

Trabajo Fin de Master  
Master en Ingeniería Aeronáutica

Diseño y análisis estructural del avión  
Lockheed SR-71 (Blackbird) con Catia V5

Autora: Rocío Punta Sánchez

Tutor: Manuel Morato Moreno

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

Sevilla, 2022





# Diseño y análisis estructural del avión Lockheed SR-71 (Blackbird) con Catia V5

Autora: Rocio Punta Sánchez

Tutor: Manuel Morato Moreno



Universidad de Sevilla  
Departamento Ingeniería Gráfica  
Camino de los descubrimientos s/n  
41092 Sevilla  
Spain

Imprimido en Sevilla, el 18 de febrero del 2022



*A mi familia y amigos*





# AGRADECIMIENTOS

---

Me gustaría agradecer, en primer lugar, a mi tutor Manuel Morato, por su ayuda en la realización de este proyecto.

También agradecer a mi familia y amigos el apoyo incondicional que me han dado siempre.

# RESUMEN

---

El objetivo de este trabajo es el modelado en CATIA Version 5 y el posterior análisis estructural de la aeronave Lockheed SR-71.

Para ello se comenzará con una breve introducción histórica de CATIA y de la aeronave en cuestión. Una vez finalizado el análisis histórico, se continuará con el análisis del diseño. Para ello se divide la aeronave en sus elementos principales y se remarcan características de cada uno de ellos.

Seguidamente en el proyecto, se describe el modelado de la aeronave, lo cual supone recrear la superficie exterior de la aeronave y, posteriormente, a partir de la superficie externa, modelar la estructura interna. Para concluir con este apartado, se explicará en detalle los dos tipos de estructuras que se encuentran en la aeronave: estructura monocasco y semi-monocasco.

Finalmente, este proyecto se concluirá con posibles líneas futuras de estudio que puedan servir para completar el análisis realizado.



# ABSTRACT

---

The main objective of this project is the modeling in CATIA Version 5 and the structural analysis of the Lockheed SR-71 aircraft.

First, it will begin with a brief historical introduction to CATIA and the aircraft in question. Once the historical analysis is finished, it will continue with the design analysis where the aircraft is divided into its main elements and the characteristics of each of them are highlighted.

Following, the modeling of the aircraft is described, which involves recreating the exterior surface of the aircraft and, later, using the external surface, modeling the internal structure. Finally, the two types of structures found in the aircraft (monocoque and semi-monocoque) will be explained in detail.

This project will conclude with some possible future lines of study that may serve to complete the analysis made.



# ÍNDICE

---

<b>Agradecimientos</b>	<b>vii</b>
<b>Resumen</b>	<b>viii</b>
<b>Abstract</b>	<b>x</b>
<b>Índice</b>	<b>xii</b>
<b>Índice de Figuras</b>	<b>xv</b>
<b>1. Introducción</b>	<b>19</b>
<b>2. CATIA V5: los orígenes de un software de modelado revolucionario</b>	<b>20</b>
2.1. <i>Historia de programas CAD (1960-1980)</i>	20
2.2. <i>Historia de programas CAD (1980-1990)</i>	22
2.3. <i>Historia de programas CAD (1990-2000)</i>	24
2.4. <i>Historia de programas CAD (2000-actualidad)</i>	26
<b>3. Estado del arte</b>	<b>27</b>
3.1. <i>Contexto histórico</i>	28
3.2. <i>Lockheed Skunk Works versus Convair</i>	28
3.3. <i>Modelos predecesores al “Blackbird”</i>	29
3.3.1. Lockheed U-2, “Dragon Lady”	29
3.3.2. Lockheed A-12, “Arcangel”	31
3.3.3. Lockheed YF-12	32
3.3.4. Lockheed M-21/D-21	33
3.3.5. Lockheed SR-71, “Blackbird”	34
<b>4. Componentes estructurales</b>	<b>37</b>
4.1. <i>Dimensiones</i>	37
4.2. <i>Secciones</i>	39
4.2.1. Morro	39
4.2.2. Parte delantera del fuselaje	40
4.2.3. Parte trasera del fuselaje	41
4.2.4. Motores	42
<b>5. Modelado en CATIA V5 del Lockheed SR-71</b>	<b>43</b>

5.1. Documentación utilizada para el modelado	43
5.2. Introducción al modelado	46
5.3. Explosionado de componentes	48
5.4. Diseño de fuselaje, alas interiores y elevadores.	49
5.5. Diseño de cabinas	55
5.6. Diseño de ventanas	57
5.7. Diseño de motores y alas exteriores	58
5.8. Diseño de estabilizadores verticales	62
5.9. Diseño del tren de aterrizaje	66
5.10. Resultado final	70
<b>6. Análisis de la estructura interna de la aeronave</b>	<b>72</b>
6.1. Estructura monocasco	72
6.2. Estructura semi-monocasco	72
6.3. Estructura interna del fuselaje del Lockheed SR-71	73
<b>7. Líneas futuras</b>	<b>75</b>
<b>8. Bibliografía</b>	<b>77</b>





# ÍNDICE DE FIGURAS

---

Figura 1: Interfaz de CATIA versión 1 .....	21
Figura 2: Don Marcel Dassault presentando CATIA versión 1 (1980) .....	22
Figura 3: “Boeing: más francés que nunca” .....	23
Figura 4: Maqueta 3D en CATIA Version 4 .....	24
Figura 5: Maqueta CATIA versión 5 .....	25
Figura 6: Modelo Lockheed U-2 .....	29
Figura 7: Modelo MiG-17 .....	30
Figura 8: Modelo Lockheed A-12, “Arcangel” .....	31
Figura 9: Modelo Lockheed YF-12 .....	33
Figura 10: Modelo Lockheed M-21 portando D-21 .....	33
Figura 11: Modelo Lockheed SR-71A .....	34
Figura 12: Modelo Lockheed SR-71B .....	35
Figura 13: Dimensiones Lockheed SR-71 en metros .....	37
Figura 14: Componentes Lockheed SR-71 .....	38
Figura 15: Morro del Lockheed SR-71 .....	39
Figura 16: Parte delantera del fuselaje del Lockheed SR-71 .....	40
Figura 17: Parte trasera del fuselaje del Lockheed SR-71 .....	41
Figura 18: Pratt & Whitney J58 .....	42
Figura 19: Plano Lockheed SR-71, vista desde arriba .....	43
Figura 20: Plano Lockheed SR-71, vista desde abajo .....	44

Figura 21: Plano Lockheed SR-71, secciones transversales .....	44
Figura 22: Plano estructural del Lockheed SR-71 por Michael Badrocke .....	45
Figura 23: Modelo en CATIA V5 del Lockheed SR-71.....	46
Figura 24: Imágenes reales Lockheed SR-71.....	47
Figura 25: Explosionado de componentes del modelo en CATIA V5 del SR-71 .....	48
Figura 26: Modelo en CATIA del fuselaje, alas interiores y elevadores del SR-71 ..	49
Figura 27: Secciones transversales del morro.....	51
Figura 28: Morro del Lockheed SR-71 utilizando “Multi-section” .....	51
Figura 29: Comando “Fill” en la punta del morro .....	52
Figura 30: Comando “extrude” en la parte final del fuselaje.....	52
Figura 31: Ala interna y elevadores del Lockheed SR-71 .....	53
Figura 32: “Closure Surface” del conjunto morro, alas interiores y elevadores del Lockheed SR-71 .....	53
Figura 33: Variables Booleanas para la creación de la superficie exterior de la cabina .....	54
Figura 34: Variables Booleanas para la creación del interior de la cabina .....	55
Figura 35: Diseño final del fuselaje del Lockheed SR-71 .....	55
Figura 36: Elemento de superficie utilizado para el diseño de ventanas y cabinas..	56
Figura 37: Diseño de las cabinas usando usando la superficie del morro previamente diseñada y el comando “Extrude” .....	56
Figura 38: Diseño final de cabinas .....	57
Figura 39: Diseño final de ventanas.....	58
Figura 40: Motor y ala externa de la aeronave Lockheed SR-71 .....	58
Figura 41: Superficie exterior del motor derecho .....	59
Figura 42: Intersección entre el ala interna y el motor.....	59
Figura 43: Sección delantera del ala interna. ....	60

Figura 44: Borde de ataque lineal del ala externa.....	60
Figura 45: Borde de ataque redondeado del ala externa .....	61
Figura 46: Pincho en la entrada de aire del motor .....	61
Figura 47: Estabilizador vertical del Lockheed SR-71 .....	62
Figura 48: Perfil NACA0014 exportado de Excel a CATIA .....	63
Figura 49: Superficie del estabilizador vertical derecho .....	64
Figura 50: Operación Split para cortar la superficie lateral del VTP.....	65
Figura 51: Superficie intersección del VTP y el motor .....	65
Figura 52: Diseño del tren de aterrizaje del Lockheed SR-71 .....	66
Figura 53: Eje de unión del tren principal con el fuselaje .....	67
Figura 54: Unión entre el eje principal y el eje de revolución.....	67
Figura 55: Ejes principales del tren de aterrizaje .....	68
Figura 56: Ejes del montaje del morro del tren de aterrizaje .....	69
Figura 57: Diseño de las ruedas del tren de aterrizaje.....	69
Figura 58: Recreación del Lockheed SR-71 en vuelo .....	70
Figura 59: Recreación del Lockheed SR-71 en h�ngar .....	71
Figura 60: Estructura interna del Lockheed SR-71.....	73
Figura 61: "Sketch" de la estructura interna derecha del fuselaje .....	74
Figura 62: Estructura interna del morro del Lockheed SR-71 .....	74



# 1. INTRODUCCIÓN

---

EL objetivo de este proyecto es el modelado en Catia V5 y posterior análisis estructural de la aeronave “Lockheed SR-71”, más conocida por el sobrenombre de “Blackbird”.

Por tanto, en este proyecto destacan dos elementos fundamentales. Por un lado, el software de modelado Catia V5 (Computer – Aided Three dimensional interactive application), creado por Dassault Systèmes a principio de los 70 con el propósito de dar soporte al desarrollo del avión de combate, “Mirage”, y actualmente convertido en una de las herramientas más potentes y usadas no solo por el sector aeronáutico sino por el automovilístico y el naval.

Por otro lado, se tiene una de las aeronaves más destacadas diseñadas durante la guerra fría, el “Lockheed SR-71” (Strategic Reconnaissance), que como su propio nombre indica, se trata de un avión de reconocimiento estratégico. Entre sus aspectos más destacados se encuentran su largo alcance y su capacidad de superar la velocidad del sonido. Y es que, a pesar de haber sido diseñado a principio de los años 70, actualmente mantiene el record mundial de velocidad para aeronaves tripuladas en servicio.

A lo largo de este proyecto se tratarán en detalle ambos elementos, comenzando por una breve introducción histórica de ambos y continuando con la explicación detallada de los pasos a seguir para el modelado en CATIA V5 del “Blackbird”. En esta explicación se aportarán detalles estructurales de importancia que han ayudado al modelado y se justificaran las decisiones de diseño tomadas. Finalmente, se incluirán líneas de trabajo futuras que podrían aportar un valor añadido a los resultados obtenidos.

# 2. CATIA V5: LOS ORÍGENES DE UN SOFTWARE DE MODELADO REVOLUCIONARIO

---

**C**ATIA es una plataforma que engloba CAD ( Computer-Aided-Design), CAM (Computer-Aided-Manufacturing), CAE (Computer-Aided-Engineering), 3D Modeling y PLM (Product lifecycle management).

Se trata, por tanto, de una plataforma multidisciplinar que pretende dar soporte al completo desarrollo del producto, desde su conceptualización inicial a su diseño y posterior fabricación. Por ello, es considerado un CAx-software (Computer-Aided technology).

A lo largo de este capítulo se tratarán los orígenes del CAD, diseño asistido por ordenador, y como se le fueron añadiendo otras disciplinas para dar paso al actual software CATIA.

## 2.1. Historia de programas CAD (1960-1980)

Un software CAD hace referencia, tal como se ha introducido anteriormente, a un programa de diseño asistido por ordenador que daba soporte a ingenieros y diseñadores de diferentes industrias en el diseño y fabricación de una gran variedad de productos, desde puentes y carreteras a barcos y aviones.

Aunque los orígenes de este tipo de los programas de modelado datan de principio de los 60, hay que destacar que su existencia sería completamente imposible sin "The Elements" de Euclides de Alejandría (350 a.C.), que contiene los postulados y axiomas de la geometría euclídea en la cual se basan estos programas. [1]

El primer programa CAD, llamado "Sketchpad" fue creado por Ivan Sutherlands como parte de su tesis doctoral en el MIT. "Sketchpad" fue especialmente innovador

debido a que por primera vez el diseñador podía interactuar con el ordenador gráficamente, usando un lápiz de luz para dibujar en la pantalla del monitor.

A pesar de que "Sketchpad" fue el primer programa CAD, el primer programa comercial CAM fue la herramienta "PRONTO", desarrollada en 1957 por Patrick J. Hanratty. Es por ello por lo que Hanratty es conocido como "el padre de CAD CAM".

Debido al coste elevado de los primeros ordenadores y los conocimientos requeridos para su manejo, las primeras industrias en hacer uso de los programas CAD fueron la aeronáutica y automovilística.

Las primeras generaciones de programas de Diseño Asistido por ordenador consistían en aplicaciones para planos 2D, generalmente producto de colaboraciones con investigaciones universitarias. No fue hasta principio de los años 70 cuando el uso de programas CAD como prototipos en fase de investigación pasaron a tener uso comercial. Las principales ventajas del uso de este tipo de programas era la reducción en el número de errores de trazado y el incremento de usos que podía darse al plano.

Uno de los programas más famosos creados en aquella época y que actualmente sigue en servicio es CADAM (Computer Augmented Drafting and Manufacturing) desarrollado inicialmente por la compañía aeronáutica Lockheed. No sería hasta 1975, cuando una compañía aeronáutica francesa, Avions Marcel Dassault, compró la licencia de CADAM y en 1977 comenzó con el desarrollo de una aplicación CAD 3D que llamó CATIA (Computer Aided Three Dimensional Interactive Application), actualmente la aplicación CAD más usada en todo el mundo. [2]

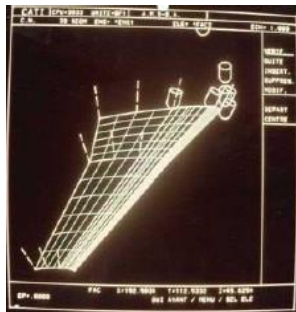


Figura 1: Interfaz de CATIA versión 1

Otros aspectos fundamentales en el desarrollo de los programas CAD durante esta época fueron el incremento de capacidad computacional y, sobre todo, la disminución del coste de ordenadores más pequeños optimizados por compiladores Fortran y con buena calidad gráfica.



Figura 2: Don Marcel Dassault presentando CATIA versión 1 (1980)

La propagación en el uso de programas CAD a otras industrias dio paso a la necesidad de consensuar estandarizaciones. Por ello, en 1979, Boeing, General Electric y NBS (en aquellos momentos conocido como National Bureau of Standards, ahora como NIST, "National Institute of Standards) acordaron comenzar con esta tarea y publicaron, al año siguiente IGES (Initial Graphic Exchange Standard). IGES facilitó la transferencia de complejas curvas y superficies 3D entre diferentes programas CAD

## 2.2. Historia de programas CAD (1980-1990)

Los programas CAD comenzaron la década de los 80 pasando de ser un prototipo en investigación a un producto comercial que tuvo que hacer frente a una alta competitividad y a unos continuos cambios debido al rápido desarrollo en los ordenadores. [2]

Avions Marcel Dassault creó en 1981 su primera subsidiaria y firmó un contrato de marketing permitiendo IBM vender CATIA. Un año después, en 1982, se publica CATIA Version 1, consistente en una extensión de CADAM que incluía modelado



de superficies 3D y funciones NC (Numerical Control)). La asociación de ambas empresas, Avions Marcal Dassault e IBM, continúa siendo efectiva en la actualidad. 3 años más tarde, en 1985, se publica CATIA Version 2 como un programa independiente de CADAM.

Ese mismo año, la industria de programas CAD parecía haber asentado su desarrollo ofreciendo cada vez más funcionalidades aprovechando los avances en los ordenadores. El margen de beneficios era grande debido a que su precio se mantuvo alto frente a la caída de el de los ordenadores. Fue entonces cuando apareció un fuerte competidor en el modelado de sólidos 3D, Parametrics Technology Corp. (ahora PTC), que cambiaría para siempre la industria de programas CAD.

Otro aspecto para destacar que incitó el crecimiento en el uso de programas CAD a lo largo de esta época fue el desarrollo interno por parte de las industrias aeronáutica y automovilística de programas CAD propios. Boenig comenzó su proyecto TIGER 3D CAD en 1980 aunque en 1988 anuncia que los modelos de su nueva aeronave Boeing 777 serían realizados en CATIA. Un años después, en 1989, Dassault Systemes lanza CATIA versión 3.



Figura 3: “Boeing: más francés que nunca”

La década de los 80 termina con el mercado de programas CAD creciendo fuertemente a la vez que se incrementa la competitividad entre sus distintos proveedores.

## 2.3. Historia de programas CAD (1990-2000)

A pesar de la alta competitividad con la que terminó la década de los 80, afortunadamente para aquellos proveedores pioneros en el desarrollo de programas CAD, el mercado comenzó a crecer fuertemente impulsado por la disminución de costes de fabricación que conllevaba la utilización de este tipo de programas. [3]

Un ejemplo de este hecho fue el caso de Boeing que con su estrategia de diseño “all CATIA, no paper” consiguió reducir sustancialmente el tiempo de desarrollo de nuevos modelos eliminando muchas de sus maquetas tradicionalmente requeridas para verificar sus diseños en papel.

El éxito de Boeing impulsó a otras empresas en el sector espacial y en el automovilístico a considerar la necesidad de estandarizar un proveedor de programas CAD. Es por ello por lo que en esta década se firman algunos de los contratos más importantes. Además de Boeing, Mercedes-Benz, Chrysler, Renault y Honda se deciden contratar CATIA para el desarrollo de sus productos.

En 1993, Dassault Systemes lanza CATIA versión 4.

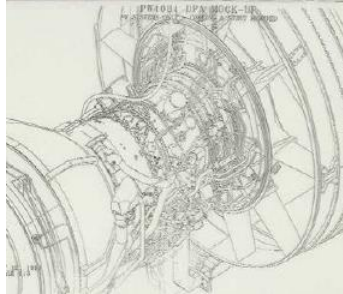


Figura 4: Maqueta 3D en CATIA Version 4

En mitad de la década de los 90 el mercado de los programas CAD debe reinventarse de nuevo debido a la aparición de los sistemas PDM. Y es que, debido al uso de los programas CAD el número de planos comenzó a aumentar drásticamente siendo necesario un sistema que permitiese su gestión. Boeing, tras su exitoso diseño del 777 sin planos en papel, fue el primero en mostrar interés en usar sistemas PDM que no solo permitiera gestionar los planos, sino que fuese capaz de gestionar la

configuración y los cambios realizados en la base de datos de los planos.

El mercado de los programas CAD a finales de los 90 estuvo marcado por 2 novedades y debido a que la competitividad de los distintos proveedores de programas CAD no podía seguir basándose en mejoras del diseño 3D. Por un lado, la aparición de los sistemas PDM, ya mencionada anteriormente, y de la necesidad de compatibilizar estos programas con Internet.

En 1997, Dassault Systems compra SolidWorks y Deneb Robotics. Finalmente, en 1999, Dassault Systems compra Matra Datavision, otro gran proveedor de programas CAD asentado en el mercado.

Aunque algunas compañías fueron rápidamente capaces de ofrecer un servicio a través de Internet, es decir, de poder modelar usando la red, el objetivo principal era la visualización 3D de modelos en buscadores Web y la construcción de buscadores intranet con sistemas PDM. Uno de los líderes indiscutibles en esto último fue Dassault Systemes, que utilizando su experiencia en el proyecto Boeing 777, había dado los primeros pasos en la integración de modelos 3D en Internet a través uno de sus productos, CATIA Conferencing Groupware, el cual permitía revisar anotaciones de los modelos CATIA usando la red.

En 1997, Dassault Systemes lanzó su navegador CATWeb en el cual proporcionaba enlaces web a las vistas 3D de modelos de CATIA y ensamblajes. Un año después, en 1998, creó su subsidiaria ENOVIA para el desarrollo de los sistemas PDM, el cual utilizaba el navegador CATWeb para proporcionar PDM a través de la red.

Finalmente, Dassault Systemes lanza su esperado CATIA Version 5, la primera Version de CATIA completamente integrada en Windows.

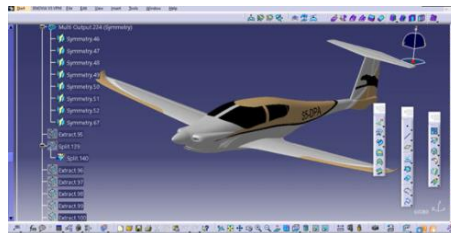


Figura 5: Maqueta CATIA versión 5

## 2.4. Historia de programas CAD (2000-actualidad)

A comienzos de este nuevo siglo, la presión sobre la industria para reducir las fases de concepto, diseño, detalles, fabricación y almacenamiento de nuevos productos se incrementa notablemente. [2]

A finales de los 2000, Ford demuestra lo mucho que puede alcanzarse con un programa CAD 3D completamente integrado y un sistema PDM accesible desde Internet al lanzar su Ford Mondeo, el cual había sido completamente diseñado usando la plataforma Ford's C3P (CAD CAM CAE PDM), en una tercera parte del tiempo que normalmente requería este trabajo.

En otras palabras, el éxito de Ford fue la prueba de que la utilización de los programas CAD, sistemas PDM y su integración en la red, que permitía a los ingenieros y diseñadores visualizar y colaborar en un único diseño común, denominado "master", implicaba no solo un ahorro tiempo y dinero en viajes y reuniones, sino que prácticamente eliminaba las diferencias en el producto final y la incompatibilidad de piezas, problemas propios en el diseño y producción de productos complejos producidos en fábricas situadas en diferentes puntos del mundo o con distintos proveedores.

Por otro lado, introduciendo el término PLM "Product Life-cycle Management", que comenzó como un prototipo de base de datos de fabricación desarrollado en investigaciones universitarias en la década de los 90, comenzó a ganar popularidad en la industria y las compañías líderes en desarrollo de programas CAD decidieron reinventarse rápidamente para poder integrar esta nueva tendencia. Estas compañías líderes aún en la actualidad son Dassault Systemes, Parametric Technology, Unigraphics Solutions y SDRC.

## 3. ESTADO DEL ARTE

---

Lockheed SR-71, más conocida por el sobrenombre de “Blackbird”, es una de las aeronaves más famosas fabricadas por Estados Unidos durante la guerra fría. A pesar de que su diseño tiene más de 60 años, mantiene el record de velocidad mundial para aeronaves que han estado en servicio, pudiendo alcanzar una velocidad equivalente a 3 veces la velocidad del sonido. [4]

Además de una forma característica inconfundible, esta aeronave tenía una gran particularidad con respecto a cualquier otra aeronave, el material del que estaba constituida es titanio. La elección de este material se debe a las altas temperaturas alcanzadas en la superficie de la aeronave como consecuencia de la fricción con el aire a altas velocidades. Debido a las diferencias mecánicas entre el aluminio, material usado predominantemente en la aeronáutica, y el titanio, fue necesario el desarrollo de nuevas máquinas de conformado de material.

Otro requerimiento indispensable que debía cumplir el diseño de esta nueva aeronave era reducir la sección rádar (RCS, “Radar Cross Section”) con respecto a su antecesor, el U-2. Debido a esto, la aeronave presenta una forma achatada y cuenta con materiales RAM (“Radar Absorbing Material”) que reducían la reflexión de las ondas Rádar.

A lo largo de este apartado se hará un repaso histórico de los diseños predecesores y de los retos superados que hicieron posible el desarrollo de la aeronave Lockheed SR-71.

### 3.1. Contexto histórico

En este apartado se explicará el contexto histórico en el cual se diseñó la aeronave SR-71 para poder entender mejor las dificultades superadas y las decisiones de diseño tomadas.

El diseño de la aeronave SR-71 comenzó, como se mencionó anteriormente, en mitad de la Guerra fría, a finales de la década de los 50 y principio de los 60. Sin embargo, para que este proyecto pudiese llevarse a cabo fue necesario el uso de tecnologías desarrolladas en proyectos anteriores. Es por ello por lo que, para entender mejor los requisitos operacionales bajo los cuales se diseñó la aeronave SR-71, habrá que remontarse a 1956, año en el que Lockheed U-2 era el avión de reconocimiento estratégico utilizado por Los Estados Unidos.

A pesar de las increíbles características del U-2, techo de vuelo de 21000 pies y autonomía de 8 horas y 45 minutos, resultaba claramente insuficientes contra las tecnologías antiaviones usadas por la Unión Soviética, capaces de detectar y neutralizar las aeronaves que sobrevolaban su territorio.

El ingeniero aeronáutico Clarence L. "Kelly" Johnson, diseñador del U-2, presidente de "Skunk Works", comenzó a trabajar en un sucesor para del U-2. El principal objetivo de este nuevo proyecto era diseñar una aeronave que fuese difícil de detectar para el radar.

### 3.2. Lockheed Skunk Works versus Convair

En el desarrollo de un nuevo proyecto que sucediera al U-2 como aeronave de reconocimiento estratégico compitieron por conseguir los "Contingency Reserve Fund" de la CIA dos grandes empresas aeronáuticas, Lockheed Skunk Works y Convair. Ésta última compañía desarrollo FISH, una aeronave parásita portada por el bombardero B-58B, producido también por Convair. El proyecto fue cancelado en sus primeras etapas de desarrollo y Convair lanzó otro prototipo, KINGFISH, una aeronave con características muy similares al Lockheed A-12.

Finalmente, Lockheed Skunk Works ganó la licitación y entre los 1960 y 1962 se realizaron numerosos tests sobre el modelo A-12 para evaluar su actuación a velocidades cercanas a 3.5 Mach.

En 1964, Lockheed Skunk Works desarrolló dos nuevos modelos, el M-21 y el SR-71. El primero de ellos tenía la capacidad de poder llevar y lanzar un dron de reconocimiento estratégico llamado D-21.

### 3.3. Modelos predecesores al “Blackbird”

En este apartado se detallará brevemente las características de los modelos predecesores, cuyo desarrollo y avances tecnológicos fueron necesarios para alcanzar el nivel tecnológico que permitiese diseñar y producir el SR-71.

#### 3.3.1. Lockheed U-2, “Dragon Lady”

El modelo Lockheed U-2, más conocido por el sobrenombre de “Dragon Lady”, es una aeronave americana de reconocimiento estratégico utilizada inicialmente por la CIA (“Central Intelligence Agency”) y posteriormente por la USAF (“United States Air Force”).



Figura 6: Modelo Lockheed U-2

Su diseño y producción tuvo lugar después de la Segunda Guerra Mundial, cuando el ejército de Estados Unidos decidió invertir en reconocimiento estratégico aéreo para poder determinar y predecir las intenciones de la Unión Soviética.

A principio de la década de los 50, la Unión Soviética atacaba neutralizando

cualquier aeronave cercana a sus fronteras, a veces incluso aquellas que sobrevolaban el espacio aéreo de Japón. Las aeronaves de reconocimiento de ese momento, que no eran más que bombarderos reconvertidos, como el Boeing RB-47, eran claramente vulnerables a la tecnología antiaérea soviética. Es entonces cuando Richard Leghorn, perteneciente a la USAF, sugiere que la única manera de hacerle frente es desarrollando una aeronave con un techo de vuelo por encima de los 60 000 pies, ya que el mayor interceptor soviético, MiG-17, solo alcanzaba los 45 000.



Figura 7: Modelo MiG-17

En aquel momento se pensaba que una aeronave con un techo de vuelo elevado sería capaz no sólo de evitar los interceptores soviéticos, sino que serían invisibles al radar.

Fue la compañía Lockheed Skunk Works, bajo el diseño del ingeniero aeronáutico Clarence "Kelly" Johnson, la que diseñaría y fabricaría una aeronave capaz de cumplir con las exigencias de la USAF, el U-2. Sus principales características son:

- Longitud: 19.20m
- Envergadura: 31 m
- Altura: 4.88m
- Velocidad en crucero: 760 km/h (Mach 0.715) a 22000m
- Alcance: 11280 Km
- Techo de vuelo: 24 000 m (80 000 ft)

Cuando los primeros U-2 sobrevolaron la Unión Soviética fueron rápidamente detectados por el radar, lo que llevo a la CIA iniciar el proyecto "Rainbow", que



tenía como principal objetivo reducir la RCS (Radar-Cross-Section) del U-2. Tras el fracaso de este proyecto, comenzó un nuevo desarrollo de aeronaves de reconocimiento estratégico que concluiría con el diseño y fabricación del A-12.

### 3.3.2. Lockheed A-12, "Arcangel"

El A-12, conocido por el sobrenombre de "Arcangel" fue el duodécimo diseño de Lockheed Skunk Works que consiguió finalmente la licitación de la CIA para la creación y producción de un sucesor de la aeronave U-2.

El A-12 se trata de un avión de reconocimiento estratégico monoplazo que voló por primera vez en 1962. Las características principales de esta aeronave son:

- Longitud: 31.3m
- Envergadura: 17 m
- Altura: 5.6m
- Velocidad máxima alcanzada: 3500 km/h (Mach 3.35)
- Alcance: 4000 Km
- Techo de vuelo: 29 000 m (95 144 ft)



Figura 8: Modelo Lockheed A-12, "Arcangel"

Antes de que el A-12 entrara en servicio, el objetivo del programa, reemplazar al modelo U-2 en sus misiones de reconocimiento estratégico contra la Unión Soviética, parecía cada vez menos probable. El aumento de precisión del radar soviético hacía al Lockheed A-12 claramente vulnerable para este tipo de misiones.

Se contruyeron un total de 12 Lockheed A-12, de los cuales 5 fueron perdidos en servicio.

### **3.3.3. Lockheed YF-12**

En octubre de 1962, la USAF ("United States Air Force") ordenó 3 interceptores que sustituyeran el F-108A Rapier. La solución aportada por Lockheed Skunk Works fue un diseño basado en el A-12, inicialmente denominado AF-12 para luego pasar a llamarse YF-12.

La misión del YF-12 era interceptar los bombarderos supersónicos soviéticos antes de que alcanzaran las fronteras De Estados Unidos. Esta aeronave contaba con 3 misiles "air-to-air", AIM-47A Falcon". Para poder manejar el armamento, a diferencia del A-12 que era monoplaça, el YF-12 contaba con una tripulación de 2 personas. Algunas de las características más importantes de esta aeronave son:

- Longitud: 30.97m
- Envergadura: 16.95 m
- Altura: 5.64m
- Velocidad máxima alcanzada: 3661 km/h (Mach 3.35)
- Alcance: 4800 Km
- Techo de vuelo: 27 432 m

Como se mencionó anteriormente, solo se construyeron 3, 2 de ellos se conservan en la "National Aeronautics and Space Administration" y son utilizados actualmente en investigaciones. La tercera aeronave fue reconvertida en un avión de entrenamiento para el programa SR-71.



Figura 9: Modelo Lockheed YF-12

### 3.3.4. Lockheed M-21/D-21

El modelo Lockheed M-21 fue un prototipo diseñado y producido por Lockheed Skunk Works como una variante del A-12 diseñado para una tripulación de 2 personas.

A finales de los años 60, Estados Unidos decidió terminar con los vuelos tripulados sobre la Unión Soviética debido al gran riesgo que suponían. Es por lo que el modelo M-21 fue diseñado, para portar y lanzar el Drone D-21. El D-21 consistía en una aeronave no tripulada con una cámara de alta definición que se autodestruía una vez terminado su recorrido previamente marcado y eyectado el módulo de la cámara.



Figura 10: Modelo Lockheed M-21 portando D-21

Las principales características de este modelo son:

- Longitud: 31.1 m
- Envergadura: 16.74 m
- Altura: 5.48m
- Mach de vuelo: 3.35
- Techo de vuelo: 22 860m

Solo se construyeron 2 prototipos del M-21 debido al completo fracaso durante una prueba de vuelo, destuyendose la aeronave, el D-21 que portaba y muriendo uno de sus tripulantes.

### 3.3.5. Lockheed SR-71, "Blackbird"

Lockheed SR-71, sucesor de los modelos A-12 e YF-12, es una aeronave de reconocimiento estratégico de largo alcance, techo de vuelo alto, y velocidad supersónica, por encima de Mach 3, desarrollado por la compañía Lockheed Skunk Works y diseñado por el ingeniero aeronáutico Clarence "Kelly" Jonson. [5]

La forma del fuselaje del SR-71 se basaba en la de su predecesor, el A-12, el primer avión diseñado para reducir la RCS ("Radar-Cross-Section").



Figura 11: Modelo Lockheed SR-71A

Otro aspecto que destacar en la estructura de esta aeronave es el material utilizado para su fabricación y es que, debido a la increíble actuación de esta aeronave en términos de techo de vuelo y velocidad de crucero, a lo largo de su superficie se alcanzaban temperaturas por encima de los 560°, siendo solo posible el uso de dos materiales: acero o titanio. Debido a aumento de peso que suponía el uso del primero, se utilizó titanio, lo que supuso varios retos tanto para obtenerlo, ya que la principal proveedora de este material era la Unión Soviética, como para conformarlo. Por otro lado, en algunas partes donde la temperatura superficial alcanzada no era tan elevada, como los bordes y los estabilizadores verticales, se utilizaron materiales como feilsilano, silicona, amianto y fibra de vidrio. El uso de estos materiales se debe que son prácticamente transparentes para la señal rádar.

En cuanto a sus sistemas, y debido al role de reconocimiento estratégico del SR-71, la aeronave estaba equipada con sensores, SLAR (“Side-Looking Airbone Radar”) y una cámara de fotos.

Algunas de las características más importantes de esta aeronave son:

- Longitud: 32.7 m
- Envergadura: 16.9 m
- Altura: 5.6 m
- Velocidad máxima alcanzada: 3540 km/h (Mach 3.3) a 24 000 m
- Alcance: 5400 Km
- Techo de vuelo: 26 000 m



Figura 12: Modelo Lockheed SR-71B

De este modelo se construyeron 2 variantes:

- SR-71A, versión estándar con dos tripulantes: piloto y RSO ("Reconnaissance System Officer"). De esta versión se construyeron un total de 29 aeronaves
- SR-71B, versión de entrenamiento con dos tripulantes: piloto y instructor. De esta versión se construyeron solo dos modelos.

## 4. COMPONENTES ESTRUCTURALES

**E**L objetivo fundamental de este apartado será introducir los diferentes componentes estructurales que conforman Lockheed SR-71 y que serán modelados posteriormente en CATIA V5. Para ello se comenzará señalando las dimensiones elementales de la aeronave (altura, envergadura, etc). A continuación, se justificarán las secciones en los que se ha dividido para facilitar su posterior modelado. Finalmente se hará alusión a algunas características generales de la estructura y sistemas.

### 4.1. Dimensiones

Las medidas elementales de la aeronave de estudio, Lockheed SR-71, son 32.7 m de longitud, 5.6m de altura, 16.9m de envergadura y 170 m<sup>2</sup> de superficie alar.

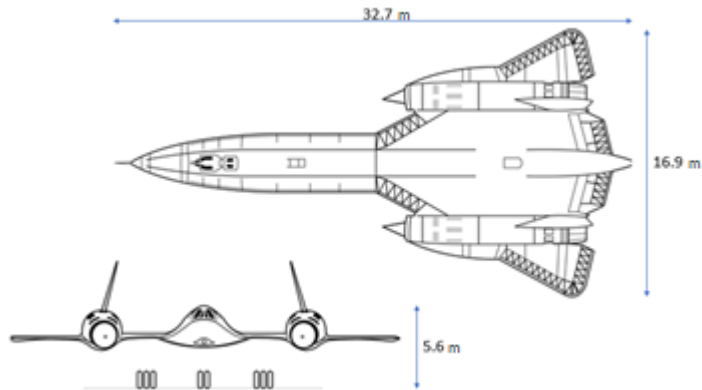


Figura 13: Dimensiones Lockheed SR-71 en metros

Otro aspecto importante para destacar en aeronautica es el peso. La aeronave contaba con un MTOW (Maximun Take Off Weight) de 78 toneladas, EW (Empty Weight) de 30,6 toneladas

En cuanto a superficies estabilizadoras, el "Blackbird" tenía dos estabilizadores verticales, cada uno de 6.9 m, inclinados hacia dentro un ángulo de 15°. Las superdicias de control de dirección, "rudder" estaban instalados en ellos.

En cuanto a los elevadores, tal como se puede ver en la Figura 14, el Lockheed SR-71 contaba con 4, 2 en las alas interiores y 2 en las exteriores. [6]

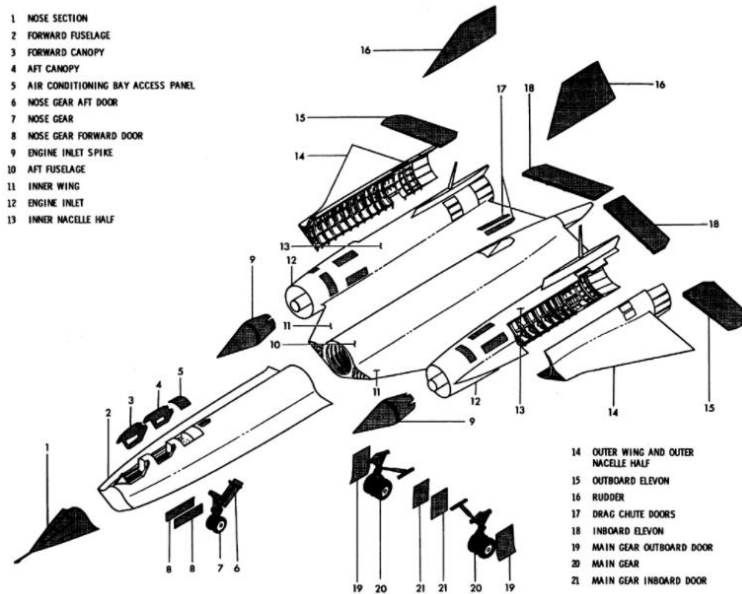


Figura 14: Componentes Lockheed SR-71



## 4.2. Secciones

### 4.2.1. Morro

El morro de la aeronave consistía una estructura tipo semi monocasco: cuadernas unidas a través de larguerillos cubiertas por una membrana estructural denominada piel. Era desmontable y, albergaba en su interior sistemas de navegación aérea como el tubo de Pitot, medidas del ángulo de ataque, de resbalamiento y dirección, antenas RWR y VOR.

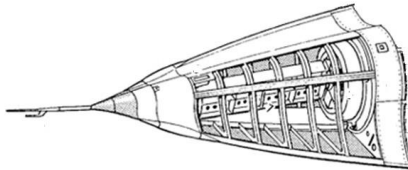


Figura 15: Morro del Lockheed SR-71

## 4.2.2. Parte delantera del fuselaje

La parte delantera del fuselaje, la cual tenía, al igual que el morro, una estructura semimonocasco, incorporaba en sus cuerdas unas aristas que dan a la aeronave su forma tan característica. Estas aristas estaban fabricadas de material compuesto y fueron inicialmente incorporadas por las propiedades reflectivas al radar de este material, aunque adicionalmente también suponían una mejora en la actuación en términos aerodinámicos y en estabilidad de la aeronave.

En la parte delantera del fuselaje se incorporaba la cabina para la tripulación, el piloto y RSO (“Reconnaissance Systems Officer’s”).

En cuanto a los sistemas que se encuentran en esta sección del fuselaje y como se mencionó anteriormente, Lockheed SR-71 fue pionero en volar bajo condiciones extremas en términos de altitud y velocidad que implica que se alcancen temperaturas muy altas en la superficie de la aeronave. Debido a que se trata de una aeronave tripulada especializada en misiones de largo alcance, la aeronave debía de estar provista de equipos que permitiesen una temperatura ambiente habitable en cabina y sistemas de emergencia en caso de necesitarlos.

Otro sistema que albergaba la parte delantera del fuselaje es el tren de aterrizaje delantero.

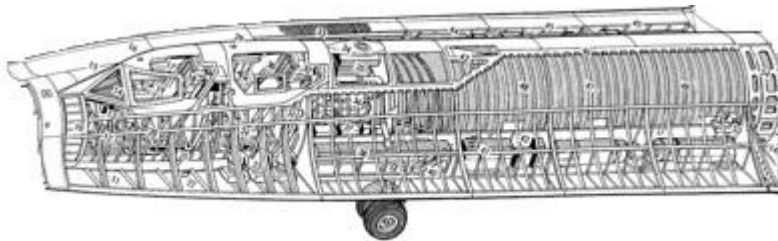


Figura 16: Parte delantera del fuselaje del Lockheed SR-71

### 4.2.3. Parte trasera del fuselaje

A la parte trasera del fuselaje de la aeronave estaban sujetas las alas interiores y exteriores, las góndolas y las diferentes superficies de control de vuelo, los elevadores, estando estos divididos a su vez en dos: elevadores interiores y elevadores exteriores. En cuanto a timón de dirección, estos se encuentran instalados en los estabilizadores verticales.

En cuanto a la estructura alar, se trata de una configuración constituida de varias costillas sujetas entre sí gracias a largueros. Estos largueros se extienden más allá del ala hasta las góndolas de los motores a cada lado de la aeronave.

El ala interior contiene el tren de aterrizaje principal que, junto con el tren delantero conforman un sistema de aterrizaje triciclo. Se trataba de un sistema eléctrico con actuadores hidráulicos.

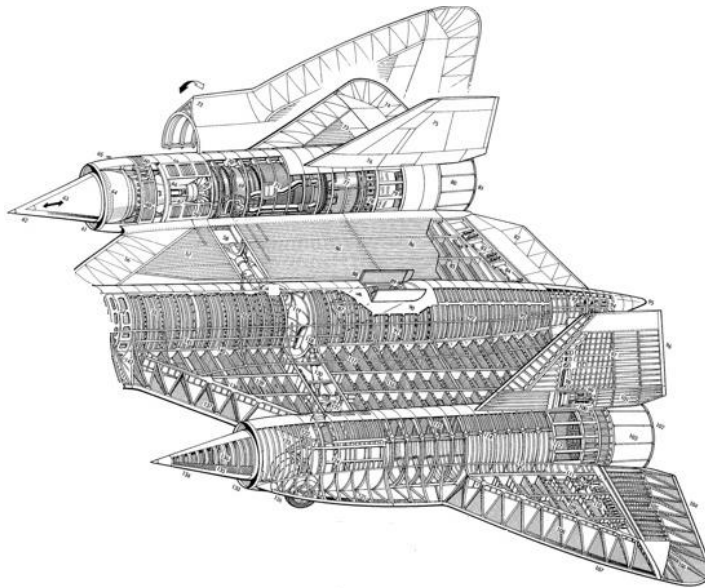


Figura 17: Parte trasera del fuselaje del Lockheed SR-71

Ambos, el la parte anterior y posterior del fuselaje, y el interior de las alas, contenían tanques de combustible. Debido a las altas temperaturas alcanzadas en la superficie, fue necesario el desarrollo de un nuevo combustible con gran estabilidad térmica. Este combustible se denominó JP-7.

#### 4.2.4. Motores

El Lockheed SR-71 contaba con dos motores Pratt & Whitney J58. Este modelo es un turboreactor axial fue considerado una de las grandes innovaciones de la época, capaz de producir un empuje de 145 kN.

Su rango de mayor eficiencia lo alcanzaba a velocidades cercanas a Mach 3.2, es decir, a la velocidad de crucero de la aeronave.

El aire era inicialmente comprimido en la espina de la tobera de entrada y conducido hacia el interior del motor. Las ondas de choque generadas disminuían la velocidad del aire antes de su entrada en la primera etapa de compresor. Tras 5 etapas de compresor, el aire pasaba a la cámara de combustión, donde, como su nombre indica, se produce la reacción de combustión. Para los cual el aire es mezclado previamente con combustible.

A continuación, el aire pasa a las etapas de turbina, unidas solidariamente a través de un eje con las etapas de compresor. Finalmente, el aire pasa al post combustor.



Figura 18: Pratt & Whitney J58

# 5. MODELADO EN CATIA V5 DEL LOCKHEED SR-71

---

**E**L objetivo fundamental de este apartado será, en primer lugar, detallar la documentación utilizada para el modelado de la aeronave Lockheed SR-71 y, en segundo lugar, proceder a realizar dicho modelado paso a paso.

## 5.1. Documentación utilizada para el modelado

Para el modelado del Lockheed SR-71 se ha utilizado fundamentalmente los siguientes planos [6]:

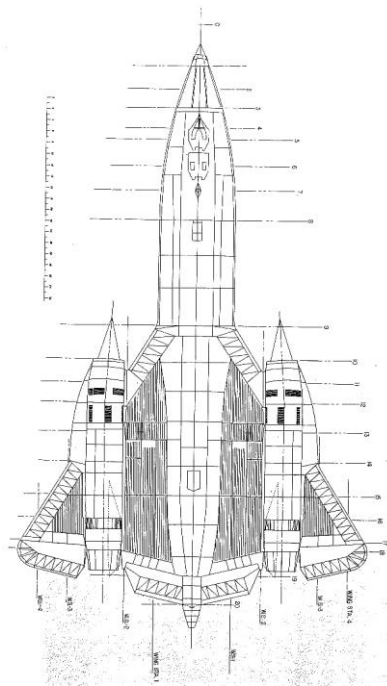


Figura 19: Plano Lockheed SR-71, vista desde arriba

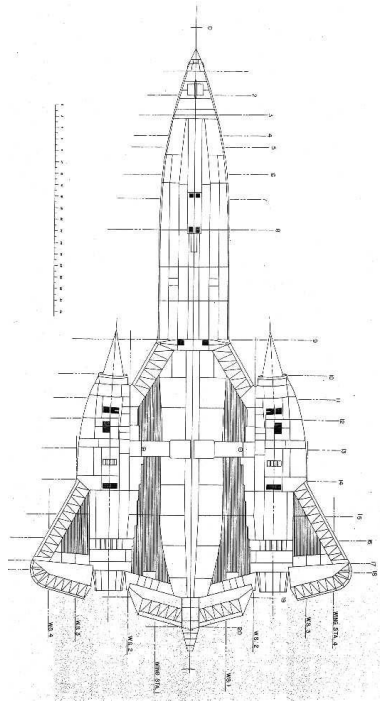


Figura 20: Plano Lockheed SR-71, vista desde abajo

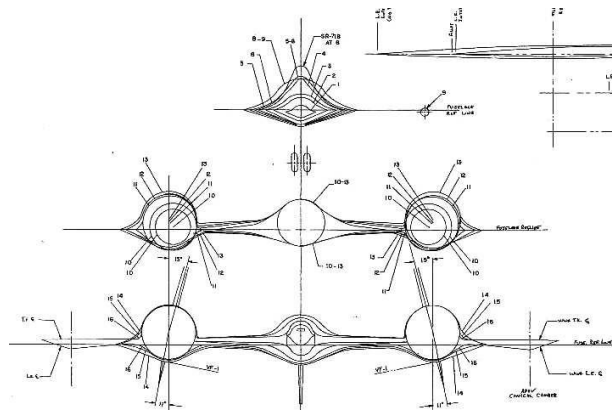


Figura 21: Plano Lockheed SR-71, secciones transversales

Los planos que aparecen en Figura 19, Figura 20 y Figura 21 forman parte del mismo set de planos. La Figura 19 es la vista del modelo Lockheed SR-71 desde arriba. En esta figura podemos apreciar 20 cortes a lo largo del plano. Las secciones transversales de estos cortes aparecen en la Figura 21. En cuanto a la Figura 20, se trata de la vista desde abajo del modelo de la aeronave. En ella, aparecen los mismos cortes que aparecen en la Figura 19.

Por otro lado, para el modelado de la estructura interna de la aeronave se ha utilizado el plano de Michael Badrocke

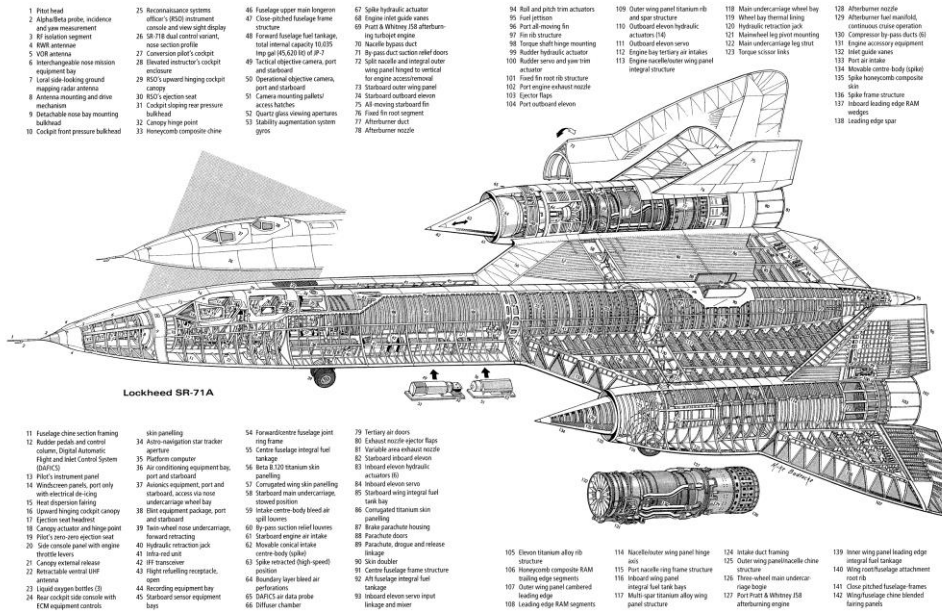


Figura 22: Plano estructural del Lockheed SR-71 por Michael Badrocke

## 5.2. Introducción al modelado

Para modelar una aeronave tan compleja como el Lockheed SR-71, se ha diseñado sus diferentes componentes por separado y posteriormente se han ensamblado y renderizado, dando como resultado imágenes como las de Figura 23

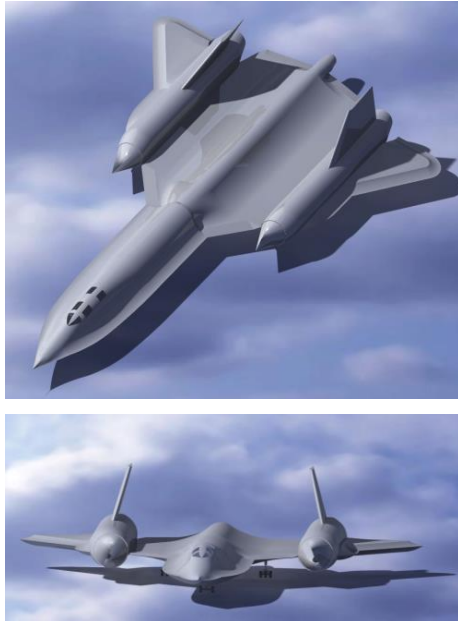


Figura 23: Modelo en CATIA V5 del Lockheed SR-71

Los resultados obtenidos pueden compararse con las imágenes del modelo real, el cual aparece en la Figura 24. [4]





Figura 24: Imágenes reales Lockheed SR-71

Además, para hacer el modelo lo más similar posible a la aeronave real, a cada uno de sus componentes se les ha aplicado un cierto material. Por ejemplo, en el caso del fuselaje y las alas, tanto interiores como exteriores, se ha aplicado Titanio, mientras que en las ventanas se aplicado vidrio. Es precisamente el hecho de que se haya aplicado titanio al fuselaje, alas, góndolas y estabilizadores verticales que la aeronave presente un acabado plateado en lugar de su característico color negro que da lugar a su nombre, "Blackbird". El objetivo de este apartado es detallar los pasos seguidos para el diseño de cada uno de sus componentes

### 5.3. Explosionado de componentes

Como se ha introducido anteriormente, para facilitar el modelado se han separado sus componentes y se han diseñado por separado. Esta división puede verse en Figura 25.

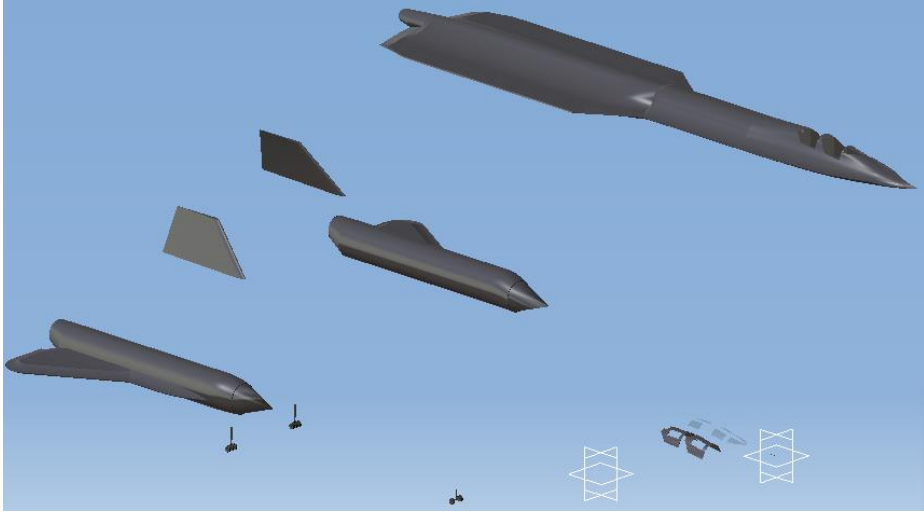


Figura 25: Explosionado de componentes del modelo en CATIA V5 del SR-71

Por tanto, los distintos componentes son:

- Fuselaje, alas interiores y elevadores.
- Motores y alas exteriores.
- Cabina
- Ventanas
- Tren de aterrizaje configuración triciclo
- Estabilizadores verticales
- Antena

## 5.4. Diseño de fuselaje, alas interiores y elevadores.

En este apartado, como su propio nombre indica se detallarán los pasos seguidos en el diseño del fuselaje, alas interiores y elevadores de la aeronave Lockheed SR-71, cuyo resultado puede verse en la Figura 26.

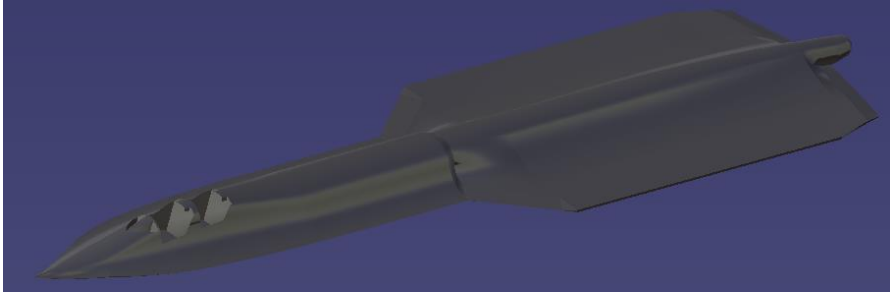


Figura 26: Modelo en CATIA del fuselaje, alas interiores y elevadores del SR-71

Debido a la complejidad del diseño, se utilizó el modelo “Generative Shape Design”, para posteriormente convertirlo en sólido y generar el espacio para la cabina del piloto y RCO usando operaciones Booleanas. A continuación, se detallan los pasos seguidos.

Como se ha mencionado anteriormente, y debido a la complejidad de la aeronave, se ha utilizado el módulo “Generative Shape Design”, módulo mucho muy versátil y que permite la creación de superficies no cerradas a partir de diferentes comandos como “Sweep”, “Multi-Section” o “Fill”.

Tal como se ve en la Figura 19 y Figura 21, el plano utilizado para el diseño contiene 20 cortes transversales. A través de un programa de diseño 2D se han medido las distancias de estos cortes al morro de la aeronave y, utilizando como medida de referencia la longitud total de la aeronave, se han escalado dichas distancias para obtener las medidas reales de la aeronave. Los resultados obtenidos se encuentran en la Tabla 1.

Corte	Distancia al morro
0	0.00
1	1.24
2	2.42
3	3.53
4	4.74
5	5.39
6	6.89
7	8.28
8	9.99
9	15.82
10	18.49
11	19.77
12	20.88
13	22.52
14	24.18
15	26.05
16	27.41
17	28.69
18	29.17
19	30.55
20	32.10

Tabla 1: Distancia entre cortes señalados en la Figura 19

Creamos 20 planos verticales utilizando la herramienta “offset from plane” usando de referencia el origen de coordenadas y las distancias señaladas en la Tabla 1. A continuación, y utilizando el plano mostrado en la Figura 21, se dibujan las secciones transversales de la aeronave, tal como puede verse en la Figura 27.

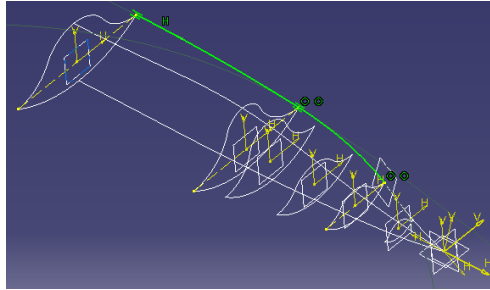


Figura 27: Secciones transversales del morro

A continuación, una vez creadas las secciones transversales estas se unirán a través de guías. Las guías y las secciones transversales serán las entradas necesarias para que el comando “Multi-section” funcione correctamente.

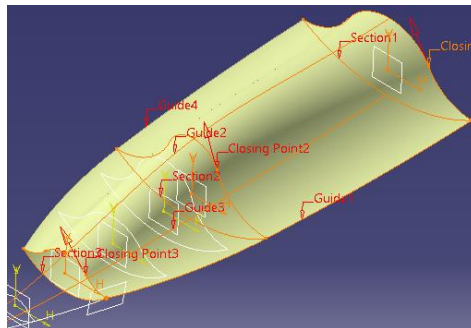


Figura 28: Morro del Lockheed SR-71 utilizando “Multi-section”

En cuanto a la punta del morro, se ha utilizado el comando “Fill” para conseguir el acabado puntiagudo, tal como se muestra en la Figura 29. Para que este comando funcione correctamente es imprescindible que se le proporcione un contorno cerrado. Para ello se ha hecho uso de la sección transversal correspondiente al corte 1 (Tabla 1) y las guías que unen esta sección con el origen de coordenadas.

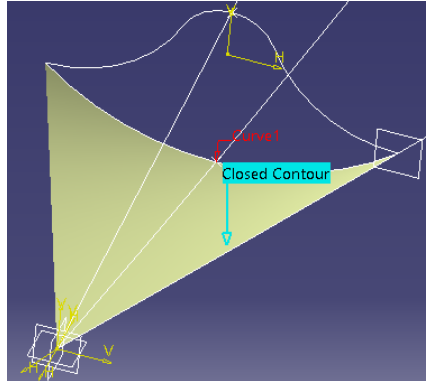


Figura 29: Comando “Fill” en la punta del morro

A continuación, se procede diseñando la parte final del fuselaje. Para ello, como puede verse en la Figura 19, se ha considerado que las secciones que resultan de los cortes 8 y 9 (Tabla 1) son iguales. Para la generación de una superficie recta se sección constante, el comando más adecuado resulta ser “Extrude”.

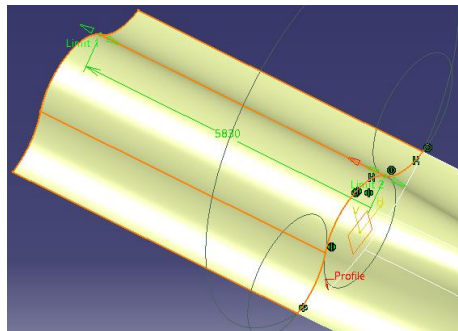


Figura 30: Comando “extrude” en la parte final del fuselaje

La siguiente parte en ser modelada es el ala interna y los elevadores del Lockheed SR-71. Se van a modelar conjuntamente debido a que están unidas y a que en este proyecto no se pretende el estudio del movimiento relativo entre ellas.

Para modelar estos dos elementos se ha procedido de manera similar al morro, utilizando el comando “Multi-section” utilizando variables de entrada las secciones transversales que aparecen en el plano de la Figura 21, y guías que describen la silueta de la aeronave, basadas en los planos sde la Figura 19. Los resultados pueden

verse en Figura 31.

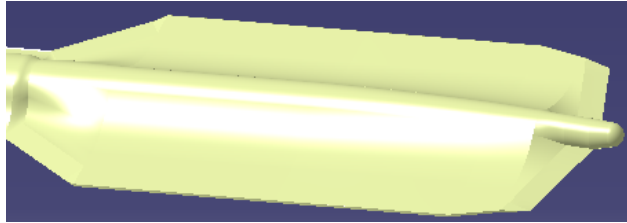


Figura 31: Ala interna y elevadores del Lockheed SR-71

Tal como se ha mencionado al principio de este apartado, el morro, las alas interiores y elevadores se han modelado como un solo conjunto, siendo este conjunto una superficie cerrada. Al ser una superficie cerrada, para solidificarla únicamente será necesario utilizar el comando “Closure Surface”. Siendo el resultado el mostrado en la Figura 32.

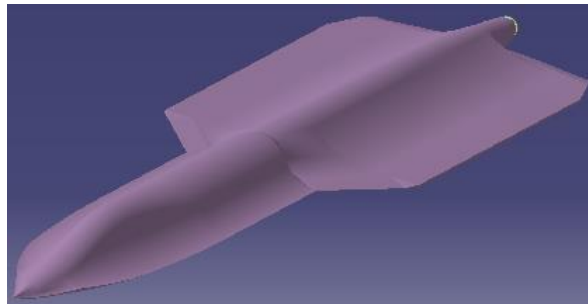


Figura 32: “Closure Surface” del conjunto morro, alas interiores y elevadores del Lockheed SR-71

Una vez se ha modelado la superficie exterior del fuselaje sin considerar las cabinas del piloto y RSO se ha hecho uso de variable Booleanas para considerarlas ya que éstas permiten unir, eliminar o intersectar dos “bodies”. Una vez modelado las cabinas, se hará nuevamente uso de las variables Booleanas para proporcionar hueco para las ventanas.

Antes de comenzar con el diseño hay que tener en cuenta es que el modelo del fuselaje es un sólido y no una superficie, por lo que para poder utilizar variables booleanas sobre él será necesario que los “bodies” sobre los que se va a operar sean también sólidos. Para crear sólidos en el módulo “Generative Shape Design” se

utilizará un set de herramientas llamado “Volumes”, del que se hará uso en este apartado.

En primer lugar, para modelar las cabinas se creará un nuevo elemento, denominado “Body.2” y se señalará como elemento actual de trabajo con el comando “Define in Work object”. A continuación, se añadirá un “sketch” con el diseño exterior de las cabinas que puede verse en el plano de la Figura 19 y con el comando “Extrude” se creará un sólido que se corresponde con la parte de las cabinas que se quiere eliminar. Una vez obtenido este sólido se selecciona el comando “Remove” dentro del set de herramientas “Volumes” y se elimina del “PartBody” el “Body.2”. Esto generará un nuevo sólido, llamado “Remove.2”. Para poder visualizar con claridad los resultados de la operación, se oculta el “PartBody” con el comando “Hide”, obteniéndose los resultados de Figura 33.

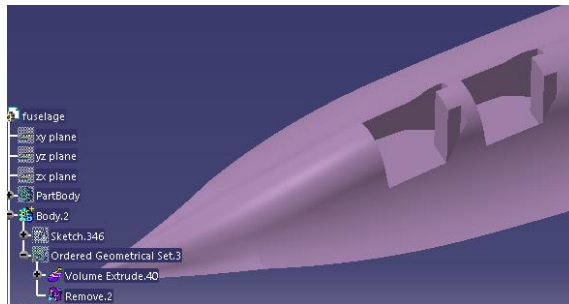


Figura 33: Variables Booleanas para la creación de la superficie exterior de la cabina

Finalmente, para completar la cabina, se insertará un nuevo “Body”, “Body.4”, y se creará un sólido con el comando “Extrude” que represente el interior de la cabina. Se procede de igual manera que en el modelado de la superficie exterior de la cabina: se utiliza el comando “Remove”, en esta ocasión se elimina el “Body.4” del “Body.2”, creandose el objeto “Remove.3”. Seguidamente se oculta el “Body.2” con el comando “Hide” para poder visualizar el resultado, el cual se muestra en la Figura 34.



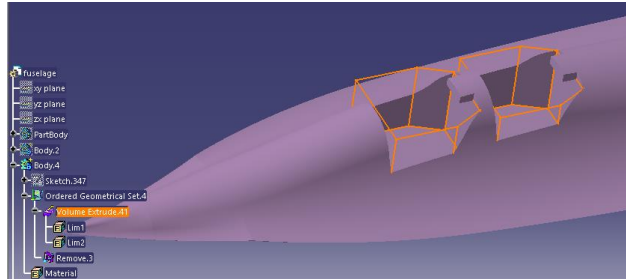


Figura 34: Variables Booleanas para la creación del interior de la cabina

Seguidamente, se diseñan las ventanas de la aeronave. Para ello, vuelve a crearse un nuevo "body", en este caso "Body.5". En este nuevo elemento se realiza un "Sketch" con las dimensiones de la ventana, y se procede de forma análoga a como se hizo con las cabinas. Se crea un sólido con el comando "extrude" aplicado al nuevo "Sketch" y se vuelve a operar con el comando "Remove". En este caso se extrae el "Body.5" del "Body.4", obteniendo el elemento "Remove.4". A continuación, se oculta el "Body.4".

Finalmente, para dar un mayor realismo al diseño, CATIA V5 permite aplicar material sobre un "Body". En este caso se aplicará Titanio sobre el "Body.5".

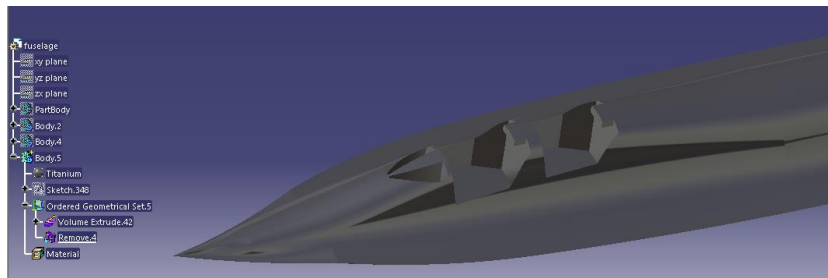


Figura 35: Diseño final del fuselaje del Lockheed SR-71

## 5.5. Diseño de cabinas

En este apartado del proyecto se procederá a describir los pasos seguidos para el diseño de las cabinas para lo cual se ha utilizado el módulo "Generative Shape Design".

Para diseñar tanto las ventanas como las cabinas se ha hecho uso de una de las superficies creadas durante el modelado del fuselaje, en concreto, se ha hecho uso de la sección del morro donde se sitúan las cabinas y ventanas denominada “Multi-sections Surface.1” mostrada en la Figura 36.

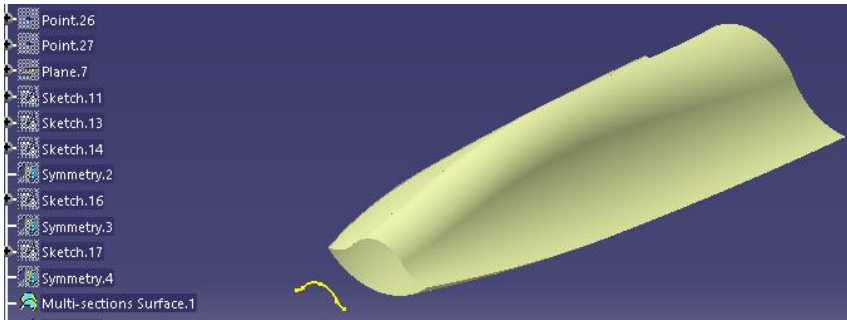


Figura 36: Elemento de superficie utilizado para el diseño de ventanas y cabinas.

A continuación, se realiza un “Sketch” con la forma de las cabinas y se le aplica un “Extrude”, el resultado de estas operaciones queda reflejado en la Figura 37. Con el comando “Split”, se definirá las cabinas como la superficie del morro del fuselaje que queda en el interior de las superficies generadas por el “Extrude”

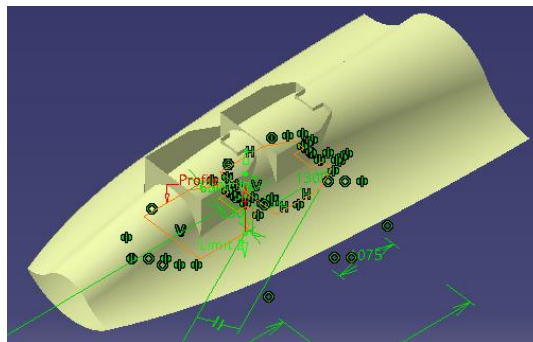


Figura 37: Diseño de las cabinas usando usando la superficie del morro previamente diseñada y el comando “Extrude”

A continuación, estas superficies se transforman en sólidas utilizando el comando “Thick Surface”.

Una vez se tiene el sólido que constituirá la base de las cabinas, se procede a realizar las operaciones extracción de material en la parte central de las cabinas donde se situarán las ventanas. Para ello se inserta el “Body.2”, se añade un “Sketch” con la forma de las ventanas y se solidifica usando el comando “Extrude” del set de herramientas “Volumes”. A continuación, se realiza una operación de “Remove”, y se extrae el “Body.2” del “PartBody”, creándose el elemento “Remove.1”. Los resultados pueden verse en

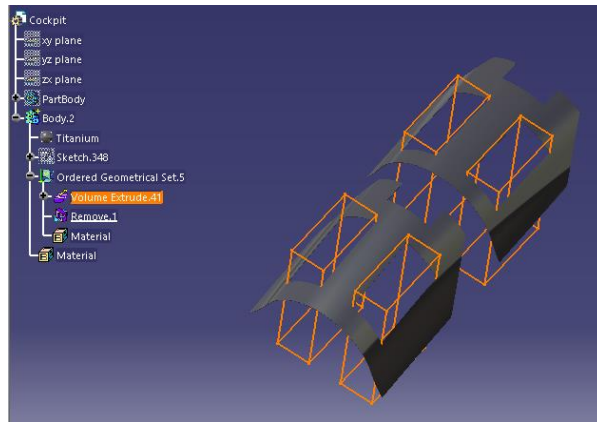


Figura 38: Diseño final de cabinas

Por último, se aplica titanio sobre el “Body.2”.

## 5.6. Diseño de ventanas

En este apartado del proyecto se procederá a describir los pasos seguidos para el diseño de las ventanas para lo cual se ha utilizado el módulo “Generative Shape Design”.

Tal como se comentado anteriormente, en el modelado de las ventanas se ha utilizado una de las superficies creadas durante el diseño del fuselaje, en concreto se ha utilizado “Multi-sections Surface.1”, la cual puede verse en la Figura 36.

A continuación, se realiza un “Sketch” con las dimensiones de las ventanas según el plano de la Figura 19 y se le aplica “Extrude”. Con el comando “Split”, se definirá las

ventanas como la superficie del morro del fuselaje que queda en el interior de las superficies generadas por el "Extrude". Una vez definida las superficies de las ventanas, se convierten en sólido con el comando "Thick Surface" y se le aplica como material vidrio. El resultado puede verse en



Figura 39: Diseño final de ventanas

## 5.7. Diseño de motores y alas exteriores

En este apartado, como su propio nombre indica, se detallarán los pasos seguidos en el diseño de los motores y alas exteriores de la aeronave Lockheed SR-71. EL resultado final puede verse en la Figura 40.

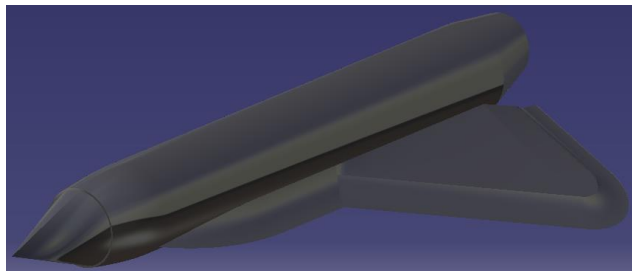


Figura 40: Motor y ala externa de la aeronave Lockheed SR-71

Primero, se diseña el motor añadiendo "Sketches" que representan las secciones transversales que se muestran en el plano de la Figura 21. A continuación, se unen a

través de guías y se les aplica el comando “Multi-Section”.

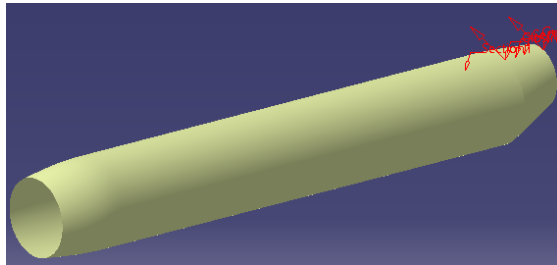


Figura 41: Superficie exterior del motor derecho

A continuación, se modela el ala externa que va unida al motor. A la hora de modelarla, hay que considerar que posteriormente el conjunto completo va a solidificarse utilizando el comando “Closure Surface”, para lo cual tienen que ambos elementos, motor y ala externa, debene estar perfectamente unidos y conectados por dentro. Por esta razón, el primer paso para modelar el ala interna será crear un “Sketch” con la forma de la intersección del ala interna y el motor, para luego aplicar un “Extrude” a dicho “Sketch” y eliminar la superficie de intersección aplicando un “Split” tomando como superficie a cortar “Multi-sections Surface.1” y como superficie de corte la superficie extruída anteriormente generada. Los resultados de esta operación pueden verse en la Figura 42.

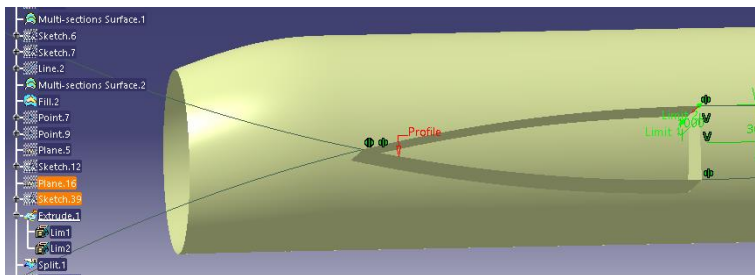


Figura 42: Intersección entre el ala interna y el motor

Esta intersección, junto con las referencias tomadas del plano de la Figura 19, servirá como guía para modelar el ala externa a través del comando “Fill” como puede verse en la Figura 43.

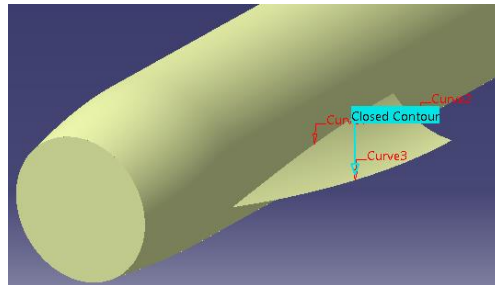


Figura 43: Sección delantera del ala interna.

La parte posterior del ala externa se realiza de forma análoga al a la delantera. En cuando al borde de ataque, para modelarlo se ha utilizado el comando “Extrude” en la parte lineal del ala, como puede verse en la Figura 44.

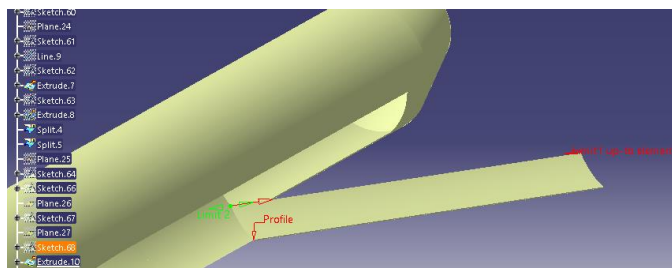


Figura 44: Borde de ataque lineal del ala externa

Por otro lado, para el borde de ataque redondeado del ala externa se ha usado el comando “Sweep”, que realiza una función similar al comando “Extrude” usado para la parte lineal del ala exterior, pero a diferencia de éste, permite usar guías no rectas. El resultado puede verse en la Figura 45.

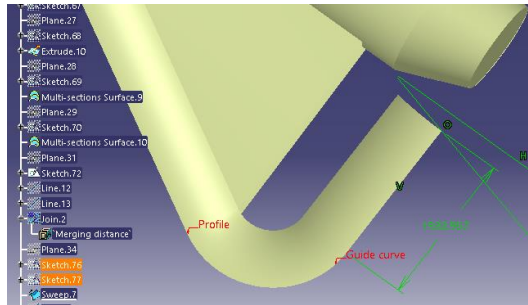


Figura 45: Borde de ataque redondeado del ala externa

Finalmente, para completar el diseño del motor se le añade el pincho a la entrada de aire de éste. Para ello, se ha usado el comando “Revolve”. El resultado puede verse en la Figura 46.

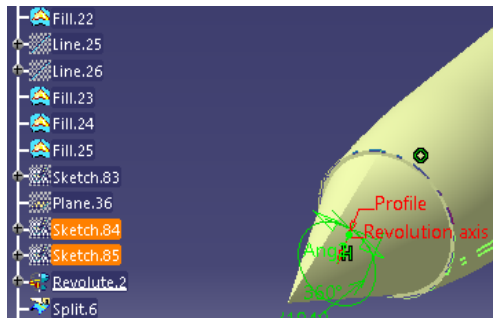


Figura 46: Pincho en la entrada de aire del motor

Para terminar con el modelado de esta parte, se utiliza el comando “Join” para unir todas las superficies que forman el motor, se le aplica “Closure Surface” para solidificarlo y se le aplica titanio como material.

## 5.8. Diseño de estabilizadores verticales

En este apartado, como su propio nombre indica, se detallarán los pasos seguidos en el diseño de los estabilizadores verticales (VTP) de la aeronave Lockheed SR-71. Hay que destacar que en estos estabilizadores se encuentran además superficies de control de dirección, más conocidos como “rudders”. En este caso, se modelarán los estabilizadores verticales y las superficies de control como un solo elemento. El resultado puede verse en la Figura 47.

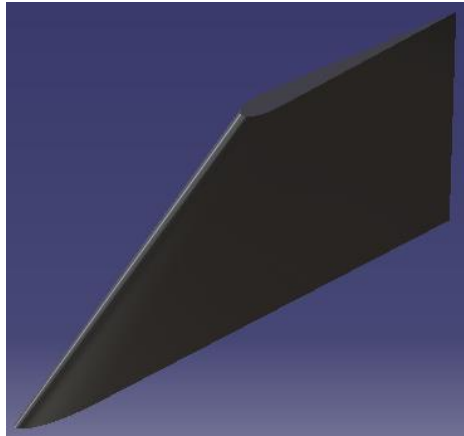


Figura 47: Estabilizador vertical del Lockheed SR-71

Antes de proceder al diseño de los estabilizadores verticales, se ha investigado el perfil aerodinámico de estos. Sin embargo, y debido a la falta de documentación sobre el perfil aerodinámico del Lockheed SR-71, se ha supuesto que se trata un perfil NACA 0014, debido a que se trata de un perfil simétrico, característica fundamental para cualquier perfil perteneciente a un estabilizador vertical, y es comumente usado en aeronaves de características similares.

Una vez escogido el perfil, para poder diseñarlo correctamente se hace uso de una base de datos de perfiles aerodinámicos [7]. Esta base de datos proporciona las coordenadas del perfil aerodinámico considerando que éste tiene una cuerda de 1 metro. Se escala las coordenadas obtenidas de esta base de datos para obtener dos perfiles, el perfil de la raíz y el de la punta.

Una vez se tienen las coordenadas de los dos perfiles de interés, se exporta a CATIA



estas coordenadas. Para llevar a cabo esta operación y otras similares, el programa cuenta con macros en Microsoft Excel que te permiten realizar dicha operación de forma rápida y sencilla. Para ello basta con ir a la carpeta donde se ha instalado CATIA y buscar un archivo Excel habilitado para macros llamado GSD\_PointSplineLoftFromExcel. Se introducen las coordenadas de uno de los perfiles y se ejecuta la macro "Main" con la opción "2. Spline". Se utiliza esta opción porque en lugar de únicamente exportar los puntos, los une utilizando una función "Spline" y teniendo en cuenta que se han exportado más de 100 puntos de coordenadas, el hecho de que se unan automáticamente permite ahorrar una gran cantidad de trabajo. Un aspecto importante para tener en cuenta para que se realice dicha exportación es que es necesario tener CATIA funcionando en paralelo con un archivo "Partdesign" abierto. El resultado de la exportación de uno de estos perfiles se muestra en la Figura 48.

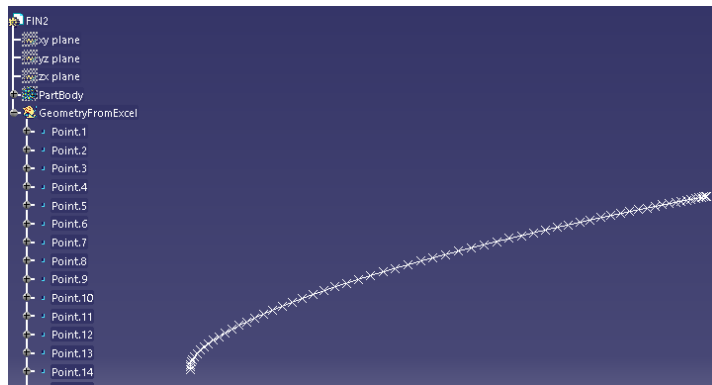


Figura 48: Perfil NACA0014 exportado de Excel a CATIA

Una vez los perfiles han sido exportados a CATIA correctamente, es necesario trasladarlos a la posición correcta, es decir, que el perfil de la raíz del VTP coincida con el final de la planta motora y el perfil de la punta se sitúe en un plano distanciado verticalmente del perfil raíz una longitud igual a la altura del VTP. También hay que tener en cuenta que, tal como puede verse en el plano de la Figura 21, el VTP forma un ángulo de  $15^\circ$  respecto a la vertical.

Tras la exportación de los puntos en el "PartDesign", se procede a cambiar de módulo de trabajo a "Generative Shape Design", módulo que se utilizó para el diseño del resto de los elementos modelados. A continuación, se procede a la

creación de dos planos horizontales en las posiciones correspondientes al perfil de la punta y la raíz.

Para trasladar el perfil de la raíz del VTP exportado desde Excel a la posición correcta, se inserta un "Sketch" situado en la posición que le corresponde a ese perfil. Desde las herramientas de la opción "Sketch" se utiliza "Project 3D Elements" para obtener la proyección de los puntos exportados en ese plano y "Translate" para situar el borde de salida del perfil al final de la planta motora.

Se procede de forma análoga con el perfil de la punta con el plano correspondiente a su posición.

Finalmente, se crea una superficie a partir de estos dos perfiles utilizando el comando "Multi-section Surface".

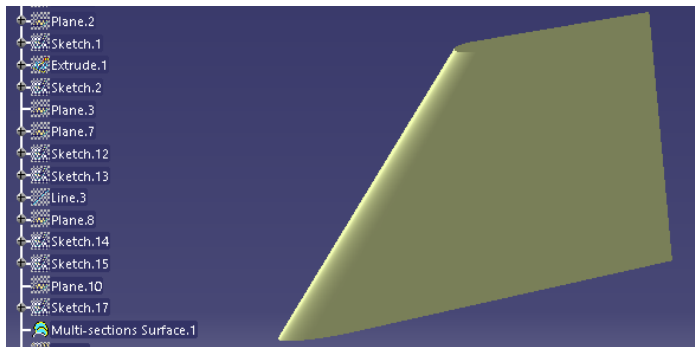


Figura 49: Superficie del estabilizador vertical derecho

Una vez se tiene la superficie lateral del VTP, es necesario comprobar que la base de éste encaja con la superficie cilíndrica del motor. Para ello se crea la superficie del motor con el comando "Extrude" y se corta la superficie lateral del VTP con ella usando el comando "Split", operación que puede verse en Figura 50.

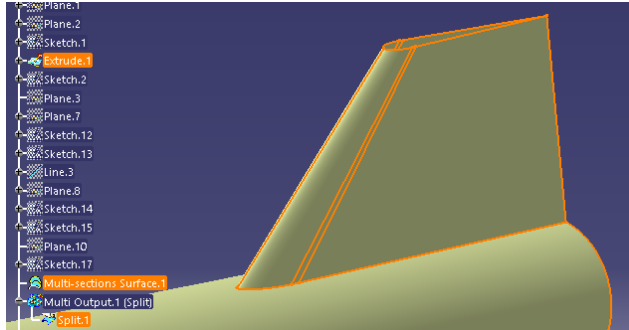


Figura 50: Operación Split para cortar la superficie lateral del VTP

A continuación, se realiza otra operación “Split”, esta vez para cortar la superficie lateral del motor usando la del VTP, quedando como resultado la intersección entre ambas superficies. El resultado de esta operación puede verse en la Figura 51.

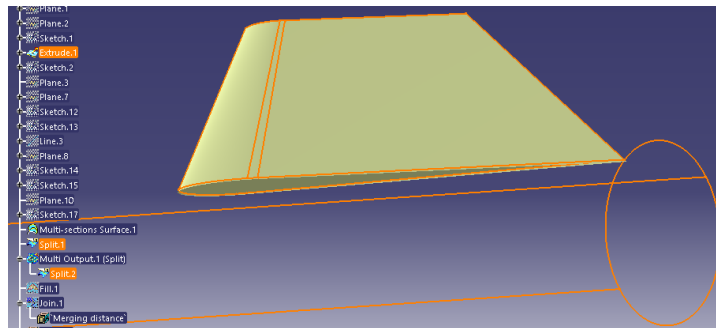


Figura 51: Superficie intersección del VTP y el motor

Seguidamente, se utiliza el comando “Fill” en la base superior del VTP para que la superficie quede completamente cerrada y se realiza un “Join” para que todas las superficies creadas formen parte de un solo conjunto. Este conjunto se solidifica usando el comando “Closure Surface” y se le aplica Titanio.

## 5.9. Diseño del tren de aterrizaje

En este apartado, como su propio nombre indica, se detallarán los pasos seguidos en el diseño del tren de aterrizaje de la aeronave Lockheed SR-71. El resultado puede verse en Figura 52.

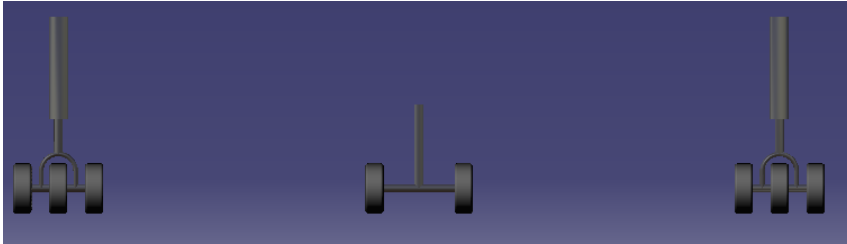


Figura 52: Diseño del tren de aterrizaje del Lockheed SR-71

Este elemento de la aeronave tiene la función de absorber el impacto del aterrizaje y posibilitar la rodadura en el despegue. Debido a las fuertes cargas de compresión a la que está expuesto este elemento se fabrica de acero, a pesar de la alta densidad de este material. Se trata de un elemento crítico que normalmente requiere un mantenimiento no predictivo: una vez se cumple su ciclo de vida útil, muy inferior al ciclo de vida real del material, se cambia.

En el caso del tren de aterrizaje del Lockheed SR-71, se trata de un tren retractil: el tren se recoge dentro del fuselaje de la aeronave una vez se ha completado la maniobra de despegue y no vuelve a desplegarse hasta que comienza la maniobra de aterrizaje. Esto permite disminuir la resistencia aerodinámica de la aeronave durante el vuelo.

Por otra parte, el tren de aterrizaje para la aeronave de estudio tiene una configuración triciclo: tiene dos montajes debajo del fuselaje y un montaje frontal en la parte delantera del morro. Esta configuración puede verse claramente en el plano de la Figura 22.

Para comenzar, se diseñará el tren de aterrizaje principal, más concretamente, el eje de unión con el fuselaje. Para ello se va a usar el comando "Revolute", cuyos parámetros de entrada son el eje de rotación y el perfil, ambos pueden verse en la Figura 53.



Figura 53: Eje de unión del tren principal con el fuselaje

A continuación, utilizando el comando “Sweep” cuyas variables de entrada son una guía y un perfil ovalado, se diseñará la unión del eje principal con el eje de revolución de la rueda (Figura 54).



Figura 54: Unión entre el eje principal y el eje de revolución

Una vez obtenido uno de los ejes que unirá el eje de rotación con el eje principal, se realiza una simetría, de dicho eje respecto a un plano vertical que pasa por el eje principal. Seguidamente, con el comando “Extrude” se construye el eje de rotación. Los resultados de estas operaciones pueden verse en la Figura 55.

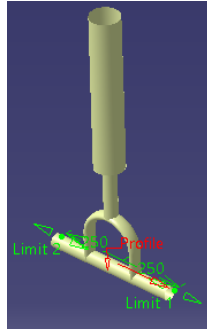


Figura 55: Ejes principales del tren de aterrizaje.

A continuación, para que todos los ejes encajen bien entre sí y el eje principal encaje con el fuselaje, se utiliza el comando "Split" repetidamente. Tras esto, se utiliza el comando "Fill" para cerrar el conjunto, una operación "Join" para unir todas las superficies creadas y se solidifica la superficie utilizando el comando "Closure Surface". Por último, se realiza una operación de simetría de la estructura creada respecto a un plano vertical que pasa por el eje longitudinal de la aeronave, obteniéndose así los dos montajes traseros del tren de aterrizaje.

Habiendo acabado el modelado de los montajes traseros, se comienza con el modelado del montaje del morro. La estructura de éste es mucho más simple, ya que únicamente se constituye de un eje principal que une el tren al fuselaje y un eje de rotación. Tal como se hizo anteriormente, se utiliza el comando "Split" para que encaje la unión entre ejes y entre el eje principal y el fuselaje, como puede verse en la Figura 56. A continuación, se cierra la superficie utilizando el comando "Fill", se realiza una unión de todas las superficies creadas con el comando "Join" y se solidifica usando "Closure Surface".

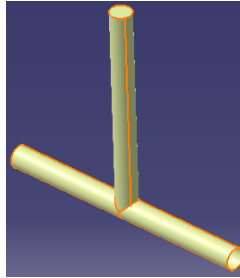


Figura 56: Ejes del montaje del morro del tren de aterrizaje

Una vez se tiene la estructura completa de ejes del tren de aterrizaje, la cual ha sido modelada completamente dentro del “PartBody”, se le aplica material. En este caso, se le aplica acero, que como se mencionó anteriormente, se trata del material más comúnmente utilizado en las estructuras de este tipo.

A continuación, se inserta “Body.2”, bajo el cual se diseñarán las ruedas. Para diseñarlas, se utilizará el comando “Revolve”, tal y como se muestra en la Figura 57.

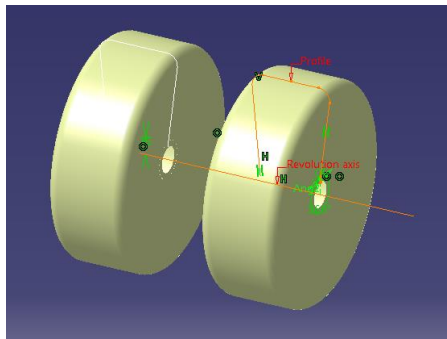


Figura 57: Diseño de las ruedas del tren de aterrizaje

Una vez diseñadas todas las ruedas se le aplica un comando “Thick Surface”, que permite solidificar las superficies dándoles un cierto espesor, en este caso se ha considerado un espesor de 0.5 cm. Finalmente, se le aplica material. En este caso, el material de la librería de CATIA V5 más parecido al real, es el caucho, “Rubber”.

## 5.10. Resultado final

Finalmente, tras haber explicado detalladamente como se ha modelado cada uno de los elementos, se presenta la estructura completa ensamblada y renderizada en diferentes escenarios.



Figura 58: Recreación del Lockheed SR-71 en vuelo





Figura 59: Recreación del Lockheed SR-71 en h ngar

# 6. ANÁLISIS DE LA ESTRUCTURA INTERNA DE LA AERONAVE

---

La aeronave de estudio, Lockheed SR-71, combina dos tipos de estructura frecuentemente utilizada en aeronáutica, monocasco y semimonocasco. A lo largo de este capítulo se va a explicar brevemente las características básicas de estos dos tipos de estructura para poder entender mejor como se distribuyen las cargas en la aeronave de estudio y se modelará, usando nuevamente CATIA V5, la estructura interna del fuselaje. [5]

## 6.1. Estructura monocasco

La estructura tipo monocasco, como su nombre indica, se trata de una simple cáscara. La tensión que se aplica en ella es soportada por una fina membrana llamada piel. Este tipo de estructura no ofrece resistencia a compresión o cortadura.

## 6.2. Estructura semi-monocasco

Tal como se introdujo anteriormente, una estructura monocasco pura se compone únicamente de piel no ofreciendo rigidez a esfuerzos de compresión o cortadura cuando la estructura del fuselaje no es completamente esférica. Para hacer frente a dichos esfuerzos es necesario añadir elementos estructurales como cuadernas, largueros y larguerillos. [8]

Los largueros son elementos estructurales longitudinales que soportan sobre todo los momentos flectores que se traducen en esfuerzos de axiales; mientras que los larguerillos, que también se tratan de elementos longitudinales, estabilizan la piel y soportan los momentos flectores. Por otro lado, las cuadernas, elementos transversales que se colocan paralelas entre sí, mantienen la forma del fuselaje y previene la inestabilidad de la piel, reduciendo la longitud efectiva de los larguerillos. Por último, la piel, elemento común con las estructuras monocasco puras, soporta los esfuerzos cortantes resultado de los momentos torsores.

Las estructuras semi-monocasco pueden fallar de tres formas: por pandeo local de la piel, por pandeo del panel y por inestabilidad general.

En la inestabilidad por pandeo de la piel se producen debido al espesor tan fino de ésta, que hace que la piel entre en inestabilidad cuando se somete a cargas relativamente bajas. Si se quiere evitar, se debería aumentar el espesor o aumentar el número de larguerillos, lo que se traduce en un diseño ineficiente. No obstante, este tipo de inestabilidad no supone un gran problema porque los larguerillos pueden aguantar cargas a compresión y la piel transmite las cargas por la acción de esfuerzos diagonales a otros elementos estructurales, con lo que las cargas quedan redistribuidas de forma eficiente.

Por otro lado, otra forma de fallo en la estructura tipo semi-monocasco es la inestabilidad por pandeo del panel. El panel, en este tipo de estructura, es el conjunto de piel y larguerillos. Si las cuadernas de la estructura son lo suficientemente rígidas, los paneles fallarán a compresión.

Por último, la inestabilidad general se produce cuando la inestabilidad se extiende más allá de dos o más cuadernas. Esto se produce cuando la rigidez de las cuadernas no es suficiente como para evitar el desplazamiento de los larguerillos.

### 6.3. Estructura interna del fuselaje del Lockheed SR-71

Una vez introducidos los dos tipos de estructuras presentes en el Lockheed SR-71, se procederá a explicar los pasos seguidos para el modelado de la estructura interna del fuselaje cuyo resultado final puede verse en la Figura 60

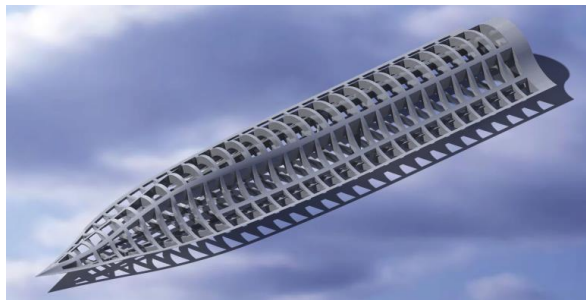


Figura 60: Estructura interna del Lockheed SR-71

Cabe destacar que en esta parte de la aeronave encontramos el segundo tipo de estructura, estructura semi-monocasco, ya que como puede verse en el plano de la Figura 22, cuenta con cuernas y largueros.

Partiendo del resultado del apartado 495.4, se realiza un "Split" de la superficie completa que aparece en la Figura 32 con el objetivo de separar el fuselaje de las alas interiores. Una vez se tiene el fuselaje separado del resto de la estructura y solidificado, se procede a realizar el vaciado del sólido utilizando el comando "Cell Volume".

A continuación, se inserta un "Body", y dentro de éste se inserta un "Sketch" con la proyección en planta de la estructura interna, la cual puede verse en la Figura 61.

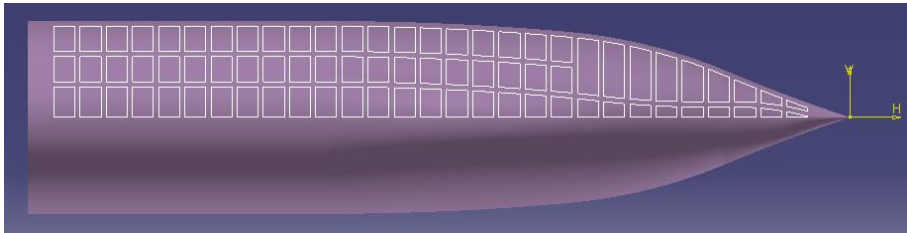


Figura 61: "Sketch" de la estructura interna derecha del fuselaje

Una vez obtenido dicho "sketch", se le aplica un "Volume extrude" y haciendo uso nuevamente de las operaciones booleanas, se realiza un "Remove Volume" extrayendo el volumen que se acaba de crear de la "Closure Surface" de la Figura 32. Finalmente, aplicamos titanio en la estructura y obteniendo como resultado la Figura 62

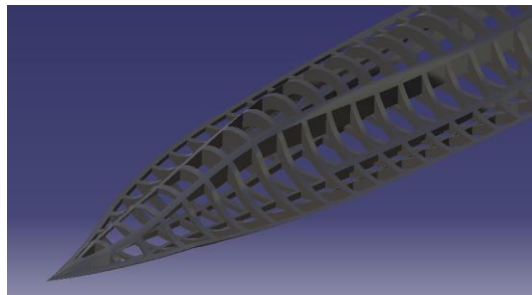


Figura 62: Estructura interna del morro del Lockheed SR-71

## 7. LÍNEAS FUTURAS

---

El objetivo fundamental de este proyecto era el modelado de la superficie exterior y, a partir de ésta, de la estructura interna de la aeronave Lockheed SR-71. Una vez completado el modelado, se ha hecho un análisis cualitativo identificándose los distintos tipos de estructuras que podemos encontrar en el fuselaje.

Una vez alcanzados los objetivos, se concluye este proyecto, destacando las líneas futuras a seguir en el caso de querer ampliar los resultados obtenidos.

En primer lugar, una vez modelado todos los elementos de la aeronave y habiéndose utilizado los comandos pertinentes para solidificarlos, nuevamente utilizando operaciones booleanas se podría completar el modelado de la estructura interna de alas, motores y estabilizadores verticales.

Además del análisis estructural llevado a cabo, se podría haber realizado un análisis aerodinámico. Este análisis partiría de conocer la altura de vuelo, velocidad, peso y suponer un perfil aerodinámico tipo diamante normalmente utilizado en aeronaves que alcanzan velocidades supersónicas [9] y permitiría calcular las fuerzas aerodinámicas a las que está sometido la aeronave.

Finalmente, y tras haber realizado el análisis aerodinámico, se podría haber completado el análisis estructural del modelado con simulaciones utilizando un programa de elementos finitos. Aunque CATIA también permite un análisis estructural, se propone utilizar ANSYS para obtener mejores resultados.



## 8. BIBLIOGRAFÍA

---

- [1] «<http://cadazz.com/cad-software-history.htm>,» [En línea].
- [2] B. P. Ivana Cvetkovic, «Historical Development of Computer-Aided Design (Cad) and Its Application in Education at Faculty of Mechanical Engineering in Belgrade».
- [3] F. Bernard, «A short history of CATIA,» 2003.
- [4] P. F. Crickmore, Lockheed A-12 : the CIA's Blackbird and other variants, Osprey Publishing.
- [5] M. L. Bordas, «Study of the Lockheed SR-71».
- [6] «<http://www.sr71.us/schematic.html>,» [En línea].
- [7] «<http://airfoiltools.com/search/index>,» [En línea].
- [8] R. L. Cabaco, «Diseño estructural de Fuselajes,» 2021.
- [9] «<https://iamchaitanya.wordpress.com/2017/10/30/supersonic-airfoil-design/>,» [En línea].
- [10] I. E. Sutherland, SKETCHPAD, A MAN-MACHINE, University of Cambridge, 1959.

