

Trabajo Fin de Grado

Grado en Ingeniería Aeroespacial

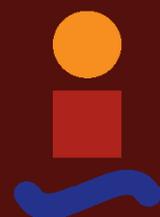
Modelado y Recreación Virtual con Catia v5
del avión Hawker Hurricane Mark IIC.
Recuperación de Patrimonio Histórico.

Autor: José Manuel Redondo Hidalgo

Tutora: Laura García Ruesgas

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

Sevilla, 2021



Trabajo Fin de Grado
Grado en Ingeniería Aeroespacial

**Modelado y Recreación Virtual con Catia v5 del
avión Hawker Hurricane Mark IIC.
Recuperación de Patrimonio Histórico.**

Autor:
José Manuel Redondo Hidalgo

Tutora:
Laura García Ruesgas
Profesora Contratada Doctora

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

Sevilla, 2021

Trabajo de Fin de Grado: Modelado y Recreación Virtual con Catia v5 del avión Hawker Hurricane Mark IIC.
Recuperación de Patrimonio Histórico.

Autor: José Manuel Redondo Hidalgo

Tutora: Laura García Ruesgas

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

Presidente:

Vocales:

Secretario:

Acuerdan otorgarle la calificación de:

Sevilla, 2021

El Secretario del Tribunal

Agradecimientos

Este espacio va dedicado a aquellas personas que, a lo largo de mi vida, me han ayudado a formarme y crecer académica, moral, emocional y profesionalmente. Además de mi familia, que ha sido partícipe y testigo de mis logros y mis fracasos, no puedo olvidarme de los profesores que amaron su trabajo y que me tendieron la mano para ayudarme a volar alto en lugar de ponerme obstáculos e intentar ser ellos los únicos que pudieran alcanzar el cielo. Tampoco puedo hacerlo de los compañeros de clase que me acompañaron en esta bonita y difícil etapa, que hicieron este viaje más ameno, y que me ayudaron con sus apuntes, consejos y experiencia. Gracias también a las personas que en algún momento se acordaron de mí y dentro de sus posibilidades y de la mejor manera que sabían me apoyaron desde la distancia para que tuviera suerte en mis exámenes. Por último, quiero acordarme de los que ya no están, que con su amor y enseñanzas han contribuido a que consiga alcanzar mis logros a pesar de su ausencia. Desde el cariño, muchas gracias.

José Manuel Redondo Hidalgo

Grado en Ingeniería Aeroespacial

Sevilla, 2021

Resumen

El contenido de este trabajo muestra el proceso de modelado del avión de combate británico Hawker Hurricane, a través del programa de diseño asistido por ordenador CATIA v5. La importancia de este monoplano en las batallas del siglo pasado, así como su aportación al desarrollo de la industria aeronáutica han sido la razón por la que se ha decidido llevar este modelo al diseño en 3D utilizando como referencia diferentes planos, dibujos de corte y fotografías reales.

En el primer capítulo, se expone el propósito de este trabajo, así como la metodología adoptada. También se realiza un breve índice de las herramientas y los módulos utilizados en CATIA. De manera concisa, el objetivo principal de este proyecto radica en la mejora de habilidades en el uso de programas CAD, así como poner en valor una de las aeronaves británicas más conocidas de la historia. Para ello, se ha recreado tanto la parte exterior del Hawker Hurricane como la estructura interna del avión, dividiendo el trabajo en varias partes como el fuselaje, el tren de aterrizaje, las alas, los estabilizadores vertical y horizontal, la toma de admisión del carburador, la entrada de aire de refrigeración, la cabina, la hélice, los tubos de escape, los mástiles, las costillas de las alas y estabilizadores, los largueros y las cuerdas del fuselaje. En último lugar, se ha aplicado material y pintura a toda la aeronave, utilizando como modelo algunas fotografías de aviones que aún se conservan en museos o en hangares de grandes fanáticos de este monoplano británico. Este proceso se ha llevado a cabo mediante el uso de los módulos *Part Design*, *Generative Shape Design*, *Assembly Design* y *Sketch Tracer*, siendo rigurosos en el orden a través de la creación de varios *Geometrical Set* y *Bodies* que nos permitan diferenciar cada elemento del modelado.

También se realizará un análisis del estudio preliminar que nos llevó a elegir el modelado del Hawker Hurricane como trabajo de fin de grado por encima de otras opciones, así como las causas que nos hicieron descartar otras que a priori parecían también interesantes. La recopilación de material que nos sirviera de referencia ha sido fundamental a la hora de desarrollar este trabajo, puesto que nos ha permitido justificar las decisiones tomadas en cada momento. Algunas referencias a destacar son los planos de la prestigiosa revista *Model Airplane News*, fundada en 1929 en Estados Unidos, así como el dibujo de corte *M. Badrocke*, extraído del libro *Hawker Hurricane Owners' Workshop Manual*. De este último también se han utilizado algunas fotografías reales de diferentes partes de la aeronave.

De manera introductoria, en el tercer capítulo se narran algunos de los mayores logros del Hawker Hurricane, cuyo diseño se atribuye al ingeniero Sydney Camm, como la Batalla de Inglaterra o la apasionante historia del piloto Eric Nicolson, galardonado con la condecoración militar más alta al valor "frente al enemigo" de todas las condecoraciones británicas, la *Victoria Cross*. Además, destacaremos algunas de las modificaciones realizadas en esta aeronave, como el Sea Hurricane.

Posteriormente, se realiza una explicación detallada del proceso seguido en el modelado de la aeronave, así como la información que se ha recopilado y las decisiones que se han tomado en cada momento para solventar algunos de los desafíos que han ido surgiendo en la realización del proyecto. Se concluye con una pequeña galería de fotografías comparativas que pondrán de manifiesto el buen resultado obtenido gracias a una avanzada y potente herramienta como es CATIA v5.

Agradecimientos	v
Resumen	vii
Índice	ix
Índice de Figuras	x
1 Introducción.....	1
1.1 <i>Objetivos</i>	1
1.2 <i>Metodología</i>	1
1.2.1 Módulo Part Design.....	2
1.2.2 Módulo Generative Shape Design	3
1.2.3 Módulo Assembly Design	4
1.2.4 Módulo Sketch Tracer.....	4
2 Estudio Preliminar y Material de Referencia	6
3 Introducción Histórica del Hawker Hurricane.....	11
4 Proceso de Modelado	14
4.1 <i>Exterior del Hawker Hurricane</i>	16
4.1.1 Fuselaje	16
4.1.2 Cabina.....	21
4.1.3 Estabilizador Horizontal	23
4.1.4 Estabilizador Vertical.....	27
4.1.5 Alas	29
4.1.6 Hélice.....	31
4.1.7 Tren de Aterrizaje.....	38
4.1.8 Rueda de Cola	41
4.1.9 Radiador de Refrigeración	43
4.1.10 Sistema de Escape	44
4.1.11 Toma de Admisión del Carburador	46
4.1.12 Mástil y Radio Antena	46
4.1.13 Aleta Ventral	48
4.1.14 Ensamblaje y Resultado Final del Exterior del Hawker Hurricane	49
4.2 <i>Estructura Interna del Hawker Hurricane</i>	50
4.2.1 Interior del Fuselaje.....	50
4.2.2 Estructura Interna de las Alas.....	52
4.2.3 Estructura Interna de los Estabilizadores Vertical y Horizontal	56
4.2.4 Ensamblaje y Resultado Final del Interior del Hawker Hurricane.....	58
5 Acabado Exterior y Resultado Final.....	60
6 Conclusiones y Futuras Líneas de Trabajo	67
Bibliografía y Material de Apoyo	69

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1.1: Orden adoptado para el árbol de operaciones.....	2
Figura 2.1: Plano alzado y perfil del Hawker Hurricane Mk. IIC.....	6
Figura 2.2: Plano planta del Hawker Hurricane Mk. IIC.	7
Figura 2.3: Plano corte longitudinal del Hawker Hurricane.	7
Figura 2.4: Plano secciones del fuselaje.	8
Figura 2.5: Dibujo de corte del Hawker Hurricane.	8
Figura 2.6: Restauración llevada a cabo por HAWKER RESTORATIONS LTD [5]	9
Figura 3.1: Sydney Camm en una fotografía tomada en 1915 en el Windsor Model Aeroplane Club.....	11
Figura 3.2: Sea Hurricane a bordo de un buque mercante en el puerto de Halifax, Canadá, en noviembre de 1941.	12
Figura 4.1: Parte exterior del Hawker Hurricane separada en varias piezas.	14
Figura 4.2: Modelo final del Hawker Hurricane realizado en CATIA.	15
Figura 4.3: Estructura interna del Hawker Hurricane separada en varias piezas.	15
Figura 4.4: Modelo final de la estructura interna realizada en CATIA.	16
Figura 4.5: Secciones del fuselaje dibujadas en los planos de la revista <i>Model Airplane News</i> [1]	17
Figura 4.6: Extracción de las secciones del fuselaje según su estación.	17
Figura 4.7: <i>Sketches</i> de las secciones del fuselaje colocados en sus correspondientes planos.	18
Figura 4.8: Guía superior del fuselaje.	18
Figura 4.9: Extremums colocados en cada sección del fuselaje.	19
Figura 4.10: Guías colocadas para dar forma al fuselaje del Hawker Hurricane.	19
Figura 4.11: Superficie del fuselaje, creada con la herramienta Multi-Sections Surface.	20
Figura 4.12: Sketch que representa el espacio donde se ubicará la cabina del piloto.	20
Figura 4.13: Creación del hueco en el fuselaje destinado a la cabina del piloto a través de un corte.....	20
Figura 4.14: Fotografía real de la cubierta de la cabina del Hawker Hurricane AG244 [16].	21
Figura 4.15: Planos y <i>Sketch</i> que formarán la estructura metálica de la cubierta.	21
Figura 4.16: Utilización de la herramienta <i>Pad</i> para dar volumen a la estructura de la cubierta.	22
Figura 4.17: Estructura cortada sin sobrepasar el hueco destinado a la cubierta.	22
Figura 4.18: Arcos y base de la estructura terminados a la izquierda, guías de las barras intermedias de la estructura a la derecha.	23
Figura 4.19: A la izquierda, estructura de la cubierta terminada sin material. A la derecha, renderizado de la cubierta completa con cristal y material aplicados.	23
Figura 4.20: Perfil LWK 80-080 frente al dibujado en los planos del estabilizador horizontal.	24
Figura 4.21: Medida de la cuerda y la posición de los perfiles del estabilizador horizontal.	24

Figura 4.22: Hoja de Excel para la implementación de perfiles aerodinámicos en el módulo <i>Generative Shape Design</i>	25
Figura 4.23: Implementación de los perfiles en el espacio y su posterior transformación utilizando la herramienta <i>Multi-Sections Surface</i>	25
Figura 4.24: Modelado de la punta del estabilizador horizontal.	26
Figura 4.25: Modelado del hueco reservado para el movimiento del timón de dirección.	26
Figura 4.26: Suavizado de las aristas mediante la herramienta <i>Edge Fillet</i>	26
Figura 4.27: Renderizado final del recubrimiento del estabilizador horizontal.	27
Figura 4.28: A la izquierda, perfiles y contorno extraídos de los planos. A la derecha, superficie creada con la herramienta <i>Multi-Sections Surface</i>	27
Figura 4.29: Construcción del borde del estabilizador vertical a través de la herramienta <i>Multi-Sections Surface</i>	28
Figura 4.30: Renderizado del modelo del estabilizador vertical terminado.	28
Figura 4.31: Contorno del ala y medida de la cuerda de las secciones que utilizaremos de referencia.	29
Figura 4.32: Contorno del ala y perfiles colocados correctamente con la ayuda de <i>Extremums</i>	30
Figura 4.33: Modelado de la superficie del ala, a excepción de la punta.	30
Figura 4.34: Recreación digital de la superficie que recubre el ala.	30
Figura 4.35: A la izquierda, dibujo de corte de <i>M. Badrocke</i> . A la derecha, fotografía real realizada por <i>Paul Blackah</i> . [4]	31
Figura 4.36: Modelado de la base del cono de la hélice.	31
Figura 4.37: Fotografía real del cono de la hélice del Hawker Hurricane. [5]	32
Figura 4.38: Modelado del cono de hélice del Hawker Hurricane.	32
Figura 4.39: Encastre y cilindro del cambio de paso de las palas [4].	33
Figura 4.40: Líneas de construcción para medir el espacio disponible para el encastre.	33
Figura 4.41: Modelado del encastre de la hélice, con las guías destinadas a sujetar el cilindro.	34
Figura 4.42: Resultado final del modelado del encastre de la hélice junto con el cilindro.	34
Figura 4.43: Vista frontal de la pala dibujada por <i>Willis L. Nye</i> [1]	35
Figura 4.44: Utilización de la herramienta <i>Revolve</i> y <i>Sweep</i> para crear la superficie y generar torsión de evolución lineal entre 0 y 30 grados.	35
Figura 4.45: Punta de la pala con la herramienta <i>Connect Curve</i> y superficie completa terminada.	36
Figura 4.46: Secciones típicas de una hélice. [18]	36
Figura 4.47: A la izquierda, unión de las secciones con la herramienta <i>Multi-Sections Surface</i> . A la derecha, borde de la punta de la pala.	37
Figura 4.48: Superficie exterior de la pala del modelado del Hawker Hurricane.	37
Figura 4.49: Renderizado final de las palas y el encastre.	38
Figura 4.50: Ensamblaje final de la hélice y el cono.	38
Figura 4.51: A la izquierda, extracción de la proyección de la rueda en una vista de perfil. A la derecha, utilización de la herramienta <i>Shaft</i>	39

Figura 4.52: Modelado del neumático y la llanta.	39
Figura 4.53: Modelado del eje y amortiguador del tren de aterrizaje.	40
Figura 4.54: Sketch del carenado y modelado completo del amortiguador, eje y carenado.	40
Figura 4.55: A la izquierda, tren de aterrizaje renderizado. A la derecha, fotografía real [19].	41
Figura 4.56: Modelado del neumático y la llanta.	42
Figura 4.57: A la izquierda, renderizado de la rueda de cola y su pieza de sujeción. A la derecha, fotografía real [20].	42
Figura 4.58: Extracción de las vistas frontal y lateral del radiador.	43
Figura 4.59: Superficie del carenado del radiador de refrigeración.	43
Figura 4.60: Arriba, fotografías reales del radiador de refrigeración [5] y [20]. Abajo, renderizado final del modelado.	44
Figura 4.61: Sistema de escape real de un Hawker Hurricane [20].	45
Figura 4.62: <i>Sketch</i> de la vista en planta del sistema de escape y utilización del módulo <i>Part Design</i>	45
Figura 4.63: Renderizado final del modelado del sistema de escape.	45
Figura 4.64: Modelado de la toma de admisión del carburador.	46
Figura 4.65: Fotografía histórica de la parte trasera del Hawker Hurricane con la antena T.R.9D [22].....	46
Figura 4.66: Modelado de los mástiles de las antenas del sistema <i>TR9D</i>	47
Figura 4.67: Modelado final de la antena del sistema de comunicaciones.	47
Figura 4.68: <i>Sketch</i> del contorno de la aleta ventral realizado en el plano de simetría del avión.....	48
Figura 4.69: Resultado final del modelado de la aleta ventral.	48
Figura 4.70: Renderizado del modelo final del exterior del Hawker Hurricane.	49
Figura 4.71: Proceso de restauración de un Hawker Hurricane donde se muestra parte de la estructura interna del fuselaje. [5]	50
Figura 4.72: Comando de entrenamiento de la Royal Air Force 1939-1940 [23].	50
Figura 4.73: Posición de las cuadernas a lo largo del eje longitudinal del avión.	51
Figura 4.74: Intersección de los planos con la superficie interior del revestimiento del fuselaje y geometría interna de las cuadernas.	51
Figura 4.75: Modelado de las cuadernas del fuselaje.	52
Figura 4.76: Resultado final de la estructura interna del fuselaje.	52
Figura 4.77: Cálculo de la posición de los planos que contienen las costillas, así como la intersección de éstos con la superficie del ala.	53
Figura 4.78: Modelado de las costillas con la herramienta <i>Pad</i>	53
Figura 4.79: Realización de la superficie de los largueros con la herramienta <i>Extrude</i> y <i>Split</i>	54
Figura 4.80: Modelado de las costillas y los largueros, aún sin huecos que aligeren su peso.	54
Figura 4.81: Modelado de los largueros y costillas mostrados por separado.	55
Figura 4.82: Renderizado final de la estructura interna del ala.	55
Figura 4.83: Determinación de la posición de las costillas del estabilizador horizontal.	56
Figura 4.84: Renderizado final de las costillas del estabilizador horizontal.	56

Figura 4.85: Determinación de la posición de las costillas del estabilizador vertical.	57
Figura 4.86: Renderizado final de la estructura interna del estabilizador vertical.	57
Figura 4.87: Renderizado final de la estructura interna del Hawker Hurricane.	58
Figura 5.1: Emblemas de la Royal Air Force ubicados en la superficie externa del Hawker Hurricane.	60
Figura 5.2: Proceso de pintado del Hawker Hurricane.	61
Figura 5.3: Renderizado 1 del Hawker Hurricane realizado en CATIA v5.	62
Figura 5.4: Fotografía real 1 del Hawker Hurricane P3717 [24].	62
Figura 5.5: Renderizado 2 del Hawker Hurricane realizado en CATIA v5.	63
Figura 5.6: Fotografía real 2 del Hawker Hurricane P3717 [25].	63
Figura 5.7: Renderizado 3 del Hawker Hurricane realizado en CATIA v5.	64
Figura 5.8: Fotografía real 3 del Hawker Hurricane P3717 [20].	64
Figura 5.9: Renderizado 4 del Hawker Hurricane realizado en CATIA v5.	65
Figura 5.10: Fotografía real 4 del Hawker Hurricane P3717 [26].	65

1 INTRODUCCIÓN

A lo largo de este documento se desarrollará el proceso de modelado de la aeronave Hawker Hurricane Mark IIC utilizando el software de diseño asistido por ordenador CATIA V5R20 y con el apoyo de diferentes fuentes de referencia, especialmente los planos del ingeniero *Willis L. Nye* y el dibujo de corte de *M. Badrocke* publicado en el libro *Hawker Hurricane Owners' Workshop Manual*, así como algunas fotografías reales mostradas a lo largo de esta memoria.

1.1 Objetivos

El principal propósito de este trabajo radica en ampliar la destreza con CATIA, el programa CAD más utilizado en la industria aeronáutica, especialmente en los módulos de *Part Design*, *Generative Shape Design* y *Assembly Design*, impartidos en la asignatura optativa Diseño y Fabricación Asistidos por Ordenador del Grado en Ingeniería Aeroespacial de la Universidad de Sevilla, así como ser capaz de plasmar ese aprendizaje en un caso real, más cercano a los requerimientos de la industria. Además, se ha implementado el uso del módulo *Sketch Tracer*, con el que se han tomado algunas medidas extraídas directamente de los dibujos de los planos, teniendo en cuenta la escala anotada por el autor.

Por otro lado, el hecho de que estemos ante una aeronave tan trascendente tanto en la historia de la Real Fuerza Aérea británica como en el transcurso de la Segunda Guerra Mundial, además de los avances que supuso en la industria aeronáutica de la época, recalcan la necesidad de recrear en tres dimensiones el Hawker Hurricane.

1.2 Metodología

Para la realización del modelado se ha dividido el avión en varias partes (*Parts*). De esta forma, se ha comenzado por la parte exterior o la parte visible del Hawker Hurricane, creando de manera separada el fuselaje, el tren de aterrizaje, las alas, los estabilizadores vertical y horizontal, la toma de admisión del carburador, la entrada de aire de refrigeración, la cabina, la hélice, los tubos de escape y los mástiles. Posteriormente se ha desarrollado la estructura interna del avión, apoyándose en el diseño exterior, del que se tenía más información en los planos. Así, se han recreado las costillas y los largueros del ala, las cuadernas del fuselaje y, de manera preliminar, el esqueleto de los estabilizadores vertical y horizontal.

Por otro lado, con el objetivo de llevar a cabo una metodología de trabajo ordenada, cada *CATPart* se ha dividido en tres *Geometrical Set*: una sección llamada “Estructura”, donde se han ido depositando los elementos de construcción utilizados en el módulo *Generative Shape Design*, compuestos por cuatro subgrupos denominados “Planos”, “Guías”, “Extremums” y “Secciones”. En el primero se han guardado todos los planos que nos han servido de apoyo para crear los *Sketch*, así como para realizar intersecciones con superficies o líneas. En el segundo se encuentran las líneas de apoyo o construcción, esto es, las que no repercutían de manera directa en la forma del elemento a modelar, como las guías utilizadas en la herramienta *Multi-Sections Surface* para suavizar el desarrollo de la superficie del fuselaje. En el subgrupo llamado “Extremums” se han ido colocando los puntos utilizados. Este nombre es debido al procedimiento utilizado en el modelado del fuselaje para trazar las guías superior, inferior, derecha e izquierda. Por último, en el subgrupo llamado “Secciones” se han ubicado principalmente los *Sketch* y los elementos en 2D directamente trascendentes para la forma de la pieza a modelar, como son las diferentes secciones del fuselaje o los perfiles del ala a lo largo de su envergadura.

En el segundo *Geometrical Set*, denominado “Superficies”, encontramos las superficies generadas en el módulo *Generative Shape Design* como resultado de los elementos anteriormente creados.

Por último, tras acabar el desarrollo completo de la aeronave, se ha concluido dando color al exterior de todas las partes. Para este proceso se ha utilizado un tercer *Geometrical Set* denominado “Pintura”, ya que formaba parte de otra etapa distinta.

Además de las superficies que han dado forma al Hawker Hurricane, era necesario dotar a éstas de volumen, utilizando el módulo *Part Design*. Para almacenar estos elementos en tres dimensiones ha sido necesario insertar un *Body* o, en caso necesario para diferenciar varias piezas de un mismo *CATPart*, varios *Bodies*. Así, el “Árbol de operaciones” queda de la siguiente forma:



Figura 1.1: Orden adoptado para el árbol de operaciones

Para una mejor comprensión del proceso a seguir a lo largo del proyecto, a continuación, se expondrá brevemente las funciones principales utilizadas en cada módulo.

1.2.1 Módulo Part Design

Este *workbench* tiene como función la creación de elementos sólidos, partiendo normalmente de una geometría generada en un *sketch*. Las herramientas principales son:

- **Sketch:** es una conexión de curvas o líneas bidimensionales que crean un perfil normalmente cerrado. En esta configuración, habitualmente se establecen un conjunto de cotas o restricciones. Una vez definido el boceto, se puede realizar diversas operaciones como *Pad*.
- **Pad:** permite la extrusión de perfiles cerrados. En el menú se puede escoger el tipo de extrusión, eligiendo su dimensión, la dirección en la que se propagará el perfil, entre otras propiedades más secundarias.
- **Pocket:** se utiliza para eliminar material de una pieza extruyendo una curva cerrada. Funciona de manera similar a la herramienta *Pad*, excepto que en este caso el perfil seleccionado resta material.
- **Shaft:** permite crear un cuerpo mediante la revolución de un perfil cerrado, seleccionando el perfil a revolucionar y el eje de giro.
- **Rib:** forma un sólido mediante el barrido de un perfil a lo largo de una curva que sirve de guía.
- **Multi-Sections Solid:** puede crear un sólido mediante el barrido de varios perfiles colocados perpendicularmente a la espina. Además, se pueden introducir varias curvas de guía para adaptarse mejor al diseño deseado.
- **Edge Fillet:** permite redondear aristas en piezas sólidas.

- Chamfer: esta herramienta crea chaflanes en aristas de piezas sólidas.
- Thick Surface: se utiliza para producir sólidos dando grosor a una superficie.
- Shell: herramienta que genera vaciados en sólidos, seleccionando la cara a eliminar y definiendo un grosor.
- Close Surface: cierra superficies transformándolas en piezas sólidas.
- Circular Pattern: permite propagar circularmente un elemento, como puede ser un *Pad* o un *Pocket*, alrededor de un eje.
- Mirror: se utiliza para realizar una simetría con copia de un objeto con respecto a un plano.
- Add: forma parte de la barra de herramientas de *Boolean Operations*. Suma dos cuerpos (*body*) que se encuentren en un mismo *Part*.
- Remove: lleva a cabo una operación booleana, restando dos sólidos que se encuentren en un mismo *Part*.
- Apply Material: aplica a cada *Body* un material, permitiendo que al renderizar la pieza se aprecie una textura determinada. Además, permite estudiar parámetros como la inercia o el centro de masas.

1.2.2 Módulo Generative Shape Design

Su finalidad está en crear superficies a partir de una geometría definida en un *sketch* o cualquier línea o curva creada en el espacio.

- Extrude: genera una superficie mediante el barrido de una curva en una dirección determinada con unos límites definidos.
- Revolve: permite crear una superficie mediante la revolución de una curva alrededor de un eje de giro.
- Fill: forma una superficie dentro de un contorno cerrado, siendo útil sobre todo para cerrar pequeños huecos de manera sencilla.
- Blend: nos permite generar superficies entre dos curvas dadas, debiéndose seleccionar tanto éstas como el soporte al que pertenecen.
- Connect Curve: sin necesidad de crear un *sketch*, podemos unir dos curvas mediante un *spline* controlando su forma a través de una propiedad denominada tensión, útil para moldear la curva.
- Extract: se utiliza para extraer elementos (sólidos, superficies, curvas, etc.) definiendo, según se desee, que esta selección se propague por continuidad de punto, de tangencia o de curvatura.
- Intersection: da como resultado la intersección entre dos elementos, ya sea una superficie, una curva o un punto.
- Join: se utiliza para unir elementos en uno solo. Pueden ser curvas o superficies.
- Split: realiza el corte de una superficie o curva con otro elemento.
- Multi-Sections Surface: puede crear una superficie mediante el barrido de varios perfiles colocados perpendicularmente a la espina. Además, se pueden introducir varias curvas de guía para adaptarse mejor al diseño deseado.
- Apply Material: aplica a cada superficie un material, permitiendo que al renderizar la pieza se aprecie una textura determinada.

1.2.3 Módulo Assembly Design

Crea la unión de varios *Parts* en un solo *Product*, definiendo diferentes restricciones que permitan la obtención del resultado deseado. Este módulo funciona de manera cooperativa con los dos módulos descritos anteriormente.

- Coincidence: se utiliza para alinear elementos, ya sea concetricidad, coplanaridad o coaxialidad.
- Contact Constraint: une dos superficies planas.
- Offset Constraint: sirve para definir una distancia entre dos elementos que se encuentren paralelos.
- Angle Constraint: define el ángulo que forman dos elementos.
- Fix: fija una pieza en el espacio impidiendo su movimiento.
- Symmetry: se puede crear un nuevo *Part* simétrico a cualquier elemento del *Product*.
- Existing Component: permite introducir elementos en el *Product* creados previamente.
- Manipulation: se utiliza para mover las piezas libremente moviendo el ratón. También es posible la utilización del compás para realizar la misma función.
- Explode: separa los componentes que forman el *Assembly* simulando una explosión.
- Manipulation On Clash: calcula si existe colisión entre los componentes.

1.2.4 Módulo Sketch Tracer

Su función radica en hacer uso directo de imágenes o planos para tomar medidas y realizar *sketches* que nos permitan posteriormente crear superficies o sólidos en los módulos anteriormente descritos.

- Create an Immersive Sketch: se utiliza para seleccionar una imagen archivada en nuestro ordenador y proyectarla en el plano seleccionado.
- Sketch Parameters: su función es ajustar los ejes del sistema de referencia de manera adecuada para trabajar. Además, una característica fundamental es la posibilidad de establecer una escala definiendo la distancia entre dos puntos de referencia cualesquiera.
- Properties > Graphic: aunque no es una herramienta en sí, haciendo clic derecho en la imagen importada y accediendo a la pestaña “Graphic” del menú de propiedades, será esencial aumentar la transparencia hasta un valor aproximado de 180, de manera que sea mucho más fácil trazar *Splines* dentro de un *Sketch* en los módulos de *Part Design* y *Generative Shape Design*.

2 ESTUDIO PRELIMINAR Y MATERIAL DE REFERENCIA

El primer paso para la realización de este proyecto, al igual que en cualquier otro, era poner sobre la mesa diferentes ideas tratando de ser influenciado por los menos prejuicios posibles para lograr así, en un proceso posterior, filtrar y ser capaz de elegir el tema sobre el que trabajar estableciendo diferentes criterios. De esta manera, se tuvieron en cuenta algunos vehículos espaciales, autogiros, aviones comerciales, bombarderos como el CASA 2.111 o aviones de combate como el archiconocido Spitfire o el propio Hawker Hurricane. Se decidió descartar aquellos que, por ser demasiado modernos o tener relevancia en el panorama actual, no disponían de información suficiente de manera pública, siendo un gran obstáculo para la realización de un modelado preciso y fiel a la realidad. Por otro lado, un vehículo que fuera demasiado grande supondría una gran carga de tiempo y trabajo, que impediría tener en cuenta pequeños pero importantes detalles, así como exceder los 12 ECTS estipulados en el plan de estudios del grado para esta asignatura. Por último, se decidió eliminar aquellas aeronaves que ya habían sido modeladas por otros compañeros en años anteriores, como el Supermarine Spitfire.

Finalmente, tras consultar diferentes libros con planos, en especial "Scale Aircraft Drawings" [1], "The best of Wylam" [2], así como enciclopedias con fotografías reales y dibujos de corte como "The illustrated encyclopedia of combat aircraft of World War II" [3] o "Hawker Hurricane Owners' Workshop Manual" [4], se decidió que había material suficiente para recrear digitalmente el caza británico Hawker Hurricane Mark IIC.

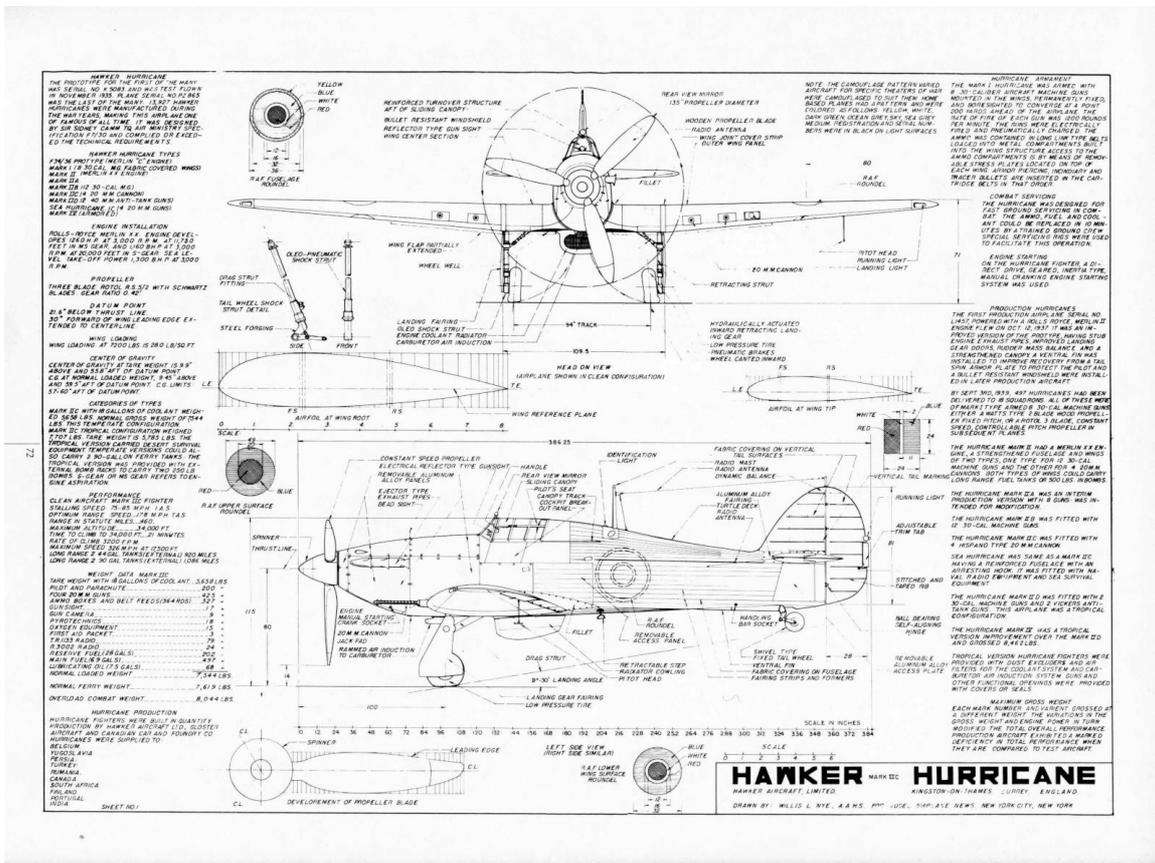


Figura 2.1: Plano alzado y perfil del Hawker Hurricane Mk. IIC [1].

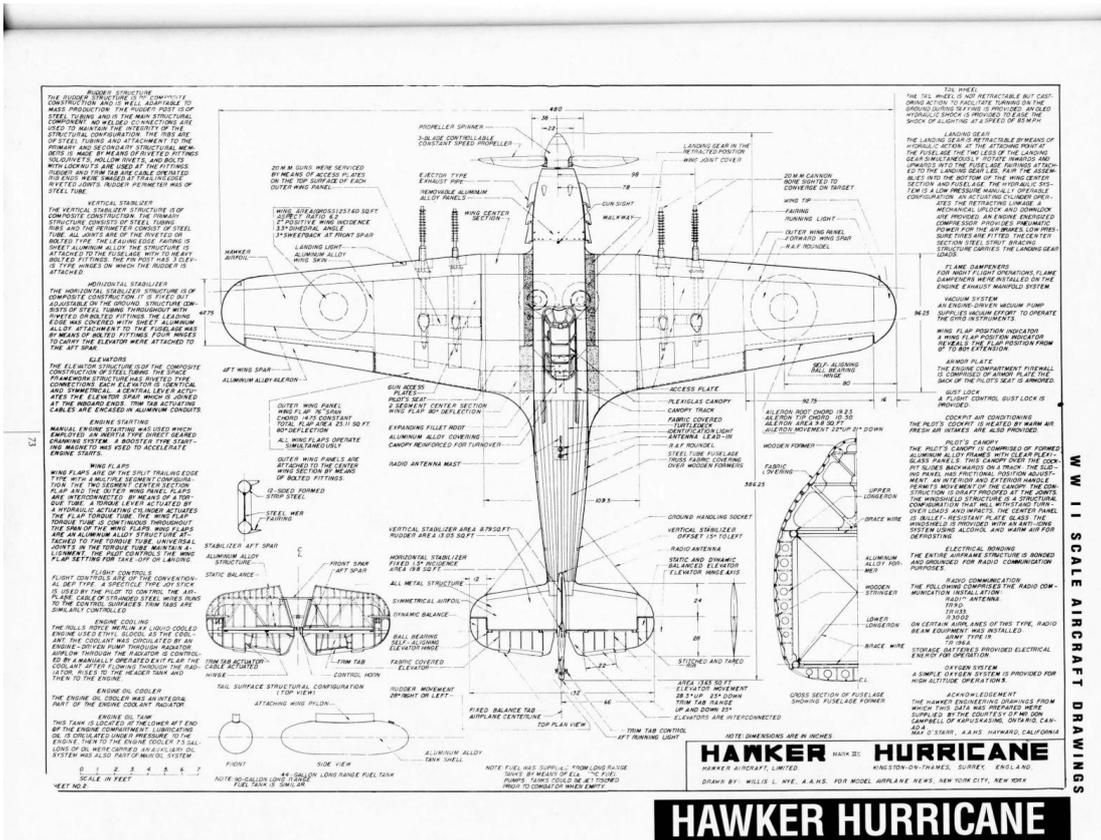


Figura 2.2: Plano planta del Hawker Hurricane Mk. IIC [1].

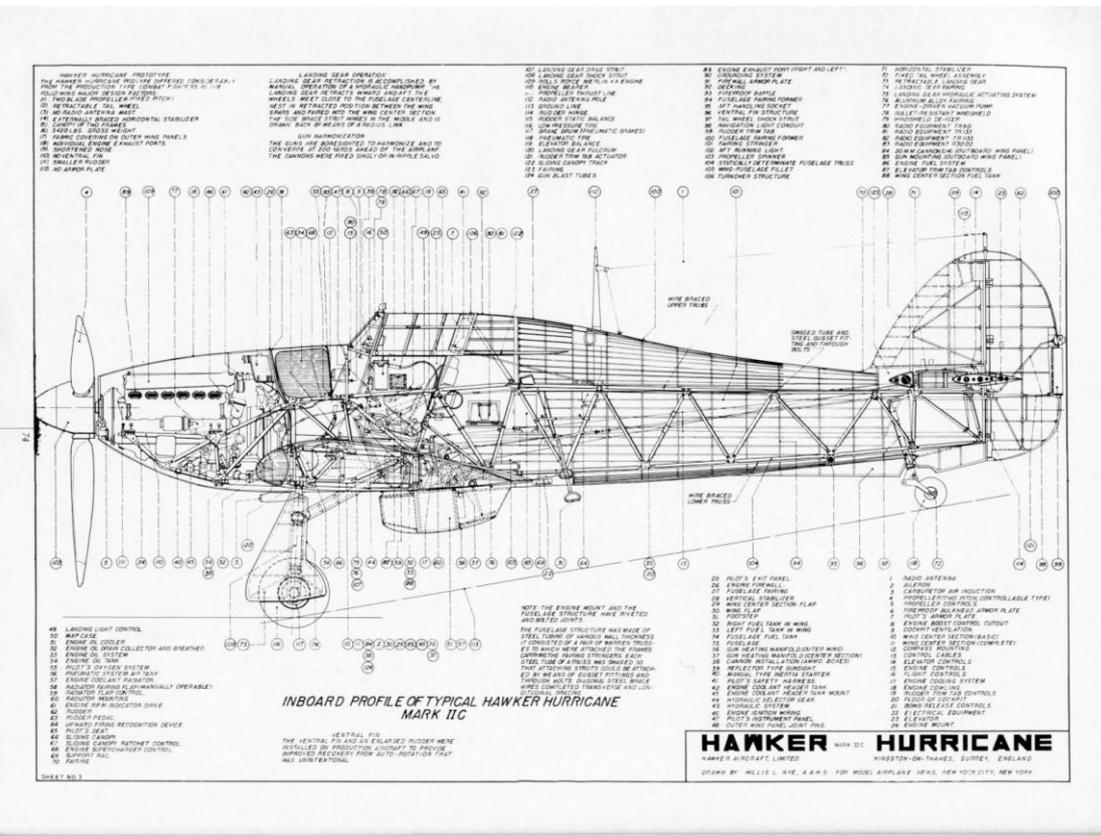


Figura 2.3: Plano corte longitudinal del Hawker Hurricane [1].

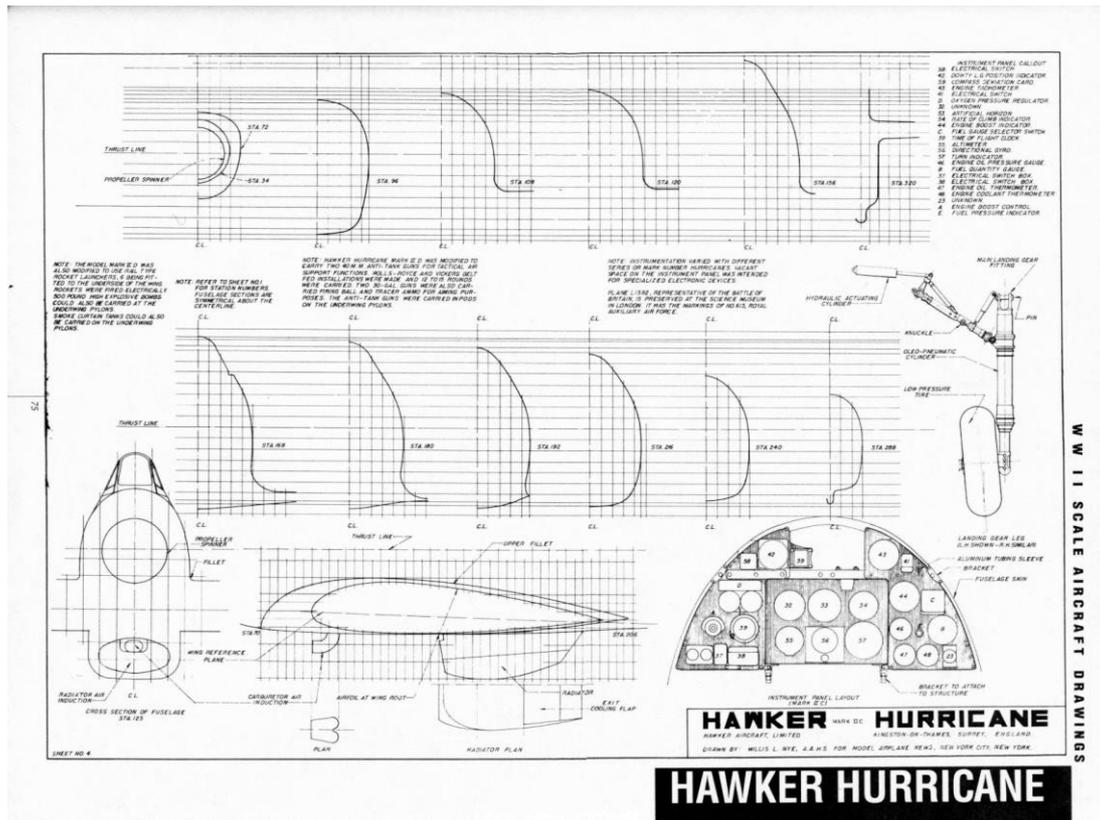


Figura 2.4: Plano secciones del fuselaje [1].

Los planos anteriormente mostrados serán, finalmente, la referencia principal de la que partiremos para trabajar, ya que forman parte de la prestigiosa revista *Model Airplane News*, fundada en 1929 en Estados Unidos por la editorial *Air Age Media, Inc.*, dedicada durante casi 100 años a la recreación de aviones a escala o aeromodelismo. El modelo Mk. IIC hace referencia a una serie de aviones construidos a partir de 1941 y que contaban con un cono de hélice más grande que su versión original, así como cuatro cañones Hispano Mk. II dispuestos en las alas. Además, las alas se retocaron ligeramente para ser capaces de anclar bombas de 250 o 500 libras.

Por otro lado, para piezas internas cuya forma y medidas eran desconocidas, se ha utilizado principalmente el siguiente dibujo de corte, realizado por *M. Badrocke*:

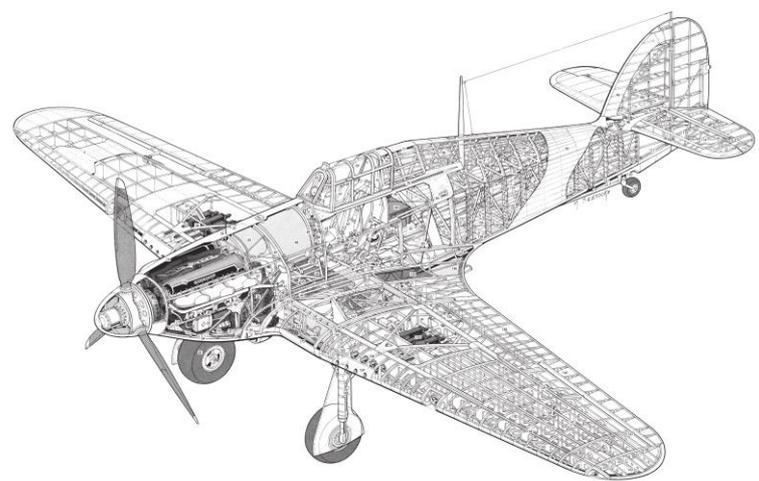


Figura 2.5: Dibujo de corte del Hawker Hurricane [4].

Para trabajar fácilmente con las medidas halladas en los planos, se decidió modificar los ajustes del programa CATIA, de manera que la unidad de medida por defecto fueran las pulgadas (in). De esta forma se evitaba realizar la conversión, además de sortear cualquier error debido al redondeo. Por otro lado, algunas de las cotas desconocidas como podían ser pequeños agujeros o el grosor del cable visible en la parte superior del avión, podían estimarse más fielmente por números enteros o de pocos decimales en pulgadas (en lugar de 1cm, que equivale a 0,393701in, suponer una cota igual a 0,4in, más realista).

Por último, se ha contado con la información recogida en varios foros, así como blogs especializados en aviones de la Segunda Guerra Mundial, y webs como *Airfoil Tools*, en donde se han encontrado datos sobre los perfiles alares. Además, existen varios proyectos de restauración de Hawker Hurricane reales, como *HAWKER RESTORATIONS LTD* [5] o la web especializada en fotografías aeronáuticas *Sierra Bravo Aeropictures* [6], que han sido de gran ayuda a la hora de visualizar pequeños detalles que no aparecían en los planos, así como servir de ejemplo para realizar la pintura externa.



Figura 2.6: Restauración llevada a cabo por HAWKER RESTORATIONS LTD. [5]

3 INTRODUCCIÓN HISTÓRICA DEL HAWKER HURRICANE

El Hawker Hurricane siempre ha vivido a la sombra del caza Supermarine Spitfire sin ocupar el lugar que realmente merece, ya que fue caballo de batalla de la Real Fuerza Aérea Británica en su etapa más oscura y difícil.

Este avión evolucionó a partir de una serie de biplanos diseñados por Hawker Aircraft Limited en la década de 1920, alcanzando éstos su punto álgido en 1931, cuando el biplano Hawker Fury logró volar por primera vez. Sin embargo, debido al creciente desarrollo de la industria en aquellas décadas, estos biplanos pronto quedaron obsoletos y el ingeniero Sydney Camm, junto con su empresa privada, comenzó a desarrollar el nuevo Hurricane. El ingeniero británico combinó el fuselaje del antiguo Hawker Fury con un nuevo empenaje de cola para crear un avión monoplano con tren de aterrizaje retráctil, propulsado por un motor Rolls-Royce Goshawk. La estructura mantuvo el diseño tubular de metal, recubierta de tela en lugar de un revestimiento metálico, mucho más complejo. Sin embargo, para poder implementar un nuevo motor más potente, el Rolls-Royce PV-12 Merlin, el diseño fue modificado de nuevo. [7]



Figura 3.1: Sydney Camm en una fotografía tomada en 1915 en el Windsor Model Aeroplane Club.

En junio de 1934, se construyó una maqueta a escala 1:10 para realizar estudios de comportamiento de la aeronave en el Laboratorio Nacional de Física y, apenas tres meses después, el 4 de septiembre, el diseño fue enviado al Ministerio del Aire. No obstante, sin haber obtenido aún la aprobación, Hawker envió los dibujos al taller. El 10 de enero de 1935, con una maqueta de madera, participó en una conferencia celebrada en Kingston entre el Ministerio del Aire y Hawker Aircraft Limited, y el 25 de febrero de 1935 se firmó el contrato para construir un monoplano de alta velocidad bajo la especificación F.36/34. [8]

Más tarde, el 6 de noviembre de 1935, el prototipo realizó su primer vuelo en el aeródromo de Brooklands con George Bulman a los mandos, el jefe piloto de pruebas de Hawker. En febrero de 1936, se llevaron a cabo más pruebas de vuelo en la estación de la Real Fuerza Aérea en Martlesham Heath y, finalmente, el 3 de junio de ese mismo año, el Ministerio del Aire hizo un pedido de seiscientos aviones. Ese mismo mes, la aeronave fue bautizada como “Hurricane”, realizando su primer vuelo el 12 de octubre de 1936. [7]

En enero de 1938, los primeros Hawker Hurricane salieron de la línea de producción y fueron entregados al escuadrón 111 de la Real Fuerza Aérea británica (RAF) y, a finales de ese año, ya habían recibido más de doscientos aviones. [9]

El Hawker Hurricane llamó la atención de mucha gente, ya que se convirtió en el primer monoplano en entrar en servicio en la RAF y el primero con un tren de aterrizaje retráctil, cabina de pilotaje cerrada y una velocidad superior a 300 millas por hora (482 km/h). [10]

Dos días después del estallido de la Segunda Guerra Mundial, en septiembre de 1939, la RAF ya tenía dieciocho escuadrones equipados con Hurricanes [9]. Debido a su construcción robusta, facilidad de mantenimiento y reparación y sus características dóciles de aterrizaje y despegue, junto con un tren de aterrizaje con una gran separación entre ruedas para una mayor estabilidad, fue seleccionado para ir a Francia como el principal caza de la RAF. Cuatro escuadrones fueron enviados con grandes resultados. En octubre de 1939, el oficial piloto P. W. O. “Boy” Mould del escuadrón número 1, logró la primera victoria aérea derribando el bombardero alemán Dornier Do 17 [11]. Con la invasión nazi en Francia en mayo de 1940, treinta escuadrones volaron para ayudar a defender el cielo francés. Aunque lograron derribar numerosos aviones rivales y apuntarse algunas victorias, fueron

superados en número por los combatientes alemanes. Al final de la campaña, la RAF había perdido nada menos que novecientos cincuenta y nueve aviones de todo tipo, siendo casi cuatrocientos de ellos Hawker Hurricane. A finales de junio, los Hurricanes que habían quedado a salvo volvieron a su país, preparándose para la que se conocería como la Batalla de Inglaterra. [12]

Esta batalla resultaría ser el punto álgido de este caza británico. Al inicio de la contienda, el 1 de julio, la RAF contaba con 29 escuadrones del Hawker Hurricane, además de 19 escuadrones del Spitfire. Dos meses después, aumentaron las unidades, llegando a 30 escuadrones del Hawker Hurricane, 18 del Spitfire y otros 10 escuadrones de otros cazas. Aunque a menudo resulta eclipsado por el Spitfire, el Hurricane resultó ser igual de valioso, anotándose alrededor del 60% de todas las victorias aéreas [8]. Al final de la batalla, alrededor de 1715 Hawker Hurricane habían participado [13]. Uno de los momentos más destacados ocurrió con uno de los pilotos de esta batalla, que finalmente fue galardonado con la condecoración militar más alta al valor “frente al enemigo” de todas las condecoraciones británicas, la *Victoria Cross*. El teniente de vuelo Eric Nicolson, del escuadrón número 249, el 16 de agosto de 1940, mientras volaba con su Hawker Hurricane fue disparado por un Messerschmitt Bf 110, hiriendo al piloto en un ojo y un pie. Su motor también resultó dañado y el tanque de combustible se incendió. Mientras luchaba por escapar de la cabina, vio a otro Messerschmitt y logró volver a su asiento, presionó el botón de disparo y continuó hasta derribarlo. Fue entonces cuando logró abrir su paracaídas a tiempo para aterrizar de forma segura. En su descenso, fue atacado por miembros de la Guardia Nacional, quienes ignoraron su grito advirtiendo de que era piloto de la RAF. Nicolson volvió a combatir hasta ser derribado en mayo de 1945 [14].

En septiembre de 1940, los Hurricane volvieron al escuadrón de la RAF, pero lamentablemente ya estaban quedándose obsoletos para luchar contra los cazas más modernos. Por ende, el Hawker Hurricane fue enviado al norte de África, además de ser el avión principal de la armada británica en Burma. De vuelta a casa, fue modificado para ocupar diferentes roles. Algunos estaban equipados con bastidores que les permitían transportar dos bombas de 250 libras (113,5 kg) o dos de 500 libras (227 kg). En 1943, Hawker desarrolló el Hurricane Mk. IV, capaz de transportar misiles debajo de las alas. El escuadrón 137 utilizó esta versión por primera vez ese mismo año logrando ser el primer caza de la RAF en emplear misiles. [15]



Figura 3.2: Sea Hurricane a bordo de un buque mercante en el puerto de Halifax, Canadá, en noviembre de 1941.

Una variante extremadamente importante del huracán fue el Sea Hurricane. Cuando los bombarderos alemanes de largo alcance comenzaron a bombardear convoyes en el Atlántico, transportando suministros vitales a Gran Bretaña, se necesitó una solución. El resultado fue el Sea Hurricane. Los monoplanos británicos fueron equipados con gancho de parada de manera que pudieran ser lanzados con una catapulta desde los buques, por lo que cada vez que se acercaba un bombardero, los Hurricanes podían lanzarse al aire para combatir desde el inicio. El único inconveniente fue que los cazas británicos no podían aterrizar de nuevo en el barco, por lo que

en caso de que los pilotos de la RAF no pudieran encontrar una base en tierra, debían saltar en paracaídas o amerizar, lo que hacía que la

supervivencia de los pilotos fuera muy escasa. A partir de 1941, la Royal Navy utilizó el portaaviones HMS Furious y desde octubre de ese año se emplearon portaaviones mercantes británicos, con una gran cubierta que permitía tanto lanzar los aviones como recuperarlos. Sin embargo, en 1943, el Sea Hurricane se consideró inadecuado para continuar su labor y comenzó a desaparecer del servicio. [16]

Finalmente, los Hawker Hurricane se utilizaron en Europa hasta finales de 1943, aunque el escuadrón número 6 de la RAF siguió usando este aeroplano en el este de Asia y Palestina hasta 1947. En total, se construyeron más de 14500 aviones en Gran Bretaña y Canadá, y se exportaron a países de todo el mundo, siendo enviados a la Unión Soviética casi unos 3000 [13]. Aunque a menudo se olvida, la contribución del Hawker Hurricane al esfuerzo bélico no debe subestimarse, habiendo sido este monoplano británico un avión decisivo para detener la maquinaria de guerra nazi.

4 PROCESO DE MODELADO

En este capítulo se mostrará el proceso que se ha seguido para la realización del modelado digital en tres dimensiones del avión de combate británico Hawker Hurricane mediante el programa de CAD más utilizado en la industria aeronáutica, CATIA. Para dividir el trabajo de una manera eficiente, se ha separado la aeronave en varias piezas, que se irán diseñando poco a poco, además de distinguir entre el recubrimiento o parte externa del avión de la estructura interna.



Figura 4.1: Parte exterior del Hawker Hurricane separada en varias piezas.

En la gran mayoría de los casos, se comenzará utilizando el módulo *Sketch Tracer*, con el que extraeremos la forma de las piezas cuyas medidas desconozcamos. Esta etapa del modelado podría realizarse con otros programas especializados como AutoCAD, pero finalmente se opta por sacar partido a esta útil herramienta que nos proporciona CATIA, pudiendo crear *Sketches* que posteriormente puedan ser utilizados en los módulos de *Part Design* y *Generative Shape Design*. Este último será la segunda etapa del modelado en la mayoría de nuestras piezas, ya que podremos diseñar superficies complejas como el fuselaje y las alas. Por último, daremos volumen a nuestra aeronave gracias al módulo *Part Design*, cuyas herramientas *Thick Surface* y *Close Surface* serán fundamentales para proporcionar grosor a las superficies, así como convertir en sólido el volumen encerrado por la superficie. En algunos casos como el tren de aterrizaje, será suficiente con tratar la pieza como un sólido desde el principio.

Una vez disponemos de todas las piezas terminadas por separado, como se puede observar en la imagen anterior creada con la herramienta *Explode*, ensamblaremos el producto final gracias al módulo *Assembly Design*, definiendo restricciones entre las diferentes piezas. Para concluir, dotaremos nuestra aeronave de color, tomando como ejemplo imágenes reales. Para pintar cada pieza disponemos de dos opciones: administrar material a la pieza e insertar una imagen configurando las propiedades visuales de dicho material, o trabajar en el módulo *Generative Shape Design*, realizando cortes en la pieza con la herramienta *Split* y suministrando a esas secciones el color deseado aplicando material. En nuestro caso, se ha optado por la segunda opción, obteniendo unos resultados satisfactorios. A continuación, se muestra el resultado final.



Figura 4.2: Modelo final del Hawker Hurricane realizado en CATIA.

El proceso de modelado se ha iniciado por la parte exterior del avión, puesto que era de lo que más información disponíamos en los planos y lo que nos permitía ser lo más fieles posible a la realidad. Así, una vez concluida ésta, comenzamos con la estructura interna, cuyo procedimiento principal ha sido colocar planos auxiliares a lo largo de la pieza cuyo esqueleto queríamos modelar y realizar intersecciones que permitieran extraer la forma deseada de cuadernas, costillas, largueros, etc. Para la parte interior del avión, se ha optado por simplificar ligeramente el modelado, debido a la complejidad y el tiempo necesario para reproducir con exactitud cada pieza. No obstante, esto no ha implicado dejar de ser fieles a los dibujos, planos y fotografías de referencia.

En la siguiente imagen se muestran por separado los diferentes *Parts* de los que ha estado compuesta la estructura interna.

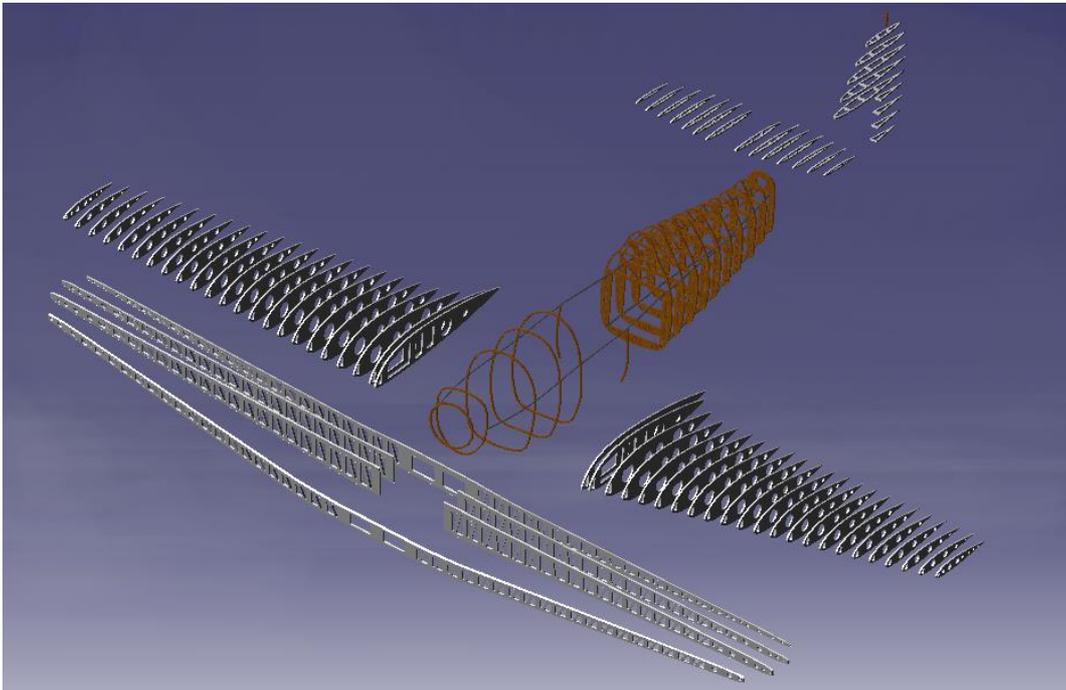


Figura 4.3: Estructura interna del Hawker Hurricane separada en varias piezas.

Mediante el módulo *Assembly Design* y una vez definidas las restricciones de manera que cada pieza quede debidamente ensamblada, obtenemos el resultado final.

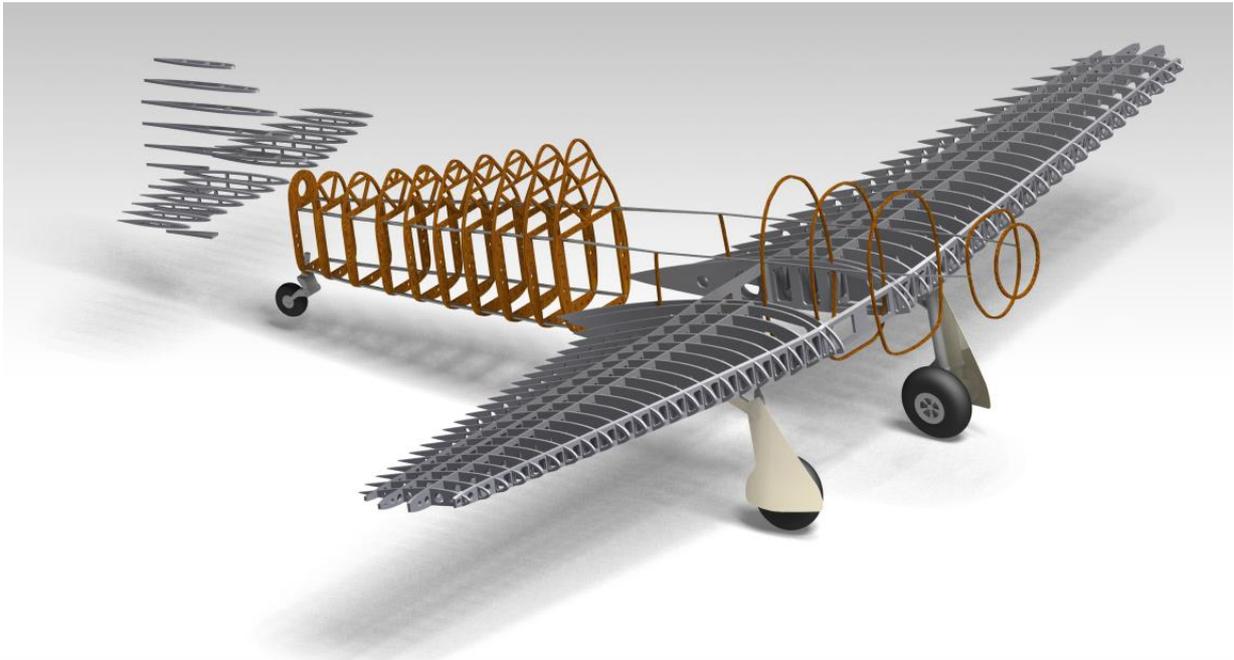


Figura 4.4: Modelo final de la estructura interna realizada en CATIA.

A continuación, se detallará el procedimiento y las decisiones adoptadas para la realización de cada una de las piezas por separado, concluyendo con una pequeña galería de fotografías comparativas que pondrán de manifiesto el buen resultado obtenido gracias a una avanzada y potente herramienta como es CATIA.

4.1 Exterior del Hawker Hurricane

La manera habitual de fabricar cualquier aeronave de forma real sería empezando por la estructura interna para, posteriormente, crear los revestimientos y otras piezas exteriores. Sin embargo, en este caso realizaremos un trabajo de ingeniería inversa, modelando inicialmente la parte visible de esta aeronave británica, contando con la disponibilidad de gran información en el material de referencia utilizado.

4.1.1 Fuselaje

El fuselaje representa la parte estructural principal de una aeronave, de forma aproximadamente cilíndrica que alberga posibles pasajeros y carga, así como sistemas y dispositivos necesarios para el control del avión. Se considera la parte central porque está acoplada directa o indirectamente al resto de elementos como las superficies sustentadoras, el motor, la hélice, las antenas o el tren de aterrizaje. En los aviones de un solo motor, como es el caso, el sistema de propulsión se aloja en el propio fuselaje, mientras que la cabina se encuentra totalmente anexionada a él y tendrá una capacidad de sólo una persona.

El primer paso que hemos realizado ha sido extraer cada sección del fuselaje en función de la distancia al morro del avión, es decir, en función de su estación. Además, la línea discontinua horizontal representada en los planos hace referencia al eje longitudinal que comienza en el centro del cono de la hélice y atraviesa el avión, mientras que la línea vertical nos indica la existencia de simetría. Estas líneas auxiliares serán de vital importancia a la hora de colocar bien nuestros *Sketch*.

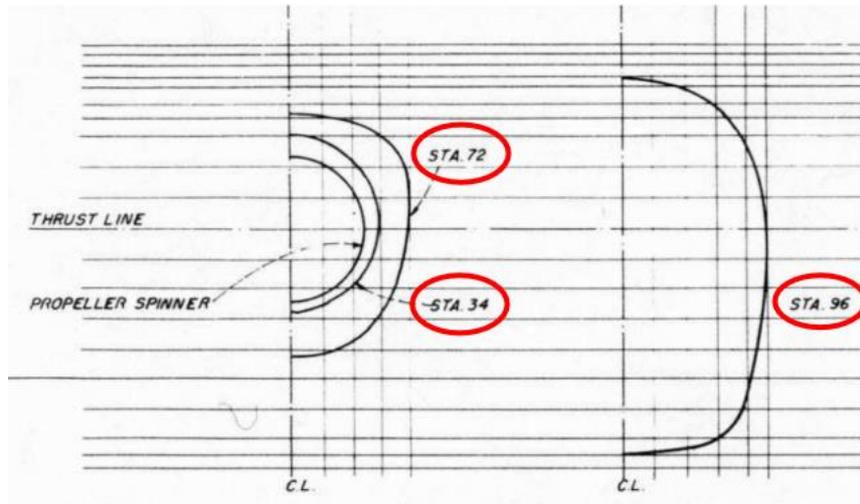


Figura 4.5: Secciones del fuselaje dibujadas en los planos de la revista *Model Airplane News*. [1]

Como se puede apreciar en la imagen mostrada anteriormente, cada sección está formada por geometrías complejas de las que no se dispone medidas. Es por ello que será necesario utilizar el módulo *Sketch Tracer*, de manera que, definiendo los ejes de forma correcta y a escala, podremos realizar varios *Sketch* trazando varios *Splines* que se adapten fielmente a los planos.

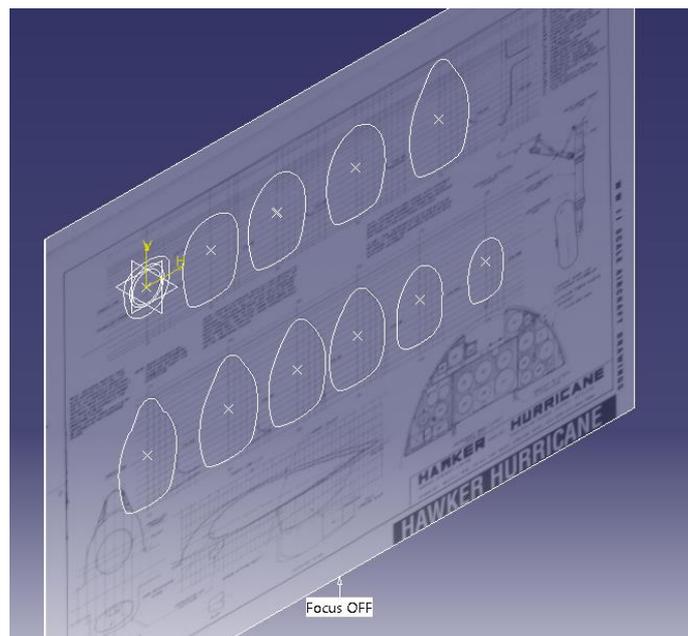


Figura 4.6: Extracción de las secciones del fuselaje según su estación.

En un *Part* destinado únicamente al fuselaje y abriendo ahora el módulo *Generative Shape Design*, se distribuyen varios planos a lo largo de lo que representaría el eje longitudinal del avión, en los que se irán colocando los *Sketch* anteriormente creados. Además, los puntos insertados dentro de cada sección, como se observa en la *Figura 4.6*, irán colocados en ese eje longitudinal. El resultado es el siguiente.

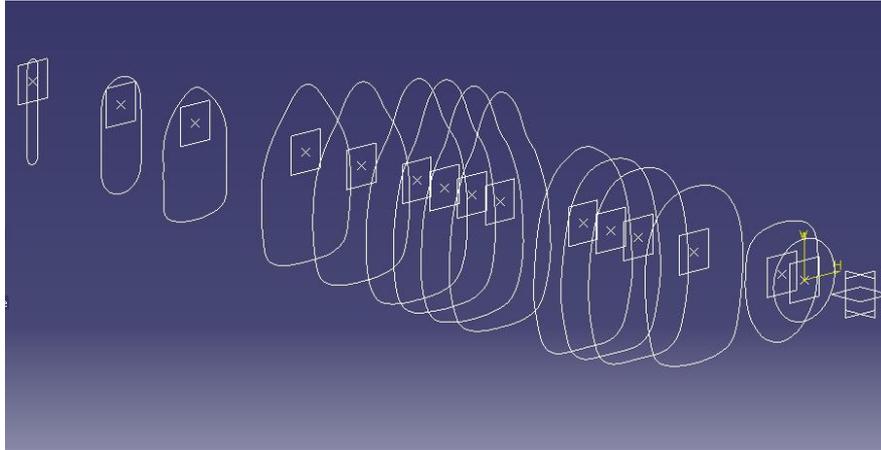


Figura 4.7: Sketches de las secciones del fuselaje colocados en sus correspondientes planos.

Tras intentar, de una manera sencilla y rápida el uso de la herramienta *Multi-Sections Surface* utilizando como entrada únicamente las secciones, se concluye que será necesario realizar también guías que suavicen y moldeen la forma del fuselaje de una manera más precisa. Para ello, siguiendo un procedimiento parecido con el módulo *Sketch Tracer*, se extraen cuatro guías directamente de los planos, tal y como se presenta en la siguiente imagen.

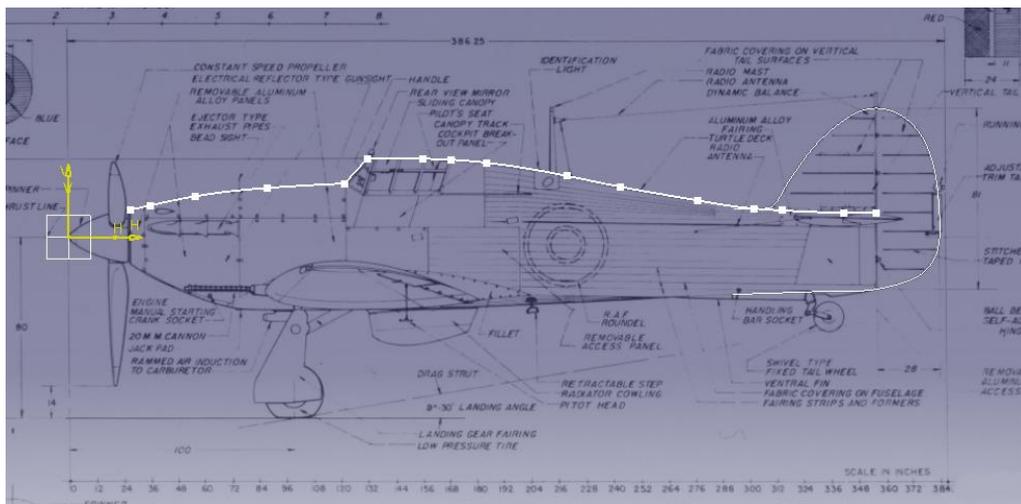


Figura 4.8: Guía superior del fuselaje.

Sin embargo, debido a que la geometría de las secciones, aun ajustándose de manera casi exacta a los planos, presenta un error propio del trazo manual de los *Splines* y la ausencia de algunas medidas numéricas, será necesario ajustar estas guías ligeramente para conectarlas a las secciones anteriormente creadas. Para ello, previamente, estableceremos qué puntos están en los cuatro extremos de las secciones. Es decir, si trazamos dos ejes cartesianos en el plano de las secciones, uno vertical y otro horizontal, qué puntos se encontrarán más arriba y más abajo, o bien más a la derecha y más a la izquierda. Este cálculo se realizará a través de la herramienta *Extremums*. Debido a la simetría en el plano longitudinal al avión, sólo serán necesarios tres puntos por cada sección.

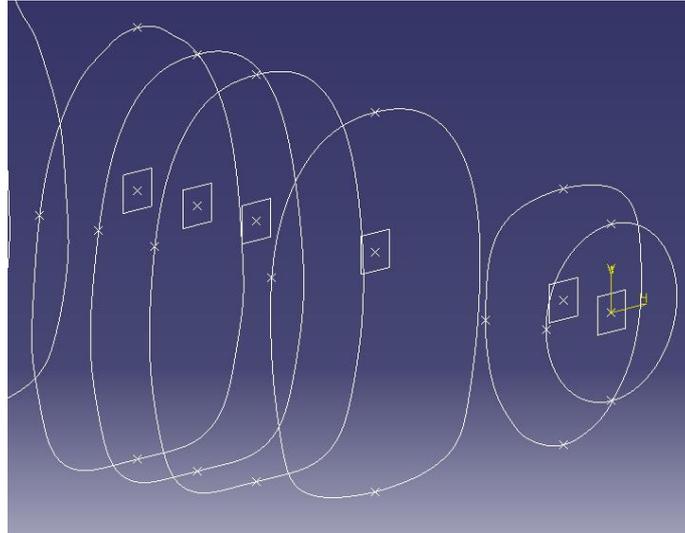


Figura 4.9: Extremums colocados en cada sección del fuselaje.

Posteriormente, ajustamos las guías para que estén conectadas con cada una de las secciones.

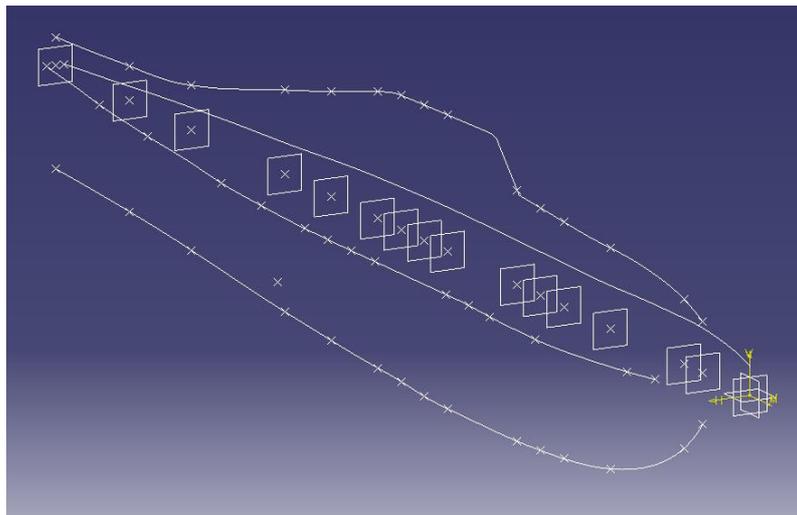


Figura 4.10: Guías colocadas para dar forma al fuselaje del Hawker Hurricane.

Una vez creadas las curvas que darán forma a nuestro fuselaje, es el momento de crear la superficie final empleando la herramienta *Multi-Sections Surface*. Para ello se seleccionan todas las secciones que CATIA debe conectar mediante un barrido, además de las cuatro guías que restringirán la dirección y forma de dicho barrido, dentro de la pestaña *Guides* del menú. Un detalle a tener en cuenta es la dirección de las flechas rojas tangentes a los *Sketch*, debiendo tener todas el mismo sentido, antihorario en el caso que se presenta en la *Figura 4.11*.

Tras terminar el desarrollo de la superficie del fuselaje, nos disponemos a crear el hueco correspondiente a la cabina, de manera que se pueda utilizar posteriormente para realizar la cubierta que protegerá al piloto. Para ello, el primer paso es crear un boceto en un plano paralelo a la vista de perfil del avión, cuyas medidas se han obtenido de los planos.

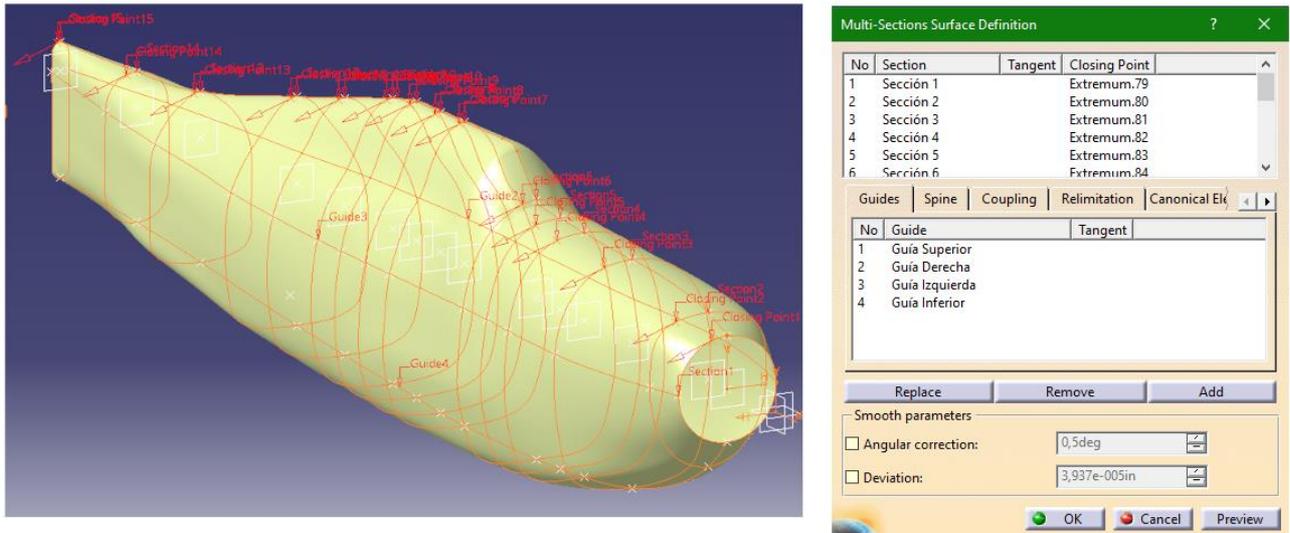


Figura 4.11: Superficie del fuselaje, creada con la herramienta Multi-Sections Surface.

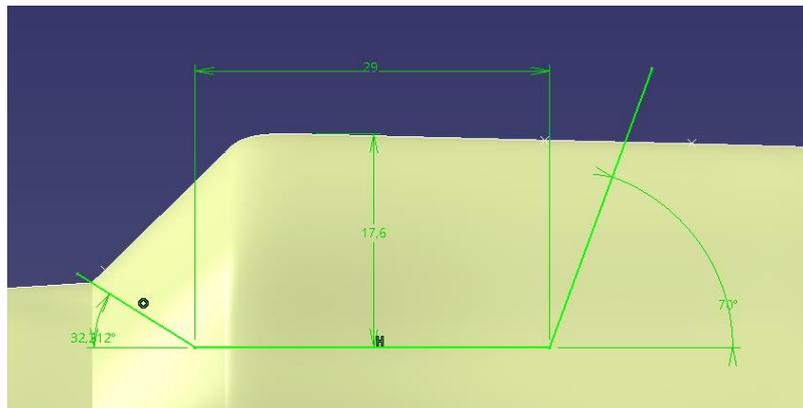


Figura 4.12: Sketch que representa el espacio donde se ubicará la cabina del piloto.

Finalmente, se realizará una superficie perpendicular al plano de simetría de la aeronave gracias a la herramienta *Extrude*, con la que haremos un barrido en la dirección deseada del perfil que se indica en la *Figura 4.12*. Para realizar el corte entre superficies utilizaremos la herramienta *Split*, que podemos encontrar tanto en el módulo *Generative Shape Design* como en el módulo *Part Design*. El resultado final será el mostrado a continuación.

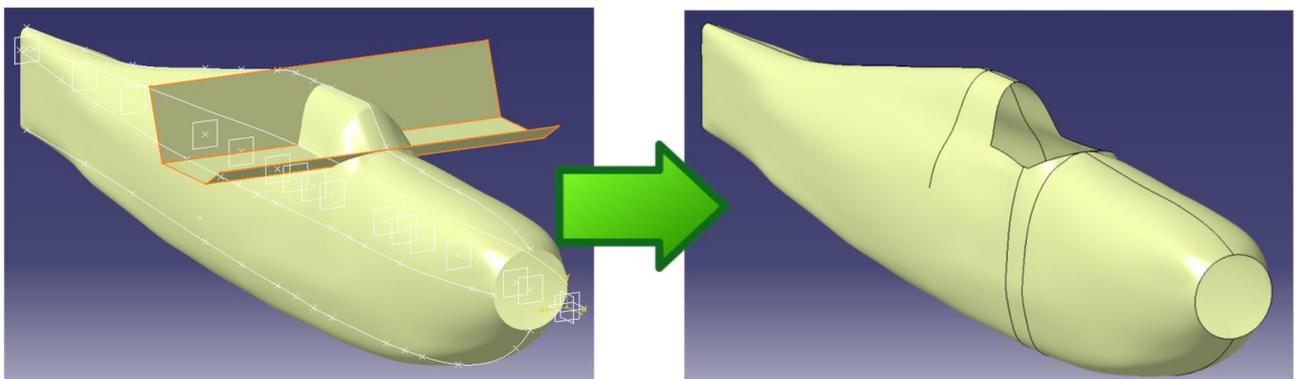


Figura 4.13: Creación del hueco en el fuselaje destinado a la cabina del piloto a través de un corte.

4.1.2 Cabina

La cabina de vuelo suele situarse en una zona próxima al morro de la aeronave, y es el lugar donde se ubica el piloto que dirige el avión. Además, es el área donde se encuentra el instrumental de vuelo y los controles necesarios para despegar, dirigir y aterrizar la aeronave. Habitualmente, como es el caso del Hawker Hurricane, cuenta con vidrios que protegen de los rayos de sol y de las inclemencias meteorológicas. Debido a la misión para la que fue construido este avión, también cuenta con un cristal frontal a prueba de balas. Asimismo, la cubierta de la cabina puede deslizarse por unos pequeños railes que permiten la entrada del piloto a su asiento.



Figura 4.14: Fotografía real de la cubierta de la cabina del Hawker Hurricane AG244 [17].

Para recrear la cubierta de la cabina, se ha de tener en cuenta que las dimensiones son un poco mayores que las pertenecientes al corte en el fuselaje realizado con anterioridad. Apoyándonos de la vista de perfil del dibujo de la revista *Model Airplane News* que venimos utilizando de referencia, se comienza colocando planos en el mismo *Part* en el que se ha modelado el fuselaje, transversales a éste, de manera que al utilizar la herramienta *Intersection* del módulo *Generative Shape Design* obtengamos la forma que tendría la estructura metálica que forma la cubierta de la cabina.

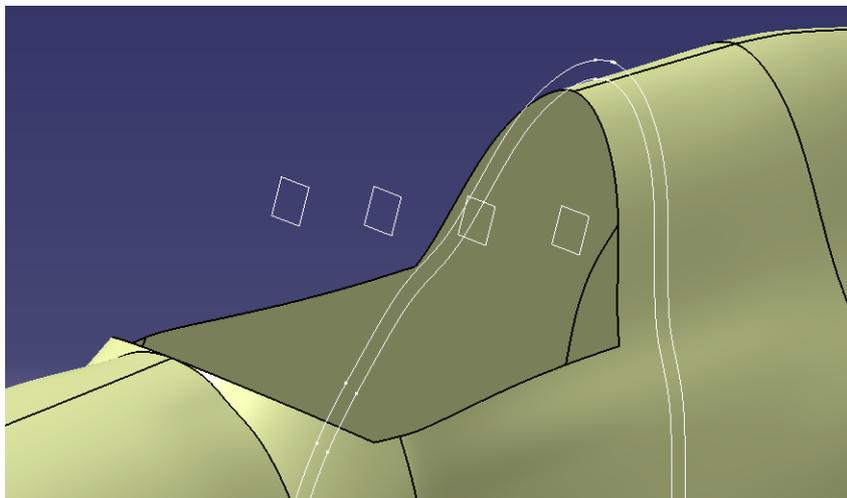


Figura 4.15: Planos y *Sketch* que formarán la estructura metálica de la cubierta.

Tras obtener las intersecciones con el fuselaje, copiamos éstas en diferentes *Sketch* para darles un *Offset* de 1,5in. Posteriormente, se utiliza la herramienta *Pad* para darle grosor a las secciones. Por defecto, CATIA hace un barrido en dirección perpendicular al boceto. En este caso, modificaremos la configuración en el menú, seleccionando el eje Y (eje longitudinal del fuselaje) como la dirección en la que se desea propagar nuestro sólido.

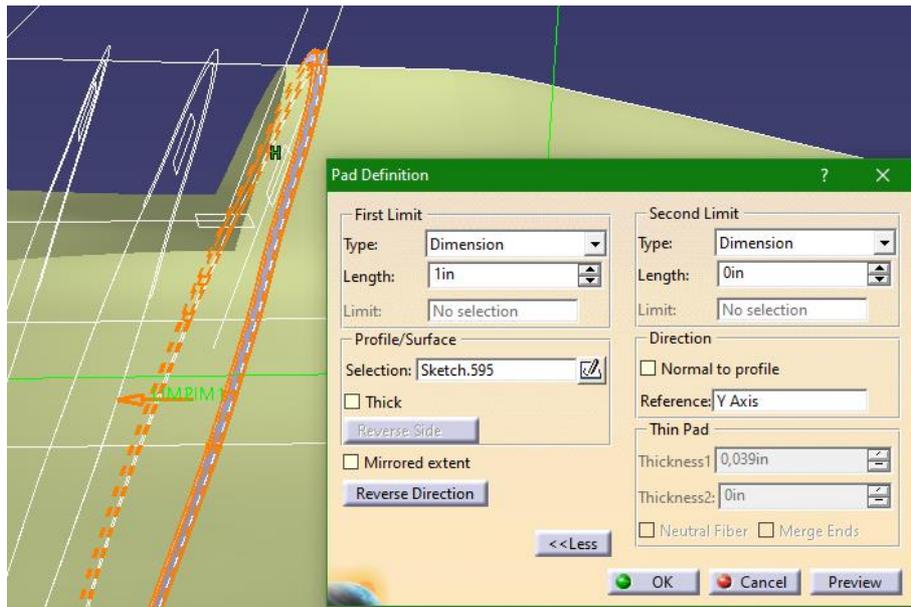


Figura 4.16: Utilización de la herramienta *Pad* para dar volumen a la estructura de la cubierta.

Una vez concluida esta fase en la que hemos dado grosor a la parte de la estructura mostrada en la imagen anterior, tendremos que cortar estos *Pads* de manera que no sobrepasen el contorno del corte realizado en la superficie del fuselaje en el que irá colocada la cubierta de la cabina. Para ello haremos uso de la herramienta *Pocket*, eliminando el material deseado, cuyo resultado se muestra a continuación.

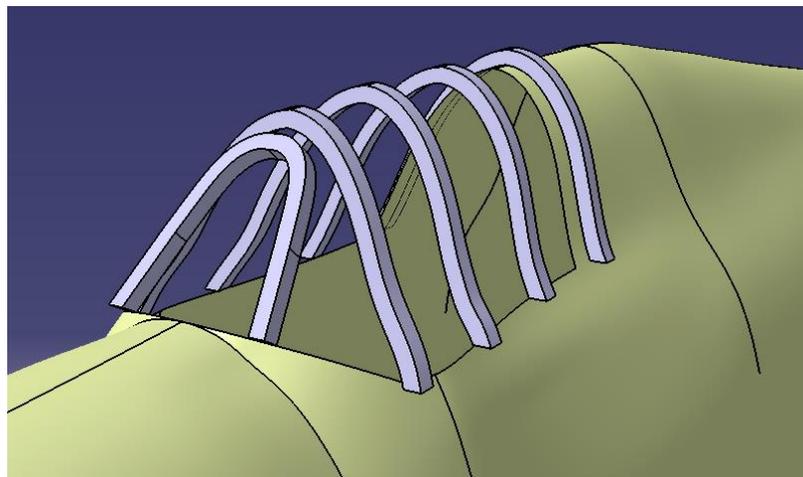


Figura 4.17: Estructura cortada sin sobrepasar el hueco destinado a la cubierta.

Realizando dos *Sketch* en los planos que conforman la base de la cubierta y volviendo a dar grosor con la herramienta *Pad*, daremos la forma casi definitiva a la estructura metálica. Además, será necesario modelar las barras que rodean y rigidizan la cubierta. Para ello, trazaremos las secciones transversales de las barras en un *Sketch*, apoyado en las caras de los arcos de la estructura previamente modelados. Haremos un barrido entre estas secciones para formar las barras con la herramienta *Multi-Sections Surface*. También realizaremos unas guías, mostradas en la siguiente imagen, que servirán de apoyo para este barrido.

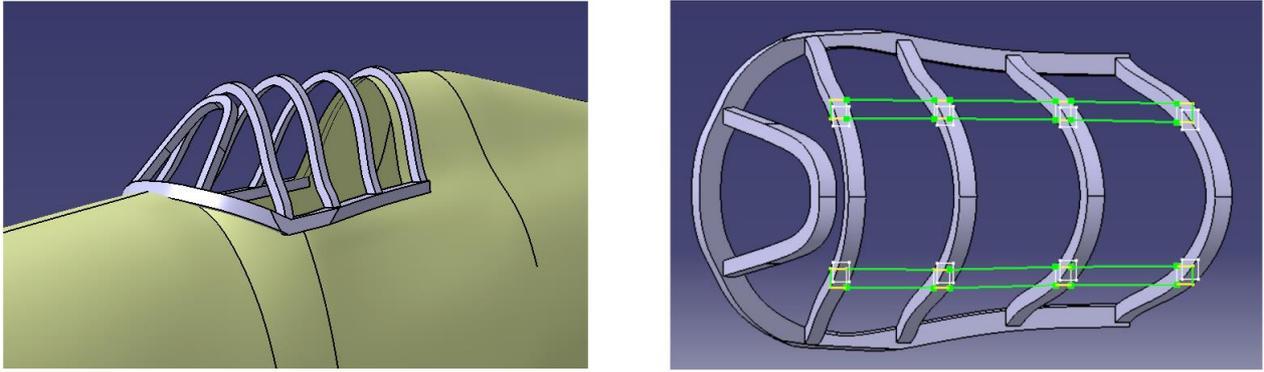


Figura 4.18: Arcos y base de la estructura terminados a la izquierda, guías de las barras intermedias de la estructura a la derecha.

Finalmente, una vez se ha modelado la estructura que da forma a la cubierta, es el momento de incorporar el cristal. La parte lateral se ha realizado con el uso, de nuevo, del *Multi-Sections Surface*. Para la parte curva de la luna delantera se opta también por la misma herramienta, utilizando unas guías en la base que dirijan el cristal de una manera adecuada. Para el cristal frontal, debido a su geometría, más sencilla, elegimos la herramienta *Fill*, para que rellene la superficie encerrada por una curva apoyada en la base y otra en el lateral del arco delantero. El último paso será aplicar material. Ante la imposibilidad de encontrar una fuente que nos indicara de qué estaba hecha la estructura, se elige un metal ligero y maleable como el aluminio. Por otro lado, aunque la luna está hecha de un cristal blindado, se decide aplicar un material que visualmente se parezca y no sea totalmente transparente, eligiendo finalmente el “plexiglás”. De esta manera, se obtienen los siguientes resultados.

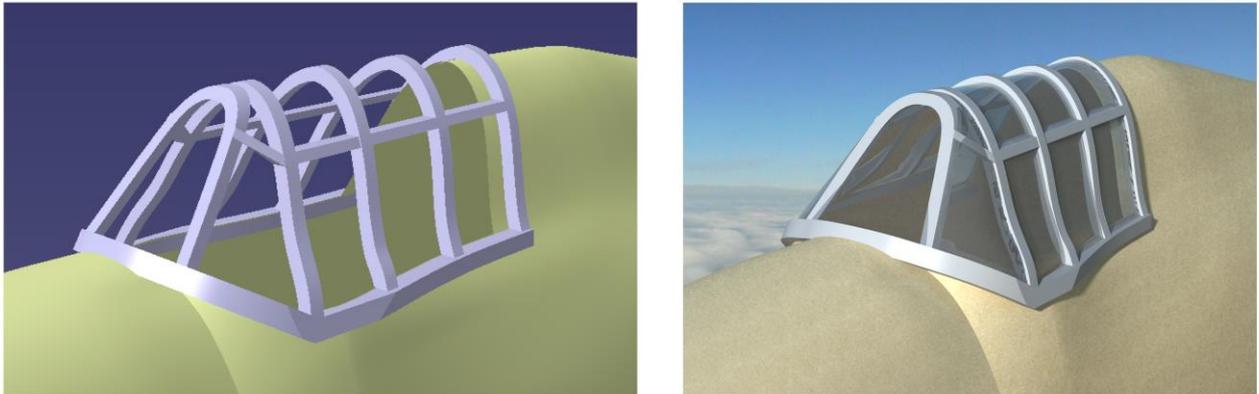


Figura 4.19: A la izquierda, estructura de la cubierta terminada sin material. A la derecha, renderizado de la cubierta completa con cristal y material aplicados.

4.1.3 Estabilizador Horizontal

El elemento estabilizador de la aeronave es la cola, conocido como empenaje al conjunto completo. Habitualmente se encuentra en la parte trasera de la aeronave y está formado por dos elementos: el estabilizador vertical y el estabilizador horizontal. La parte trasera del estabilizador vertical generalmente está articulada y recibe el nombre de timón de dirección, mientras que, en el caso del estabilizador horizontal, estas superficies articuladas se conocen como timón de profundidad.

En primer lugar, tras analizar el plano de *Willis L. Nye*, nos encontramos con un perfil simétrico con un espesor en torno al 9% situado en el 40% de la cuerda. Tras realizar una búsqueda en la web *Airfoil Tools*, concluimos que el perfil que resulta más parecido al dibujado en los planos es el LWK 80-080. En la siguiente imagen se ha solapado el perfil obtenido (en rojo) frente al dibujado en los planos (en negro), comprobándose la validez de esta aproximación.

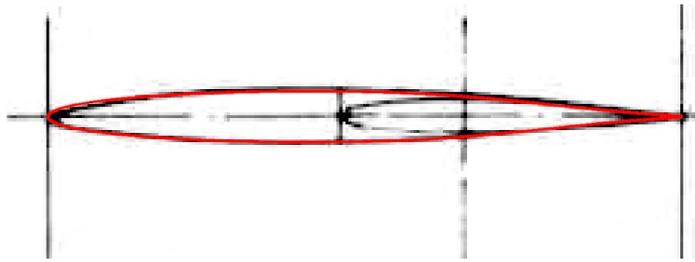


Figura 4.20: Perfil LWK 80-080 frente al dibujado en los planos del estabilizador horizontal.

Partiendo de la vista en planta del avión y utilizando el módulo *Sketch Tracer*, se mide la cuerda de los perfiles a lo largo de la envergadura del estabilizador. Para su implementación en CATIA haremos uso de una hoja de Excel llamada *GSD_PointSplineLoftFromExcel* que incorpora CATIA en una de las carpetas de instalación. No obstante, este archivo también se puede encontrar fácilmente a través de internet. En nuestro caso, se ha modificado ligeramente este pequeño programa para poder ajustar los perfiles en un *Part* utilizando el módulo *Generative Shape Design* variando su cuerda y posicionándolos en el espacio según sea necesario, introduciendo directamente en la hoja de cálculo las coordenadas del perfil, obtenidas en *Airfoil Tools*.

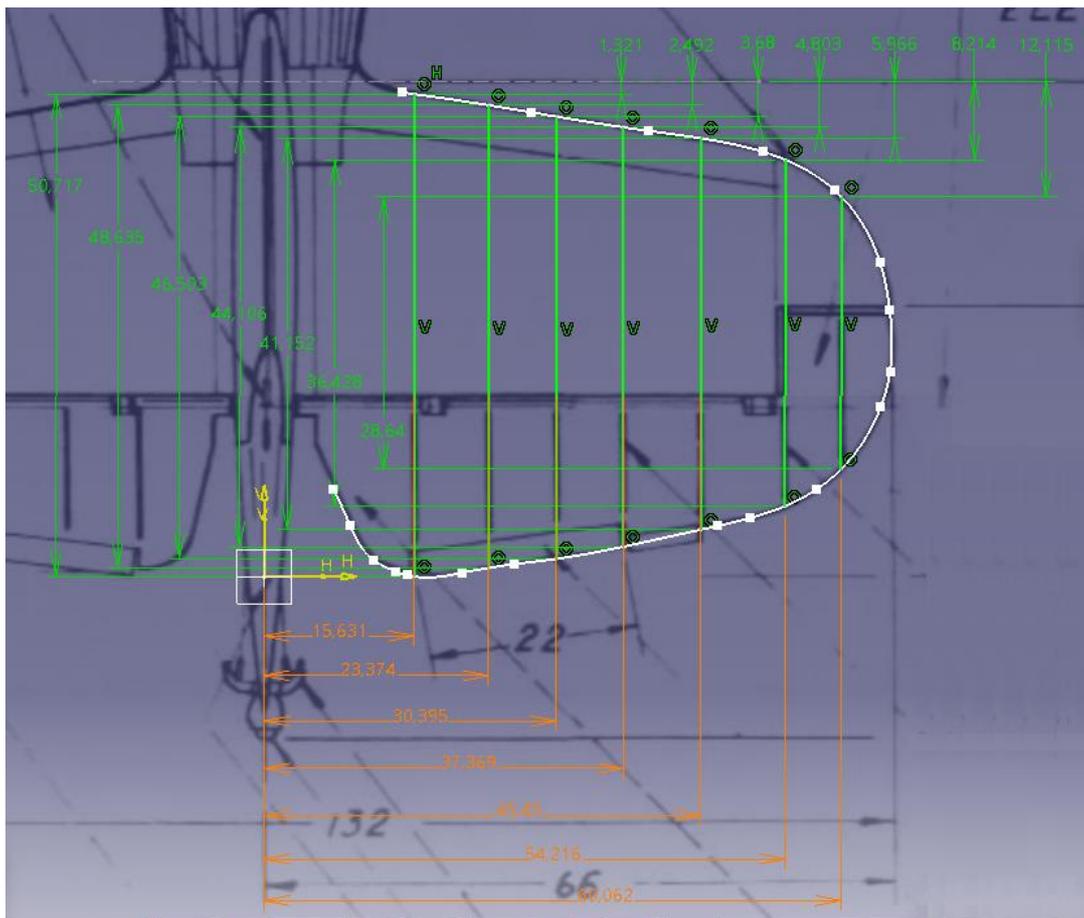


Figura 4.21: Medida de la cuerda y la posición de los perfiles del estabilizador horizontal.

StartLoft					Chord	720	Span	2000	Displacement	600
StartCurve					Y	Z				
2000	-1320	0,76				1	0,0010500			
2000	-1284,2952	7,13				0,95041	0,0099000			
2000	-1248,4824	13,08				0,90067	0,0181600			
2000	-1176,6984	23,73				0,80097	0,0329600			
2000	-1104,7344	32,77				0,70102	0,0455100			
2000	-1032,612	40,18				0,60085	0,0558000			
2000	-960,3528	45,76				0,50049	0,0635600			
2000	-888	49,23				0,4	0,0683700			
⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮
2000	-959,6472	-17,77				0,49951	-0,0246800			
2000	-1031,388	-14,57				0,59915	-0,0202400			
2000	-1103,2656	-11,17				0,69898	-0,0155100			
2000	-1175,3016	-7,73				0,79903	-0,0107400			
2000	-1247,5176	-4,28				0,89933	-0,0059400			
2000	-1283,7048	-2,53				0,94959	-0,0035200			
2000	-1320	-0,76				1	-0,0010500			
EndCurve										
EndLoft										
End										

Figura 4.22: Hoja de Excel para la implementación de perfiles aerodinámicos en el módulo *Generative Shape Design*.

El resultado final será la inserción de los puntos y los *Splines* que forman los perfiles del estabilizador. A continuación, se empleará la herramienta *Multi-Sections Surface* para producir la superficie que conecta estos perfiles. En este caso, no será necesario el uso de guías, puesto que la calidad conseguida es suficiente debido a la proximidad entre perfiles.

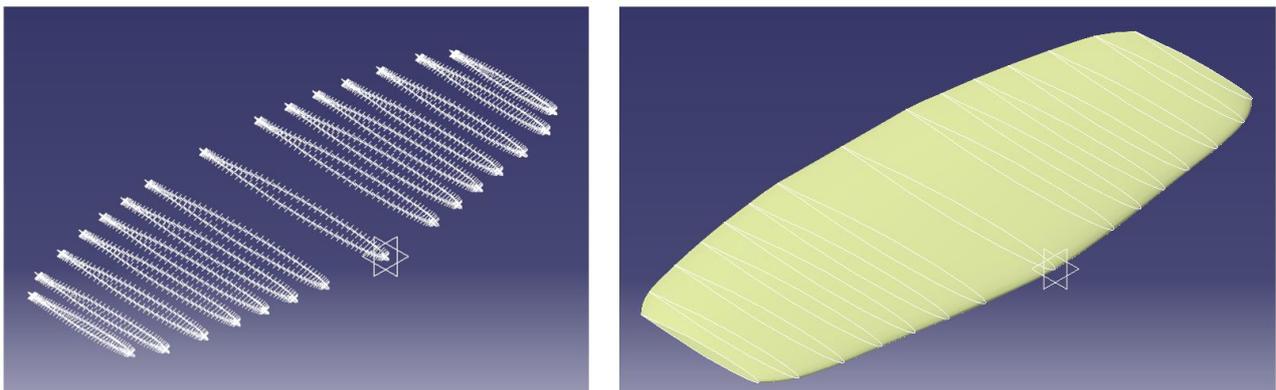


Figura 4.23: Implementación de los perfiles en el espacio y su posterior transformación utilizando la herramienta *Multi-Sections Surface*.

Como se puede observar, el modelado aún carece de las puntas del estabilizador. En primer lugar, haremos varios cortes con la herramienta *Split* en el perfil situado en el extremo de la superficie que acabamos de obtener, de manera que dividamos éste en cuatro curvas, correspondientes al borde de ataque, borde de salida, extradós e intradós. Empleando la herramienta *Multi-Sections Surface*, conectamos las curvas que representan el borde de ataque y de salida apoyándonos en una curva guía (*Guide*), que será el contorno del estabilizador obtenido en la vista en planta de los planos utilizados de referencia. De esta manera, nos queda una especie de anillo en la punta del estabilizador. Finalmente, utilizando la herramienta *Blend*, e introduciendo como entrada el contorno del anillo y las curvas que representan el intradós y el extradós, se logra cerrar la superficie de la punta del estabilizador.

En la siguiente imagen se observa el resultado, a falta de realizar el corte en la parte posterior que permita el libre movimiento del timón de dirección del estabilizador vertical.

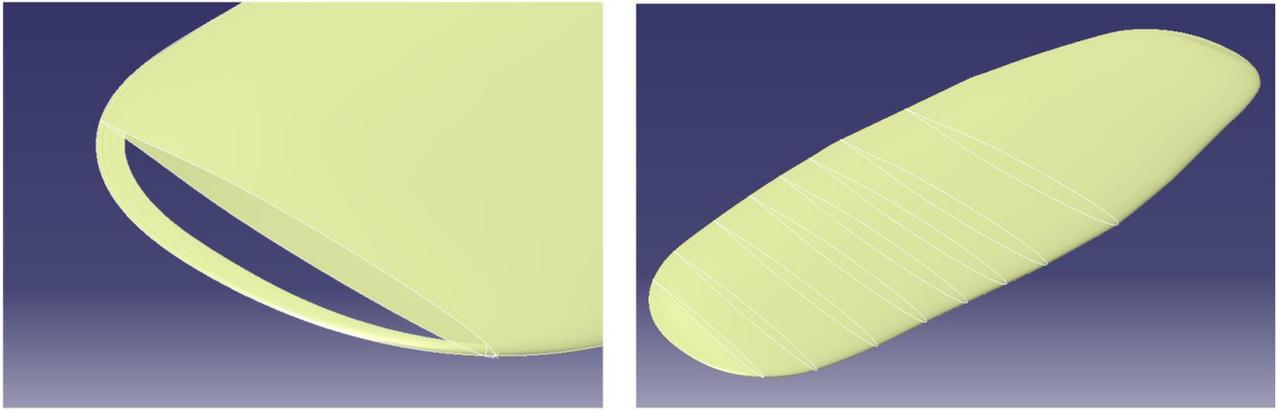


Figura 4.24: Modelado de la punta del estabilizador horizontal.

En efecto, para realizar ese pequeño corte en el estabilizador sin repercutir en su geometría fuselada, se decide utilizar la herramienta *Sweep*. Para ello, lo primero que debemos efectuar es el *Sketch* de la curva que propagaremos. Esta curva debe ser ligeramente redondeada, aproximándose a la forma que tendría el borde de salida de un perfil. A continuación, se traza una guía, que extraeremos del contorno de la vista en planta del estabilizador, para que en todo momento se mantenga la geometría marcada en los planos. Una vez hemos realizado el barrido, se hace uso de la herramienta *Split* para hacer un corte en el modelo que teníamos previamente. En la *Figura 4.25* se puede observar la superficie generada pintada en verde, además del resultado tras el corte.

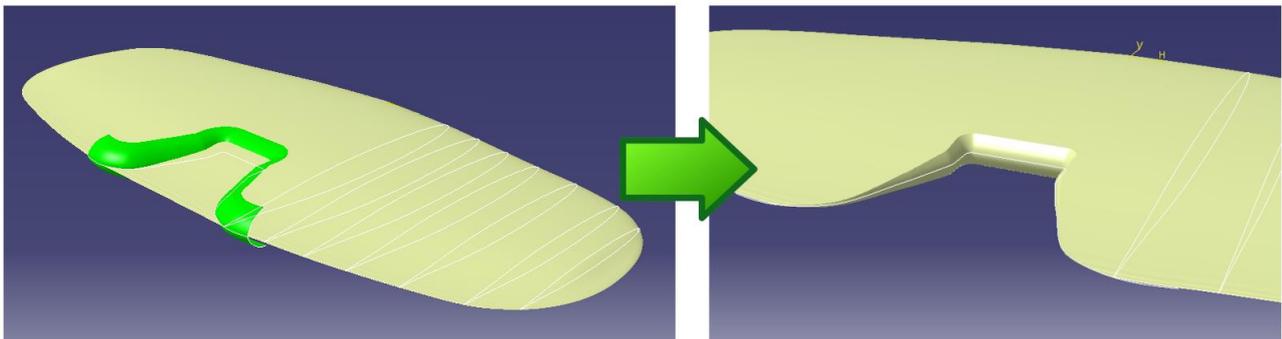


Figura 4.25: Modelado del hueco reservado para el movimiento del timón de dirección.

Finalmente, con el propósito de suavizar más las aristas provocadas por el corte, empleamos la herramienta *Edge Fillet*, permaneciendo, lógicamente, dentro del módulo *Generative Shape Design* puesto que seguimos trabajando con superficies. Para concluir la recreación del recubrimiento de este elemento del Hawker Hurricane, aplicaremos material a la superficie, de tal manera que se asemeje al lino irlandés utilizado en la época.

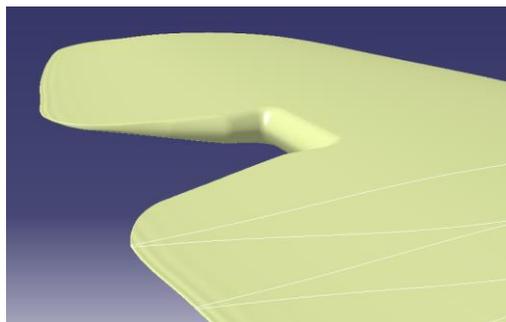


Figura 4.26: Suavizado de las aristas mediante la herramienta *Edge Fillet*.

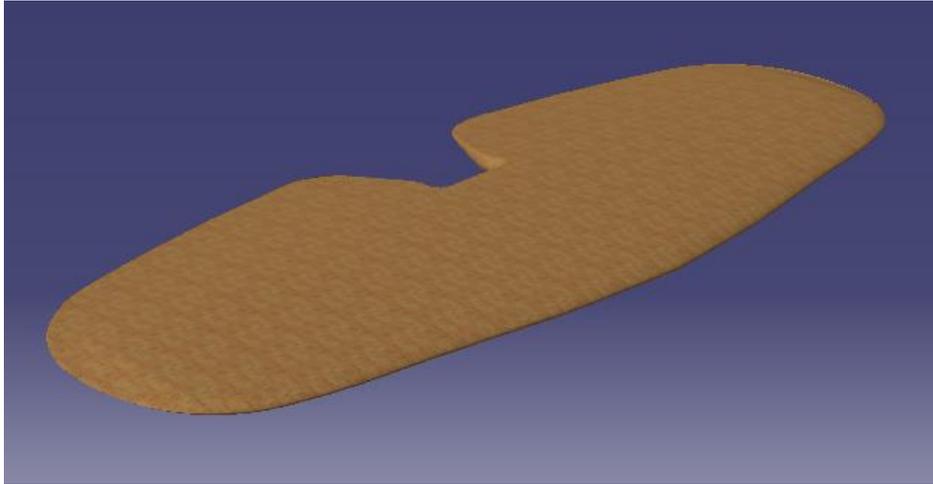


Figura 4.27: Renderizado final del recubrimiento del estabilizador horizontal.

4.1.4 Estabilizador Vertical

Proseguimos con la otra parte que conforma la cola del avión, el estabilizador vertical. Para ello, comenzaremos extrayendo el contorno del mismo utilizando el módulo *Sketch Tracer*, además de la línea vertical que separa el timón de dirección y el resto del estabilizador vertical. Esta separación será la que, finalmente, en el módulo *Assembly Design* encaje con la última sección del fuselaje. Asimismo, se trazan las líneas donde irán situados los perfiles, a modo de costillas, que darán forma al cuerpo del estabilizador.

Tras la imposibilidad de encontrar unas medidas detalladas de las secciones que conforman el estabilizador vertical, se recurre al dibujo de corte realizado por *M. Badrocke*, de donde se deduce que el ancho de la sección que separa el estabilizador y el timón es prácticamente constante. Además, para la forma de las costillas del estabilizador se utilizará la vista en planta del Hawker Hurricane, hallada en los planos. Estas decisiones se ven reflejadas en el resultado obtenido, mostrado a continuación.

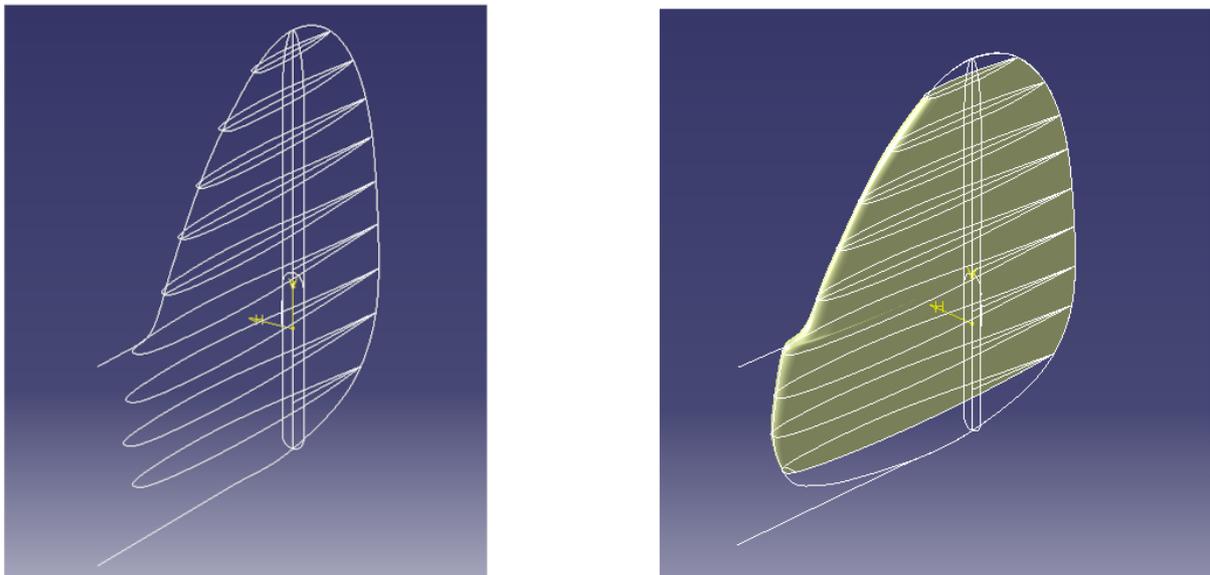


Figura 4.28: A la izquierda, perfiles y contorno extraídos de los planos. A la derecha, superficie creada con la herramienta *Multi-Sections Surface*.

Tras cuadrar todas las medidas y hacer que las secciones sean lo más cercanas a las fotografías y el material de referencia, se procede a modelar la superficie que representa el revestimiento del estabilizador empleando la herramienta *Multi-Sections Surface*. En el menú de la herramienta, seleccionamos cada perfil asegurándonos de que las flechas rojas apunten en el mismo sentido. Asimismo, utilizamos el contorno del estabilizador como guía para que se cumpla, en la medida de lo posible, la geometría representada en los planos.

Para los extremos o las puntas del estabilizador procederemos de forma análoga al estabilizador horizontal. Dividiremos los *Sketch* de los extremos en cuatro partes, que representan el borde de ataque y de salida, así como cada una de las superficies laterales del estabilizador. Utilizando la herramienta *Multi-Sections Surface* se unirán las dos curvas que forman el borde de ataque y de salida, creándose una especie de anillo, apoyado por una guía que será el contorno del estabilizador. Por último, cubriremos los huecos restantes con la herramienta *Blend*. Debido a la forma estrecha que presenta el estabilizador, estableceremos una tensión de 1 unidad, que implica que la superficie se visualiza como si estuviera muy estirada. Para apreciar mejor la forma en la que se ha procedido en los bordes del estabilizador, se muestran los resultados a continuación.

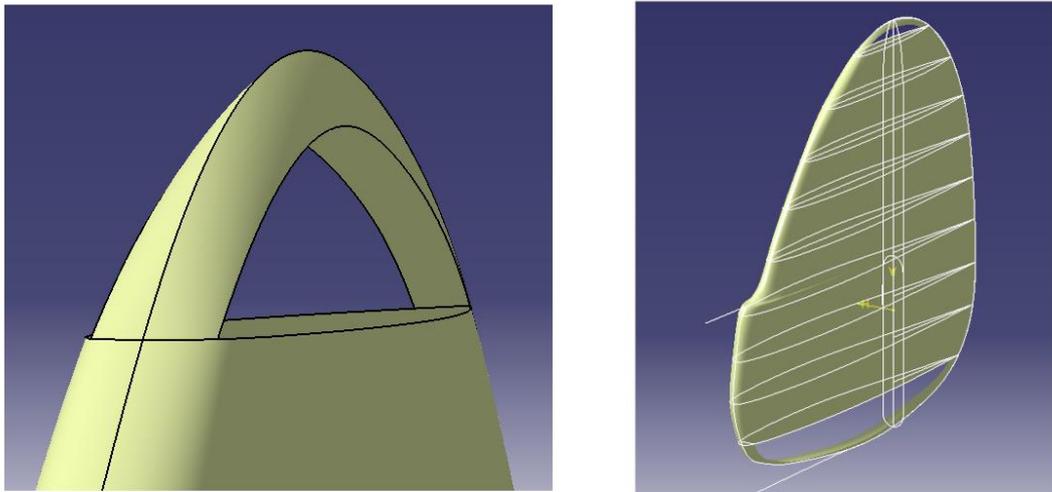


Figura 4.29: Construcción del borde del estabilizador vertical a través de la herramienta *Multi-Sections Surface*

Para concluir, se aplica material a la superficie, simulando el efecto que resultaría de revestir este componente con tela, al igual que se realizaba en torno al año 1940. El modelo final, con los extremos de la pieza cerrados y la superficie terminada se muestra a continuación.

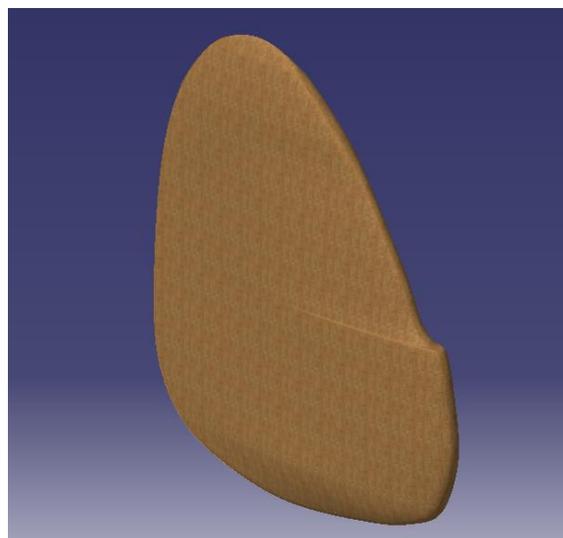


Figura 4.30: Renderizado del modelo del estabilizador vertical terminado.

4.1.5 Alas

El ala es la principal superficie sustentadora de la aeronave. Este elemento del avión proporciona además la capacidad de maniobrar gracias a los flaps, slats y alerones. Por otra parte, la estructura interna incluye costillas, largueros y larguerillos. En un primer momento, el recubrimiento tanto del fuselaje como de las alas del Hawker Hurricane era de tela, en concreto de lino irlandés, siendo sustituido posteriormente por uno de duraluminio, aunque en la conocida como la Batalla de Inglaterra aún quedaba un gran porcentaje de aviones con recubrimientos de lino.

En este apartado comenzaremos recreando la parte exterior del ala, en la que se ha seguido un proceso de ingeniería inversa, esto es, en lugar de comenzar construyendo las costillas y los largueros, como se manufacturaría la aeronave en un taller, se ha empezado analizando la información de la que disponíamos, que correspondía a la forma exterior del ala. Tras realizar una investigación sobre el tipo de perfiles que conforman el ala del Hawker Hurricane, sabemos que éstos se tratan de perfiles Clark YH con un espesor del 19% en la raíz, así como del 12,2% en la punta [18]. Sin embargo, después de consultar las principales bases de datos sobre perfiles aerodinámicos, así como algunos libros de la NASA, no se han obtenido resultados muy precisos sobre las coordenadas o la forma de estos perfiles. Es por ello que se toma la decisión de seguir siendo fieles a los planos de la revista *Model Airplane News* que venimos utilizando a lo largo de la realización de este proyecto, donde se indica tanto la forma de los perfiles en la raíz como en la punta, así como la intersección con el fuselaje.

Utilizando el módulo *Sketch Tracer* de CATIA y aprovechando la vista en planta de los planos, se generan varios *Splines* en el contorno del ala que servirán de guía para utilizar la herramienta *Multi-Sections Surface* más adelante, respetando y dando preferencia en todo momento a las medidas numéricas indicadas en el plano. Además, se secciona el ala transversalmente para obtener la longitud de la cuerda para varias secciones, como se muestra a continuación.

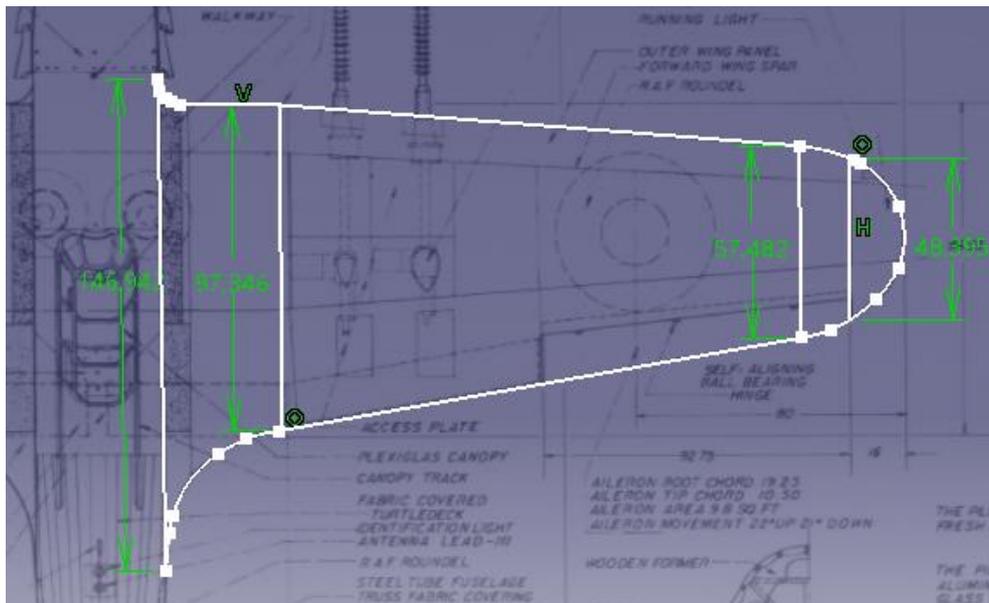


Figura 4.31: Contorno del ala y medida de la cuerda de las secciones que utilizaremos de referencia.

Procedemos de la misma forma con el contorno del ala en la vista frontal. Por otro lado, en un *Part* aparte y haciendo uso del módulo *Generative Shape Design*, se colocan los *Splines* del contorno del ala, así como los perfiles. Además, utilizando la herramienta *Extremums*, se calculan los puntos que están en la parte superior e inferior de cada perfil. Estos puntos permitirán conectar de manera correcta los perfiles a las guías, como mostramos en la siguiente imagen.

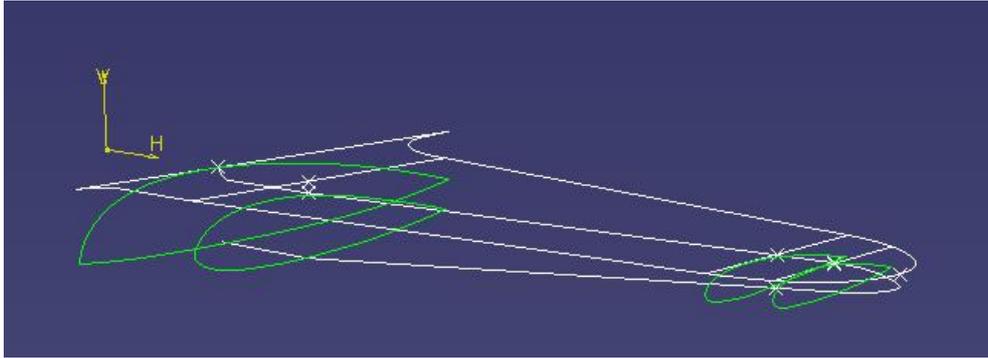


Figura 4.32: Contorno del ala y perfiles colocados correctamente con la ayuda de *Extremums*.

Posteriormente, unimos los perfiles a través de la herramienta *Multi-Sections Surface*, apoyándonos en las guías superior e inferior del ala, como se muestra arriba en la figura.

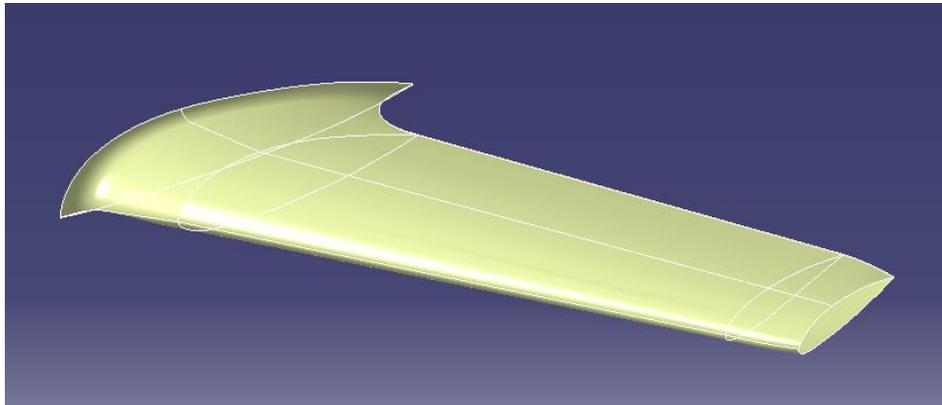


Figura 4.33: Modelado de la superficie del ala, a excepción de la punta.

Tal y como venimos haciendo para los extremos de las superficies sustentadoras, a continuación, dividimos el *Sketch* que se encuentra más alejado del encastre en cuatro partes realizando varios cortes con la herramienta *Split*, del módulo *Generative Shape Design*. Tras esto, conectamos las curvas del borde de ataque y borde de salida mediante el uso de la herramienta *Multi-Sections Surface* y apoyándonos con un *Guide*, que no es más que el contorno del ala vista desde arriba, formamos una especie de anillo. Por último, para cerrar el hueco que queda tanto en intradós como en extradós cerca de la punta, emplearemos la herramienta *Blend*, configurándola para que aplique una tensión de 0,8, que se ajusta al aspecto que tiene el ala en el alzado dibujado en los planos. El resultado final se muestra a continuación.

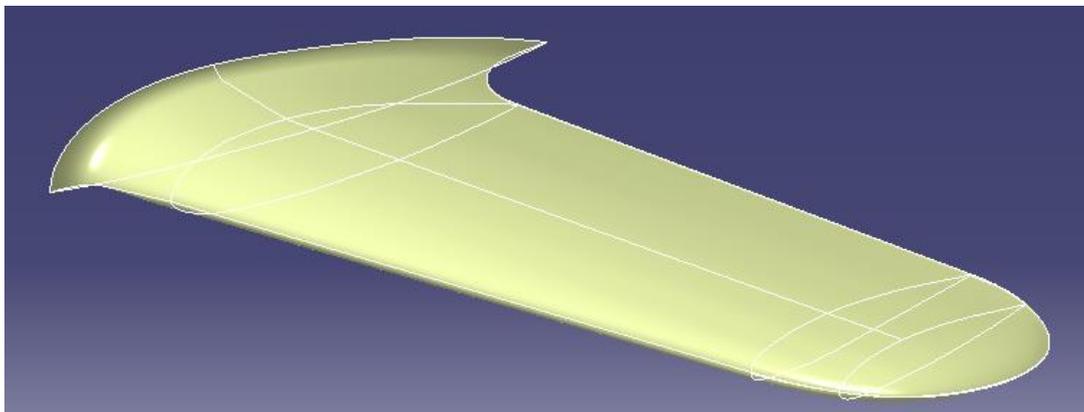


Figura 4.34: Recreación digital de la superficie que recubre el ala.

4.1.6 Hélice

En esta sección se empezará a modelar la hélice del Hawker Hurricane y sus componentes. La hélice se encarga de convertir la energía mecánica generada por el motor en empuje, dando lugar al avance del avión debido a los cambios de presión y velocidad del aire que provoca la forma de sus palas. Se encuentra conectada al eje del cigüeñal del motor, que provoca un movimiento rotativo. Existen hélices fabricadas tanto para el medio aéreo como el acuático, pero su forma y características son claramente distintas.

Para el modelado, comenzaremos con el cono de la hélice y el encastre o elemento de unión entre palas. Para ello, utilizaremos como referencia el dibujo de corte de *M. Badrocke*, junto con fotografías reales realizadas por *Paul Blackah* para el libro *Hawker Hurricane Owners' Workshop Manual*, de la editorial *Haynes* [4].

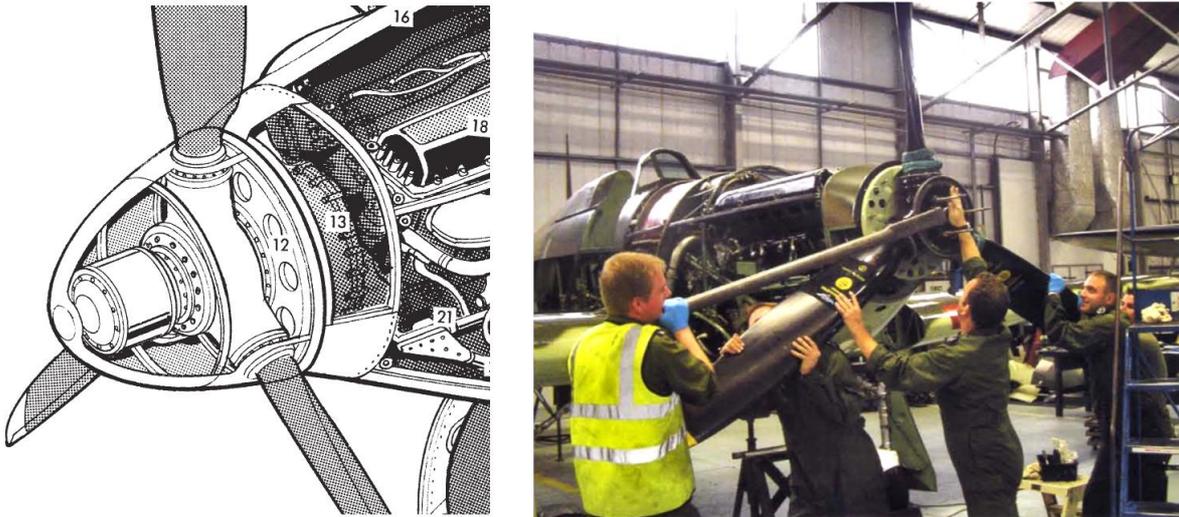


Figura 4.35: A la izquierda, dibujo de corte de *M. Badrocke*. A la derecha, fotografía real realizada por *Paul Blackah*. [4]

De estas imágenes extraeremos la información de la manera más aproximada posible, intentando ser concisos y sin precisar en detalles innecesarios.

Empezaremos modelando el cono de la hélice, en concreto, la base de éste, cuyo diámetro sacaremos de los planos y al que realizaremos unos agujeros que aligeren su peso, al igual que se muestra en el dibujo de corte. Crearemos un *Part* aparte sólo para el cono y accederemos al módulo *Part Design*. En un plano, se traza un *Sketch* con la forma del contorno en una vista lateral a la base del cono.

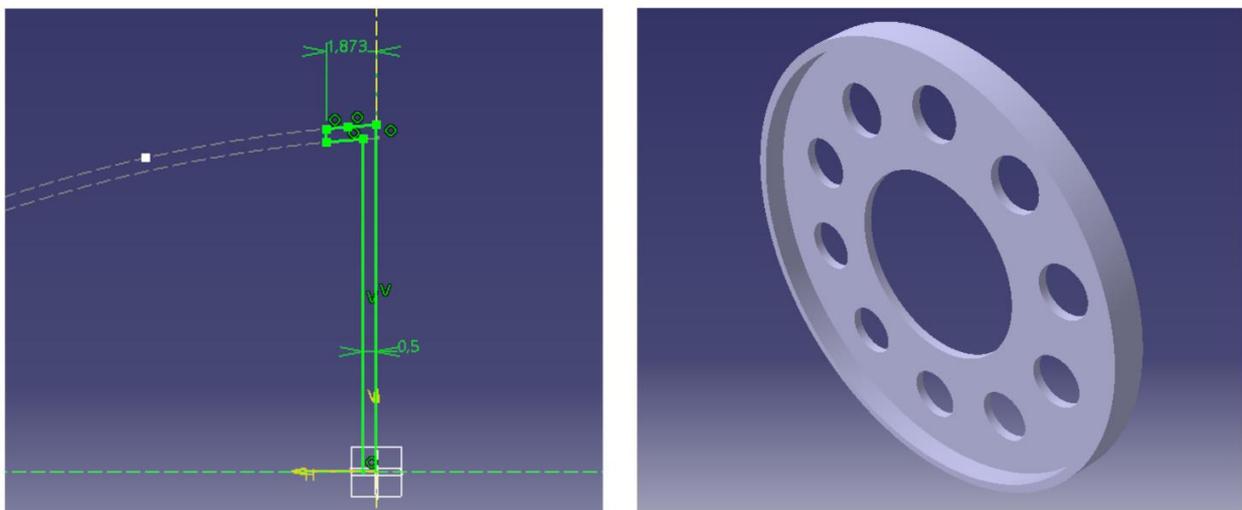


Figura 4.36: Modelado de la base del cono de la hélice.

Posteriormente, debido a la simetría de revolución, hacemos uso de la herramienta *Shaft*, que es capaz de propagar un perfil alrededor de un eje. Para los agujeros, primero seleccionaremos la cara de la pieza creada y realizamos un *Sketch*. A continuación, se realiza un solo círculo y se ajusta su diámetro de manera que quede lo más cercano posible al dibujo de corte que tenemos de referencia. Una vez hecho esto, utilizamos la herramienta *Pocket* para eliminar material de la pieza previamente generada, para posteriormente propagar este agujero utilizando la herramienta *Circular Pattern*, que nos permitirá copiarlo de una manera fácil y eficiente. El resultado se muestra en la *Figura 4.36*.

A continuación, haremos el modelado del resto del cono, teniendo como referencia los planos de *Willis K. Nye* para la revista *Model Airplane News*, además de una imagen real publicada por el proyecto de restauración *HAWKER RESTORATIONS LTD*, cuya imagen se muestra a continuación.



Figura 4.37: Fotografía real del cono de la hélice del Hawker Hurricane. [5]

Continuamos en el mismo *Part* y hacemos uso del módulo *Part Design* debido a que estamos trabajando con un sólido de geometría más o menos sencilla. Realizamos un *Sketch* en un plano de simetría, trazando una curva con la forma extraída de los planos, a través del módulo *Sketch Tracer*. Además, para darle espesor, utilizamos un *Offset* de 0,5 pulgadas. Más tarde, empleamos la herramienta *Shaft* para darle volumen a la pieza. Concluimos realizando los agujeros donde irán colocadas las palas. Para ello, trazamos una circunferencia de 6in de diámetro en un plano que contenga el eje de revolución del cono. Finalizamos restando material al cono con la herramienta *Pocket*, copiando los agujeros orificios obtenidos con la herramienta *Circular Pattern*. El resultado es el siguiente.



Figura 4.38: Modelado del cono de hélice del Hawker Hurricane.

Tras esto, modelamos el elemento de unión entre palas. Para ello, tendremos como referencia tanto las imágenes halladas en la *Figura 4.35* como la fotografía mostrada a continuación, también realizada por *Paul Blackah* para el libro *Hawker Hurricane Owners' Workshop Manual*. Además, se ha modelado el cilindro que se encuentra unido justo delante del encastre y cuya función es ajustar el paso de las palas.



Figura 4.39: Encastre y cilindro del cambio de paso de las palas [4].

Para que la geometría se ajuste al espacio interior del cono de la hélice, utilizaremos el *Sketch* del cono para trazar líneas de construcción que nos proporcionen tanto el diámetro de la unión entre palas y del cilindro como el espesor de éstos, así como la posición de los tornillos de fijación que los unen. A continuación, se muestran los cálculos realizados.

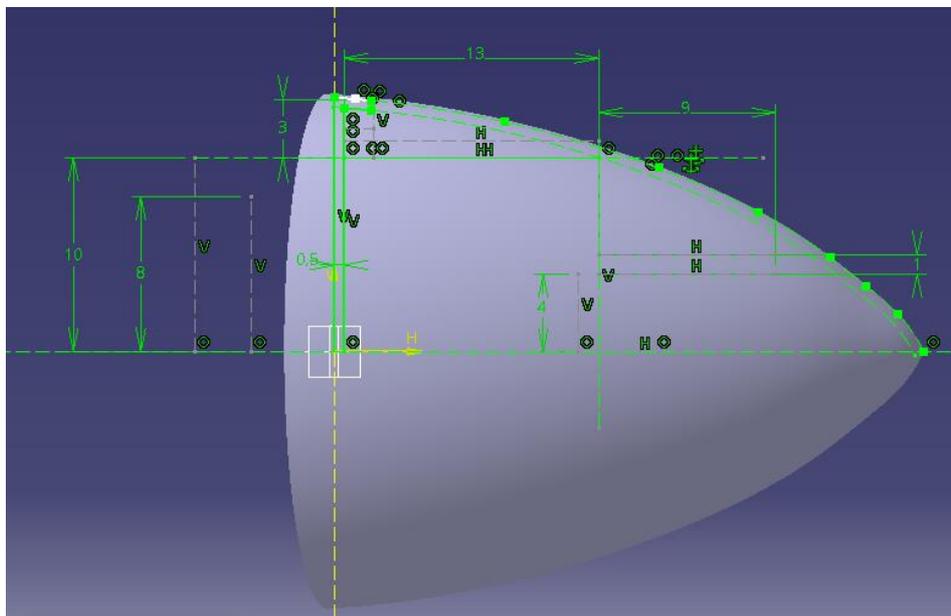


Figura 4.40: Líneas de construcción para medir el espacio disponible para el encastre.

Una vez que se ha decidido la geometría que tendrá esta pieza, se tratará únicamente de dar volumen a ésta a través de la herramienta *Pad* del módulo *Part Design*, ya mencionado y utilizado en ocasiones anteriores. Además, con la herramienta *Pocket* dejaremos un espacio en el centro del encastre destinado al eje del cigüeñal del motor, encargado de hacer girar la hélice. El modelado del elemento de unión entre palas se muestra en la siguiente imagen.

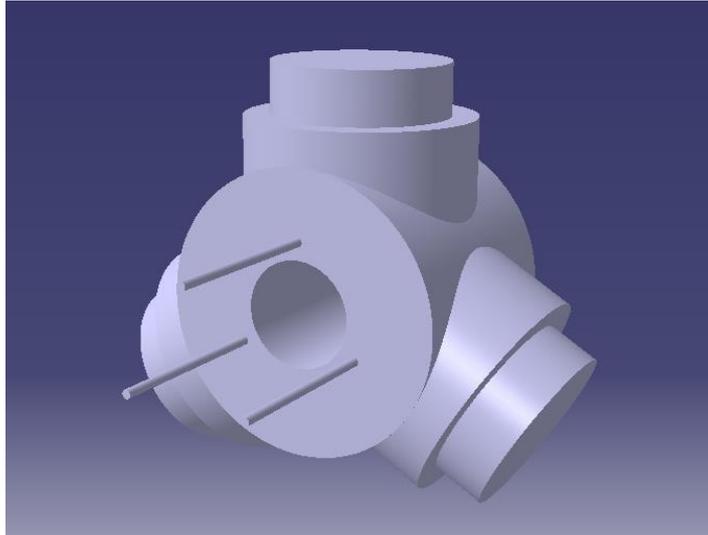


Figura 4.41: Modelado del encastre de la hélice, con las guías destinadas a sujetar el cilindro.

Ahora construimos la pieza con forma de disco que protege al encastre realizando un *Sketch* y aprovechando la simetría de revolución para generar el volumen con la herramienta *Shaft*. Finalmente, se modela el cilindro, al que realizaremos un estrechamiento en su parte central con la herramienta *Pocket* para que puedan pasar las guías tal y como se observa en la fotografía real. Además, simularemos la tapadera que cubre la parte frontal del cilindro con una forma similar a la de una cúpula o casquete esférico. Por último, simularemos los agujeros de esta tapa utilizados para atravesar tornillos que la unan al cilindro. El resultado final se obtiene tras haber aplicado material al encastre, con la unión entre palas de acero, con un acabado de color grisáceo para el cilindro y dorado para las guías, como se muestra en la fotografía utilizada como referencia. En la siguiente imagen podemos apreciar el modelado obtenido.

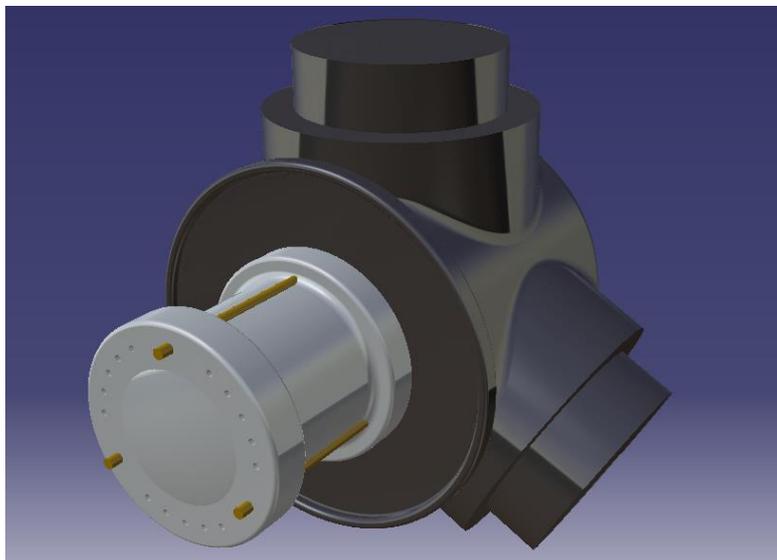


Figura 4.42: Resultado final del modelado del encastre de la hélice junto con el cilindro.

Seguimos ahora recreando las palas de la hélice, una de las piezas que han significado un mayor desafío en la realización de este proyecto.

Accedemos al módulo *Generative Shape Design*, ya que requeriremos de herramientas que nos permitan generar superficies con forma compleja. En primer lugar, utilizaremos el dibujo de los planos que venimos utilizando de referencia para extraer el contorno de la pala con el módulo *Sketch Tracer*.

A continuación, utilizando ese mismo *Sketch* del contorno, realizamos dos curvas, una que represente el borde de ataque y otra del borde de salida. En el mismo *Part* donde modelamos el encastre de la hélice, insertamos estos dos *Splines* que servirán como guías para crear la pala.

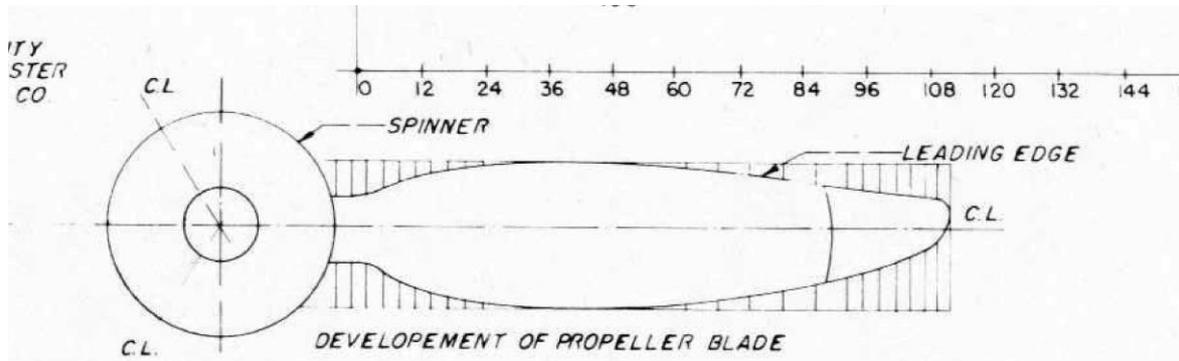


Figura 4.43: Vista frontal de la pala dibujada por Willis L. Nye [1]

Posteriormente, con la herramienta *Revolve*, generamos una superficie con la forma del borde de salida de la pala. Por otra parte, con la herramienta *Sweep*, crearemos una superficie a partir del *Spline* con la forma del borde de ataque del ala, que se proyectará hacia la superficie previamente generada, mostrada en rojo en la siguiente imagen. Además, para realizar la torsión en la pala, utilizamos la opción *Law Definition* del menú de la herramienta *Sweep*, cuyas propiedades también mostramos a continuación.

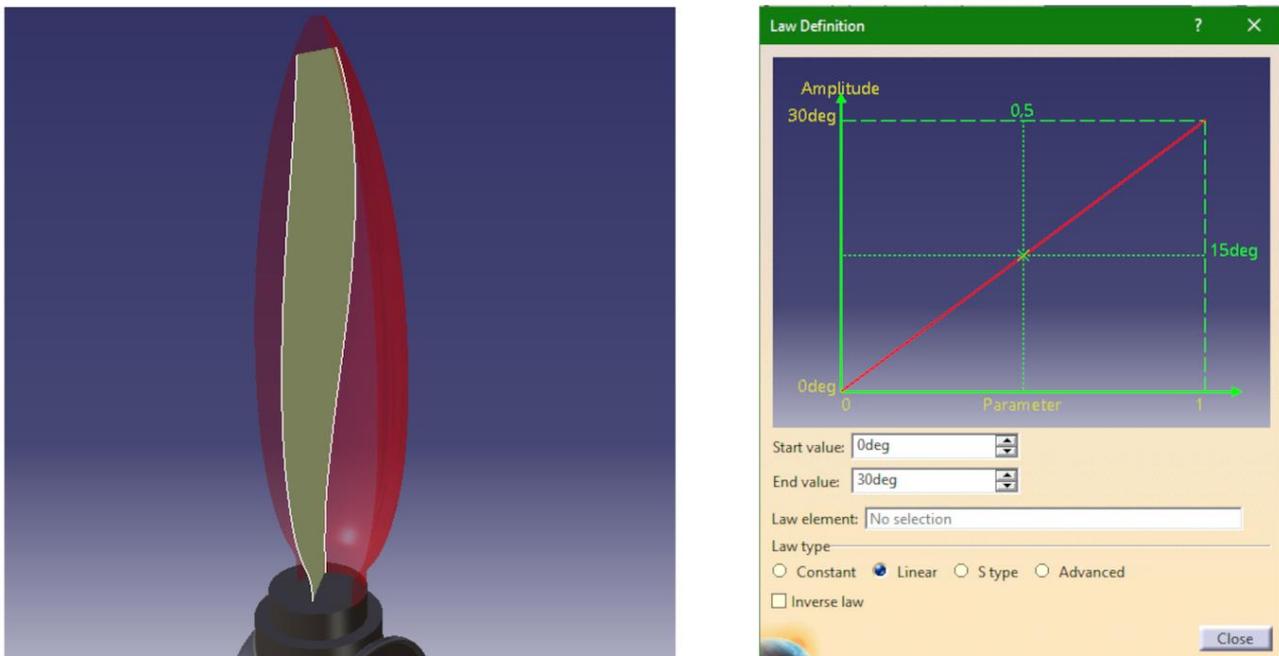


Figura 4.44: Utilización de la herramienta *Revolve* y *Sweep* para crear la superficie y generar torsión de evolución lineal entre 0 y 30 grados.

Como se observa en la imagen anterior, finalmente, tras iterar en el menú *Law Definition* con diferentes configuraciones y comparar los resultados con fotografías reales y el dibujo de corte de *M. Badrocke*, se decide aplicar torsión con una función lineal que vaya de 0 a 30 grados comenzando por el extremo de la pala.

Tras esto, para finalizar la superficie que dará forma a la pala, cerramos la punta con la herramienta *Connect Curve*, que generará un *Spline* entre el borde de salida y el borde de ataque, pudiendo ajustar su curvatura con diferentes valores de tensión. Concluiremos rellenando esta curva con la herramienta *Fill*, obteniendo la superficie completa de la pala.

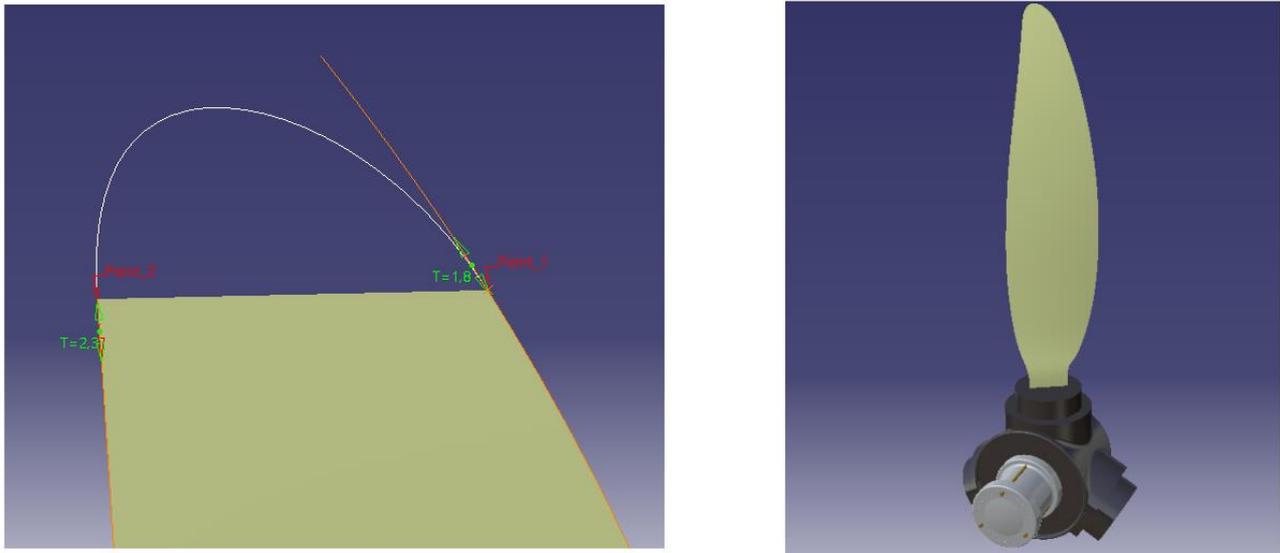


Figura 4.45: Punta de la pala con la herramienta *Connect Curve* y superficie completa terminada.

Después de navegar por diferentes webs y foros, así como consultar diferentes libros y revistas, la dificultad para encontrar información con precisión sobre las secciones de la pala nos conduce a utilizar secciones genéricas, halladas en la literatura. Una vez más, teniendo como referencia los dibujos de corte y las imágenes del libro *Hawker Hurricane Owners' Workshop Manual*, realizamos pequeños ajustes que nos lleven a un acabado más realista o cercano a las fuentes de referencia.

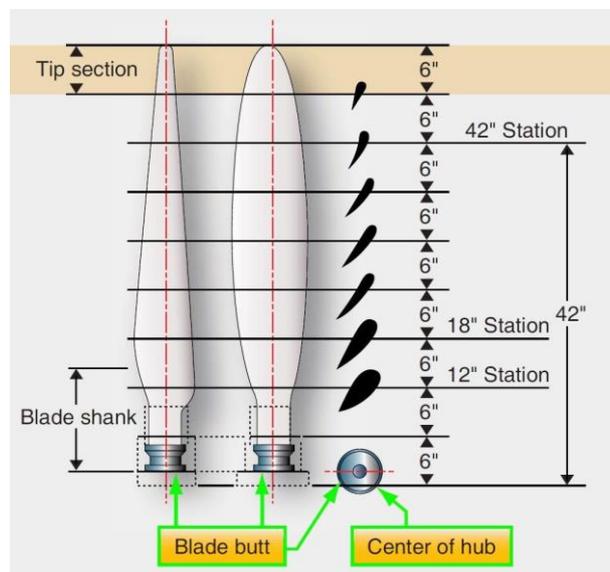


Figura 4.46: Secciones típicas de una hélice. [19]

Tras colocar las secciones en diferentes planos a lo largo del eje de la pala, se emplea la herramienta *Multi-Sections Surface* para unir las, utilizando como guías tanto el *Spline* del borde de ataque como el del borde de salida. Este último *Spline* se ha obtenido directamente del borde de la superficie de la pala creada inicialmente gracias a la herramienta *Boundary*. Para la punta de la pala, se procede de igual forma que para las alas y los estabilizadores. El perfil que se encuentra en el extremo de la pala se divide en cuatro curvas, dos que representan el borde de ataque y borde de salida, y otras dos en los laterales de la pala. Utilizando la herramienta *Multi-Sections Surface*, se genera una superficie en forma de anillo que bordea lo que será la punta de la pala.

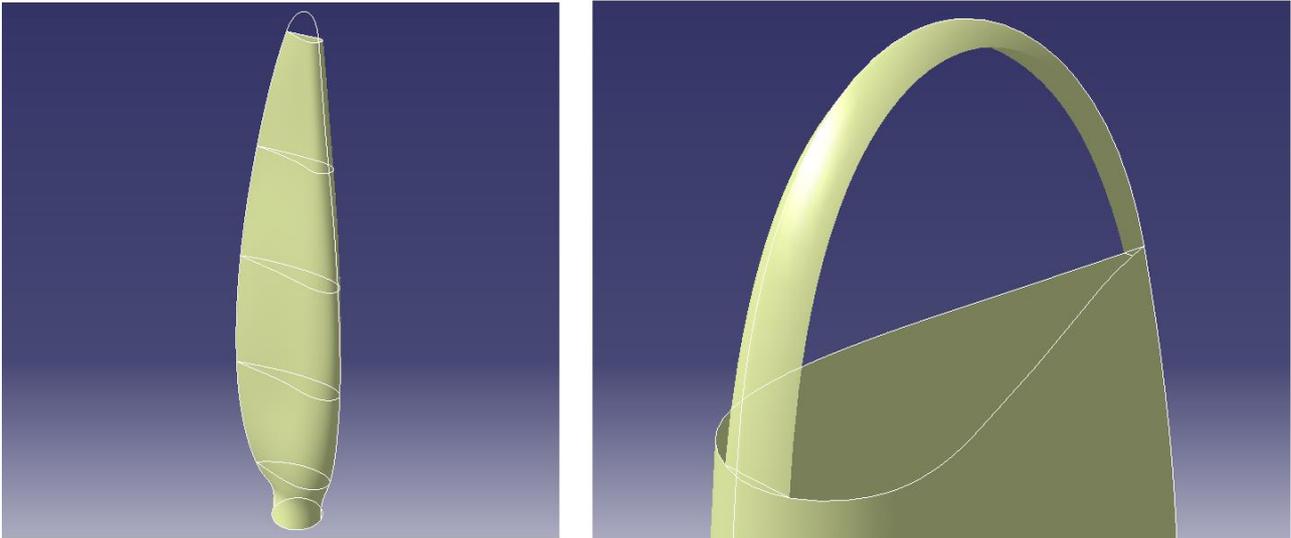


Figura 4.47: A la izquierda, unión de las secciones con la herramienta *Multi-Sections Surface*. A la derecha, borde de la punta de la pala.

Para producir la superficie restante, que cierre el hueco de la punta de la pala, haremos uso de la herramienta *Blend*, con una tensión de 0,7, ya que nos interesa que la sección se vaya estrechando poco a poco. El resultado final se muestra a continuación.

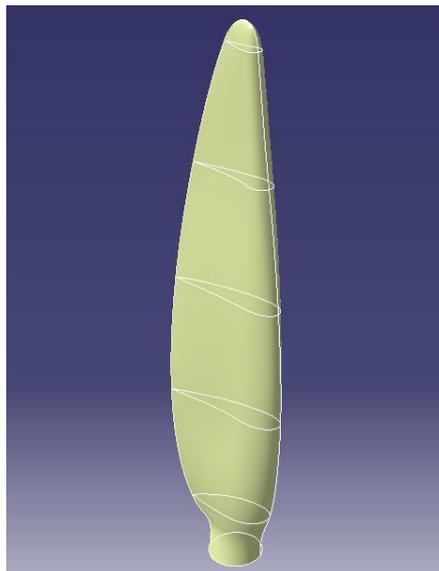


Figura 4.48: Superficie exterior de la pala del modelado del Hawker Hurricane.

Ahora accedemos al módulo *Part Design*. Con la herramienta *Close Surface*, transformaremos en un sólido el volumen encerrado por la superficie de la pala que acabamos de modelar. Además, para copiar las otras dos palas, idénticas a ésta, emplearemos la herramienta *Circular Pattern*, donde se propagará el sólido alrededor del eje de revolución. Para concluir, aplicamos material a las palas, con un acabado negro desde la raíz hasta una distancia de 4 pulgadas al extremo de la pala. Este último tramo que queda sin pintar, que corresponde a las puntas, irá en color amarillo para asegurar que la hélice sea visible cuando se encuentra rotando [4].

El resultado final de las palas y el encastre de la hélice se muestra a continuación.



Figura 4.49: Renderizado final de las palas y el encastre.

En último lugar, accediendo al módulo *Assembly Design*, colocamos el cono de la hélice, cuya función es sobre todo aerodinámica. Se ha configurado el aspecto del cono, aplicándole un porcentaje de transparencia para que se pueda apreciar cómo todo encaja según lo previsto. En la imagen de la derecha se ha aplicado un color beige claro que simula el aspecto de algunos Hawker Hurricane encontrados en fotografías.

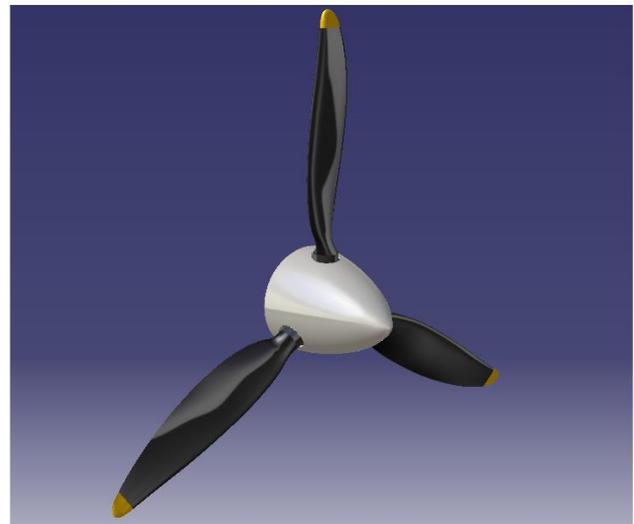
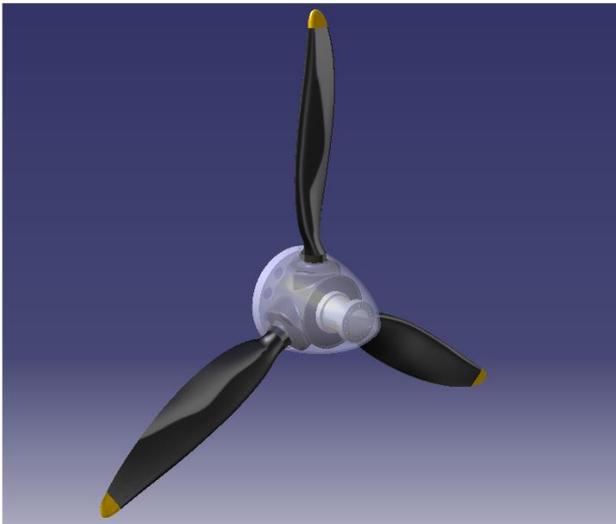


Figura 4.50: Ensamblaje final de la hélice y el cono.

4.1.7 Tren de Aterrizaje

El tren de aterrizaje tiene como función soportar las cargas en el momento del aterrizaje, así como ser capaz de guiar al avión en la calle de rodaje. Las cargas de los trenes varían considerablemente. Al aterrizar, el tren ha de soportar todo el peso de la aeronave, transformar la velocidad en movimiento horizontal en la pista y atenuar el impacto con el suelo. El tren de aterrizaje es un elemento muy resistente a los impactos por lo que, para respaldar todo este trabajo, éstos se componen de algo más que dos ruedas unidas a un avión. Los trenes de aterrizaje utilizan amortiguadores o sistemas de amortiguadores, que absorben el impacto y la energía cinética del avión.

Para recrear este elemento, comenzaremos utilizando el módulo *Sketch Tracer*. Usando uno de los planos de la revista *Model Airplane News*, donde se halla una vista de perfil del avión, extraemos el contorno del neumático, que se corresponde con una circunferencia de 26,5in de diámetro. Por otro lado, hacemos un *Sketch* en un plano transversal al neumático, con forma redondeada. En el módulo *Part Design*, utilizamos la herramienta *Shaft*, que nos permite propagar el perfil del neumático alrededor de un eje de revolución, tal y como se muestra en la figura siguiente.

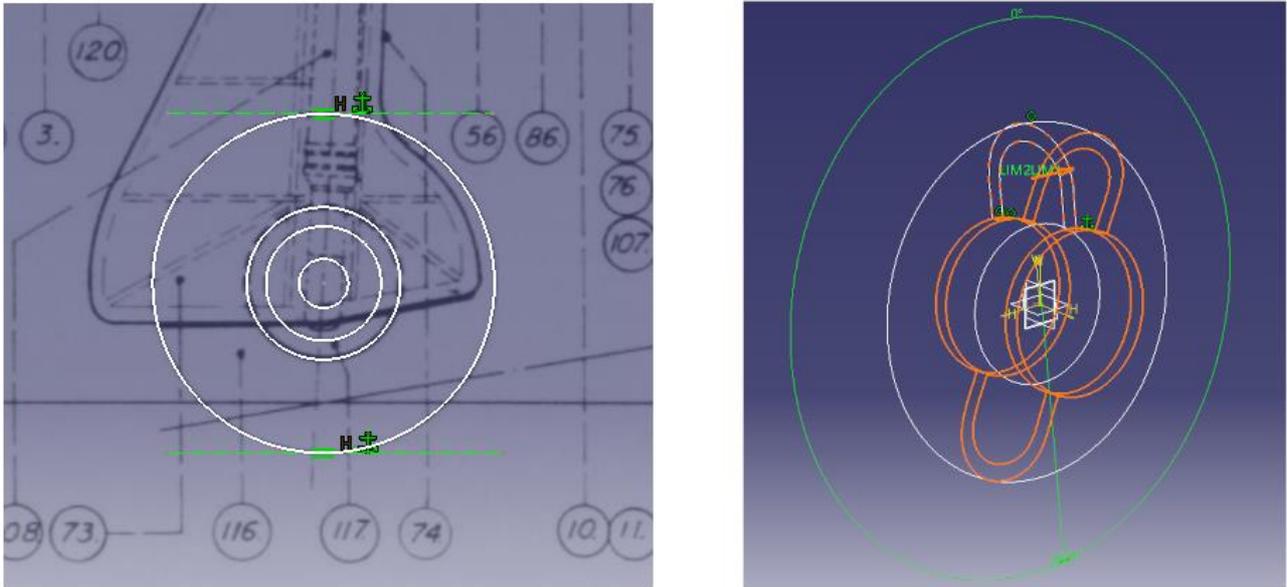


Figura 4.51: A la izquierda, extracción de la proyección de la rueda en una vista de perfil. A la derecha, utilización de la herramienta *Shaft*.

De una manera similar se procede con la llanta, donde, tras crear un *Sketch*, se generará un sólido aprovechando su simetría de revolución. Además, para la creación de los pequeños orificios se ha utilizado la herramienta *Pocket*, que ha eliminado la cantidad de material deseado y que posteriormente se ha propagado con la herramienta *Circular Pattern*.

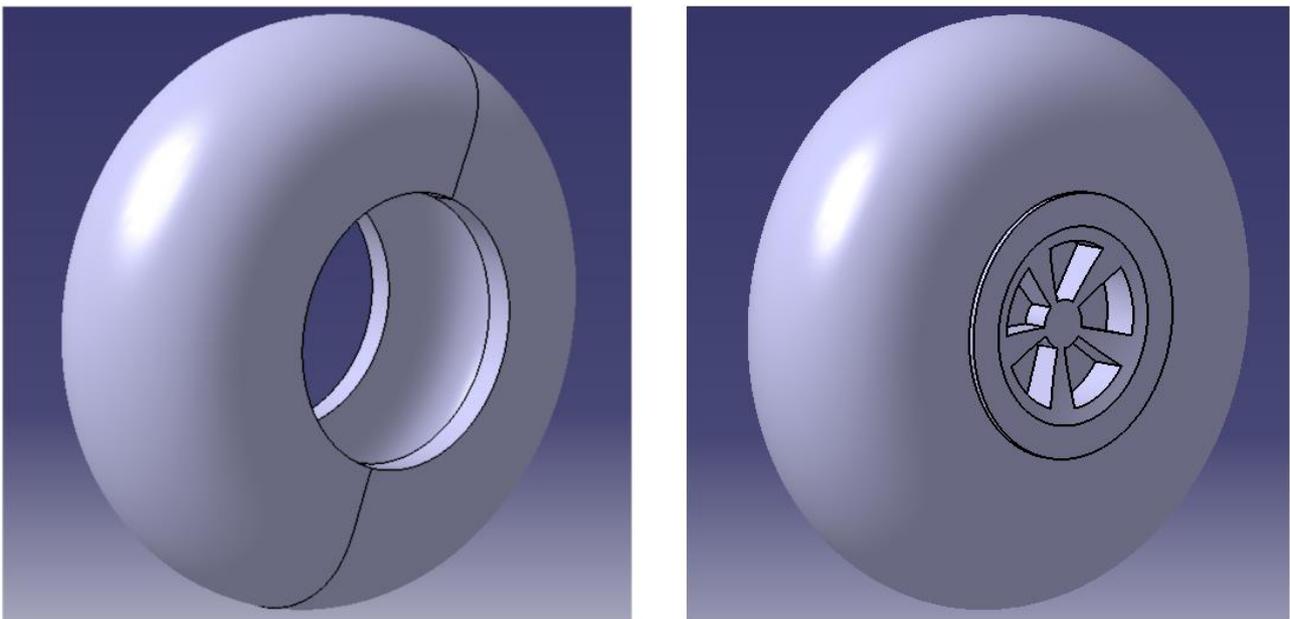


Figura 4.52: Modelado del neumático y la llanta.

Para el eje de la rueda y el amortiguador, también aprovechando su simetría de revolución, bastará con extraer su contorno en la vista de perfil de los planos. Estos dos elementos se modelarán en el mismo *Part* que el neumático y la llanta, pero añadiremos un nuevo *Body* para posteriormente aplicar material por separado. Para el eje, trazamos una circunferencia, y aplicamos la herramienta *Pad* del módulo *Part Design*. Este eje no irá totalmente perpendicular a la rueda, ya que ésta presenta una ligera inclinación, como muestran los planos, por lo que el eje irá en dirección normal al plano de simetría del avión. Para el amortiguador, empleamos la herramienta *Shaft*, que dará una forma cilíndrica al *Sketch* extraído previamente de los planos. El resultado es el siguiente.

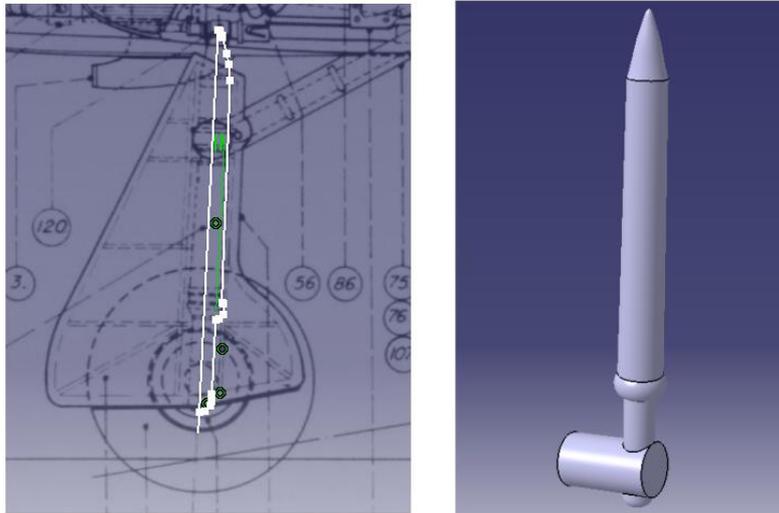


Figura 4.53: Modelado del eje y amortiguador del tren de aterrizaje.

El carenado o pieza que cubre el tren de aterrizaje se comenzará a modelar extrayendo el *Sketch* de los planos gracias al módulo *Sketch Tracer*. A continuación, accediendo al módulo *Generative Shape Design*, se realiza una lámina curva de grandes dimensiones con la herramienta *Extrude*. Por otro lado, propagamos en dirección perpendicular al plano de simetría del avión el *Sketch* realizado previamente con la forma de la cubierta del tren de aterrizaje, de manera que se interseque con la lámina curva que habíamos creado. Con la herramienta *Split*, se realiza un corte quedándonos finalmente con la superficie que cubre la rueda. Por otro lado, se genera la pletina que cubre la barra que va conectada al amortiguador del tren a partir de un *Sketch* y la herramienta *Fill*. Tras esto, accedemos al módulo *Part Design*, donde gracias a la herramienta *Thick Surface* damos un espesor de 0,2in a las superficies. Este nuevo sólido se introducirá en un nuevo *Body*, ya que posteriormente aplicaremos un material distinto al resto del tren de aterrizaje.

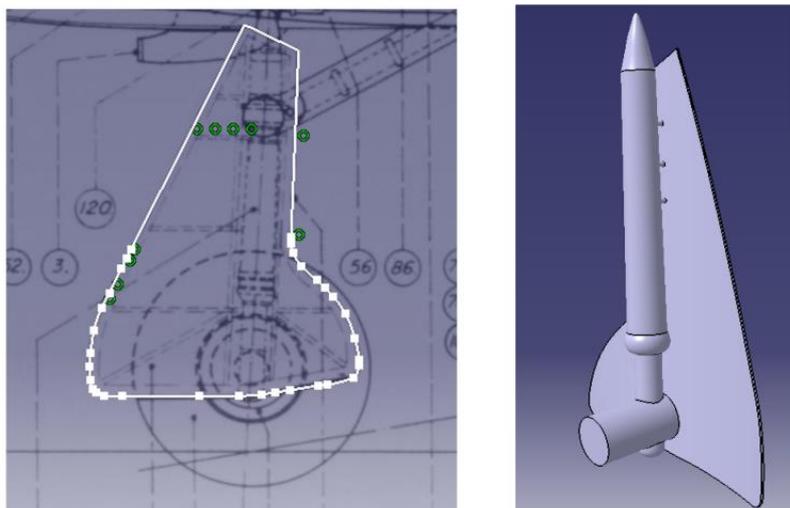


Figura 4.54: Sketch del carenado y modelado completo del amortiguador, eje y carenado.

La unión entre la pletina y la cubierta se realiza mediante una circunferencia a la que damos espesor mediante la herramienta *Pad*. También simulamos una pequeña unión entre la cubierta y el amortiguador. El resultado se muestra en la imagen anterior.

Por último, con la herramienta *Apply Material*, damos a la pieza un aspecto más realista. Además, haciendo uso de la herramienta *Photo Studio Easy Tools* creamos una imagen renderizada, que comparamos a continuación con una fotografía real.



Figura 4.55: A la izquierda, tren de aterrizaje renderizado. A la derecha, fotografía real [20].

4.1.8 Rueda de Cola

La rueda de cola, al contrario que el tren principal, se mantiene fija y no se retrae. Esta configuración se debe a que, en los inicios de la aviación, el ala y el motor de las aeronaves se encontraban en una posición muy adelantada. Además, siendo una rueda no retráctil, su resistencia aerodinámica influye menos estando en una posición atrasada. También hay que tener en cuenta que se trata de una época en la que primaba la robustez y la rapidez de fabricación para combatir cuanto antes en la guerra.

De una forma similar al tren principal, comenzamos trazando el contorno de la rueda en un *Sketch* a través del módulo *Sketch Tracer*. Además, se realiza otro boceto con la forma redondeada del neumático, visto frontalmente. En un nuevo *Part* y accediendo al módulo *Part Design*, se utiliza la herramienta *Shaft* para crear un sólido de revolución, que recreará el neumático. Además, para la llanta, se realiza otro *Sketch* dejando un espacio en el centro para el eje de la rueda, y volveremos a crear un sólido de revolución. El resultado obtenido es el siguiente.

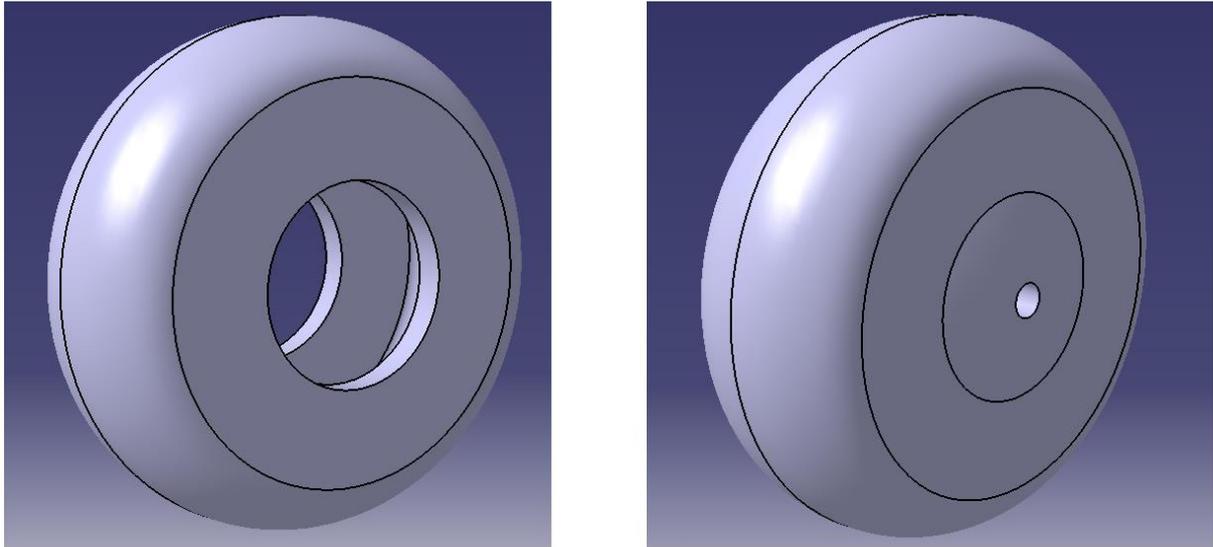


Figura 4.56: Modelado del neumático y la llanta.

Por otro lado, para la sujeción, utilizamos el dibujo de corte de uno de los planos de *Willis L. Nye* que estamos siguiendo como referencia. En primer lugar, para la barra alargada que conecta la sujeción de la rueda con la estructura interna del avión, se genera un *Sketch* y se le proporciona volumen utilizando la herramienta *Shaft*. Para el resto de la sujeción, extraemos el contorno de esta pieza mediante el módulo *Sketch Tracer*. A continuación, transformamos este perfil en un sólido con la herramienta *Pad*. Posteriormente, para dejar espacio a la rueda para girar, se resta material con la herramienta *Pocket*. Por último, modelamos el eje de la rueda creando una pequeña circunferencia y generando el eje con la herramienta *Pad*. El resultado final se muestra a continuación, comparándolo con una fotografía real.



Figura 4.57: A la izquierda, renderizado de la rueda de cola y su pieza de sujeción. A la derecha, fotografía real [6].

4.1.9 Radiador de Refrigeración

Este componente del avión no es más que un intercambiador de calor, utilizado para refrigerar motores de combustión interna, tanto en automóviles como en aviones con motor de pistones. Para enfriar el motor, se hace circular propilenglicol alrededor de éste, donde se calienta. Posteriormente, pasa a través del radiador, donde cede calor a la atmósfera.

En primer lugar, accedemos al módulo *Sketch Tracer* para extraer tanto la vista frontal como la vista lateral del radiador. Posteriormente, se crea un nuevo *Part* y abrimos el módulo *Generative Shape Design*, donde se pegan los *Sketch* realizados.

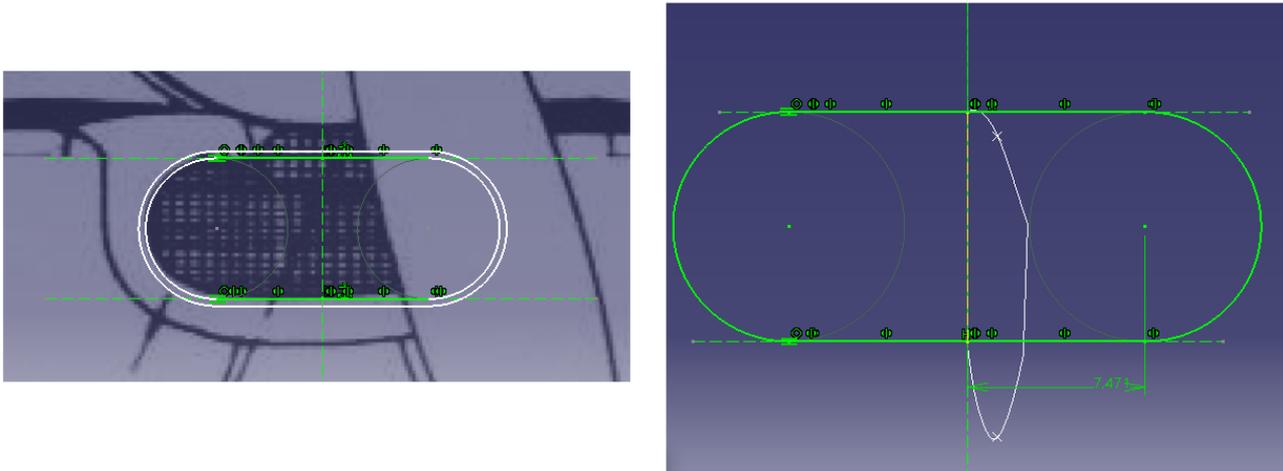


Figura 4.58: Extracción de las vistas frontal y lateral del radiador.

A continuación, se trazan dos secciones más apoyadas en planos transversales al carenado del radiador, simulando la forma que tendría ésta. Con la herramienta *Multi-Sections Surface*, se hace un barrido a través de estas secciones, utilizando como guías la vista lateral del radiador, como puede apreciarse en la imagen anterior. El resultado obtenido es el siguiente.

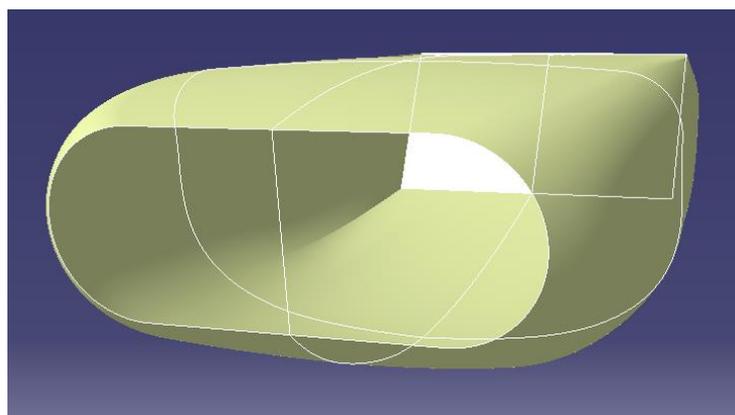


Figura 4.59: Superficie del carenado del radiador de refrigeración.

Por otro lado, en la entrada de la toma de aire del radiador, realizaremos una superficie a través de la herramienta *Fill*, para más tarde darle un pequeño espesor. Aplicaremos un material oscuro y translúcido, de manera que logre simular el aspecto real con el radiador ubicado en su interior. Por último, se emplea la herramienta *Thick Surface* para el carenado, convirtiéndolo así en un sólido. Además, pintamos la pieza con un color beige que logre imitar la pintura habitual de los Hawker Hurricane.

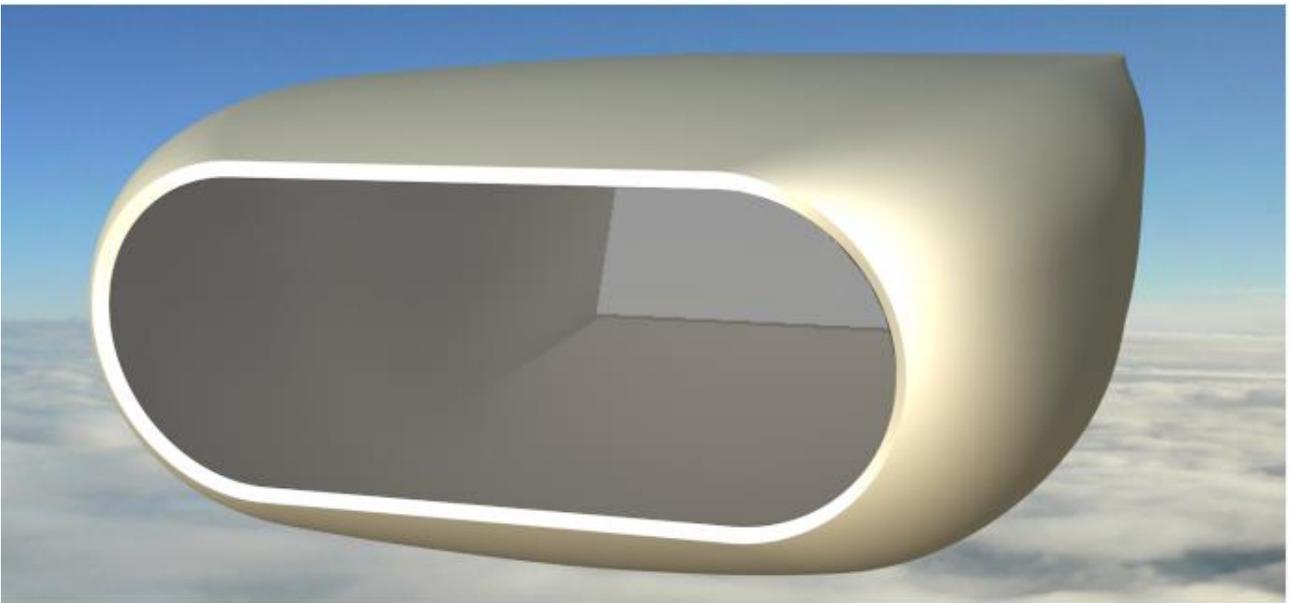
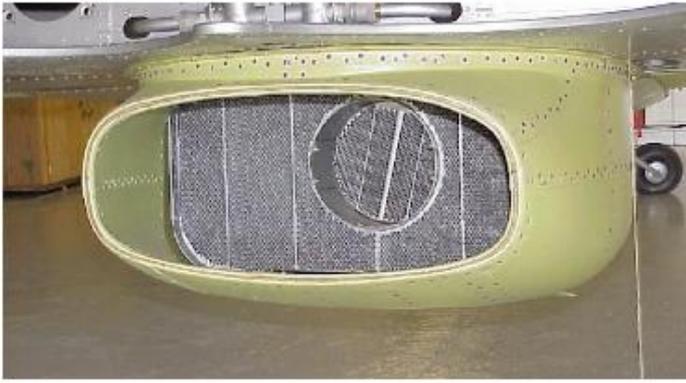


Figura 4.60: Arriba, fotografías reales del radiador de refrigeración [5] y [6]. Abajo, renderizado final del modelado.

Como se puede apreciar en las imágenes anteriores, el aspecto de la entrada al radiador de refrigeración es ligeramente diferente si comparamos las dos fotografías tomadas de un avión real. Esto se debe a que, para el uso del Hawker Hurricane en las misiones de Asia y Palestina se requería de una refrigeración algo superior.

4.1.10 Sistema de Escape

Se trata de un sistema formado por varios conductos gracias al cual pueden escapar los gases de la combustión del motor. En el Hawker Hurricane podemos encontrar dos versiones distintas de este elemento. En nuestro caso, debido a que se instaló con mayor frecuencia en la versión Mk. IIC de esta aeronave británica, modelaremos el sistema de escape mostrado en la *Figura 4.61*.

Comenzamos recreando la parte interior del sistema de escape, ayudándonos tanto de los planos de la revista *Model Airplane News* [1] como del dibujo de corte de *M. Badrocke* [4]. Para ello, insertamos un nuevo *Part* en el módulo *Part Design*. En un plano, realizamos un *Sketch* que represente la forma de la vista en planta del interior del sistema de escape. Posteriormente, damos un espesor de 6 pulgadas con la herramienta *Pad*.



Figura 4.61: Sistema de escape real de un Hawker Hurricane [6].

Ahora modelamos los tubos del sistema de escape, con esa forma de luna creciente tan particular. Para ello, se realizan dos bocetos para cada tubo con la forma de las secciones transversales a éstos. En otro *Sketch* realizaremos las guías que permitirán generar de una manera más suave y estable el tubo a través de la herramienta *Multi-Sections Solid* del módulo *Part Design*. El resultado es el siguiente.

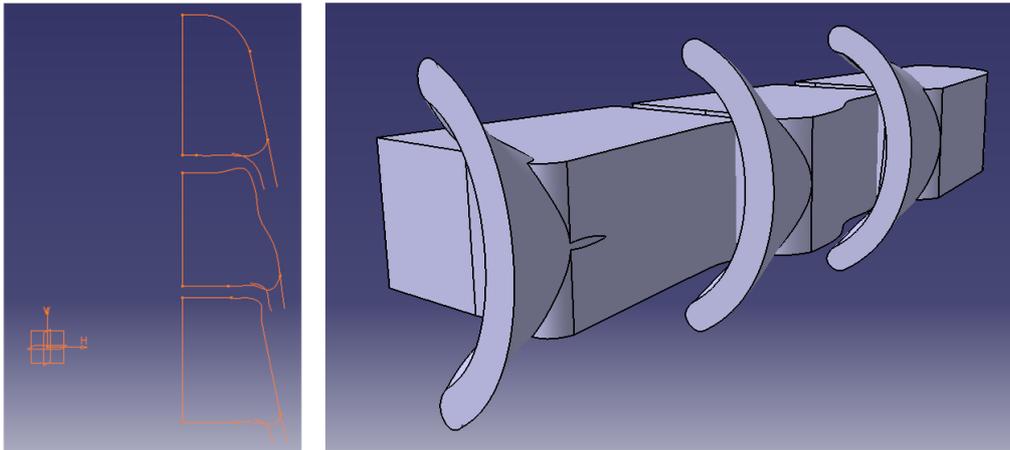


Figura 4.62: *Sketch* de la vista en planta del sistema de escape y utilización del módulo *Part Design*.

Para finalizar, se ha realizado una pequeña hendidura en la entrada de los tubos con la herramienta *Pocket*. También se han redondeado las aristas con la herramienta *Edge Fillet*. Para dotar a la pieza de un aspecto similar al real, se ha aplicado material para recrear la fotografía del sistema de escape real (*Figura 4.61*).



Figura 4.63: Renderizado final del modelado del sistema de escape.

4.1.11 Toma de Admisión del Carburador

La admisión es la primera de las etapas de un motor de combustión interna de cuatro tiempos. Ésta consiste en la introducción de aire fresco dentro de los cilindros para la posterior etapa de compresión. Esta toma no es más que un elemento que permite la entrada de aire limpio al motor.

El proceso de recreación de esta pieza será bastante sencillo, ya que nos bastará con dos *Sketches*: la sección transversal al tubo y una guía que permita propagar la sección. Por un lado, trabajaremos en el módulo *Generative Shape Design*, generando la superficie de la toma de admisión con la herramienta *Sweep*. A continuación, le aplicamos grosor de 0,5in con la herramienta *Thick Surface*, dentro del módulo *Part Design*. El resultado final se muestra en la siguiente figura.

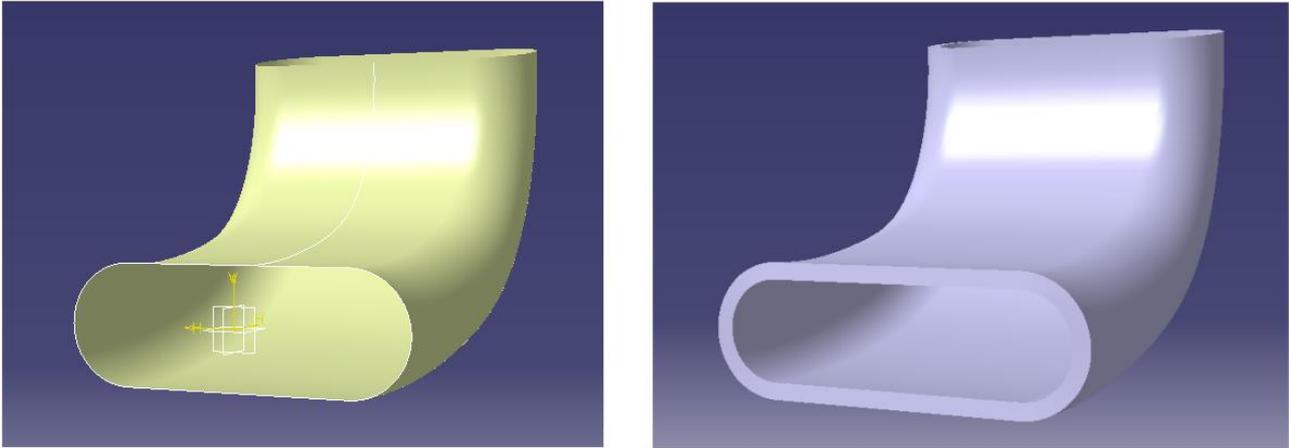


Figura 4.64: Modelado de la toma de admisión del carburador.

4.1.12 Mástil y Radio Antena

Los aviones de combate Hawker Hurricane incorporaban un sistema de comunicaciones AM llamado *TR9D*, capaz de establecer conexión con tierra y otras aeronaves. En la cabina del piloto, existía un controlador electromecánico para operar este sistema a través de un cable *Teleflex*. Este sistema era una evolución del *TR9*, creado por la RAF, solventando algunos fallos debido a vibraciones y temperatura, así como incorporando un segundo canal que permitiera realizar la función radar a la vez que la comunicación por voz [21].



Figura 4.65: Fotografía histórica de la parte trasera del Hawker Hurricane con la antena T.R.9D [22].

El modelado de este sistema se compondrá de tres partes: el mástil ubicado detrás de la cabina, el cable y el pequeño mástil ensamblado en el estabilizador vertical.

Para el primer mástil, el de mayores dimensiones, se utilizará el módulo *Part Design*. De manera simple, se trazarán dos *Sketch* en dos planos separados por 33in con una circunferencia en cada uno. Posteriormente, se unirán por medio de la herramienta *Multi-Sections Solid*. Por otra parte, para construir el pequeño orificio situado en la parte superior del mástil por donde pasa el cable, se creará un *Sketch* al que daremos volumen con la herramienta *Pad*.

Por otra parte, el pequeño mástil que se encuentra en la parte superior del estabilizador vertical se realizará en el mismo *Part* que el resto del estabilizador, pero en un *Body* distinto. Bastará con crear un cilindro de 1,5in de diámetro con la herramienta *Pad*. Para el orificio que permita hacer llegar el cable se procederá de forma idéntica al otro mástil. Los resultados de ambos sólidos se muestran a continuación.

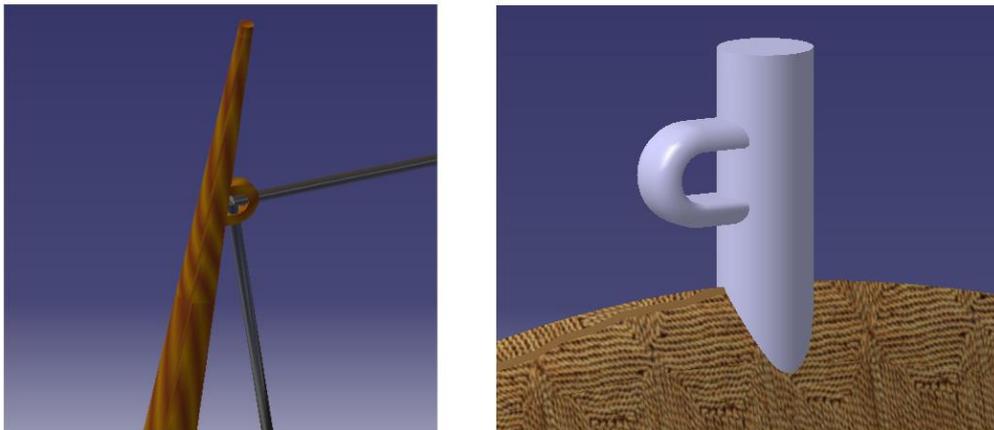


Figura 4.66: Modelado de los mástiles de las antenas del sistema TR9D.

Para concluir el sistema de comunicaciones, modelamos el cable en el módulo *Part Design*, pero dentro a su vez del archivo *Product* del ensamblaje del avión completo, donde ya se encuentra colocado previamente el fuselaje y los estabilizadores (este proceso se detallará más adelante en esta memoria). De este modo, trazamos un *Sketch* que consista en dos líneas: una que parta del interior del fuselaje y llegue hasta el orificio creado en el mástil de mayor tamaño, y otra que vaya desde el orificio del mástil grande hasta el situado en el estabilizador vertical. Por otro lado, en un extremo de cada una de las líneas, se realiza una circunferencia en un plano perpendicular a éstas. Finalmente, con la herramienta *Rib*, haremos un barrido de manera que se propaguen las circunferencias creadas a lo largo de cada línea, obteniendo un sólido que simulará el aspecto del cable. El resultado final será el siguiente.

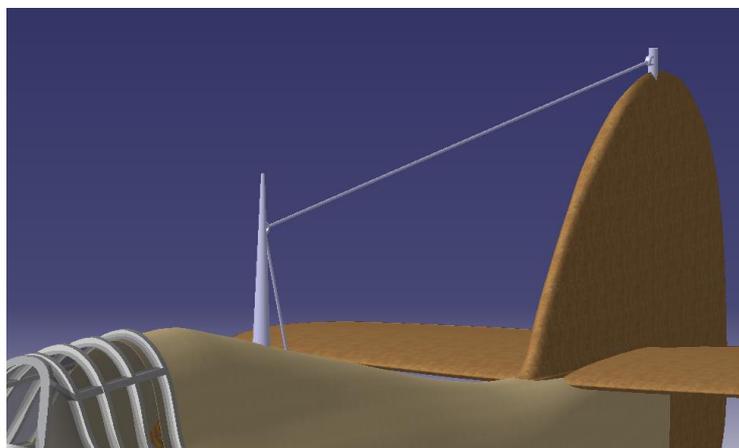


Figura 4.67: Modelado final de la antena del sistema de comunicaciones.

4.1.13 Aleta Ventral

Por lo general, este tipo de componentes aerodinámicos suelen añadirse para compensar algún tipo de inestabilidad, ya sea de manera intencionada durante el proceso de diseño de la aeronave o para corregir un error tras los ensayos. En el caso del Hawker Hurricane, como su nombre indica, se encuentra en la parte inferior del fuselaje del avión, a ambos lados de la rueda de cola.

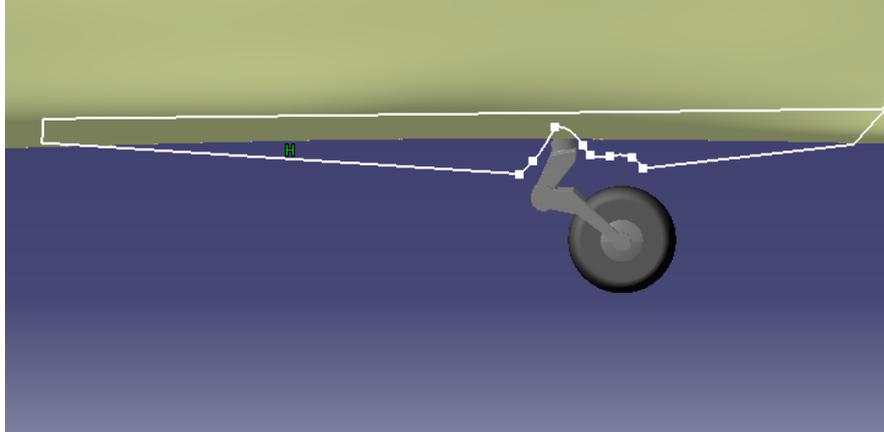


Figura 4.68: *Sketch* del contorno de la aleta ventral realizado en el plano de simetría del avión.

Esta pieza se realizará de manera muy sencilla en el módulo *Part Design*. Iniciamos creando un *Sketch* contenido en el plano de simetría del avión. A continuación, propagaremos este perfil en dirección perpendicular al mismo, creando un sólido con la herramienta *Pad*. El siguiente paso será estrechar este sólido poco a poco desde la parte ensamblada al fuselaje hasta el borde inferior de la aleta. Para ello, realizamos un *Sketch* en un plano frontal al avión. Por último, restaremos material al sólido que habíamos construido previamente con la herramienta *Pocket*. Los resultados obtenidos son los siguientes.

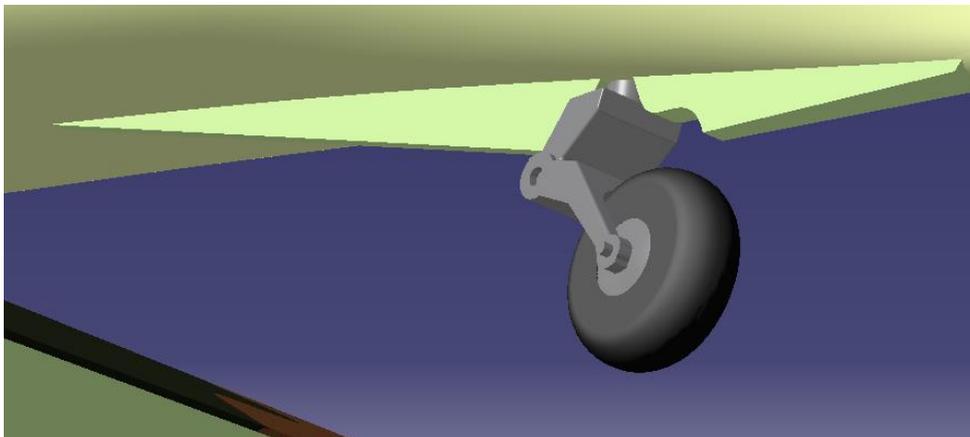


Figura 4.69: Resultado final del modelado de la aleta ventral.

4.1.14 Ensamblaje y Resultado Final del Exterior del Hawker Hurricane

El capítulo 4.1 concluye con el ensamblaje de todas las piezas anteriormente descritas. Así, en un *Product* colocamos cada *Part* de la manera deseada a través del módulo *Assembly Design*. Por otra parte, aplicamos material, simulando el uso de varios tipos de tela para el recubrimiento del fuselaje, las alas y los estabilizadores horizontal y vertical en un proceso previo a la adición de la pintura.

En primer lugar, utilizamos la herramienta *Fix* para fijar el fuselaje en el espacio, siendo éste el *Part* principal y al que iremos ensamblando los demás elementos. A continuación, se emplea la herramienta *Contact Constraint* para unir la cara posterior del encastre de la hélice a la cara de la base del cono de la hélice. Además, para permitir que las palas se ajusten a los orificios realizados en el cono, se utiliza la herramienta *Coincidence Constraint*, en la que seleccionaremos los ejes que atraviesan el centro de las circunferencias que forman tanto los orificios del cono como la raíz de las palas. Posteriormente, se une la hélice completa al fuselaje con la herramienta *Contact Constraint*.

Para las alas, puesto que sólo disponemos de una, se utilizará la herramienta *Symmetry* para crear un nuevo *Part* que sea una copia del ala que ya habíamos modelado. Seleccionaremos como plano de referencia el plano de simetría del avión. La segunda rueda del tren principal de aterrizaje se añadirá de la misma forma. Tras esto, será necesario emplear la herramienta *Offset Constraint*, en la que definiremos la distancia de los planos que forman el sistema de referencia de las alas con sus análogos en el *Part* del fuselaje, que es la pieza que tenemos fija en el espacio. Haremos lo mismo para el caso de los estabilizadores, así como el tren de aterrizaje, la aleta ventral, el radiador, la toma de admisión del carburador, la antena y los tubos de escape.

En todos los casos, sólo será necesario llevar a cabo una traslación de las piezas, ya que los sistemas de referencia de las piezas los hemos definido paralelos entre sí a lo largo del proceso de modelado. No obstante, para la hélice se deja un grado de libertad, que será el que permita girarla alrededor de su propio eje utilizando la herramienta *Manipulation*. Con todas las piezas ensambladas y con el material aplicado, el resultado es el siguiente.



Figura 4.70: Renderizado del modelo final del exterior del Hawker Hurricane.

4.2 Estructura Interna del Hawker Hurricane

En este segundo subcapítulo del proceso de modelado del avión de combate británico, partiremos de la parte exterior del avión, ya simulada en tres dimensiones, para extraer parte de la geometría de la estructura interna. Además, ante la ausencia de información precisa en los planos, recurriremos a dibujos de corte, así como a fotografías reales obtenidas en diferentes libros que iremos referenciando a lo largo de esta sección.

Para llevar a cabo la estructura interna, se han debido tomar algunas decisiones con el propósito de simplificar algunos elementos, tratando de encontrar un equilibrio entre realizar un modelado conciso y ser fieles a la realidad y el material de referencia.

4.2.1 Interior del Fuselaje

La estructura interna del fuselaje consta de diferentes elementos. Entre los más importantes se encuentran las cuadernas, los larguerillos y algunas estructuras que dotan a la aeronave de rigidez y forma.



Figura 4.71: Proceso de restauración de un Hawker Hurricane donde se muestra parte de la estructura interna del fuselaje. [5]

Para comenzar el proceso de modelado, necesitamos conocer la posición de las cuadernas a lo largo del eje longitudinal del avión. Para ello, utilizaremos como referencia uno de los planos de *Willis L. Nye* [1], donde se muestra la estructura interna del Hawker Hurricane, así como el dibujo de corte de *M. Badrocke* [4]. En el módulo *Sketch Tracer*, realizaremos varias líneas que marcarán la posición de las cuadernas, como se muestra en la *Figura 4.73*.



Figura 4.72: Comando de entrenamiento de la Royal Air Force 1939-1940 [23].

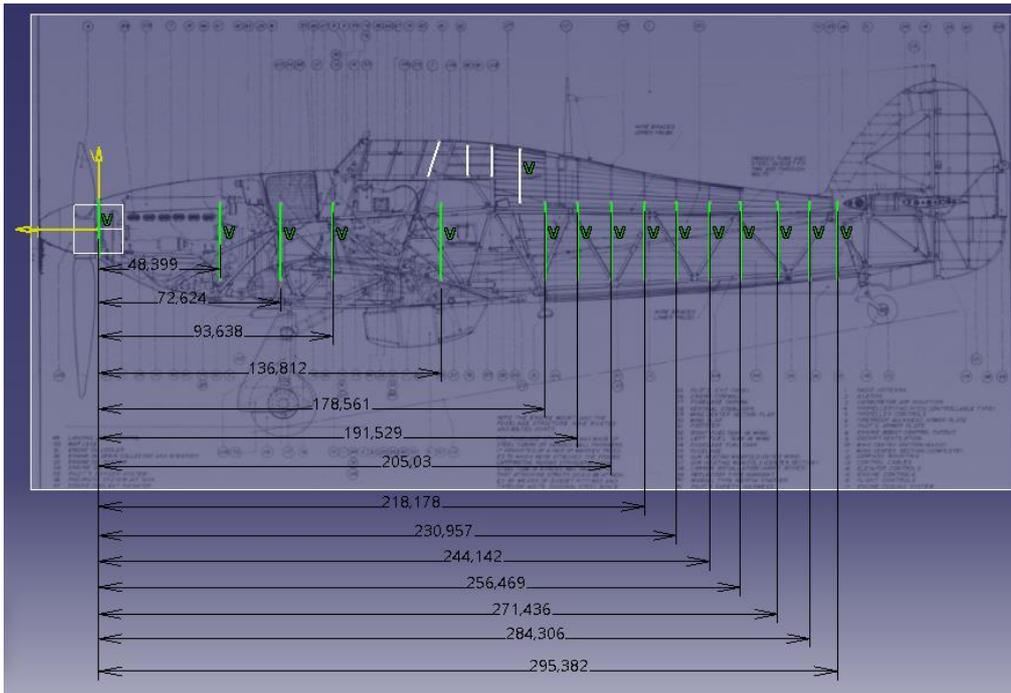


Figura 4.73: Posición de las cuadernas a lo largo del eje longitudinal del avión.

Debido a que ya conocemos la geometría y la forma del modelado de la parte externa del avión, para saber de manera exacta el contorno de las cuadernas bastará con emplear la herramienta *Intersection* del módulo *Generative Shape Design*, donde se intersecan los planos anteriormente creados con la superficie interna del sólido del fuselaje. Tras esto, a partir de las intersecciones, que representan el contorno exterior de las cuadernas, realizaremos un boceto en cada plano donde van situadas éstas. Así, proyectamos las intersecciones en un *Sketch* y vamos dando forma a la sección completa de las cuadernas. Este proceso es complejo, siendo necesarias varias rectificaciones hasta que los resultados se asemejan al material que seguimos como referencia. En el Hawker Hurricane, la función principal de las cuadernas es dotar al fuselaje de la forma deseada, por lo que se crean agujeros y espacios en ellas para aligerar el peso.

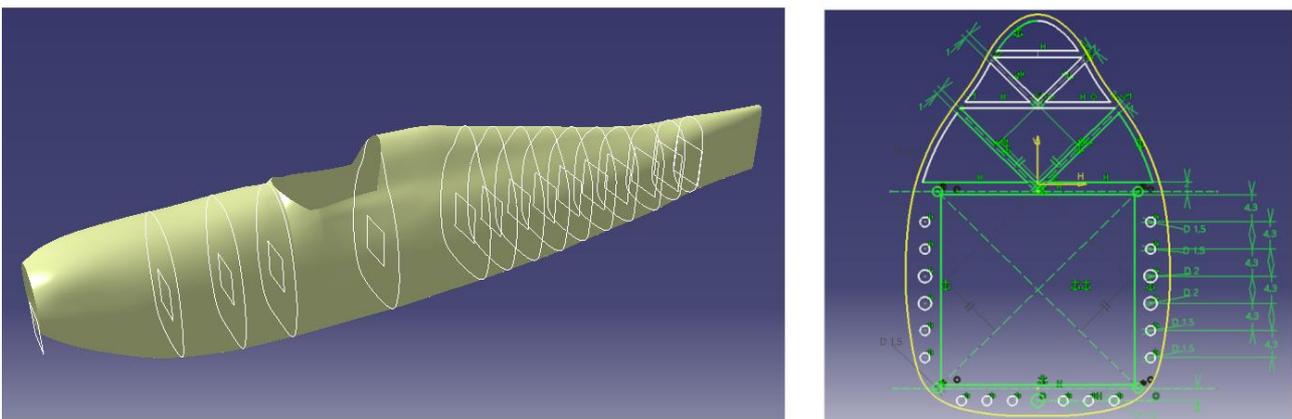


Figura 4.74: Intersección de los planos con la superficie interior del revestimiento del fuselaje y geometría interna de las cuadernas.

Tras llevar a cabo la geometría interna de todas las cuadernas, accedemos al módulo *Part Design* para dar volumen a las cuadernas empleando la herramienta *Pad* para dotarlas de un espesor de 1 pulgada a cada una.

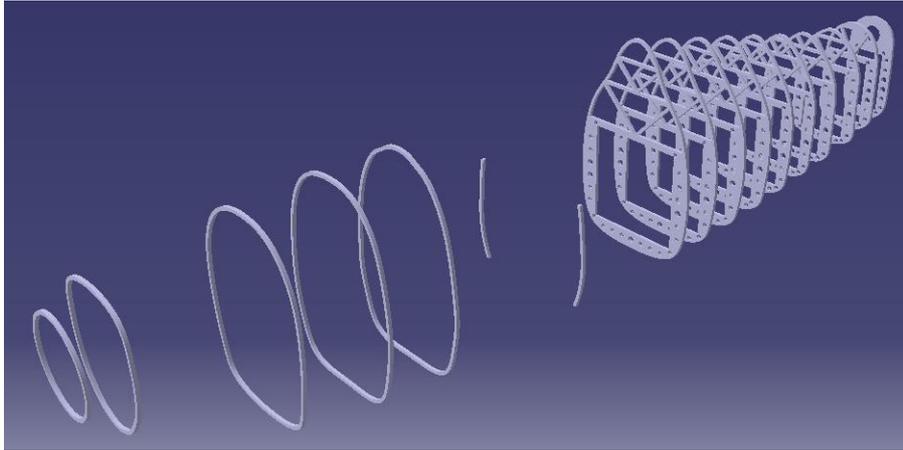


Figura 4.75: Modelado de las cuadernas del fuselaje.

Finalmente, se procede a unir la estructura con cuatro barras que atraviesen las cuadernas. Estas barras, en realidad, forman parte de una estructura tubular más compleja, que no se llevará a cabo completamente en este trabajo. Además, hay que tener en cuenta que están realizadas en un material diferente, a las cuadernas, por lo que debemos insertarlas en *Body* diferente.

En primer lugar, se insertan varios puntos que atraviesen los orificios creados en las cuadernas, así como en las caras de las secciones que se encuentran en la zona del morro. Tras esto, unimos los puntos con la herramienta *Spline*, generando varias curvas en el espacio. En los extremos de éstas, se crean unos *Sketch* donde trazamos una circunferencia del diámetro de la barra. Por último, se propaga la sección de la barra con la herramienta *Rib* a lo largo de las curvas creadas previamente. Al *Part* que se ha obtenido le aplicamos material, llegando finalmente al resultado mostrado en la siguiente imagen.

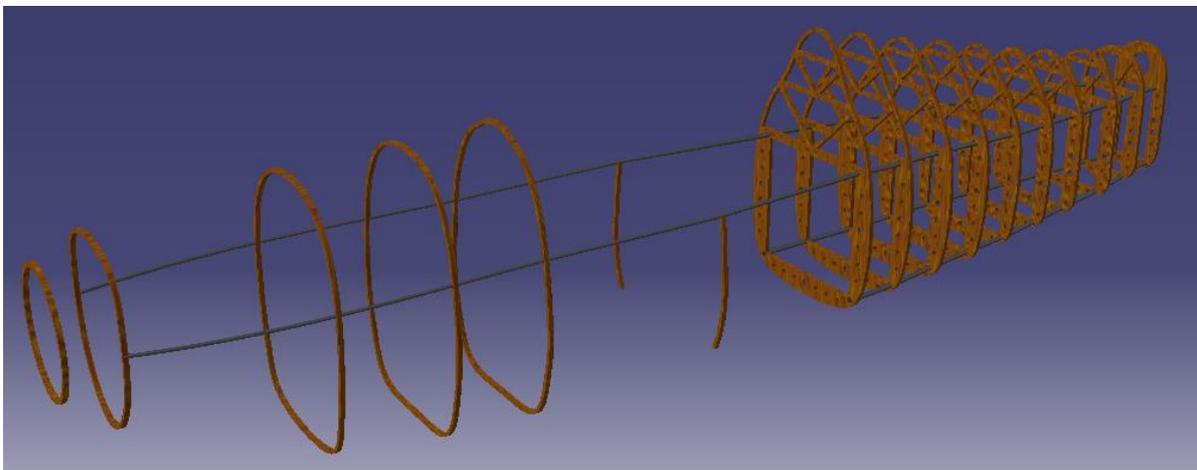


Figura 4.76: Resultado final de la estructura interna del fuselaje.

4.2.2 Estructura Interna de las Alas

El interior de las alas está formado por largueros, larguerillos y costillas. Los largueros recorren el ala desde el encastre hasta la punta, siendo la parte de la estructura que resiste las cargas principales del ala en las distintas etapas del vuelo. Por otro lado, las costillas se sitúan de manera transversal tanto al ala como a los largueros, y son los elementos que dan forma y curvatura, además de dotar de rigidez al ala. Por último, los larguerillos proporcionan consistencia al conjunto y permiten poder realizar el revestimiento de una manera más adecuada.

El primer paso para el modelado consistirá en utilizar el módulo *Sketch Tracer*, donde trazaremos líneas de manera que obtengamos la posición y separación de las 23 costillas que forman el ala. Como referencia se seguirá el dibujo de corte de *M. Badrocke*. El siguiente paso será utilizar la herramienta *Plane*, donde a partir de las líneas creadas previamente insertaremos planos verticales. A continuación, se emplea la herramienta *Intersection* del módulo *Generative Shape Design*, con la que se obtendrá la intersección de los planos con la superficie del ala y, por tanto, el contorno que corresponde a cada costilla.

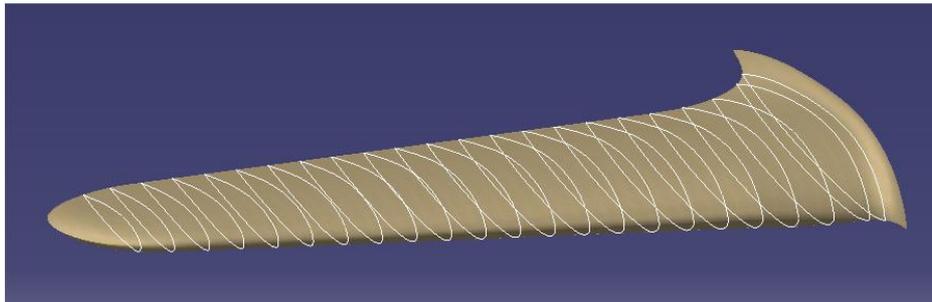
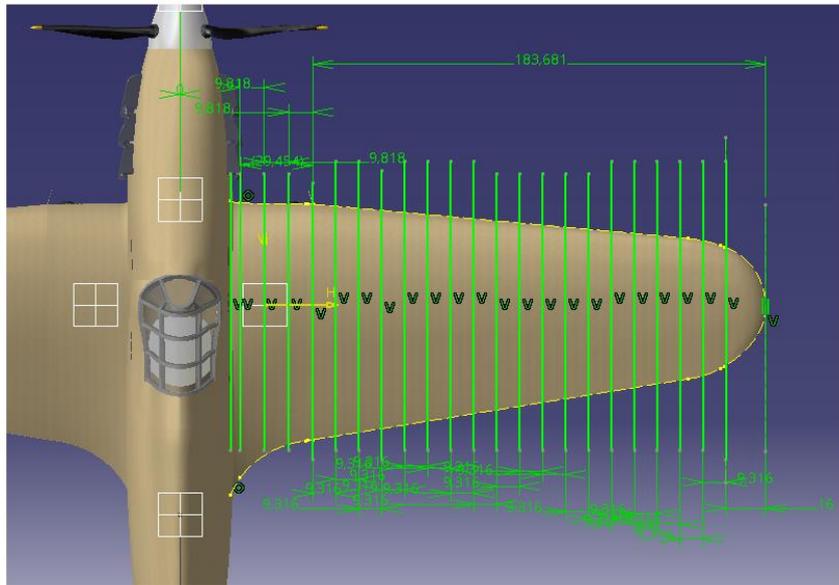


Figura 4.77: Cálculo de la posición de los planos que contienen las costillas, así como la intersección de éstos con la superficie del ala.

Para dar grosor a las costillas, seleccionamos cada perfil y aplicamos la herramienta *Pad*, dándoles un espesor de 1 pulgada. El resultado obtenido es el siguiente.

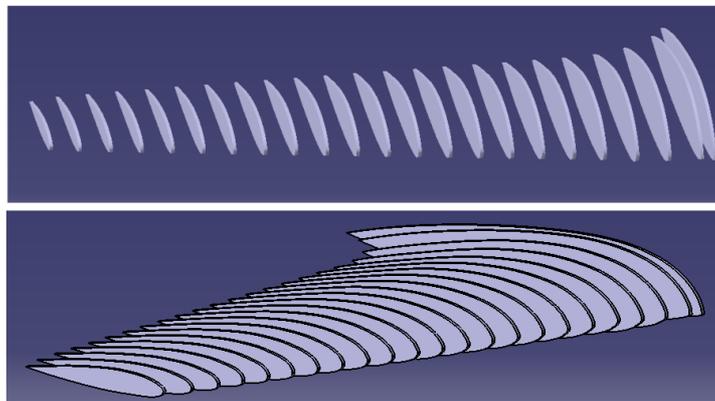


Figura 4.78: Modelado de las costillas con la herramienta *Pad*.

Posteriormente, antes de realizar los huecos en las costillas para aligerar su peso, continuaremos con el modelado de los largueros en nuevo *Part*. Para ello, el primer paso será realizar un *Sketch* en un plano que contenga los ejes X e Y, es decir, un plano horizontal. Ahí trazaremos la sección de los largueros, siendo dos los que atravesarán las alas de punta a punta y otros dos que sólo irán desde una zona cercana al encastre hasta la punta del ala. A continuación, se propagan estas secciones con la herramienta *Extrude* del módulo *Generative Shape Design* en dirección vertical. Tras esto, empleamos la herramienta *Split* aprovechando la intersección entre la nueva superficie generada de los largueros y el revestimiento del ala. El resultado será la superficie lateral de los largueros, sin cerrar aún por su parte superior e inferior, como mostramos en la siguiente imagen.

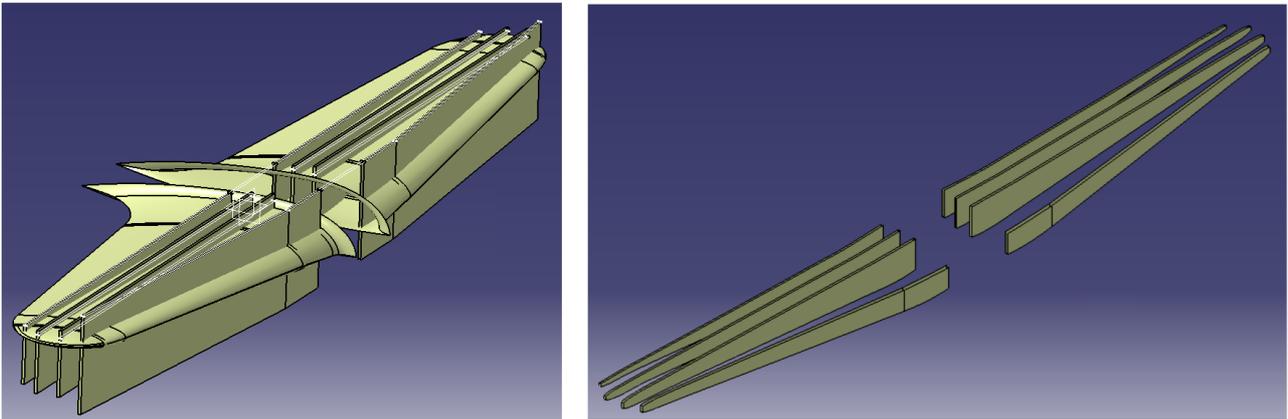


Figura 4.79: Realización de la superficie de los largueros con la herramienta *Extrude* y *Split*.

Puesto que el revestimiento de las alas no es una superficie continua, únicamente se han modelado las superficies de los largueros hasta una posición cercana al encastre. Para conectar los largueros que se encuentran en el extremo izquierdo y derecho, que atraviesan las alas de punta a punta, trazamos un rectángulo en un *Sketch* y lo rellenamos con la herramienta *Fill*, de manera que cerremos la superficie lateral de esos largueros. A continuación, con la herramienta *Extract*, seleccionamos el borde superior e inferior de los largueros, cuyas caras aún se quedan al descubierto, y lo cerraremos con la función *Fill*. Por último, para transformar estas superficies en un sólido, nos vamos al módulo *Part Design* y, empleando la herramienta *Close Surface*, convertimos el volumen encerrado por las superficies en un sólido. Posteriormente, en el módulo *Assembly Design*, observamos cómo quedarían los largueros y las costillas de manera entrelazada.

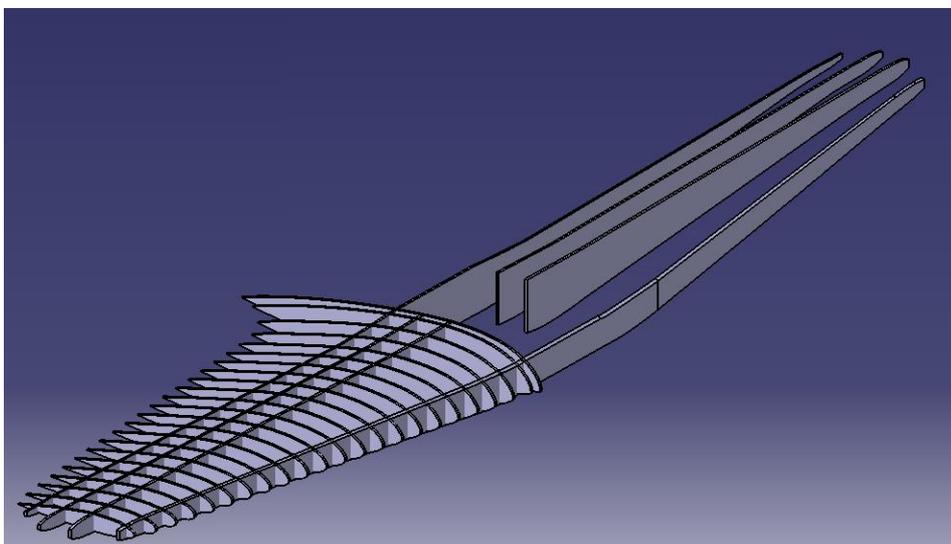


Figura 4.80: Modelado de las costillas y los largueros, aún sin huecos que aligeren su peso.

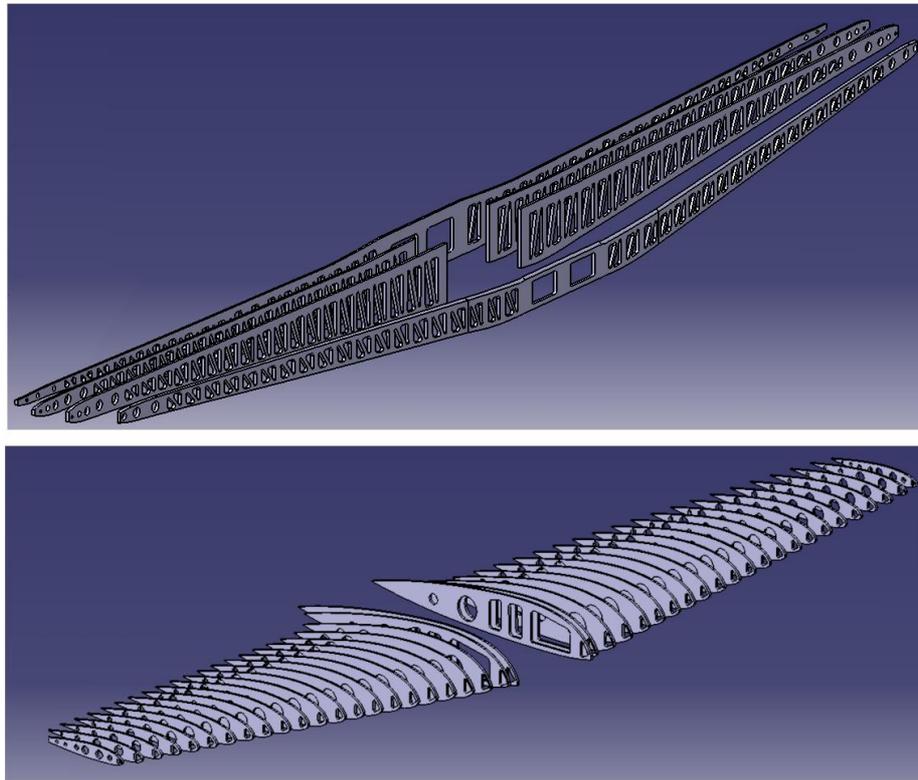


Figura 4.81: Modelado de los largueros y costillas mostrados por separado.

El último paso consistirá en realizar los huecos en las costillas y los largueros con el propósito de aligerar su peso, tal y como se muestra en el dibujo de corte de *M. Badrocke* [4]. Para ello, creamos diferentes *Sketch* en las caras de los sólidos generados y utilizamos la herramienta *Pocket* del módulo *Part Design* para eliminar material. En el caso de las costillas, será suficiente con realizar un *Pocket* que atravesase varias de ellas a la vez, haciendo este proceso de una manera un poco más eficiente. También nos aprovecharemos de la simetría de varios de estos elementos, utilizando la herramienta *Mirror* en el caso del módulo *Part Design* y *Symmetry* en el módulo *Assembly Design* para crear un nuevo *Part* que realice una copia de las costillas haciendo uso de la simetría del avión. Por último, aplicamos material, más concretamente duraluminio. El resultado final puede verse en la siguiente imagen.

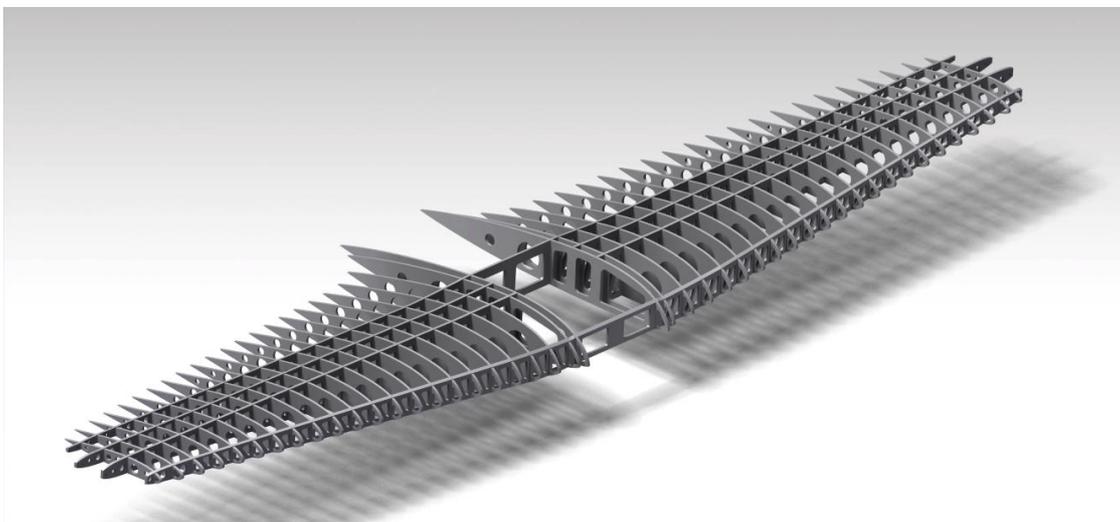


Figura 4.82: Renderizado final de la estructura interna del ala.

4.2.3 Estructura Interna de los Estabilizadores Vertical y Horizontal

En este apartado recrearemos el interior de los estabilizadores de una manera simplificada, pero siendo fieles a los planos y dibujos de corte que venimos siguiendo como referencia. Esta estructura, además de dar forma a los estabilizadores, dotan a esta de rigidez y resistencia.

Comenzamos obteniendo la posición en la que se encuentran las costillas del estabilizador horizontal. Para ello, trazamos varias líneas en el módulo *Sketch Tracer*, separadas por 8,16 pulgadas. A continuación, en el módulo *Generative Shape Design*, creamos varios planos utilizando las líneas generadas previamente.

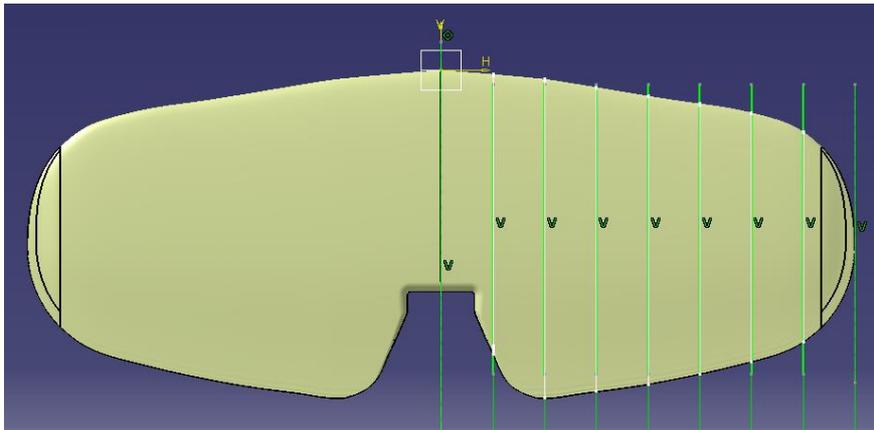


Figura 4.83: Determinación de la posición de las costillas del estabilizador horizontal.

Más tarde, intersecamos éstos con la superficie interior del estabilizador horizontal. Ahora, realizaremos un *Sketch* en cada plano, que representará el contorno de las costillas. Con la herramienta *Projection*, trasladamos a los *Sketch* las intersecciones previamente realizadas para posteriormente utilizar la herramienta *Offset* y generar los huecos de las costillas directamente en el *Sketch*. Con la herramienta *Pad* del módulo *Part Design*, damos un espesor de 1in a las costillas. Como sólo se ha modelado la mitad izquierda del estabilizador, la otra parte se copiará empleando la herramienta *Mirror*, aprovechándonos de la simetría del avión. Por último, aplicamos material y creamos un renderizado de la pieza.

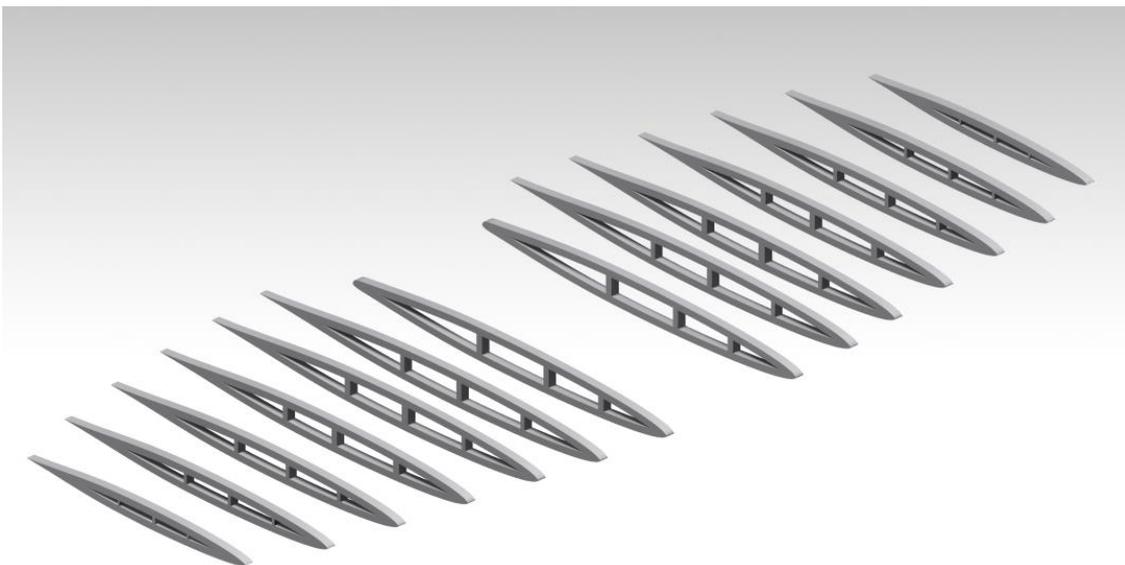


Figura 4.84: Renderizado final de las costillas del estabilizador horizontal.

Para el estabilizador vertical se procede de forma similar. El primer paso es determinar la posición de las costillas, trazando varias líneas en un *Sketch*. A partir de éstas, crearemos varios planos horizontales.

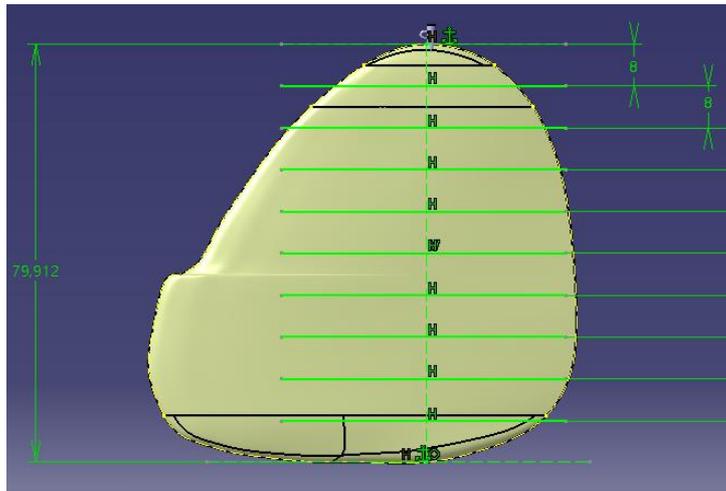


Figura 4.85: Determinación de la posición de las costillas del estabilizador vertical.

A continuación, se emplea la herramienta *Intersection*, para obtener el contorno de las costillas a través de la intersección entre los planos y el revestimiento del estabilizador. Hay que tener en cuenta que, las cuatro últimas costillas no se modelarán por completo, ya que sólo forman parte del timón de dirección. De la misma manera que con el estabilizador horizontal, se crea un *Sketch* en cada plano, definiendo la geometría interna de las costillas, de manera que se queden huecas para aligerar el peso de la aeronave, tal y como se hallan en la realidad. Tras darles espesor con la herramienta *Pad* y aplicar material obtenemos el siguiente resultado.

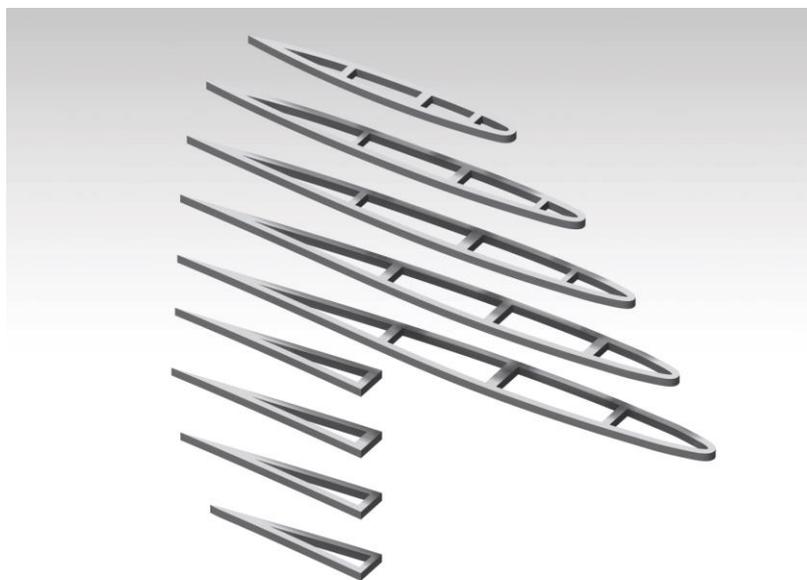


Figura 4.86: Renderizado final de la estructura interna del estabilizador vertical.

4.2.4 Ensamblaje y Resultado Final del Interior del Hawker Hurricane

En este caso, debido a que tanto las cuadernas como los largueros y costillas se han realizado directamente a partir de las intersecciones con las superficies del exterior del modelado del Hawker Hurricane, todos los *Parts* están automáticamente colocados de manera correcta. No obstante, si queremos crear restricciones con respecto al *Part* principal que habíamos fijado, en nuestro caso el fuselaje, para obtener un *Product* más estable y que nos permita manipular las piezas de manera más sencilla, bastará con utilizar la herramienta *Offset Constraint* para definir la distancia del sistema de referencia de cada *Part* con respecto al del fuselaje. Además, para mantener alineados los planos del sistema de referencia, se puede emplear la herramienta *Angle Constraint*.

Debemos destacar que las piezas de la estructura interna no colisionan entre sí ni tampoco con las piezas de la parte externa del avión.

Por último, realizamos un renderizado de la estructura interna de la aeronave.

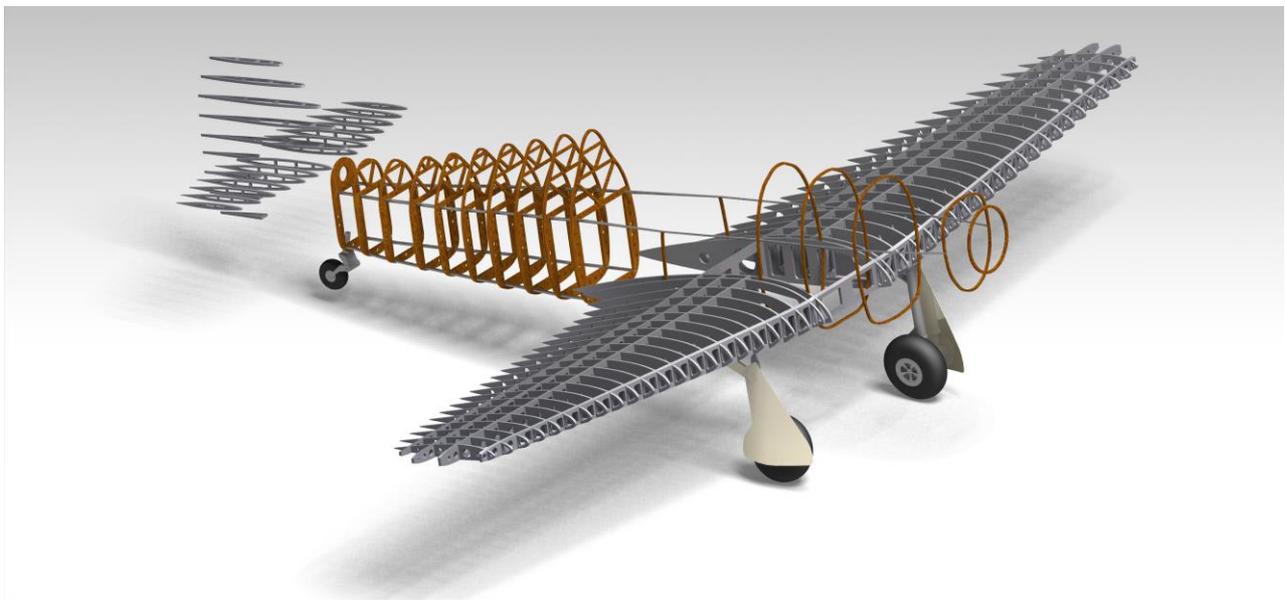


Figura 4.87: Renderizado final de la estructura interna del Hawker Hurricane.

5 ACABADO EXTERIOR Y RESULTADO FINAL

Una vez se ha llevado a cabo el modelado completo de la parte interna y externa del Hawker Hurricane, así como su ensamblaje, falta concluir con la pintura exterior del avión. Para ello, tomamos como referencia el Hawker Hurricane P3717. Este modelo fue construido por Hawker Aircraft Ltd inicialmente en 1940 en la versión Mk. I y participó en la Batalla de Inglaterra a manos del piloto polaco W. Samolinski. A las siete semanas sufrió graves daños en combate debido al ataque de un Messerschmitt BF 110. El P3717 fue reparado en varias ocasiones, adaptándolo a la versión Mk. II, siendo enviado a Rusia posteriormente, donde se conservó hasta lograr volar de nuevo en 2017 [17].

Para aplicar la pintura e insertar algunos símbolos como la escarapela nos encontramos con dos opciones: aplicar material a las superficies externas y modificar las propiedades de éstas para insertar una imagen, lo cual nos parecía poco preciso y nos daba una menor resolución, o realizar cortes con la herramienta *Split* en la superficie exterior del avión y aplicar material de colores. En nuestro caso, se ha elegido la segunda opción.



Figura 5.1: Emblemas de la Royal Air Force ubicados en la superficie externa del Hawker Hurricane.

El primer paso es seleccionar todas las caras externas de las piezas del avión y convertirlas en superficies con la herramienta *Extract* del módulo *Generative Shape Design*. A continuación, en cada *Part* creado, insertamos un *Geometrical Set* donde se alojarán todos los elementos que generemos durante el proceso de pintado. Para los emblemas como la bandera y las escarapelas, se realizan varios *Sketch* en un plano elegido según las necesidades. Para el caso de las alas, se realizarán en un plano horizontal, mientras que para la bandera del estabilizador y la escarapela del fuselaje se elegirá el plano de simetría del avión. Posteriormente, se generan superficies perpendiculares a los bocetos con la herramienta *Extrude*. Tras esto, empleamos la función *Split*, donde iremos dividiendo la superficie externa del avión en pequeñas áreas a las que posteriormente se les aplicará color.

La manera de proceder para realizar el particular diseño de camuflaje será idéntica, es decir, creando varios *Sketch*, barriendo una superficie perpendicular al mismo y realizar un corte con la superficie que deseamos pintar con la herramienta *Split*. Por último, empleamos la función *Apply Material*.

En la siguiente imagen mostramos parte del proceso de pintado del Hawker Hurricane, siendo ésta la última etapa de la recreación digital llevada a cabo.

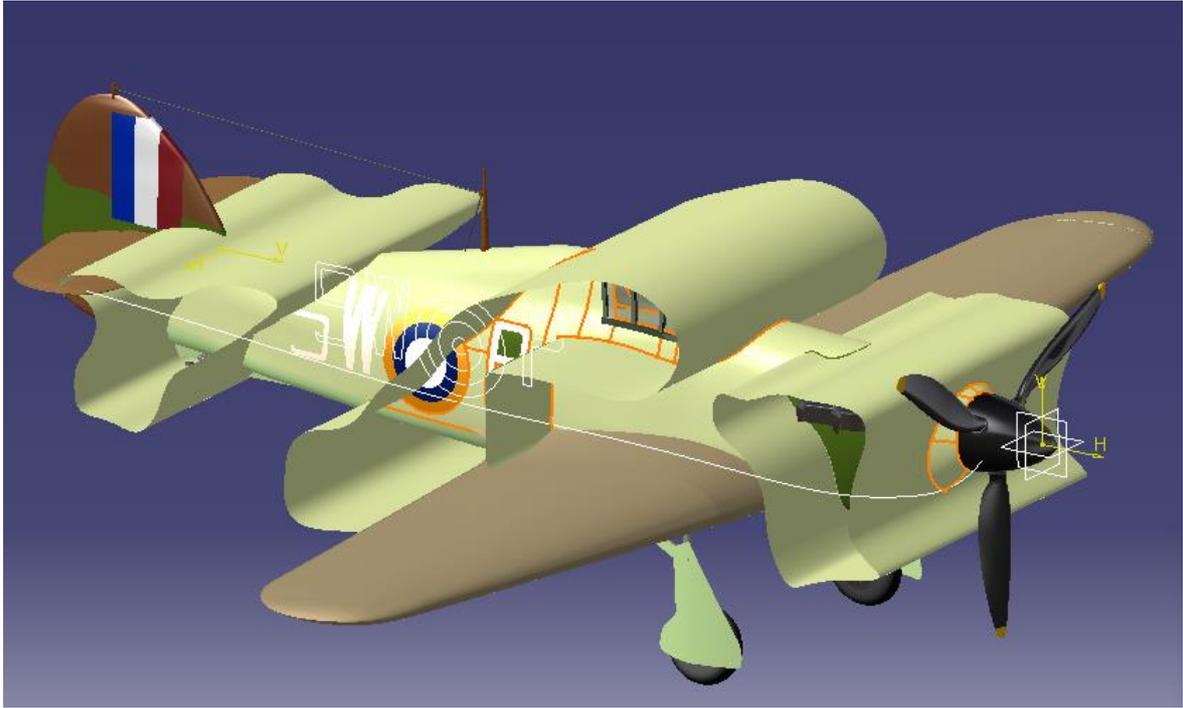


Figura 5.2: Proceso de pintado del Hawker Hurricane.

Una vez aplicada la pintura, en las próximas páginas se mostrará una galería de fotografías reales, así como diversos renderizados realizados a partir de la herramienta *Photo Studio Easy Tools*, donde podremos apreciar realmente la calidad del acabado obtenido en CATIA v5.



Figura 5.3: Renderizado 1 del Hawker Hurricane realizado en CATIA v5.



Figura 5.4: Fotografía real 1 del Hawker Hurricane P3717 [24].



Figura 5.5: Renderizado 2 del Hawker Hurricane realizado en CATIA v5.



Figura 5.6: Fotografía real 2 del Hawker Hurricane P3717 [25].



Figura 5.7: Renderizado 3 del Hawker Hurricane realizado en CATIA v5.



Figura 5.8: Fotografía real 3 del Hawker Hurricane P3717 [6].



Figura 5.9: Renderizado 4 del Hawker Hurricane realizado en CATIA v5.



Figura 5.10: Fotografía real 4 del Hawker Hurricane P3717 [26].

6 CONCLUSIONES Y FUTURAS LÍNEAS DE TRABAJO

Una vez se ha finalizado el trabajo, en este apartado se hace un breve repaso de los objetivos alcanzados tras la realización del modelado del Hawker Hurricane Mk. IIC. Además, se comentan las conclusiones a las que se llega al término de este proyecto.

En primer lugar, con los resultados obtenidos y tras comparar el modelado final con fotografías reales en el *Capítulo 5*, podemos calificar el trabajo como muy satisfactorio. Por otro lado, el orden y la metodología seguidos nos han conducido a ser rigurosos y eficientes con el proceso, habiendo sido muy importantes las anotaciones de las decisiones tomadas a lo largo del modelado y el archivado de imágenes que posteriormente se han incluido en esta memoria.

Por otra parte, se han alcanzado los objetivos marcados, debido a que se ha puesto en valor la importancia de esta aeronave británica, hemos logrado aumentar nuestra habilidad con el empleo de los módulos *Part Design*, *Generative Shape Design*, *Assembly Design*, y *Sketch Tracer* del programa CATIA v5, y hemos sido capaces de entender y extraer la información con las herramientas y el material de referencia del que disponíamos. Este trabajo refuerza los conocimientos adquiridos en la asignatura *Diseño y Fabricación Asistidos por Ordenador* impartido en nuestro grado, pero también nos acerca a los requerimientos de la industria, donde cada día es más importante diferenciarse de los demás para hacerse un hueco en el mundo laboral, adquiriendo o reforzando nuevas competencias.

En el plano personal, este proyecto también ha significado una oportunidad para aprender a afrontar obstáculos imprevistos y mejorar la capacidad de programar y recalcular el tiempo esperado para cada tarea o proceso. Otro valor adquirido ha sido el hecho de ser capaz de buscar información entre un amplísimo abanico bibliográfico en inglés, algo con lo que los ingenieros, especialmente de nuestra rama, debemos estar habituados.

En último lugar, el tiempo y los recursos de los que se disponía para la realización de este trabajo han sido limitados, permitiendo la posibilidad de proseguir y mejorar el contenido del proyecto. Entre las futuras mejoras destacamos las siguientes:

- Empleo de los módulos *DMU Kinematics* y *DMU Space Analysis* para recrear el movimiento que tendrían algunas partes móviles de la aeronave como la hélice o las superficies de control.
- Incremento del detalle con el que se ha realizado el modelado, especialmente de la estructura interna.
- Empleo de un programa de análisis de elementos finitos para estudiar la estructura del Hawker Hurricane, así como su eficiencia aerodinámica comparándola con la de su sucesor, el avión Supermarine Spitfire.
- Recreación de la planta de potencia del avión.
- Incorporación de los distintos sistemas del Hawker Hurricane al modelado.
- Análisis y simulación del comportamiento de la aeronave durante diferentes etapas del vuelo.

BIBLIOGRAFÍA Y MATERIAL DE APOYO

- [1] P. M. Bowers, *Scale Aircraft Drawings*, Wilton: Air Age Publishing, Inc., 1991.
- [2] W. C. Northrop Jr., *The best of Wylam*, USA: Air Age Publishing, Inc., 1964.
- [3] B. Gunston, *The illustrated encyclopedia of combat aircraft of World War II*, New York: Bookthrift Inc., 1978.
- [4] P. B. & M. V. Lowe, *Hawker Hurricane Owners' Workshop Manual*, Sparkford: Haynes Publishing, 2010.
- [5] Hawker Restorations Ltd, 2017. [En línea]. Available: <http://hawkerrestorations.co.uk/>. [Último acceso: 2021 agosto 19].
- [6] S. V. Heertum, «Sierra Bravo Aero Pictures,» 2017. [En línea]. Available: http://www.sbap.be/events/2017/046bobdux2017/046bobdux2017_01.htm. [Último acceso: 21 agosto 2021].
- [7] F. K. Mason, de *The British Fighter Since 1912*, London, Putnam, 1992, p. 242.
- [8] L. Mckinstry, de *Hurricane: Victor of the Battle of Britain*, London, John Murray, 2010, p. 40.
- [9] F. K. Mason, de *The Hawker Hurricane I (Profile 111)*, Windsor, Berkshire, UK, Profile Publications, 1967, pp. 4-5, 7.
- [10] S. Dowling, «The forgotten fighter plane which won the Battle of Britain,» 30 noviembre 2020. [En línea]. Available: <https://www.bbc.com/future/article/20201127-the-forgotten-fighter-plane-which-won-the-battle-of-britain>. [Último acceso: 28 julio 2021].
- [11] T. Holmes, de *Hurricanes to the Fore: The First Aces (Aircraft of the Aces: Men and Legends Ser.# 7)*, Oxford, UK, Osprey Publishing, 1999, pp. 15-16.
- [12] J. Lake, *The Battle of Britain*, London: Amber Books, 2012.
- [13] G. Riley, de *Hawker Hurricane Survivors*, London, Grub Street, 2015, p. 9.
- [14] W. Ramsay, de *The Battle of Britain Then and Now, Mark V*, London, After the Battle, 1982, pp. 306–313, 362.
- [15] P. Birtles, de *Hawker Hurricane: The Multirole Fighter*, Fonthill Media, 2017.
- [16] C. E. Brown, de *The Wings of the Navy: Flying Allied Carrier Aircraft of World War II*, London, Jane's Publishing Company, 1980, p. 114.

- [17] Warbird Tails, 14 septiembre 2015. [En línea]. Available: <https://warbirdtails.net/2015/09/14/goodwood-revival-aviation-2015-photo-post/>. [Último acceso: 5 septiembre 2021].
- [18] David Lednicer, «UIUC Airfoil Data Site,» 2010. [En línea]. Available: <https://m-selig.ae.illinois.edu/ads/aircraft.html>. [Último acceso: 14 agosto 2021].
- [19] Aeronautics Guide, «Aircraft Propeller Aerodynamic Process,» 2021. [En línea]. Available: <https://www.aircraftsystemstech.com/p/propeller-aerodynamic-process-airplane.html>. [Último acceso: 19 agosto 2021].
- [20] J. Anttila, «Pienoismallit,» 7 julio 2007. [En línea]. Available: https://pienoismallit.net/galleria/referenssi_1536/kuva_13488/. [Último acceso: 20 agosto 2021].
- [21] M. Clark, «Spitfire Spares,» 2003. [En línea]. Available: <http://spitfirespares.co.uk/radio.html>. [Último acceso: 8 septiembre 2021].
- [22] «ww2aircraft.net,» [En línea]. Available: <https://ww2aircraft.net/forum/threads/bob-hurricane-i-antenna-systems.47576/>. [Último acceso: 2021 septiembre 8].
- [23] D. B. J, Artist, [Art]. Air Ministry Second World War Official Collection, 1939-1945.
- [24] M. Stretton, «Alamy,» 5 septiembre 2010. [En línea]. Available: <https://bit.ly/Hawker-Hurricane-1>. [Último acceso: 3 septiembre 2021].
- [25] A. Wilson, «Wikimedia Commons,» 17 junio 2017. [En línea]. Available: <https://bit.ly/Hawker-Hurricane-2>. [Último acceso: 4 septiembre 2021].
- [26] D. Stoddart, «Warbirds Photographer,» 16 noviembre 2018. [En línea]. Available: <https://www.warbirdspilot.co.uk/>. [Último acceso: 4 septiembre 2021].

