

# Trabajo Fin de Grado

## Grado en Ingeniería Aeroespacial

### Estudio del avión Mitsubishi A6M Zero y modelado en CATIA V5

Autor: Mario Doblado Agüera

Tutores: María Gloria del Río Cidoncha

Rafael Ortiz Marín

Dpto. de Ingeniería Gráfica  
Escuela Técnica Superior de Ingeniería  
Universidad de Sevilla

Sevilla, 2020





Trabajo Fin de Grado  
Grado en Ingeniería Aeroespacial

# **Estudio del avión Mitsubishi A6M Zero y modelado en CATIA V5**

Autor:

Mario Doblado Agüera

Tutor y publicador:

María Gloria del Río Cidoncha

Profesor titular

Tutor:

Rafael Ortiz Marín

Profesor colaborador

Dpto. de Ingeniería Gráfica  
Escuela Técnica Superior de Ingeniería  
Universidad de Sevilla

Sevilla, 2020



Trabajo Fin de Grado: Estudio del avión Mitsubishi A6M Zero y modelado en CATIA V5

Autor: Mario Doblado Agüera

Tutor y publicador: María Gloria del Río Cidoncha

Tutor: Rafael Ortiz Marín

El tribunal nombrado para juzgar el Proyecto arriba indicado, compuesto por los siguientes miembros:

Presidente:

Vocales:

Secretario:

Acuerdan otorgarle la calificación de:

Sevilla, 2020

El Secretario del Tribunal



# Agradecimientos

---

En primer lugar, quiero agradecer a mis padres el esfuerzo constante que han hecho a lo largo de toda mi vida para que yo esté aquí ahora mismo escribiendo este trabajo, con todo lo que ello implica. Me gustaría darle las gracias también a mi hermano, por guiarme en más de una ocasión.

Quiero darle las gracias a todos los amigos que han sido un apoyo para mí en estos años de carrera, como Elena, Jesús, Rocío, Ana...y otros compañeros que me dejo en el tintero. Especialmente, quiero agradecerle a Antonio su ayuda constante en muchos aspectos.

Finalmente, me gustaría agradecer a mis maestros y profesores por las lecciones que he aprendido de ellos, y en especial a mis tutores por darme la oportunidad de realizar este proyecto.

*Mario Doblado Agüera*  
*Escuela Técnica Superior de Ingeniería*  
*Sevilla, 2020*



# Resumen

---

El objetivo de este proyecto es contribuir a la conservación del patrimonio aeronáutico mediante la recreación virtual del avión de combate japonés Mitsubishi A6M “Zero”, de gran importancia para el desarrollo la Segunda Guerra Mundial. Para ello, se realizará un estudio del diseño de la aeronave y un modelado de esta en el software CATIA V5 R19.



# Índice

---

<b>Agradecimientos</b>	<b>i</b>
<b>Resumen</b>	<b>iii</b>
<b>Índice</b>	<b>v</b>
<b>Índice de Figuras</b>	<b>vii</b>
<b>Índice de Tablas</b>	<b>xi</b>
<b>1 Introducción</b>	<b>1</b>
1.1 <i>Objetivo del proyecto</i>	1
1.2 <i>Alcance del proyecto</i>	1
1.3 <i>Metodología empleada</i>	1
1.4 <i>Estructura del documento</i>	3
<b>2 Contexto histórico</b>	<b>5</b>
2.1 <i>Situación previa</i>	5
2.2 <i>Desarrollo del Zero</i>	6
2.3 <i>Historia operacional</i>	8
2.4 <i>Legado</i>	12
<b>3 Modelado en CATIA V5 R19</b>	<b>15</b>
3.1 <i>División en subconjuntos</i>	15
3.2 <i>Ala</i>	16
3.2.1 <i>Largueros</i>	17
3.2.2 <i>Larguerillos</i>	18
3.2.3 <i>Costillas</i>	20
3.2.4 <i>Piel</i>	22
3.2.5 <i>Alerón</i>	23
3.2.6 <i>Tren de aterrizaje principal</i>	27
3.3 <i>Fuselaje</i>	32
3.3.1 <i>Largueros</i>	34
3.3.2 <i>Larguerillos</i>	37
3.3.3 <i>Cuadernas</i>	38
3.3.4 <i>Piel</i>	41
3.3.5 <i>Tren de aterrizaje secundario</i>	43
3.3.6 <i>Motor</i>	45
3.3.7 <i>Cabina</i>	50
3.4 <i>Estabilizador horizontal</i>	54
3.4.1 <i>Largueros</i>	55
3.4.2 <i>Costillas</i>	56
3.4.3 <i>Piel</i>	57

3.4.4	Timón de profundidad	57
3.5	<i>Estabilizador vertical</i>	61
3.5.1	Largueros	62
3.5.2	Costillas	63
3.5.3	Piel	64
3.5.4	Timón de dirección	64
3.6	<i>Uniones entre elementos</i>	68
3.6.1	Largueros y costillas del ala	68
3.6.2	Ala y fuselaje	70
3.6.3	Estabilizadores y fuselaje	71
3.6.4	Otras uniones	73
<b>4</b>	<b>Resultado final, conclusiones y trabajo futuro</b>	<b>75</b>
	<b>Referencias</b>	<b>79</b>

# ÍNDICE DE FIGURAS

---

Figura 1: Mitsubishi A5M (Franck, 2009).	6
Figura 2: A6M1, prototipo (D'Angina, 2016, pág. 15).	7
Figura 3: A6M2a (D'Angina, 2016, pág. 15).	7
Figura 4: A6M2b (D'Angina, 2016, pág. 15).	8
Figura 5: Ataque a Pearl Harbor (HISTORY.com, 2009).	9
Figura 6: A6M3, modelo 32 (D'Angina, 2016, pág. 23).	10
Figura 7: A6M3, modelo 22 (D'Angina, 2016, pág. 39).	10
Figura 8: A6M5 (D'Angina, 2016, pág. 39).	11
Figura 9: Plantas de producción del Mitsubishi Zero (elaboración propia).	13
Figura 10: Ilustración del Mitsubishi Zero (Nohara, 1993, pág. 73).	15
Figura 11: Superficie exterior del ala.	16
Figura 12: Perfiles de los largueros.	17
Figura 13: Guías de los largueros.	17
Figura 14: Largueros del ala.	18
Figura 15: Detalle de los largueros.	18
Figura 16: Perfiles de los larguerillos.	19
Figura 17: Larguerillos del ala.	19
Figura 18: Detalle de los larguerillos.	20
Figura 19: <i>Pad</i> de la costilla.	20
Figura 20: Costilla tras el <i>pocket</i> .	21
Figura 21: Superficies que recortan a las costillas.	21
Figura 22: Costilla recortada.	21
Figura 23: Costilla 26.	22
Figura 24: Costillas del ala.	22
Figura 25: <i>Shape fillet</i> del ala.	23
Figura 26: Piel del ala.	23
Figura 27: Soporte del alerón en la costilla 9.	24
Figura 28: Soporte del alerón en la costilla 25.	24
Figura 29: Superficie exterior del alerón.	25
Figura 30: Eje de giro del alerón.	25
Figura 31: Costilla 1 del alerón.	26

Figura 32: Costillas del alerón colocadas en el eje de giro.	26
Figura 33: Alerón completo.	27
Figura 34: Ilustración del tren de aterrizaje (Nohara, 1993, pág. 52).	27
Figura 35: Soporte del tren en el larguero.	28
Figura 36: Cilindros del brazo.	28
Figura 37: Brazo del tren de aterrizaje.	29
Figura 38: Rueda del tren.	29
Figura 39: Cubierta del tren.	30
Figura 40: Tren de aterrizaje principal.	30
Figura 41: Ala con dispositivos plegados.	31
Figura 42: Ala con dispositivos desplegados.	31
Figura 43: Estructura interna del ala.	32
Figura 44: Secciones del fuselaje.	33
Figura 45: Superficie exterior del fuselaje.	34
Figura 46: Perfil del larguero delantero superior.	35
Figura 47: Perfil del larguero delantero inferior.	35
Figura 48: Perfil del larguero trasero.	36
Figura 49: Superficies externas de los largueros.	36
Figura 50: Largueros del fuselaje.	37
Figura 51: Detalle de los largueros.	37
Figura 52: Secciones de los larguerillos.	38
Figura 53: Larguerillos del fuselaje.	38
Figura 54: Sección de la cuaderna.	39
Figura 55: Cuaderna 1 antes de ser modificada.	39
Figura 56: Cuaderna 1 tras las modificaciones.	40
Figura 57: Cuaderna 0.	40
Figura 58: Cuaderna 17 junto a la 16.	41
Figura 59: Cuadernas del fuselaje.	41
Figura 60: Cubiertas del armamento.	42
Figura 61: Piel del fuselaje.	42
Figura 62: Cubiertas auxiliares del tren de aterrizaje principal.	43
Figura 63: Ilustración del tren de aterrizaje secundario (Nohara, 1993, pág. 59).	43
Figura 64: Modificación de la cuaderna 17.	44
Figura 65: Brazo del tren de aterrizaje secundario.	44
Figura 66: Rueda del tren de aterrizaje secundario.	45
Figura 67: Tren de aterrizaje secundario.	45

Figura 68: Ilustración del motor (Nohara, 1993, pág. 55).	46
Figura 69: Sakae-12.	46
Figura 70: Montura del motor.	47
Figura 71: Pala de la hélice.	47
Figura 72: Perfil de revolución del <i>spinner</i> .	48
Figura 73: <i>Spinner</i> .	48
Figura 74: Superficies principales del <i>cowling</i> .	49
Figura 75: Superficies de las entradas de aire.	49
Figura 76: <i>Cowling</i> .	50
Figura 77: Grupo motor.	50
Figura 78: Secciones y superficie exterior de la cabina.	51
Figura 79: Superficies de extrusión para delimitar los vidrios.	51
Figura 80: Estructura y vidrios de la cabina.	52
Figura 81: Raíl de deslizamiento, vista interna.	52
Figura 82: Raíl de deslizamiento, vista externa.	52
Figura 83: Fuselaje con dispositivos plegados.	53
Figura 84: Fuselaje con dispositivos desplegados.	53
Figura 85: Estructura interna del fuselaje.	54
Figura 86: Superficie exterior del estabilizador horizontal.	54
Figura 87: Perfiles de los largueros en la raíz y en el extremo.	55
Figura 88: Sólidos de sección variable para los largueros.	55
Figura 89: Largueros del estabilizador horizontal	56
Figura 90: Pieza central de la costilla 1.	56
Figura 91: Costillas del estabilizador horizontal.	57
Figura 92: Piel del estabilizador horizontal.	57
Figura 93: Soporte de la costilla 9.	58
Figura 94: Soporte del larguero trasero.	58
Figura 95: Superficie externa del timón de profundidad.	58
Figura 96: Eje de giro del timón de profundidad.	59
Figura 97: Costillas del timón de profundidad.	59
Figura 98: Timón de profundidad.	60
Figura 99: Estabilizador horizontal con timón plegado.	60
Figura 100: Estabilizador horizontal con timón desplegado.	60
Figura 101: Estructura interna del estabilizador horizontal.	61
Figura 102: Superficie exterior del estabilizador vertical.	62
Figura 103: Perfiles de los largueros en la raíz y el extremo.	62

Figura 104: Largueros del estabilizador vertical.	63
Figura 105: Costillas del estabilizador vertical.	64
Figura 106: Piel del estabilizador vertical.	64
Figura 107: Soportes del larguero trasero.	65
Figura 108: Superficie exterior del timón de dirección.	65
Figura 109: Eje de giro del timón.	66
Figura 110: Costillas del timón de dirección.	66
Figura 111: Timón de dirección.	66
Figura 112: Estabilizador vertical con el timón plegado.	67
Figura 113: Estabilizador vertical con el timón desplegado.	67
Figura 114: Estructura interna del estabilizador vertical.	68
Figura 115: Superficie de la unión entre costilla y larguero.	69
Figura 116: Unión entre costilla y larguero.	69
Figura 117: Uniones entre costilla 2 y largueros delanteros del ala.	70
Figura 118: Superficie de la unión entre ala y fuselaje.	70
Figura 119: Unión entre ala y fuselaje.	71
Figura 120: Uniones entre largueros de ala y fuselaje.	71
Figura 121: Superficies de las uniones entre estabilizador horizontal y fuselaje.	72
Figura 122: Superficies de las uniones entre estabilizador vertical y fuselaje.	72
Figura 123: Uniones entre estabilizador horizontal y fuselaje.	72
Figura 124: Uniones entre estabilizador vertical y fuselaje.	73
Figura 125: Agujeros para remaches entre montura del motor y cuaderna 0.	73
Figura 126: Remache.	74
Figura 127: Modelo del Mitsubishi Zero.	75
Figura 128: Estructura interna del Mitsubishi Zero.	75
Figura 129: Comparativa con fotografía del avión real (Nohara, 1993, pág. 67).	76
Figura 130: Detalle del modelo del Mitsubishi Zero.	77

# ÍNDICE DE TABLAS

---

Tabla 1: Resumen de las variantes del Mitsubishi A6M (D'Angina, 2016, pág. 38).	12
Tabla 2: Producción de aviones Mitsubishi A6M (Smith, 2015, pág. 246).	13
Tabla 3: Perfiles de la pala (Nohara, 1993, págs. 87-88).	47



# 1 INTRODUCCIÓN

---

## 1.1 Objetivo del proyecto

En este documento se realiza un estudio del avión de combate Mitsubishi A6M “Zero”. El objetivo de este análisis no es único, sino que se divide en varios aspectos.

En primer lugar, la motivación de contribuir a la conservación del patrimonio aeronáutico. Este avión, como se podrá ver a lo largo del documento, fue decisivo en el desarrollo de la Segunda Guerra Mundial, siendo usado por el Imperio Japonés contra las fuerzas aliadas en distintas batallas en el Pacífico. Mediante la realización de este proyecto se pretende conservar digitalmente el Mitsubishi Zero.

En segundo lugar, está el objetivo de entender cómo afecta este contexto tan insólito al diseño y características físicas del avión.

Por último, se quiere realizar un análisis del proceso de digitalización de piezas a partir de planos, detallando los pasos necesarios para conseguirlo con las herramientas elegidas.

## 1.2 Alcance del proyecto

Al hablar de un objetivo de tanta envergadura como es el modelado de una aeronave completa, se debe dejar claro cuál es el grado de profundidad al que se quiere llegar. Debido a esta dificultad intrínseca, en este documento se modela el avión de forma general, es decir, incluyendo los componentes principales de su estructura, cubiertas y superficies aerodinámicas, pero prescindiendo de mecanismos, del interior de la cabina y otros sistemas.

Asimismo, ha de recalarse que la profundidad alcanzada en el modelo de estas piezas dependerá a su vez de los planos y datos de que se dispongan.

## 1.3 Metodología empleada

El primer paso para lograr los objetivos propuestos ha sido la búsqueda y análisis de distintas fuentes bibliográficas que pudieran aportar tanto información de manera general sobre el Mitsubishi Zero como planos, esquemas y medidas de las distintas piezas que lo componen.

Para la realización del modelado a partir de estos datos, la herramienta principal que se ha usado es el software de diseño asistido por ordenador CATIA V5 R19. La elección de esta herramienta ha sido motivada por varios aspectos:

- el amplio uso que se le da a este software en el sector de la ingeniería y el diseño industrial;
- la experiencia previa de uso en la asignatura de *Diseño y Fabricación Asistido por Ordenador*;
- la multitud de comandos existentes para trabajar tanto con sólidos como con superficies y conjuntos de piezas, lo cual se adecua al trabajo que se quiere realizar.

La metodología que se ha seguido a la hora de modelar el avión en CATIA ha consistido en dividirlo en subconjuntos y piezas. Para cada una de las piezas, se obtienen las medidas a partir de los planos y

de la bibliografía de referencia. Con sus medidas correspondientes, las piezas se han modelado mediante los módulos de *Part Design* o *Wireframe and Surface Design*. Una vez obtenidas las piezas, se definen sus posiciones y orientaciones relativas mediante el módulo de *Assembly Design*.

Algunos de los comandos más usados en cada caso son:

## **Part Design**

- *Sketch*, para dibujar en dos dimensiones.
- *Pad*, para generar un sólido proyectando un perfil en una dirección.
- *Pocket*, para eliminar parte de un sólido proyectando un perfil en una dirección.
- *Shaft*, para generar un sólido de revolución.
- *Hole*, para realizar agujeros en los sólidos.
- *Rib*, para generar un sólido extrayendo un perfil a lo largo de una curva determinada.
- *Multi-section solid*, para generar un sólido a partir de varias secciones distintas.
- *Thick Surface*, para darle espesor a una superficie previamente definida.
- *Close Surface*, para rellenar una superficie cerrada.

## **Wireframe and Surface Design**

- *Point*, para generar puntos.
- *Line*, para generar líneas rectas.
- *Plane*, para generar planos.
- *Spline*, para definir curvas que pasan por varios puntos.
- *Intersection*, para obtener la intersección entre dos elementos.
- *Split*, para cortar elementos con otros.
- *Trim*, para recortar superficies entre sí.
- *Extrude*, para generar superficies extrayendo un perfil en una dirección.
- *Revolve*, para generar una superficie con simetría de revolución.
- *Sweep*, similar a *rib*, pero generando una superficie.
- *Multi-section Surface*, para generar una superficie a partir de varias secciones distintas.
- *Fill*, para rellenar curvas cerradas.

## **Assembly Design**

- *Fix*, para fijar un elemento.
- *Coincidence*, para hacer coincidir dos ejes.

- *Contact*, para forzar contacto entre dos planos.
- *Offset*, para definir la distancia entre dos planos.
- *Angle*, para definir el ángulo entre dos planos.

## 1.4 Estructura del documento

Conociendo los objetivos, el alcance y la metodología que se tiene para realizar el proyecto, se detalla en este epígrafe la estructura del documento.

En primer lugar, se dedica un punto al análisis del contexto histórico del Mitsubishi Zero. En este punto se detalla la situación en la que se diseña y desarrolla el avión, así como su vida operativa y el legado que deja tras el fin de la guerra.

El segundo punto corresponde al grueso del proyecto, el modelado de la aeronave. El primer epígrafe se dedica a dividirla en sus distintos subconjuntos y piezas. Posteriormente, se dedica un epígrafe a cada uno de los subconjuntos, explicando el proceso de modelado de cada pieza y el ensamblaje de estas, así como los planos y documentos de donde se obtiene la información necesaria y las decisiones que se van tomando.

Finalmente, se cierra la memoria con las conclusiones del proyecto en su conjunto, comparando el modelo obtenido con imágenes del avión real, además de comentar las posibles mejoras y trabajo futuro sobre el mismo y la bibliografía utilizada.



## 2 CONTEXTO HISTÓRICO

---

Una vez explicada la estructura que va a seguir la memoria, se lleva a cabo en este punto una labor de investigación sobre el contexto histórico que rodea al Mitsubishi Zero. Se explicará cuál es la situación en la que se desarrolla este avión, pasando por toda su historia al servicio de la Armada Imperial Japonesa para terminar con el legado de este modelo tras la Segunda Guerra Mundial.

### 2.1 Situación previa

Entorno al modelo A6M, mejor conocido como Mitsubishi Zero, se ha generado una verdadera leyenda, en cierta medida sobredimensionada. Esto no se debe a los pocos méritos reconocidos en tal obra de ingeniería, sino en la gran infravaloración por parte de las fuerzas aliadas a la capacidad militar japonesa (Smith, 2015, págs. 7-11).

De hecho, el desarrollo tecnológico y militar de Japón no se resume a los prolegómenos inmediatos de la Segunda Guerra Mundial, sino que cuenta con una trayectoria previa amplia. Desde la victoria sobre China en 1895, el ejército japonés se va a posicionar como uno de los más profesionales y efectivos del momento. Las consecuencias territoriales de esta guerra son la incorporación de territorios chinos y la ampliación de la esfera de influencia a Corea; sin embargo, habrá que destacar que se trata de la primera guerra donde Japón sale de su territorio insular para conseguir una gran victoria, además frente al gigante chino.

Pese a todo esto, Occidente mantendrá una subestimación continuada a Japón, asumiendo de hecho la gran derrota china como un ejemplo de su debilidad más que del poder japonés. No será hasta la guerra Ruso-japonesa de 1905 cuando se considere a Japón como un país de primer nivel, consiguiendo una rápida victoria sobre una de las grandes potencias europeas, el Imperio Ruso (López Rodríguez, 2019, págs. 633-641).

A partir de este momento se produce el amplio despliegue tecnológico. El foco de atención se centró en la Armada nipona por razones logísticas debido al carácter insular del país. Destacarán Mitsubishi o Kawasaki, grandes empresas que se impondrán en la industria aeronáutica a partir de los años 20, desarrollando los motores diésel y de combustión a nivel nacional. Destacará especialmente la primera comentada, fundada en un principio para una producción dual automovilística y aeronáutica que, a partir del final de la década, abandonará su rama terrestre para dedicarse por exclusiva a la aérea (Okazaki, 2011, págs. 973-994).

Al servicio de la Armada se encontrará la Aviación, formando parte de esta como una rama militar, desarrollándose a partir de este momento debido a la evolución marcial de guerras navales a aeronavales, no solo a nivel local sino mundial, lo que en gran medida dio forma al tipo de combates que se llevaron a cabo durante la Segunda Guerra Mundial. Las mejoras aeronáuticas en Japón serán ampliamente reconocidas, incrementadas por el valor y pericia de los propios pilotos japoneses, en gran medida adiestrados en Occidente. Algunas tácticas novedosas además de la tecnología serán la adaptación de ciertas estrategias militares, como la posición solar, que permitía desenvolverse de las defensas antiaéreas (López Rodríguez, 2019, págs. 633-641).

Será importante el papel de los británicos en el adiestramiento previo de estas nuevas fuerzas, debido al papel fundamental que desarrolla el tratado de alianza anglojaponesa, que se mantendrá en vigor hasta 1923. Ya entrados en los años 30, Japón se desliza a una alianza ventajosa con el Eje, apoyando así sus intereses imperiales sobre China y las colonias británicas del Sureste Asiático. Con este posicionamiento será necesaria una vuelta de tuerca a la tecnología japonesa debido a la necesidad a

hacer frente a las potencias aliadas no solo en el aspecto naval, sino en el aéreo -ya altamente desarrollado en este momento tanto por Reino Unido como por Estados Unidos- (Smith, 2015, págs. 15-21).

## 2.2 Desarrollo del Zero

Aquí es donde aparece a la escena Jiro Horikoshi. Ingeniero de Mitsubishi, contaba con experiencia internacional, habiéndose formado en Alemania, Reino Unido y Estados Unidos. Su trabajo en el desarrollo del primer gran modelo japonés de caza fue crucial: el A5M o Tipo 96 (Smith, 2015, págs. 23-24). Este será no solo un elemento excepcional de la tecnología propiamente nacional, sino que además contará con el valor añadido de ser el primer caza monoplano con bases en portaaviones, algo que caracterizará por completo la guerra aeronaval de la Segunda Guerra Mundial y que será crucial en la guerra contra China (D'Angina, 2016, págs. 4-6).

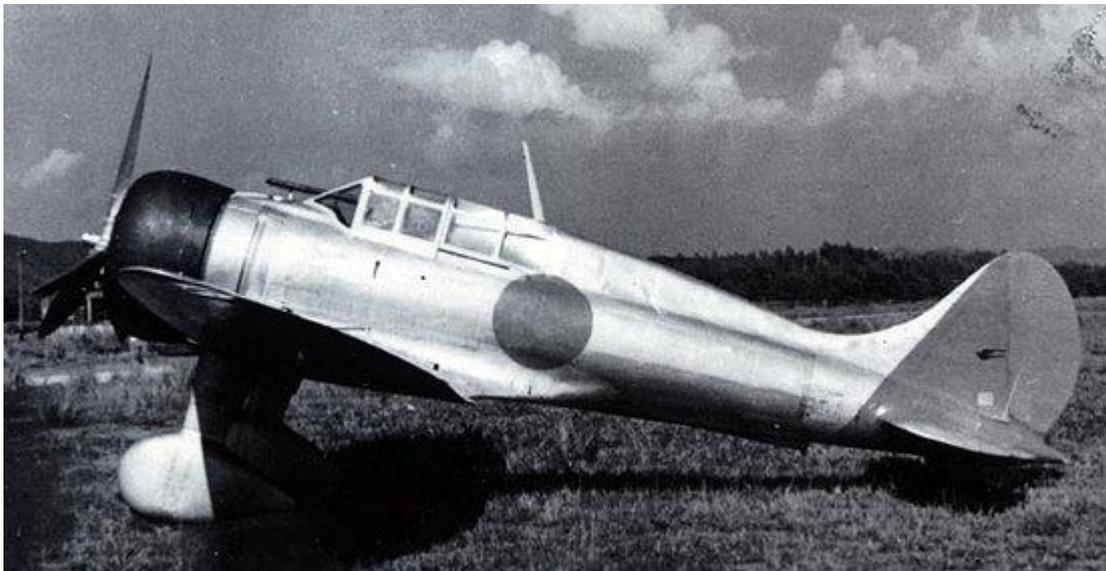


Figura 1: Mitsubishi A5M (Franck, 2009).

Con el éxito del Tipo 96, Horikoshi se plantea un prototipo distinto, presentando en 1937 una alternativa: el caza 12-Shi. Para este nuevo modelo se plantea unas alas de 12 metros, con capacidad de 310 mph a 13000 pies de altura en combate. Estos requerimientos se planteaban imposibles y el propio Horokoshi llegó a renunciar el proyecto por las imposibilidades que planteaba, planteando cambios en el proyecto al gobierno que jamás serían aceptados. De esta manera, para alcanzar los altos estándares exigidos por el gobierno, el ingeniero opta por una alternativa, la de reducir drásticamente el peso del prototipo intentando mantener al mismo tiempo unos ciertos requerimientos de seguridad. Para ello necesitó un cambio material, experimentando un nuevo tipo metálico llamado *extra super duralumin* (ESD). Funcionó satisfactoriamente y, de nuevo, el reputado ingeniero consiguió sacar adelante un proyecto previamente sentenciado como imposible (Horikoshi, 1970, págs. 4-57).

Un año después, en 1938, tras repetidas pruebas del diseño, se llega a la decisión de plantear ya el modelo que ocupa a este proyecto. Para el mismo se había decidido reducir de nuevo el peso y desarrollarlo con una mayor maniobrabilidad que permitiera una competitividad máxima frente a los cazas desarrollados por Estados Unidos. La única problemática que acompañará a este nuevo modelo será en gran medida el elevado coste de producción y el tiempo necesario para su ensamblaje, debido a que por su estructura no se podía producir desde distintas plantas, sino que se debía realizar desde una sola.

El 12-Shi será probado de forma inmediata en la guerra activa contra China —es especialmente interesante cómo esta guerra se convierte en el perfecto campo de prueba de las nuevas tecnologías desarrolladas en el momento-. De esta manera, con esta gran victoria, se plantea no solo un nuevo reto aeronáutico, sino el directo precursor de lo que será el gran avión japonés de la Segunda Guerra Mundial, el Mitsubishi Zero (Bueschel, 1970, págs. 4-6).



Figura 2: A6M1, prototipo (D'Angina, 2016, pág. 15).

Hacia febrero de 1939, poco antes del inicio de la Segunda Guerra Mundial, Japón ya se encontraba preparado con la creación de su primer prototipo del Mitsubishi Zero. Este prototipo, denominado A6M1, resultó ser de gran calidad, con solo algunos pequeños desperfectos como vibraciones armónicas, haciendo relativas modificaciones a lo largo del año. Sin embargo, en marzo de 1940, se produce la muerte de un piloto con la explosión de uno de los ejemplares. Su rediseño fue completamente necesario, dedicándose el mismo a las alas y sus largueros además de un nuevo motor, el Sakae-12. El nuevo diseño será volado en enero de 1940, con el nuevo nombre de A6M2, y para ello se le dedicará un cuidado especial, dentro de un proyecto completamente novedoso en su testeo. No es de extrañar que China sea de nuevo el campo de prueba bajo la mano de Tamotsu Yokoyama y Saburo Shindo, dos jóvenes comandantes (Bueschel, 1970, págs. 7-9).



Figura 3: A6M2a (D'Angina, 2016, pág. 15).

Con respecto a los nombres que se le da al avión, caben destacar varios aspectos. En primer lugar, el nombre de “Zero” tiene su origen en que se desarrolla con la denominación de Tipo 00. Este número procede de los dos últimos dígitos del año imperial japonés en el que se diseña el avión. Así, el predecesor del Zero, o A5M, es el Tipo 96 porque se desarrolla en el año imperial 2396, y el Zero le

debe su nombre al año 2400. En la denominación de A6M se especifican más detalles del avión: la “A” significa que es un avión de combate llevado en portaviones; el “6”, que es el sexto que se desarrolla de este tipo; y la “M”, que es desarrollado por Mitsubishi.

Además de estas denominaciones para el avión en general, se especifica también la variante mediante el nombre de modelo. En este nombre, el primer dígito se refiere a la estructura usada, y el segundo al motor. De esta forma, el prototipo o A6M1 no tiene número de modelo, y para el A6M2a se aplica el nombre de modelo 11. Cuando se realiza la primera modificación de la estructura alar, incluyendo un mecanismo para doblar las puntas del ala, se evoluciona al A6M2b o modelo 21 (Smith, 2015, págs. 41-42).

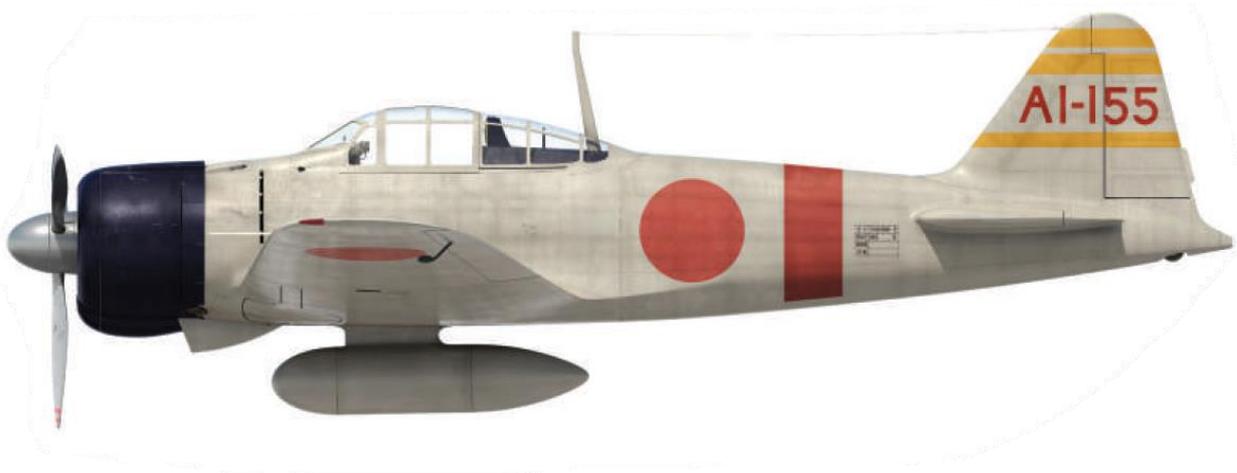


Figura 4: A6M2b (D'Angina, 2016, pág. 15).

Exceptuando estas pequeñas diferencias con las que se cuenta entre el modelo 11 y el 21, contamos a partir del 1941 con el avión más avanzado del escenario mundial, protagonista de momentos definitivos en los combates de la Segunda Guerra Mundial.

## 2.3 Historia operacional

La conocida escenografía en la que se descubrirán las proezas del Zero no será otra que el ataque a Pearl Harbor (7 de diciembre de 1941), sin embargo, los aliados ya contaban con noticias de el nuevo caza japonés. Es realmente interesante esto, ya que, en 1941, la inteligencia británica y americana había recopilado información sobre el mismo. Todo apuntaba a un modelo irrelevante, algo en lo que influía con fuerza los prejuicios raciales y el etnocentrismo occidental, considerando a Japón aún –a pesar de todas sus victorias- como un país de segunda clase sin nada real que aportar a la desarrollada tecnología militar (Smith, 2015, págs. 59-66).

Los años de pruebas en China habían permitido a Japón desarrollar el ejército más moderno e instruido de su historia, alimentado al mismo tiempo por un sentimiento de descontento generalizado hacia el imperialismo occidental de Estados Unidos y Reino Unido. A mediados de verano de 1941, se había desarrollado un nacionalismo fanático incontrolable que dominó la escena política del país, ultimando las negociaciones diplomáticas con Estados Unidos. Para aquel entonces Isoroku Yamamoto, jefe de la Armada Imperial Japonesa, había recibido órdenes de realizar un ataque total sobre las fuerzas estadounidenses en Pearl Harbor de forma sorpresiva, unas fuerzas de 23 buques, 6 portaaviones y más de 350 aviones (Sakaida, 1998, págs. 47-61).



Figura 5: Ataque a Pearl Harbor (HISTORY.com, 2009).

Dos ataques consecutivos por sorpresa dieron como resultado una victoria espectacular, donde la mayor flota de Estados Unidos en el Pacífico Occidental había sido prácticamente destruida por un rápido ataque en el que apenas se dieron 55 bajas del ejército japonés (Sakaida, 1998, págs. 62-65). A partir de este momento, el Zero se convierte en una verdadera leyenda, nacida por la subestimación occidental hacia la tecnología japonesa. Se produjeron una admiración y miedo colosales que se expandió por parte de las fuerzas aliadas a la capacidad de la armada imperial. A partir de ese momento la búsqueda de un ejemplar intacto para poder analizarlo será crucial para Estados Unidos (Bueschel, 1970, págs. 13-20).

Japón, tras su victoria, se lanzó de inmediato a la conquista total de las colonias aliadas en Oriente, prestando especial atención en las islas Filipinas, Hong Kong y las Antillas Holandesas. Estas últimas serán un elemento crucial para la guerra en el Pacífico debido al considerable valor de sus yacimientos minerales, caucho y reservas petrolíferas. Para esta conquista se apoyarán en su base en Formosa, dedicando especial atención al archipiélago filipino. La rápida toma de las islas en otro ataque relámpago donde la mayor parte de las fuerzas aéreas estadounidenses fueron destruidas no hicieron otra cosa que aumentar la moral de las fuerzas aéreas japonesas, continuando su paseo militar conquistando las Antillas Holandesas y fijando su atención a Nueva Guinea y Australia (Sakaida, 1998, págs. 72-80).

Desde 1941 se comienza a diseñar el modelo 32 para conseguir mejores prestaciones a grandes altitudes, introduciendo el motor *Sakae-21*. Este cambio incrementó el peso y el tamaño del cowling, pero proporcionaba mayor potencia. A su vez, con el objetivo de incrementar la maniobrabilidad en estas altitudes se eliminó la punta plegable del ala, sustituyéndolas por bordes rectos (Smith, 2015, págs. 144-145).



Figura 6: A6M3, modelo 32 (D'Angina, 2016, pág. 23).

Tras realizar ensayos en vuelo a lo largo de junio de 1941 los resultados obtenidos fueron decepcionantes, ya que el alcance del avión disminuía en unos 1000 km a máxima potencia, y el incremento de la velocidad máxima era apenas de 11 km/h. Pese a ello, se siguió adelante con este modelo y entró en producción en producción en 1942, llegándose a fabricar solo 343 unidades. Se llegó a desarrollar también un prototipo para el A6M4, pero finalmente acabó descartándose (D'Angina, 2016, págs. 29-32).

Incluso tras sus mayores logros en combate, durante 1942 se continuó con el diseño de modificaciones sobre el Zero. Tras el fallo de haber sustituido los extremos elípticos del ala por rectangulares se volvió a la configuración anterior, pero manteniendo el nuevo motor. Este modelo, el 22, fue oficialmente aceptado a principios de 1943 (Horikoshi, 1970, págs. 137-139).



Figura 7: A6M3, modelo 22 (D'Angina, 2016, pág. 39).

1942 se plantea como la continuación de todas las victorias conseguidas en los últimos meses del año anterior. De esta forma se plantean los dos grandes focos de actuación: Nueva Guinea –como paso

previo para poder enfocarse en Australia- y las islas del Pacífico controladas por EE. UU. Complejas operaciones son planteadas por los japoneses como la *Operación Mo* o la *Operación Mi*. Ambas de ellas tenían una intencionalidad clara: despistar al enemigo. Para la primera se planteó una intensiva actividad militar en el Mar de Coral con el objetivo de centrar los refuerzos aliados en la zona y aprovechar mientras tanto para tomar Nueva Guinea; mientras que la segunda plantearía una posible invasión de Estados Unidos desde Alaska para poder tomar el atolón de Midway, un archipiélago estratégico controlado por EEUU próximo a las islas Hawaii que permitiría a Japón establecer una fuerte base militar en el centro del Pacífico (Smith, 2015, págs. 150-166).

Sin embargo, ambas operaciones, a pesar de cumplirse, fracasan estrepitosamente, debido a la capacidad estadounidense para desvelar el engaño japonés. Lo más destacado para este proyecto será lo sucedido en la batalla de Dutch Harbor, donde EE. UU. conseguirá hacerse con uno de los legendarios Zero japoneses. El Zero de Koga permitirá a los Aliados desvelar los secretos tan bien guardados de la estrella aérea nipona para, a partir de su análisis, sacar provecho de sus puntos más débiles en la guerra y desarrollar tecnologías precisas efectivas (Bueschel, 1970, págs. 21-28).

Japón lanzará poco después la invasión de Midway con un resultado completamente nefasto. Entre el 4 y el 5 de junio de 1942 Japón perdió 4 portaaviones además de más del 10% de sus pilotos más veteranos. La gran problemática de esta batalla no se desarrolló en el aire, donde los japoneses superaron rápidamente a los Buffalos y el Wildcat que protegían la zona; sino en el mar, donde los bombarderos estadounidenses consiguieron hundir los portaaviones japoneses, algo que dejó a los Zero completamente aislados. Las grandes caídas de pilotos en esta batalla supondrán el principio del fin, debido a la inexperiencia de nuevos pilotos y la necesidad de movilizar a los veteranos como instructores (Sakaida, 1998, págs. 85-89).

Entre 1943 y 1944 se siguieron realizando modificaciones al Zero y adaptando prototipos, hasta que finalmente se llegó al A6M5, o modelo 52. Este presentaba una envergadura más corta, de 11 metros, pero sin abandonar los extremos redondeados del ala. Sobre este mismo modelo se realizaron distintas modificaciones, como el 52-Koh, el 52-Otsu o el 52-Hei, cuyas mejoras fueron mayormente del armamento equipado en la aeronave y de las protecciones al piloto (Horikoshi, 1970, págs. 140-145).

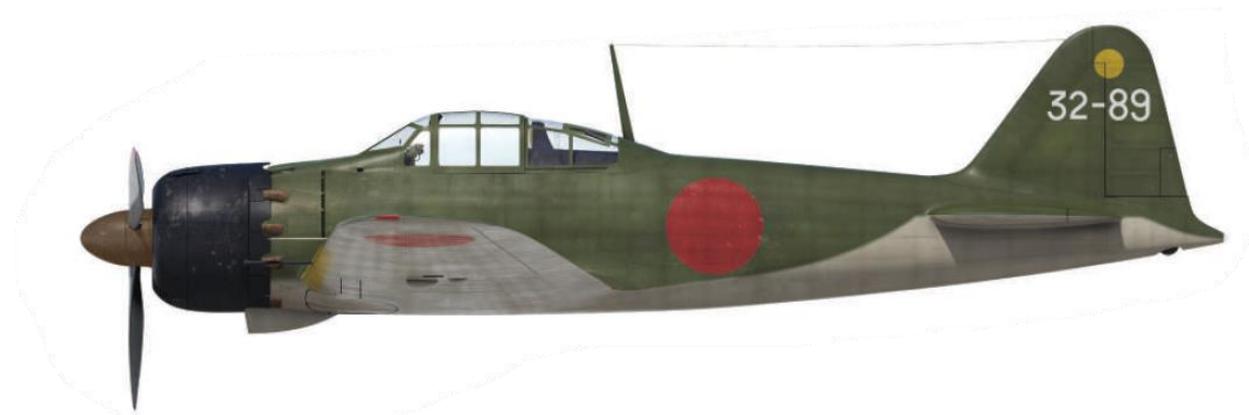


Figura 8: A6M5 (D'Angina, 2016, pág. 39).

La última variante desarrollada que participó en combate fue el A6M7, denominado modelo 62 o 63 según el motor incorporado. Este modelo se diseñó específicamente para operaciones *kamikaze* como bombardero en picado, y llevaba incorporada una bomba de 250 kg.

Entre 1944 y 1945 también se realizaron algunos prototipos para las variantes A6M6 y A6M8, pero la situación al final de la guerra impidió que continuase la producción de aeronaves y estos modelos nunca llegaron a estar operativos (D'Angina, 2016, págs. 36-37).

Tras Midway el desastre se precipitó. Poco después, la armada japonesa intentó desembarazarse de la

terrible derrota continuando con la campaña de las Islas Salomón intentando tomar la isla de Guadalcanal, lo cual se transformará en un desastre casi mayor que la propia batalla de Midway para la armada, que se verá completamente mermada. Después de esta terrible derrota, Japón solo volverá a contar con una tímida victoria en la campaña de las Islas Salomón, en la batalla de Santa Cruz, donde de nuevo los Zero destacaron por su agilidad (Smith, 2015, págs. 167-186).

Tras este momento no habrá una marcha atrás en la guerra, donde Japón pasó de actitud ofensiva a defensiva. El cambio de estrategia provocado por la situación de derrota en la guerra fue en gran parte la causa del desarrollo del concepto de *kamikaze*. Consistían en aviones que realizaban ataques suicidas con el fin de erradicar objetivos enemigos de mayor importancia estratégica. El Zero pasó de ser el caza más temido de la guerra en el Pacífico a ser el máximo representante de estos ataques (Horikoshi, 1970, págs. 146-156).

Después de Guadalcanal, la mayor parte de la armada japonesa y sus unidades aéreas se encontraban mermadas, y peor aún, descabezadas, lo que supuso una política militar desastrosa que sucumbirá, finalmente, a la derrota total de Japón en la Segunda Guerra Mundial (Sakaida, 1998, págs. 91-104).

## 2.4 Legado

Con el objetivo de tener una visión general del impacto que se tuvo el Mitsubishi Zero a lo largo de su vida operativa, se presentan a continuación unas tablas a modo de resumen de las distintas variantes y de su producción.

Tabla 1: Resumen de las variantes del Mitsubishi A6M (D'Angina, 2016, pág. 38).

Designación	Modelo	Año	Detalles
A6M1	-	1939	Prototipo, equipado con un motor <i>Zusei-13</i> .
A6M2a	11	1940	Primer modelo, equipado con un <i>Sakae-12</i> .
A6M2b	21	1940	Punta del ala con mecanismo para plegarla.
A6M2-N	11	1941	Variante desarrollada como hidroavión con flotadores.
A6M2-K	21	1944	Avión de entrenamiento.
A6M3	32	1942	Modificación del ala haciendo las puntas rectas. Equipado con un <i>Sakae-21</i> .
	22	1943	Vuelta al ala de punta plegable.
A6M5	52	1944	Reducción de envergadura del ala y sin puntas plegables.
A6M5a	<i>52-Koh</i>	1944	Mejora del armamento del ala y aumento del espesor de la piel.
A6M5b	<i>52-Otsu</i>	1944	Mejora del armamento del morro.
A6M5c	<i>52-Hei</i>	1944	Inclusión de superficies blindadas en la cabina.
A6M5-K	52	1944	Avión de entrenamiento biplaza.
A6M7	62	1945	Bombardero, modificado para misiones <i>kamikaze</i> .

Tabla 2: Producción de aviones Mitsubishi A6M (Smith, 2015, pág. 246).

Lugar de producción	Número de aviones
Mitsubishi (Nagoya)	3879
Nakajima (Ota, Tokio)	6570
Arsenal Naval de Sasebo	236
Hitachi (Chiba)	279
<b>Total</b>	<b>10964</b>

Como puede apreciarse, la mayoría de las unidades se fabricaron en las plantas de Mitsubishi y Nakajima –un 95.3% del total-. Este hecho debe su explicación a que los aviones producidos en el Arsenal Naval de Sasebo y en la planta de Hitachi fueron exclusivamente aviones de entrenamiento – de los modelos A6M2-K y A6M5-K-.



Figura 9: Plantas de producción del Mitsubishi Zero (elaboración propia).

Aunque no se tienen datos exactos de la producción de cada variante, debido a la disparidad en las fuentes de referencia, se conoce que del modelo 21 o A6M2b se llegaron a producir hasta 3746 unidades (D'Angina, 2016, pág. 40). Esta cantidad representa el 34.2% del total de aeronaves, convirtiéndose en la variante más producida y, en consecuencia, la más conocida. Esta es una de las razones por la cual será el modelo que se modele en este documento, como se verá en el siguiente punto.

De estas 10964 unidades producidas, el número de aviones supervivientes a la guerra es muy bajo, estando la mayoría reconstruidos de partes de distintos modelos. Algunas de estas recuperaciones se encuentran en museos como el Museo Nacional de Ciencia de Japón o el Museo Imperial de la Guerra en Londres.



# 3 MODELADO EN CATIA V5 R19

Hecho ya el repaso por el contexto que rodea al Mitsubishi Zero, se procede a comenzar la parte central del proyecto, que consiste en el modelado de este avión mediante la herramienta de diseño asistido por ordenador CATIA V5 R19. A lo largo de este punto se desarrollará la recreación virtual, en primer lugar, dividiendo la aeronave en los distintos subconjuntos que la componen y, a su vez, estos subconjuntos en sus piezas elementales, para así poder describir el modelado de cada una de estas por separado.

## 3.1 División en subconjuntos

A gran escala, el Zero se divide en cuatro grupos estructurales claramente diferenciados: el fuselaje, el ala, el estabilizador horizontal y el estabilizador vertical, a semejanza de otros aviones tanto de la época como actuales. Además, estos grupos llevan asociados a su vez otros elementos que no son simples piezas elementales como pueden ser: trenes de aterrizaje principal y secundario, motor o cabina (Foster, 1945, págs. 119-121).

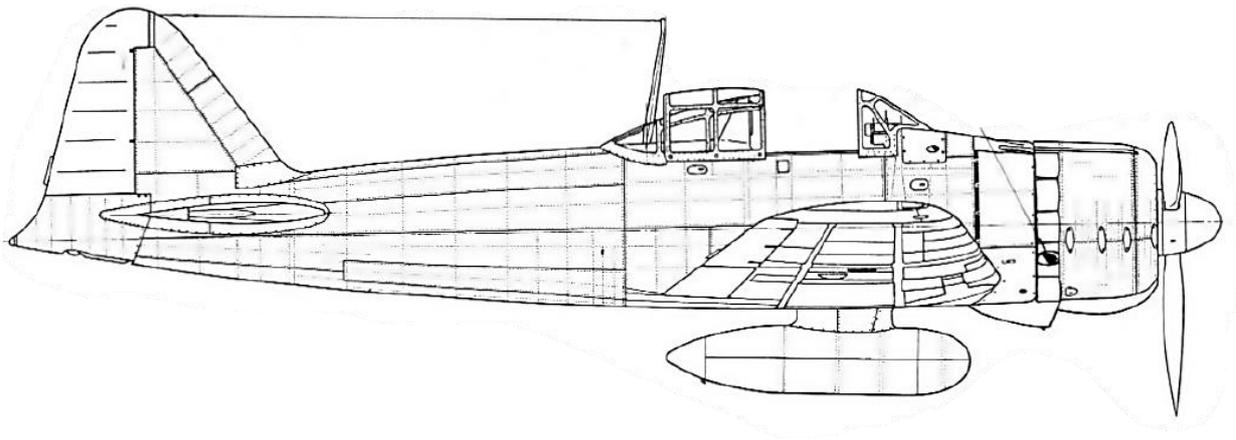


Figura 10: Ilustración del Mitsubishi Zero (Nohara, 1993, pág. 73).

Subconjuntos:

1. Ala
  - a. Tren de aterrizaje principal
  - b. Alerón
2. Fuselaje
  - a. Tren de aterrizaje secundario
  - b. Motor
  - c. Cabina
3. Estabilizador horizontal
  - a. Timón de profundidad
4. Estabilizador vertical
  - a. Timón de dirección

Cabe destacar que, tanto en el ala como en el estabilizador horizontal, al ser subconjuntos formados por dos partes simétricas, se va a proceder al modelado de una mitad a la que, posteriormente, se le hará una operación de simetría.

Se aprovecha también este momento para definir el sistema de referencia que se va a usar a lo largo del modelado. El eje X comienza en el morro del avión, con las coordenadas aumentando conforme se acerca a la cola. El eje Z se define vertical hacia arriba, y el eje Y completa el sistema apuntando hacia el ala derecha del avión, como puede verse en la figura anterior.

### 3.2 Ala

Aunque lo intuitivo parecería comenzar el modelo con el fuselaje, que es el subconjunto central, se comienza con el ala debido a la dependencia que existe entre ambos a nivel de fabricación. Durante la producción del avión, estos grupos estructurales se fabrican conjuntamente, de manera que los largueros inferiores del fuselaje guardan la forma del extradós del ala (Foster, 1945, pág. 121). Por esta razón, se empieza por el grupo alar.

Para soportar las principales cargas generadas en el vuelo y por el propio peso del ala, existen cuatro largueros: dos al 33.3% de la cuerda y dos al 66.7%, en ambos casos uno en el extradós y otro en el intradós. A su vez, los largueros conectan con las 26 costillas, transversales a estos y encargadas de mantener la forma del perfil del ala. Cubriendo a estas piezas se encuentra la piel del ala, formada por la unión de varias planchas metálicas, y varios larguerillos que rigidizan esta superficie (Nohara, 1993, págs. 73-75).

Además de estos elementos estructurales, en el ala se encuentra el tren de aterrizaje principal y un alerón que permite el giro del avión (Nohara, 1993, págs. 24-33). Las piezas que los componen se especificarán en sus apartados correspondientes.

Para modelar este subconjunto, se comienza con su superficie exterior. Esta superficie está definida por los perfiles NACA que la conforman, un 2315 en la raíz y un 3309 en el extremo del ala. Además, se tienen datos de su envergadura, que es de 6 m; de las cuerdas del perfil en la raíz y el extremo, de 2629.816 mm y 1415.732 mm respectivamente; del ángulo diedro, de  $5.72^\circ$  y del ligero ángulo de torsión, de  $1^\circ$ , que presenta el extremo del ala (Foster, 1945, pág. 121).

Con estas medidas, se importan los puntos que definen los perfiles aerodinámicos desde MS Excel y se crea un *spline* para cada uno. Una vez obtenidos, se crea una superficie de sección variable con guías en el borde de ataque y de salida de los perfiles para terminar la superficie exterior.

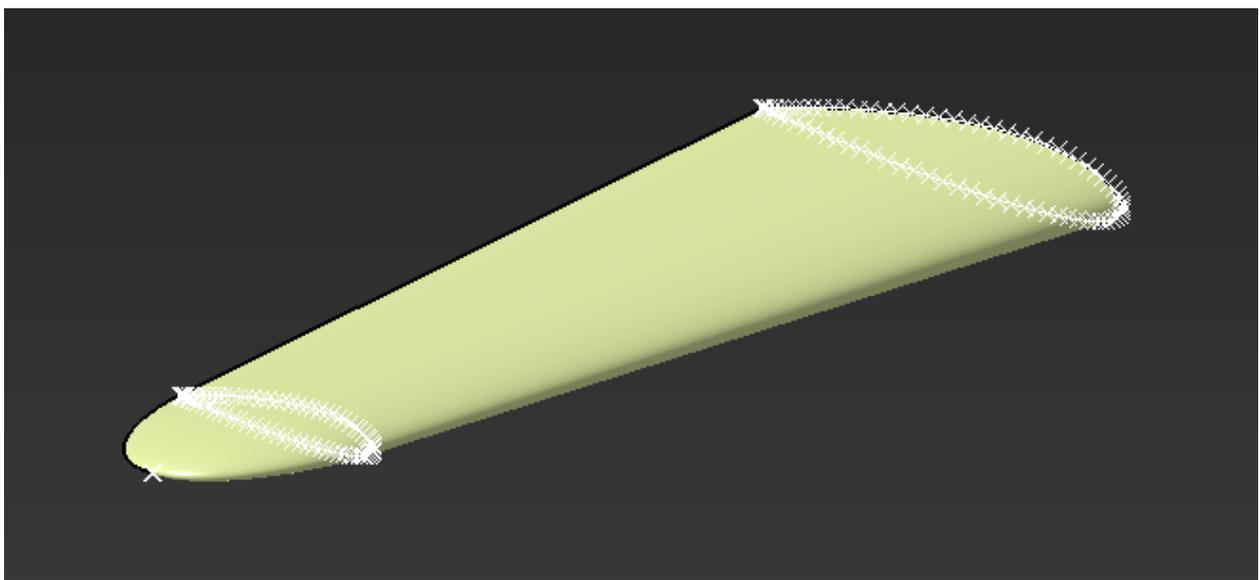


Figura 11: Superficie exterior del ala.

### 3.2.1 Largueros

Los largueros consisten en cuatro elementos alargados de sección en T. Para modelarlos, se comienza definiendo estos perfiles.

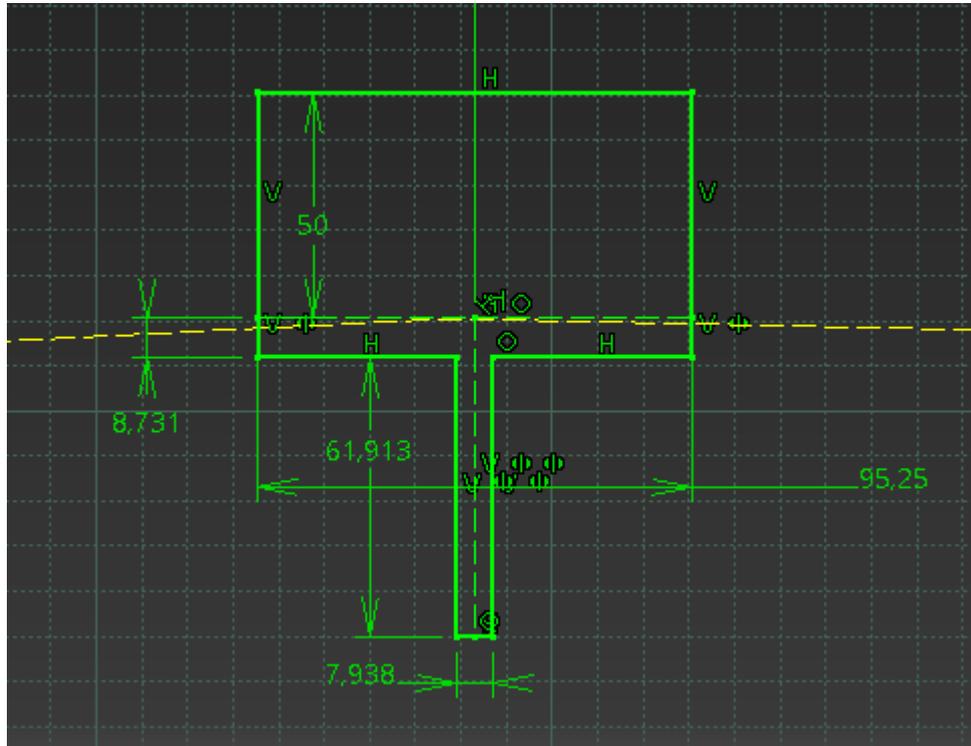


Figura 12: Perfiles de los largueros.

Para definir la guía sobre la que se extruyen estos perfiles se crean primero dos líneas, correspondientes al 33.3% y 66.7% de la cuerda del ala en el plano XY, y se extruyen verticalmente para interseccionar a la superficie exterior del ala y definir así las guías.

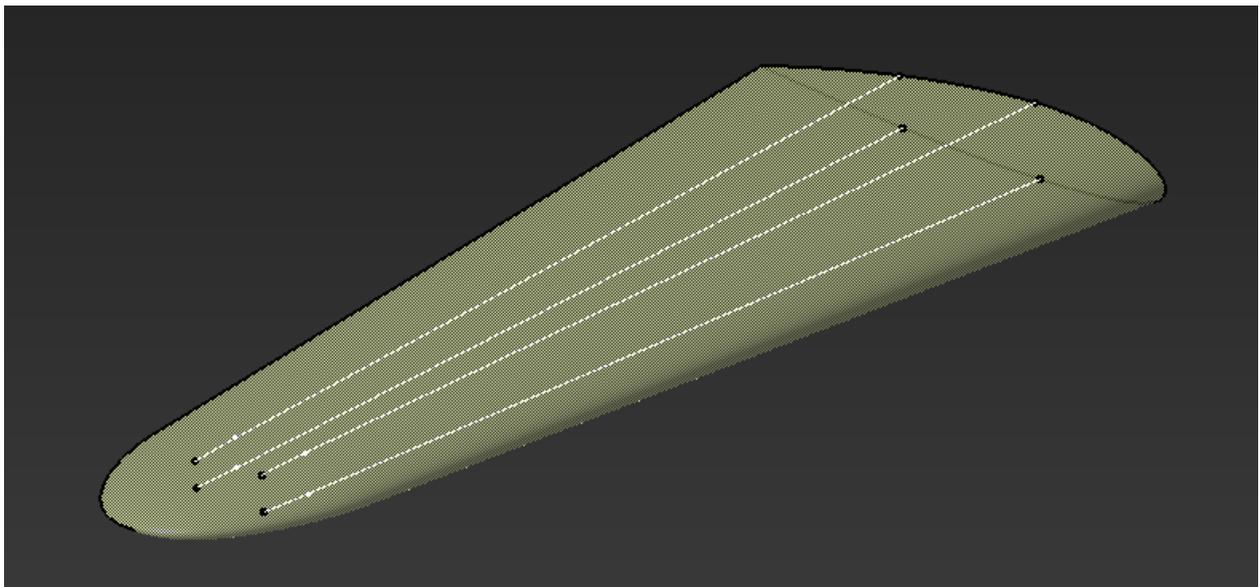


Figura 13: Guías de los largueros.

Una vez obtenidos los distintos perfiles y guías, se podrían definir los largueros mediante el comando *rib*. Sin embargo, se usa en primer lugar el comando *sweep*, creando las superficies exteriores a estos, que servirán posteriormente para las intersecciones con el resto de los elementos del ala. Como

último paso, se recorta cada sólido de los largueros con la superficie exterior del ala, para que no sobresalga ninguna esquina, y con el plano correspondiente a la costilla 24, que es hasta donde llegan los largueros.

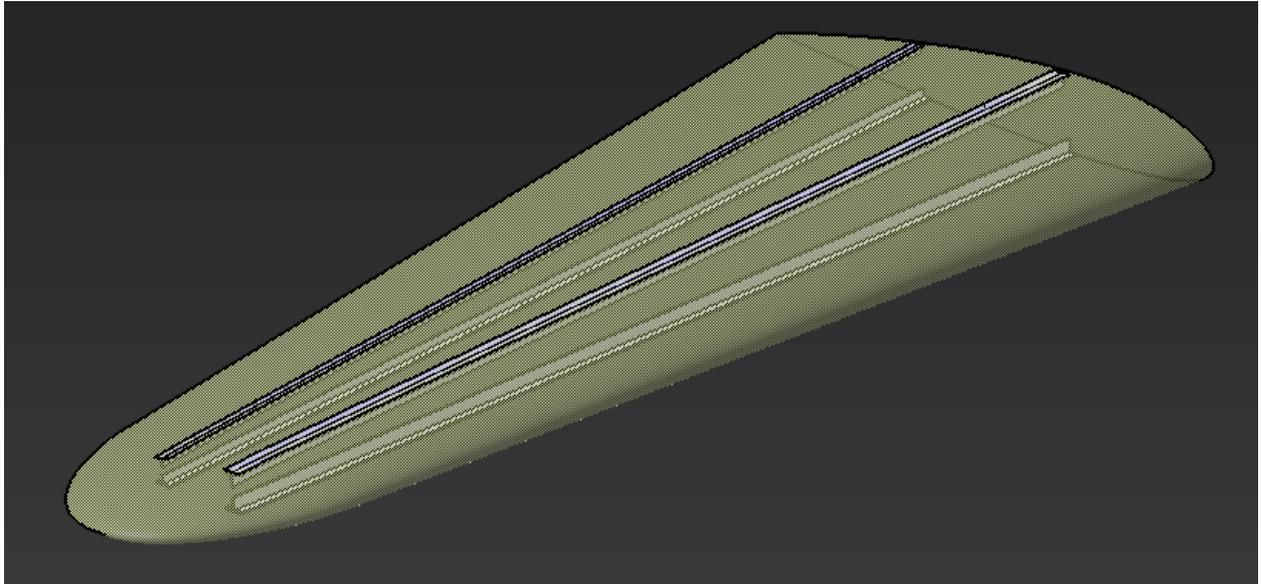


Figura 14: Largueros del ala.

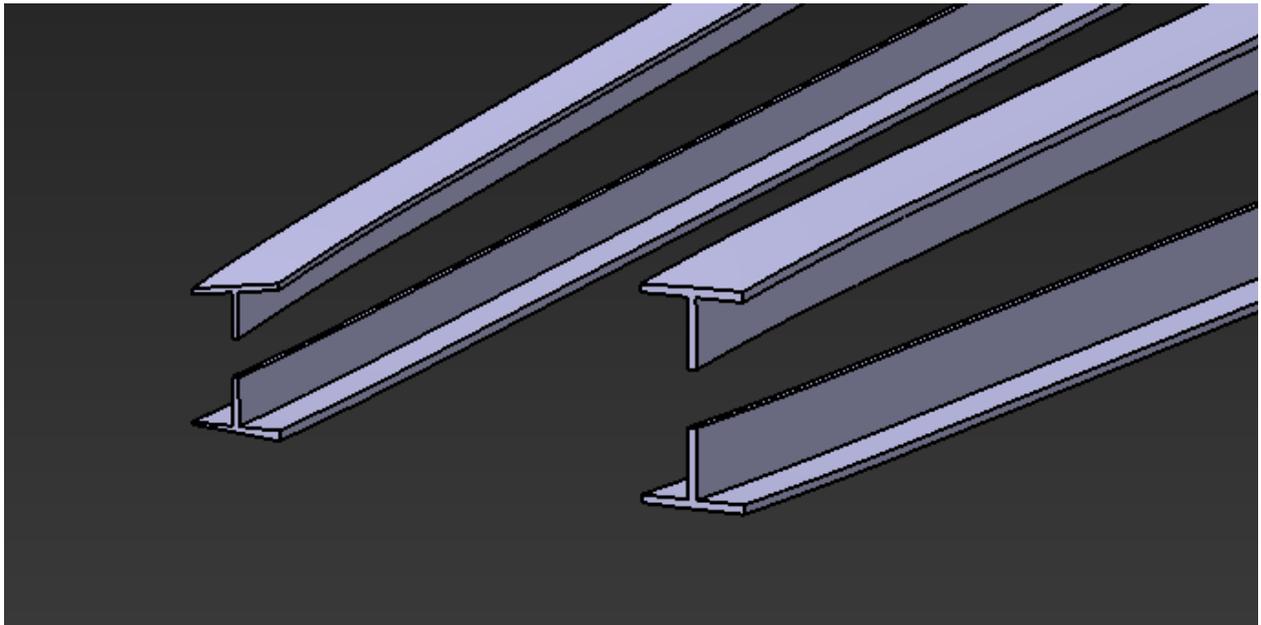


Figura 15: Detalle de los largueros.

### 3.2.2 Larguerillos

El proceso de modelado de los larguerillos es similar al seguido con los largueros, ya que consisten en largueros más pequeños que ayudan a rigidizar la piel del ala y a soportar las cargas de las costillas 25 y 26, a las que los largueros no llegan. En este caso están formados por perfiles en L, definidos en la figura siguiente.

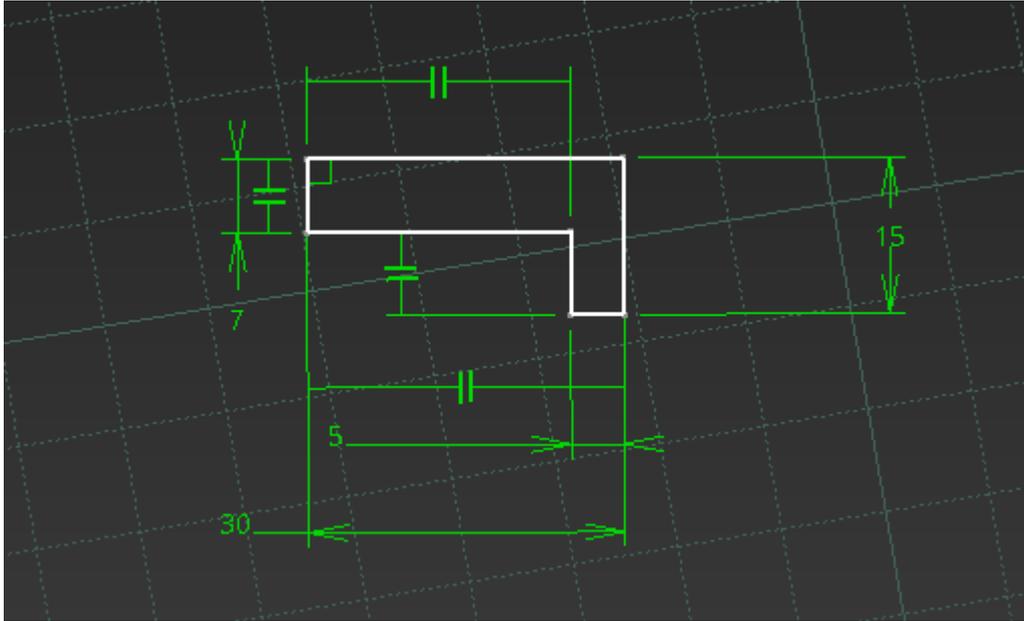


Figura 16: Perfiles de los larguerillos.

Ahora las guías se definen de la misma forma que las de los largueros, pero situadas en este caso a un 15.2% y un 50% de la cuerda. Hay que tener en cuenta también que los larguerillos van desde la costilla 1 a la 26, excepto el situado en el borde de ataque inferior, que comienza en la costilla 8 para dejar lugar al tren de aterrizaje.

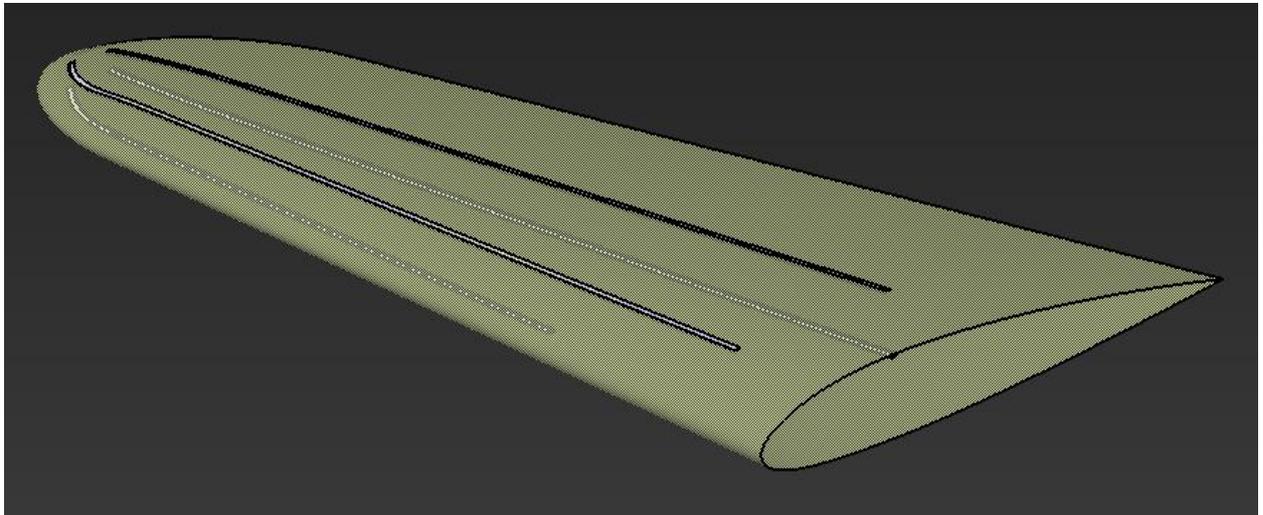


Figura 17: Larguerillos del ala.

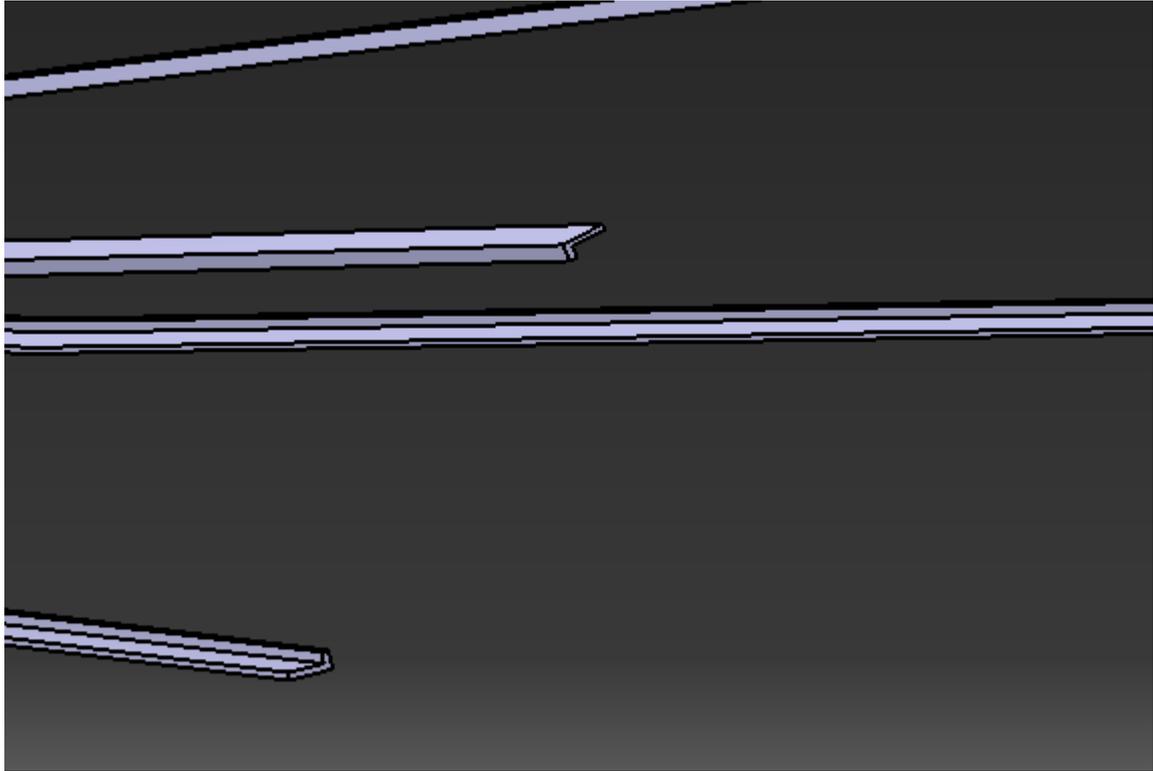


Figura 18: Detalle de los larguerillos.

### 3.2.3 Costillas

Para modelar las costillas del ala, se define un plano paralelo al XZ en la posición correspondiente a cada una (Nohara, 1993, pág. 90). En cada uno de estos planos se hace un *pad* rectangular de 28.575 mm de espesor y que sea suficientemente extenso como para contener el perfil del ala en cada costilla. A estos sólidos rectangulares se les realiza una operación de *split* con la superficie exterior del ala, ajustándose así a la forma de esta.

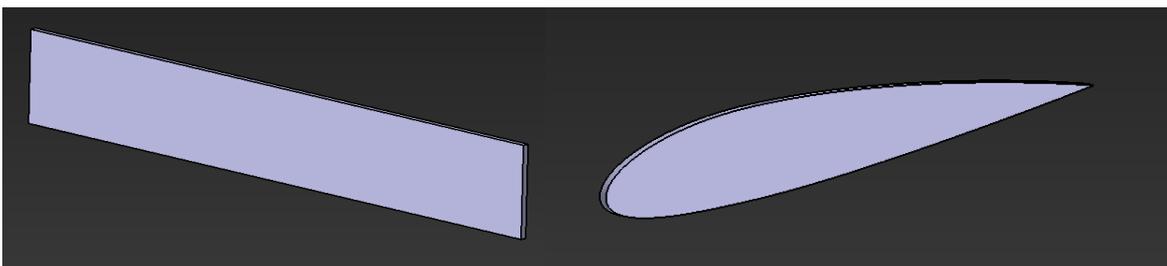


Figura 19: *Pad* de la costilla.

En cada costilla se realiza ahora un pocket con la misma forma del perfil a 5 mm del borde exterior y de 20 mm de profundidad, creando de esta manera el perfil en L que recorre el contorno de la costilla.

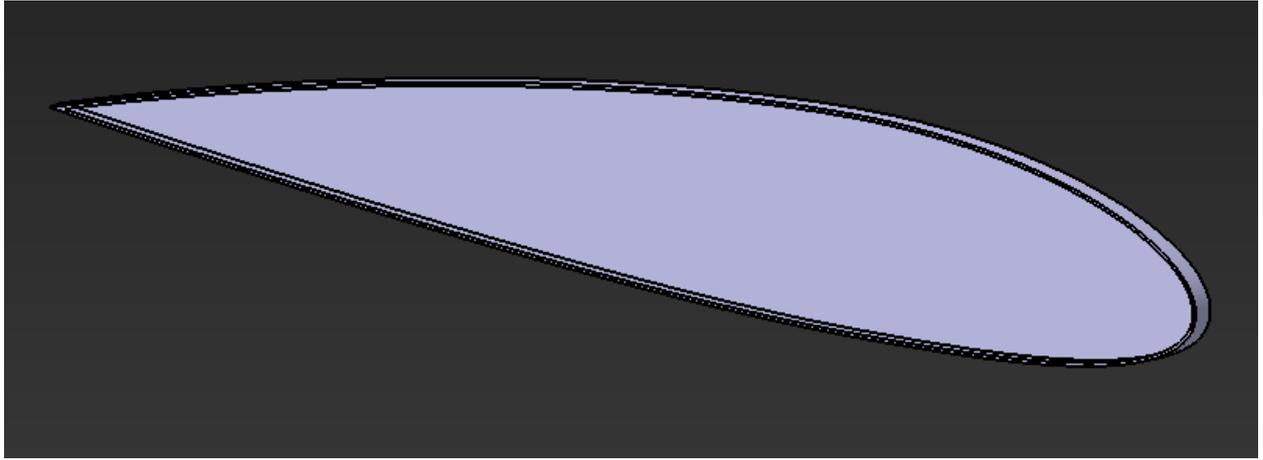


Figura 20: Costilla tras el *pocket*.

Una vez hecho esto, se crean 3 superficies a partir de *offsets* del exterior del ala, con las que se van a recortar las costillas para dejar los refuerzos verticales correspondientes en la unión con los largueros, es decir, al 33.3% y al 66.7% de la cuerda.

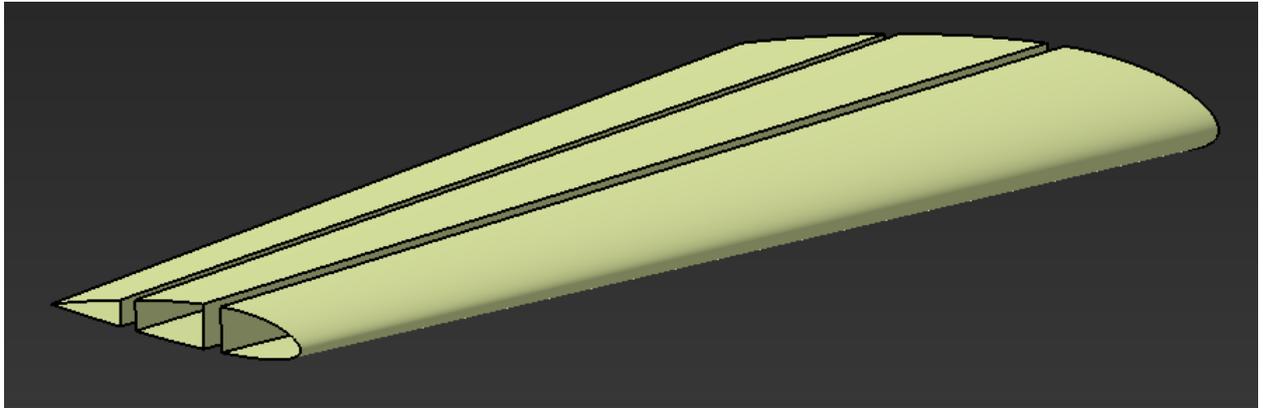


Figura 21: Superficies que recortan a las costillas.

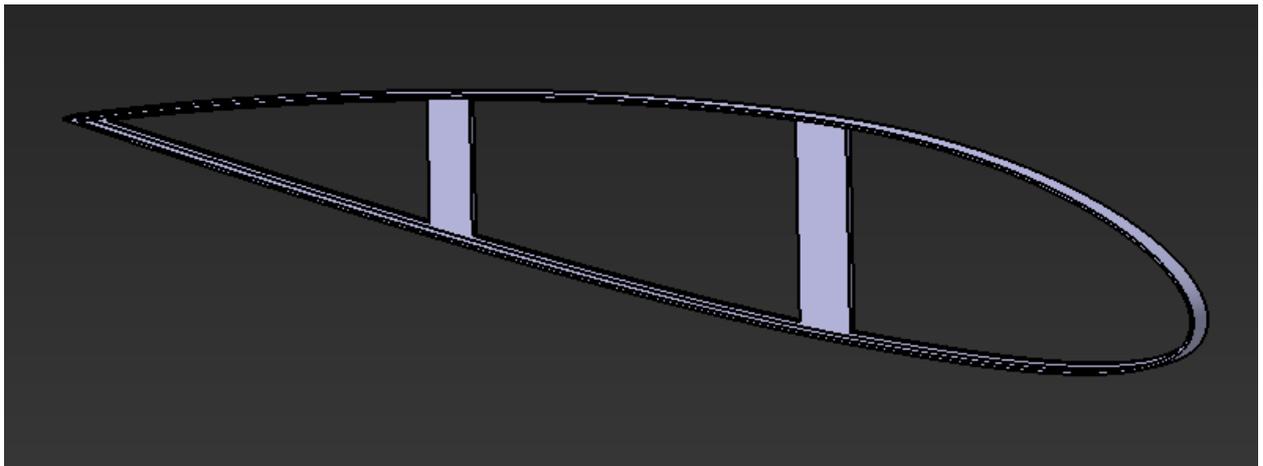


Figura 22: Costilla recortada.

Esto no se hace en las costillas 23, 24, 25 y 26, que tienen otra tipología y presentan agujeros para aligerar el peso. Son piezas más sencillas debido a que las cargas que soportan en la punta del ala son menores. Estos agujeros se realizan mediante operaciones de *hole*.

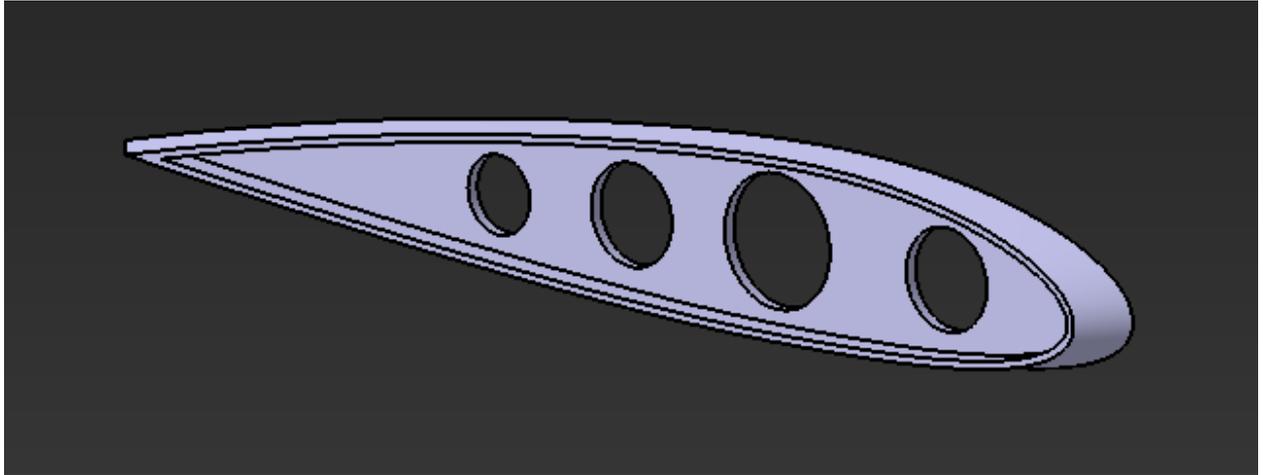


Figura 23: Costilla 26.

Por último, se realizan operaciones de *split* para acoplar el resto de los elementos del ala. En todas las costillas se debe dejar espacio para largueros y larguerillos, cuyas superficies exteriores han sido definidas previamente. Además, hay que recortar las costillas de la 1 a la 7 en la zona inferior del borde de ataque para el tren de aterrizaje, y el borde de salida de las costillas de la 9 a la 25.

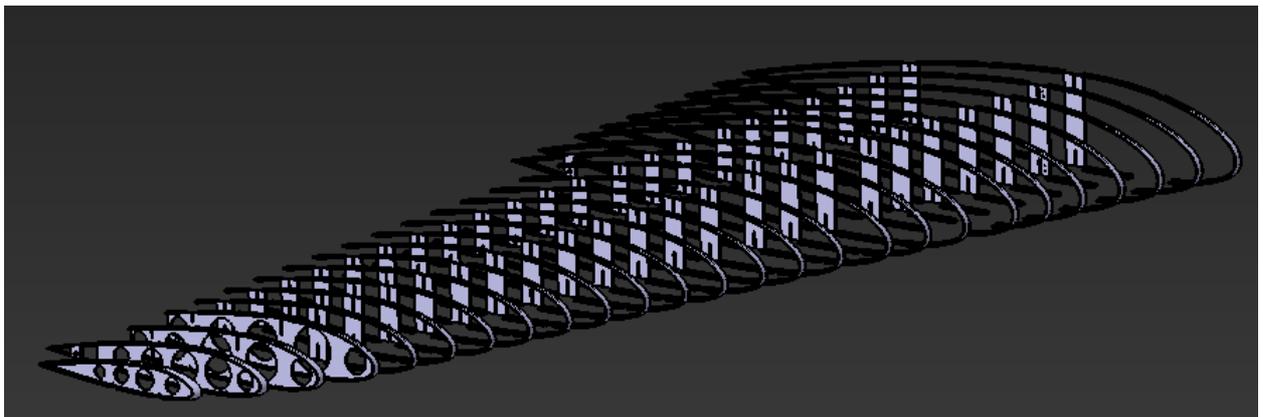


Figura 24: Costillas del ala.

#### 3.2.4 Piel

Como paso previo a dar espesor a la superficie externa del ala, se ha de realizar una operación de *shape fillet* en el módulo *Generative Shape Desing*, para adaptar la forma del ala a la del fuselaje.

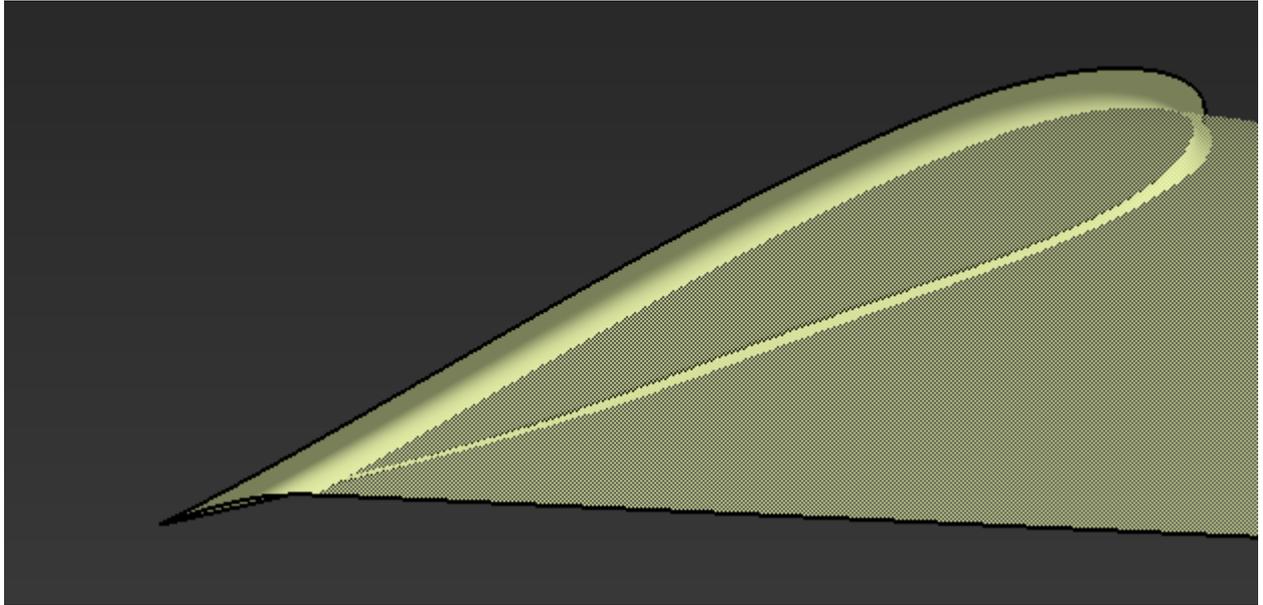


Figura 25: *Shape fillet* del ala.

Una vez hecho esto, solo queda recortar esta superficie de manera similar a las costillas para permitir el movimiento tanto del tren de aterrizaje como del alerón, y darle un espesor de 1 mm mediante una operación de *thick surface* para terminar con esta pieza.

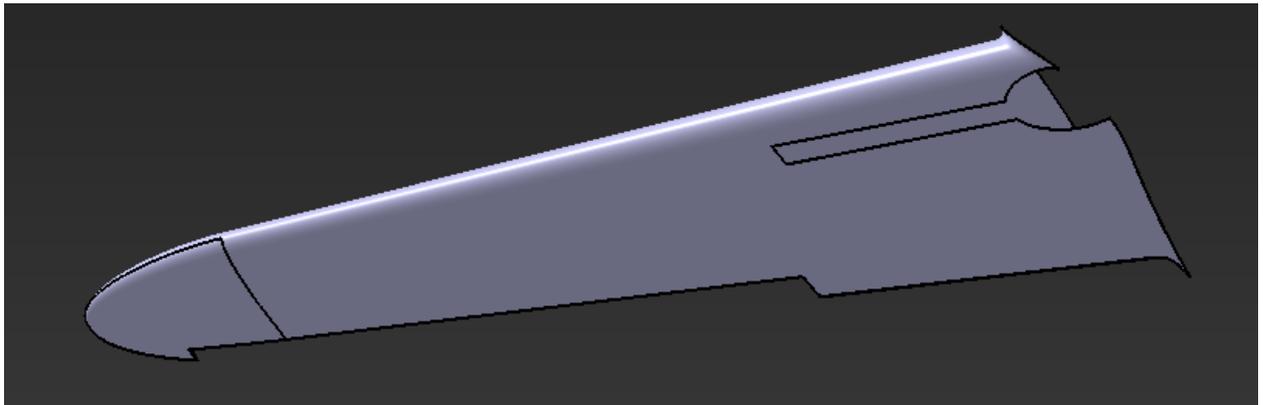


Figura 26: Piel del ala.

### 3.2.5 Alerón

El alerón es un dispositivo de control integrado en el ala, permitiendo mediante su despliegue el giro de la aeronave. Está compuesto por un eje de giro, que aporta el movimiento al sistema; 15 costillas, correspondientes al borde de salida de las costillas de la 10 a la 24, y la piel que envuelve a estos elementos (Foster, 1945, págs. 130-133).

De forma previa al modelado de las piezas del alerón, ha de realizarse una modificación en las costillas 9 y 25 que permita la unión de este sistema. Para ello, se crea un nuevo cuerpo en cada una de ellas, que consiste en un *pad* con un agujero de 20 mm de diámetro, el tamaño del eje de giro del alerón.

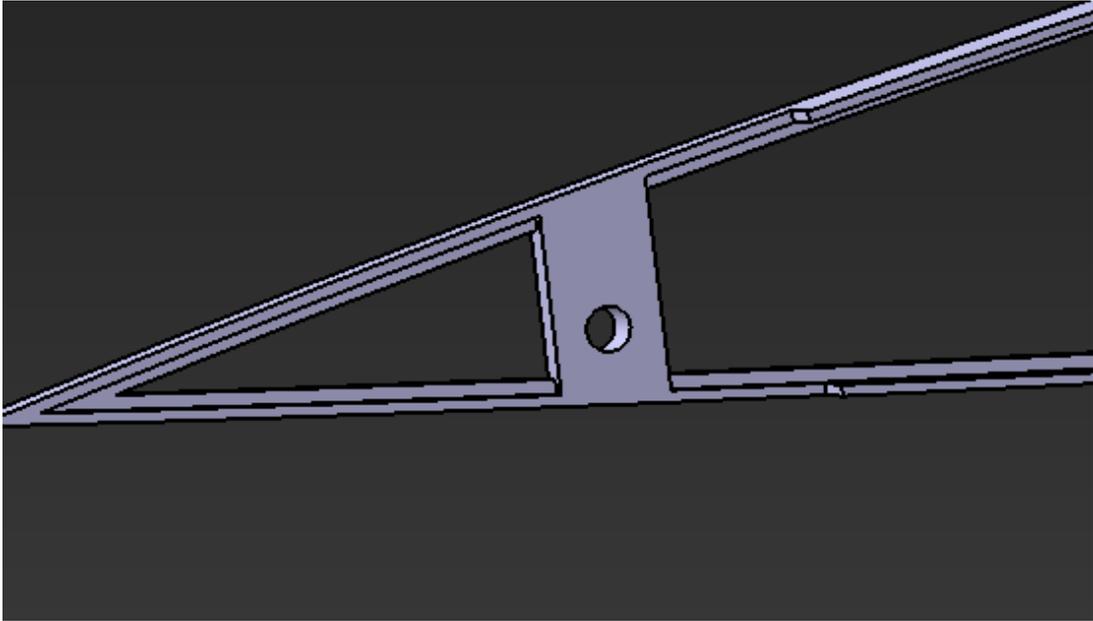


Figura 27: Soporte del alerón en la costilla 9.

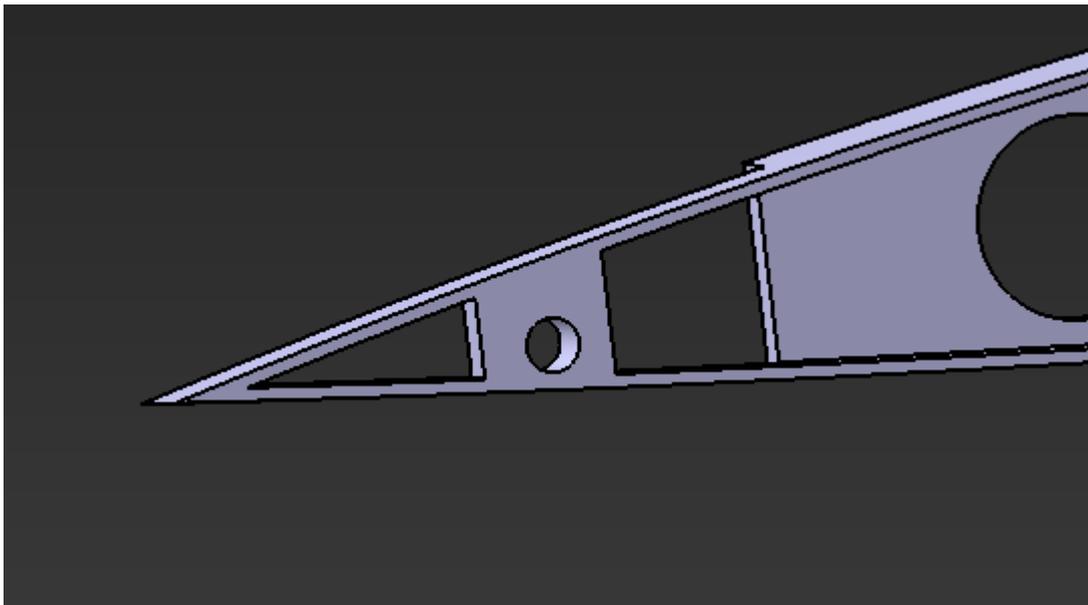


Figura 28: Soporte del alerón en la costilla 25.

Como primer paso ya dentro del alerón, se comenzará por definir la superficie que lo envuelve. Esta consiste en un *split* de la superficie exterior del ala, a la altura del eje de giro, al que se le añade una superficie curva en la parte delantera. Esta superficie curva se obtiene mediante una *multi-section surface* aplicada a dos perfiles de arco de circunferencia en cada uno de los extremos del alerón.

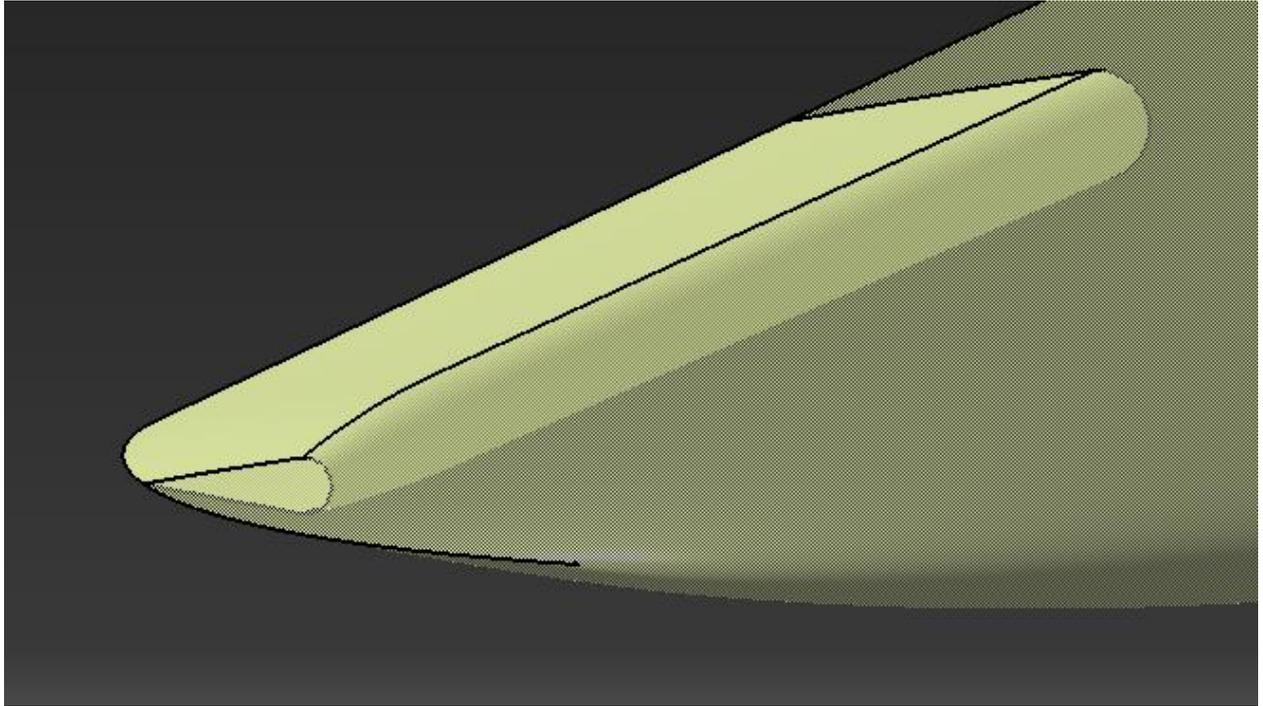


Figura 29: Superficie exterior del alerón.

#### 3.2.5.1 Eje de giro

El eje de giro del alerón consiste en un cilindro de 20 mm de diámetro, y se modela mediante un *pad* de estas dimensiones que va desde el plano XZ correspondiente a la costilla 9 hasta el de la costilla 25.

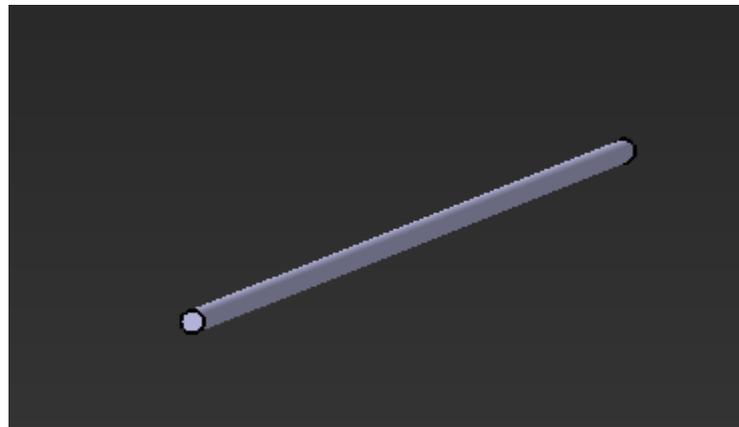


Figura 30: Eje de giro del alerón.

#### 3.2.5.2 Costillas

Para modelar las costillas del alerón, se realiza un procedimiento análogo, pero más sencillo, al ya realizado con las del ala. Se parte de un *pad* rectangular, en este caso de 4 mm de espesor, en cada uno de los planos correspondientes a las costillas de la 10 a la 24. A cada una de estas piezas se le hacen dos agujeros: uno correspondiente al eje en el que van encajadas, y otro de mayor tamaño cercano al borde de salida para aligerar el peso de la estructura.

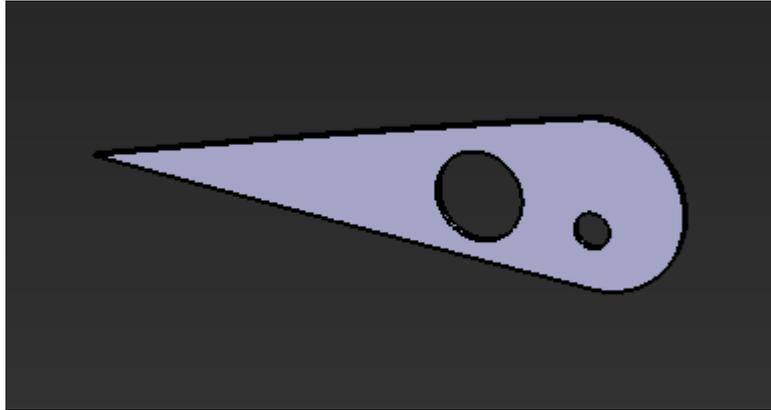


Figura 31: Costilla 1 del alerón.

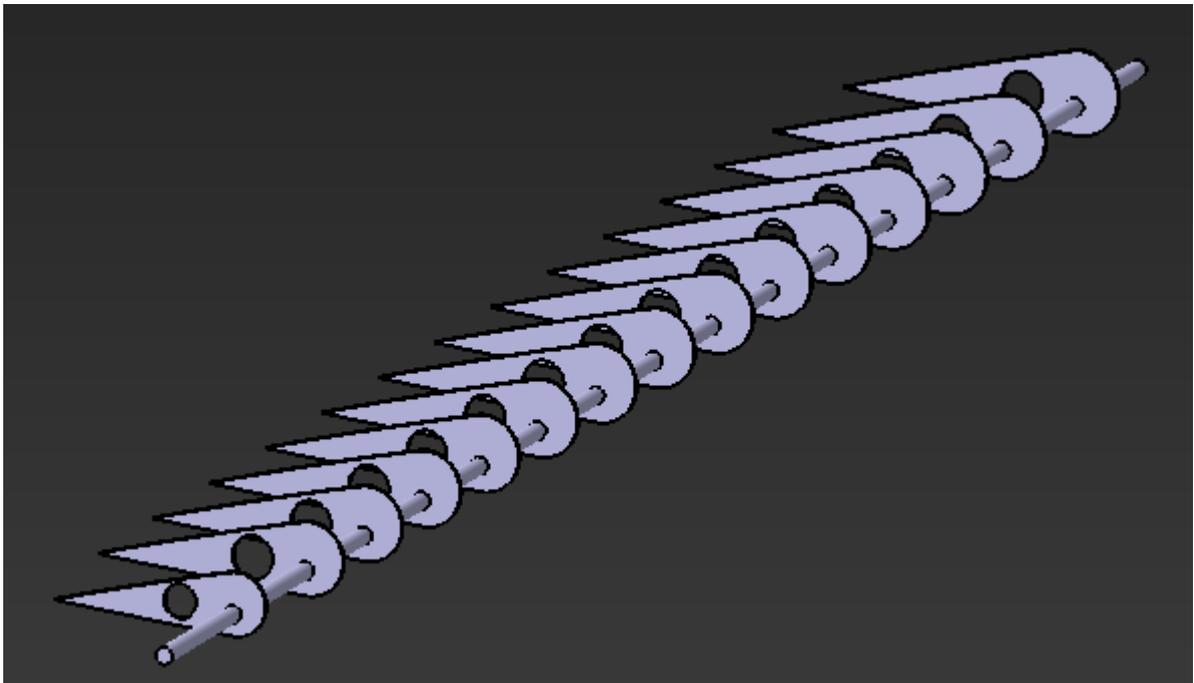


Figura 32: Costillas del alerón colocadas en el eje de giro.

### 3.2.5.3 Piel

En cuanto a la piel que cubre al alerón, simplemente se le da espesor a la superficie definida anteriormente mediante la operación thick surface.

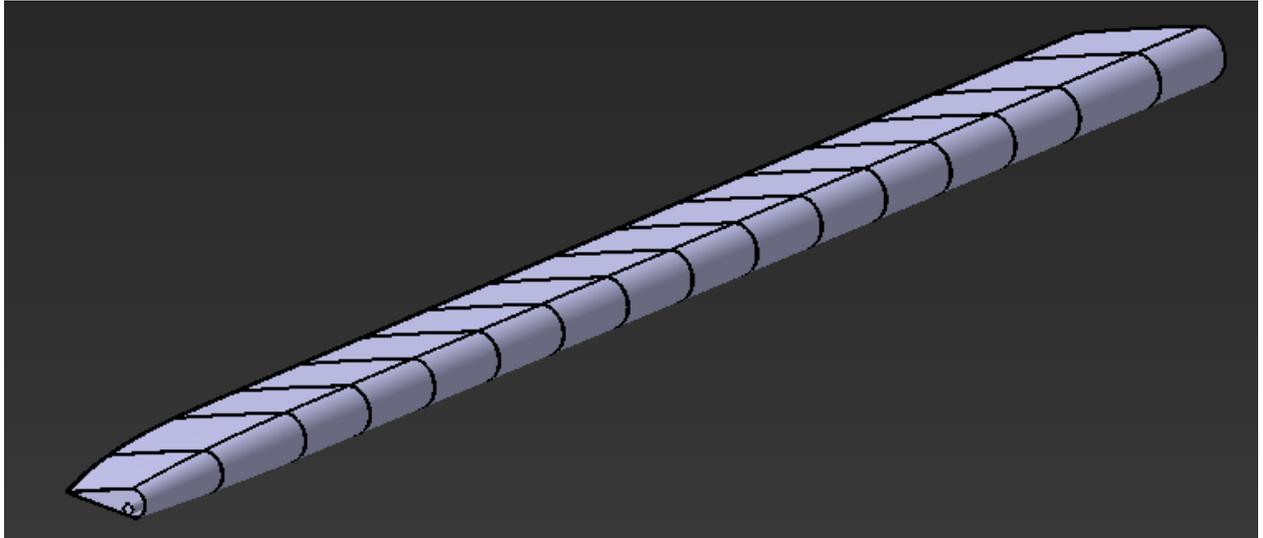


Figura 33: Alerón completo.

### 3.2.6 Tren de aterrizaje principal

El tren de aterrizaje es el sistema que permite a la aeronave el despegue, aterrizaje y control en tierra. En el caso del Mitsubishi Zero, se encuentra anclado al grupo alar, por lo que se modela dentro de este subconjunto. Concretamente, se halla enganchado entre las costillas 7 y 8, cerca del borde de ataque del ala. Está compuesto por el brazo extensible, una rueda y una cubierta (Nohara, 1993, págs. 32-33).

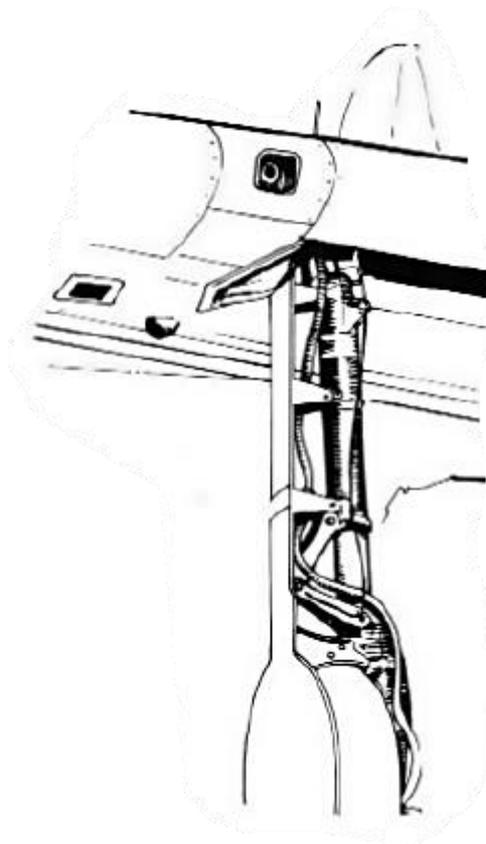


Figura 34: Ilustración del tren de aterrizaje (Nohara, 1993, pág. 52).

De manera similar a como se hizo en el alerón, antes de modelar las piezas del tren se procede a

adaptar el larguero inferior del borde de ataque para la unión de este conjunto. En este caso, se realiza una operación de *pad* a la que se añade un cilindro de 20 mm de diámetro donde irá acoplado el brazo del tren de aterrizaje.

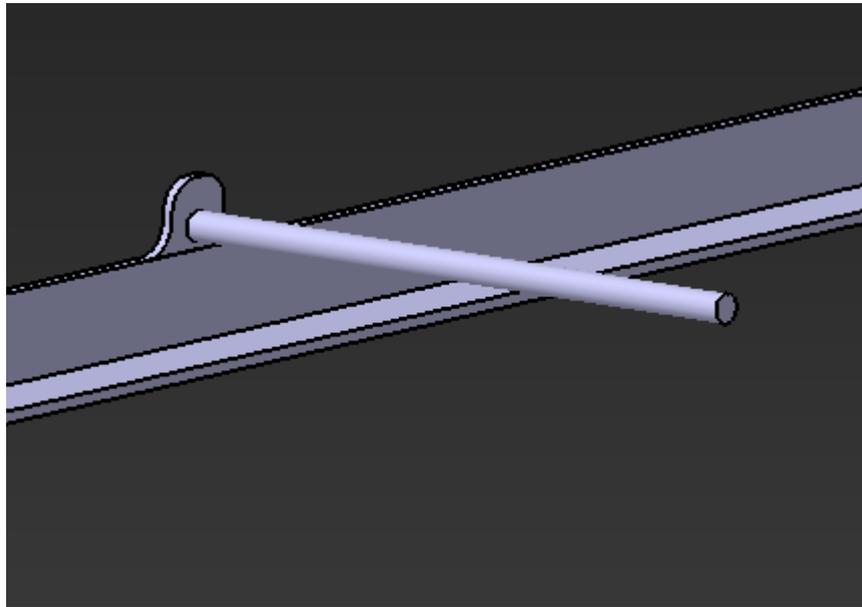


Figura 35: Soporte del tren en el larguero.

#### 3.2.6.1 Brazo

Comenzando por el enganche al ala, se crean dos cilindros mediante operaciones de *pad*, de 40 mm de diámetro, que permiten simular el sistema de despliegue. A estos cilindros se le añade otro, de 88.9 mm de diámetro y 1250 mm de longitud, que funciona como parte principal del brazo.

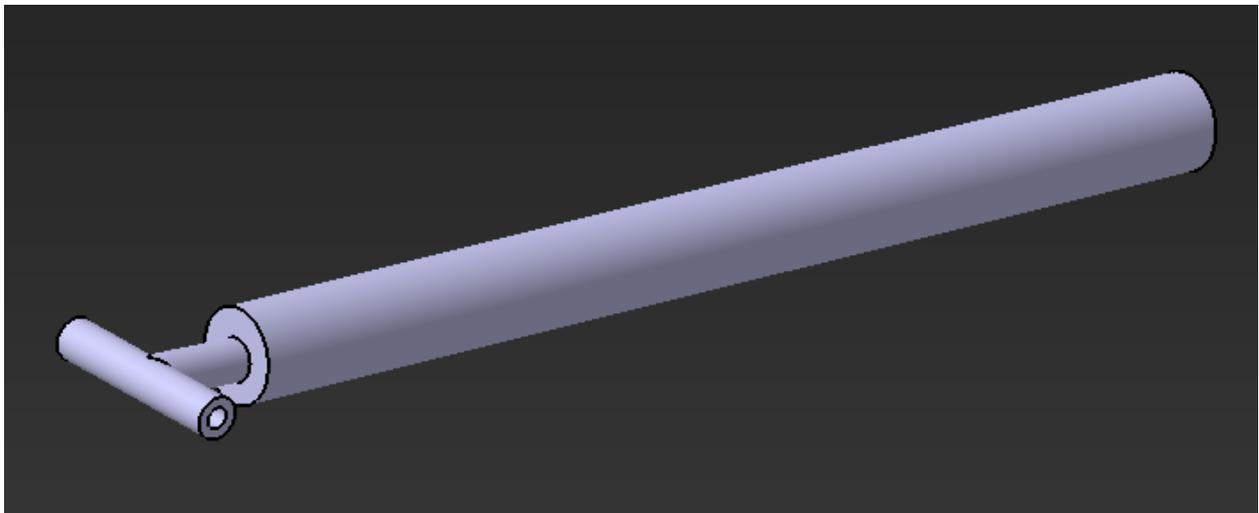


Figura 36: Cilindros del brazo.

En el otro extremo de este cilindro se le añade la unión con la rueda, creada mediante operaciones de *multi-section surface* y *fill* hasta conseguir la forma deseada. Una vez se tiene la superficie externa de esta unión, se hace una operación de *close surface* para que sea una pieza sólida.

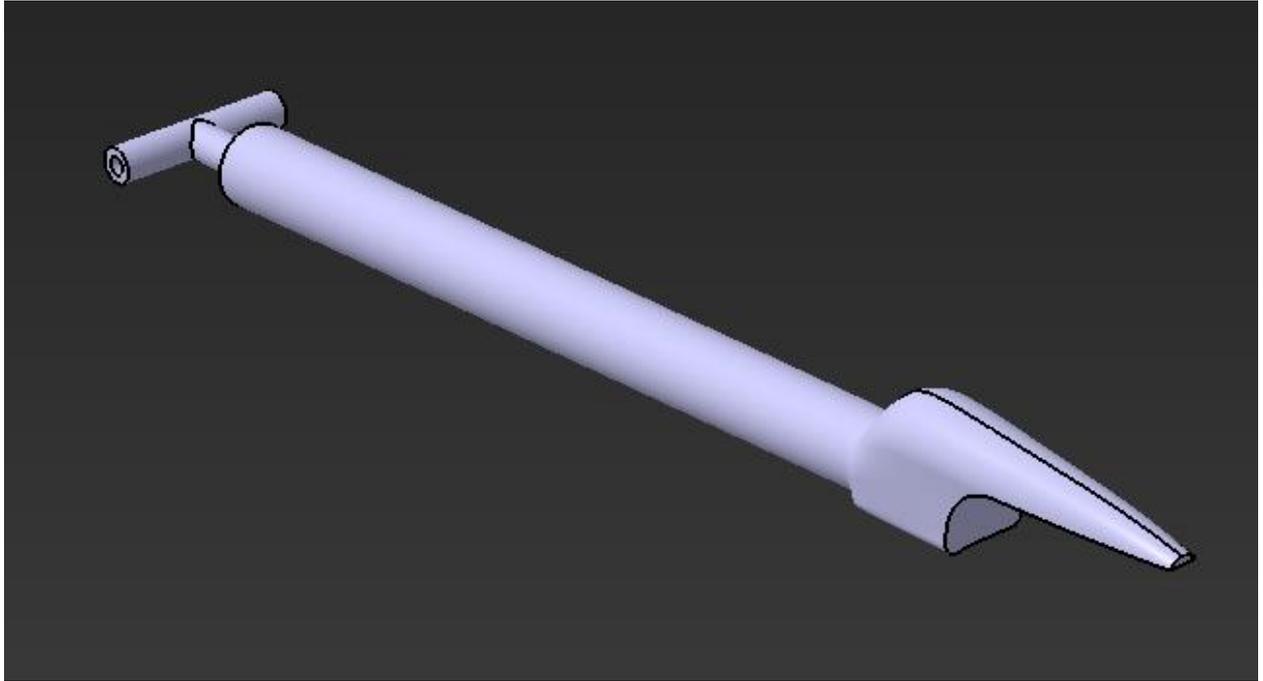


Figura 37: Brazo del tren de aterrizaje.

### 3.2.6.2 Rueda

A la hora de modelar la rueda, se comienza por el neumático de 600 mm de diámetro y 175 mm de ancho, que se modela mediante un *pad* de estas dimensiones. Esta pieza se redondea con un *edge fillet* de 800 mm de radio y se le realiza un vaciado mediante la operación *shell*.

Para terminar, se incluye la llanta mediante un nuevo *pad* cilíndrico, esta vez de 300 mm de diámetro y 185 mm de ancho, que se añade al neumático mediante una operación booleana.

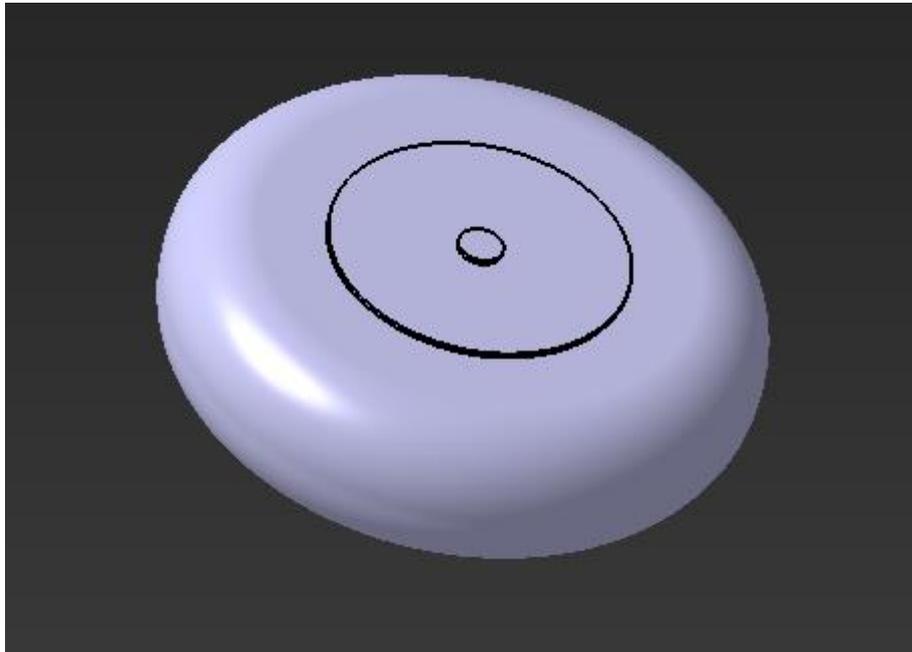


Figura 38: Rueda del tren.

### 3.2.6.3 Cubierta

Para modelar la cubierta externa, basta con dar espesor a la superficie que se ha recortado anteriormente del ala correspondiente al hueco que se deja para el tren de aterrizaje. Esta pieza se completa mediante dos enganches, modelados mediante *pads*, que se agujerean para permitir el paso del brazo del tren.

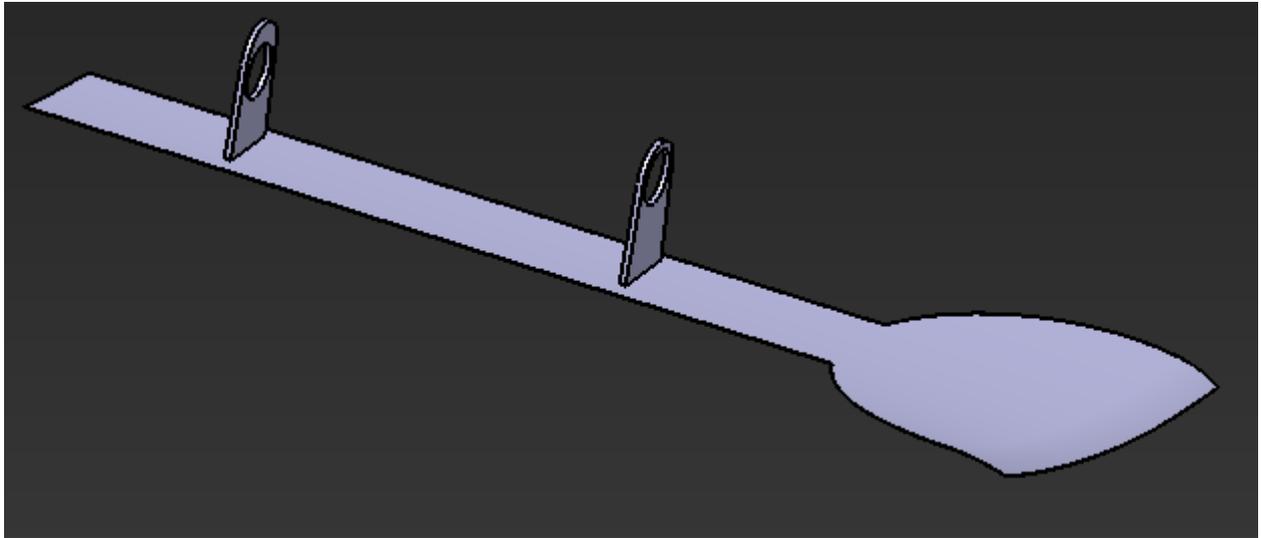


Figura 39: Cubierta del tren.

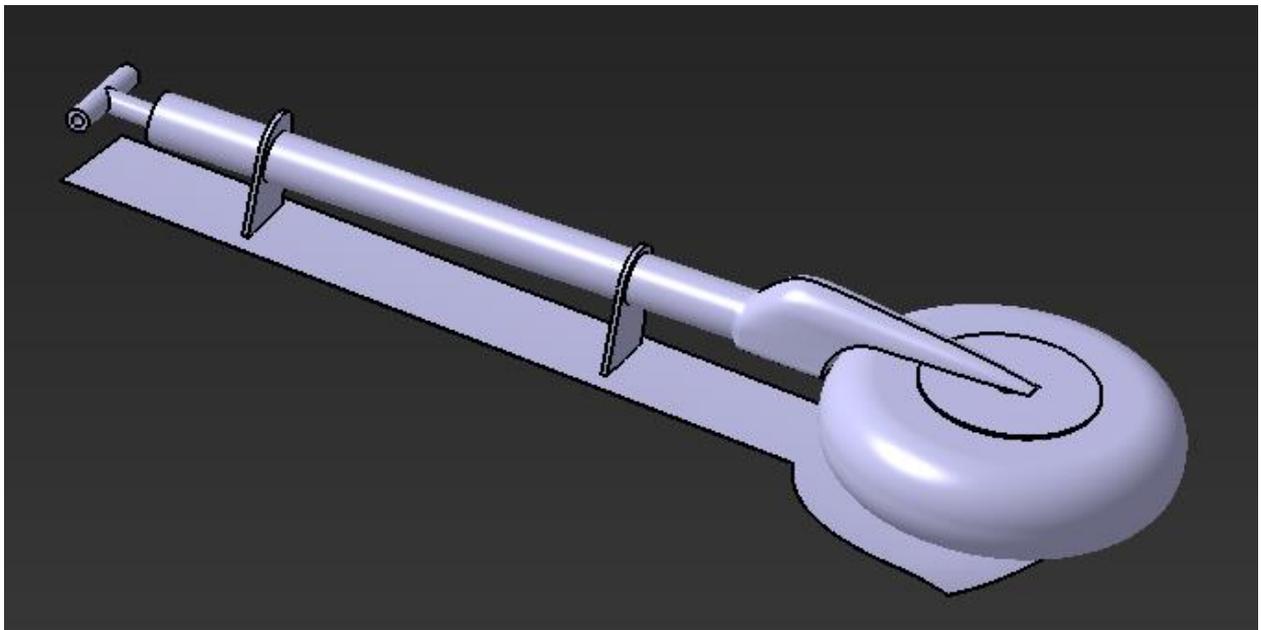


Figura 40: Tren de aterrizaje principal.

Con esta pieza, se da por finalizado el modelado del subconjunto correspondiente al ala.

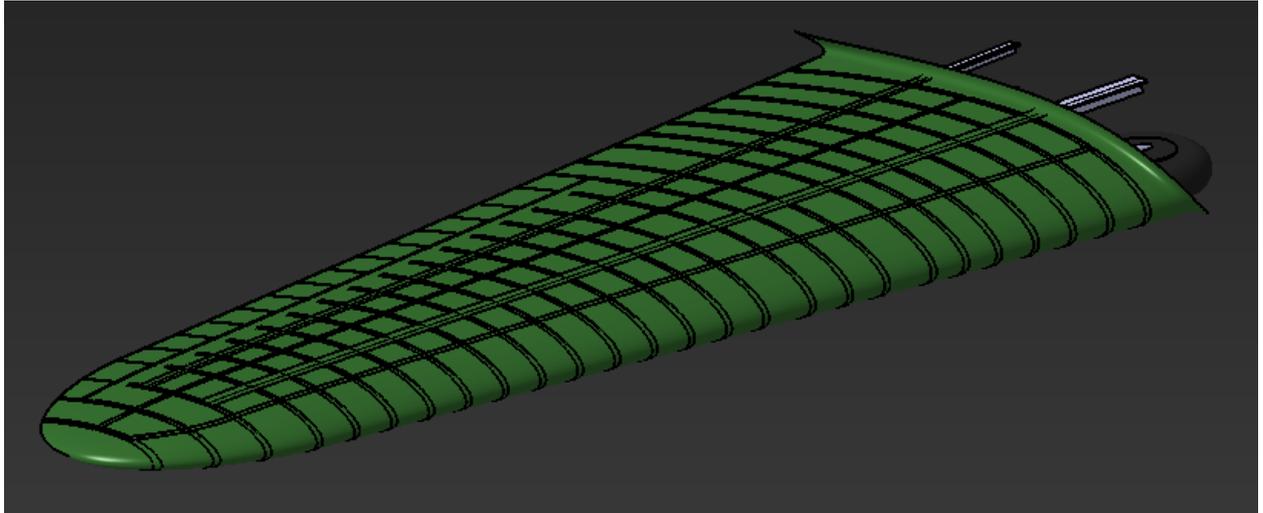


Figura 41: Ala con dispositivos plegados.

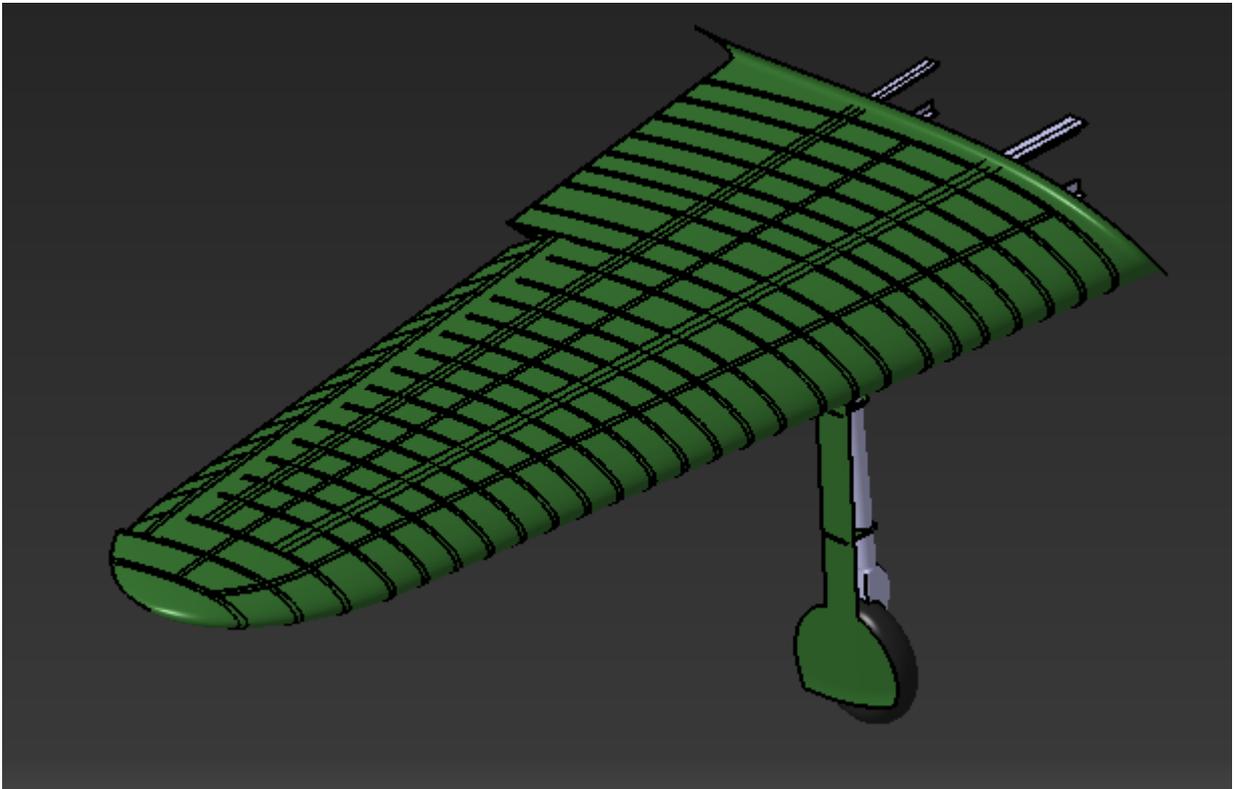


Figura 42: Ala con dispositivos desplegados.

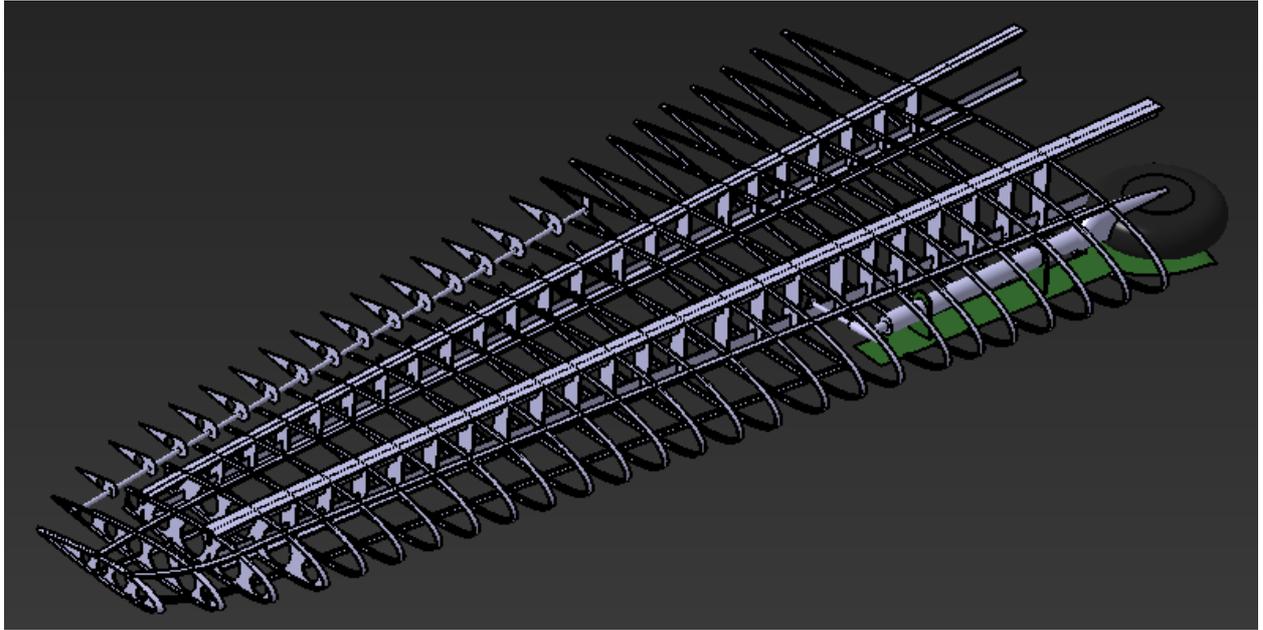


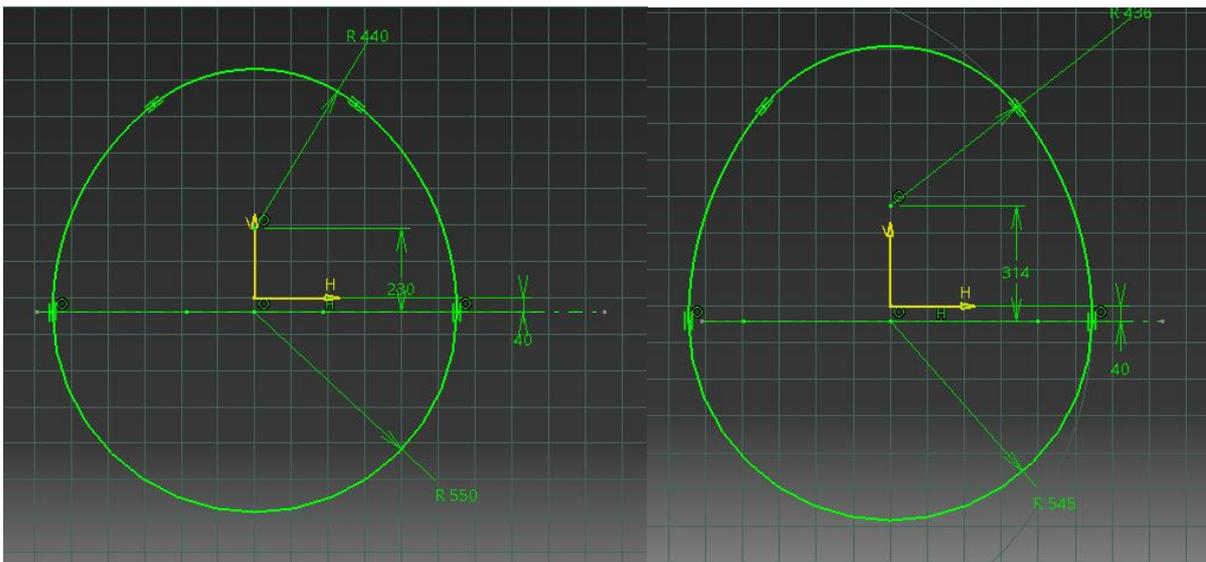
Figura 43: Estructura interna del ala.

### 3.3 Fuselaje

Ya modelado el conjunto alar se continúa con el fuselaje, que es el punto de unión entre el resto de las partes del avión.

Estructuralmente, sigue un esquema similar al visto en el ala, con cinco largueros como elementos longitudinales principales y 18 cuadernas, en este caso, como elementos transversales, que se rigidizan mediante larguerillos adicionales y las planchas metálicas que forman la piel.

Adicionalmente, también se encuentran en el fuselaje el grupo motor, la cabina, y el tren de aterrizaje secundario, cuyos elementos se describirán más adelante.



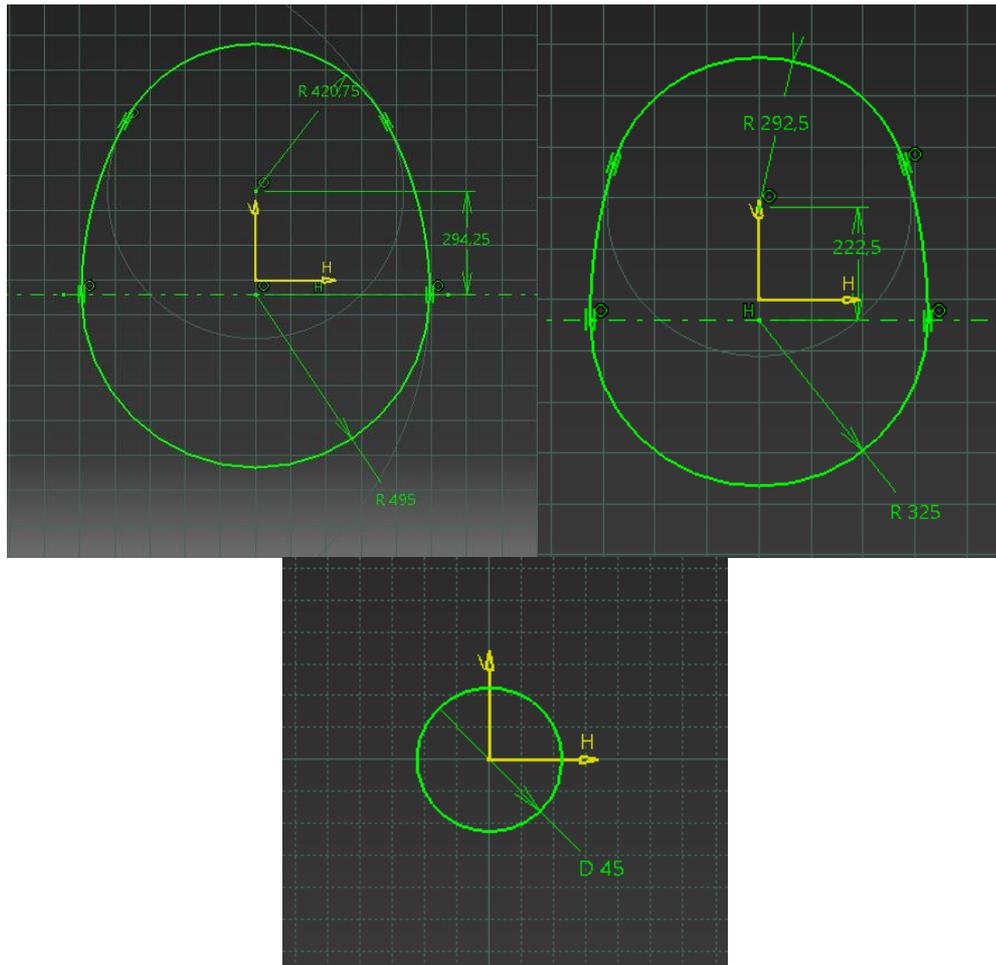


Figura 44: Secciones del fuselaje.

A la hora de modelarlo, se empieza por la superficie exterior, que queda definida mediante las 6 secciones transversales mostradas en los planos (Nohara, 1993, pág. 88). Para trasladar estos planos a CATIA, se traza un *sketch* correspondiente a cada sección y se coloca a la distancia adecuada en el eje X mediante planos paralelos al YZ. Una vez obtenidos, se crea una superficie de sección variable que siga a estos perfiles para terminar la superficie exterior.

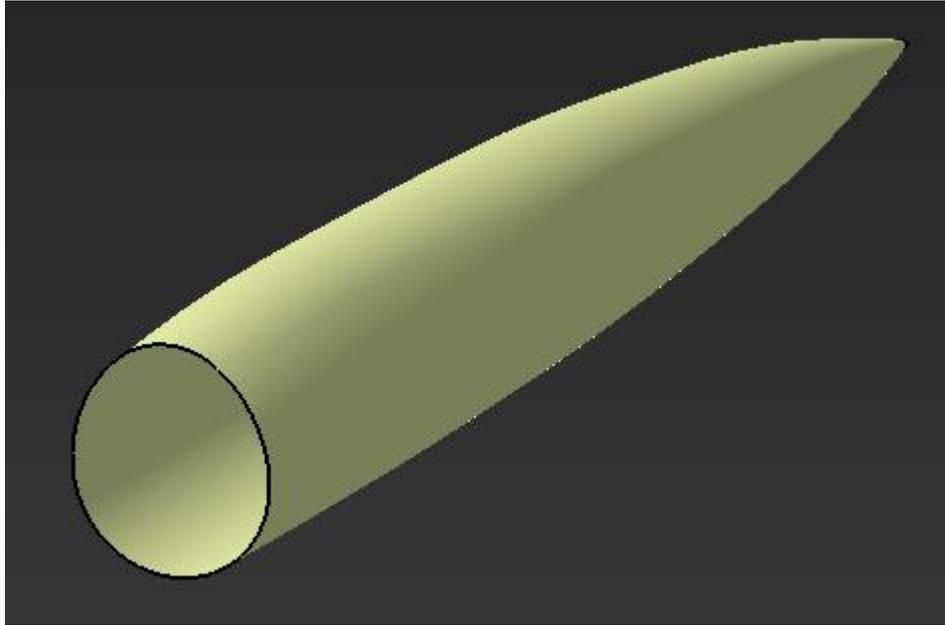


Figura 45: Superficie exterior del fuselaje.

### 3.3.1 Largueros

El fuselaje presenta cinco largueros en total, de los que hay tres tipos. Cuatro largueros se encuentran en la parte delantera del fuselaje, entre las cuadernas 1 y 7. Los dos superiores tienen sección de tipo “sombbrero” y los dos inferiores presentan sección de C y siguen la forma del extradós del ala. El último larguero tiene también sección de tipo “sombbrero” y se encuentra en la parte inferior trasera del fuselaje, entre las cuadernas 7 y 16.

Debido a que, de los cuatro largueros delanteros, dos son simétricos, se procederá a modelar únicamente los de un lado del fuselaje. El primer paso consiste en definir las secciones que los conforman.

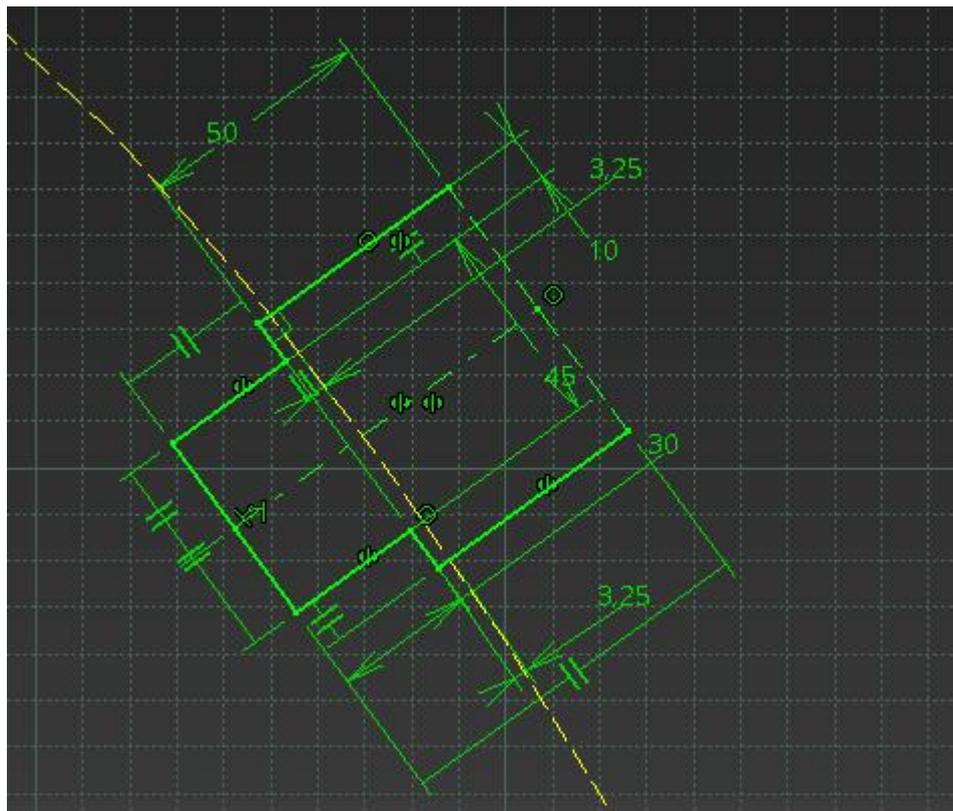


Figura 46: Perfil del larguero delantero superior.

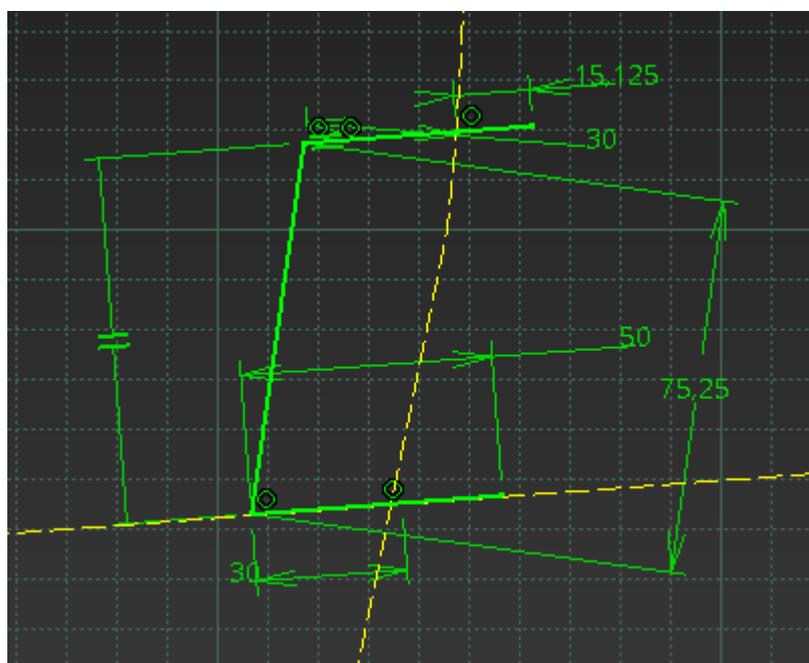


Figura 47: Perfil del larguero delantero inferior.

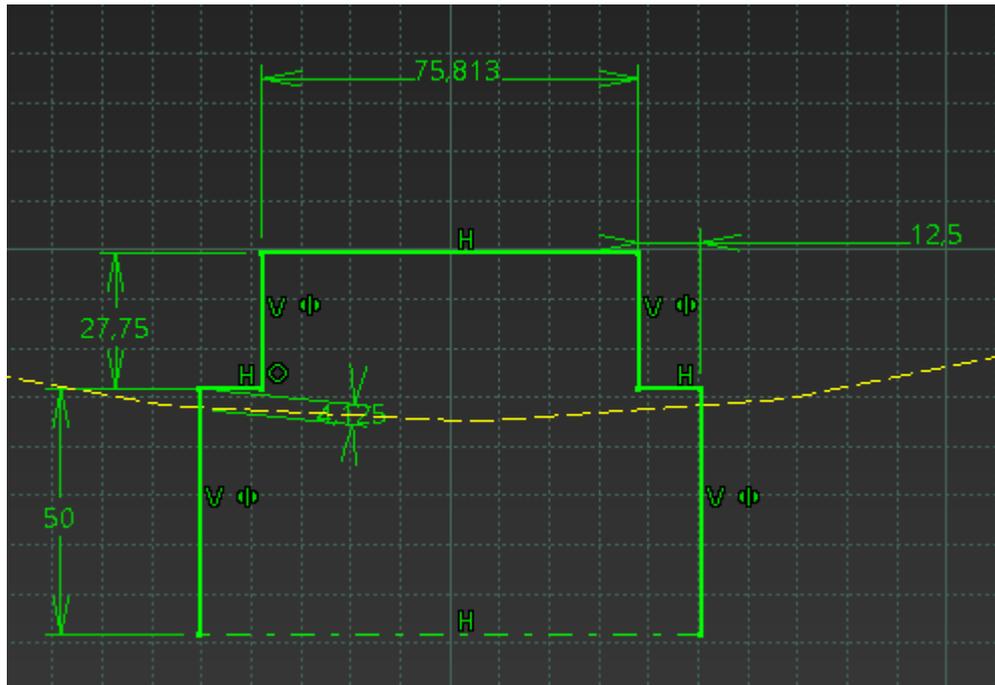


Figura 48: Perfil del larguero trasero.

Una vez hecho esto, se realiza para cada larguero una operación de *sweep* con los parámetros adecuados para mantener la orientación de la sección en todo momento, obteniendo así la superficie externa de cada uno.

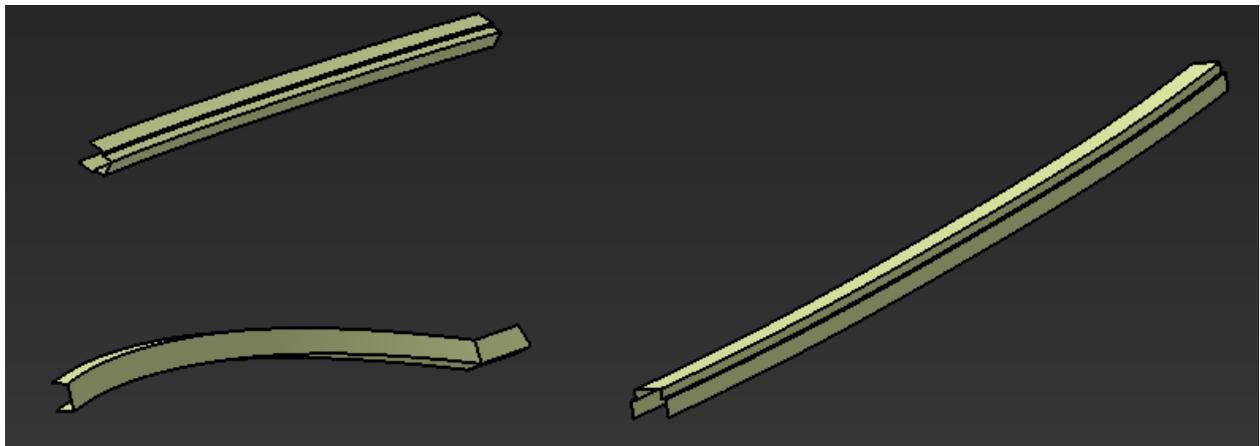


Figura 49: Superficies externas de los largueros.

Estas superficies se completan mediante operaciones de *fill* y se convierten en elementos sólidos de la misma manera que se ha hecho con otras piezas. A estos sólidos se les realiza, además, una operación de *split* para que no sobresalgan de la superficie del fuselaje.

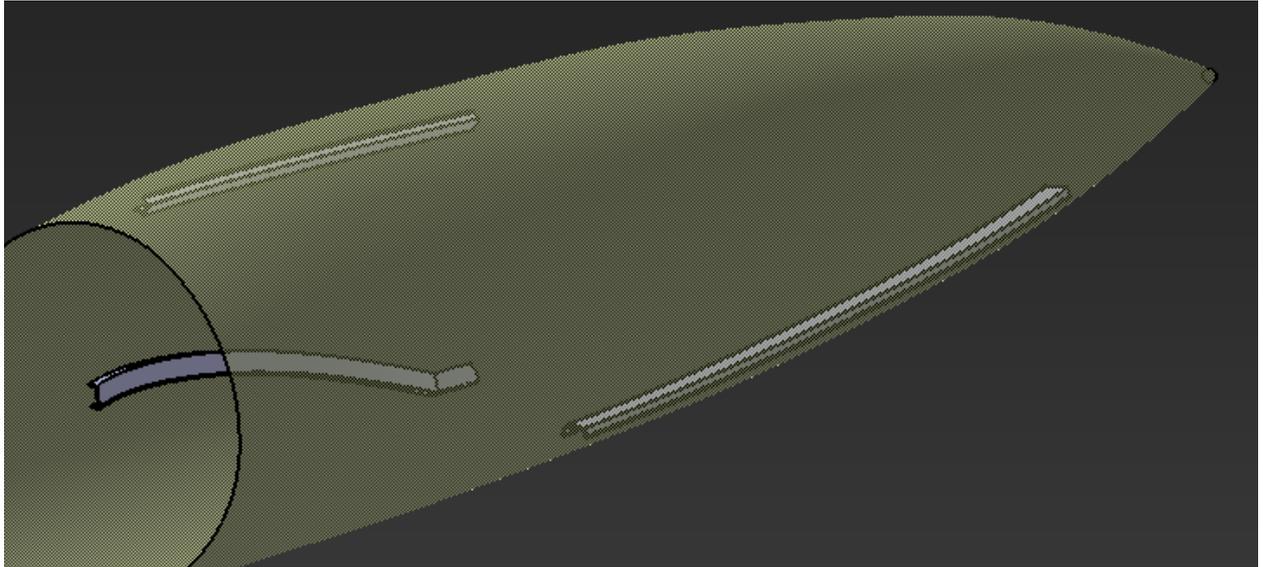


Figura 50: Largueros del fuselaje.

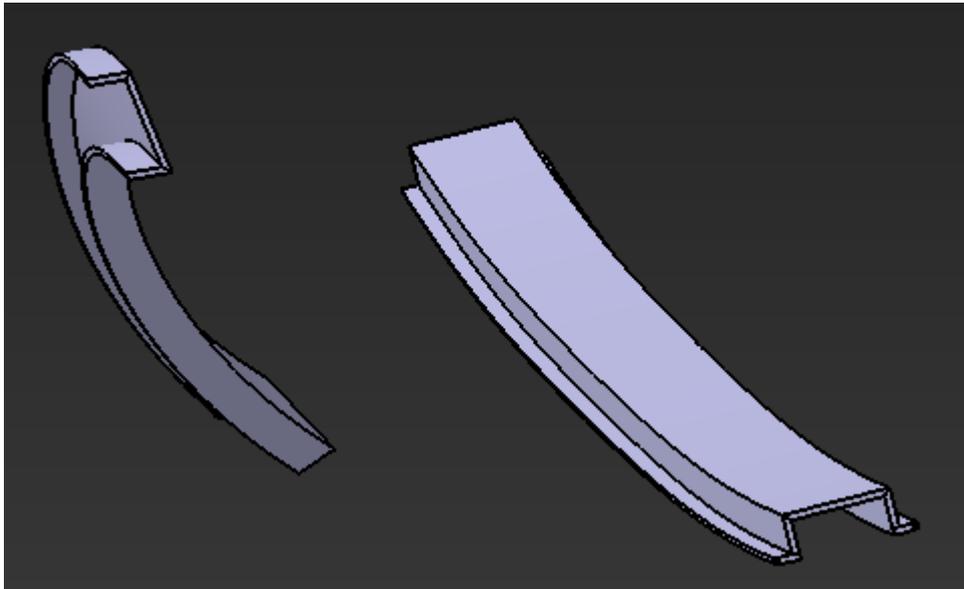


Figura 51: Detalle de los largueros.

### 3.3.2 Larguerillos

Para los larguerillos se sigue un procedimiento similar al que se ha seguido tanto con los largueros como con los elementos estructurales longitudinales del ala. En este caso, son cinco larguerillos con sección en forma de L.

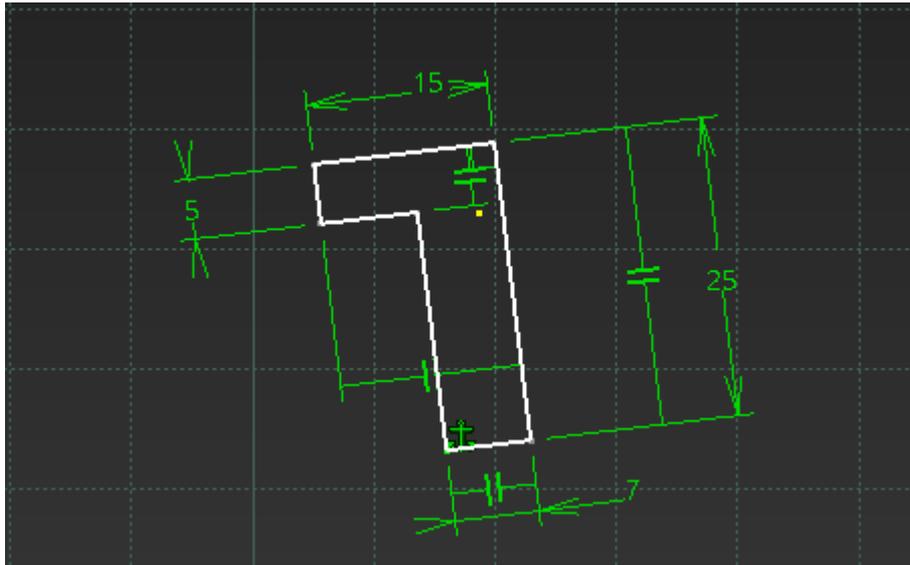


Figura 52: Secciones de los larguerillos.

Cuatro de ellos se sitúan en los laterales del fuselaje, dos a cada lado, desde la primera cuaderna hasta la última. El último se encuentra en la parte superior, llegando también hasta el final del fuselaje, pero partiendo de la cuaderna 7, que es donde acaba la cabina del piloto.

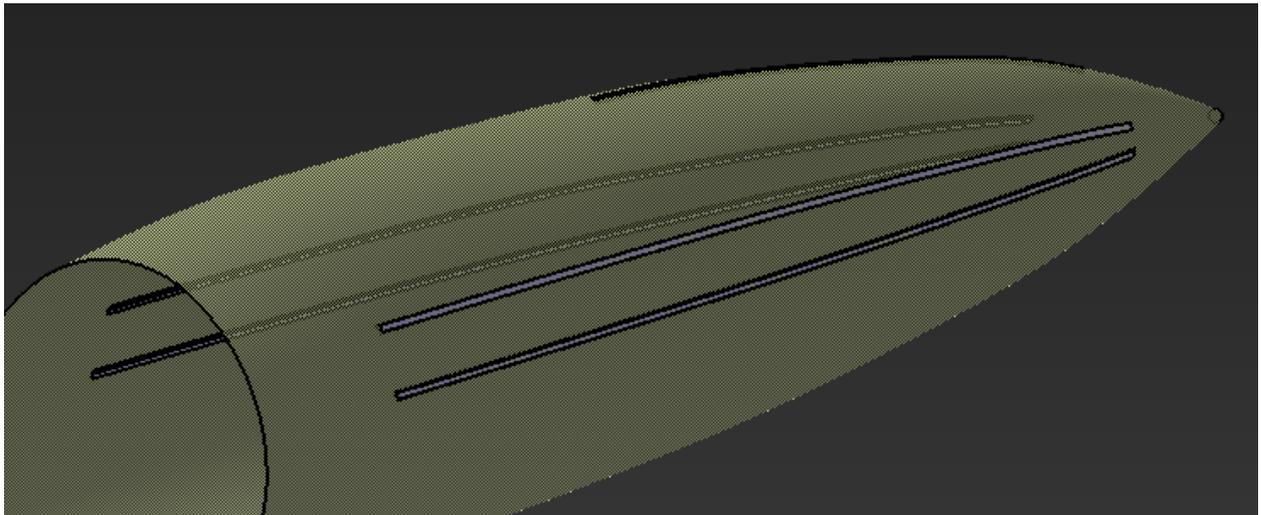


Figura 53: Larguerillos del fuselaje.

### 3.3.3 Cuadernas

Las cuadernas del fuselaje son 18 elementos en total, que mantienen la forma del mismo y soportan al resto de elementos. Hay dos, la primera y la última, que son distintas al resto y se describirán al final del epígrafe. En cuanto a las 16 restantes, el primer paso es definir un plano paralelo al YZ en la coordenada X correspondiente para cada una (Nohara, 1993, pág. 88). Estas cuadernas presentan una sección en forma de J como la que se describe a continuación.

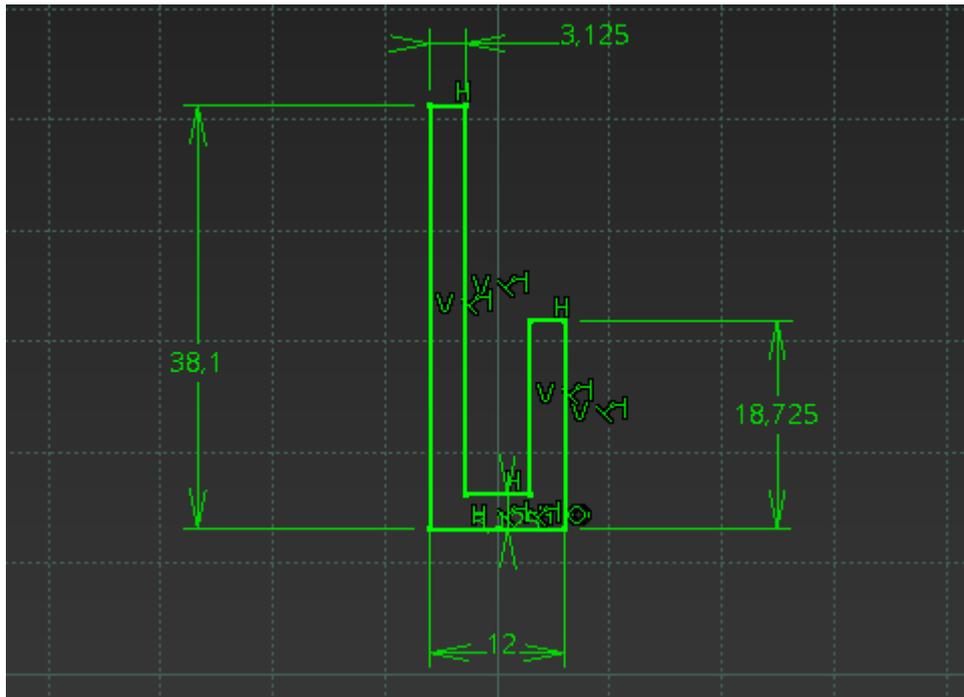


Figura 54: Sección de la cuaderna.

Para modelar cada cuaderna, se realiza una operación de *rib* en cada una, cuya guía vendrá dada por la intersección del plano correspondiente con la superficie externa del fuselaje.

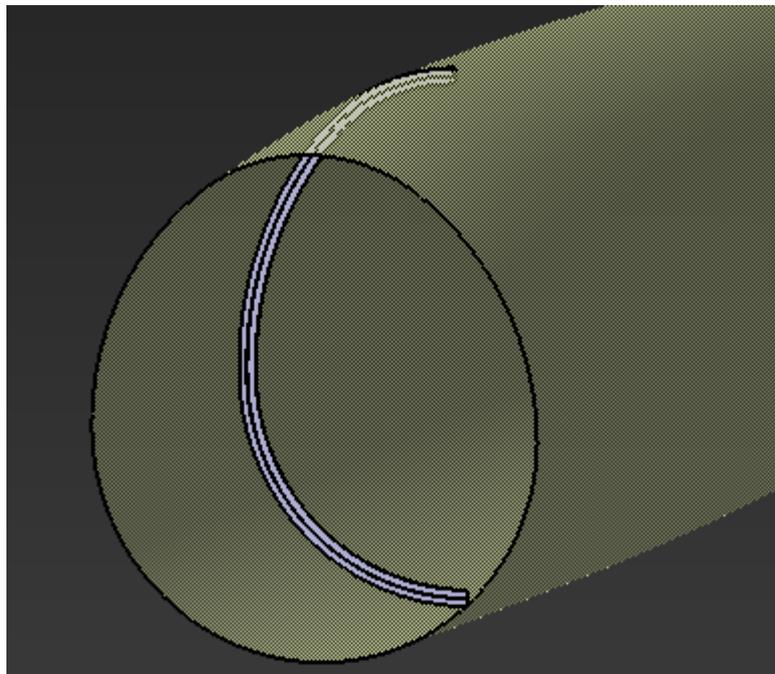


Figura 55: Cuaderna 1 antes de ser modificada.

El último paso para el modelado de estas cuadernas consiste en realizar varias operaciones de *split* de manera que se deje espacio a los elementos longitudinales, largueros y larguerillos, así como a la cabina del piloto y al ala. Finalmente, se realiza una operación de *mirror* para obtener la otra mitad.

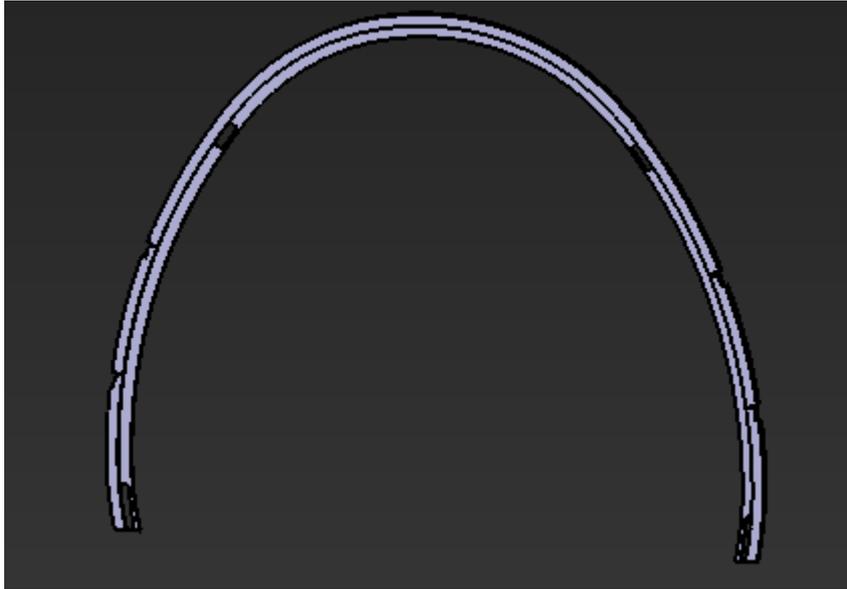


Figura 56: Cuaderna 1 tras las modificaciones.

La primera cuaderna, a la que se denomina 0, tiene una morfología distinta debido a su función como soporte del motor y cortafuegos del mismo en caso de emergencia. Se modela mediante un *pad* de 12 mm de espesor que se recorta de manera similar a las anteriores cuadernas.

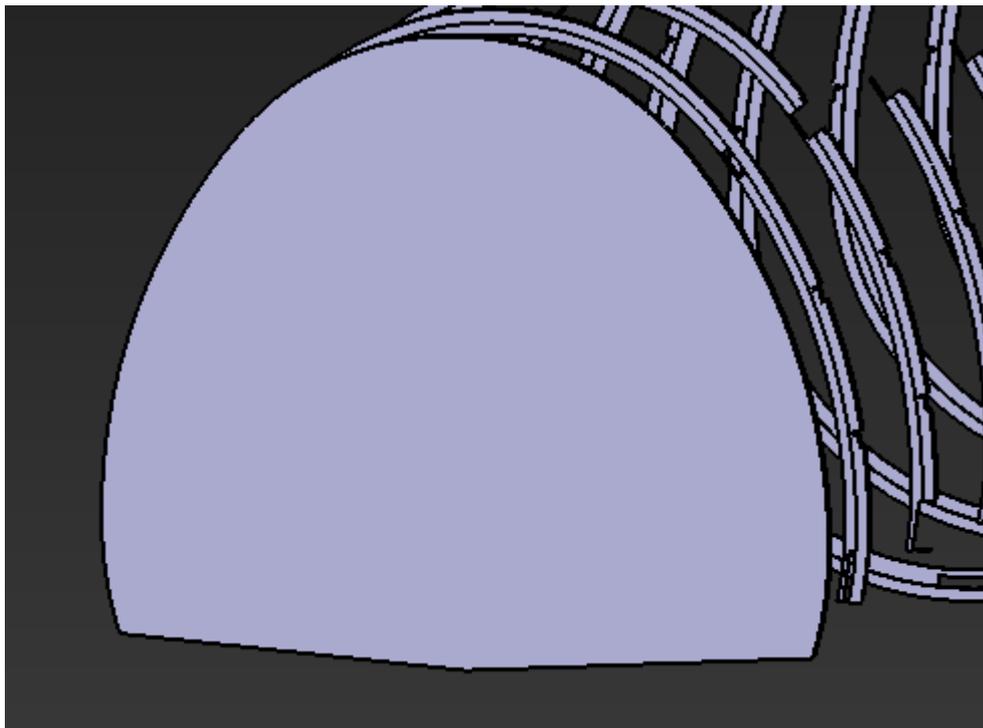


Figura 57: Cuaderna 0.

Por último, la cuaderna 17 tiene la particularidad de no ser perpendicular al eje X. En este caso habrá que definir un plano girado  $12.5^\circ$  con respecto al de la cuaderna 16. En este plano, se realiza un *pad* de 3.165 mm de espesor, que se vacía en el centro mediante un *pocket* a 38.1 mm del borde de la cuaderna. Se procede a realizar las mismas operaciones de *split* que con el resto de las cuadernas para finalizar.

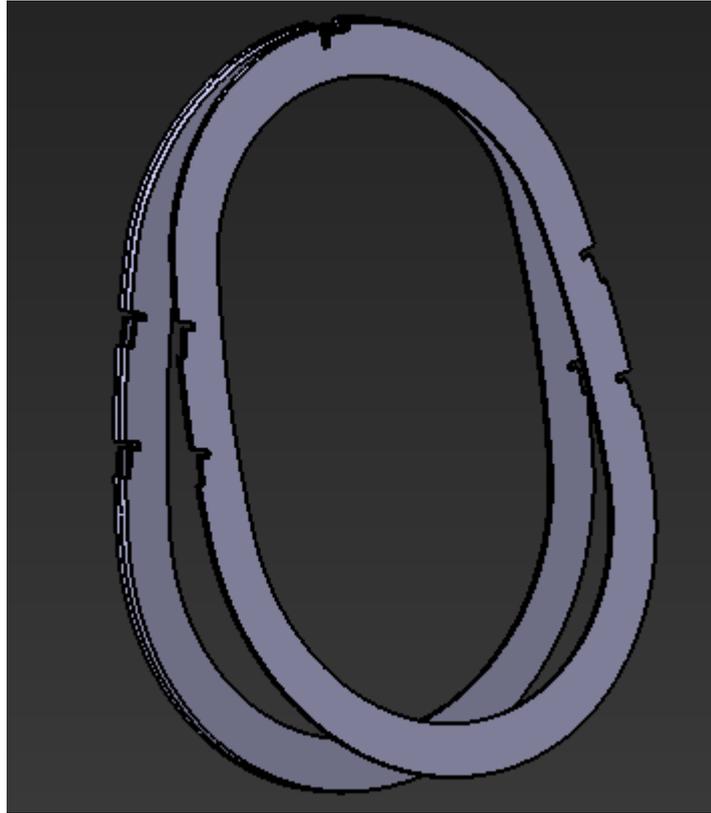


Figura 58: Cuaderna 17 junto a la 16.

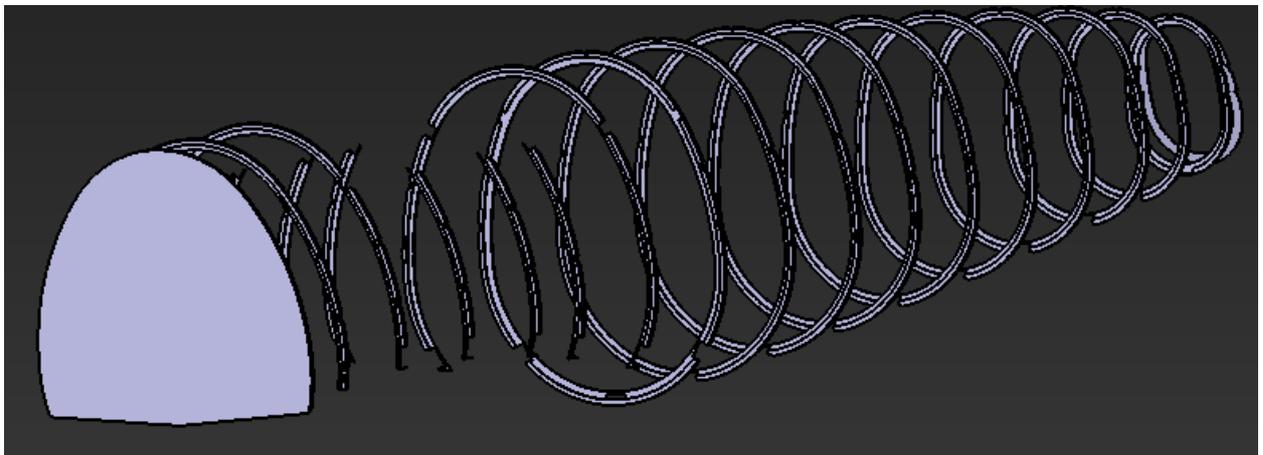


Figura 59: Cuadernas del fuselaje.

### 3.3.4 Piel

Para modelar la piel externa del fuselaje, hay que recortar la superficie definida inicialmente de manera que se deje espacio para la unión con el ala y los estabilizadores, así como el hueco de la cabina, que se definirá más adelante.

A su vez, antes de darle espesor a la superficie, hay que añadir dos superficies de sección variable mediante operaciones de *trim*, que se corresponden a los huecos libres para las armas que salen de la cabina del piloto.

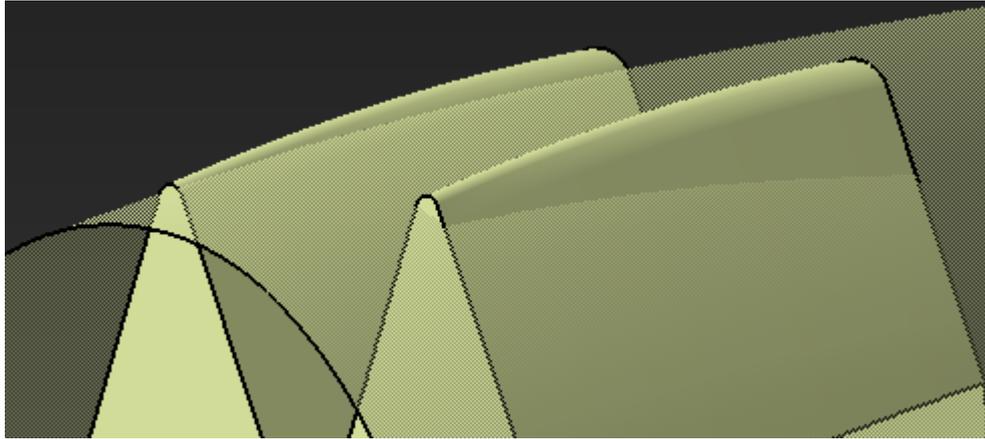


Figura 60: Cubiertas del armamento.

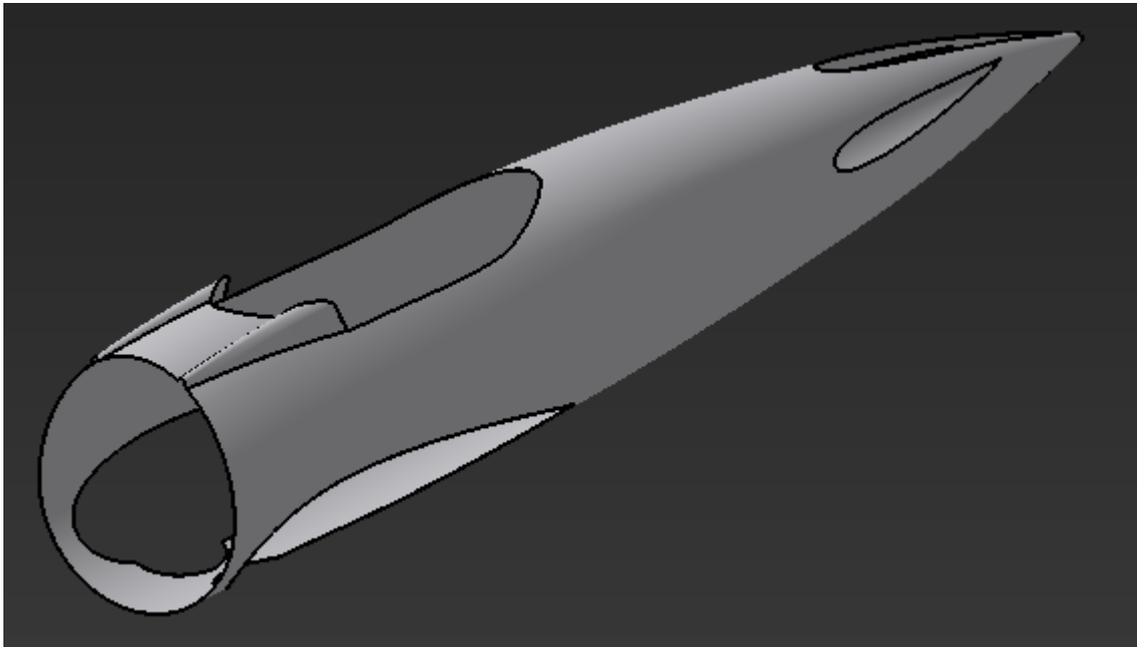


Figura 61: Piel del fuselaje.

Hecho esto, hay que añadir dos piezas adicionales, simétricas entre sí, que son parte de la cubierta del tren de aterrizaje principal. Es necesario incluirlas debido a que, si no estuviese, el tren de aterrizaje principal colisionaría con la piel del fuselaje en su despliegue. Por lo tanto, es necesario recortar mediante una operación de *trim* la parte correspondiente y añadir una unión entre ambas piezas mediante operaciones de *pad* y *hole*.

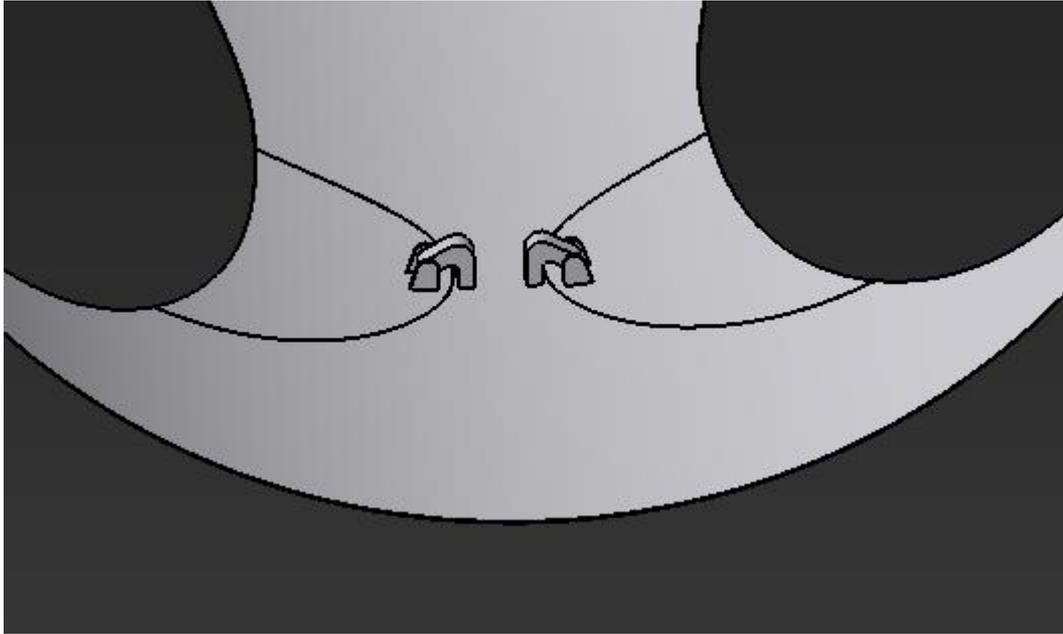


Figura 62: Cubiertas auxiliares del tren de aterrizaje principal.

### 3.3.5 Tren de aterrizaje secundario

El tren de aterrizaje secundario es un componente que, como su nombre indica, complementa la función del primario en las etapas de control en tierra, aportando un tercer punto de apoyo y equilibrando la aeronave. Está únicamente compuesto por un brazo y una rueda, ya que en este caso el pequeño tamaño del tren secundario permite no añadir una cubierta al no penalizar gravemente durante el vuelo la resistencia aerodinámica.

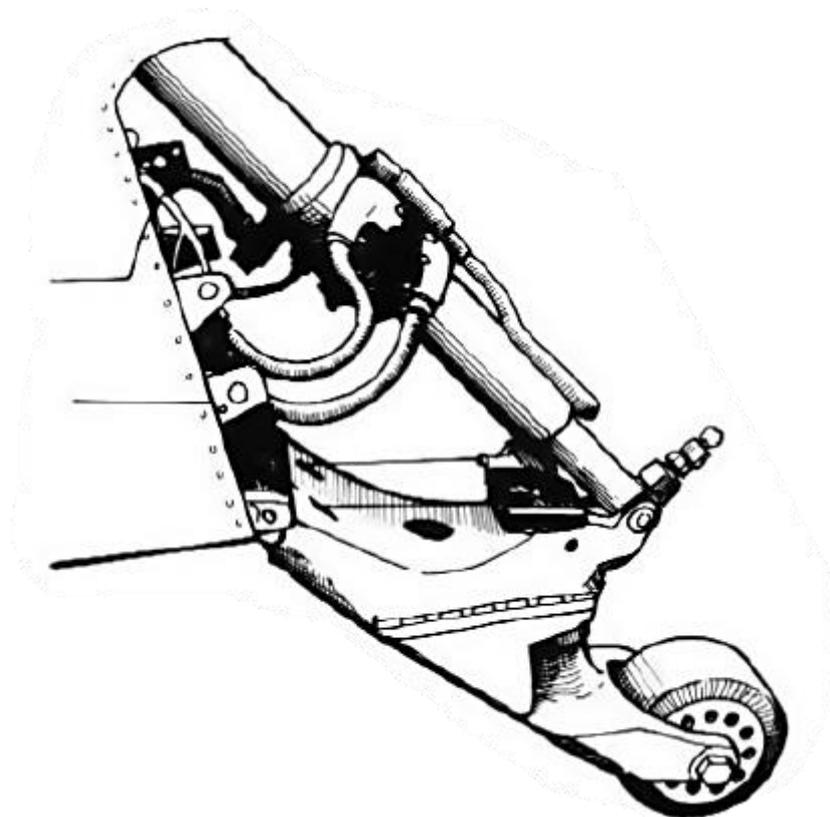


Figura 63: Ilustración del tren de aterrizaje secundario (Nohara, 1993, pág. 59).

Antes del modelado de las piezas que componen el tren secundario, se realiza una modificación a la cuaderna 17 del fuselaje para añadir la unión de este elemento. Para ello, se le añade un cuerpo mediante dos *pads* y dos agujeros de 10 mm de diámetro, donde irá enganchado el brazo del tren.

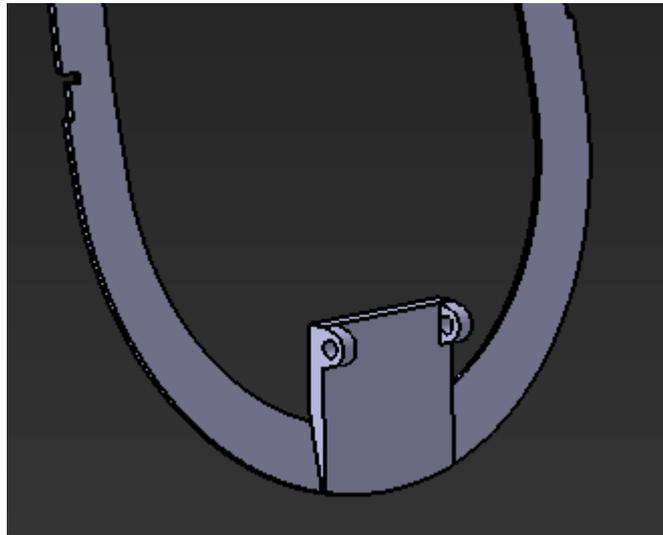


Figura 64: Modificación de la cuaderna 17.

#### 3.3.5.1 Brazo

El brazo del tren es una pieza alargada que se consigue mediante varias operaciones de *pad* unidas a un cilindro de 10 mm de diámetro que va encajado en la cuaderna 17. Así mismo a esta pieza se le realiza un *split* con la superficie exterior del fuselaje para que, en su posición de recogida, minimice la resistencia aerodinámica producida.

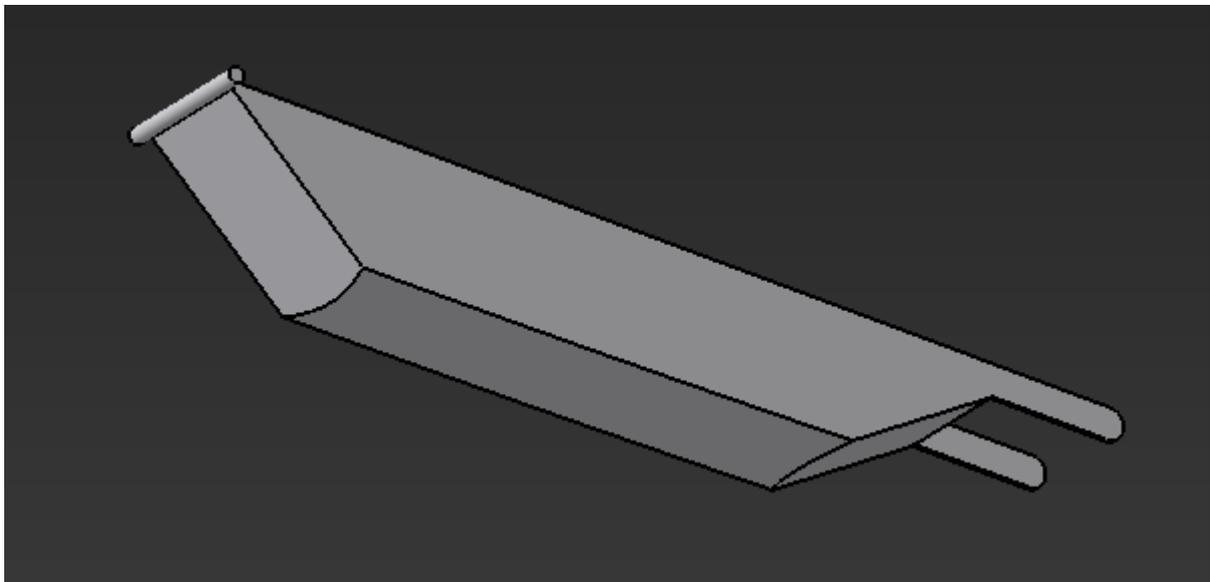


Figura 65: Brazo del tren de aterrizaje secundario.

#### 3.3.5.2 Rueda

Para la rueda se sigue un procedimiento completamente análogo al que se siguió en la rueda del tren de aterrizaje principal. En este caso, sin embargo, hay que tener en cuenta las dimensiones de 150 mm de diámetro y 75 mm de ancho que presenta el neumático.

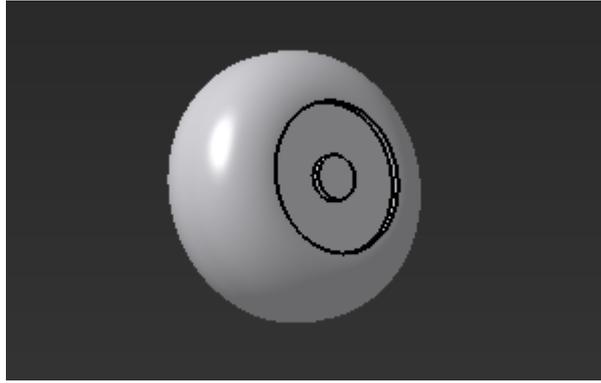


Figura 66: Rueda del tren de aterrizaje secundario.

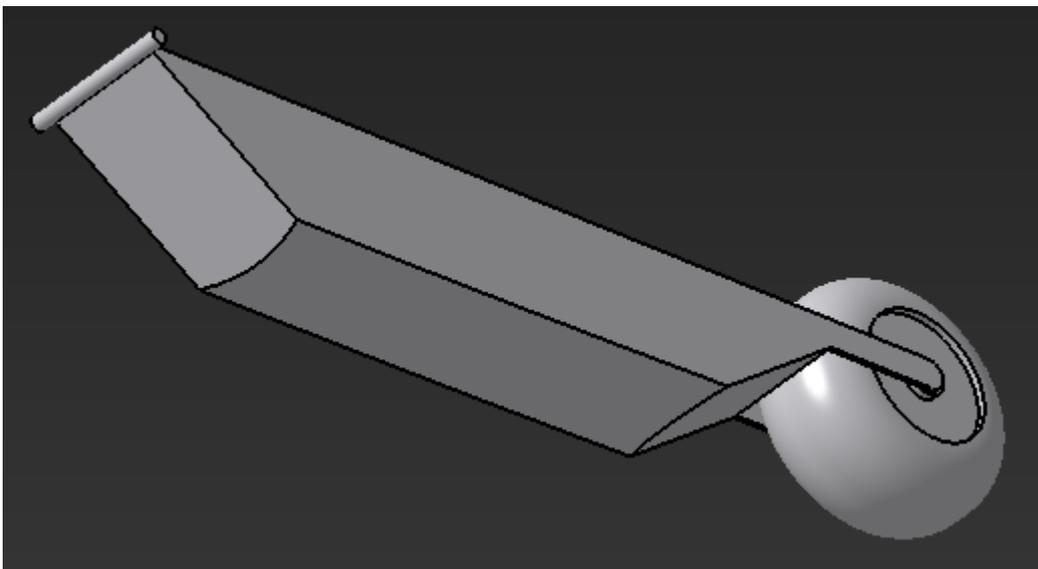


Figura 67: Tren de aterrizaje secundario.

### 3.3.6 Motor

El grupo motor es el encargado de proporcionar el empuje necesario al avión. Su principal componente es el motor Sakae-12, al que van acoplados las palas propulsoras mediante un *spinner*, y que va cubierto de un *cowling*.

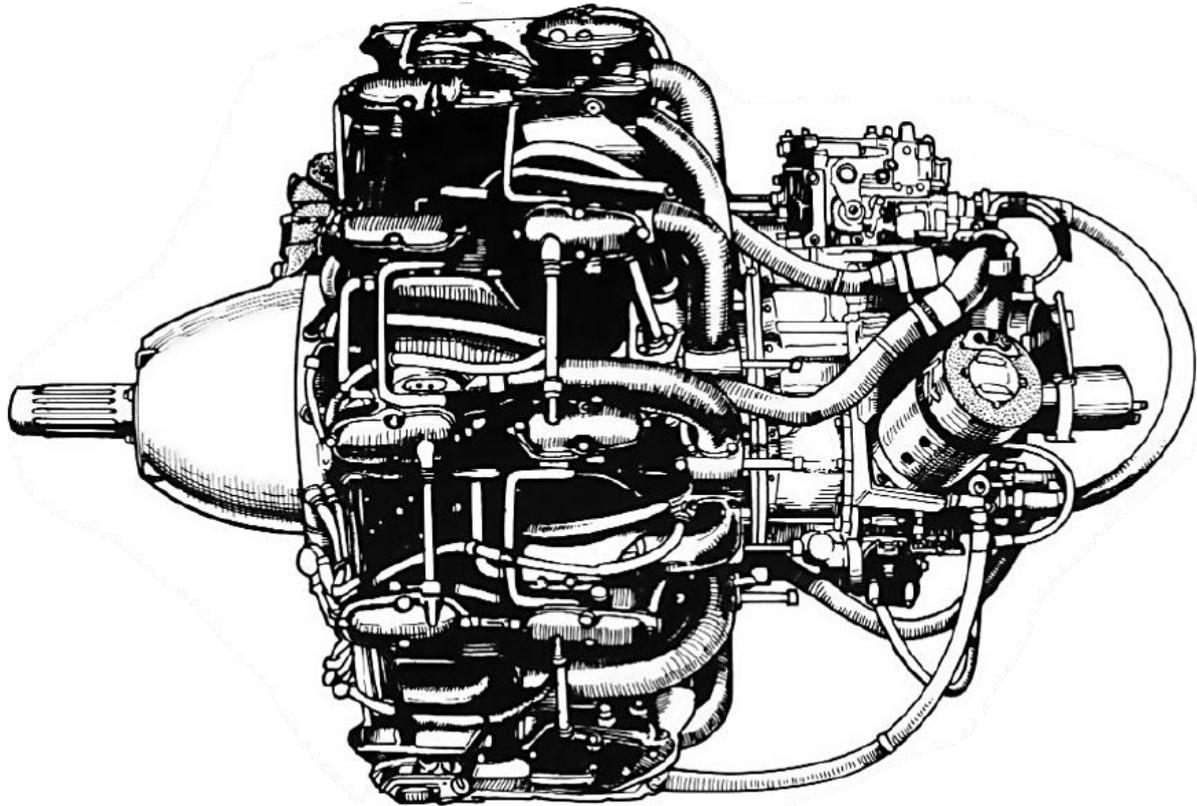


Figura 68: Ilustración del motor (Nohara, 1993, pág. 55).

### 3.3.6.1 Sakae-12

Debido a la complejidad intrínseca que exigiría el modelado del motor, no es algo que se vaya a acometer en este proyecto. Sin embargo, sí que se modela esquemáticamente, mediante el uso de varias operaciones del módulo *part design*, el volumen del motor con algunos detalles para simular los cilindros y la unión con el *spinner*.

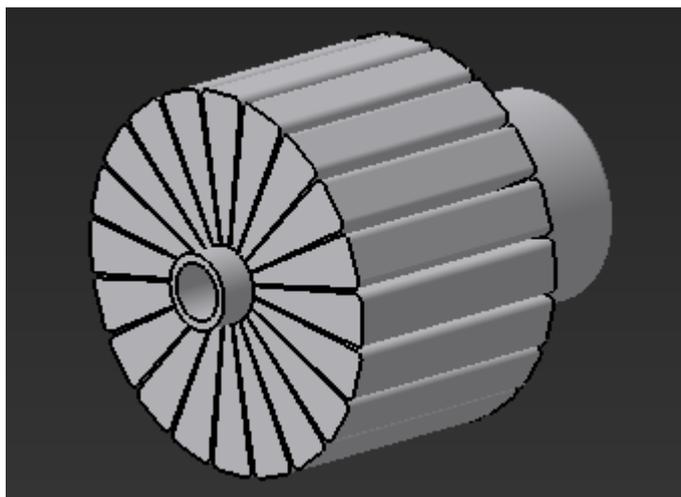


Figura 69: Sakae-12.

Además del motor en sí, se simula con estas mismas operaciones una pieza correspondiente a la montura del motor, lo que sería el elemento estructural que lo une al fuselaje.

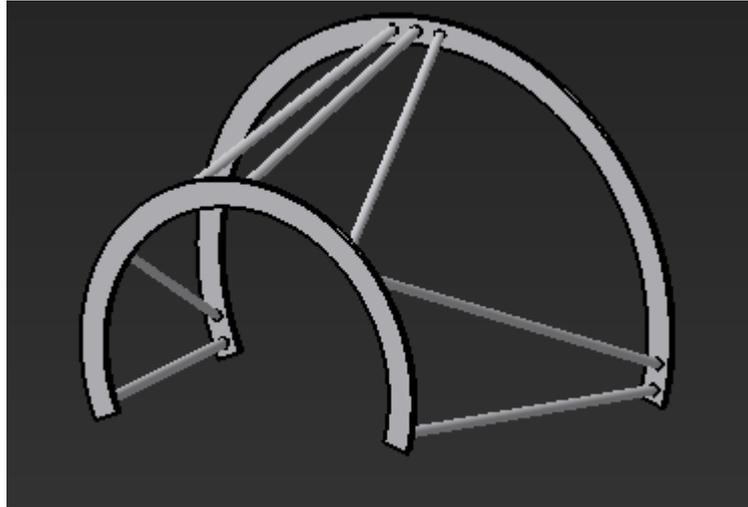


Figura 70: Montura del motor.

### 3.3.6.2 Pala

La hélice es el dispositivo encargado de aportar el empuje al avión, y en este caso está formada por tres palas idénticas. Cada pala tiene una sección compuesta de perfiles aerodinámicos variables. El primer paso para modelar una pala consistirá en obtener de los planos varias medidas que permitan extrapolar a perfiles NACA concretos. De esta manera, se obtienen los siguientes:

Tabla 3: Perfiles de la pala (Nohara, 1993, págs. 87-88).

Perfil	Tipo	Distancia a la base (mm)	Cuerda o diámetro (mm)	Incidencia (°)
1	Circular	0	50	0
2	NACA 0030	101.361	130	40
3	NACA 3315	600.211	250	10
4	NACA 5405	1250	50	0

Teniendo los perfiles, solo resta realizar una operación de *multi-section solid*, para lo cual se definen como guías dos *splines* que unen los bordes de ataque y de salida de los perfiles.

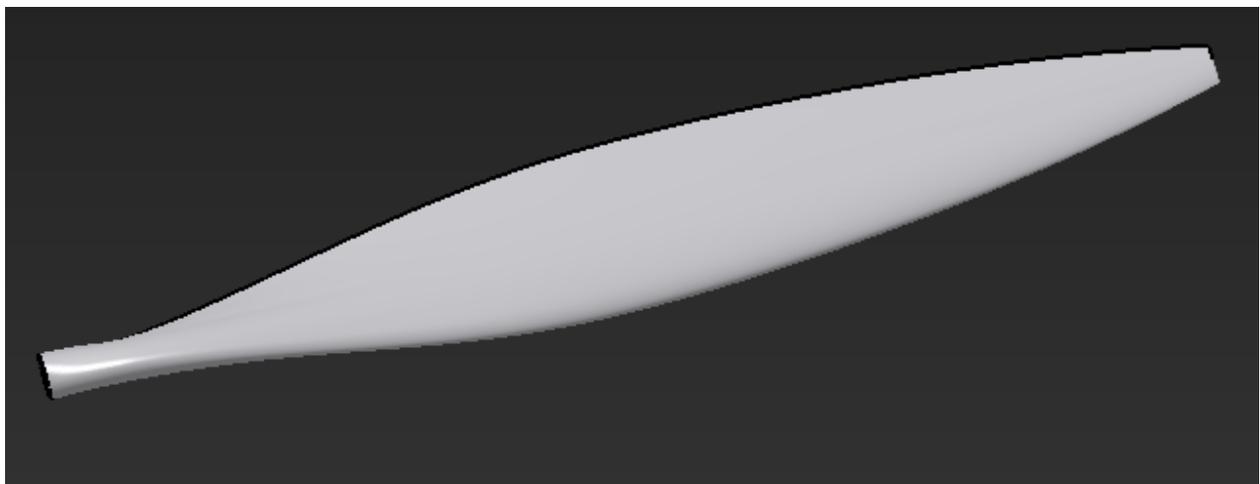


Figura 71: Pala de la hélice.

### 3.3.6.3 Spinner

El *spinner* es la pieza que conecta el motor con las palas de la hélice. Para su modelado, se comienza con un sólido de revolución hueco basado en un perfil parabólico, que se realiza mediante una operación de *shaft*.



Figura 72: Perfil de revolución del *spinner*.

A este sólido se le hacen tres agujeros de 150 mm de diámetro y tres plataformas simétricas interiores para poder pasar y colocar las palas. Además, se le añade mediante un *pad* un cilindro de 150 mm de diámetro que lo conecta con el motor, anteriormente modelado.

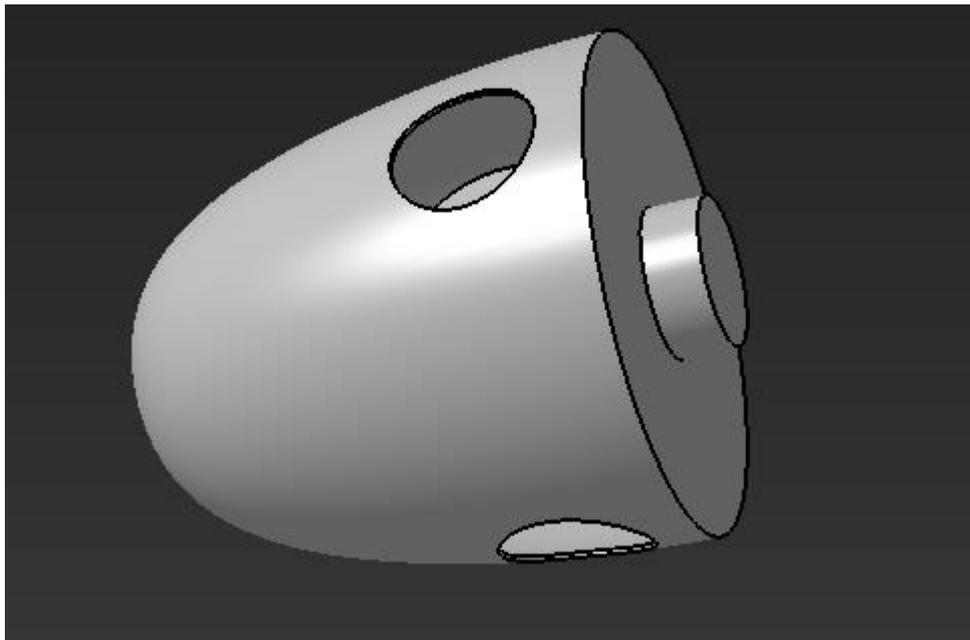


Figura 73: *Spinner*.

### 3.3.6.4 Cowling

El *cowling* es la cubierta externa que protege al motor e incluye los conductos de entrada de aire. Para modelarla hay que darles espesor a distintas superficies mediante la operación *thick surface*.

En primer lugar, la superficie que cubre al motor está formada por dos distintas: la trasera, que no es más que los primeros 524 mm de la superficie exterior del fuselaje anteriormente definida; y la delantera, que se obtiene mediante una operación de *blend* entre dicha superficie y un círculo de 900 mm de diámetro situado en la entrada del motor.

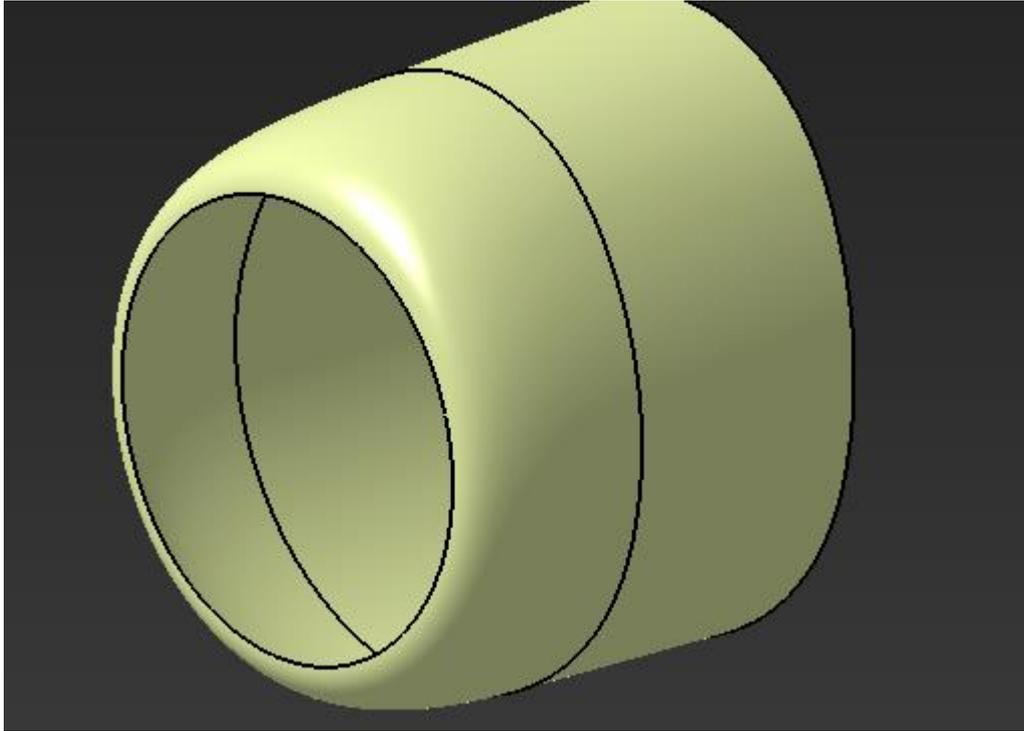


Figura 74: Superficies principales del *cowling*.

Para modelar las entradas de aire, se realizan dos operaciones de *sweep* en la parte inferior del *cowling*. Para ello se definen los perfiles y las guías según los planos referidos anteriormente.

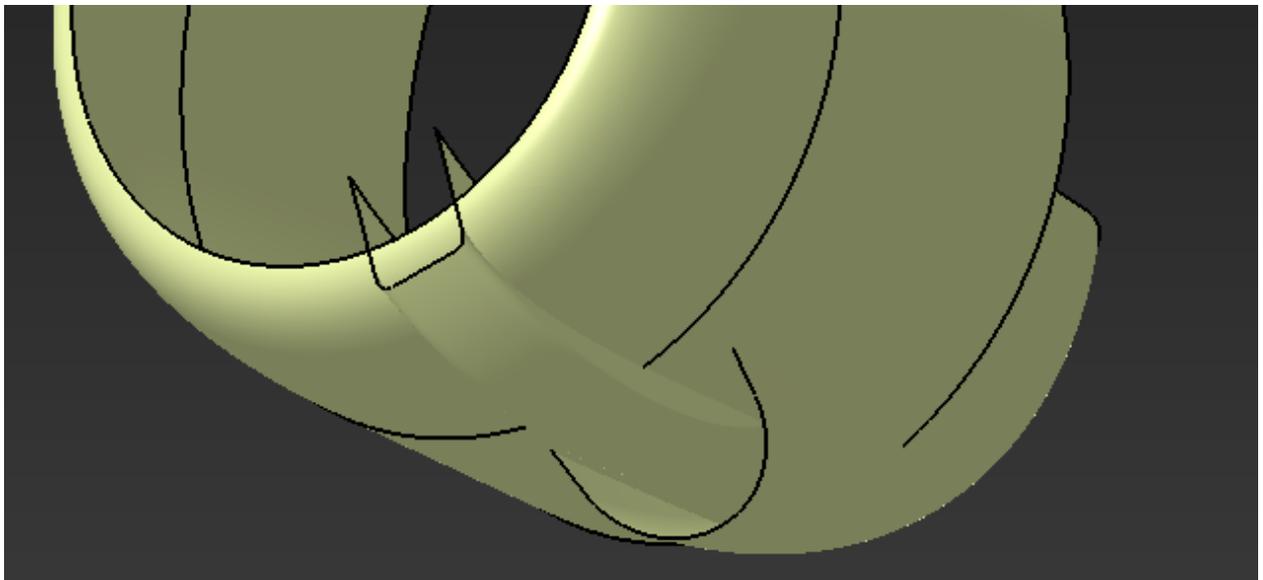


Figura 75: Superficies de las entradas de aire.

Una vez hecho esto, solo falta dar espesor a las superficies tal y como se ha explicado antes.

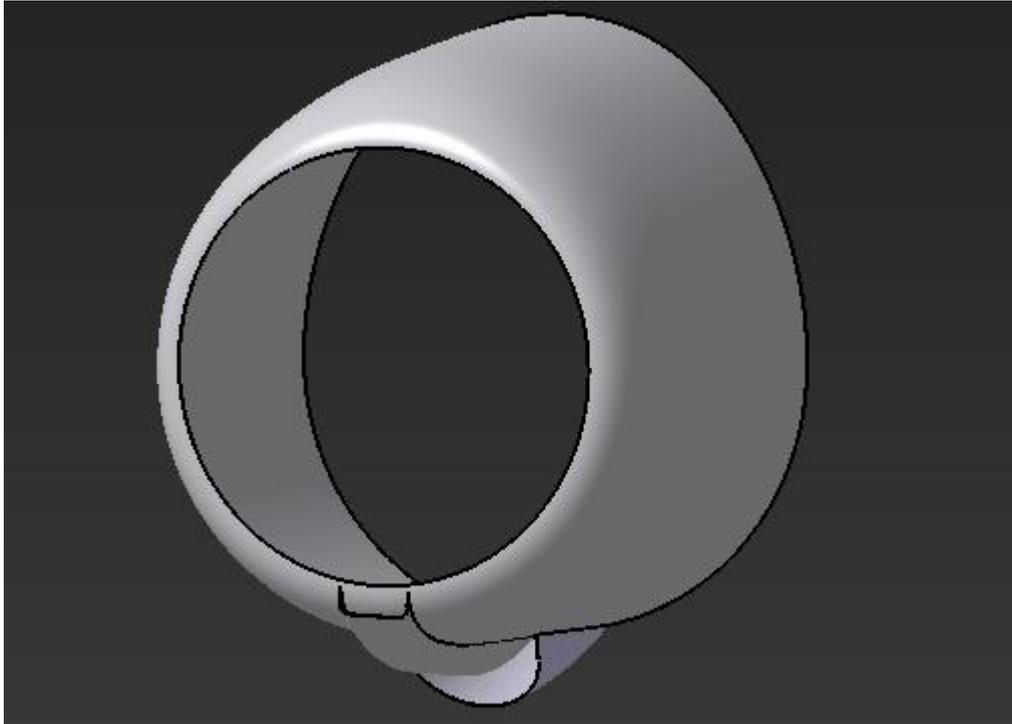


Figura 76: *Cowling*.

Tras haber modelado la cubierta, se tiene ya el modelado completo del motor.

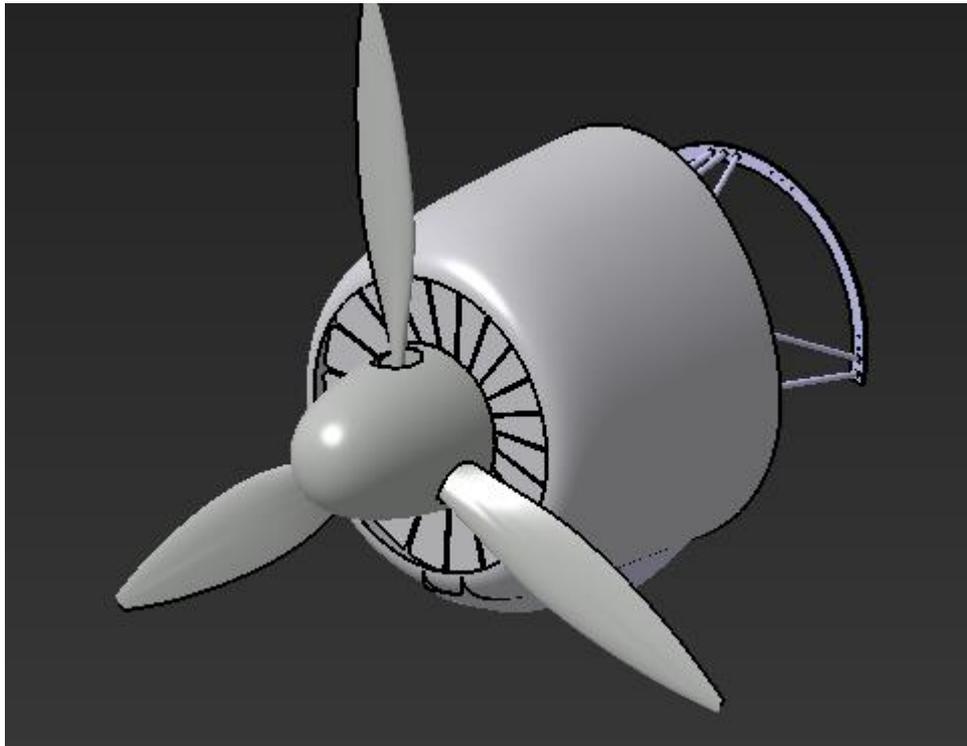


Figura 77: Grupo motor.

### 3.3.7 Cabina

En cuanto a la cabina del piloto, se procede a modelar el *canopy* o cubierta externa. Esta consiste en dos estructuras fijas, delantera y trasera, con una estructura móvil intermedia adicional que permite la entrada y salida del piloto. Cada una de estas estructuras tiene sus respectivos vidrios protectores.

Como paso previo al modelado de estas piezas se obtiene, con perfiles obtenidos de los planos, una superficie de sección variable sobre la que se va a trabajar para obtener dichas piezas.

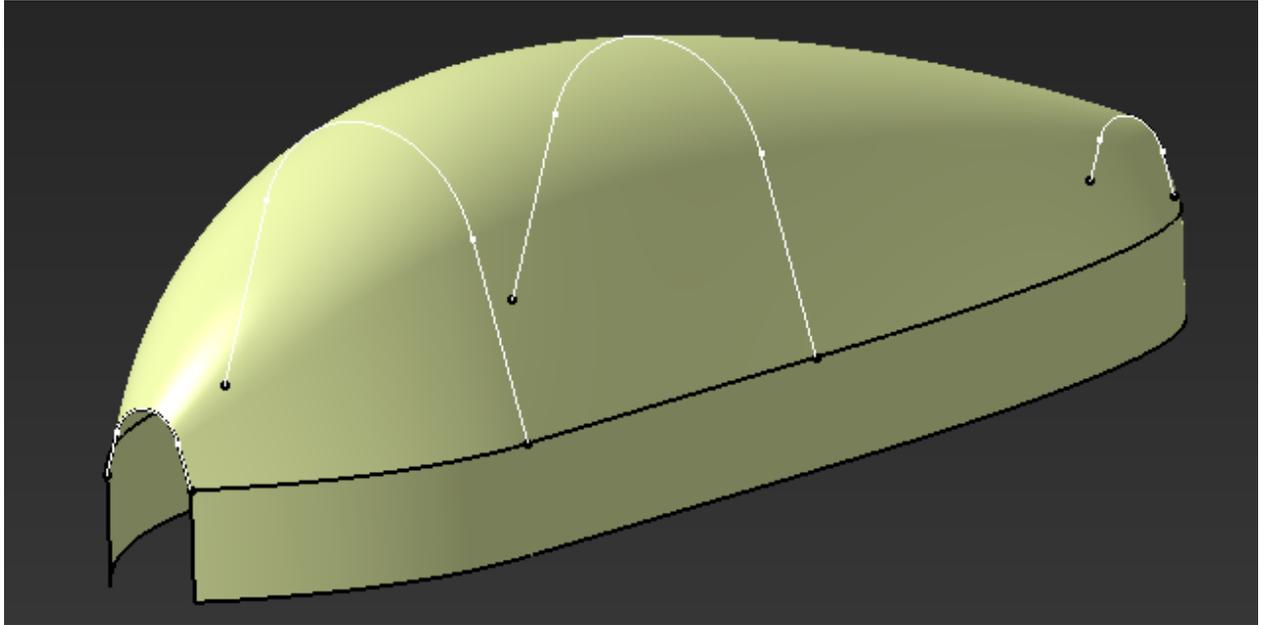


Figura 78: Secciones y superficie exterior de la cabina.

Para el modelado de cada una de las estructuras, se comienza trazando la planta de los huecos por los cuales va el vidrio con el objetivo de poder vaciar las piezas posteriormente. Con cada uno de estos *sketches* se hace una operación de extrusión hasta que interseccione con la superficie anteriormente creada.

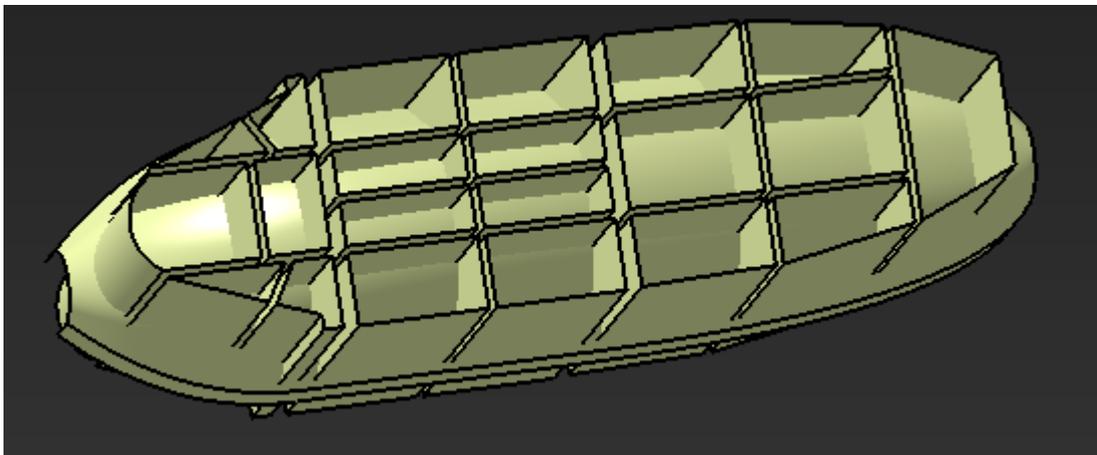


Figura 79: Superficies de extrusión para delimitar los vidrios.

En cada parte del *canopy*, se aplica un espesor de 2 mm en un sentido para crear las estructuras, y de otros 2 mm en el sentido contrario para crear los vidrios. Cabe destacar que, para la estructura fija trasera, se ha hecho un offset de la superficie original, lo que permitirá el movimiento sin colisiones entre piezas.

Posteriormente, se le realizan operaciones de split a las piezas de las estructuras para generar así la pieza deseada.

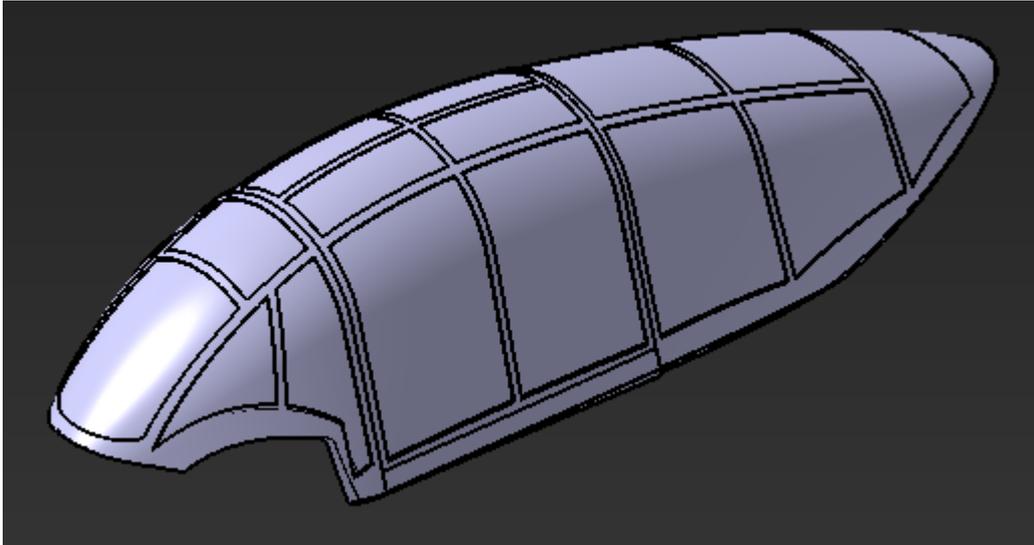


Figura 80: Estructura y vidrios de la cabina.

Finalmente, para permitir el movimiento de las estructuras entre sí, se crea mediante operaciones de *pad* y *pocket* un raíl entre la estructura intermedia y la posterior.

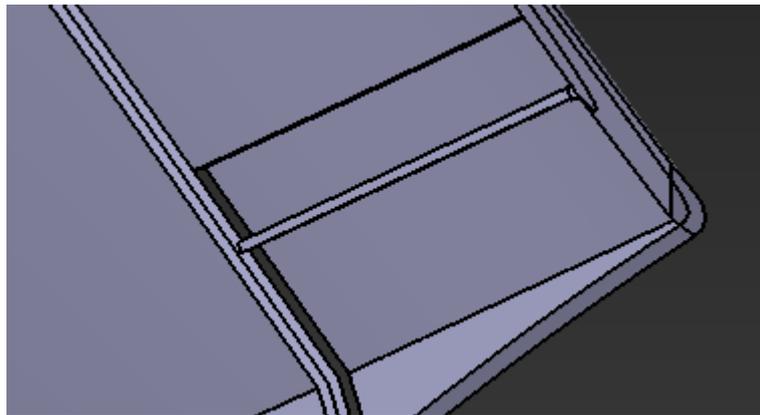


Figura 81: Raíl de deslizamiento, vista interna.



Figura 82: Raíl de deslizamiento, vista externa.

Finalizado este conjunto, se tiene la totalidad del fuselaje.

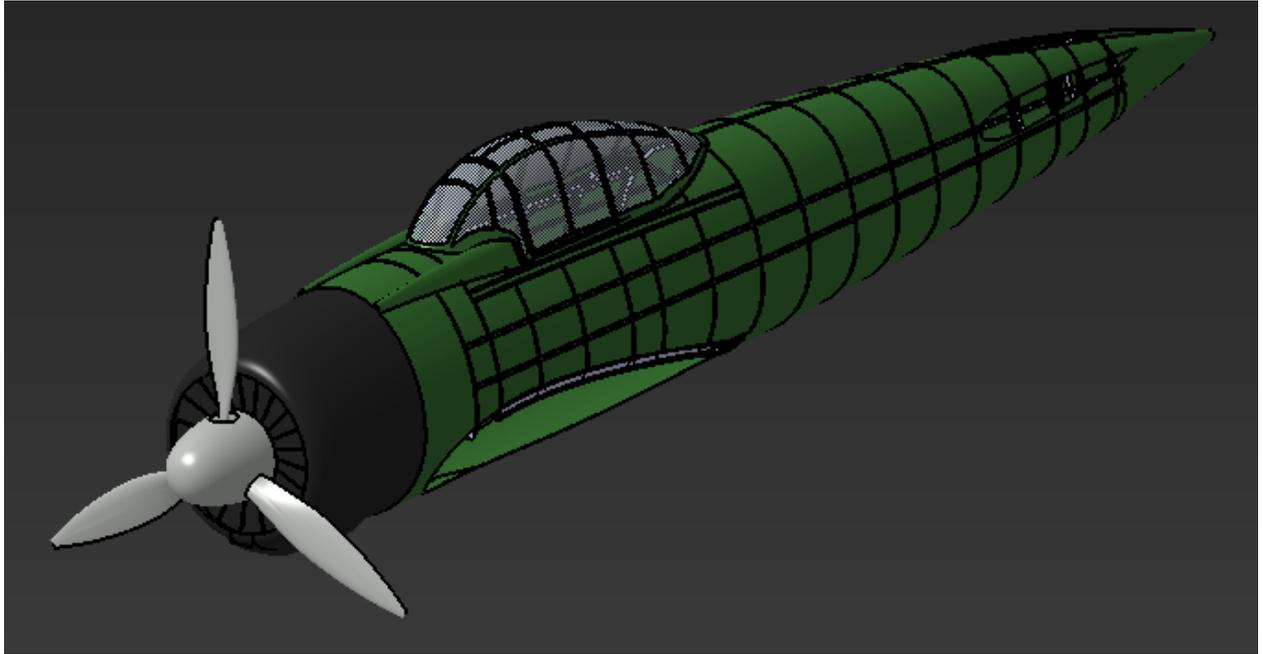


Figura 83: Fuselaje con dispositivos plegados.

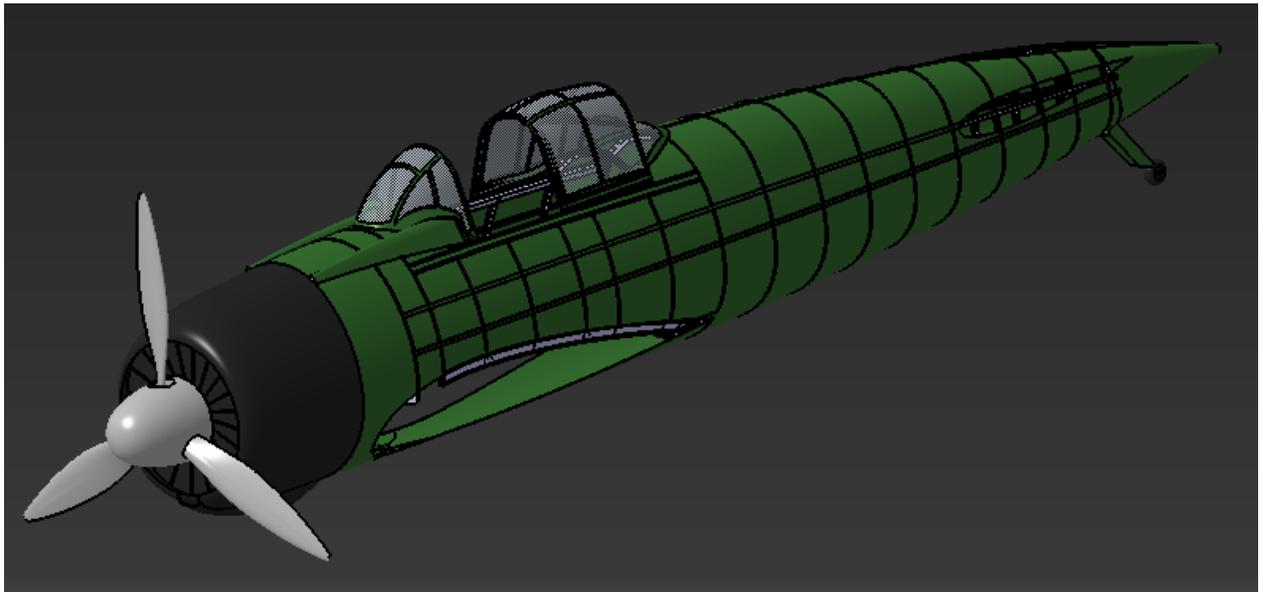


Figura 84: Fuselaje con dispositivos desplegados.

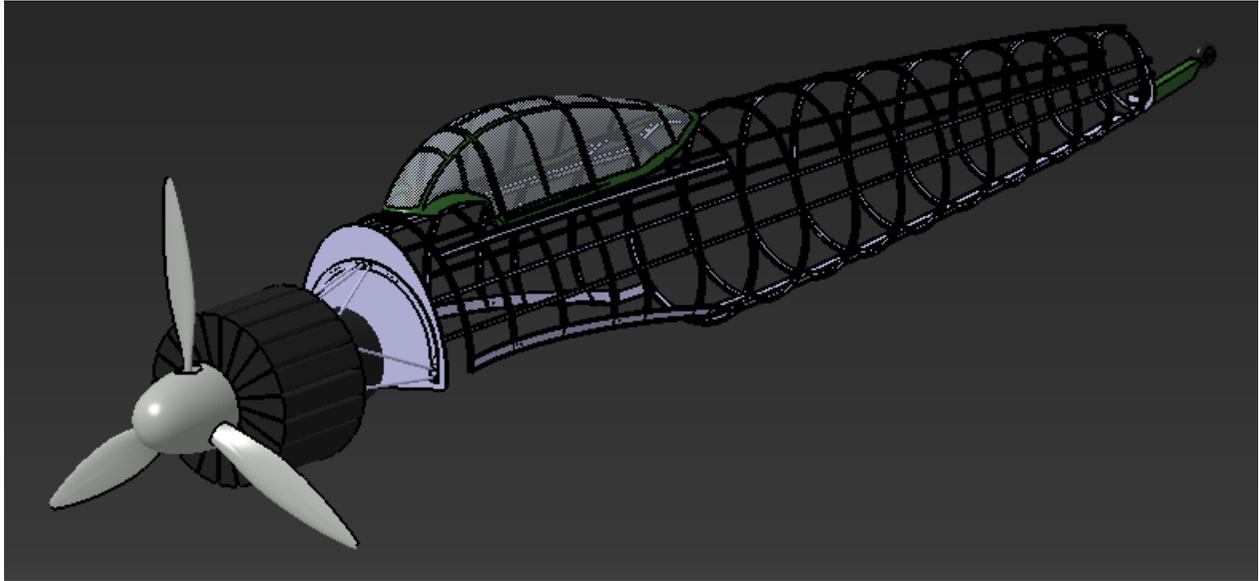


Figura 85: Estructura interna del fuselaje.

### 3.4 Estabilizador horizontal

Una vez modelados tanto el ala como el fuselaje, se procede con los estabilizadores horizontal y vertical.

En el caso del estabilizador horizontal, sigue un esquema razonablemente similar al del ala. Presenta en este caso únicamente dos largueros y 9 costillas que sirven en su conjunto como elementos soportantes de las cargas, envueltos por la piel externa. El estabilizador horizontal incluye el dispositivo de control conocido como timón de profundidad, que se detallará en su epígrafe correspondiente.

Análogamente a los casos anteriores, se comenzará el modelado mediante la superficie exterior. Como cualquier otro elemento sustentador, está definido por perfiles aerodinámicos: un NACA 0010 a lo largo de sus 2.35 m de envergadura. Estos perfiles tienen una cuerda de 1634.354 mm en la raíz y 663.51 mm en el extremo, y no presentan ángulos de torsión o diedro (Foster, 1945, pág. 121).

Con estas medidas, se importan los puntos que definen estos perfiles desde MS Excel y se crea un *spline* para cada uno. Al igual que para el ala, se termina creando una superficie de sección variable con guías en el borde de ataque y de salida de los perfiles.

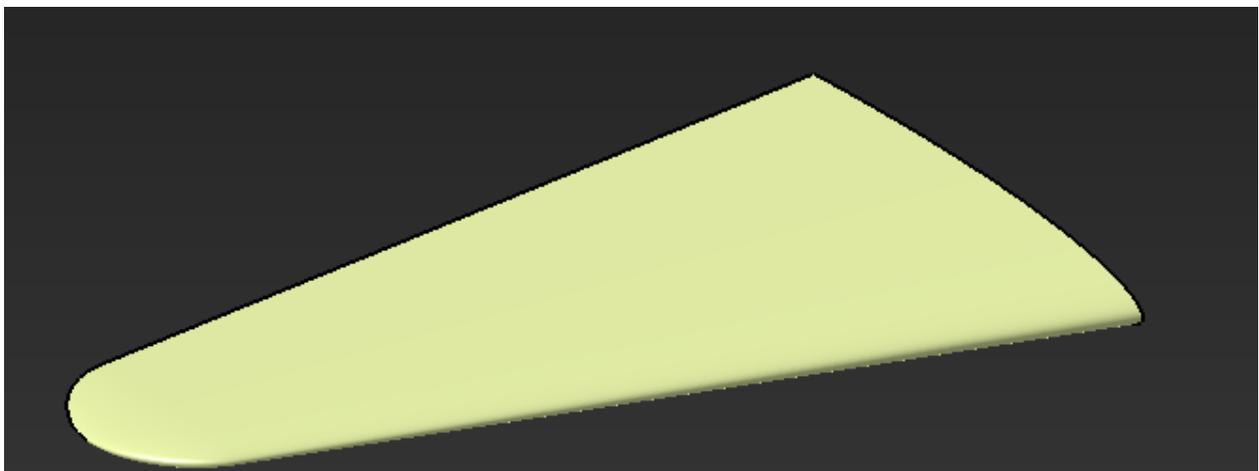


Figura 86: Superficie exterior del estabilizador horizontal.

### 3.4.1 Largueros

Los dos largueros del estabilizador horizontal se diferencian de los modelados anteriormente en que cada uno ocupa todo el espesor del conjunto. En este caso, tiene un perfil de sección en I que parte de la raíz y disminuye en longitud hasta llegar al extremo del estabilizador. Para modelar este tipo de larguero, será necesario hacer un sólido de sección variable partiendo de dos de estos perfiles.

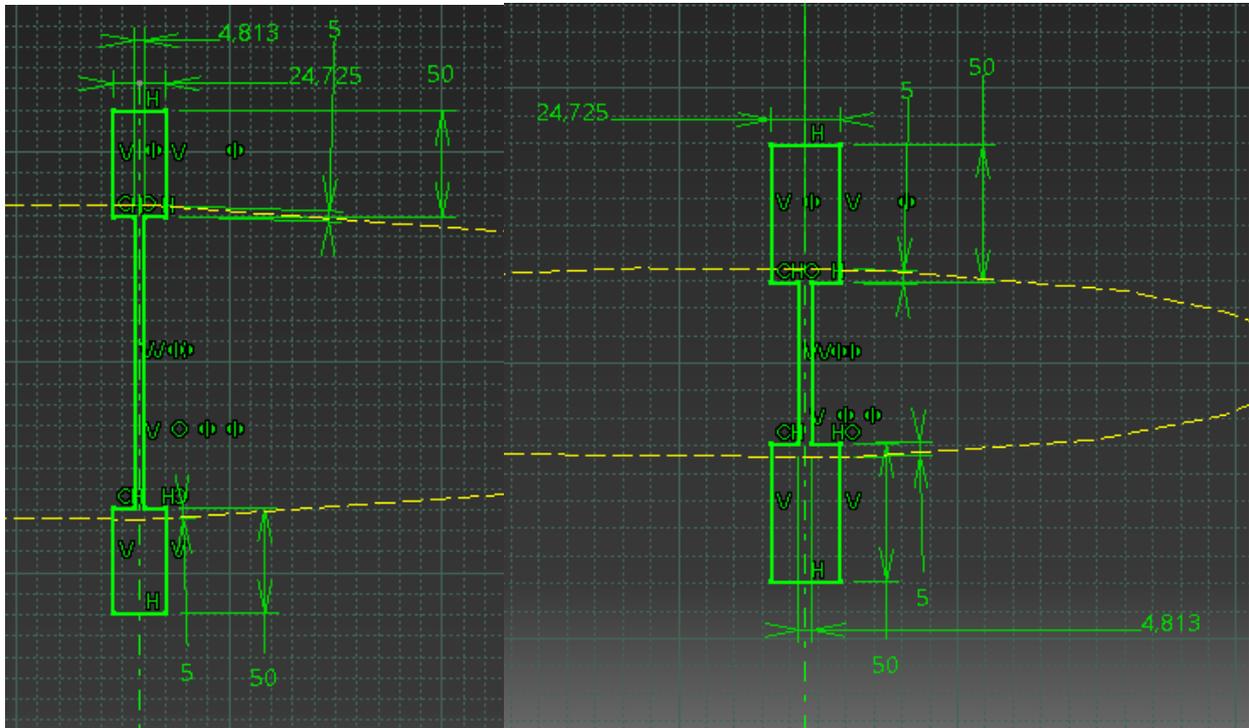


Figura 87: Perfiles de los largueros en la raíz y en el extremo.

Igual que en los casos anteriores, se ha de hacer una operación de *split* con la superficie exterior del estabilizador para evitar colisiones entre piezas, además de con la superficie exterior del fuselaje.

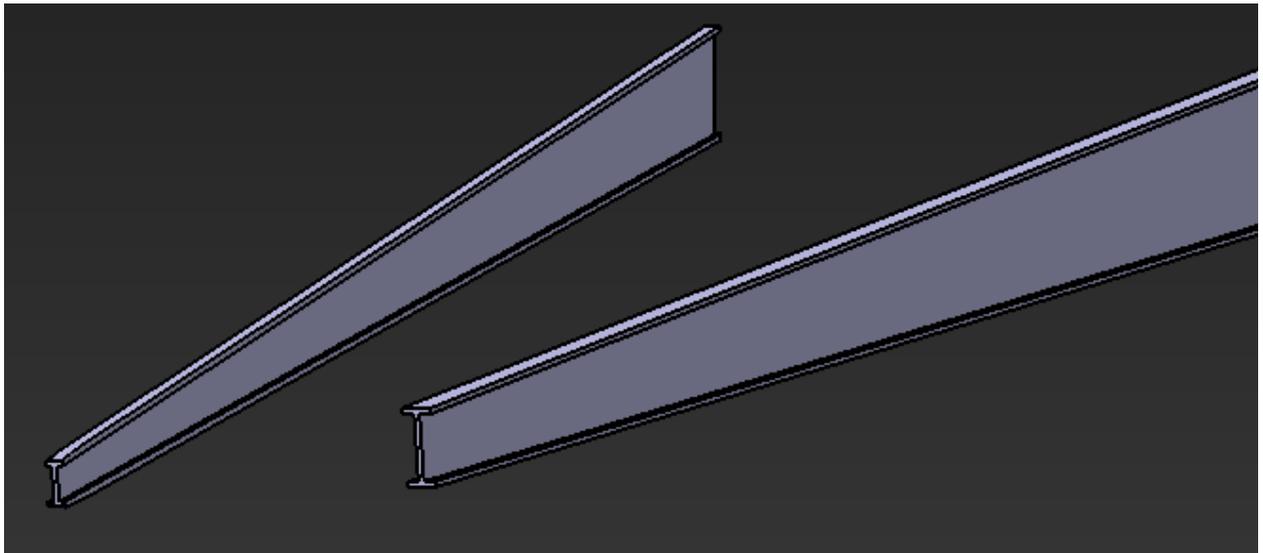


Figura 88: Sólidos de sección variable para los largueros.

La otra diferencia de estos largueros consiste en los agujeros de distinto tamaño para aligerar peso que presentan entre las uniones de las distintas costillas, teniendo el larguero delantero un agujero entre cada costilla y el trasero, tres entre cada una.

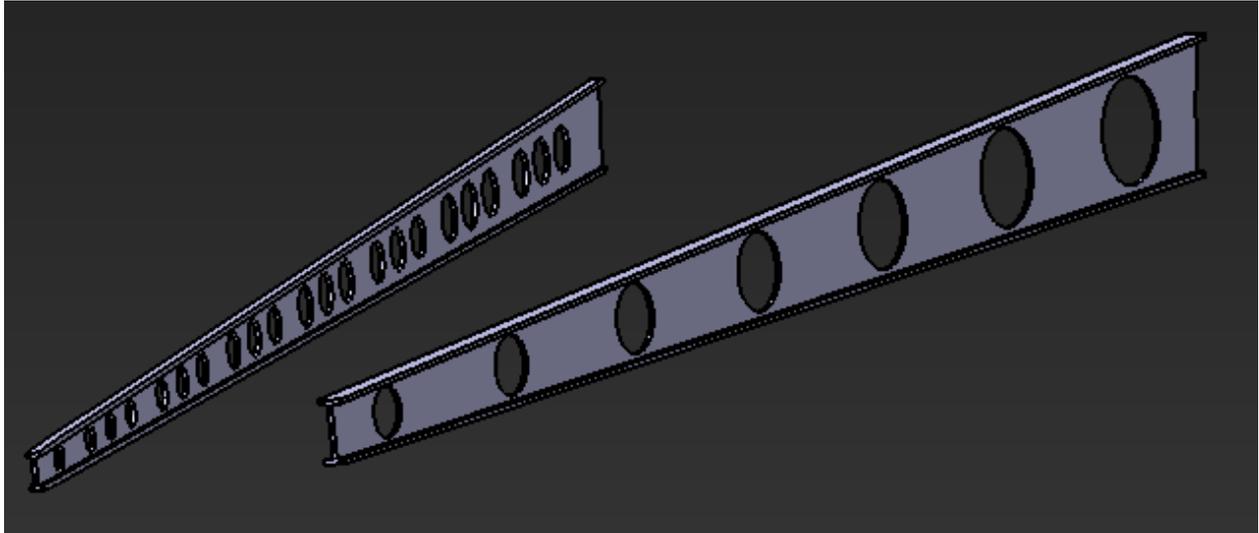


Figura 89: Largueros del estabilizador horizontal

### 3.4.2 Costillas

El modelado de las costillas del estabilizador es parecido al de las costillas finales del ala, ya que también presentan agujeros. La principal diferencia con las anteriores reside en que están divididas en dos partes: la parte central entre los dos largueros sigue siendo perpendicular a la envergadura del estabilizador, pero la parte del borde de ataque es perpendicular al mismo borde de ataque del estabilizador horizontal. Esto provoca que, en la práctica, sea necesario modelar 16 piezas: siete costillas de dos partes, y dos costillas de una sola parte.

En cualquier caso, el primer paso consiste en definir un plano a la distancia correspondiente según los planos, sobre el que se hace un *pad* rectangular de 18.575 mm de espesor. Análogamente a como se hizo en el ala, este *pad* se vacía con un *pocket* de 12 mm a 5 mm del borde para crear el perfil en L y se recorta mediante operaciones de *split* con la superficie exterior y con las correspondientes a los largueros para acoplarse a estos.

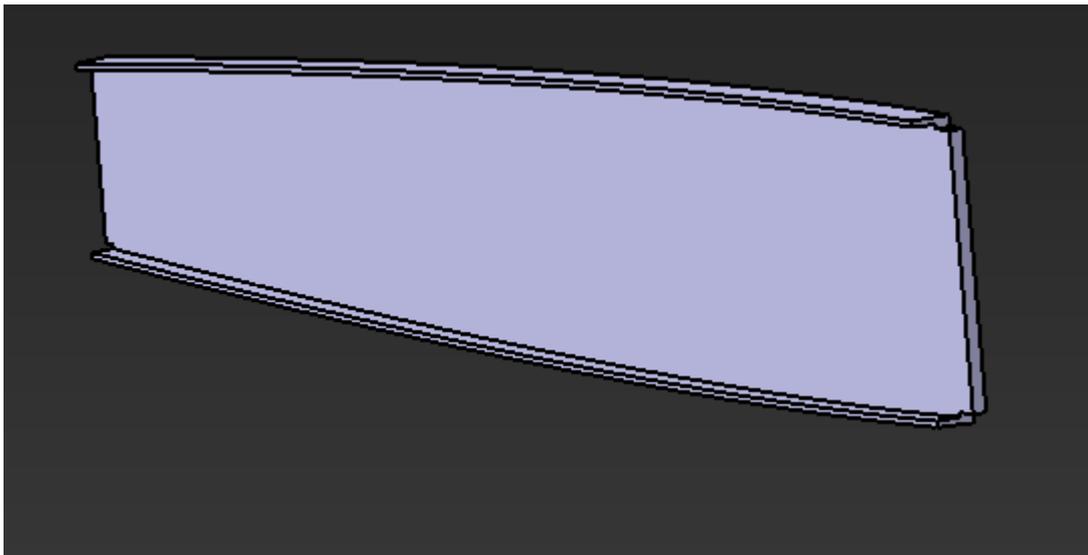


Figura 90: Pieza central de la costilla 1.

El último paso consiste en hacerle los agujeros correspondientes mediante operaciones de *hole*.

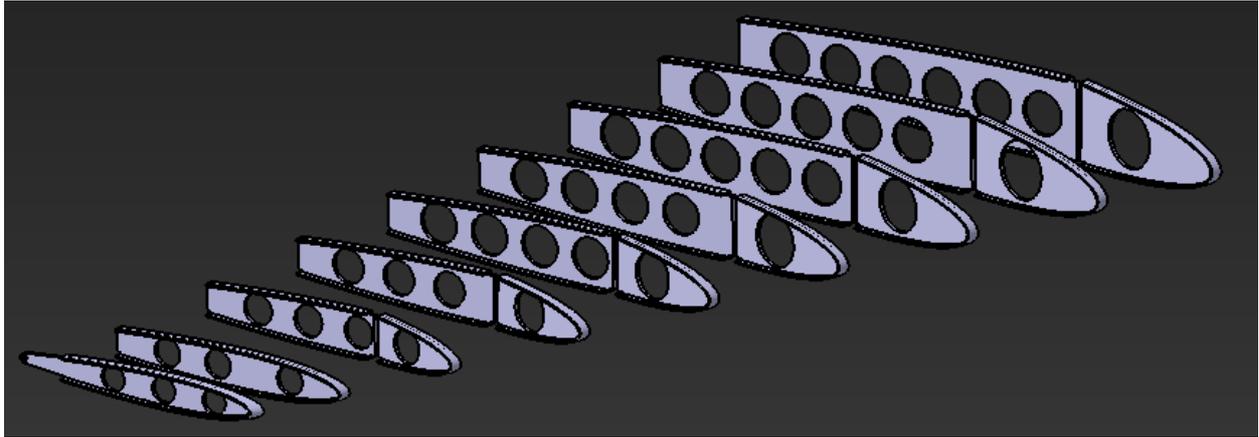


Figura 91: Costillas del estabilizador horizontal.

### 3.4.3 Piel

Al igual que con la piel del ala, primero se realiza un *shape fillet* para adaptar la forma a la del fuselaje. Después, se recorta la parte trasera correspondiente al timón de profundidad, que se definirá a continuación, con una operación de *split* y se le da espesor de 1 mm para finalizar.

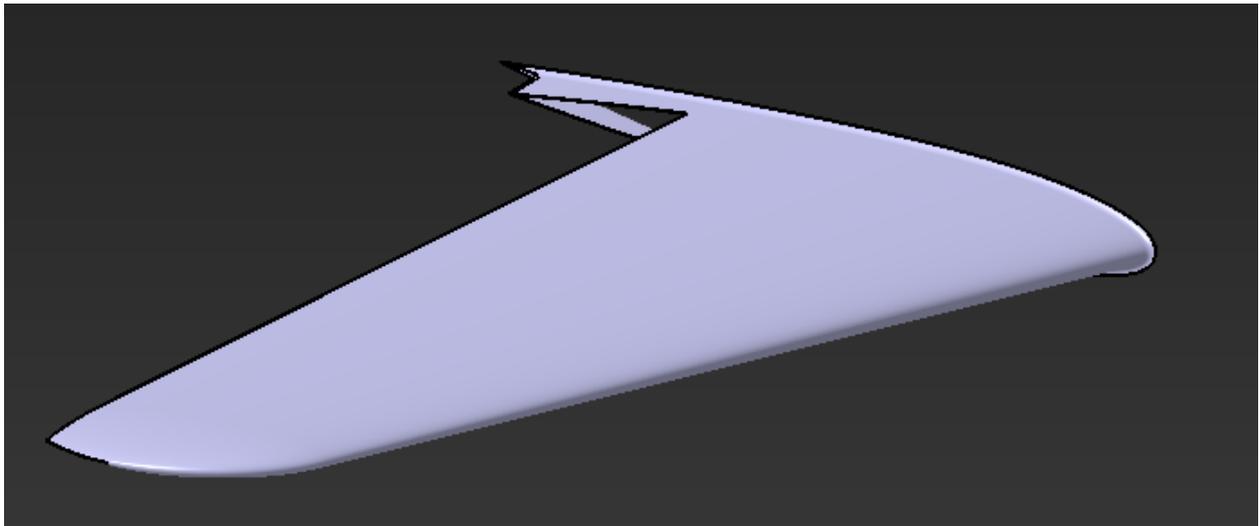


Figura 92: Piel del estabilizador horizontal.

### 3.4.4 Timón de profundidad

El timón de profundidad es un otro dispositivo de control, situado esta vez en el borde de salida del estabilizador horizontal, y que permite el cabeceo de la aeronave. De manera análoga al alerón del ala, presenta un eje de giro, costillas como elementos estructurales y la piel exterior. A diferencia del alerón, el timón de profundidad alcanza toda la envergadura del estabilizador (Foster, 1945, págs. 127-128).

Antes de comenzar con el timón de profundidad en sí, se añaden al larguero trasero y a la costilla más cercana al extremo del estabilizador dos soportes mediante operaciones de *pad* y *hole*, para adaptar el eje de giro del timón.

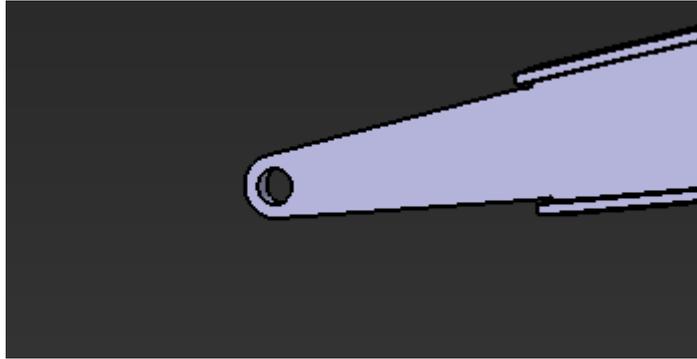


Figura 93: Soporte de la costilla 9.

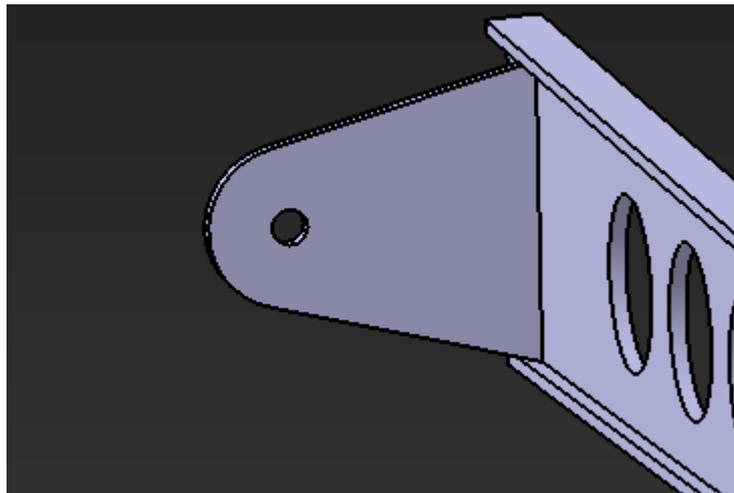


Figura 94: Soporte del larguero trasero.

También se va a definir la superficie exterior del timón de profundidad, tal y como se hizo con el alerón en el ala. Se empieza con una operación de *split* a la superficie que ya se tiene del estabilizador horizontal, y se completa con una superficie de sección variable a partir de dos arcos de circunferencia en los extremos.

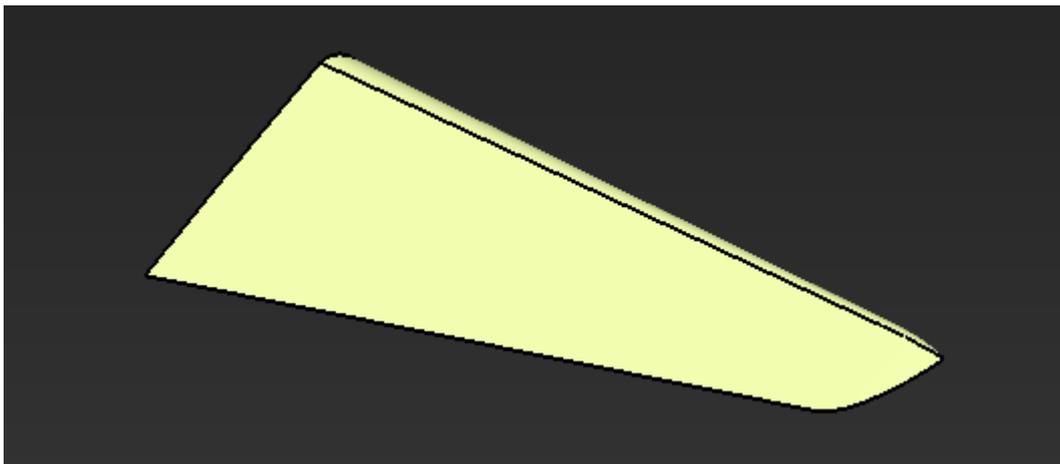


Figura 95: Superficie externa del timón de profundidad.

#### 3.4.4.1 Eje de giro

El eje de giro se modela como un cilindro de 10 mm de diámetro que conecta con los agujeros hechos anteriormente en el larguero y la costilla.

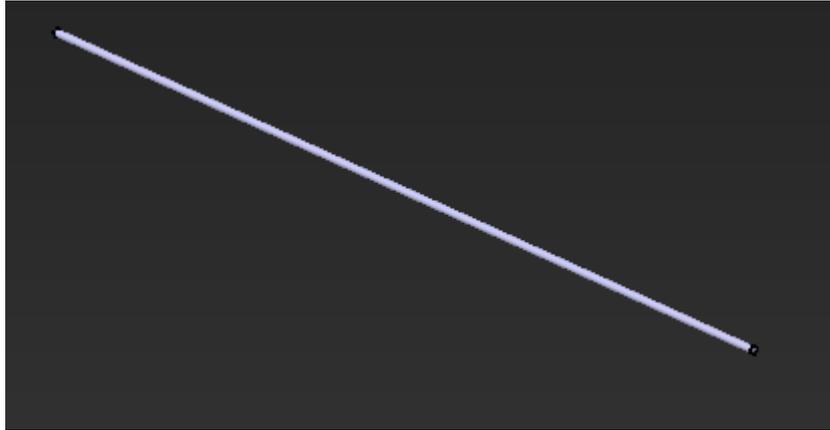


Figura 96: Eje de giro del timón de profundidad.

#### 3.4.4.2 Costillas

Al igual que con el ala, se realizan *pads* de 4 mm de espesor que se recortan según la superficie exterior anteriormente definida y a los que se le hacen dos agujeros: uno de 10 mm de diámetro para dejar pasar el eje de giro y otro mayor cercano al borde de salida para aligerar peso.

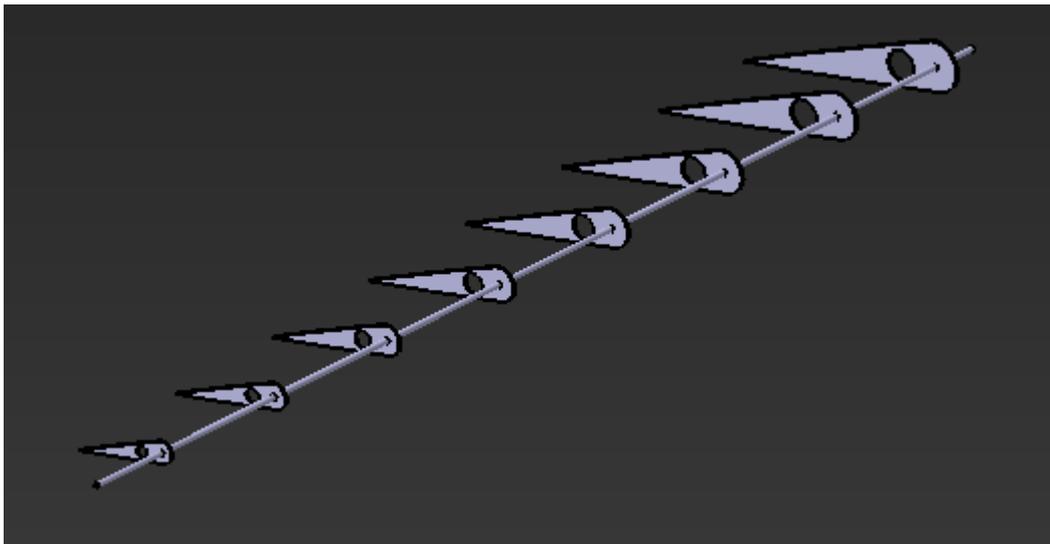


Figura 97: Costillas del timón de profundidad.

#### 3.4.4.3 Piel

El último paso para terminar el timón de profundidad consiste en dar espesor a la superficie exterior mediante el comando *thick surface*. Cabe destacar que, una vez hecho esto, se deben realizar dos operaciones de *split* para dejar dos ranuras que permitan el giro del timón de profundidad en la altura de los soportes del eje.

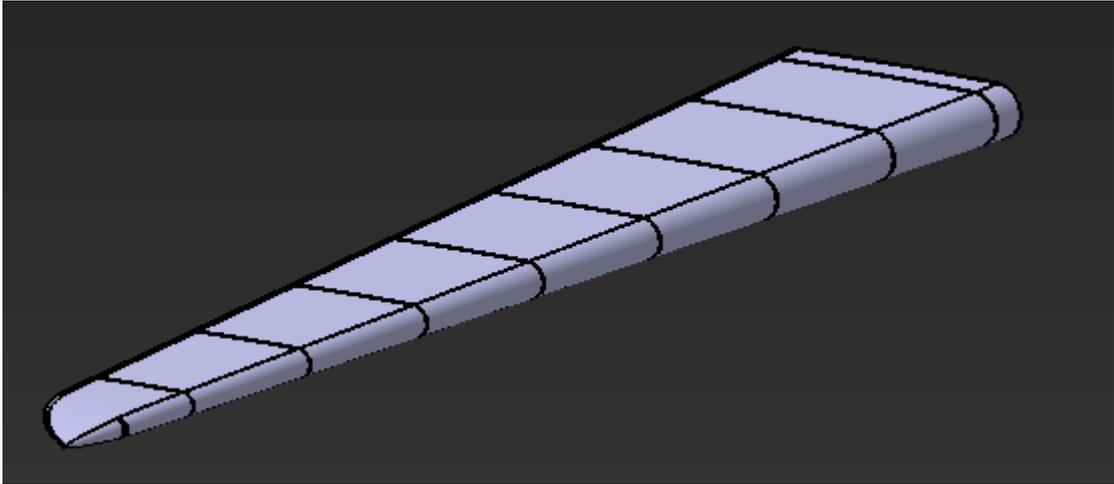


Figura 98: Timón de profundidad.

Hecho esto, se obtiene el modelado del estabilizador horizontal completo.

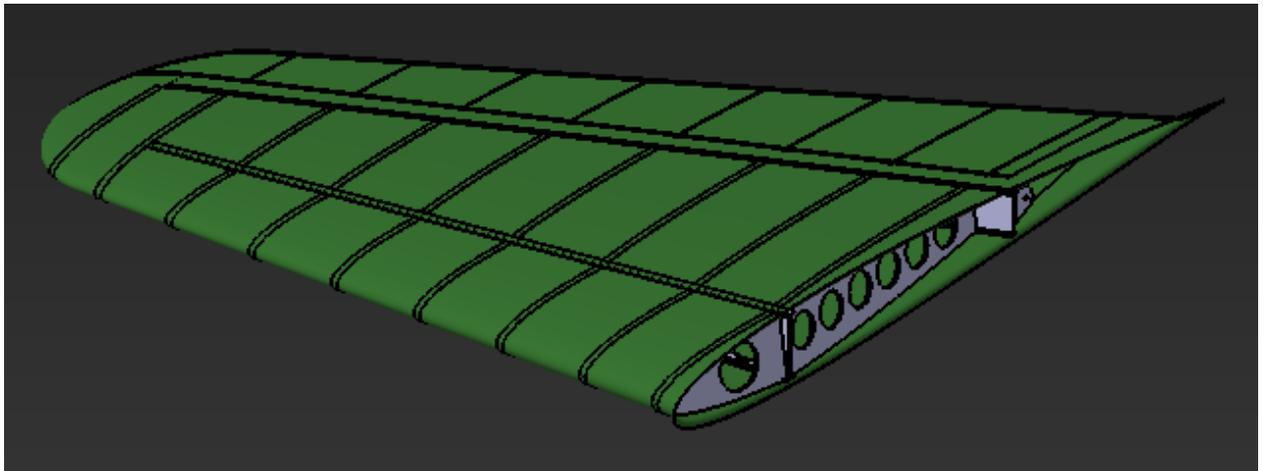


Figura 99: Estabilizador horizontal con timón plegado.

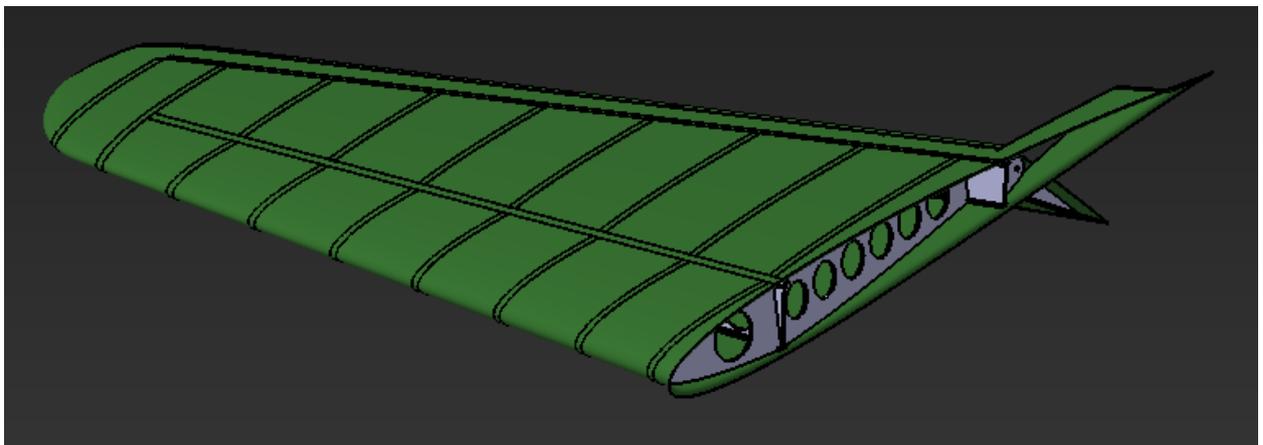


Figura 100: Estabilizador horizontal con timón desplegado.

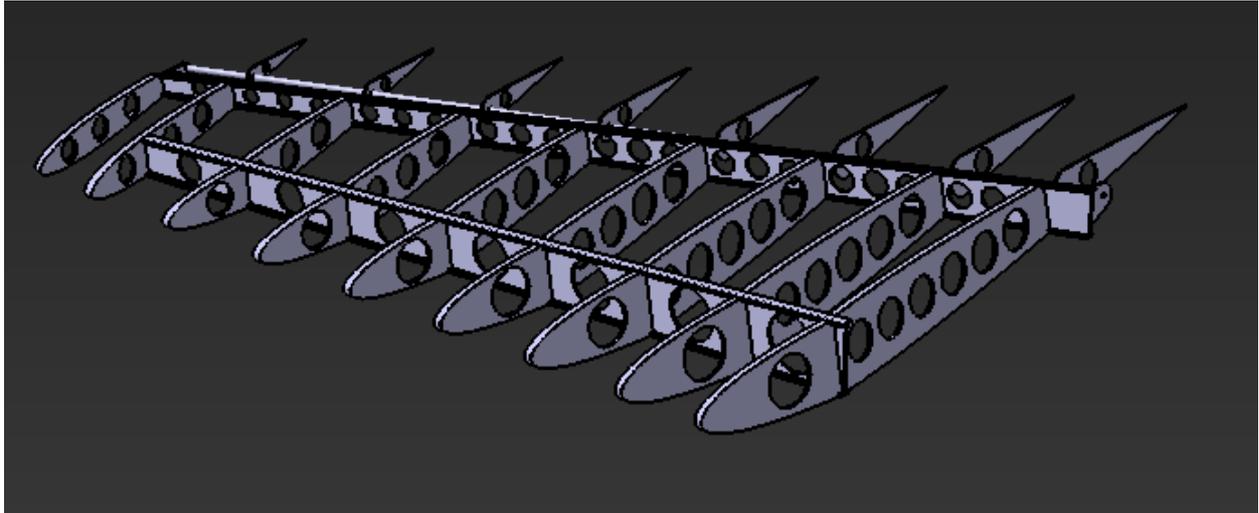


Figura 101: Estructura interna del estabilizador horizontal.

### 3.5 Estabilizador vertical

El último subconjunto para modelar es el estabilizador vertical, que se realiza de forma muy análoga al estabilizador horizontal.

Estructuralmente, también tiene dos largueros, pero solo cinco costillas, además de la piel. Como dispositivo de control, el estabilizador vertical tiene el timón de dirección, del que se hablará más adelante.

De la misma manera que para los otros subconjuntos, se comenzará el modelado mediante la superficie exterior. Al igual que el estabilizador horizontal, está definido por perfiles aerodinámicos de tipo NACA 0010, en este caso a lo largo de 1.72 m de envergadura. Estos perfiles tienen una cuerda de 2280.46 mm en la raíz y 841.73 mm en el extremo, y no presentan ángulos de torsión o diedro (Foster, 1945, pág. 121).

Análogamente al ala y al estabilizador horizontal, se importan los puntos que definen estos perfiles desde MS Excel, creando *splines* para cada uno, y terminando con la superficie de sección variable que los envuelve.

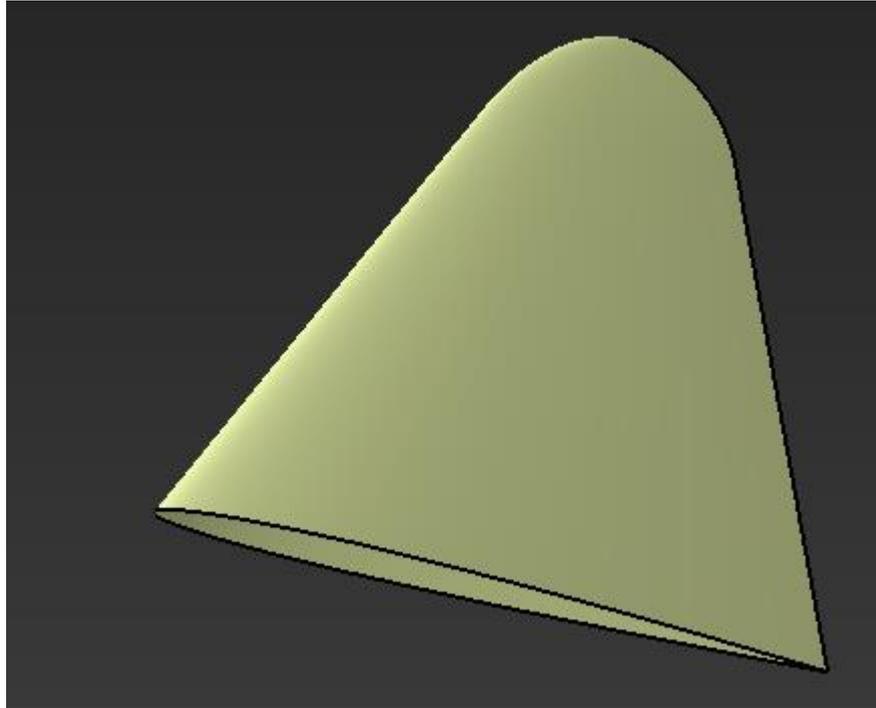


Figura 102: Superficie exterior del estabilizador vertical.

### 3.5.1 Largueros

Para el modelado de los largueros se siguen los mismos pasos que en los largueros del estabilizador horizontal.

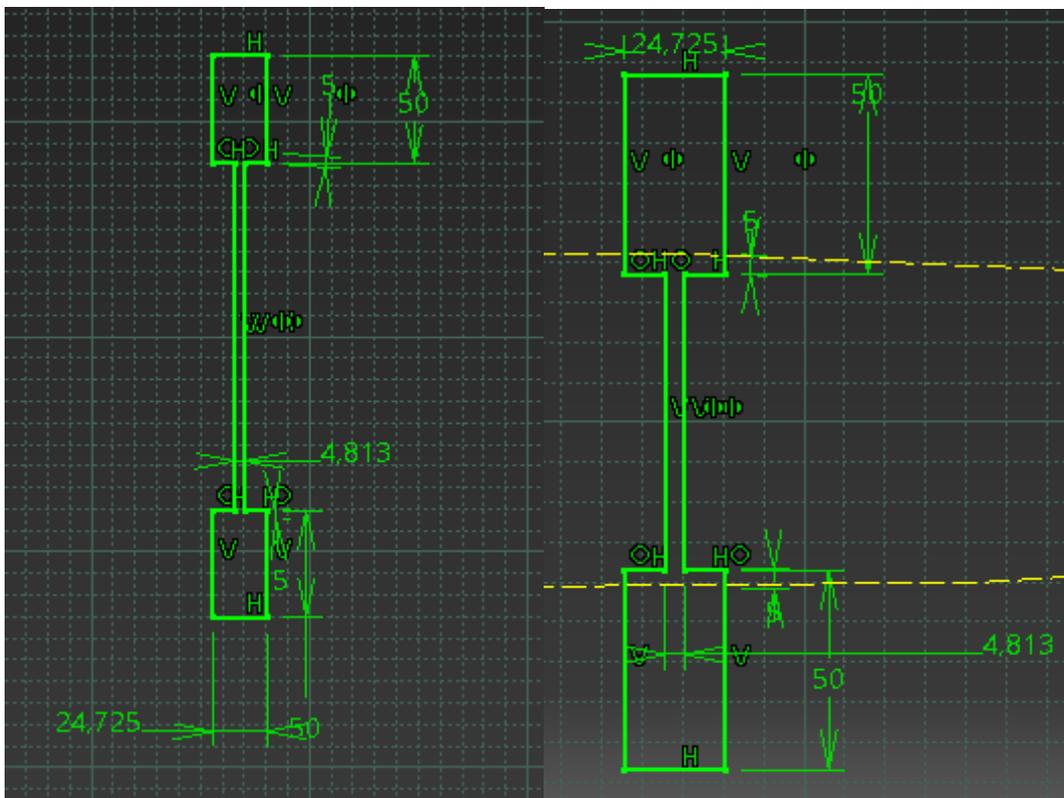


Figura 103: Perfiles de los largueros en la raíz y el extremo.

Se han de crear dos sólidos de sección variable que serán recortados mediante operaciones de *split*

para adaptarse a la forma del estabilizador y acoplarse entre sí. Por último, se les hacen agujeros para aligerar la estructura, dos en cada espacio entre costillas.

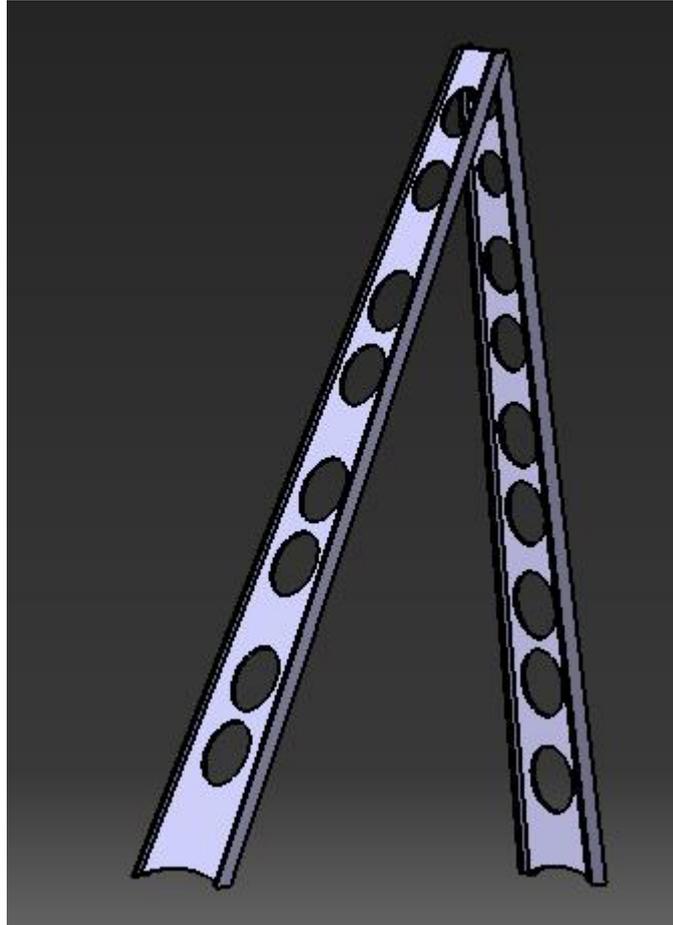


Figura 104: Largueros del estabilizador vertical.

### 3.5.2 Costillas

Al igual que los largueros, el procedimiento para modelar las costillas es el mismo que en el caso del estabilizador horizontal. Aquí, en total, habrá 9 piezas distintas: cuatro costillas de dos piezas y una de una.

Realizando para cada pieza las mismas operaciones que en las costillas del estabilizador horizontal, se obtiene el resultado final.

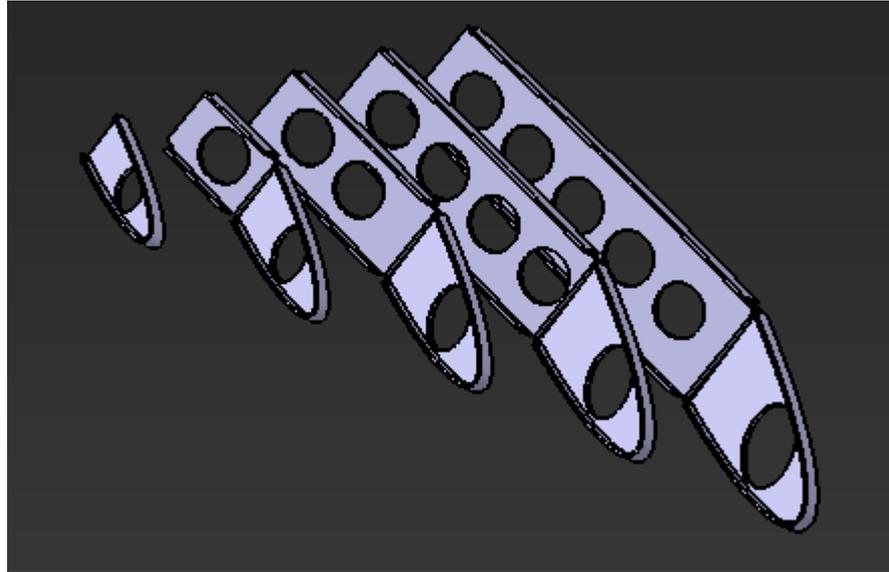


Figura 105: Costillas del estabilizador vertical.

### 3.5.3 Piel

Para la piel del estabilizador vertical, nuevamente se realiza una operación de shape fillet para adaptar la forma a la del fuselaje. Antes de dar el espesor de 1 mm, se hace un split en el sitio que ocupará el timón de dirección, que se definirá en el siguiente punto.

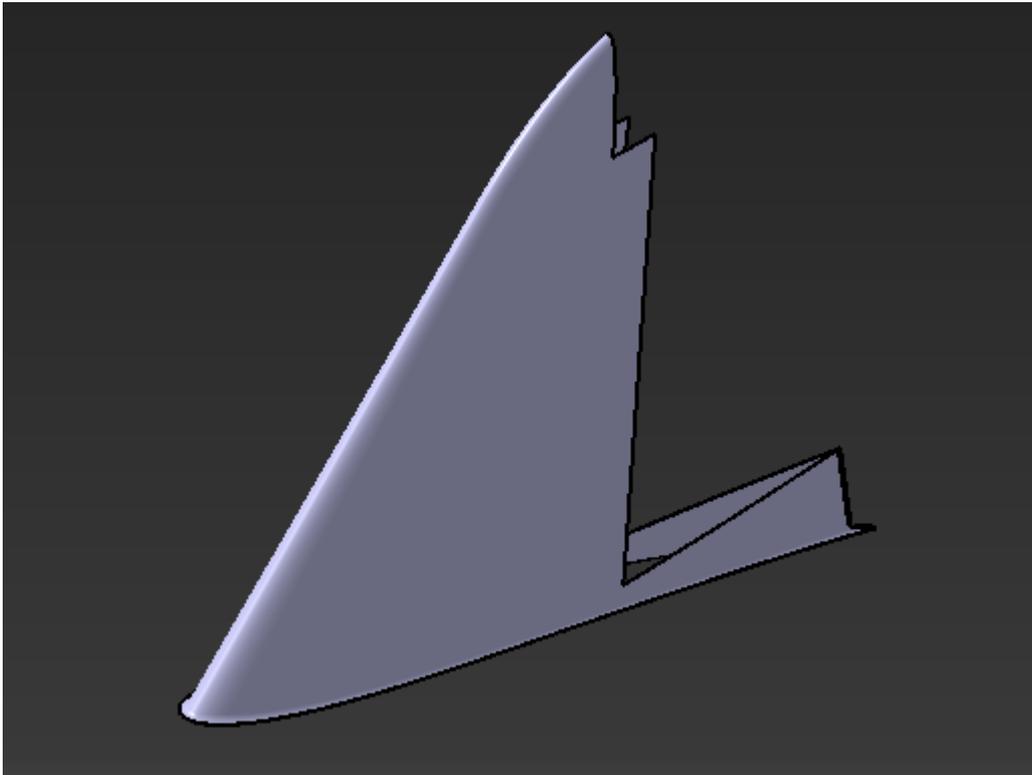


Figura 106: Piel del estabilizador vertical.

### 3.5.4 Timón de dirección

El timón de dirección es el último dispositivo de control que presenta el avión, situado en el borde de salida del estabilizador vertical. De forma similar a los otros dos dispositivos, presenta un eje de giro, costillas como elementos estructurales y la piel exterior. Su principal diferencia es la presencia en el

extremo de una zona adelantada con respecto al eje de giro, que aporta un mayor control aerodinámico al dispositivo (Foster, 1945, págs. 129-130).

Al igual que con el timón de profundidad, se añaden dos soportes mediante una operación de *pad* y *hole*, en este caso estando ambos en el larguero trasero.

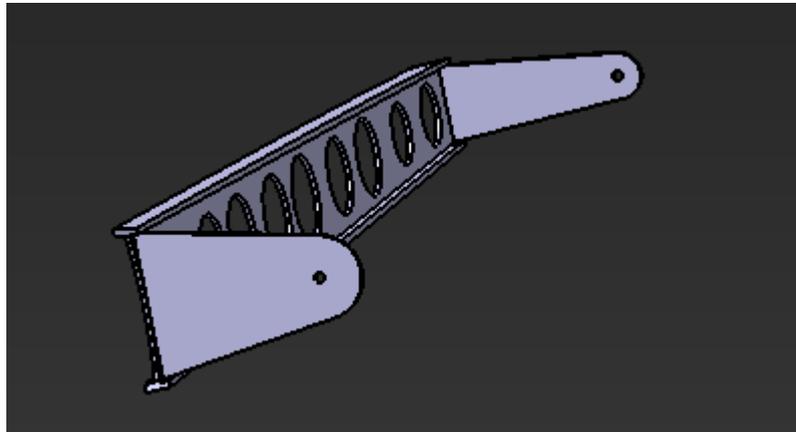


Figura 107: Soportes del larguero trasero.

Para definir la superficie exterior del timón de dirección, habrá que modificar el split que se hizo con anterioridad a la superficie del estabilizador, añadiendo en este caso dos superficies de sección variable y una más para completar mediante una operación de *fill*.

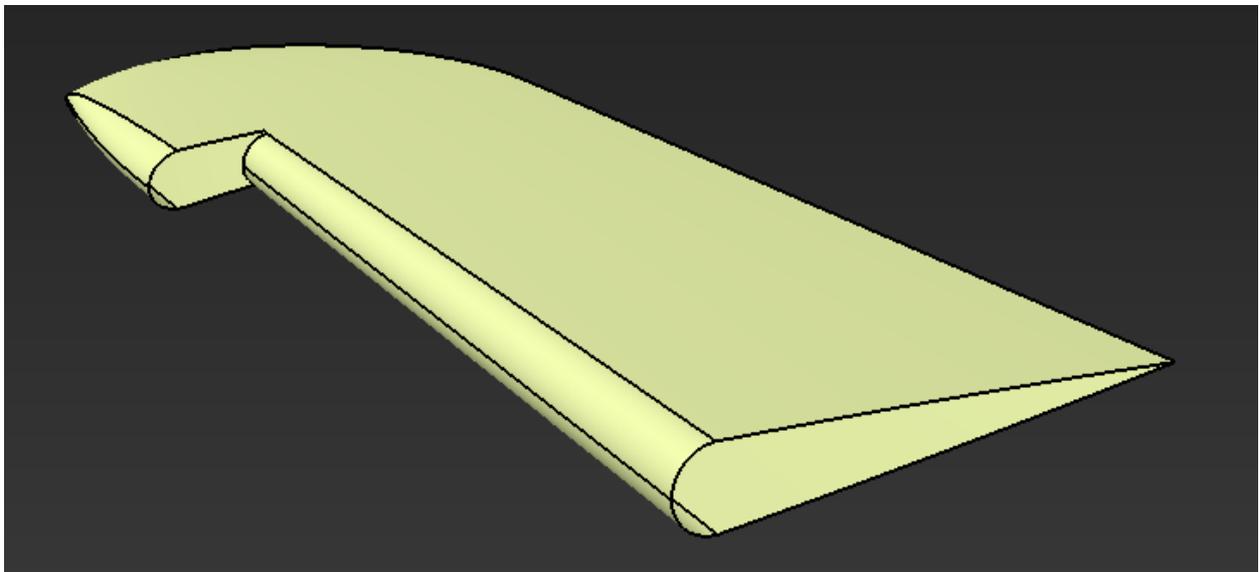


Figura 108: Superficie exterior del timón de dirección.

#### 3.5.4.1 Eje de giro

El eje de giro vuelve a ser un cilindro de 10 mm de diámetro que va de soporte a soporte del larguero posterior.

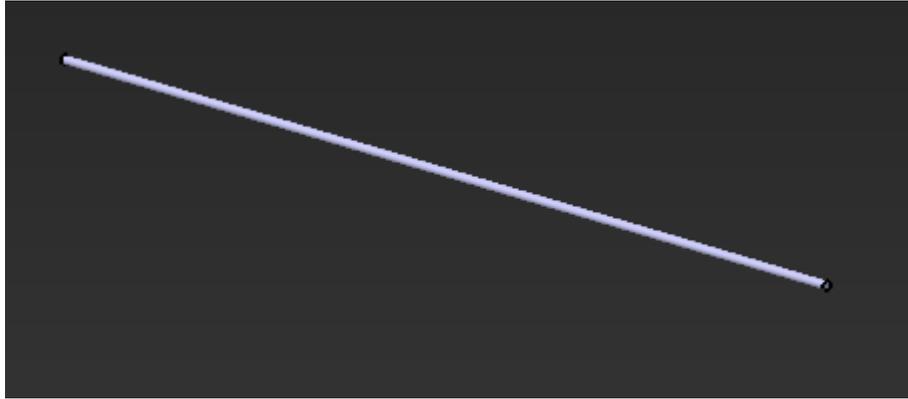


Figura 109: Eje de giro del timón.

#### 3.5.4.2 Costillas

Las costillas se modelan de forma totalmente análoga al caso del timón de profundidad, creando *pads* rectangulares que se modifican mediante *split* y *hole*.

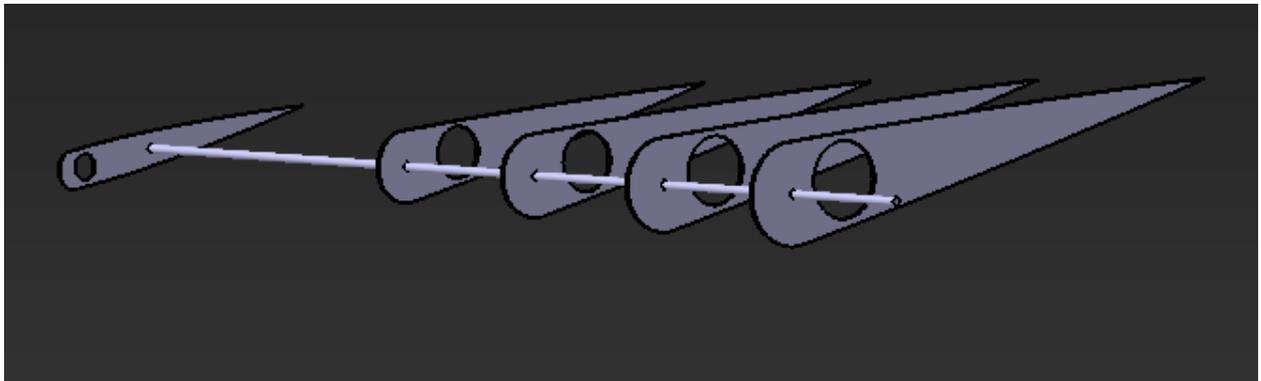


Figura 110: Costillas del timón de dirección.

#### 3.5.4.3 Piel

Para finalizar, se le da espesor a la superficie exterior antes descrita, y se hacen dos operaciones de *split* para permitir el giro del dispositivo con respecto a los soportes.

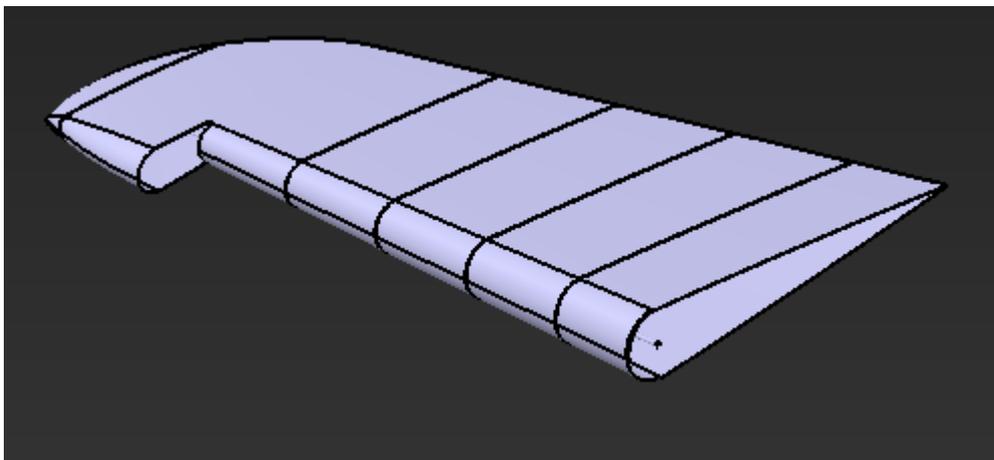


Figura 111: Timón de dirección.

Con esta pieza se termina el modelo del estabilizador vertical.

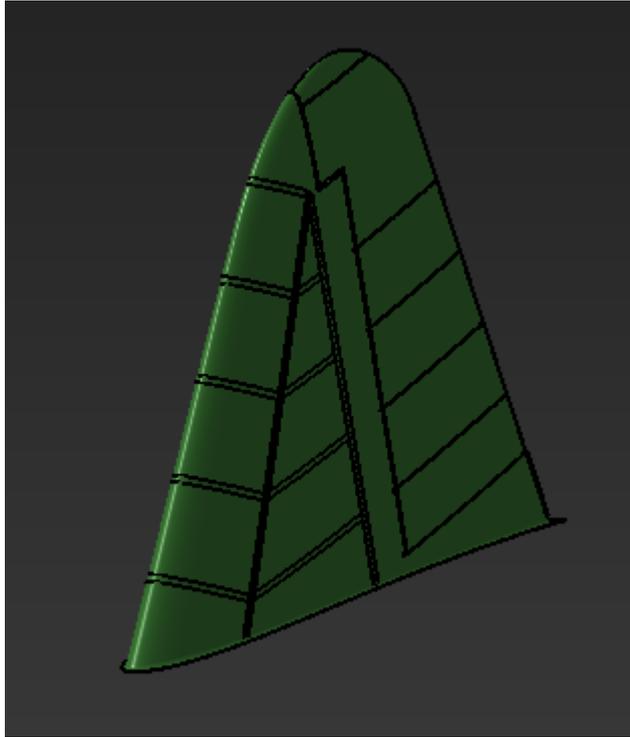


Figura 112: Estabilizador vertical con el timón plegado.

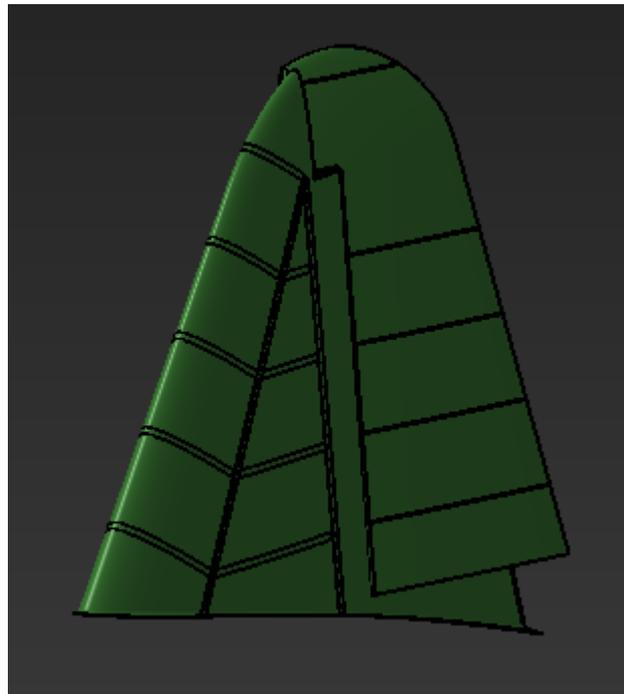


Figura 113: Estabilizador vertical con el timón desplegado.

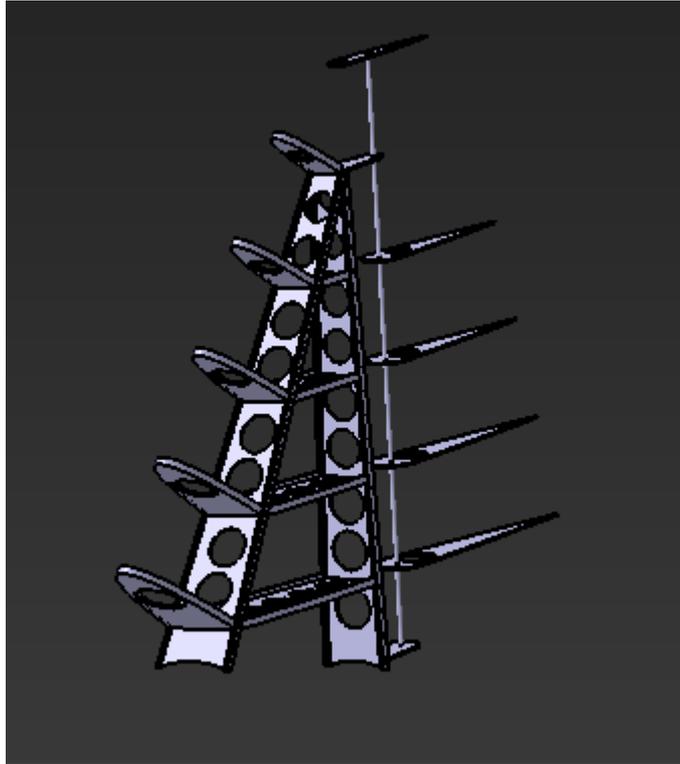


Figura 114: Estructura interna del estabilizador vertical.

### 3.6 Uniones entre elementos

En este último apartado del modelado, se quiere ejemplificar algunas de las uniones más importantes entre los distintos elementos estructurales del avión. Cabe destacar que casi la totalidad de las uniones del Mitsubishi Zero se basan en remaches y, por tanto, todas van a seguir un proceso de modelado similar (Foster, 1945, págs. 119-127).

#### 3.6.1 Largueros y costillas del ala

En primer lugar, se recrea la unión entre las costillas del ala y los largueros de esta. Para ello, se definen dos superficies auxiliares en el módulo de *wireframe and surface design*: una apoyada en el refuerzo vertical de la costilla y la otra en la parte vertical de la T del larguero. Estas superficies se unen mediante una operación de *blend*.

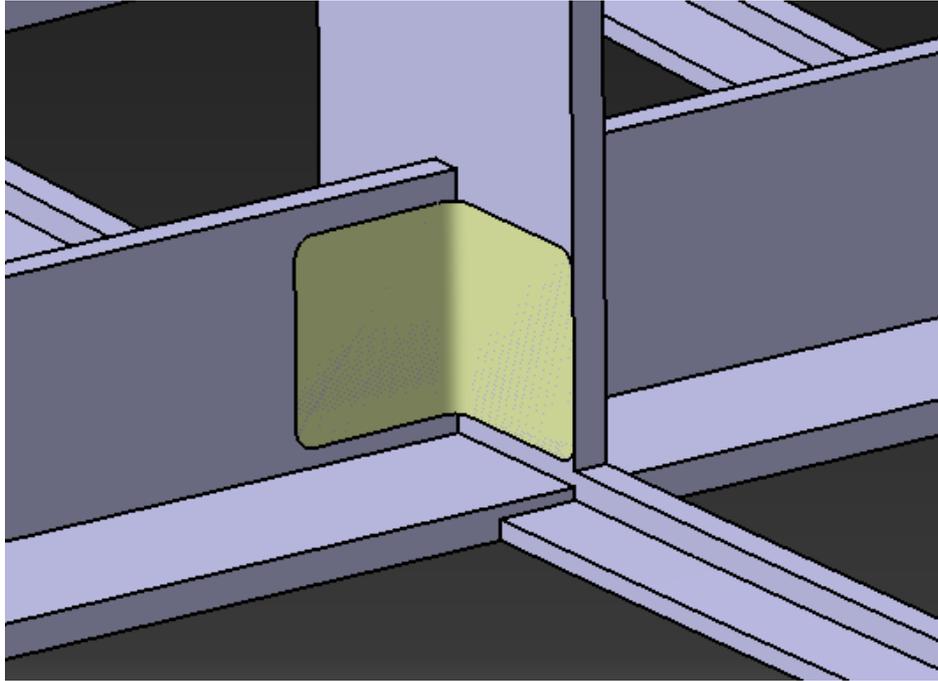


Figura 115: Superficie de la unión entre costilla y larguero.

Tras unir estas tres superficies mediante un *join*, se les da espesor con la operación *thick surface* y se procede a realizar los agujeros correspondientes a los remaches: dos en la parte de la costilla, y dos en la parte del larguero. Hay que tener en cuenta que estos agujeros continúan en la pieza correspondiente, no solo en la placa de soporte que se acaba de crear. Para ello, puede realizarse un *assembly hole* en el módulo de ensamblaje o realizar otro agujero independiente en dicha pieza.

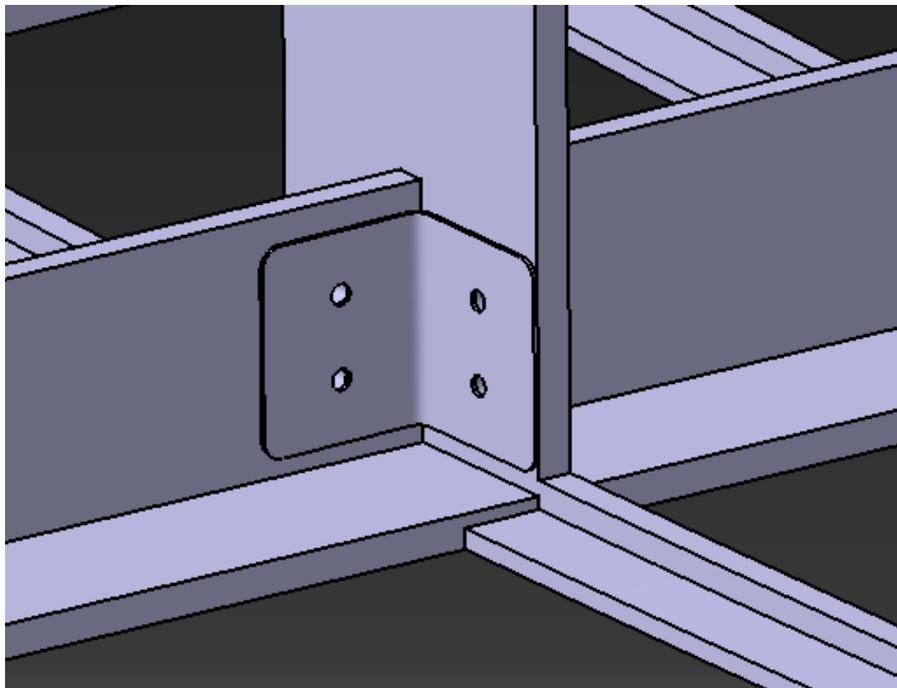


Figura 116: Unión entre costilla y larguero.

A cada costilla le corresponden cuatro uniones de este tipo, una en cada larguero, con lo que se llega a un total de 104 uniones de este tipo. Como ejemplo, se modelan las dos correspondientes a los largueros delanteros en la costilla 2. El resto siguen un procedimiento completamente análogo al aquí descrito.

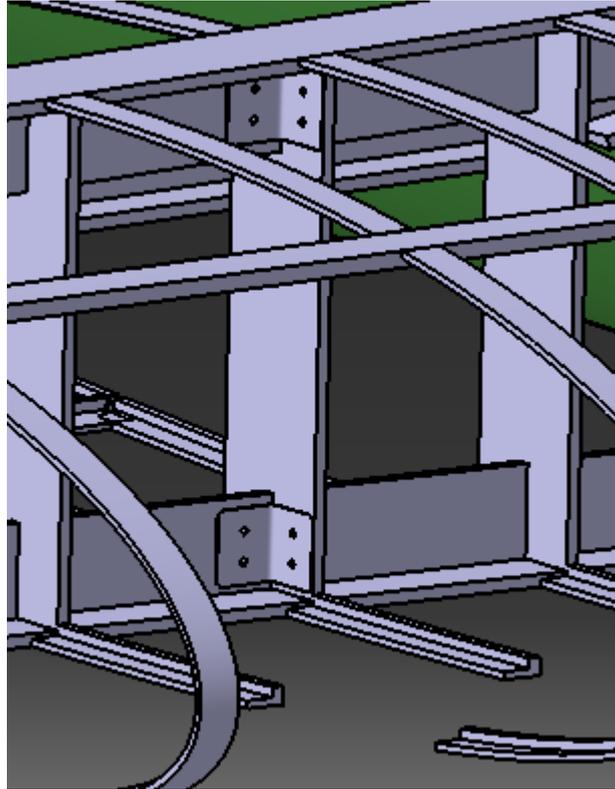


Figura 117: Uniones entre costilla 2 y largueros delanteros del ala.

### 3.6.2 Ala y fuselaje

A la hora de unir el ala y el fuselaje, se modela una unión similar a la anterior, pero esta vez entre los largueros de ambos subconjuntos. El primer paso consiste en crear las superficies correspondientes, con las mismas operaciones que antes.

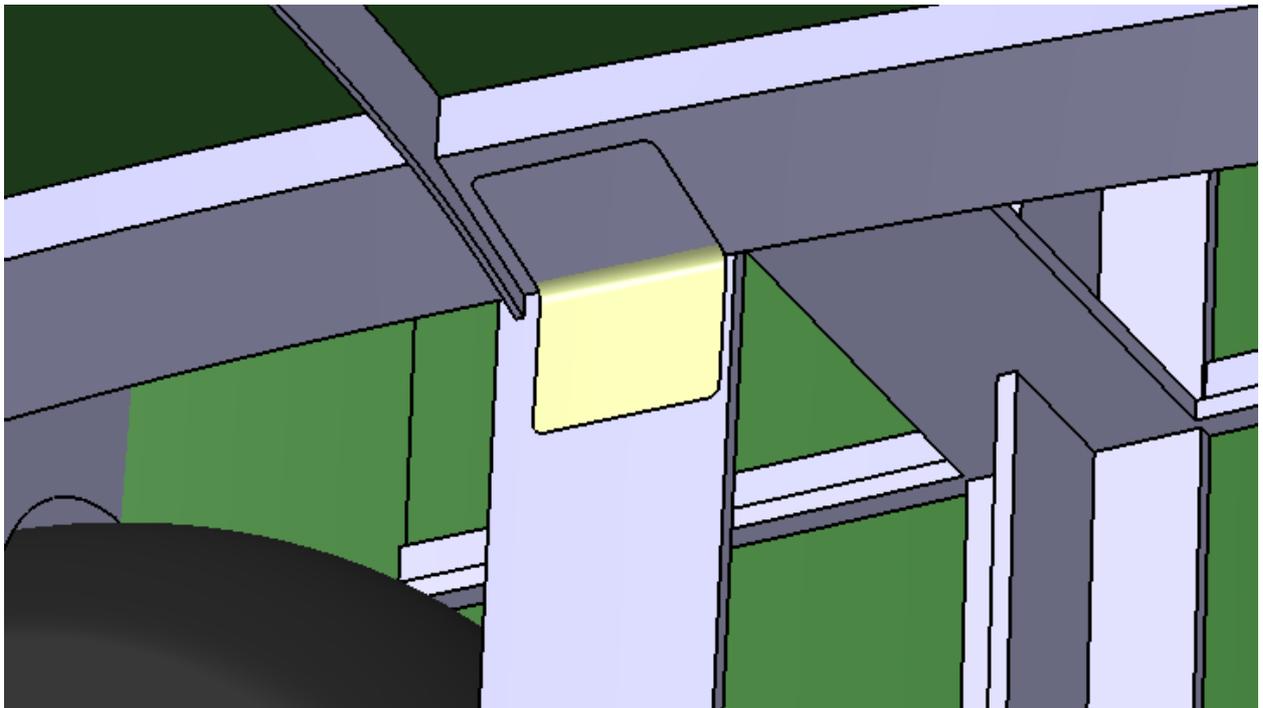


Figura 118: Superficie de la unión entre ala y fuselaje.

Se procede ahora a dar espesor y crear los agujeros para los remaches que unirán los elementos.

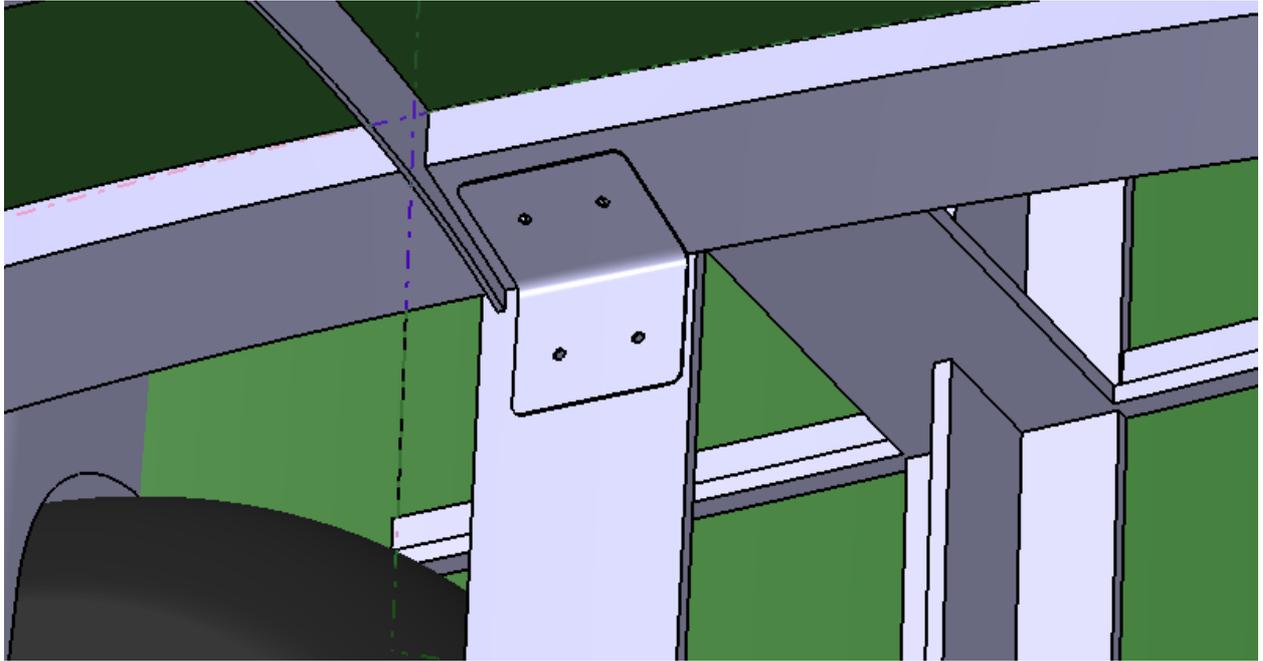


Figura 119: Unión entre ala y fuselaje.

Habría cuatro uniones en total de este tipo, y se modelan todas. Se debe tener en cuenta que dos son simétricas con respecto al plano XZ. Estas uniones fijan los dos largueros superiores del ala con los inferiores delanteros del fuselaje.

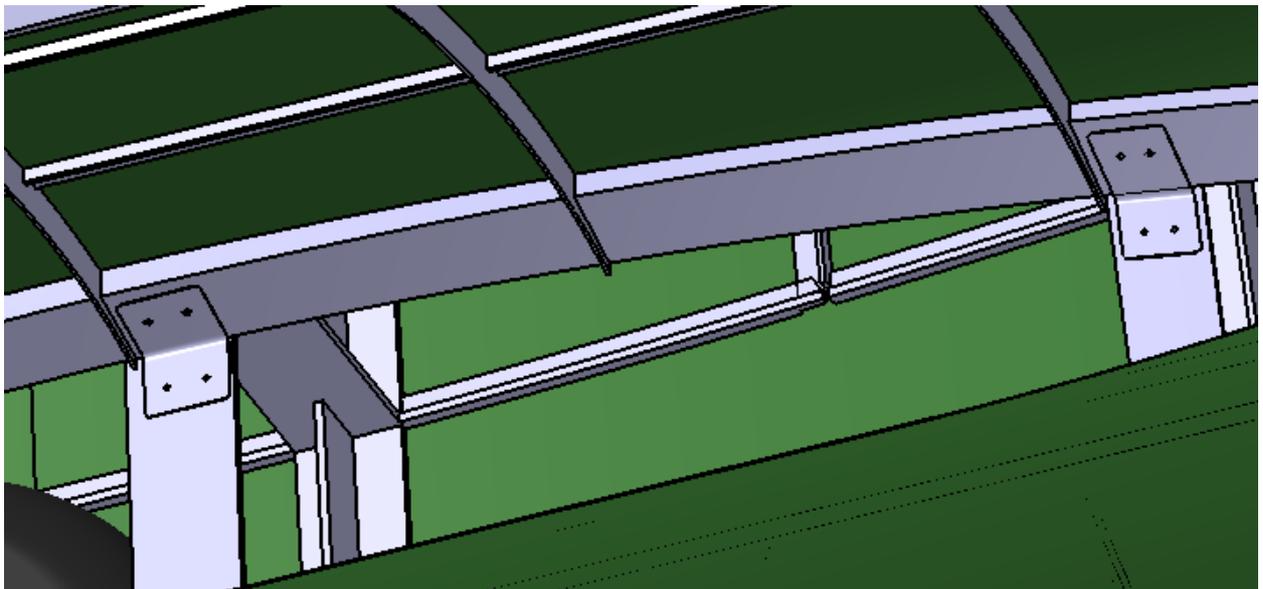


Figura 120: Uniones entre largueros de ala y fuselaje.

### 3.6.3 Estabilizadores y fuselaje

El procedimiento de estas uniones es similar al anterior. Sin embargo, debido a la morfología de estos conjuntos, la unión se hace entre los largueros de los estabilizadores y las cuadernas finales del fuselaje. En primer lugar, se crean las superficies correspondientes.

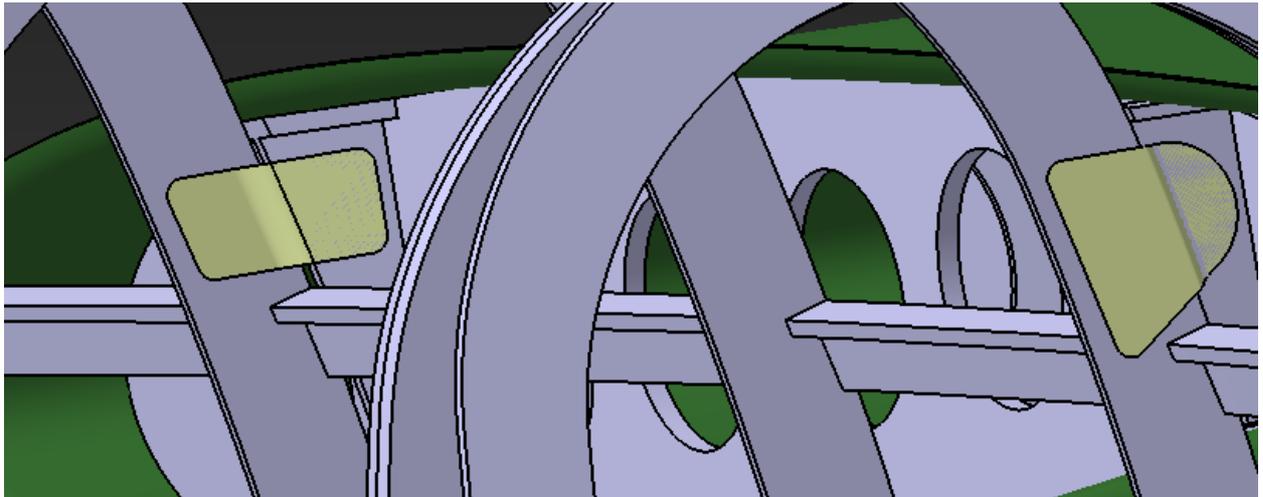


Figura 121: Superficies de las uniones entre estabilizador horizontal y fuselaje.

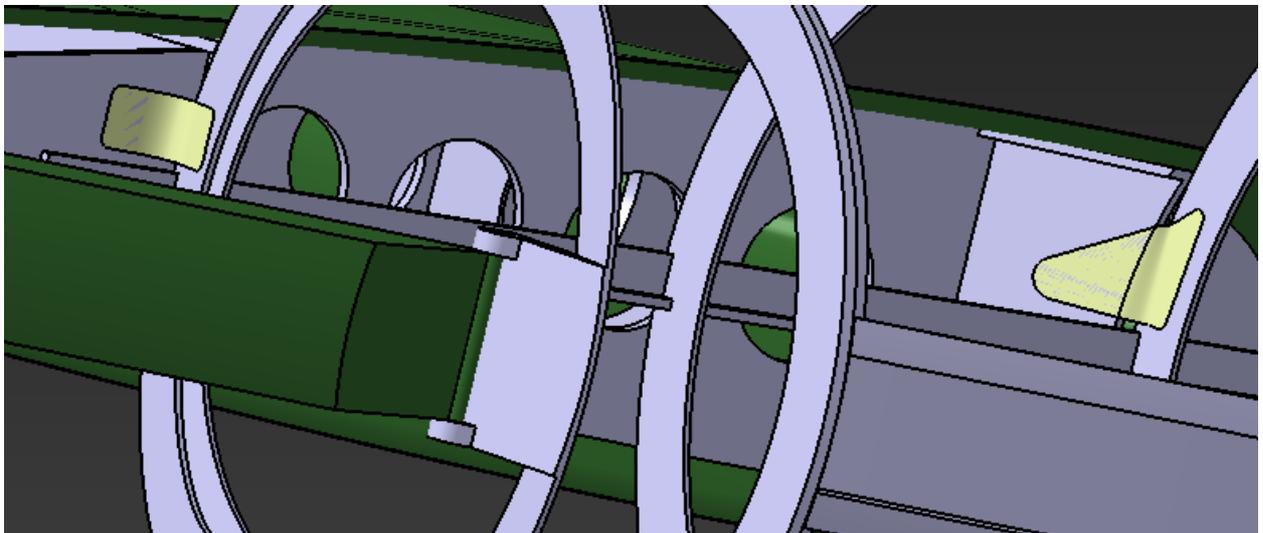


Figura 122: Superficies de las uniones entre estabilizador vertical y fuselaje.

Luego, se unen mediante un join para darles espesor y crear los agujeros con los mismos comandos que se han descrito.

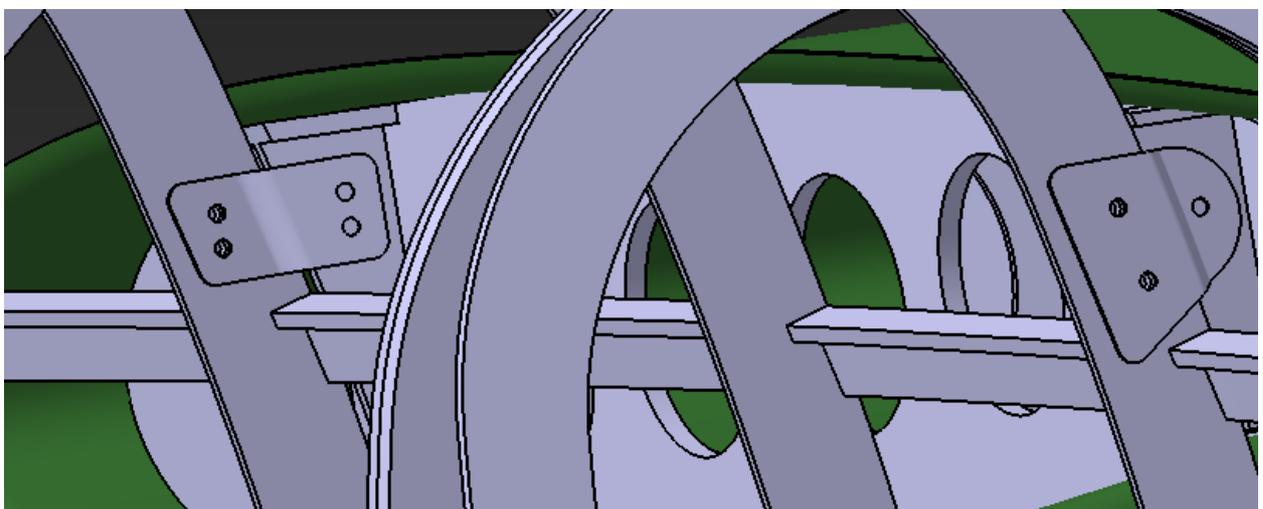


Figura 123: Uniones entre estabilizador horizontal y fuselaje.

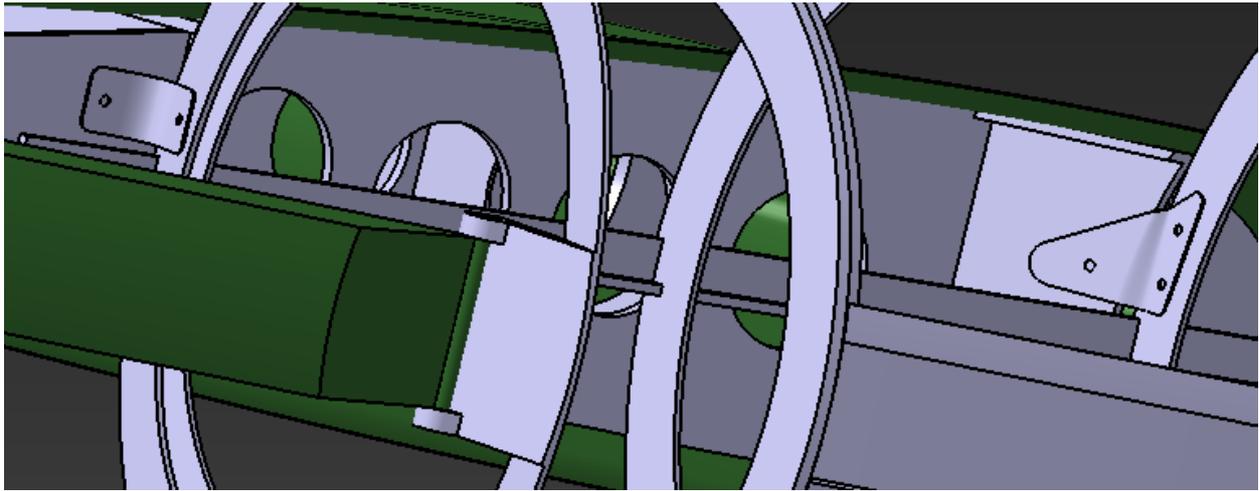


Figura 124: Uniones entre estabilizador vertical y fuselaje.

Aquí también se modelan todas las uniones, cuatro para cada estabilizador, teniendo en cuenta que la mitad son simétricas con respecto al plano XZ.

#### 3.6.4 Otras uniones

A parte de estas uniones, existen muchas otras uniones simples en el avión real que consisten en agujeros a través de varias piezas unidas mediante un remache, sin piezas adicionales como las que se han mostrado. Como ejemplo de estas, se realizan dichos agujeros en la unión entre la montura del motor y el fuselaje.

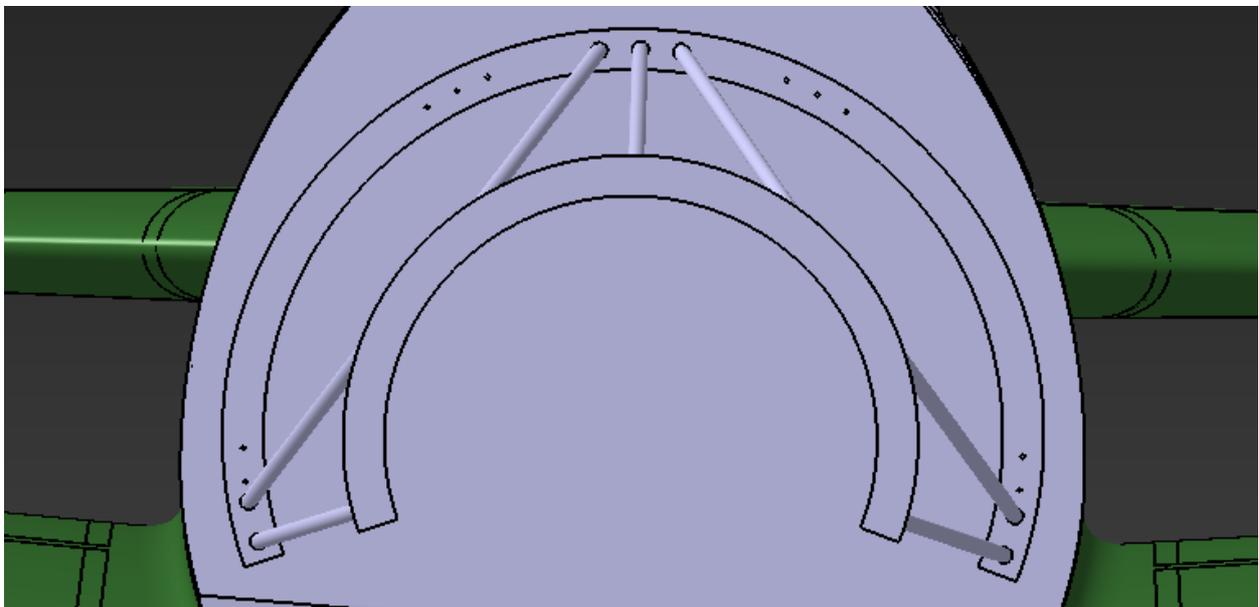


Figura 125: Agujeros para remaches entre montura del motor y cuaderna 0.

Tanto estas uniones como las anteriores se completan con remaches del tipo que se muestra a continuación, cuyo tamaño dependerá de la unión en concreto.



Figura 126: Remache.

## 4 RESULTADO FINAL, CONCLUSIONES Y TRABAJO FUTURO

---

En este último punto, tras haber hecho el estudio del Mitsubishi Zero y haberlo modelado en CATIA, se procede a extraer las conclusiones del trabajo realizado y a comentar posibles futuros desarrollos sobre el mismo.

En las figuras 127 y 128 se muestra el principal resultado del proyecto, el modelado tanto del exterior como de la estructura interna del Mitsubishi A6M2b mediante CATIA V5 R19. Se muestra, además, en la figura 129 una comparación con una fotografía del avión real.

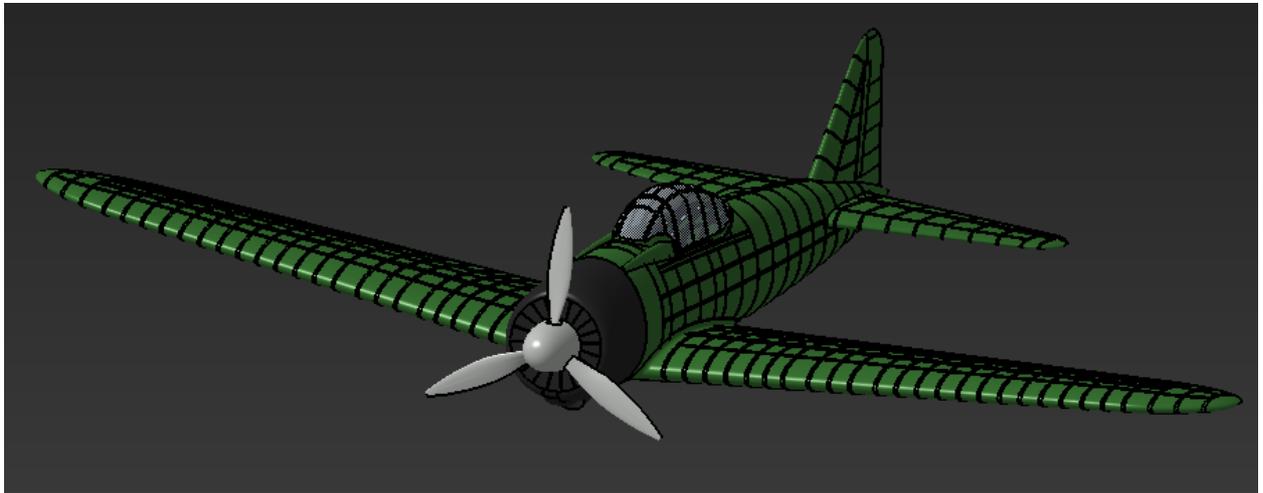


Figura 127: Modelo del Mitsubishi Zero.

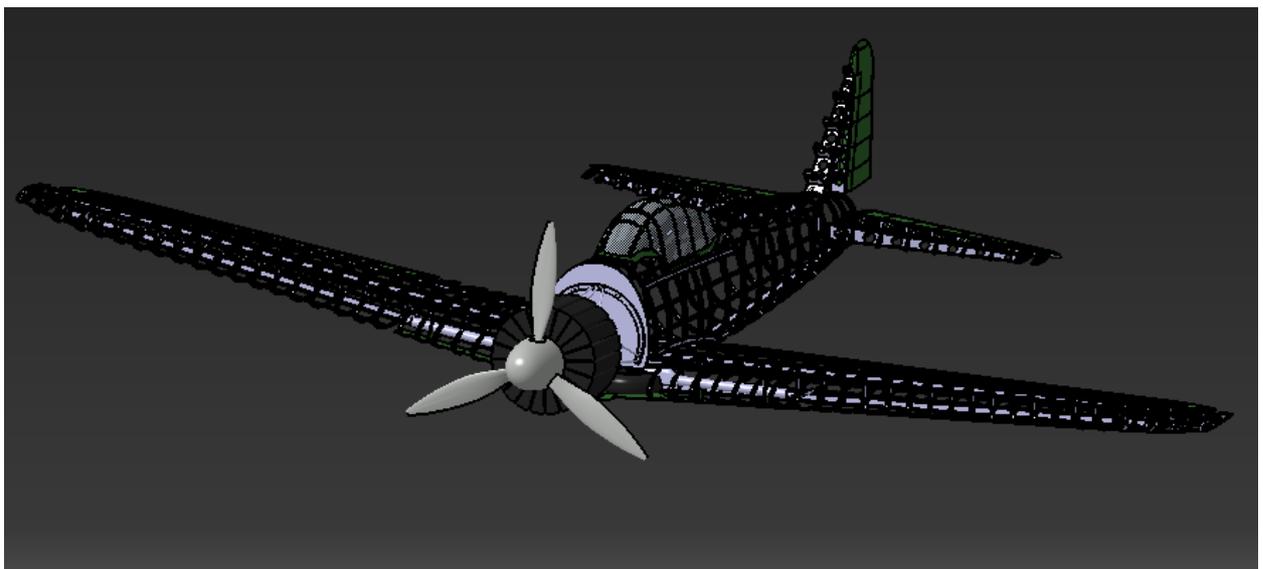


Figura 128: Estructura interna del Mitsubishi Zero.

En general, se han cumplido los objetivos con los que se inicia este documento. Por una parte, se quería entender cómo fue el proceso de desarrollo de esta aeronave y su relación con el contexto histórico de la Segunda Guerra Mundial. Mediante un análisis de los hechos que influenciaron el diseño de este avión y explorando el desarrollo del mismo y de sus distintas variantes a lo largo de sus años de operatividad, se considera que se ha llegado a una comprensión amplia del tema.

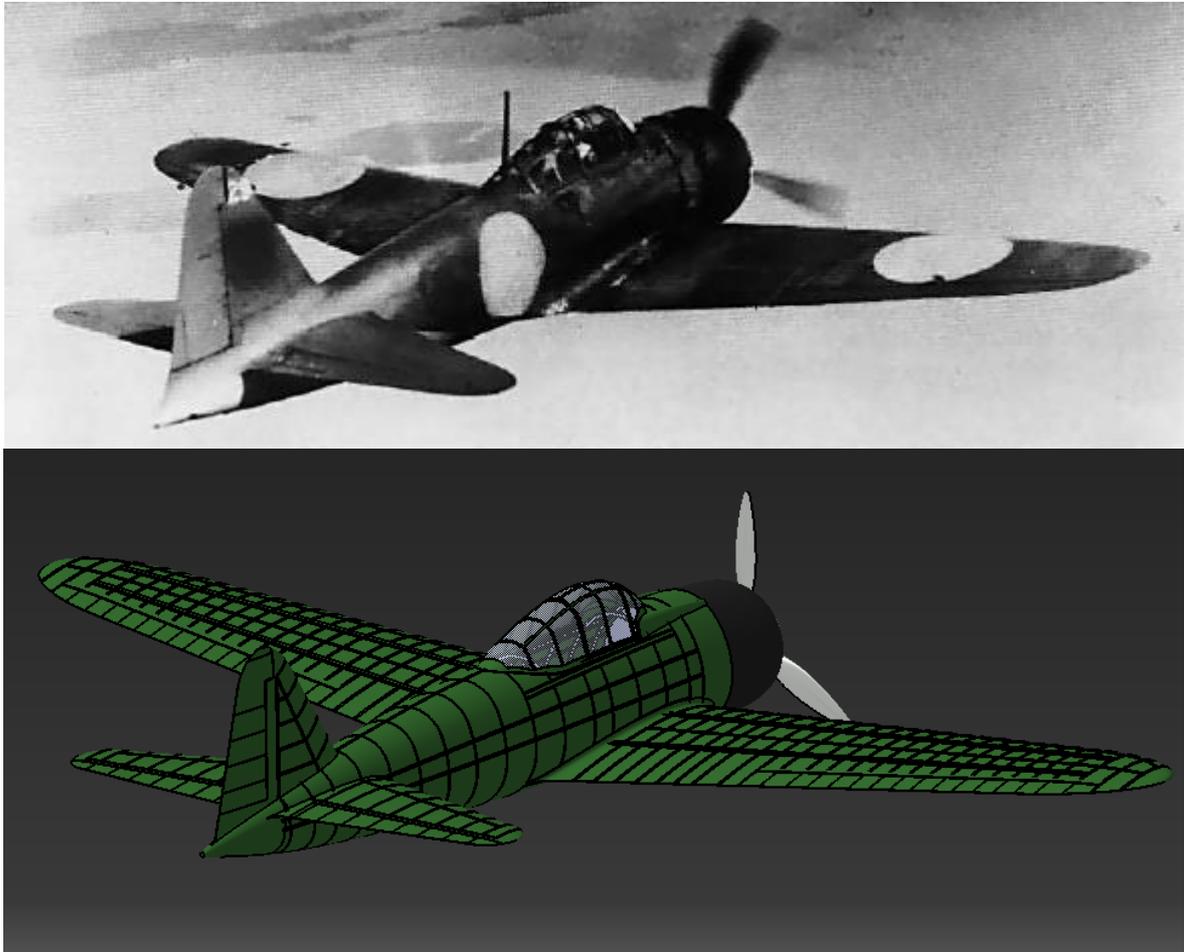


Figura 129: Comparativa con fotografía del avión real (Nohara, 1993, pág. 67).

Por otra parte, se tenía como otro objetivo el recrear digitalmente las principales piezas que componen el avión, a partir de los planos disponibles. Como se ha podido ver a lo largo de los puntos anteriores, se ha obtenido un modelo que refleja correctamente las características geométricas de los principales elementos del avión, teniendo en cuenta las limitaciones de la información de partida.

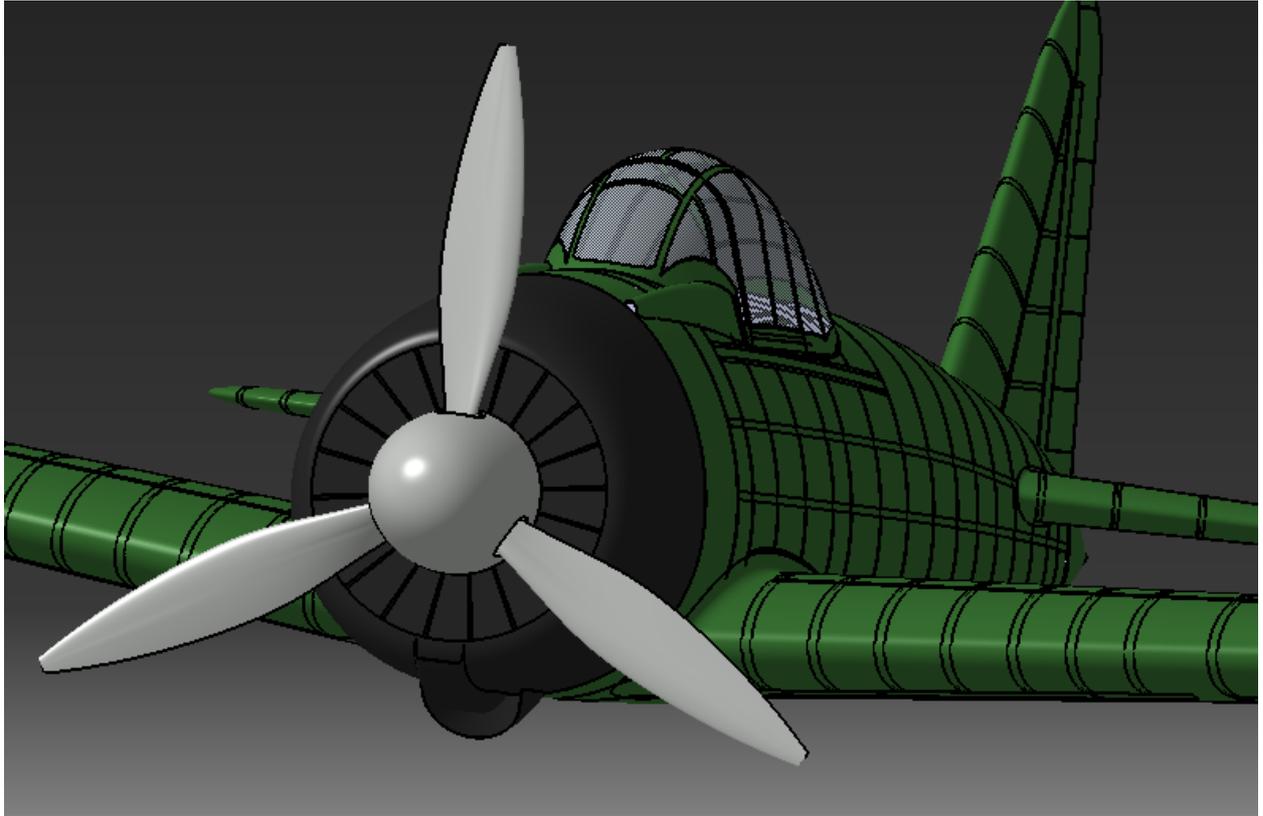


Figura 130: Detalle del modelo del Mitsubishi Zero.

En su conjunto, cabe pensar que, mediante la elaboración de este proyecto, se ha contribuido a la conservación del patrimonio aeronáutico que es, al fin y al cabo, el leitmotiv del documento.

Con respecto a posibles trabajos futuros sobre este mismo tema, se deja la puerta abierta a un modelado más profundo de algunos elementos estructurales del avión como las uniones entre los distintos elementos, así como del motor o de los sistemas internos del avión, aspectos que no se han abordado en este proyecto por las limitaciones que presenta tanto temporalmente como de información en los planos que se dispone.



# REFERENCIAS

---

- Bueschel, R. (1970). *Mitsubishi A6M1/2/-2N Zero-Sen in Imperial Japanese Naval Air Service*. Canterbury: Osprey.
- D'Angina, J. (2016). *Mitsubishi A6M Zero (Air Vanguard)*. Oxford: Osprey.
- Foster, J. J. (Mayo de 1945). Design Analysis of the Zeke 32 (Hamp). *Aviation*.
- Franck. (03 de 06 de 2009). *Les avions de legende*. Recuperado el 03 de 06 de 2020, de Les avions de legende: <http://les-avions-de-legende.e-monsite.com/pages/les-chasseurs/les-chasseurs-japonais/mitsubishi-a5m.html>
- HISTORY.com. (29 de 10 de 2009). *History*. Recuperado el 03 de 06 de 2020, de History: <https://www.history.com/topics/world-war-ii/pearl-harbor>
- Horikoshi, J. (1970). *Eagles of Mitsubishi: The Story of the Zero Fighter*. Tokyo: Konbusha Co. Ltd.
- López Rodríguez, G. (2019). Procesos de innovación militar en la Armada Imperial Japonesa. *Revista general de la marina*, 276.
- Nohara, S. (1993). *Aero Detail 7: Mitsubishi A6M Zero Fighter*. Tokyo: Dai Nippon Kaiga.
- Okazaki, T. (2011). The supplier network and aircraft production in wartime Japan. *Economic History Review*, 64(3).
- Sakaida, H. (1998). *Imperial Japanese Navy Aces 1937-45*. Botley: Osprey.
- Smith, P. (2015). *Mitsubishi Zero: Japan's Legendary Fighter*. Barnsley: Pen & Sword Books.

