para calcular este tipo de soldadura es el que se muestra continuación y se basa en la Ecuación [6].

Cálculo de soldadura tipo 3

Introduzca los datos necesarios para el cálculo:

Brace radius exterior [rb] (mm):

Brace thickness [T1] (mm):

Entrehierro [R] (mm):

Tacón [f] (mm):

Ángulo chafán [alpha] (°):

Coeficiente de corrección de sobreespesores

Figura 76: Formulario de soldadura tipo 3

- **Soldadura a tope con repaso por el interior y mismo ángulo de chafán en ambas caras**

El formulario para calcular este tipo de soldadura es el que se muestra continuación y se basa en la Ecuación [8].

Cálculo de soldadura tipo 4

Introduzca los datos necesarios para el cálculo:

Brace radius exterior [rb] (mm):

Brace thickness [T1] (mm):

Entrehierro [R] (mm):

Tacón [f] (mm):

Ángulo chafán [alpha] (°):

Coeficiente de corrección de sobreespesores

Figura 77: Formulario soldadura tipo 4



- **Soldadura a tope con repaso por el interior con diferente ángulo de chaflán en las caras**

El formulario para calcular este tipo de soldadura es el que se muestra continuación y se basa en la Ecuación [10].

Cálculo de soldadura tipo 5

Introduzca los datos necesarios para el cálculo:

Brace radius exterior [rb] (mm): 660

Brace thickness [T1] (mm): 40,5

Entrehierro [R] (mm): 6

Tacón [f] (mm): 18

Ángulo chaflán [alpha] (°): 90

Ángulo chaflán [beta] (°): 90

Coeficiente de corrección de sobreespesores: 1,06

Calcular Cancelar

Figura 78: Formulario soldadura tipo 5

- **Soldadura de injertos**

En estos casos el formulario necesita un mayor número de parámetros:

Cálculo de soldadura tipo 6

Introduzca los datos necesarios para el cálculo:

Radio tubo injerto exterior [rb] (mm): 100

Radio tubo pasante exterior [rc] (mm): 500

Espesor tubo injerto [tb] (mm): 20

Espesor tubo pasante [tc] (mm): 20

Ángulo entre directrices [theta] (°): 70

GAP entre tubulares [hs] (mm): 3

Ángulo chaflán [beta_s] (°): 45

Radio del reborde [r_min] (mm): 20

Coeficiente de corrección de sobreespesores: 1,15

Ángulo cutback: 0

Zona de aplicación del cutback: 180

Precisión de cálculo:
 Baja (5°)
 Media (1°)
 Alta (0,1°)

Calcular por el método (2D,3D,Intermedio,analítico): 3D

Calcular Cancelar

Figura 79: Formulario soldadura tipo 6



4.7. Cálculo del volumen de soldadura empleado en una jacket completa

Una vez con la herramienta totalmente operativa y funcional se calculó el volumen de soldadura necesario para fabricar los 6 tipos de jackets con cada uno de los métodos y teniendo en cuenta las tolerancias de soldadura. Hay que señalar que en estos casos se aplicó un ángulo de cutback para injertos de igual diámetro de 10º grados. La razón de escoger este valor es que se ha demostrado en numerosos estudios que no provoca en la estructura tensiones excesivas (se permite hasta 30º). En caso de querer aumentar su valor hasta 40º o 50º sería necesario llevar a cabo análisis como los que se realizan en el capítulo 5 para demostrar su viabilidad. Así pues, los volúmenes obtenidos para los distintos tipos de jackets fueron los siguientes:

Método analítico

Tabla 11: Volúmenes de soldadura de las diferentes jackets por el método analítico

	Volumen (cm3)		Horas operario (h)		Coste(€)	
	Mínimo	Máximo	Mínimo	Máximo	Mínimo	Máximo
Jacket 1	294070,57	372826,48	4023,17	4396,32	339254,51	382218,06
Jacket 2	318647,51	401219,71	4769,9	5161,13	395521,45	440566,9
Jacket 3	293926,41	372295,14	3026,42	3397,73	271443,26	314195,6
Jacket 4	310434,42	392114,8	4450,05	4837,05	371936,96	416495,89
Jacket 5	196461,83	244316,21	3584,87	3811,61	287649,88	313755,78
Jacket 6	261288,75	328169,9	2582,66	2899,54	233977,92	270463,46

Método 2D

Tabla 12: Volúmenes de soldadura de las diferentes jackets por el método 2D

	Volumen (cm3)		Horas operario (h)		Coste(€)	
	Mínimo	Máximo	Mínimo	Máximo	Mínimo	Máximo
Jacket 1	293969,80	386964,12	4016,84	5284,58	338801,46	445777,81
Jacket 2	320764,89	421778,75	4902,94	6452,86	405040,74	532995,93
Jacket 3	294333,22	387413,99	3143,86	4039,51	279520,32	361213,26
Jacket 4	316033,27	415591,91	4801,82	6312,12	397108,18	522043,93
Jacket 5	197946,22	260520,1	3678,14	4829,7	294323,37	386604,98
Jacket 6	262246,26	341297,89	2642,82	3724,37	238282,68	329484,09



Método Intermedio

Tabla 13: Volúmenes de soldadura de las diferentes jacket por el método intermedio

	Volumen (cm3)		Horas operario (h)		Coste(€)	
	Mínimo	Máximo	Mínimo	Máximo	Mínimo	Máximo
Jacket 1	279991,98	371989,08	3867,13	5072,22	325499,47	427992,55
Jacket 2	304207,54	403932,81	4718,69	6187,64	388813,74	510975,67
Jacket 3	280314,3	372362,44	3044,97	3904,54	269664,35	348673,4
Jacket 4	299597,29	397919,2	4625,2	6057,79	381426,82	500802,46
Jacket 5	178871,61	240157,72	3517,64	4588,29	279149,72	365641,76
Jacket 6	235007,97	312980,46	2454,33	3468,08	219382,23	305732,05

Método 3D

Tabla 14: Volúmenes de soldadura de las diferentes jackets por el método 3D

	Volumen (cm3)		Horas operario (h)		Coste(€)	
	Mínimo	Máximo	Mínimo	Máximo	Mínimo	Máximo
Jacket 1	275465,07	365074,08	3582,71	4637,75	305147,45	396904,2
Jacket 2	297428,38	393524,73	4292,75	5533,70	358336,06	464183,21
Jacket 3	275654,91	365198,05	2893,00	3665,32	258290,05	330806,71
Jacket 4	293608,59	388751,76	4248,93	5481,80	354502,91	459587,65
Jacket 5	174483,39	232688,37	3241,93	4118,99	259421,2	332061,16
Jacket 6	248201,47	315082,62	3283,28	3600,16	278697,39	315182,93

A continuación se muestran las gráficas que reflejan los volúmenes de soldadura máximo y mínimo para cada jacket y para cada tipo de método:

Jacket tipo 1

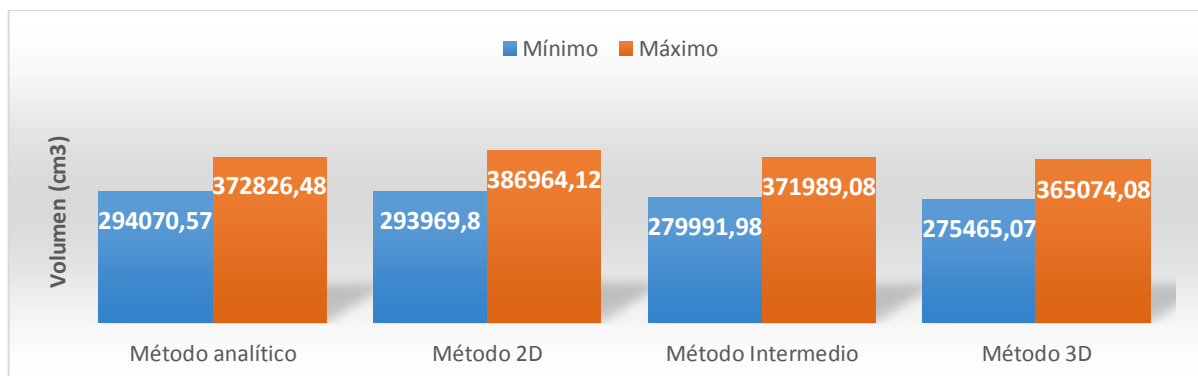


Figura 80: Volumen mínimo y máximo de construcción de una jacket para jacket de tipo 1 (Fuente propia)



La diferencia máxima entre métodos se produce entre método analítico y el método 3D y representa:

$$\Delta\text{Volumen} = 18605,5 \text{ cm}^3$$

$$\Delta\text{Horas} = 440,46 \text{ h}$$

$$\Delta\text{Coste} = 34107,06 \text{ €}$$

Se puede observar que la diferencia entre ambos métodos es elevada. Además esa diferencia horaria se produce en el volumen de soldadura manual por lo que repercute en mayor medida en la diferencia de costes.

Jacket tipo 2

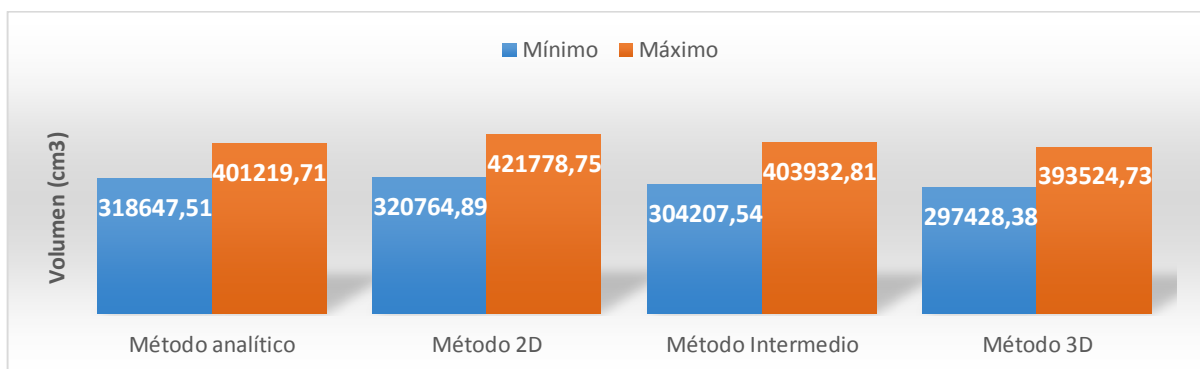


Figura 81: Volumen mínimo y máximo de construcción de una jacket para jacket de tipo 2 (Fuente propia)

La diferencia máxima entre métodos se produce entre método 2D y el método 3D y representa:

$$\Delta\text{Volumen} = 23336,51 \text{ cm}^3$$

$$\Delta\text{Horas} = 610,19 \text{ h}$$

$$\Delta\text{Coste} = 46704,68 \text{ €}$$

Jacket tipo 3

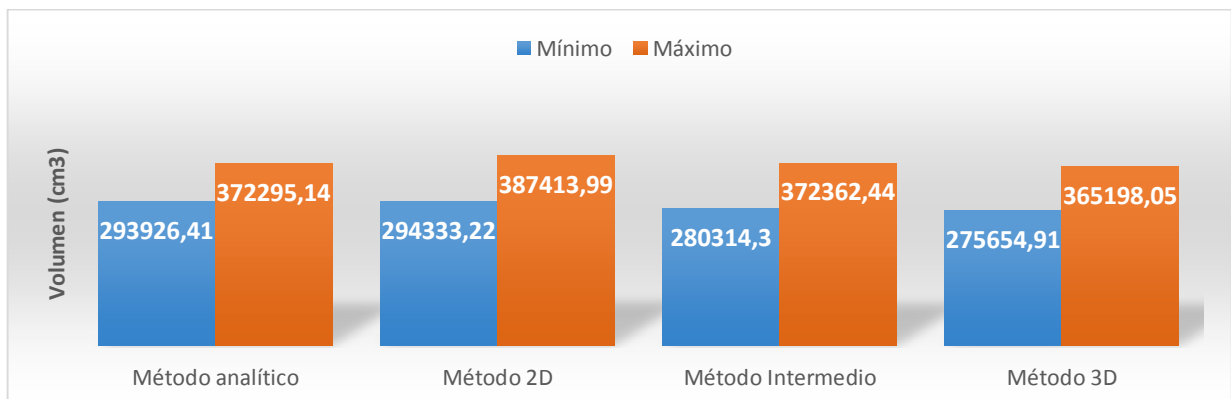


Figura 82: Volumen mínimo y máximo de construcción de una jacket para jacket de tipo 3 (Fuente propia)



La diferencia máxima entre métodos se produce entre método 2D y el método 3D, aunque el método analítico se encuentra también casi a la par que el 2D. Esta diferencia representa:

$$\Delta\text{Volumen} = 18678,31 \text{ cm}^3$$

$$\Delta\text{Horas} = 250,86 \text{ h}$$

$$\Delta\text{Coste} = 21230,27 \text{ €}$$

Jacket tipo 4

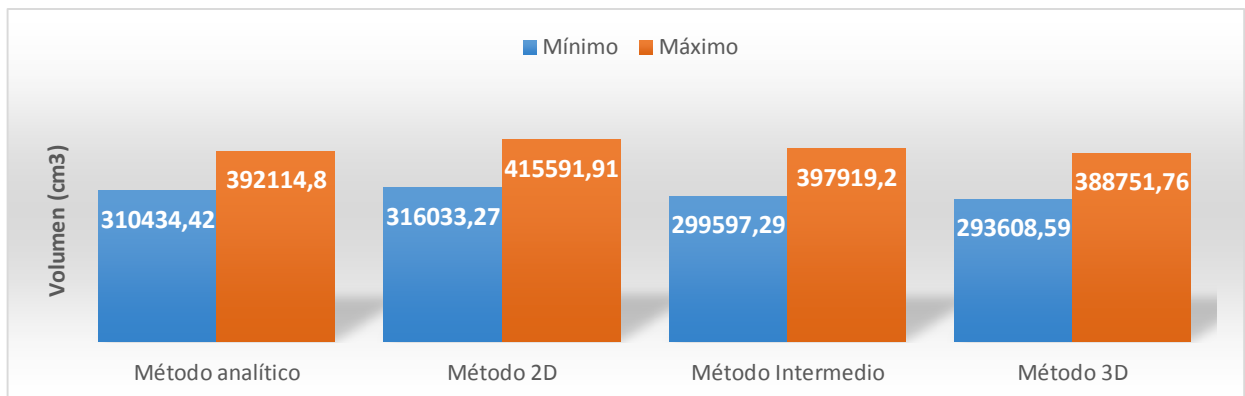


Figura 83: Volumen mínimo y máximo de construcción de una jacket para jacket de tipo 4 (Fuente propia)

La diferencia máxima entre métodos se produce entre método analítico y el método 3D y representa:

$$\Delta\text{Volumen} = 22424,68 \text{ cm}^3$$

$$\Delta\text{Horas} = 552,89 \text{ h}$$

$$\Delta\text{Coste} = 42605,27 \text{ €}$$

Jacket tipo 5

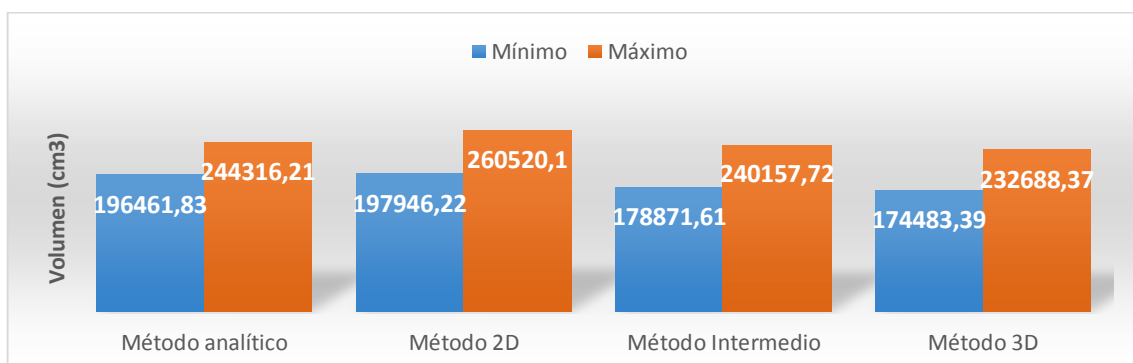


Figura 84: Volumen mínimo y máximo de construcción de una jacket para jacket de tipo 5 (Fuente propia)

La diferencia máxima entre métodos se produce entre método analítico y el método 3D y representa:



Δ Volumen = 23462,83 cm³

Δ Horas = 436,21 h

Δ Coste = 34902,17 €

Jacket tipo 6

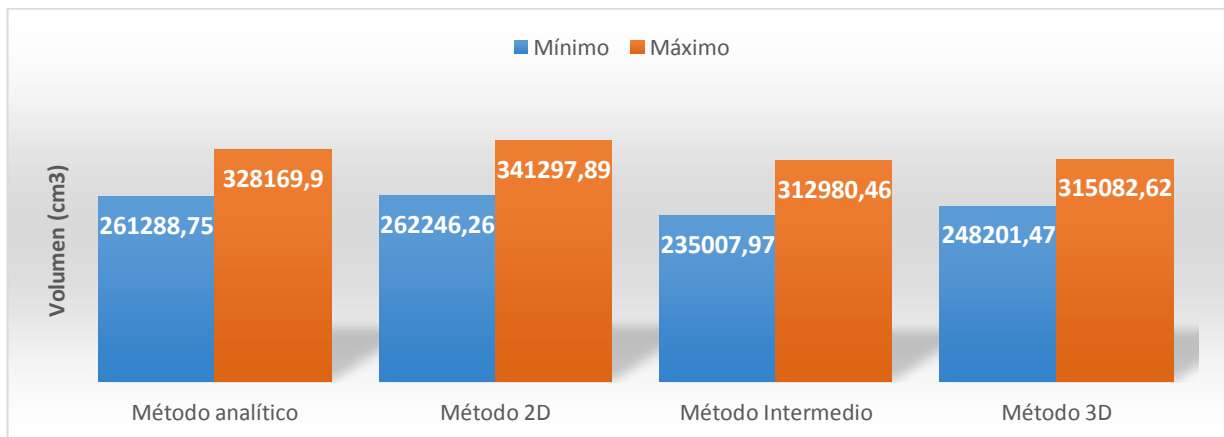


Figura 85: Volumen mínimo y máximo de construcción de una jacket para jacket de tipo 6 (Fuente propia)

La diferencia máxima entre métodos se produce entre método 2D y el método Intermedio y representa:

Δ Volumen = 27238,29 cm³

Δ Horas = 188,49 h

Δ Coste = 18900,45 €

Se puede comprobar como en la mayoría de los casos el método que arroja un valor de volumen de soldadura menor es el método 3D mientras que el que da unos resultados más elevados es el método 2D aunque seguido muy de cerca por el método analítico. Esto cuadra con lo que ya se pensaba de la fiabilidad de los métodos. Por tanto, en el caso de que una empresa quisiese calcular cual es el volumen necesario para soldar un tipo de jacket lo mejor sería acudir al método 3D sin duda. Estas diferencias entre los métodos suelen suponer una diferencia en coste de 20000 € para arriba por jacket. Se trata por tanto de una cifra a tener en cuenta ya que en caso de fabricar 20 jackets en serie la diferencia total en el presupuesto inicial sería de unos 400000 €.

Se puede ver además que hay una gran diferencia entre los valores máximos y mínimos tanto en volumen, como en horas de soldadura, como en costes. No hay que olvidar que el valor real de los costes estará entre estos dos valores y que esos dos extremos representan configuraciones que nunca se van a producir en la realidad ya que serían el peor y el mejor escenario posible por lo que la diferencia de valores tampoco es excesiva.



Capítulo 5. Verificación de la viabilidad de la aplicación del cutback a tubos de igual diámetro

Contenido

- 5.1. Importancia de la aplicación del cutback.....pág. 98
- 5.2. Análisis de tensiones en los modelos de x-bracing para diferentes ángulos de cutback pág. 102

5.1. Importancia de la aplicación del cutback

En el caso de injertos de igual diámetro es muy habitual la aplicación del llamado ángulo cutback en aquellas zonas en las que el ángulo que forma la pared exterior del tubo injerto con la tangente a la cuerda en ese punto está cerca de 180° . Esto sucede cuando el plano de soldadura se encuentra próximo a los 90° . En esta particular configuración, de injertos de igual diámetro, si se siguiese el criterio que para el resto de injertos la soldadura tendría que llegar hasta la mitad de la cuerda. Esto supone un gasto innecesario y excesivo de material que en los talleres de soldadura solventan redondeando esa zona de soldadura para evitar llegar hasta el centro de la cuerda.



Figura 86: Nudo x-bracing de injertos de igual diámetro en taller con aplicación de cutback (Fuente: Propia)

Según el estudio realizado por la Lloyd's Register [14] es posible la aplicación de un cutback entre 10° y 30° para injertos de igual diámetro, sin provocar tensiones excesivas.

Gracias al método 3D que se ha explicado anteriormente ha sido posible modelizar uno de los nudos en forma de X de la jacket, y aplicarle al mismo análisis de esfuerzos. En principio se ha escogido el nudo inferior de la misma, que es el que se encuentra más solicitado.

Se va a probar si ese cutback que se define en el estudio que se ha comentado antes, que se encuentra entre 10° y 30° no produce concentraciones excesivas de tensiones e incluso se probará a aumentar el ángulo cutback hasta 40° para determinar si es posible ahorrar un mayor volumen de soldadura. Hay que tener en cuenta que para el análisis a tensión última se aplica un factor de seguridad de 1,5.

Se muestran a continuación los modelos de SolidWorks que conforman la gama de posibles soluciones al realizar la soldadura:

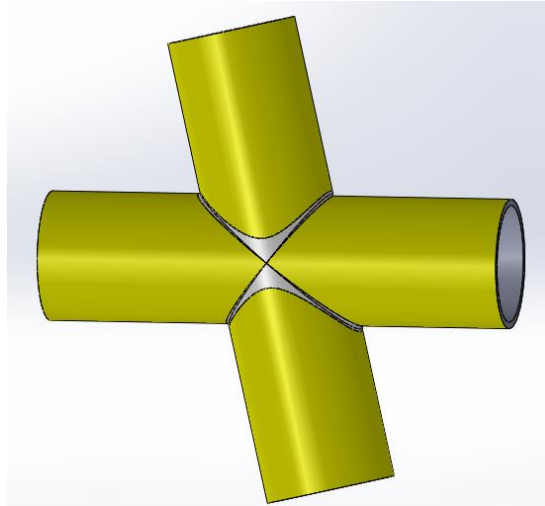


Figura 87: Modelo de nudo x-bracing sin cutback (Fuente: Propia)

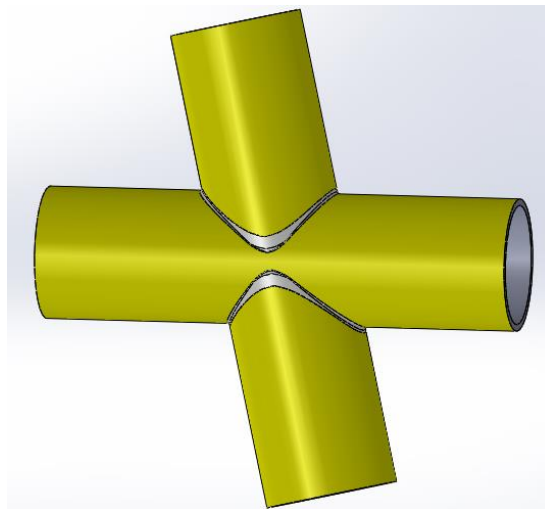


Figura 88: Modelo de nudo x-bracing con cutback = 10° (Fuente: Propia)

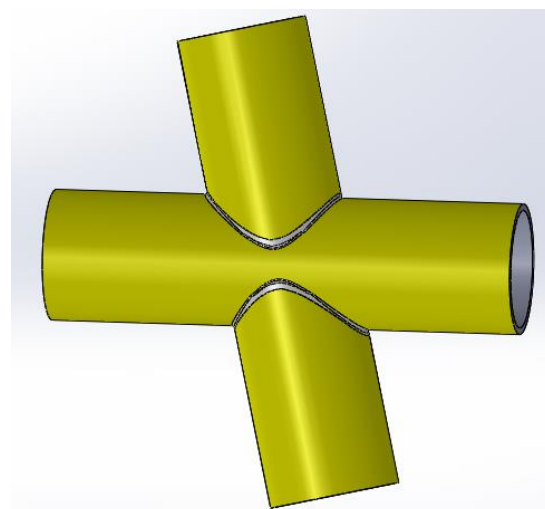


Figura 89: Modelo de nudo x-bracing con cutback = 30° (Fuente: Propia)

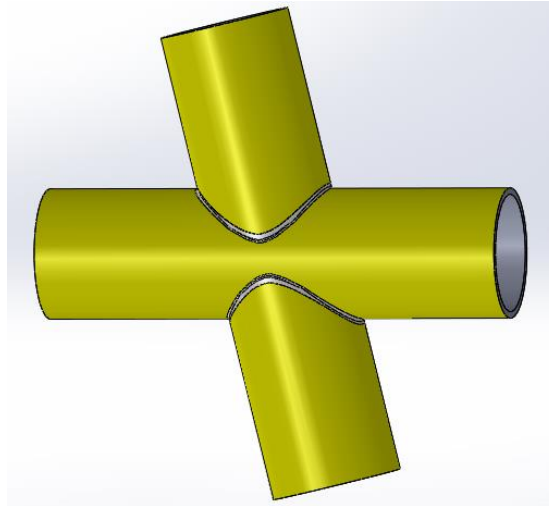


Figura 90: Modelo de x-bracing con cutback = 40° (Fuente: Propia)

Es importante de cara al estudio, señalar que en los modelos SolidWorks que se presentan en las figuras anteriores se ha conseguido aislar la soldadura, de modo que el número de sólidos totales en el x-bracing es de 5: cuerda, brazo superior, soldadura superior, brazo inferior y soldadura inferior. Con esto se consigue aplicar a la soldadura un límite de elasticidad diferente al del resto de la pieza, como sucede en la realidad. Además una vez hecho el estudio puede saberse cuál es el punto de la soldadura con mayor valor de tensión.

Las dimensiones del nudo y los parámetros significativos de la soldadura se presentan a continuación:

Diámetro del tubo injerto (D_b) = 508 mm

Espesor del tubo injerto (t_b) = 19,1 mm

Diámetro de la cuerda (D_c) = 508 mm

Espesor de la cuerda (t_c) = 25,4 mm

Ángulo de inclinación del injerto (θ) = 77,11°

Ángulo de chaflán de la soldadura (β_s) = 45°

GAP entre tubulares (h_s) = 3

Radio del reborde de soldadura (r_{min}) = 19,1 mm

Antes de realizar el estudio es necesario comentar cuáles son las ventajas de aplicar el ángulo cutback a una soldadura. Principalmente la ventaja radica en que se disminuye el volumen de material utilizado en la soldadura, de modo que así mismo también se disminuye el número de horas de soldadura y el coste de la misma.



Se presenta a continuación el volumen de soldadura del nudo x - bracing en función de la configuración del cutback. Los datos fueron obtenidos de los modelos que se han presentado anteriormente.

sin cutback	1033,19 cm ³
cutback = 10º	1027,53 cm ³
cutback = 30º	950,81 cm ³
cutback = 40º	925,34 cm ³

Analizando los datos anteriores se puede comprobar que existe una diferencia máxima entre el volumen necesario para fabricar un nudo sin cutback y otro con un cutback de 40º de 108 cm³, o en porcentaje, un 11,65% menos de volumen en el segundo caso que en el primero. Esto, en costes, supone una diferencia de 500 € por nudo. A priori puede no parecer excesiva pero si se tiene en cuenta que en una jacket de cuatro patas suele haber como mínimo tres nudos de este tipo por cara el valor total del ahorro asciende a 6000 €. Si además, en la actualidad estas estructuras se comienzan a fabricar en serie, puede llegarse a obtener un ahorro importante, en torno a 90000 €, en caso de fabricar por ejemplo 20 jackets.

Existen otros tipos de diseños que contienen un mayor número de nudos en X, lo que incrementa el volumen de soldadura ahorrado. El caso más extremo es el de construir una jacket de 6 patas, en las que todos los tubos son iguales y de un tamaño comercial. En esa situación el ahorro conseguido por el cutback se dispararía.

Hay que advertir no obstante que para dar por buenas estas cifras es necesario llevar a cabo un análisis a tensión última del nudo de la jacket.

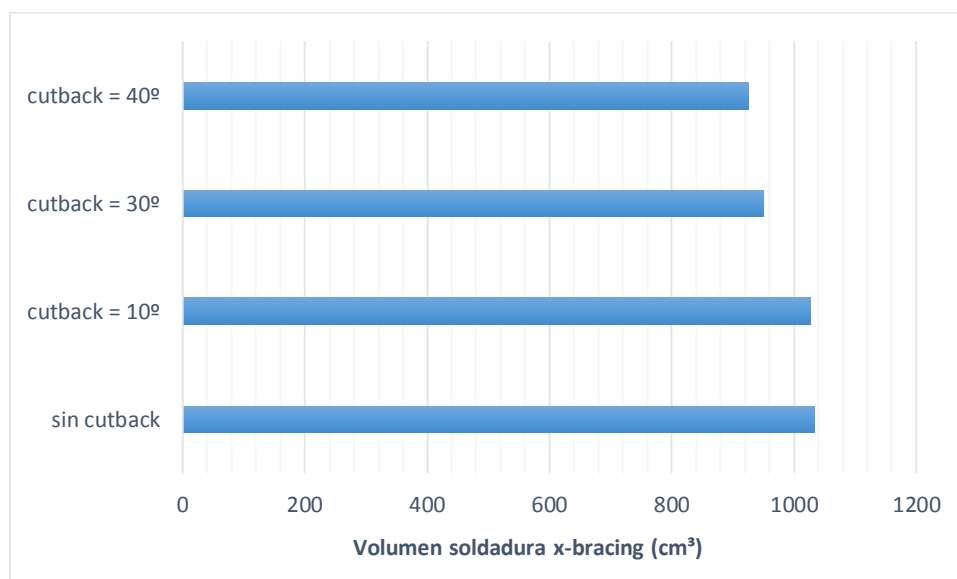


Figura 92: Gráfica del volumen de soldadura empleado en cada tipo de nudo (Fuente: Propia)

5.2. Análisis de tensiones en los modelos de x-bracing para diferentes ángulos de cutback

Se va a realizar el análisis de los 3 modelos a los que se les aplica un ángulo de cutback. Las fuerzas y los momentos con los que se va a ensayar dichos modelos se calculan a partir de un modelo de jacket completa que contiene, en particular, el nudo a analizar. La forma de obtener dichas cargas sobre el nudo es sometiendo a la estructura a unas fuerzas determinadas (provocadas por el giro de las hélices del aerogenerador entre otras cosas) y aislando el nudo particular para ver que fuerzas actúan sobre él.

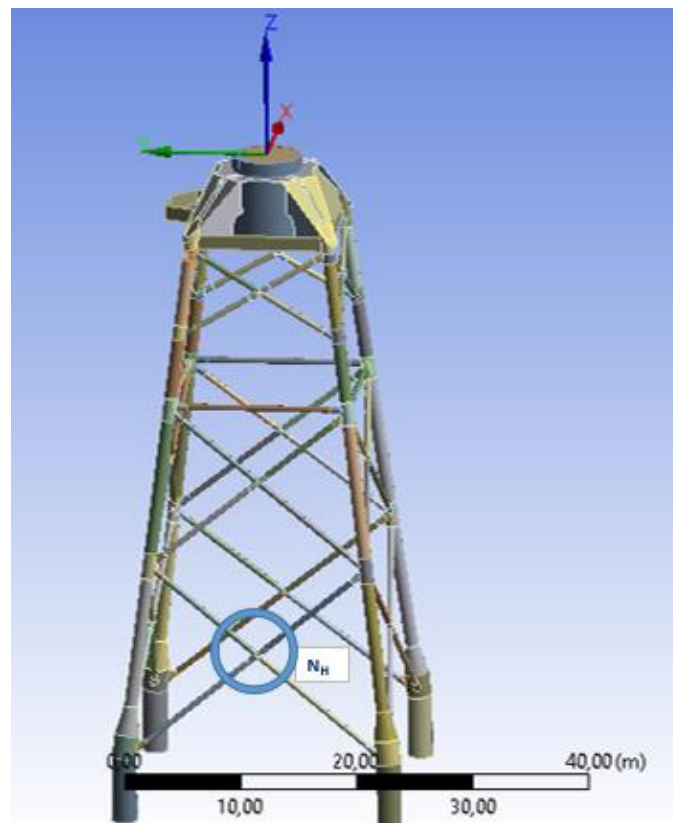


Figura 91: Modelo de jacket en ANSYS (Fuente: GII)

Las fuerzas que actúan sobre la jacket en este caso, concretamente en la parte superior de la misma, la transition piece, son adecuadas para estudiar el caso de tensión última:

Tabla 15: Fuerzas y momentos que actúan sobre la jacket

Fuerzas aplicadas	Magnitud	Unidades
Fx	1,5372E+06	N
My	1,2899E+08	N m
Mz	1,2274E+07	N m
g	9,81	m s ⁻²
Torre y Turbina	-7,80E+06	N

Para que el programa devuelva las fuerzas es necesario establecer un determinado sistema de coordenadas en el nudo en particular.

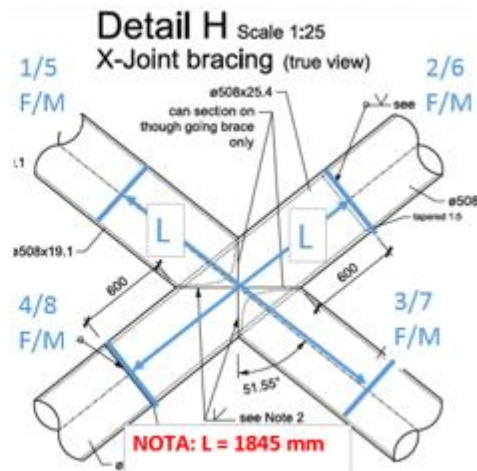
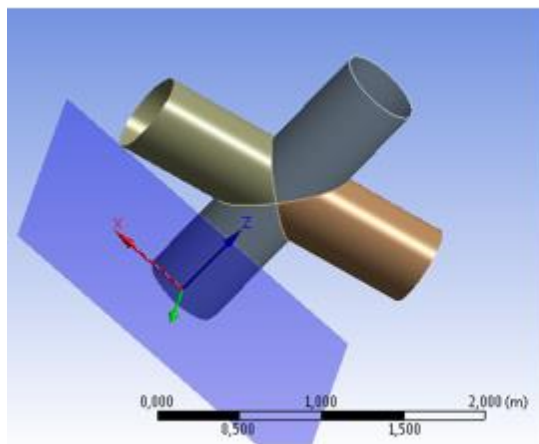


Figura 92: Detalles del nudo para situar las fuerzas que actúan sobre él (Fuente: GII)

Las fuerzas y los momentos que actúan sobre el nudo, con respecto al sistema de coordenadas elegidas, son los siguientes:

Tabla 16: Fuerzas y momentos que actúan sobre el nudo

Fuerzas	Valor	Unidad	Momentos	Valor	Unidad
1F _x	-103971,762	N	5M _x	2486,28064	N m
1F _y	939,161016	N	5M _y	-29799,411	N m
1F _z	8527,22688	N	5M _z	5791,15634	N m
2F _x	13162,121	N	6M _x	15437,5346	N m
2F _y	-1702,26548	N	6M _y	44968,5817	N m
2F _z	-160421,621	N	6M _z	1716,7542	N m
3F _x	-132590,053	N	7M _x	8140,30036	N m
3F _y	2674,5971	N	7M _y	-43083,0874	N m
3F _z	39627,6717	N	7M _z	20386,3203	N m
4F _x	-363,667787	N	8M _x	-51,2580686	N m
4F _y	-58,1845631	N	8M _y	295,977915	N m
4F _z	-291,390061	N	8M _z	4,86949526	N m

Estas fuerzas se utilizarán para calcular el estado de tensión de los tres modelos elegidos.

Cutback = 10°

Este es el cutback mínimo que se aplica según el estudio considerado [13]. Para realizar el análisis primeramente se define un sistema de ejes en el modelo coincidente con el que se había definido previamente en el Ansys. A partir de ahí se van definiendo todas las fuerzas y momentos que actúan sobre el nudo. Esas cargas se aplicarán en las superficies en las que la pieza se une con el resto de la jacket. Una vez aplicadas las fuerzas se elige el material del que está compuesto cada sólido. En este caso para los brazos y para la cuerda se utiliza acero laminado en fría con un límite de elasticidad de

3,5 MPa. En el caso de las soldaduras se utiliza acero AISI 1020 normalizado con un límite elástico de 4,6 MPa. Posteriormente se malla la pieza con elementos triangulares.

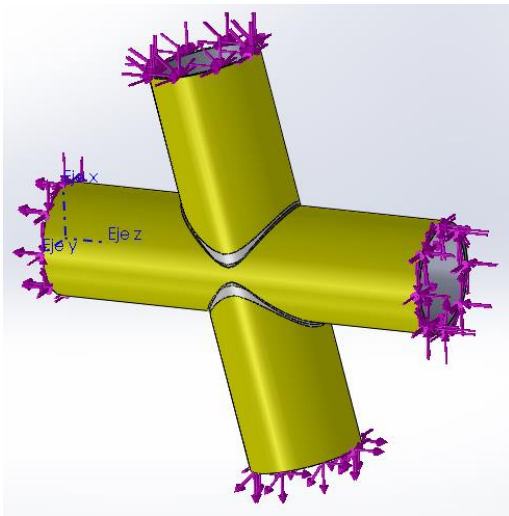


Figura 93: Cargas en el modelo (Fuente: Propia)

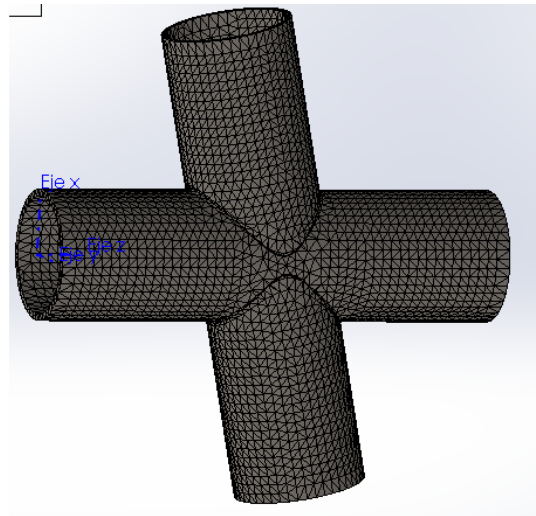


Figura 94: Mallado del nudo (Fuente: Propia)

Para el cálculo del análisis se aplica la configuración de “Cálculo de fuerzas del cuerpo libre” ya que al encontrarse las fuerzas en equilibrio no es necesario poner restricciones. Se ejecuta el análisis y los resultados son los siguientes:

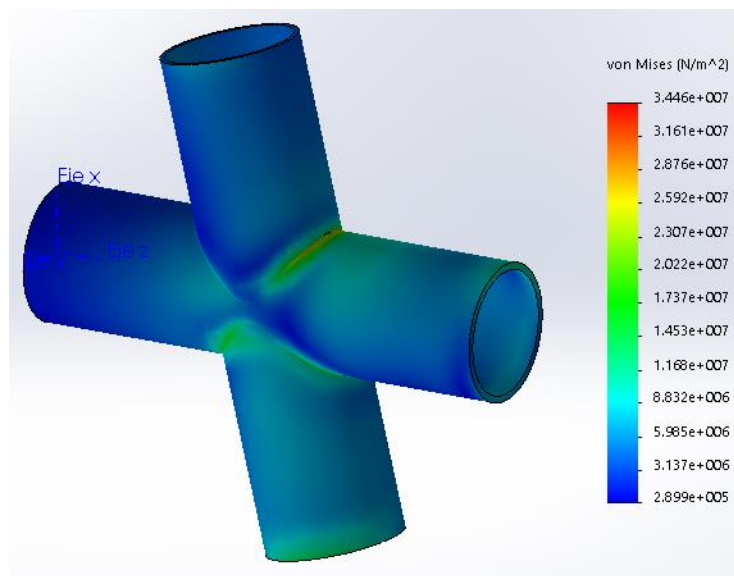


Figura 95: Tensiones resultantes en el nudo

Como se puede observar en la figura anterior, que representa la concentración de tensiones en la pieza, la tensión se acumula especialmente en la soldadura pero en unos valores que no suponen ningún problema respecto a la rotura de la pieza. Además la mayor concentración de tensiones se produce en zonas de la soldadura que están alejadas de la zona de aplicación del cutback. Queda demostrado por tanto que aplicar un cutback de 10^9 no afecta negativamente a la pieza. A continuación se puede ver la

imagen de la deformada del x-bracing que da una idea de cómo actúan las fuerzas en el modelo

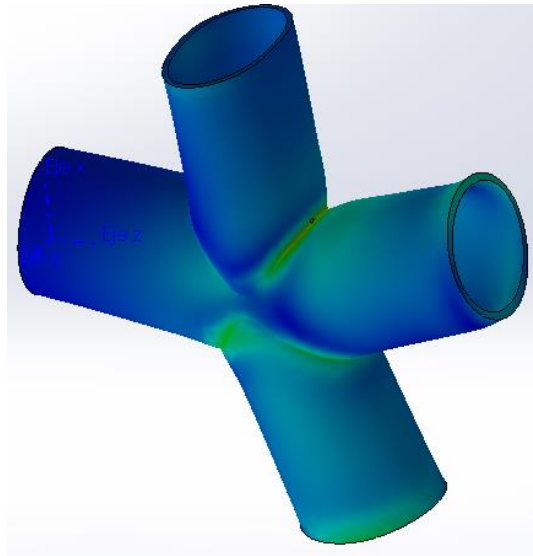


Figura 96: Deformada resultante (Fuente: Propia)

Se muestra a continuación la soldadura aislada del resto de sólidos y sus valores máximo y mínimo indicados. El valor máximo se encuentra por debajo del límite de seguridad.

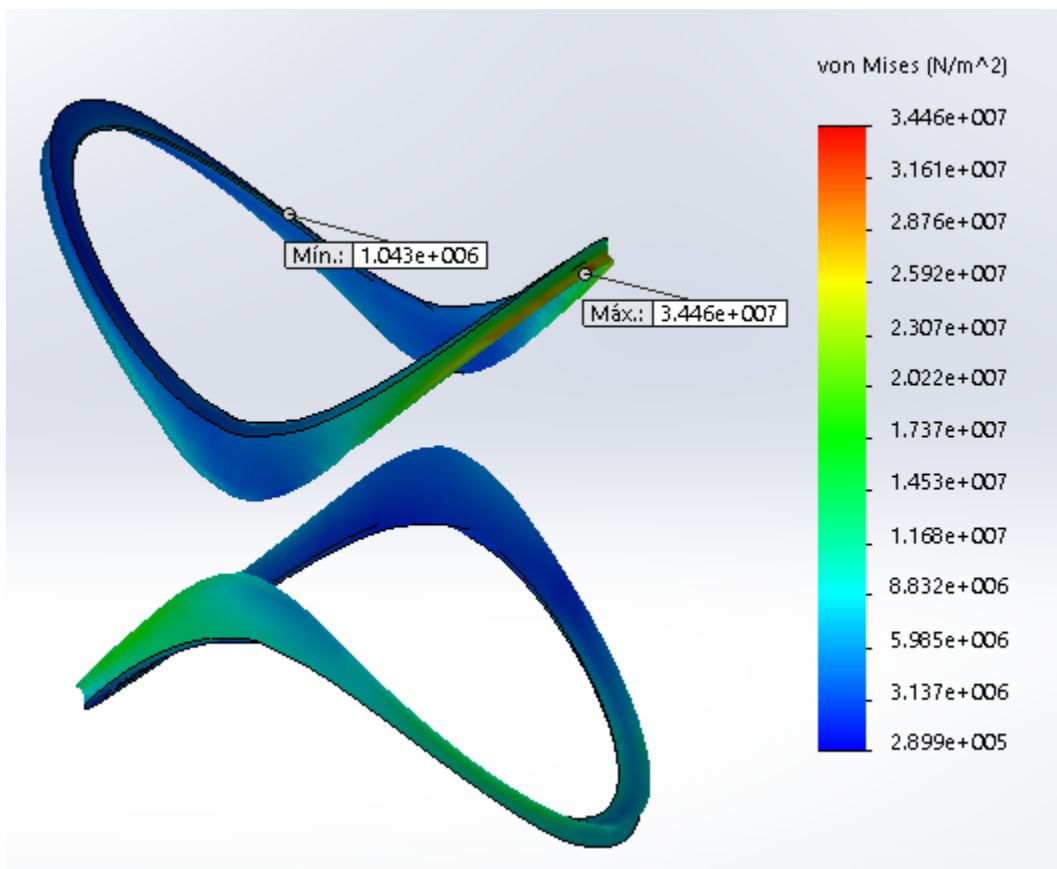


Figura 97: Valores máximo y mínimo de las soldaduras del nudo x-bracing (Fuente: Propia)

Por último también se analiza si en función de las cargas aplicadas es posible que la soldadura vaya a sufrir fatiga. Para ello se utiliza la herramienta de SolidWorks “Definir trayectoria de fatiga”. El color azul resultante indica que en principio las soldaduras no deberían sufrir fenómenos de fatiga, al menos con las cargas aplicadas. Para comprobar con mayor detalle el tema de fatiga sería necesario realizar un estudio de fatiga completo variando las cargas que se aplican sobre el nudo y definiendo el número de ciclos que debe resistir la pieza, así como la configuración de tensiones.

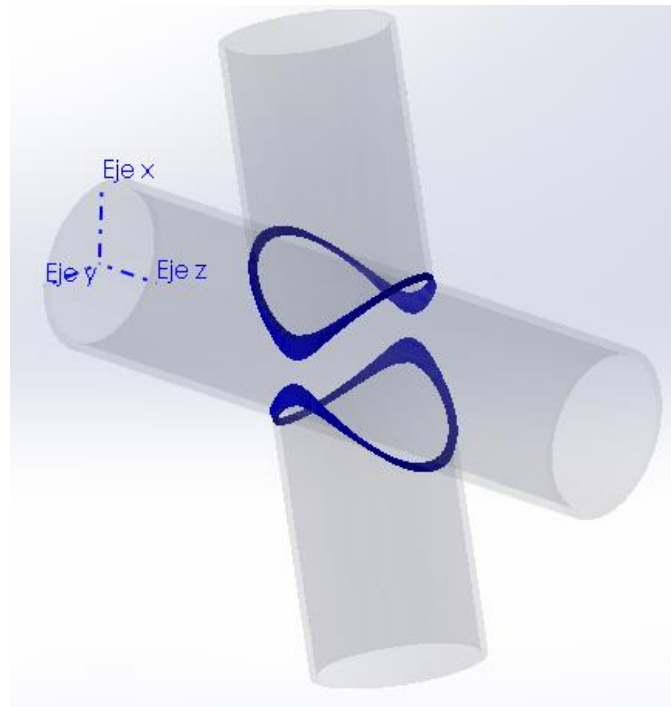


Figura 98: Trazado de fatiga (Fuente: Propia)

Cutback = 30°

En este caso se aplica a la soldadura el máximo ángulo de cutback que establece el estudio de Lloyd's Register. Se aplican las mismas cargas que en el caso anterior, se mallan los sólidos y se ejecuta el análisis. El resultado es una disminución de la tensión máxima pero una mayor zona de soldadura pasa a estar en zonas de tensiones elevadas. Tampoco en este caso se observan posibles fallos del material y el la máxima tensión impuesta por el límite elástico y el coeficiente de seguridad no se ve superado.

En el caso de fatiga se vuelve a realizar un trazado en el cual vuelve a ponerse de manifiesto que las cargas aplicadas no producen en principio problemas de fatiga.

Puede verificarse por tanto que el cutback de 30° puede aplicarse sin problemas.

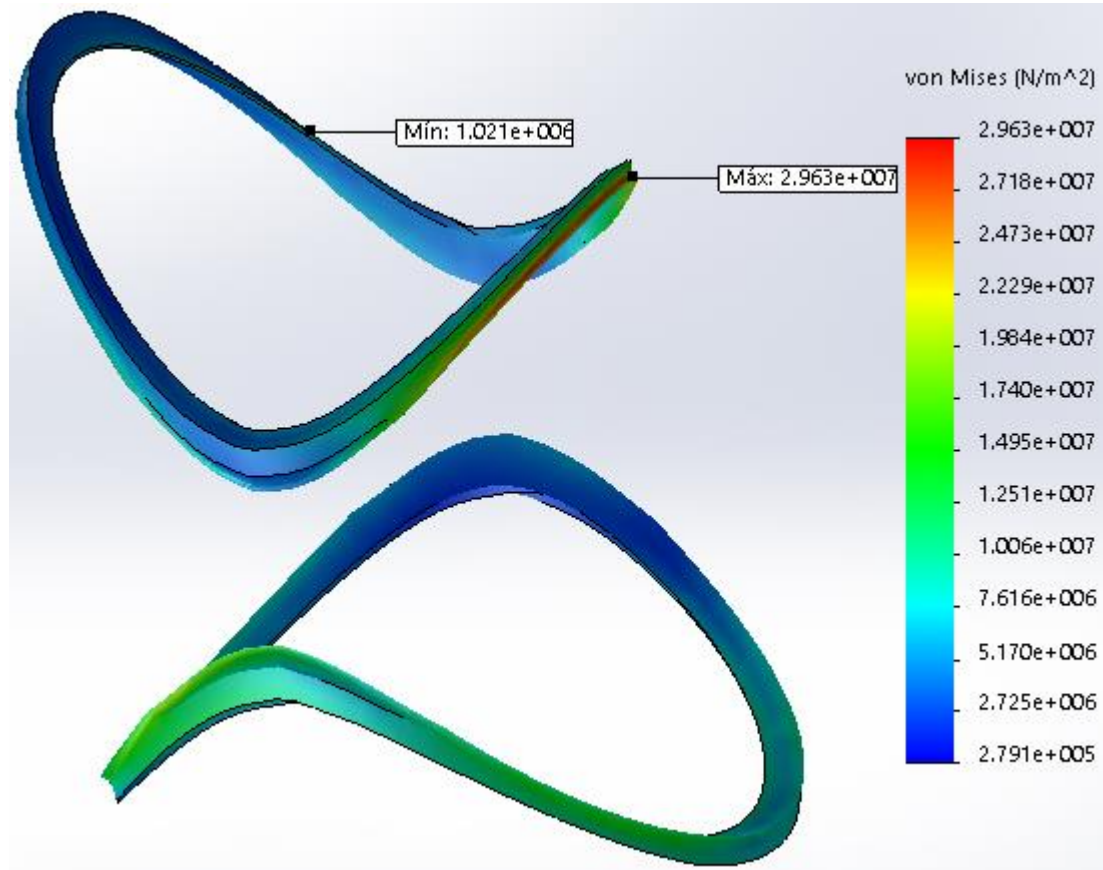


Figura 99: Valores de tensión máximo y mínimo para la soldadura con cutback = 30° (Fuente: Propia)

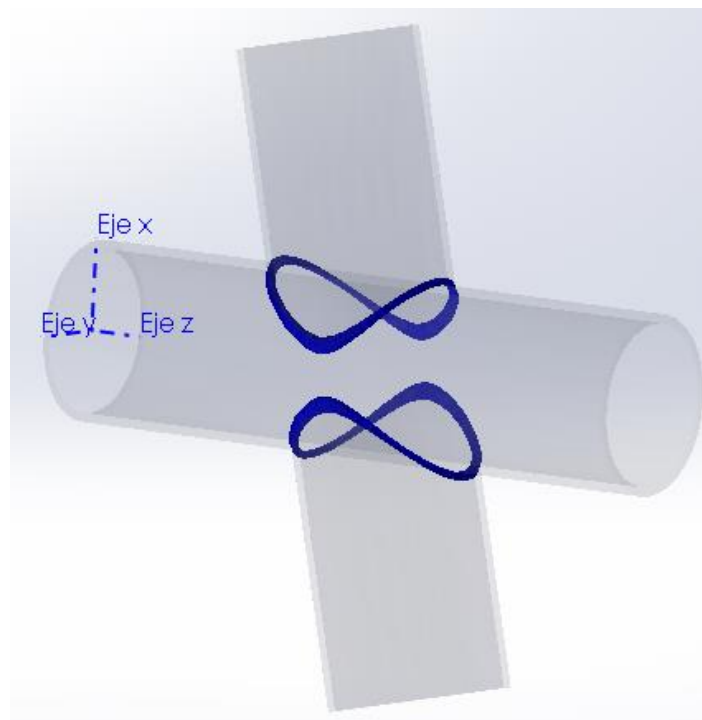


Figura 100: Resultado de la comprobación de fatiga (Fuente: Propia)

Cutback = 40°

Por último en el caso del cutback que no viene definido en la norma tampoco se produce ningún problema a tensión última ni a fatiga por lo que podría utilizarse sin mayor problema. Por ello se puede concluir que también sería posible aplicar este cutback.

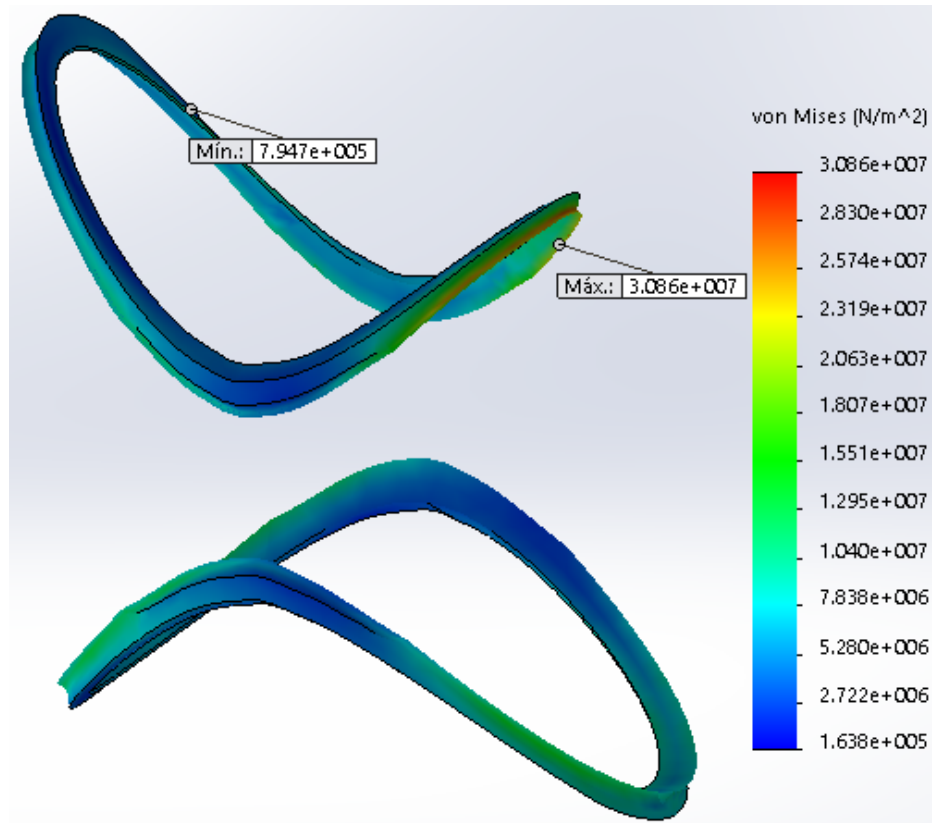


Figura 101: Tensiones máxima y mínima para un cutback de 40° (Fuente: Propia)

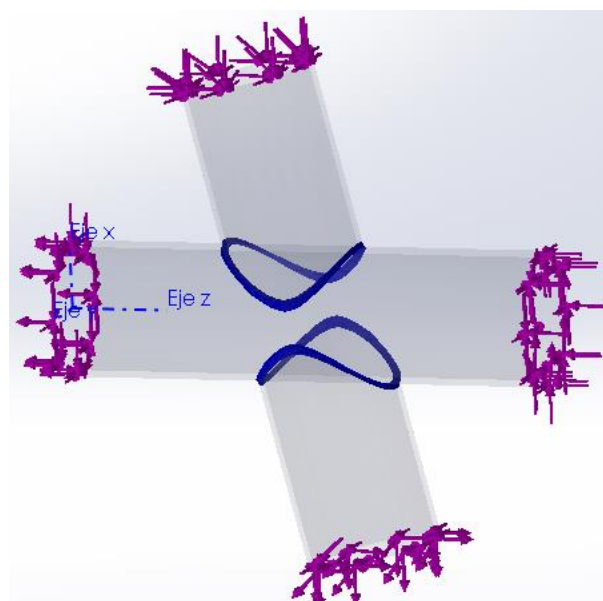


Figura 102: Trazado de comprobación de fatiga (Fuente: Propia)



Capítulo 6. Simulación del proceso constructivo de una jacket

Contenido

- 6.1. Introducción.....pág. 110
- 6.2. Modelo de simulación ExtendSim..... pág. 119
- 6.3. Resultados de la simulación..... pág. 122



6.1. Introducción

En este proyecto aparte del cálculo técnico de la soldadura necesaria para la fabricación de una jacket se ha decidido mostrar una posible utilización de la herramienta desarrollada. A partir del volumen de soldadura es posible diseñar el proceso productivo de construcción de una jacket y por tanto reestructurar una planta industrial que se dedique a la fabricación de estas subestructuras.

Para una empresa que se dedique a estos temas es de vital importancia conocer el tiempo que tardará en llevar a cabo toda esa soldadura y por tanto el tiempo que tardará en fabricar una jacket. Este tipo de consideraciones es muy útil para establecer una programación de tareas adecuada y de esta manera cumplir los plazos de entrega. La mejor forma de estimar los tiempos de fabricación es mediante un software de simulación, como ExtendSim, donde se vaya caracterizando todo el proceso. Es ahí donde entra en juego la necesidad de saber el tiempo necesario en realizar la soldadura, ya que se trata de la principal operación del proceso. Con la herramienta se han podido calcular todos esos tiempos de soldadura. Aparte de eso se han utilizado en todo momento datos reales sobre el proceso intentando así acercar la simulación a la realidad en mayor medida.

El caso que se va a tratar es el típico de una empresa que desea saber si va a poder cumplir el siguiente encargo de jackets que le ha hecho un cliente o si por el contrario necesita ampliar sus instalaciones:

- 20 Jackets en 1,5 años

Además quiere saber también cuántas estaciones de soldadura debe poner en sus talleres para conseguir una entrega a tiempo con el menor coste posible.

Antes de nada es necesario describir cual es el método de producción que va a seguir la empresa para la construcción de las jackets. Al tratarse de estructuras de gran envergadura es necesario producirlas en partes más pequeñas para luego ir ensamblando esas partes hasta obtener la pieza entera. En una jacket se distinguen tres bloques fundamentales, de manejo más sencillo:

Jacket Lower Block (JLB): Se trata de la parte más grande de las tres. Está situada en la parte inferior de la jacket y con la estructura en funcionamiento se encontraría totalmente sumergida.

Jacket Upper Block (JUB): Parte superior de la estructura de celosía, que se encuentra justo por encima del agua.

Transition Piece (TP): La transition piece es la pieza a la que se conecta el aerogenerador y en la que los operarios realizan las labores de mantenimiento.

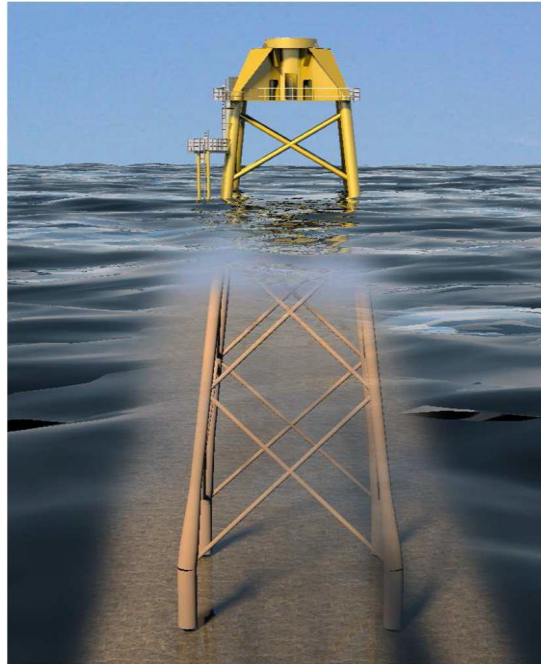


Figura 103: Subestructura jacket colocada en posición de funcionamiento (Fuente: EWEA)

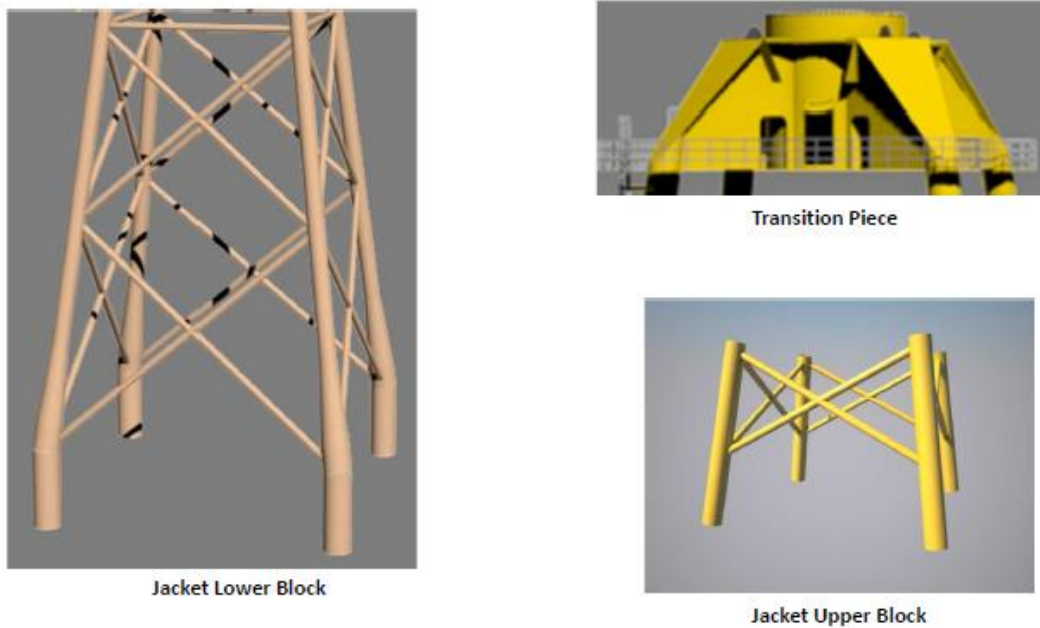


Figura 104: Bloques fundamentales de una jacket (Fuente: EWEA)

Para la empresa en cuestión, que se trata en este proyecto, la transition piece llegaría totalmente fabricada y simplemente habría que ensamblarla al resto de la estructura. La JLB y la JUB se fabrican en sus talleres aunque únicamente se llevan a cabo las soldaduras manuales, lo que reduce el tiempo de procesado.

La secuencia de montaje sería la siguiente:

- Por un lado se hacen los X-bracings, que son las cruces que se encuentran en el centro de las caras de la estructura.
- Por otro lado se hacen los Rows que son las caras de la estructura y que están compuestas por los X-bracings y las patas.
- Posteriormente se unen los x-bracings con los Rows y forman el bloque fundamental JUB o JLB.

Hay que señalar que en el caso de los JUB se necesitan dos Rows y dos X-bracings mientras que en caso de la JLB se necesitan dos Rows (cada uno compuesto por dos X-bracings) y cuatro X-bracings.

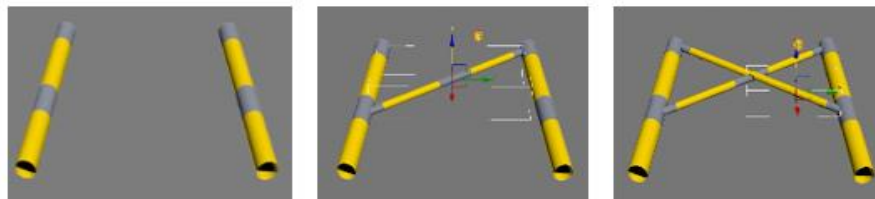


Figura 105: Proceso de formación de un Row de la JUB (Fuente: www.cener.es)

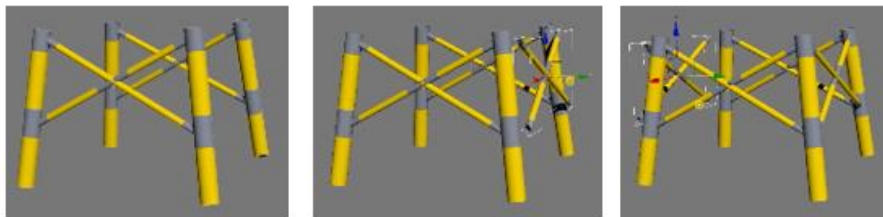


Figura 106: Proceso de formación de la JUB (Fuente www.cener.es)

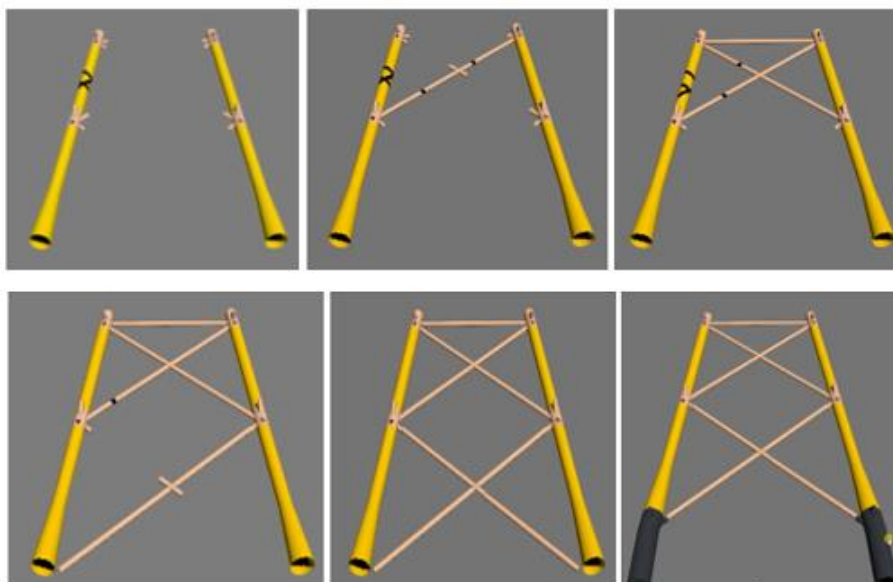


Figura 107: Proceso de formación de un Row de la JLB (Fuente: www.cener.es)



Figura 108: Proceso de formación de la JLB (Fuente: www.cener.es)

Estos bloques se fabricarían tumbados para posteriormente verticalizarlos mediante una grúa puente, como se puede observar en la figura:

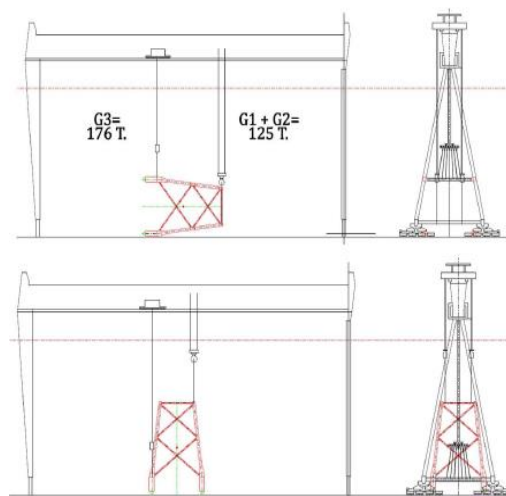


Figura 109: Proceso de verticalización de JLB (Fuente: www.cener.es)

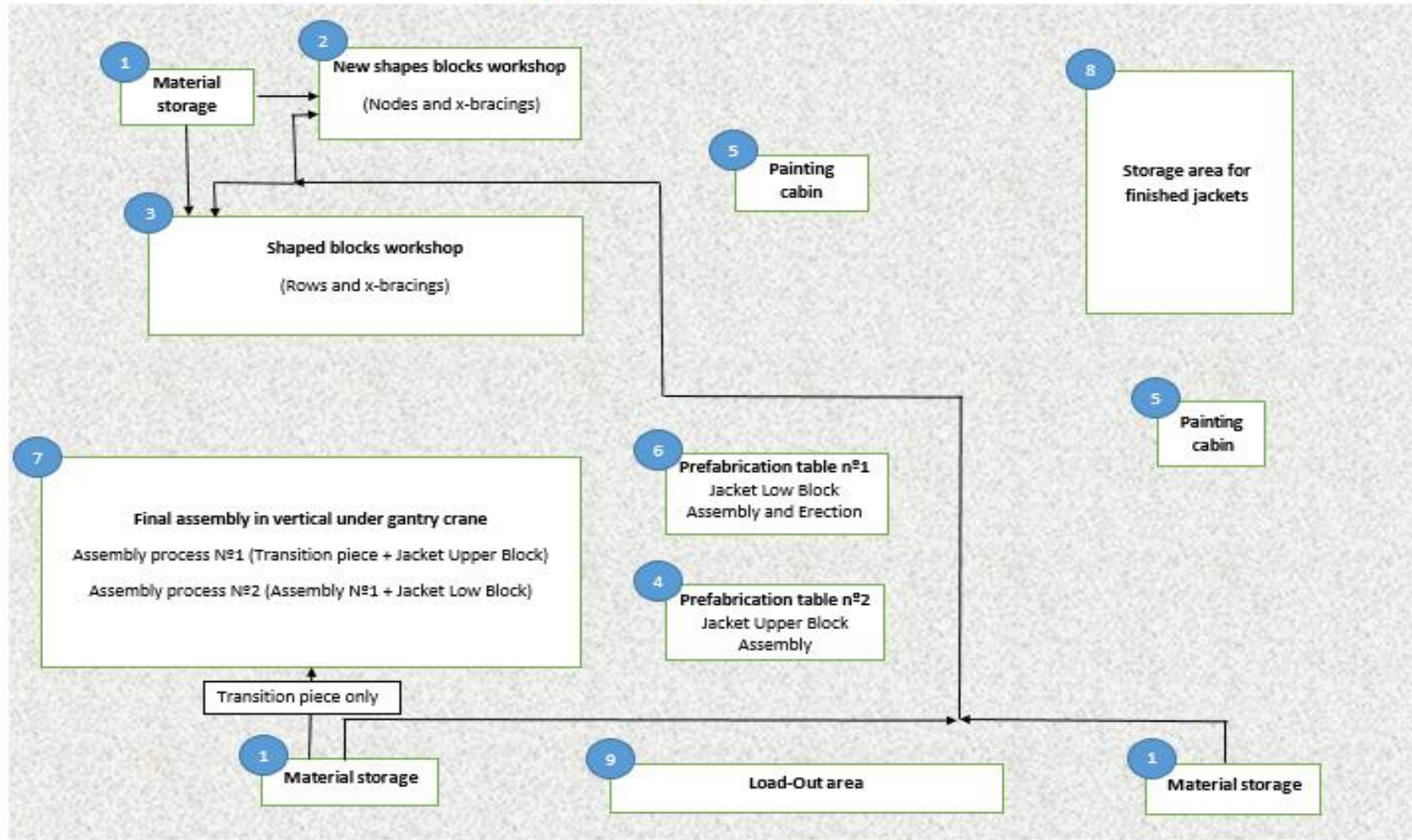


Figura 110: Proceso de ensamblaje final de la jacket (Fuente: www.cener.es)

A continuación en los siguientes esquemas se explica el flujo de material a lo largo del proceso que posteriormente servirán para definir el modelo ExtendSim de manera correcta

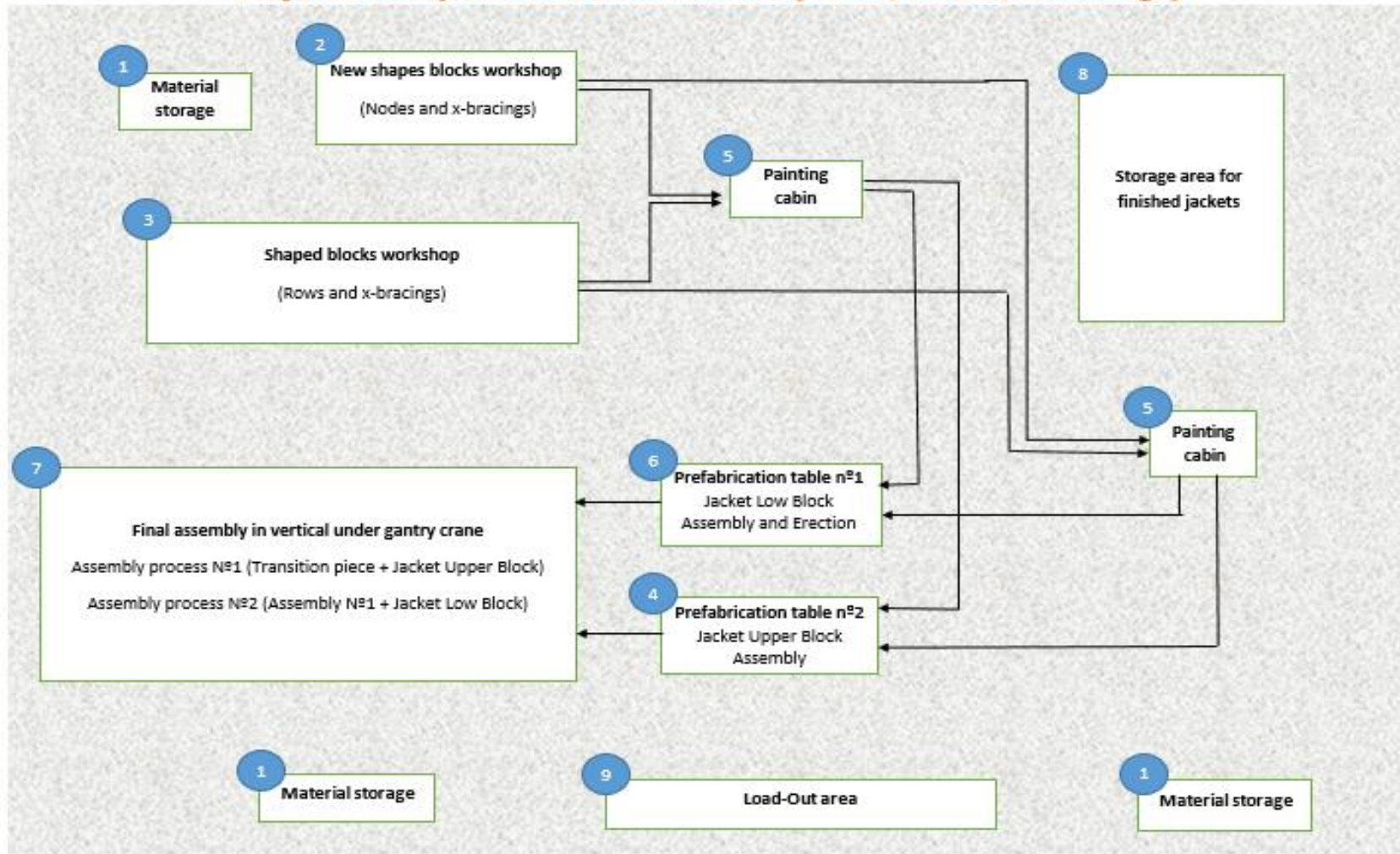


Flujo de material sin procesar



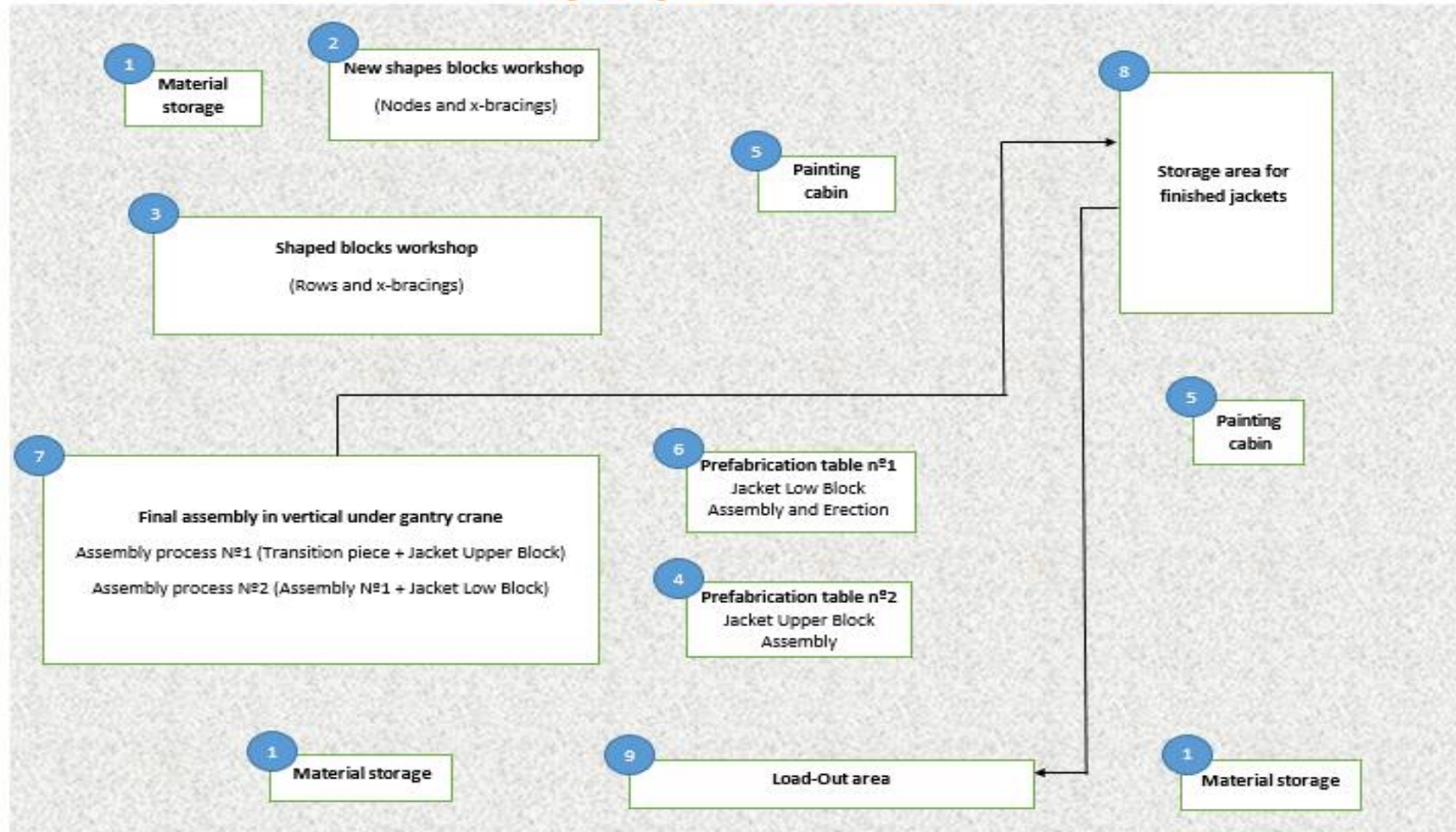


Flujo de componentes intermedios (Rows, nodes, xbracings)



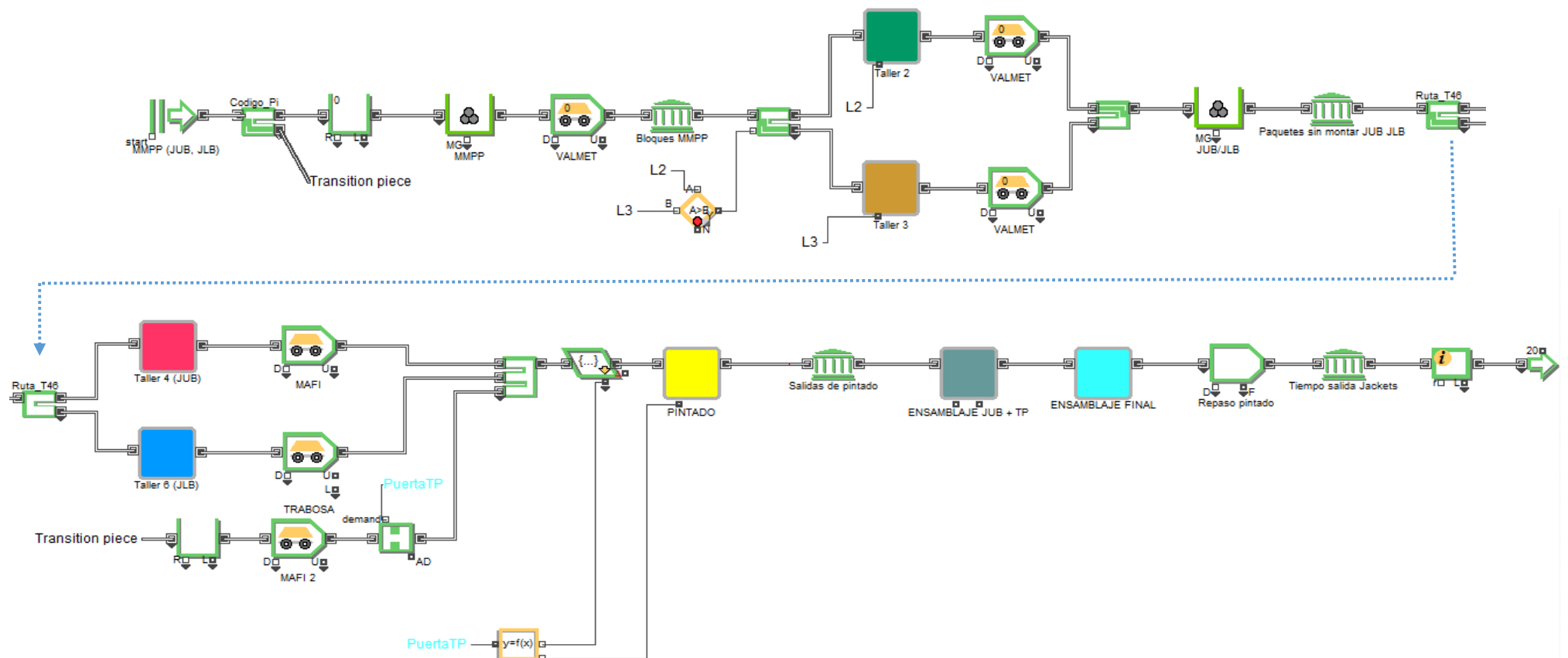


Flujo de jacket construidas





6.2. Modelo de simulación ExtendSim





Se va a dividir el modelo en tres partes, por comodidad, para explicarlo detalladamente. La primera parte considerada es la siguiente:

1º Parte del modelo

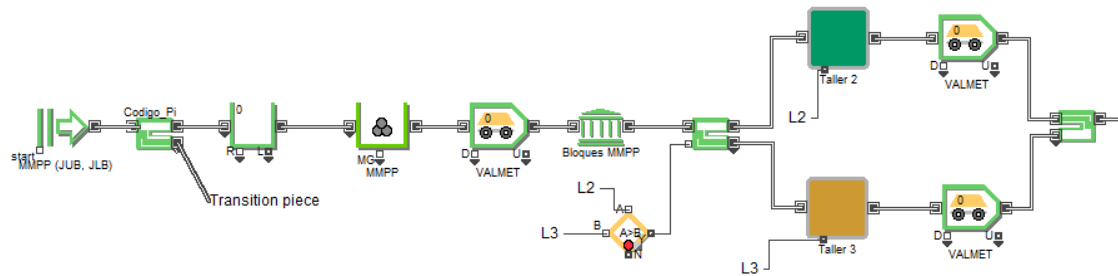


Figura 111: 1º parte del modelo (Fuente: Propia)

El primer bloque del modelo es el Create, que simula la entrada de piezas. La forma de crearlas en este caso es por medio de una programación (“by schedule”) donde además del tiempo en el que llegan las piezas al modelo se les asigna toda una serie de atributos necesarios para controlar su camino a lo largo del modelo así como para establecer un tiempo de procesamiento en determinadas actividades. Es necesario señalar que todas las piezas se crean en un tiempo 0. La razón de esto radica en que se hace la suposición de que nunca hay desabastecimiento y es el propio proceso el que se encarga de regular el flujo de piezas en función de su capacidad. Posteriormente en el bloque Select Item Out se separa la “transition piece” (TP) del resto de piezas ya que de acuerdo a la realidad esta pieza viene construida por otra empresa y no es necesario realizar en ella operaciones de soldado básicas (talleres 2, 3, 4 y 6) por lo que pasa directamente al pintado. El enrutamiento se hace a través del atributo “Código pieza” que permite diferenciar de forma inequívoca cada tipo de pieza en el proceso. Así por ejemplo, la TP es la pieza número 13, la última del código, por lo que el resto de piezas, del 1 al 12 salen por el output 0 mientras que la TP sale por el output 1.

Los ítems enrutados por el camino principal van a parar a una cola que actúa a modo de almacén y va soltando las piezas en un orden determinado (atributo “Orden_Salida”). Este orden de salida, como ya se ha explicado anteriormente, refleja una determinada estrategia de fabricación: Primero salen los x-bracings de la JUB, luego los Rows de la JUB, a continuación los x-bracings de la JLB y por último los Rows de la JLB. Después de la cola los ítems son recogidos por el Queue Matching, bloque clave del modelo, que actúa como ensamblador múltiple. Su función es la de agrupar los ítems o piezas en diferentes colas, en función de un código de ensamblaje (atributo “cod_ensamblaje”) y soltar las piezas ensambladas cuando se cumplen los requerimientos. En este caso el requerimiento es el número de piezas necesarias para realizar el ensamblaje, que se

indica con el atributo “Num_T2”. Hay que indicar que del Queue Matching sale un solo item por cada grupo formado por tanto como varios bloques Batch en paralelo.

A continuación tras formarse los grupos de piezas en el Queue Matching, éstas se transportan hacia los talleres 2 y 3 por medio de dos transportes. El enrutamiento hacia los talleres se realiza por mínima cola gracias al bloque Decision que lee la longitud de las colas en el interior de los talleres. Los talleres 2 y 3 son exactamente iguales y la empresa los utiliza para realizar el soldado de las piezas bases, es decir los tubos. De esos talleres salen convertidos ya en x-bracings y en rows. No son talleres de excesiva complejidad, cuentan con dos operaciones básicas como son el armado más el soldado y el control de calidad.

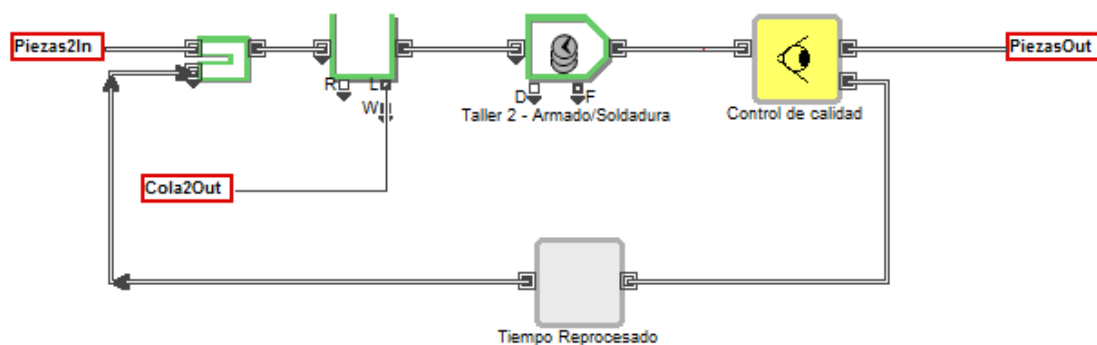


Figura 112: Interior del bloque jerárquico taller 2 (Fuente: Propia)

El control de calidad, como se puede ver en la figura anterior, está formado por una inspección visual, realizada in situ por los operarios que han realizado la soldadura, luego una espera para la fijación correcta de la soldadura al sustrato y por último un control por partículas magnéticas y ultrasonidos para detectar posibles grietas internas. Hay que tener en cuenta que el control de calidad será diferente en función de las piezas que se hayan ensamblado en un mismo componente porque ello supone más soldadura a revisar. Concretamente se estima que la inspección visual de cada soldadura dura media hora y el control por partículas magnéticas el doble, una hora. Por ello para calcular el tiempo que debe pasar el ítem en este bloque jerárquico se utiliza el atributo “Num_Piezas” que indica cuantas piezas conforman el ensamblaje. Ese valor, que es leído mediante un bloque “Set”, se procesa en un bloque Equation para obtener el valor correcto de tiempo.

Si hay una no conformidad en un ítem es necesario reprocesarlo, pero antes es necesario cambiar el valor del tiempo de actividad de soldado la segunda vez ya que será menor porque sólo hay que reprocesar la soldadura incorrecta.

2º Parte del modelo

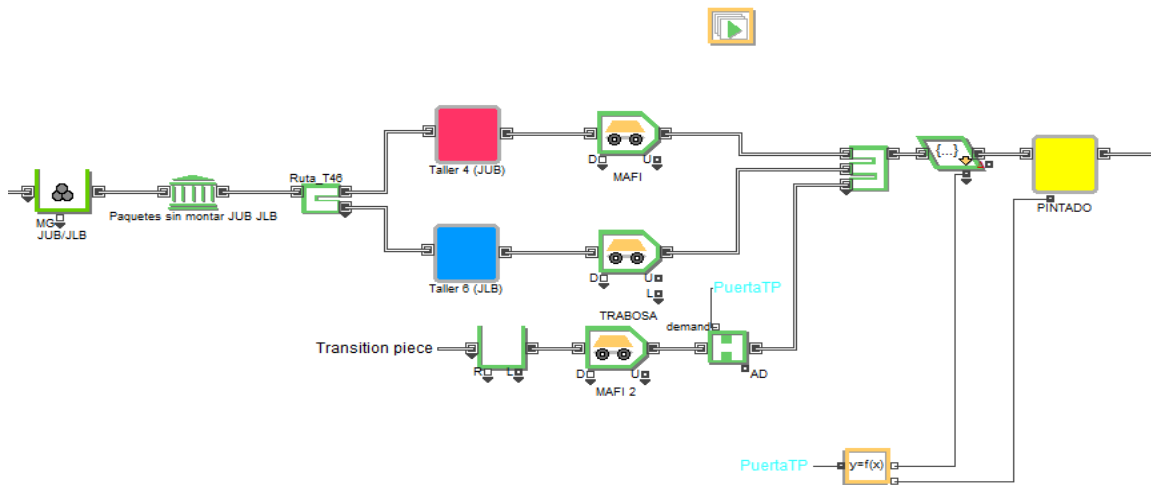


Figura 113: 2º parte del modelo (Fuente: Propia)

En esta segunda parte del modelo llegan los ítems procedentes de los talleres 2 y 3 y van a parar primeramente al queue Matching se juntan de nuevo para formar nuevos grupos más grandes. De hecho de este bloque saldrán ya las partes fundamentales de una jacket, es decir, la JLB y la JUB. Una vez se han ensamblado los nuevos grupos se mandan al taller 4 o al 6. En este caso el enrutamiento ya no se hace por mínima cola sino por atributo. Esto se debe a que en la realidad estos dos talleres están específicamente diseñados para procesar un tipo de pieza. Al taller 6 irán las JLB y al taller 4 las JUB. Estos bloques son iguales al Taller 2 y al Taller 3 ya que las operaciones son básicamente las mismas y lo único que se modifica son los tiempos de procesamiento, que ya van implícitos en el ítem por medio de un atributo. Como se puede ver en todo en el caso de los talleres 2, 3, 4 y 5 son los bloque Queue Matching los que realmente realizan la soldadura, entendiéndola como un proceso de unión, y el tiempo que se tarda en hacer esa actividad se imputa a posteriori.

En esta parte del modelo, justo antes del pintado se une la transition piece a las otras dos piezas restantes y se transportan con los correspondientes bloques hasta las cabinas de pintado. La entrada de la transition piece al resto del modelo se regula mediante una puerta que evite que inicialmente se cuelen todas las transition piece al proceso de pintado y lo atasquen mientras que los bloques que llegan por el otro camino tienen que esperar hasta el final para pintarse. La puerta se regula mediante una ecuación que la abre cuando no hay ítems dentro del bloque pintado y la cierra cuando comienzan a acumularse allí. El interior del bloque de pintado es el siguiente:

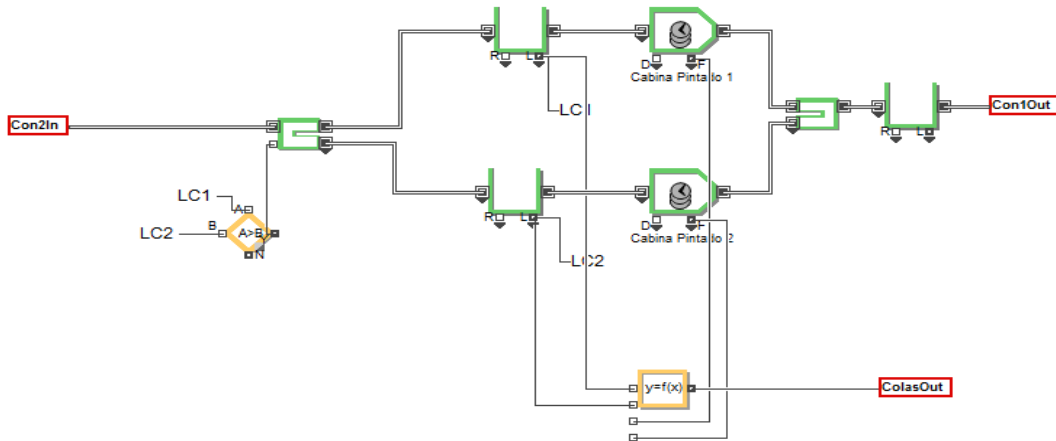


Figura 114: Interior del bloque pintado (Fuente: Propia)

Existen dos cabinas de pintado, que se simulan por medio de dos actividades y el enrutamiento hacia ellas se hace por mínima cola. Los tiempos de pintado de cada pieza se encuentran definidos en el atributo (“tpo_pintado”) que se lee directamente en los activities. El tiempo de pintado es proporcional a las dimensiones de la pieza y en el modelo actual se supone que el tiempo de pintado de la JLB es de 16 días, el tiempo de pintado de la JUB de 7 días y el tiempo de pintado de la transition piece de 10 días.

3º Parte del modelo

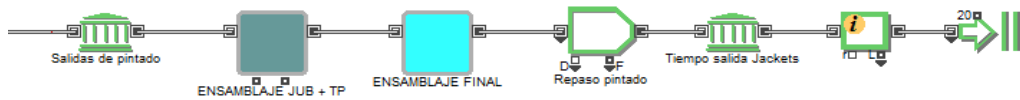


Figura 115: 3º parte del modelo (Fuente: Propia)

Por último, la tercera parte del modelo corresponde a la zona donde se encuentran las grúas pórtico. Primeramente se realiza el ensamblado de la JUB con la TP y posteriormente estas dos se juntan con la JLB. El interior del bloque jerárquico “Ensamblaje JUB+TP” es el siguiente:

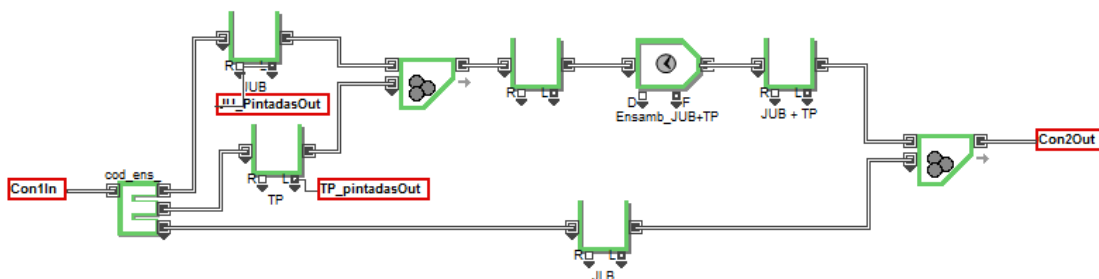


Figura 116: Interior del bloque ensamblaje JUB+TP (Fuente: Propia)



En el select item out las piezas se dividen en función del código de ensamblaje. De ese modo la JUB y la TP van al bloque Batch donde salen convertidos en un solo item y el tiempo que se tarda en realizar este ensamblaje se imputa en el bloque activity siguiente. Posteriormente, al final del bloque, hay otro Batch que junta la JUB+TP con la JLB, en previsión del activity de ensamblaje que aparece posteriormente en el bloque “Ensamblado final”. También antes de dar por terminada la jacket se realiza una operación de repaso del pintado para aquellas zonas que fueron soldadas después de la operación de pintado principal.



6.3. Resultados de la simulación

El objetivo de este apartado era saber si la empresa sobre la que se realiza el análisis podría llevar a cabo o no un encargo de fabricación de jackets. Además de confirmar o rechazar esta proposición del cliente quiere también saber, en caso de que sus instalaciones sean suficientes para llevar a cabo el trabajo, cual es la configuración de estaciones de soldadura y pintado que minimiza el coste permitiendo terminar a tiempo el trabajo. El encargo del cliente es:

- 10 jackets en un año.

Los resultados se obtuvieron mediante el escenario manager que revisa diversas configuraciones posibles y exporta los valores encontrados a un Excel donde se les puede realizar el tratamiento apropiado.

Existen 6 parámetros de variación en el modelo, que son: La capacidad del taller 2, la capacidad del taller 3, la capacidad del taller 4, la capacidad del taller 6, la capacidad de la cabina de pintado 1 y la capacidad de la cabina de pintado 2. El único resultado que se obtiene es el del tiempo de salida de la última jacket que representa la finalización del trabajo.

Para saber además cual es la mejor configuración posible de estaciones de trabajo dentro de aquellas que cumplen el plazo de entrega, se definió la función de costes que se muestra a continuación:

$$\text{Coste} = K_1 \cdot n^{\circ}T2T3 + 3 \cdot K_1 \cdot n^{\circ}T4T6 + 0,25 \cdot K_1 \cdot n^{\circ}TP1TP2 \quad [60]$$

Donde K_1 es un parámetro característico de coste, $n^{\circ}T2T3$ es el número de estaciones de armado y soldadura en los talleres 2 y 3, $n^{\circ}T4T6$ es el número de estaciones de armado y soldadura en los talleres 4 y 6 y $n^{\circ}TP1TP2$ el número de cabinas de pintado.

En el caso actual el parámetro K_1 se igualó a un valor de 20000. Este número es un tanto arbitrario y habría que contrastarlo con datos reales. Sin embargo no tergiversa los resultados obtenidos ya que para otro valor de K_1 la configuración de menor coste seguiría siendo la misma. En caso de variar la importancia relativa de los talleres en el coste final si que podría variar la mejor configuración posible, pero como ya se ha dicho esto habría que contrastarlo con datos reales.

La función de costes implementada es de tipo lineal, como suele ser habitual en el caso de adición o sustracción de unidades de procesado. Obviamente esta función se comporta así siempre y cuando el espacio físico del que disponga la empresa sea suficiente para establecer el número de talleres necesarios. En caso de no ser así, y tener que subcontratar trabajos o ampliar sus instalaciones esta función de costes dejaría de ser válida ya que tendrían que tomarse en consideración otras variables.



El procedimiento seguido para saber si el encargo se podía o no realizar y cuales eran las mejores configuraciones posibles se muestra en el siguiente flujograma:

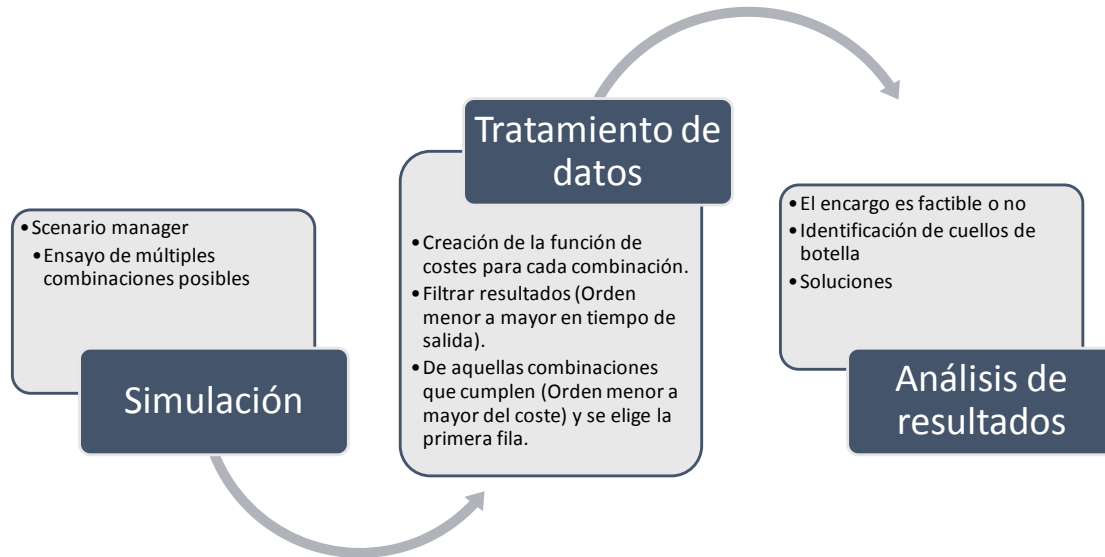


Ilustración 1: Flujograma de procedimiento de obtención de resultados (Fuente: Propia)

Con el objetivo de señalar la importancia del cálculo preciso del volumen de soldadura se han realizado dos tipos de escenarios. Uno con el volumen calculado por medio del método analítico y otro con el volumen calculado mediante el método 3D.

Encargo de 20 jackets en 1,5 años (548 días) (Volumen calculado por método analítico)

El encargo no se puede realizar en las instalaciones de la empresa

La mejor configuración de estaciones de soldadura y cabinas de pintado es:

Cap_ T2	Cap_ T3	Cap_ T4	Cap_ T6	Cap_ TP1	Cap_ TP2	Días finalización	Coste
4	4	2	2	2	2	667	500000

El tiempo necesario para la finalización de los trabajos es de **22 meses y 1 semana.**

Encargo de 20 jackets en 1,5 años (548 días) (Volumen calculado por método 3D)

El encargo no se puede realizar en las instalaciones de la empresa.

La mejor configuración de estaciones de soldadura y cabinas de pintado es:



<i>Cap_ T2</i>	<i>Cap_ T3</i>	<i>Cap_ T4</i>	<i>Cap_ T6</i>	<i>Cap_ TP1</i>	<i>Cap_ TP2</i>	<i>Días finalización</i>	<i>Coste</i>
3	4	1	2	2	1	665	380000

El tiempo necesario para la finalización de los trabajos es de **22 meses y 5 días**.

Puede verse como existe diferencia de coste en la solución final en un caso y en el otro.



Capítulo 7. Futuras líneas de investigación

Contenido

7.1. Futuras líneas de investigación.....	pág.132
---	---------



7.1. Futuras líneas de investigación

Existen diversas líneas de investigación que han quedado por desarrollar en este proyecto. Con respecto a la parte fundamental del mismo relacionada con el cálculo del volumen de soldadura sería conveniente conseguir que en el método 3D pudiera aplicarse un ángulo de cutback de forma automática, ya que al tratarse del método más preciso sería de interés poder definirlo con todos los parámetros relacionados con la soldadura que se conocen y se han considerado en este estudio.

Aparte de lo anterior sería necesario validar los métodos de cálculo desarrollados experimentalmente en mayor medida, ya que únicamente se contaba con una serie de nudos reales en los que se había llevado a cabo una soldadura real. La idea sería poder comprobar el volumen total real de la jacket con el volumen que arrojan los diferentes métodos. De esa manera también se podrían corregir, de forma precisa, los coeficientes de corrección de sobreespesores utilizados en este análisis, consiguiendo así unos métodos más exactos. Sin embargo para que esto ocurra será necesario aún esperar varios años hasta que el sector eólico offshore, y en particular el de las subestructuras tipo jacket se encuentre ya en una etapa de madurez en la que se tengan conocimientos profundos del proceso y se cuente con una amplia base de datos.

También sería muy conveniente desarrollar un método analítico más preciso que el que se ha explicado en este proyecto ya que se trata de métodos mucho más rápidos que los métodos gráficos. Además podría comprobarse su validez comparándolo con el método 3D.

Otra buena idea sería la de separar la herramienta del Excel y programarla directamente como una aplicación de escritorio de Windows mediante por ejemplo Visual Studio.

En cuanto al tema de verificación de la viabilidad de la aplicación del ángulo cutback y de aumento del mismo con respecto a la norma considerada, con el fin de optimizar el volumen de soldadura cabe señalar que sería necesario hacer un mayor número de análisis de esfuerzos tanto a tensión última como a fatiga con diferentes tipos de cargas para obtener un abanico más amplio de resultados. En este sentido podría plantearse la posibilidad de aplicar el cutback a una zona más amplia de la soldadura para ahorrar mayor volumen de soldadura comprobando si esto produce un efecto perjudicial sobre el material por el aumento de las tensiones en esa zona.

Por último el modelo ExtendSim desarrollado con el objetivo de mostrar la utilidad del cálculo del volumen de soldadura tiene amplias posibilidades de mejora. Por un lado podrían detallarse en mayor medida las actividades a realizar en el montaje de la jacket y afinar los tiempos de procesamiento introduciendo variabilidad en los mismos. Esto dependerá en gran medida de la compañía en concreto que encargue el estudio, ya que cada empresa tiene sus métodos de trabajo y sus limitaciones de recursos por lo que se tendría que contar con información de primera mano sobre la misma. Además sería



importante incluir la parte del proceso relacionado con la salida de las jackets fabricadas por el muelle destinado a ello, conocido habitualmente como “Load out” .

También sería posible, a través del modelo llegar a estimar la plantilla de trabajadores necesarios para llevar a cabo las labores de construcción a tiempo y detectar cuellos de botella relacionados con los transportes o con el puente grúa.

Fdo. : Nicolás Heredia García



Bibliografía

- [1] España EOEN. PERSPECTIVAS DE DESARROLLO Y ORDENACIÓN TERRITORIAL Y PAISAJÍSTICA DE LA ENERGÍA. 2010;175–85.
- [2] Prässler T, Schaechtele J. Comparison of the financial attractiveness among prospective offshore wind parks in selected European countries. *Energy Policy* [Internet]. 2012 Jun [cited 2014 Jun 15];45:86–101. Available from: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0301421512000894>
- [3] Gaudiosi G. Offshore wind energy prospects. *Renew Energy* [Internet]. 1999 Jan [cited 2014 Jun 15];16(1-4):828–34. Available from: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0960148198002675>
- [4] Perveen R, Kishor N, Mohanty SR. Off-shore wind farm development: Present status and challenges. *Renew Sustain Energy Rev* [Internet]. 2014 Jan [cited 2014 May 2];29:780–92. Available from: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1364032113006849>
- [5] Makridis C. Offshore wind power resource availability and prospects: A global approach. *Environ Sci Policy* [Internet]. 2013 Nov [cited 2014 May 2];33:28–40. Available from: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S146290111300097X>
- [6] European Wind Energy Association. Deep water. 2013 p. 51-86.
- [7] MacGillivray A, Jeffrey H, Winkler M, Bryden I. Innovation and cost reduction for marine renewable energy: A learning investment sensitivity analysis. *Technol Forecast Soc Change* [Internet]. 2013 Dec [cited 2014 May 23]; Available from: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0040162513003041>
- [8] Mitsui Y, Kurobane Y, Nishimura M. *Welding of Tubular Structures* [Internet]. *Welding of Tubular Structures*. Elsevier; 1984 [cited 2014 Jun 15]. Available from: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/B9780080311562500415>
- [9] Ahmadi H, Lotfollahi-Yaghin MA, Yong-Bo S, Aminfar MH. Parametric study and formulation of outer-brace geometric stress concentration factors in internally ring-stiffened tubular KT-joints of offshore structures. *Appl Ocean Res*[Internet]. 2012 Oct [cited 2014 May 2];38:74–91. Available from: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S014111871200065X>



- [10] Jo C., Kim K., Lee S. Parametric study on offshore jacket launching. *Ocean Eng* [Internet]. 2002 Dec [cited 2014 Jun 17]; 29(15):1959–79. Available from: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0029801801001081>
- [11] Cao Y, Meng Z, Zhang S, Tian H. FEM study on the stress concentration factors of K-joints with welding residual stress. *Appl Ocean Res* [Internet]. 2013 Oct [cited 2014 Jun 15];43:195–205. Available from: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0141118713000771>
- [12] Elshafey AA, Haddara MR, Marzouk H. Dynamic response of offshore jacket structures under random loads. *Mar Struct* [Internet]. 2009 Jul [cited 2014 Jun 15];22(3):504–21. Available from: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0951833909000136>
- [13] Alanjari P, Asgarian B, Kia M. Nonlinear joint flexibility element for the modeling of jacket-type offshore platforms. *Appl Ocean Res* [Internet]. 2011 Apr [cited 2014 Jun 15];33(2):147–57. Available from: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0141118710000994>
- [14] Lloyd’s Register of Shipping. Stress concentration factors for simple tubular joints. London, 1997.
- [15] Germanischer Lloyd WindEnergie GmbH. Guideline GL OWT 2005. Hamburg, 2005.
- [16] AENOR. UNE-EN 1090-2: 2011+A1. Ejecución de estructuras de acero y aluminio. Madrid, 2011.
- [17] DNV-RP-C203. Fatigue Design of Offshore Steel Structures. OCTOBER 2012
- [18] <http://help.solidworks.com/2014/English/api/sldworksapirogguide/html>

(1-18)



Presupuesto



PRESUPUESTO

Capítulo 1. Desarrollo del software.

UNIDADES	DESCRIPCIÓN		UNIT.	TOTAL EUROS
500	Horas	Graduado en ingeniería en tecnologías industriales a cargo del desarrollo del proyecto	43,00 €	21500,00 €
TOTAL CAPÍTULO 1				21500,00 €

Capítulo 2. Licencias de software.

UNIDADES	DESCRIPCIÓN		UNIT.	TOTAL EUROS
1	Ud.	Windows 8.1 Professional 64bits.	83,95 €	83,95 €
1	Ud.	Microsoft Office Ultimate 2013 Versión Completa.	539,00 €	539,00 €
1	Ud.	SolidWorks 2014 SP.2.0.	8900,00 €	8900,00 €
TOTAL CAPÍTULO 2				9522,95 €

Capítulo 3. Hardware.

UNIDADES	DESCRIPCIÓN		UNIT.	TOTAL EUROS
1	Ud.	Ordenador PC portátil formado por CPU Intel Core i7 2,9 GHz, con RAM de 8 Gb y disco duro de 1Tb, pantalla LCD de 15", grabadora DVD, teclado y ratón	800,00 €	800,00 €
1	Ud.	Impresora inyección de tinta, para impresión color en formato A4, y accesorios, totalmente instalada.	80,00 €	80,00 €
TOTAL CAPÍTULO 3				880,00 €



RESUMEN POR CAPÍTULOS

Capítulo 1- Desarrollo del software.....	21500,00 €
Capítulo 2- Licencias de software.....	9522,95 €
Capítulo 3- Hardware.....	880,00 €
Importe de Ejecución Material.....	31902,95 €
13% Gastos Generales.....	4147,38 €
6% Beneficio Industrial.....	1914,18€
Importe de Ejecución.....	37964,51€
21% IVA	7972,55€
Importe de Contrata.....	45937,06€

(CUARENTA Y CINCO MIL NOVECIENTOS TREINTA Y SIETE EUROS CON SEIS CÉNTIMOS)

Ferrol, junio de 2014

Fdo.:

Nicolás Heredia García