

Trabajo Fin de Grado

Ingeniería Aeroespacial

Modelado y simulación virtual con CATIA V5 y DELMIA V5 de la maqueta del caza Kawasaki Ki-45 Nick

Autor: Carmelo Aragón Navarro

Tutor: Rafael Ortiz Marín

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

Sevilla, 2025



Trabajo Fin de Grado
Ingeniería Aeroespacial

Modelado y simulación virtual con CATIA V5 y DELMIA V5 de la maqueta del caza Kawasaki Ki- 45 Nick

Autor:
Carmelo Aragón Navarro

Tutor:
Rafael Ortiz Marín
Profesor Contratado Doctor

Dpto. Ingeniería Gráfica
Escuela Técnica Superior de Ingeniería
Universidad de Sevilla
Sevilla, 2025

Trabajo Fin de Grado: Modelado y simulación virtual con CATIA V5 y DELMIA V5 de la maqueta del caza Kawasaki Ki-45 Nick

Autor: Carmelo Aragón Navarro

Tutor: Rafael Ortiz Marín

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

Presidente:

Vocales:

Secretario:

Acuerdan otorgarle la calificación de:

Sevilla, 2025

El Secretario del Tribunal

Agradecimientos

Siendo sincero, cuando era pequeño nunca pensé en ser ingeniero, y mucho menos, ingeniero aeroespacial. Siempre supe que me gustaban las ciencias técnicas, posiblemente por mi facilidad con ese tipo de asignaturas en primaria, y posiblemente también, incentivado por la admiración que siempre he sentido por mi padre y sus conocimientos en un amplio rango de campos técnicos. Aun así, esto no me hizo decantarme por la rama aeroespacial, sino que fue otro de mis grandes pilares, mi madre. Siempre he visto la lucha por la superación, las ganas de mejorar y dar la mejor versión de uno día a día y el hecho de no ponerse límites en cuanto a los objetivos, tanto profesionales, como vitales. Esto me hizo que, siendo realista con mis capacidades, me acabase decantando por la Ingeniería Aeroespacial.

Gracias, papá. Gracias a ti aprendí leyes físicas, termodinámicas, eléctricas, de fluidos y de muchas otras ramas, mucho antes de tocar un libro relacionado con eso. Gracias a ti me gusta este mundo. Me enseñaste, en cosas cotidianas, tantas cosas que me fascinaban desde pequeño, que nunca podré estarte lo suficientemente agradecido. Me enseñaste a tener pensamiento crítico, a que equivocarse es normal, que la experimentación es una gran herramienta en nuestras vidas... Papá, gracias por todo.

Gracias, mamá. Me enseñaste a ser constante, a ser paciente, a ser congruente, a ser educado, a ser ambicioso, a nunca rendirme y muchas cosas más, y todo fue gracias a ver todos esos valores reflejados en ti. La imitación de los hijos hacia los padres es una de las grandes formas de aprendizaje que tiene un niño desde pequeño. Gracias por haber tenido siempre estos valores y haberme hecho ser la persona que soy hoy. Algo que siempre recordaré, y que seguro les trasladaré a mis hijos, es una frase que nunca dejaste de repetirme en mis días malos: *“Mañana será otro día”*. No sé hasta qué punto sabes cómo me ha ayudado en ciertas etapas de mi vida. Nunca podré estarte lo suficientemente agradecido. Mamá, gracias.

Gracias, Ana. He de decir que darte las gracias, hermana, nunca ha salido de mí, pero nunca es tarde para ser agradecido. Quiero que sepas que siempre me he sentido arropado y protegido por ti. Desde que era pequeño, y coincidimos en el colegio, ya me demostraste que siempre estarías ahí. Gracias por el apoyo que siempre me has dado en nuestras pérdidas. Ana, gracias.

Gracias, abuela. En primer lugar, por acogerme para vivir contigo durante mi época universitaria. Gracias por llenar de velas la casa y rezarle a todo aquel que se le pudiera rezar para hacer que aprobara los exámenes. Gracias por hacerme mi comida favorita en los días que me veías triste y por cuidarme y mimarme aun teniendo la edad que tenía. Abuela, gracias.

A todos mis amigos. Pepe, Carmen, Ana, cinta y Dani. Gracias por estar siempre ahí. Gracias por poner siempre vuestro hombro si necesitaba llorar, por escucharme cuando necesitaba desahogarme y por hacer lo posible por animarme en los días que lo necesitaba. Muchas gracias, amigos míos.

Y, por último, mi compañera de vida. Gracias, Andrea. Se que tú ya lo sabes, pero estoy realmente agradecido por estos años juntos. Me has enseñado tantas cosas de mí, que no podría reunir las todas aquí. Te agradezco tu paciencia, tu capacidad de transmitirme la fuerza, tu alegría, tus ganas de verme bien... Gracias. Gracias por haberme acompañado durante toda esta etapa. Siempre he sentido admiración hacia tu fuerza de voluntad, hacia tu concentración y hacia tu actitud estricta en tus objetivos. Me has transmitido actitudes, que has hecho de mi alguien más calmado y feliz. Y, en definitiva, eso es lo que quiero agradecerte, el hecho de aportar a mi felicidad en gran medida es algo incomparable. Muchas gracias, Andrea.

Carmelo Aragón Navarro

Sevilla, 2025

El presente proyecto tiene como objetivo el modelado tridimensional completo y la simulación virtual del avión de combate japonés Kawasaki Ki-45 "Nick", un bimotor utilizado durante la Segunda Guerra Mundial. Para ello se ha empleado el software de diseño asistido por ordenador CATIA V5 para la creación del modelo y la definición de mecanismos, y la plataforma DELMIA V5 para realizar simulaciones ergonómicas con maniqués virtuales.

Uno de los principales retos del proyecto ha sido la escasa documentación técnica disponible. Los planos empleados como base pertenecen a una maqueta de madera y carecen de muchos detalles geométricos y constructivos, en gran parte debido a las simplificaciones propias de este tipo de maquetas, donde no existen las exigencias estructurales y funcionales de una aeronave real. Esta falta de precisión ha requerido un enfoque iterativo en el desarrollo del modelo. A partir de formas básicas iniciales, se ha ido perfeccionando progresivamente el diseño, revisando y ajustando piezas ya creadas en función de la evolución del conjunto.

Este proceso ha exigido un alto grado de autonomía y toma de decisiones de diseño, especialmente en aquellas partes del modelo donde la información era ambigua o inexistente. Gracias a la experiencia profesional del autor en el ámbito del diseño industrial, se han planteado soluciones razonadas, coherentes con la arquitectura aeronáutica del avión y técnicamente viables.

El trabajo no solo busca demostrar competencias técnicas en herramientas CAD y simulación industrial, sino también resaltar la capacidad de análisis, adaptación y resolución creativa de problemas a partir de información incompleta.

Además de su componente técnico, este proyecto representa una oportunidad para poner en valor el patrimonio histórico aeronáutico a través de herramientas digitales modernas. La reconstrucción virtual del Ki-45 no solo permite explorar soluciones de diseño en un contexto educativo, sino que también puede servir como base para futuras iniciativas de divulgación, musealización o formación técnica. El uso de tecnologías de simulación avanzada como CATIA y DELMIA refuerza la conexión entre el aprendizaje académico y el entorno profesional, integrando criterios de precisión, funcionalidad y ergonomía en un ejercicio completo de diseño e ingeniería.

Agradecimientos	vii
Resumen	viii
Índice	ix
Índice de Figuras	xi
Índice de Tablas	xv
Índice de Planos	xvi
1 Introducción	1
1.1 <i>Objetivo del trabajo</i>	1
1.2 <i>Contexto Histórico: La Segunda Guerra Mundial</i>	1
1.3 <i>Kawasaki Ki-45 Toryu (Nick)</i>	1
1.3.1 <i>Datos generales del caza Kawasaki Ki-45 Toryu (Nick)</i>	2
1.3.2 <i>Armamento del caza Kawasaki Ki-45 Toryu (Nick)</i>	2
1.4 <i>Herramientas de modelado 3D</i>	3
1.5 <i>Estudios preliminares</i>	3
2 Modelado del Kawasaki Ki-45 Nick	5
2.1 <i>Dimensionado inicial</i>	6
2.2 <i>Construcción del fuselaje</i>	7
2.2.1 <i>Segunda iteración de la creación de las cuernas del Kawasaki Ki-45 Nick</i>	12
2.2.2 <i>Creación de los largueros del Kawasaki Ki-45 Nick</i>	14
2.2.3 <i>Tercera iteración de la creación de las cuernas del Kawasaki Ki-45 Nick</i>	15
2.2.4 <i>Modelado de las ventanas del Kawasaki Ki-45 Nick</i>	17
2.2.5 <i>Creación de la compuerta del piloto del Kawasaki Ki-45 Nick</i>	19
2.2.6 <i>Resultado final del fuselaje del Kawasaki Ki-45 Nick</i>	20
2.3 <i>Construcción de las alas</i>	21
2.3.1 <i>Creación de las costillas</i>	21
2.3.2 <i>Creación del revestimiento</i>	22
2.3.3 <i>Segunda iteración de la creación de las costillas</i>	25
2.3.4 <i>Creación del alerón</i>	28
2.3.5 <i>Creación del tubo de Pitot</i>	31
2.3.6 <i>Creación del flap</i>	32
2.3.7 <i>Conclusiones</i>	33
2.4 <i>Construcción del empenaje</i>	34
2.4.1 <i>Construcción del HTP</i>	34
2.4.2 <i>Construcción del VTP</i>	41
2.4.3 <i>Conclusiones</i>	48
2.5 <i>Construcción de la planta de potencia</i>	49
2.5.1 <i>Conclusiones</i>	54
2.6 <i>Construcción del tren de aterrizaje</i>	55
2.6.1 <i>Construcción del tren de aterrizaje delantero</i>	55
2.6.2 <i>Tren de aterrizaje trasero</i>	60
2.6.3 <i>Conclusiones</i>	64

2.7	<i>Detalles finales del modelado</i>	65
2.8	<i>Simulaciones</i>	67
2.8.1	Estudio ergonómico	67
2.8.2	Estudio cinemático	69
3	Conclusiones y comentarios del autor	71
	Referencias	72
	Anexo I: Pliego de planos	73

Índice de Figuras

Figura 1 – Planta y perfil parciales del Kawasaki Ki-45 Nick [6]	5
Figura 2 – Plantas superior e inferior del Kawasaki Ki-45 Nick [6]	5
Figura 3 – Perfil y alzado del Kawasaki Ki-45 Nick [6]	6
Figura 4 – Uso de la herramienta <i>Create an Immersive Sketch</i> en CATIA V5	6
Figura 5 – Plano de las cuadernas del fuselaje del Kawasaki Ki-45 Nick	7
Figura 6 – Sketch de la cuaderna 1 superior del Kawasaki Ki-45 Nick	7
Figura 7 – Pad de la cuaderna 1 superior del Kawasaki Ki-45 Nick	8
Figura 8 – Posicionado de las cuadernas del fuselaje del Kawasaki Ki-45 Nick	8
Figura 9 – Conjunto de cuadernas del fuselaje del Kawasaki Ki-45 Nick	9
Figura 10 – Conjunto de sketches del revestimiento del fuselaje del Kawasaki Ki-45 Nick	9
Figura 11 – Superficie frontal del Kawasaki Ki-45 Nick	10
Figura 12 – Adición de la superficie del morro del Kawasaki Ki-45 Nick	10
Figura 13 – Adición de la superficie de la sección del piloto del Kawasaki Ki-45 Nick	10
Figura 14 – Adición de la superficie de cabina del Kawasaki Ki-45 Nick	11
Figura 15 – Adición de la superficie de cola del Kawasaki Ki-45 Nick	11
Figura 16 – Adición del cierre de cola del Kawasaki Ki-45 Nick	12
Figura 17 – Revestimiento bruto del Kawasaki Ki-45 Nick	12
Figura 18 – Pad bruto de la tercera cuaderna superior del Kawasaki Ki-45 Nick	13
Figura 19 – Split de la tercera cuaderna superior del Kawasaki Ki-45 Nick	13
Figura 20 – Conjunto de cuadernas del Kawasaki Ki-45 Nick tras la segunda iteración	14
Figura 21 – Modelo bruto del primer larguero del Kawasaki Ki-45 Nick	14
Figura 22 – Sección del primer larguero del Kawasaki Ki-45 Nick ajustado a la superficie	15
Figura 23 – Conjunto de cuadernas y largueros del Kawasaki Ki-45 Nicks	15
Figura 24 – Superficies extraídas de uno de los largueros del Kawasaki Ki-45 Nick	16
Figura 25 – Uso de <i>Split</i> para hacer la unión entre largueros y cuadernas del Kawasaki Ki-45 Nick	16
Figura 26 – Unión entre largueros y cuadernas con remaches del Kawasaki Ki-45 Nick	17
Figura 27 – Resultado final de la unión entre cuadernas, largueros y revestimiento del Kawasaki Ki-45 Nick	17
Figura 28 – Cortes generados en la superficie del Kawasaki Ki-45 Nick	18
Figura 29 – Superficies utilizadas en la creación de las ventanas del Kawasaki Ki-45 Nick	18
Figura 30 – <i>ThickSurface</i> para la creación de las ventanas del Kawasaki Ki-45 Nick	19
Figura 31 – Sección extraída con la herramienta <i>Split</i> para la compuerta del piloto del Kawasaki Ki-45 Nick	19

Figura 32 – Cortes de las ventanas de la compuerta del piloto del Kawasaki Ki-45 Nick	20
Figura 33 – Compuerta del piloto del Kawasaki Ki-45 Nick	20
Figura 34 – Fuselaje final del Kawasaki Ki-45 Nick	21
Figura 35 – Plano de las costillas de las alas del Kawasaki Ki-45 Nick	21
Figura 36 – Modelo bruto de la costilla 20 de las alas del Kawasaki Ki-45 Nick	22
Figura 37 – Costillas del ala izquierda del Kawasaki Ki-45 Nick	22
Figura 38 – Superficie principal del ala izquierda del Kawasaki Ki-45 Nick	22
Figura 39 – Primera sección de la superficie de punta de ala del Kawasaki Ki-45 Nick	23
Figura 40 – Segunda sección de la superficie de punta de ala del Kawasaki Ki-45 Nick	23
Figura 41 – Tercera sección de la superficie de punta de ala del Kawasaki Ki-45 Nick	24
Figura 42 – Superficie de punta de ala del Kawasaki Ki-45 Nick	24
Figura 43 – Superficie superior de la zona del flap del ala del Kawasaki Ki-45 Nick	25
Figura 44 – Revestimiento del ala del Kawasaki Ki-45 Nick	25
Figura 45 – Costilla 20 antes de la segunda iteración del ala del Kawasaki Ki-45 Nick	26
Figura 46 – Costilla 20 tras la segunda iteración del ala del Kawasaki Ki-45 Nick	26
Figura 47 – Costillas del ala del Kawasaki Ki-45 Nick tras la segunda iteración de su modelado	26
Figura 48 – Detalle de la unión remachada entre costillas y revestimiento del ala del Kawasaki Ki-45 Nick	27
Figura 49 – Remache usado en las uniones revestimiento-costilla en el ala del Kawasaki Ki-45 Nick	27
Figura 50 – Conjunto estructural del ala del Kawasaki Ki-45 Nick	28
Figura 51 – Conjunto estructural del ala del Kawasaki Ki-45 Nick con el revestimiento	28
Figura 52 – Superficie del alerón del Kawasaki Ki-45 Nick	29
Figura 53 – Revestimiento del alerón del Kawasaki Ki-45 Nick	29
Figura 54 – Sólido bruto de la costilla 20 del alerón del Kawasaki Ki-45 Nick	30
Figura 55 – Conjunto de costillas y revestimiento del alerón del Kawasaki Ki-45 Nick	30
Figura 56 – Eje de giro entre el alerón y el ala del Kawasaki Ki-45 Nick	31
Figura 57 – Plano del ala del Kawasaki Ki-45 Nick	31
Figura 58 – Tubo de Pitot del Kawasaki Ki-45 Nick	32
Figura 59 – Superficie del flap del ala del Kawasaki Ki-45 Nick	32
Figura 60 – Flap del ala del Kawasaki Ki-45 Nick	33
Figura 61 – Vista con perspectiva del Kawasaki Ki-45 Nick	33
Figura 62 – Planta del Kawasaki Ki-45 Nick	34
Figura 63 – Vista frontal del Kawasaki Ki-45 Nick	34
Figura 64 – Posicionado de las costillas del HTP del Kawasaki Ki-45 Nick	35
Figura 65 – Costillas del HTP del Kawasaki Ki-45 Nick	36
Figura 66 – Costillas, borde de ataque, larguero y punta de ala del HTP del Kawasaki Ki-45 Nick	36
Figura 67 – Superficies de corte del revestimiento del HTP del Kawasaki Ki-45 Nick	37
Figura 68 – HTP izquierdo (sin elevador) del Kawasaki Ki-45 Nick	37
Figura 69 – Superficie del elevador del HTP del Kawasaki Ki-45 Nick	38

Figura 70 – Corte para el <i>Trim Tab</i> de la superficie del elevador del HTP del Kawasaki Ki-45 Nick	38
Figura 71 – Revestimiento del elevador del HTP del Kawasaki Ki-45 Nick	39
Figura 72 – Costillas del elevador del HTP del Kawasaki Ki-45 Nick	39
Figura 73 – Costillas del elevador del HTP del Kawasaki Ki-45 Nick	39
Figura 74 – Conjunto costillas-largueros del elevador del Kawasaki Ki-45 Nick	40
Figura 75 – Trim Tab del elevador del Kawasaki Ki-45 Nick	40
Figura 76 – Elevador y Trim Tab del Kawasaki Ki-45 Nick	41
Figura 77 – HTP del Kawasaki Ki-45 Nick	41
Figura 78 – Posicionamiento de las costillas del VTP del Kawasaki Ki-45 Nick	42
Figura 79 – Revestimiento del VTP del Kawasaki Ki-45 Nick	43
Figura 80 – Estructura interna de la parte fija del VTP del Kawasaki Ki-45 Nick	43
Figura 81 – Split del revestimiento del timón de dirección del VTP del Kawasaki Ki-45 Nick	44
Figura 82 – Revestimiento del timón de dirección del VTP del Kawasaki Ki-45 Nick	44
Figura 83 – Corte del revestimiento del timón de dirección del VTP del Kawasaki Ki-45 Nick para el Rudder Trim	45
Figura 84 – Estructura interna del timón de dirección del VTP del Kawasaki Ki-45 Nick	45
Figura 85 – Corte del Rudder Trim del timón de dirección del VTP del Kawasaki Ki-45 Nick	46
Figura 86 – Rudder Trim del timón de dirección del VTP del Kawasaki Ki-45 Nick	46
Figura 87 – Timón de dirección del VTP del Kawasaki Ki-45 Nick	47
Figura 88 – VTP del Kawasaki Ki-45 Nick	47
Figura 89 – Empenaje del Kawasaki Ki-45 Nick	48
Figura 90 – Modelado del Kawasaki Ki-45 Nick (Fuselaje, alas y empenaje)	48
Figura 91 – Plano de la planta de potencia del Kawasaki Ki-45 Nick	49
Figura 92 – Estructura interna de la planta de potencia del Kawasaki Ki-45 Nick	49
Figura 93 – Parte trasera de la góndola de la planta de potencia del Kawasaki Ki-45 Nick	50
Figura 94 – Split de la góndola de la planta de potencia del Kawasaki Ki-45 Nick para ajustarse al ala	50
Figura 95 – Góndola de la planta de potencia del Kawasaki Ki-45 Nick	51
Figura 96 – Split para el tren de aterrizaje delantero del Kawasaki Ki-45 Nick	51
Figura 97 – Compuertas para el tren de aterrizaje delantero del Kawasaki Ki-45 Nick	52
Figura 98 – Bisagras de las compuertas para el tren de aterrizaje delantero del Kawasaki Ki-45 Nick	52
Figura 99 – Toma de aire de la planta de potencia del Kawasaki Ki-45 Nick	53
Figura 100 – Hélices de la planta de potencia del Kawasaki Ki-45 Nick	53
Figura 101 – Planta de potencia del Kawasaki Ki-45 Nick	54
Figura 102 – Modelado del Kawasaki Ki-45 Nick (Fuselaje, alas, empenaje y planta de potencia)	54
Figura 103 – Primer paso del modelado de la estructura del tren de aterrizaje delantero del Kawasaki Ki-45 Nick	55
Figura 104 – Segundo paso del modelado de la estructura del tren de aterrizaje delantero del Kawasaki Ki-45 Nick	56
Figura 105 – Tercer paso del modelado de la estructura del tren de aterrizaje delantero del Kawasaki Ki-45 Nick	56

Figura 106 – Tercer paso del modelado de la estructura del tren de aterrizaje delantero del Kawasaki Ki-45 Nick	57
Figura 107 – Cuarto paso del modelado de la estructura del tren de aterrizaje delantero del Kawasaki Ki-45 Nick	57
Figura 108 – Modelado de la rueda del tren de aterrizaje delantero del Kawasaki Ki-45 Nick	58
Figura 109 – Vista trasera del tren de aterrizaje delantero del Kawasaki Ki-45 Nick	58
Figura 110 – Vista lateral del tren de aterrizaje delantero del Kawasaki Ki-45 Nick	59
Figura 111 – Vista lateral del tren de aterrizaje delantero retraído del Kawasaki Ki-45 Nick	59
Figura 112 – Información en plano del tren de aterrizaje trasero del Kawasaki Ki-45 Nick	60
Figura 113 – Soporte del tren de aterrizaje trasero del Kawasaki Ki-45 Nick	61
Figura 114 – Brazo secundario del tren de aterrizaje trasero del Kawasaki Ki-45 Nick	61
Figura 115 – Brazos de suspensión del tren de aterrizaje trasero del Kawasaki Ki-45 Nick	62
Figura 116 – Vista lateral del brazo principal del tren de aterrizaje trasero del Kawasaki Ki-45 Nick	62
Figura 117 – Vista trasera del brazo principal del tren de aterrizaje trasero del Kawasaki Ki-45 Nick	63
Figura 118 – Rueda del tren de aterrizaje trasero del Kawasaki Ki-45 Nick	63
Figura 119 – Posición retraída del tren de aterrizaje trasero del Kawasaki Ki-45 Nick	64
Figura 120 – Modelado del Kawasaki Ki-45 Nick (Fuselaje, alas, empenaje, planta de potencia y tren de aterrizaje)	64
Figura 121 – Asiento delantero y antena del Kawasaki Ki-45 Nick	65
Figura 122 – Asiento y arma trasera del Kawasaki Ki-45 Nick	65
Figura 123 – Modelo de referencia para el pintado del Kawasaki Ki-45 Nick	66
Figura 124 – Aplicación del pintado del Kawasaki Ki-45 Nick	66
Figura 125 – Resultado final del pintado del Kawasaki Ki-45 Nick	67
Figura 126 – Estudio RULA estático del piloto del Kawasaki Ki-45 Nick	68
Figura 127 – Estudio RULA intermitente del piloto del Kawasaki Ki-45 Nick	68
Figura 128 – Estudio RULA estático del artillero del Kawasaki Ki-45 Nick	69
Figura 129 – Estudio RULA intermitente del artillero del Kawasaki Ki-45 Nick	69

Índice de Tablas

Tabla 1 – Características Técnicas del caza [4]

2

Índice de Planos

Ilustración 1 – Plano 1	73
Ilustración 2 – Plano 2	74
Ilustración 3 – Plano 3	74
Ilustración 4 – Plano 4	75
Ilustración 5 – Plano 5	76
Ilustración 6 – Plano 6	77
Ilustración 7 – Plano 7	78
Ilustración 8 – Plano 8	79
Ilustración 9 – Plano 9	80

1 INTRODUCCIÓN

1.1 Objetivo del trabajo

El propósito principal de este proyecto es la reconstrucción digital precisa del avión de combate japonés Kawasaki Ki-45 "Toryu" (Nick), mediante técnicas avanzadas de modelado tridimensional y simulación virtual. Para ello, se ha empleado el software profesional CATIA V5 en la creación de todas las piezas del avión, así como en la definición de sus mecanismos mediante el módulo de cinemática. Además, se ha utilizado DELMIA V5 para llevar a cabo simulaciones ergonómicas, incorporando maniquíes virtuales que permiten evaluar la interacción humana con el entorno de cabina.

El trabajo tiene como objetivo no solo replicar la geometría del avión a partir de planos incompletos y simplificados, sino también demostrar la capacidad de generar un modelo funcional y técnicamente coherente a través de un proceso iterativo. Este proceso ha implicado la toma de decisiones autónomas de diseño, el uso de criterios de ingeniería aplicados a contextos de escasa documentación, y el desarrollo de soluciones que respeten tanto la lógica constructiva de una aeronave real como su valor histórico. El proyecto pretende, por tanto, integrar competencias técnicas avanzadas en diseño asistido por ordenador con un enfoque creativo y crítico frente a la falta de información detallada.

1.2 Contexto Histórico: La Segunda Guerra Mundial

El 1 de septiembre de 1939, el ejército alemán, bajo el mando de Adolf Hitler, comienza la invasión de Polonia en su intento de conquistar El Corredor Polaco, dando así inicio a la Segunda Guerra Mundial. El 3 de septiembre de 1939, tanto Inglaterra como Francia le declararon la guerra a Alemania y, pocos meses más tarde, el país germano ya contaba con el control de Noruega, Dinamarca, Países Bajos, Bélgica y Francia [1].

Dado el objeto de este proyecto, cabe destacar La Guerra de Inglaterra, la cual fue posible gracias a la previa evacuación del ejército de Inglaterra en la playa de Dunkerque durante la llamada Operación Dinamo, durante la cual más de trescientas mil tropas francesas, británicas, belgas y canadienses escaparon de la invasión alemana. Y es que, aunque es cierto que el Kawasaki Ki-45 "Toryu" (Nick) aun no habría entrado en juego en la guerra, esta batalla fue conocida por ser la primera guerra enteramente disputada en el aire y la cual finalizó gracias a la ayuda estadounidense a favor de Inglaterra y el bando Aliado [2].

Japón entró en la Segunda Guerra Mundial el 7 de diciembre de 1941, después de atacar Pearl Harbor. Este ataque, que sorprendió a los Estados Unidos, marcó la entrada oficial de Japón en el conflicto como parte de las potencias del Eje, junto con Alemania e Italia. La entrada de Japón en la guerra desencadenó la declaración de guerra de Estados Unidos y su posterior participación en el frente del Pacífico [3].

La guerra fue llegando a su fin gracias a unas complejas operaciones de desembarco en tierras europeas por parte de los aliados y por el hundimiento del frente oriental. Mientras tanto, Alemania en el frente occidental experimentó los mayores bombardeos vistos hasta la fecha, llegando hasta la destrucción total de Berlín en 1945 [1].

En el frente Pacífico, Estados Unidos y Japón libraron las mayores batallas navales de la historia, hasta que en febrero de 1945 llegaron a tierras niponas. Tras esto, el presidente estadounidense Harry S. Truman ordenó bombardear Hiroshima y Nagasaki con armas nucleares, poniendo fin al conflicto con Japón [1].

El final de La Segunda Guerra Mundial no tuvo negociaciones entre los bandos, sino que fue una victoria del bando Aliado que dejó a las Potencias del Eje sin más opciones que la rendición [1].

1.3 Kawasaki Ki-45 Toryu (Nick)

En este apartado se expondrán datos generales de interés del caza de combate bajo estudio, así como los componentes de este según sus distintas versiones.

1.3.1 Datos generales del caza Kawasaki Ki-45 Toryu (Nick)

El Kawasaki Ki-45 “Toryu” (apodado “Nick” por los Aliados) es probablemente el caza bimotor japonés más reconocido de la Segunda Guerra Mundial, llegándose a fabricar hasta 1701 unidades del mismo. Fue el principal avión de caza pesado en servicio con las Fuerzas Aéreas del Ejército Imperial japonés durante el conflicto. Aunque inicialmente no cumplió de manera óptima su función original como caza diurno, logró consolidarse, similar a su homólogo alemán Messerschmitt Bf-110 —aunque con menor fama y escala—, como un eficaz interceptor de bombarderos enemigos [4].

Como una evolución natural de su función original, el Kawasaki Ki-45 fue adaptado para actuar como caza nocturno, rol en el que se convirtió posiblemente en el diseño más exitoso de este tipo en la aviación japonesa durante la guerra. A pesar de este éxito, cabe destacar que su eficacia se vio limitada por el retraso tecnológico de Japón en áreas clave como los radares aerotransportados para la interceptación, lo que redujo notablemente sus capacidades en misiones nocturnas. Además, el Ki-45 demostró gran versatilidad, pudiendo adaptarse a múltiples roles; entre ellos, el de avión de ataque, desempeñó diversas funciones en todos los frentes del Pacífico hasta la rendición de Japón en agosto de 1945 [4].

En cuanto a las especificaciones técnicas generales [5]:

- Tripulación: 2 en tandem
- Longitud: 11m
- Envergadura: 15.02m
- Altura: 3.7m
- Área alar: 32m²
- Peso en vacío: 4000kg
- Peso bruto: 8820kg

Este caza contó con diversas versiones a lo largo de los años. En la siguiente tabla se muestran algunas de las configuraciones de su planta de potencia, así como las capacidades operativas que permitían.

Modelo:	Ki-45 Tipo 1 (Prototipos)	Ki-45 Tipo 2 Modelo A	Ki-45 Tipo 2 Modelo C
Planta Motriz	2 Nakajima Ha-20B, radiales, de 820 Hp	2 Nakajima Ha-25, radiales, de 1050 Hp	2 Mitsubishi Ha-102, radiales, de 1080 Hp
Velocidad Máxima	480 km/h a 4000 m	547 km/h a 7000 m	550 km/h a 7000 m
Trepada	A 5000 m en 10'12''	A 5000 m en 6'17''	A 5000 m en 7'
Techo de Servicio	-	10730 m	10000 m
Alcance Operacional	1750 km	2260 km	2000 km

Tabla 1 – Características Técnicas del caza [4]

1.3.2 Armamento del caza Kawasaki Ki-45 Toryu (Nick)

En este apartado se detallarán las capacidades armamentísticas del caza estudiado según las diferentes versiones que este adoptó durante los años en guerra [4].

- Todas las versiones: tenían la capacidad de poder montar pilones bajo las góndolas de los motores, con las cuales portar 2 bombas de 250kg.
- Ki-45 Tipo 1 (prototipos): 2 ametralladoras de 7.7mm “Tipo 89”, 1 cañón de 20mm “Tipo 97”, una ametralladora defensiva de 7.7mm “Tipo 89”.

- Ki-45-KAI-Ko: 2 ametralladoras “Ho-103” de 12.7mm, un cañón de 20mm “Ho-3”, una ametralladora defensiva de 7,92mm “Tipo 98”.
- Ki-45-KAI-Otsu: cañón de 37mm “Tipo 94”, un cañón de 20mm “Ho-3” una ametralladora defensiva de 7.92mm “Tipo 98” (en ocasiones reemplazada por una “Ho-103” de 12.7mm).
- KI-45-KAI-Hei: 1 cañón de 37mm “Ho-203”, un cañón de 20mm “Ho-3”, una ametralladora defensiva de 7.92mm “Tipo 98” (en ocasiones reemplazada por una Ho-103 de 12.7mm).
- Ki-45-KAI-Tei: 1 cañón de 37mm “Ho-203”, y dos ametralladoras de 12.7mm “Ho-103” en tiro oblicuo y vertical.
- Ki-45-KAI-Bo: 1 cañón de 40 mm Ho-301.
- KI-45-KAI-Ko de caza nocturna: 2 ametralladoras de 12.7mm “Ho-103”, 1 cañón de 20mm “Ho-3”, 2 ametralladoras de 12.7mm “Ho-103” de tiro oblicuo y vertical, y una ametralladora defensiva de 7.92mm “Tipo 98”.
- Ki-45-KAI-Hei de caza nocturna: 1 cañón de 37 mm “Ho-203”, 1 cañón de 20 mm “Ho-3”, y 2 cañones de 20 mm “Ho-5” de tiro oblicuo y vertical.

1.4 Herramientas de modelado 3D

Las herramientas de modelado 3D son aplicaciones de diseño asistido por ordenador (CAD, por sus siglas en inglés) que permiten crear, editar y visualizar representaciones digitales tridimensionales de piezas, ensamblajes o productos completos. Estas herramientas son fundamentales en numerosos sectores industriales, como la automoción, la aeronáutica, la ingeniería mecánica o la arquitectura, ya que facilitan la validación virtual del diseño antes de su fabricación real. A través de ellas es posible definir no solo la geometría, sino también propiedades físicas, restricciones mecánicas, movimientos y condiciones de montaje.

CATIA V5 (Computer Aided Three-Dimensional Interactive Application) es una de las plataformas CAD más potentes y utilizadas a nivel industrial. Desarrollada por Dassault Systèmes, CATIA permite realizar modelado paramétrico de sólidos, superficies y ensamblajes complejos, así como análisis estructurales, definición de mecanismos, generación de planos técnicos y simulaciones cinemáticas, entre otras funciones. Su estructura modular y su capacidad para gestionar modelos de alta complejidad la convierten en una herramienta estándar en sectores altamente exigentes como el aeroespacial y el automovilístico.

DELMIA V5 (Digital Enterprise Lean Manufacturing Interactive Application) es una herramienta desarrollada por Dassault Systèmes orientada a la planificación, simulación y validación de procesos de fabricación en un entorno virtual. Se integra dentro de la plataforma 3DEXPERIENCE y complementa a herramientas CAD como CATIA, permitiendo no solo visualizar productos en 3D, sino también simular su montaje, uso, mantenimiento o interacción con operarios, con el fin de optimizar procesos antes de su implementación real.

En el contexto del presente proyecto, DELMIA V5 se ha utilizado principalmente para la realización de simulaciones ergonómicas, mediante la incorporación de maniqués virtuales (humanos digitales). Estas simulaciones permiten analizar aspectos como la accesibilidad, la postura de trabajo o la interacción del operario con los controles de cabina. Gracias a sus capacidades, DELMIA se convierte en una herramienta clave en el diseño centrado en el usuario, ayudando a identificar posibles problemas de ergonomía, confort o seguridad desde fases tempranas del desarrollo.

1.5 Estudios preliminares

Decidir el modelo de estudio no fue algo sencillo. Encontrar planos suficientes, pero no excesivos (puesto que el reto era poder demostrar las capacidades y el conocimiento del diseño aeronáutico, no solo la capacidad de replicación de piezas a partir de sus planos), así como que el avión a modelar tuviera un interés histórico relevante, fue una tarea que conllevó muchas horas de búsqueda para poder encontrar la aeronave perfecta.

Finalmente, la búsqueda concluyó con el hallazgo de un conjunto de planos de una maqueta a escala del Kawasaki Ki-45 Toryu (Nick), lo que dio inicio al trabajo en el presente proyecto.

En el próximo capítulo se detallará tanto la primera iteración del modelado de la aeronave como sus consecutivos cambios hasta llegar al modelo final, pero el trabajo previo clave en este proyecto fue encontrar la relación de escalado que tenían los planos frente al modelo real.

De aquí en adelante, para simplificar y usar el nombre más conocido de la aeronave, se mencionará como el Kawasaki Ki-45 Nick.

2 MODELADO DEL KAWASAKI KI-45 NICK

Este capítulo contendrá todo el modelado, dividido en secciones del avión, de manera detallada, haciendo mención de los módulos de CATIA V5 utilizados para las operaciones principales de cada pieza, así como las iteraciones que se han dado a lo largo del desarrollo del proyecto.

A modo de resumen, los módulos utilizados principalmente han sido: *Part Design* y *Assembly Design*, dentro de *Mechanical Design*, para la construcción de los sólidos, y el módulo de *Generative Shape Design*, dentro de *Shape*, para la creación de superficies de apoyo para el diseño.

A continuación, se pueden ver los planos principales usados para dimensionar el modelo en CATIA V5 (Figuras 1, 2 y 3).

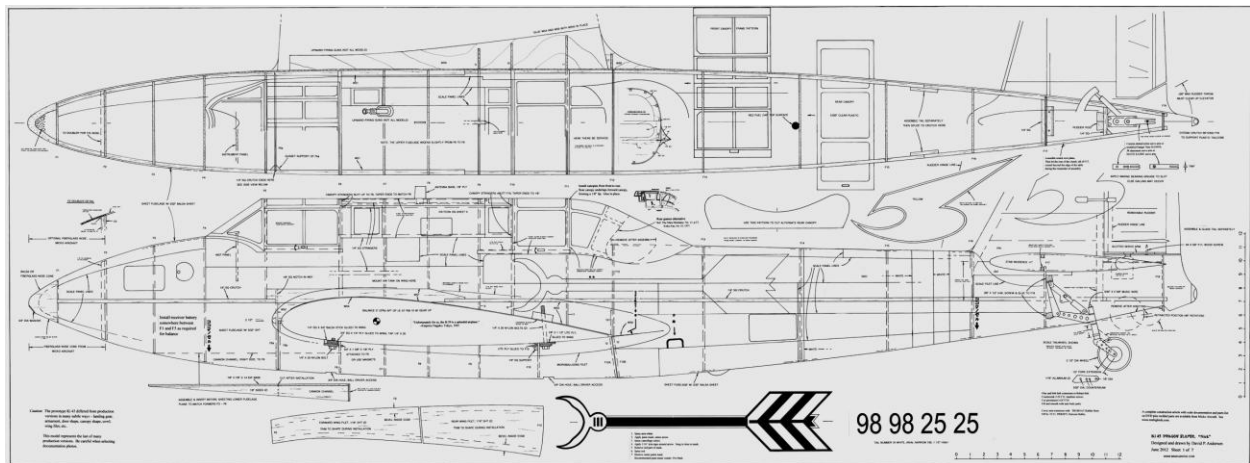


Figura 1 – Planta y perfil parciales del Kawasaki Ki-45 Nick [6]

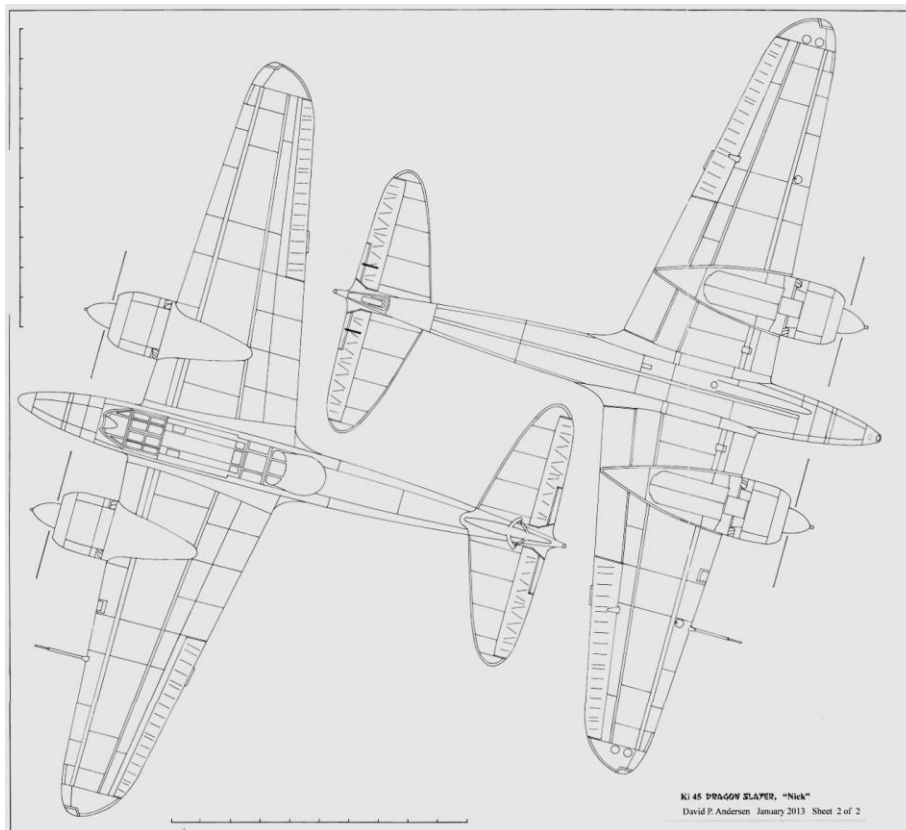


Figura 2 – Plantas superior e inferior del Kawasaki Ki-45 Nick [6]

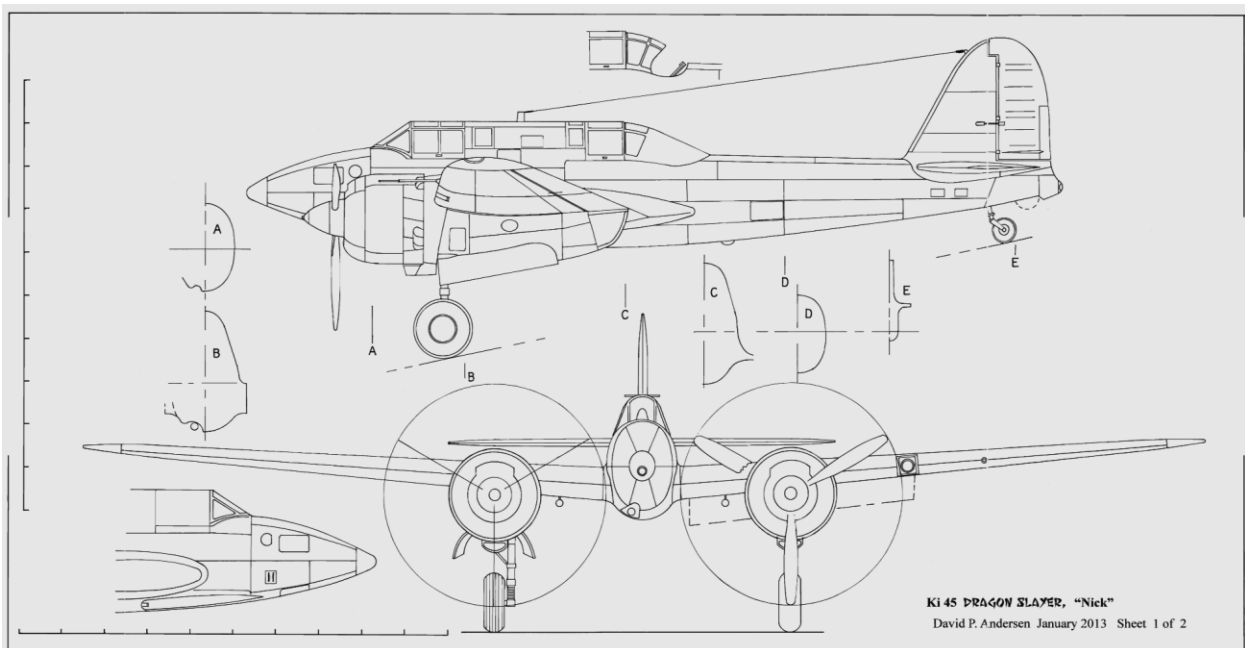


Figura 3 – Perfil y alzado del Kawasaki Ki-45 Nick [6]

El procedimiento seguido en el comienzo del modelado para todas las partes del avión se detallará en el siguiente apartado, Dimensionado inicial.

2.1 Dimensionado inicial

En este apartado, se describirá el procedimiento utilizado para dimensionar los planos dentro de CATIA V5. Para este proceso se ha utilizado el módulo *Sketch Tracer* dentro de *Shape*. En este, usando la opción *Create an Immersive Sketch*, se introdujeron los planos necesarios en los ejes correspondientes para poder comenzar el modelado.

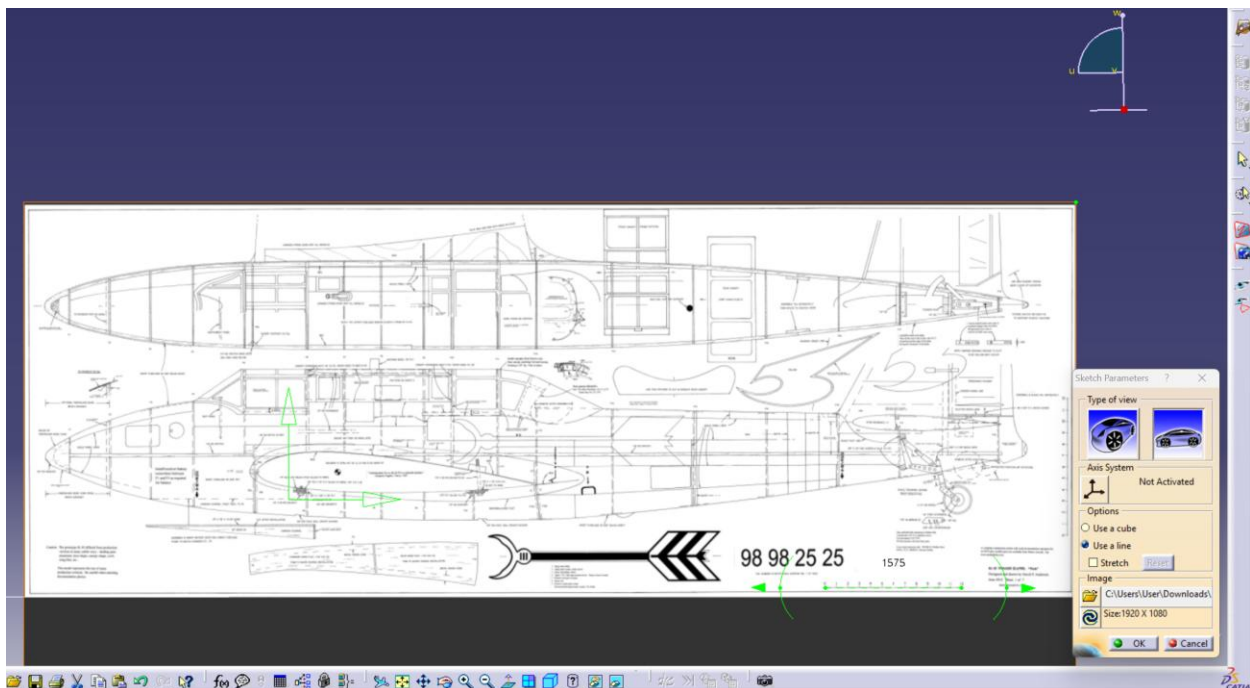


Figura 4 – Uso de la herramienta *Create an Immersive Sketch* en CATIA V5

En la Figura 4 se puede ver el valor del escalado aplicado entre los planos y la aeronave real, 1575:1.

2.2 Construcción del fuselaje

Tal y como se ha mostrado en el punto anterior, introduciendo los planos que contenían la información sobre las secciones del fuselaje, se modelaron todas y cada una de las “piezas” que compondrían el fuselaje de la maqueta del Kawasaki Ki-45 Nick. El plano utilizado en esta sección se muestra a continuación en la Figura 5.

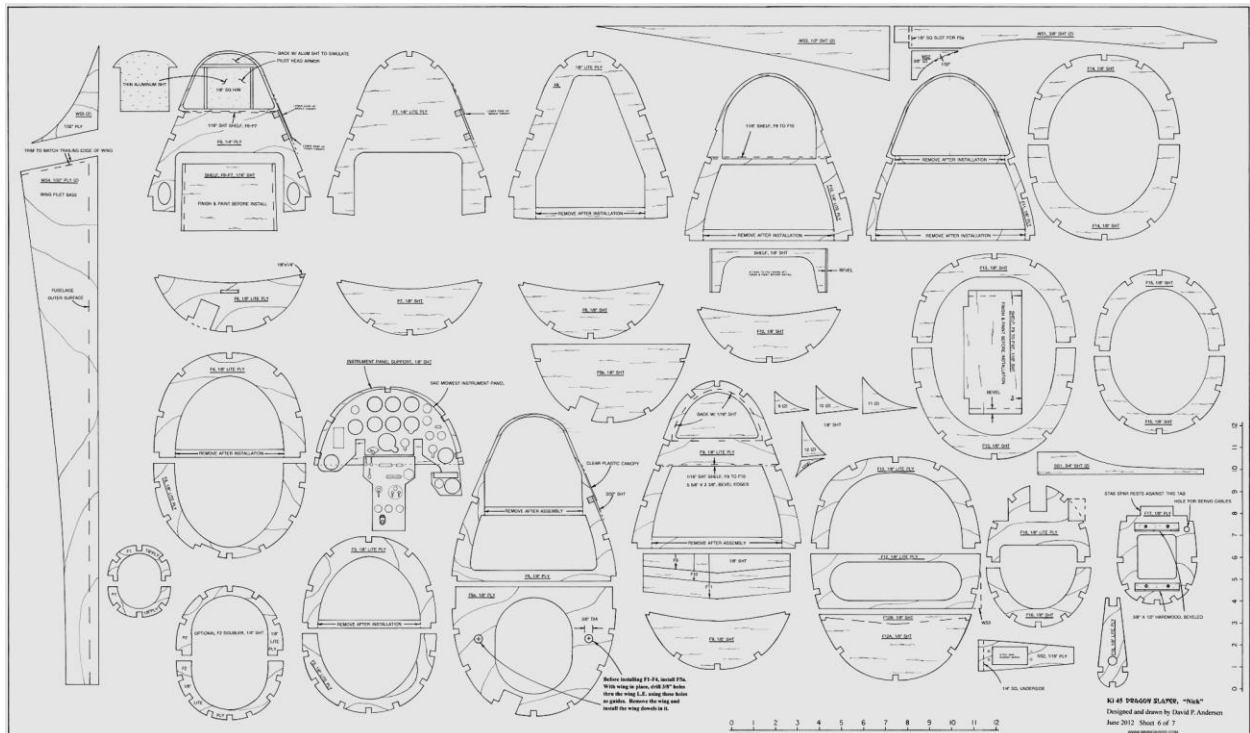


Figura 5 – Plano de las cuadernas del fuselaje del Kawasaki Ki-45 Nick

El procedimiento para el modelado de cada una de las cuadernas consiste en “calcar” del plano de la Figura 5 en CATIA V5 e ir usando la herramienta *Pad* para construir el sólido. En las siguientes imágenes (Figuras 6 y 7) se hace un ejemplo para la cuaderna 1 superior, tanto del *Sketch* como del *Pad*.

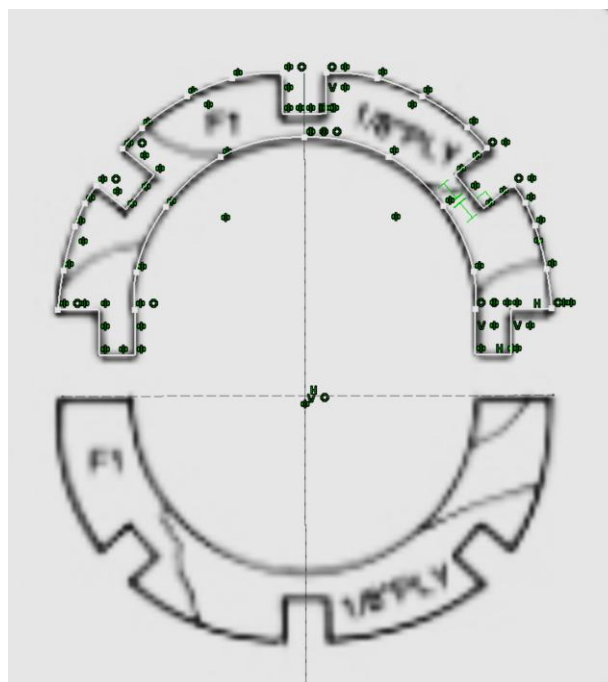


Figura 6 – Sketch de la cuaderna 1 superior del Kawasaki Ki-45 Nick

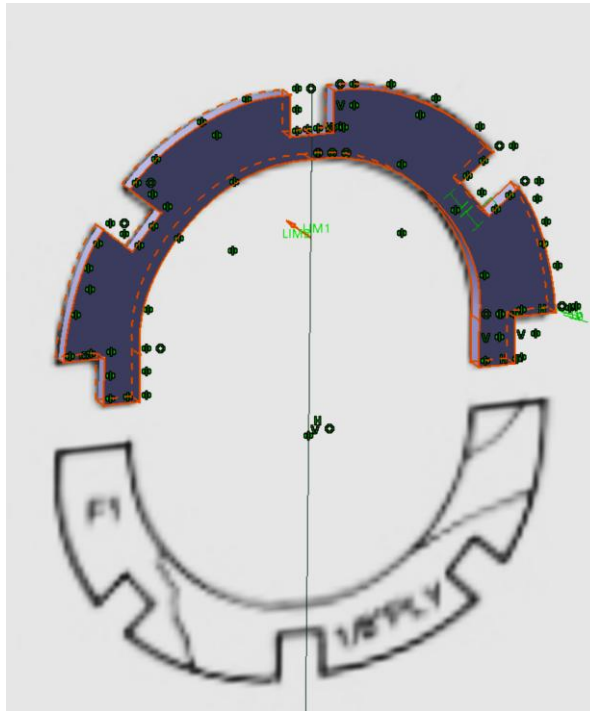


Figura 7 – Pad de la cuaderna 1 superior del Kawasaki Ki-45 Nick

Tras crear todas las cuadernas, y usando de nuevo los planos insertados en el modelo 3D, se posicionaron como se ve en las siguientes imágenes (Figuras 8 y 9).

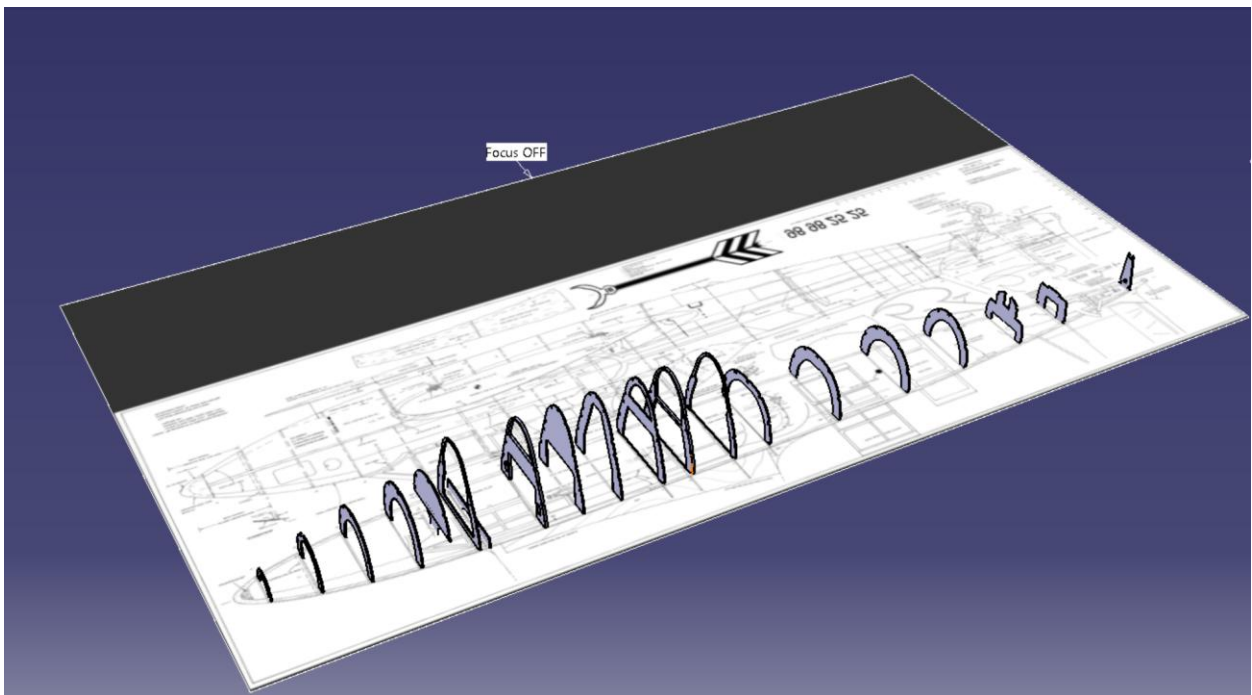


Figura 8 – Posicionado de las cuadernas del fuselaje del Kawasaki Ki-45 Nick

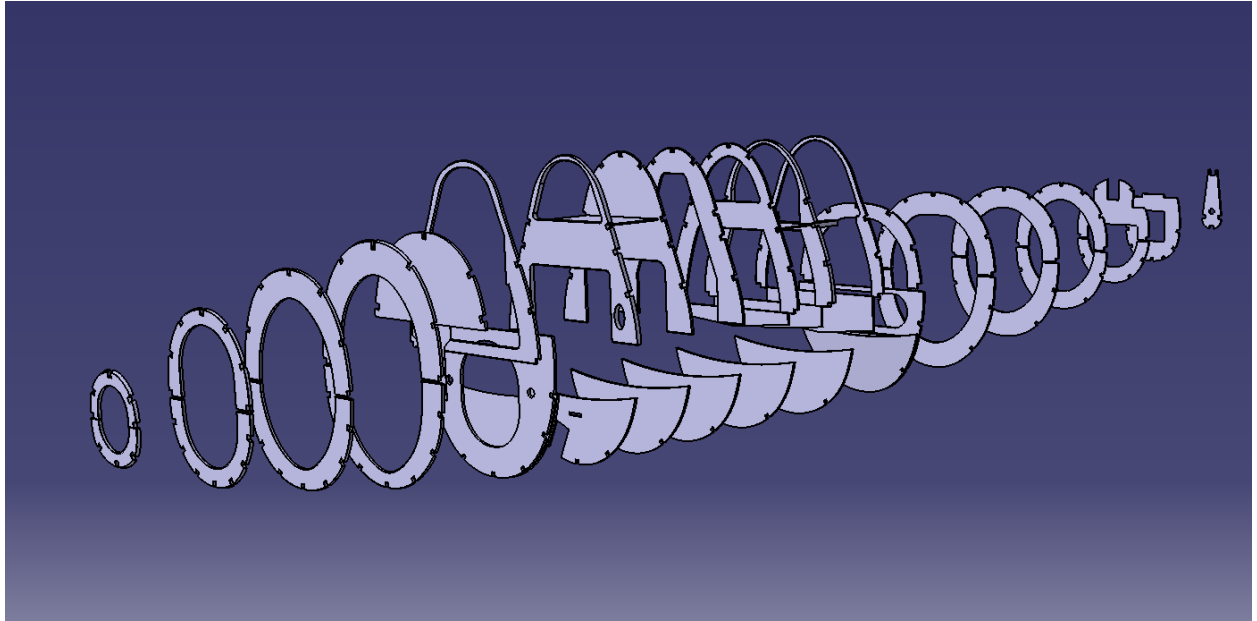


Figura 9 – Conjunto de cuadernas del fuselaje del Kawasaki Ki-45 Nick

Una vez montado el conjunto de cuadernas, se procedió a crear las primeras superficies, en este caso, el revestimiento del fuselaje. Para ello, se realizaron diferentes *sketches* tomando como referencia las cuadernas ya modeladas y añadiéndole un margen para poder iterar más adelante. A continuación, se muestran todos los *sketches* utilizados en esta operación (Figura 10).

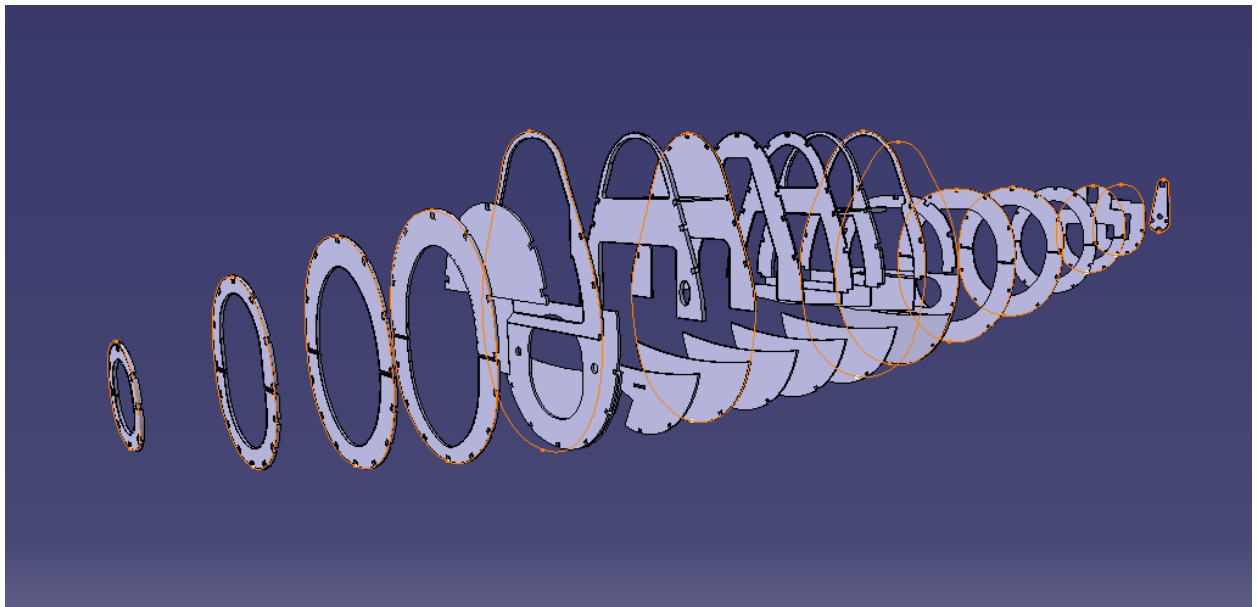


Figura 10 – Conjunto de sketches del revestimiento del fuselaje del Kawasaki Ki-45 Nick

Para las siguientes secciones del fuselaje se ha utilizado fundamentalmente la herramienta de *Multi-Sections Surface*, excepto para la nariz del avión, donde se ha optado por usar la herramienta *Fill*. A continuación, se muestran todas las secciones en la secuencia que fueron creadas para el fuselaje completo (Figuras 11, 12, 13, 14, 15 y 16).

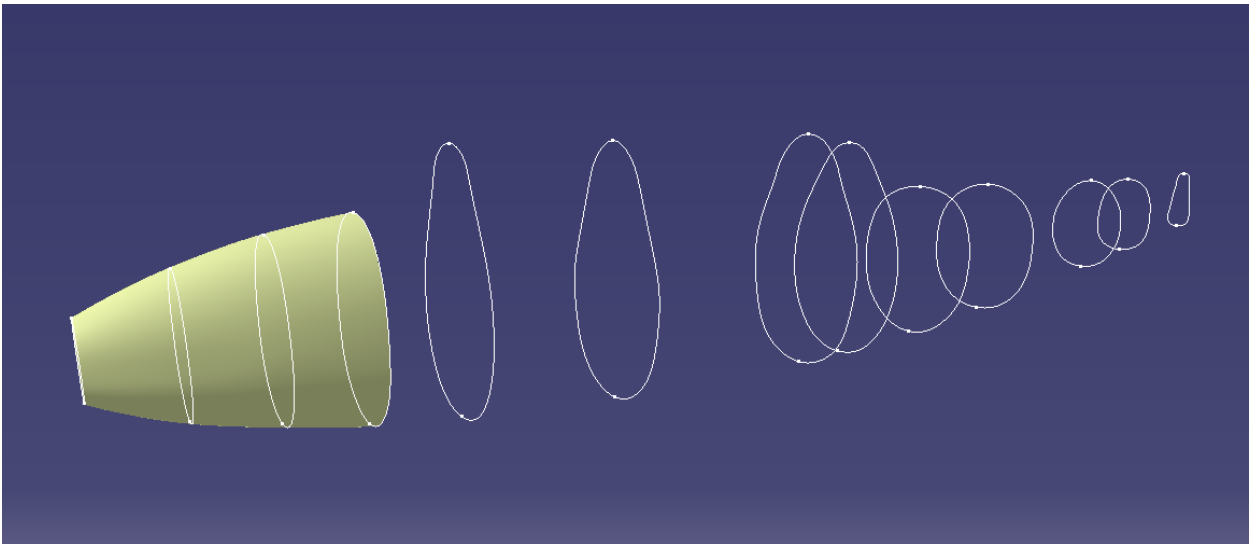


Figura 11 – Superficie frontal del Kawasaki Ki-45 Nick

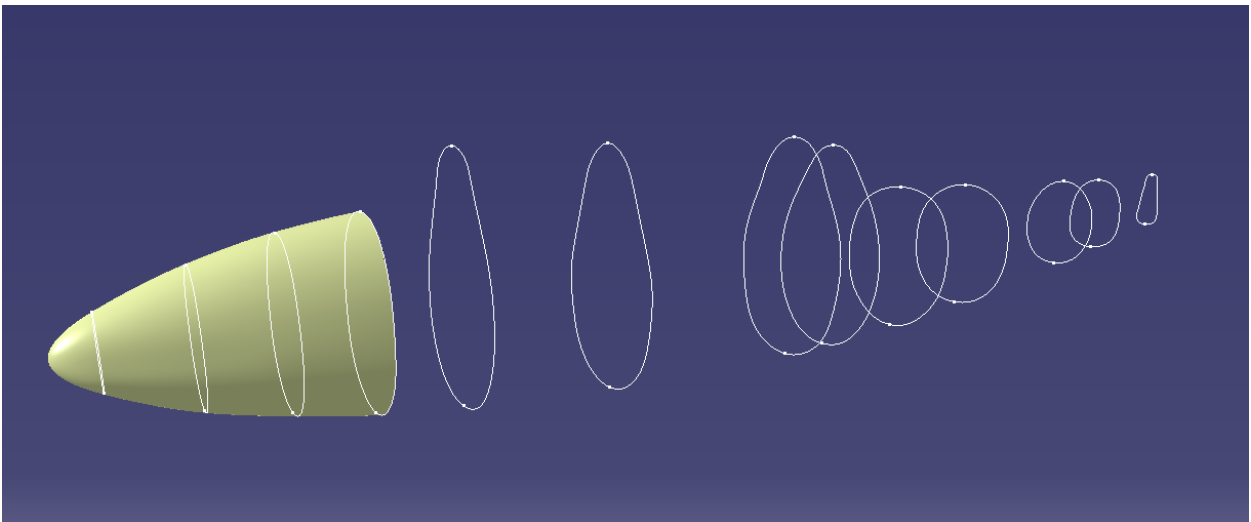


Figura 12 – Adición de la superficie del morro del Kawasaki Ki-45 Nick

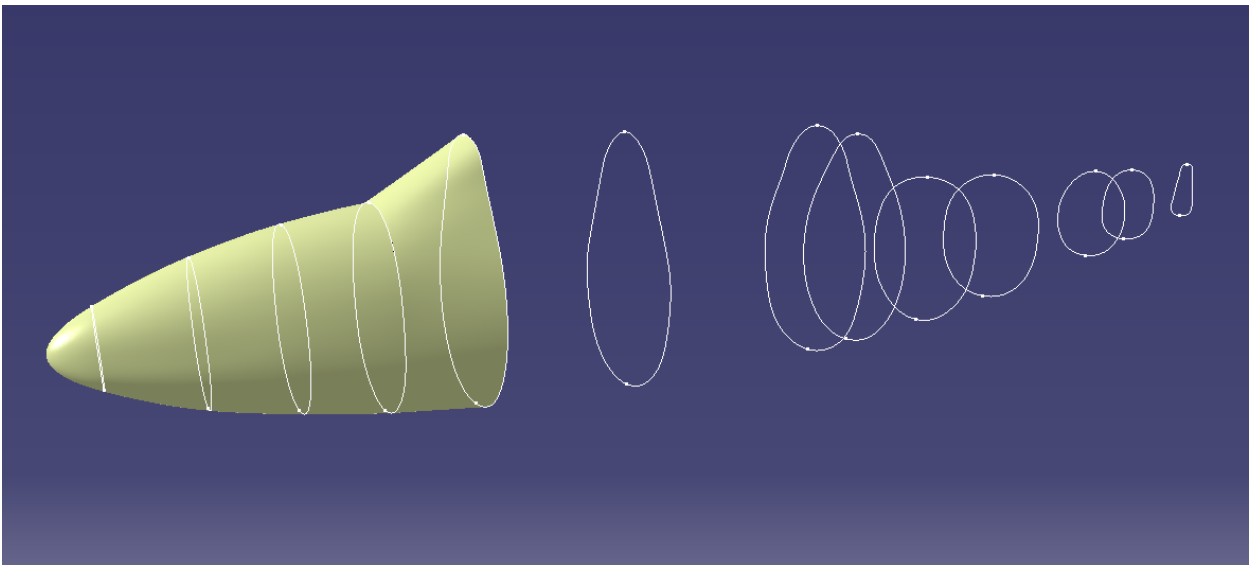


Figura 13 – Adición de la superficie de la sección del piloto del Kawasaki Ki-45 Nick

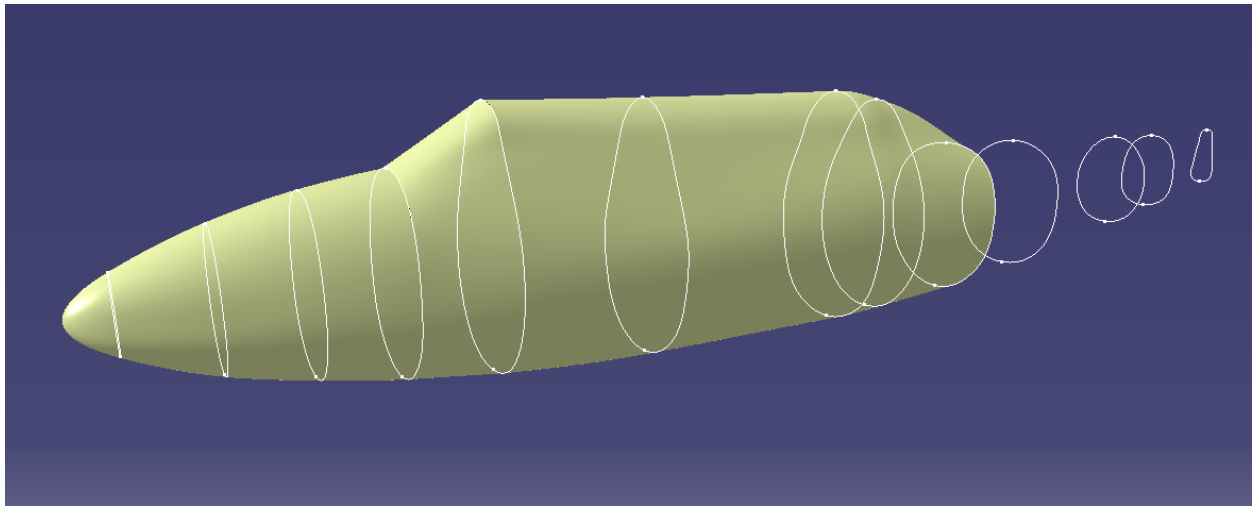


Figura 14 – Adición de la superficie de cabina del Kawasaki Ki-45 Nick

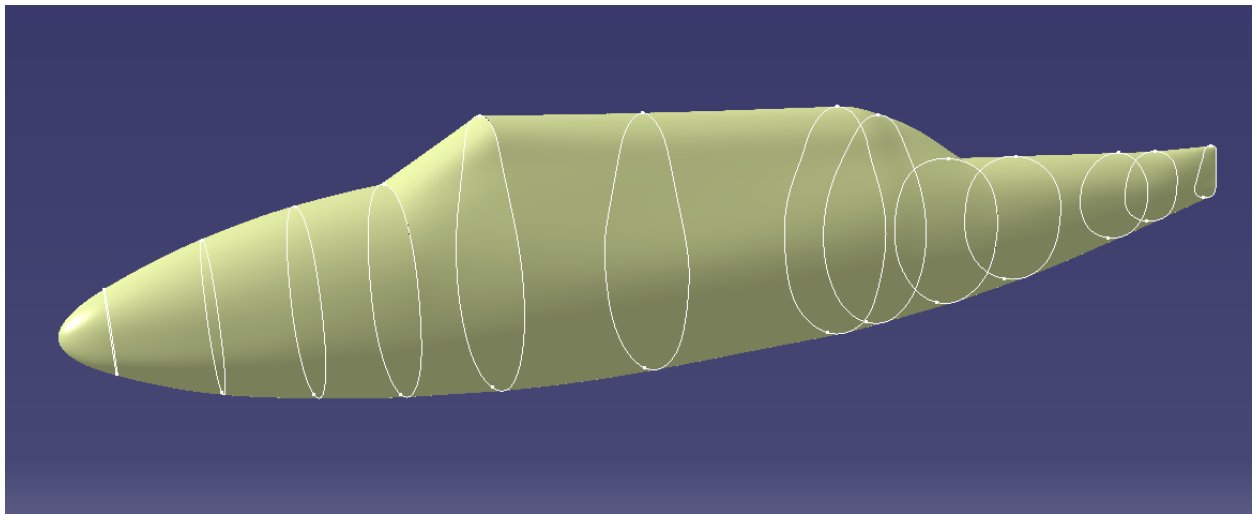


Figura 15 – Adición de la superficie de cola del Kawasaki Ki-45 Nick

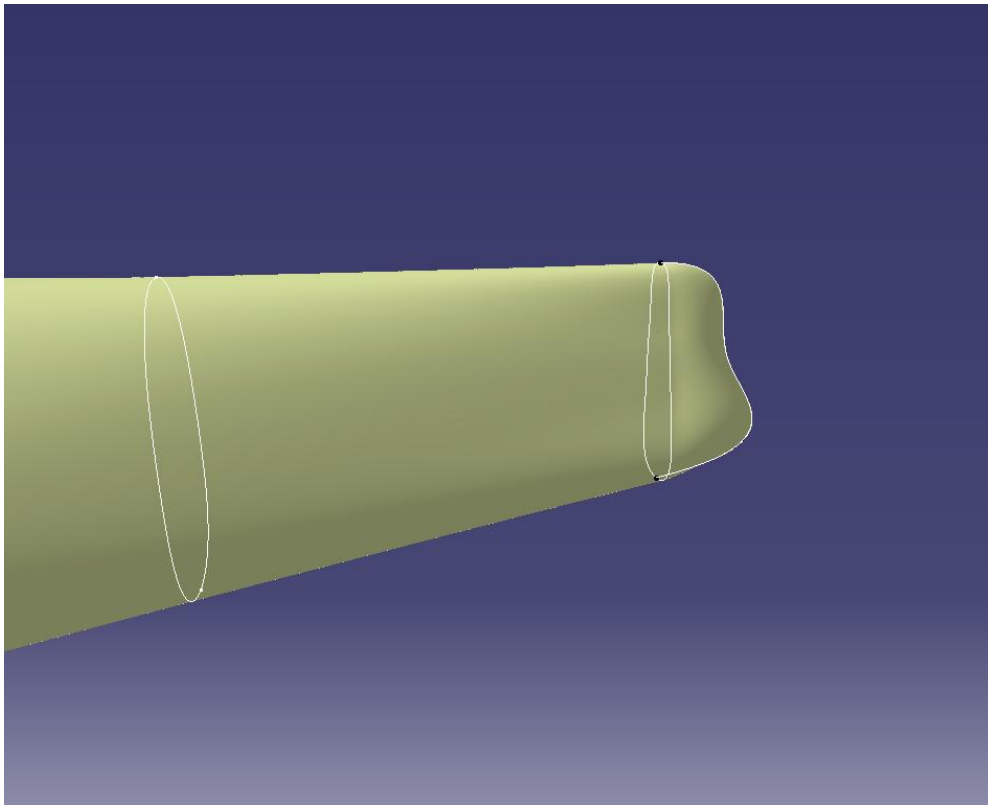


Figura 16 – Adición del cierre de cola del Kawasaki Ki-45 Nick

Tras unir todas las superficies con la herramienta *Join*, se creó el sólido usando la herramienta *Thick Surface* (Figura 17).

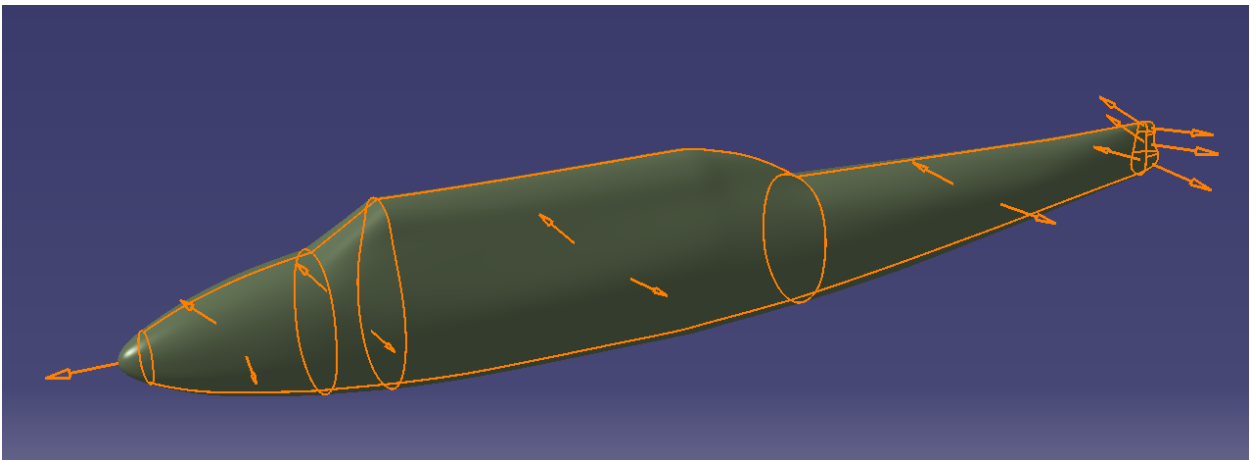


Figura 17 – Revestimiento bruto del Kawasaki Ki-45 Nick

2.2.1 Segunda iteración de la creación de las cuadernas del Kawasaki Ki-45 Nick

En este punto empieza la segunda iteración del modelado de las cuadernas, las cuales han sido creadas previamente con el uso de los planos tal y como se ha expuesto en el apartado anterior, Construcción del fuselaje.

Con esta segunda iteración se pretende mejorar la unión obtenida entre las cuadernas y las superficies, ya que tras la primera iteración se vio que dichas uniones no eran suaves y existían *gaps*.

Para proceder, se comenzó creando un *Pad* en cada una de las posiciones de las cuadernas construidas previamente, de tal manera que intersecara con la superficie interior del revestimiento del fuselaje, tal y como se muestra en la siguiente imagen (Figura 18).

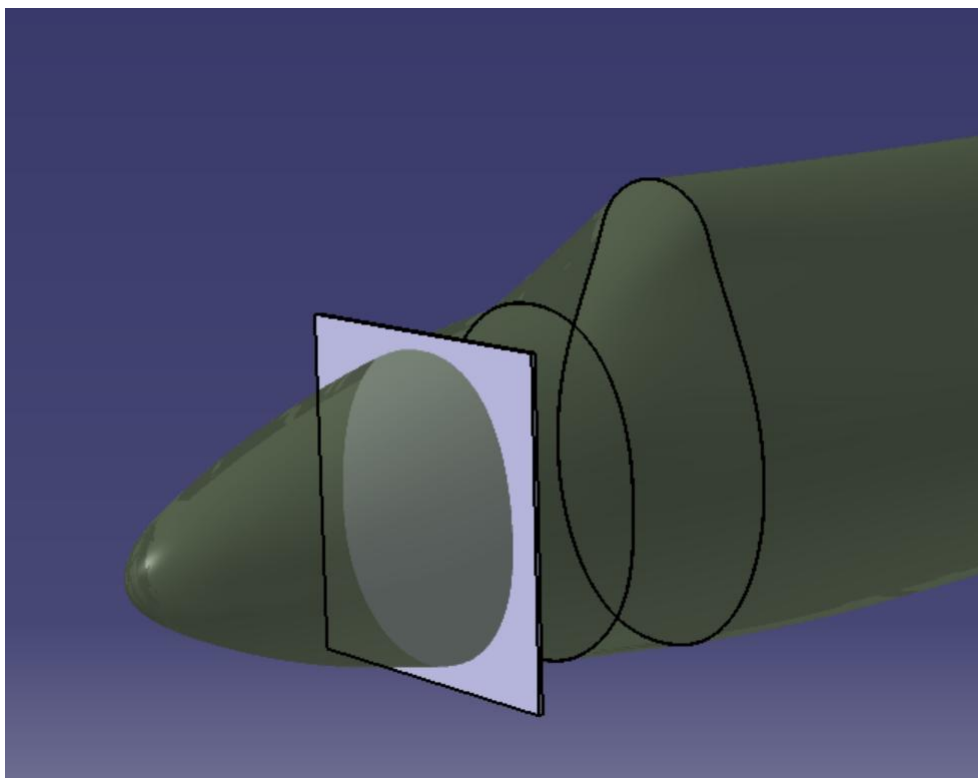


Figura 18 – Pad bruto de la tercera cuaderna superior del Kawasaki Ki-45 Nick

Una vez hecho el bruto de la cuaderna, mediante un *Split* con la superficie, se conseguía una unión perfecta entre la cuaderna y el revestimiento del fuselaje (véase la siguiente Figura 19).

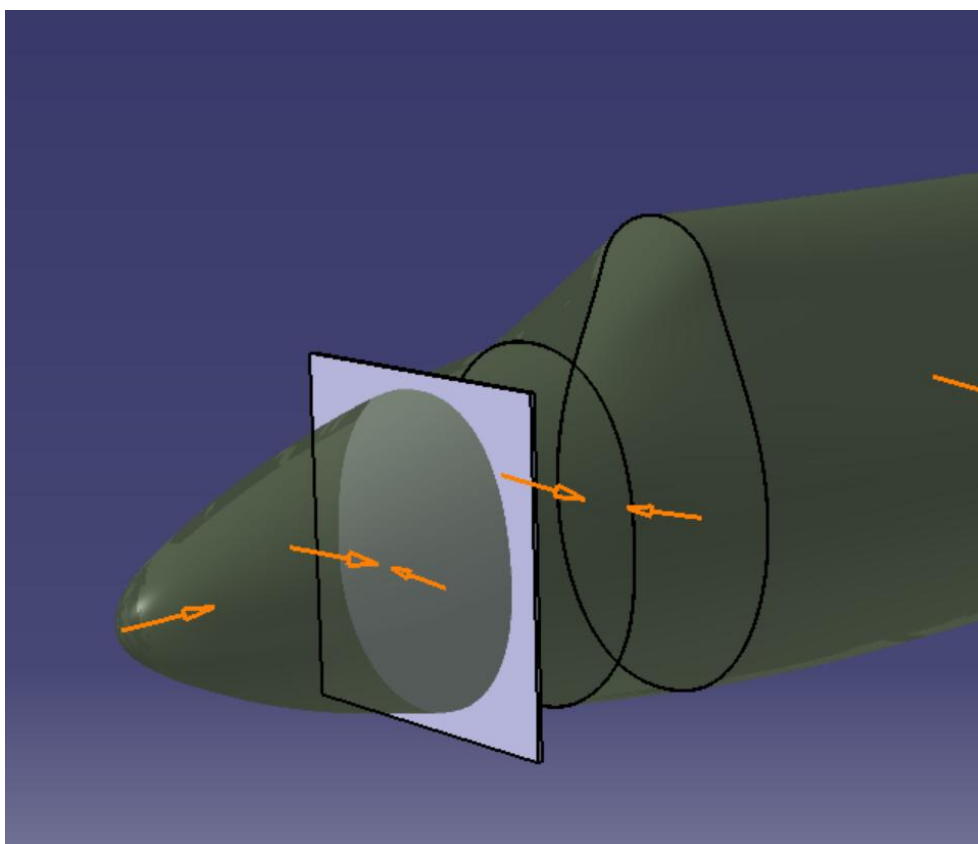


Figura 19 – Split de la tercera cuaderna superior del Kawasaki Ki-45 Nick

Haciendo esto para el resto de las cuadernas, el resultado es el mostrado en la Figura 20.

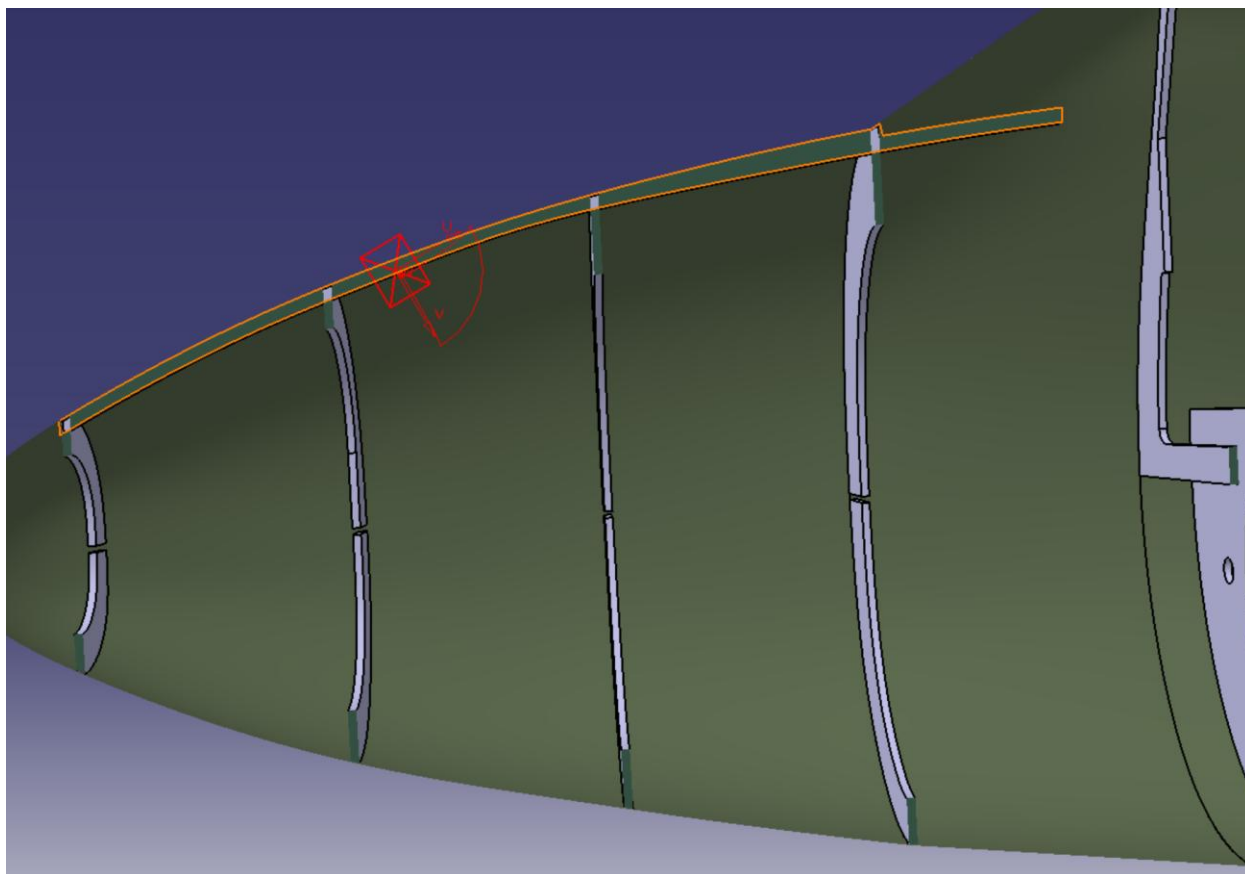


Figura 22 – Sección del primer larguero del Kawasaki Ki-45 Nick ajustado a la superficie

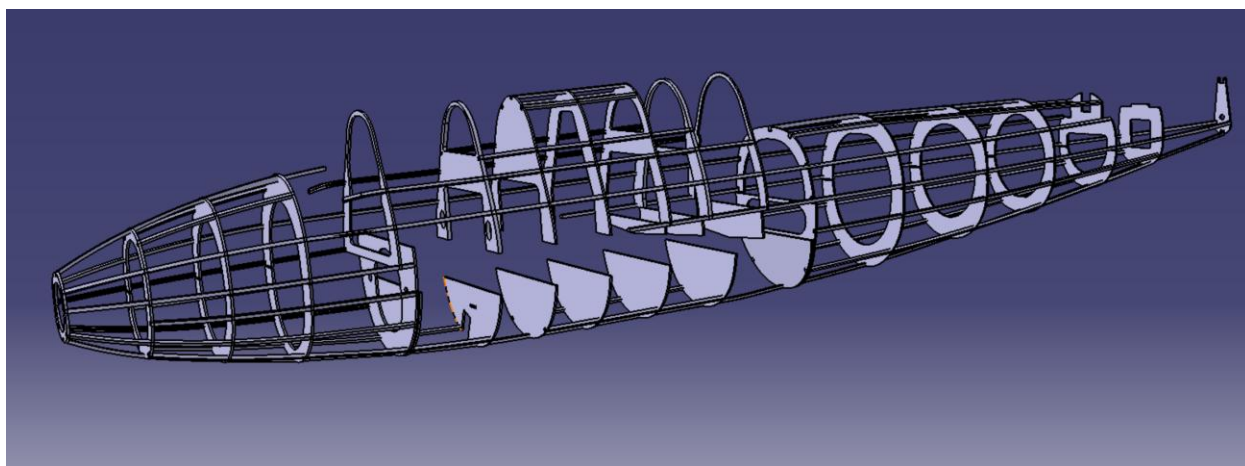


Figura 23 – Conjunto de cuadernas y largueros del Kawasaki Ki-45 Nicks

Una vez se tuvieron todos los largueros modelados, se procedió a preparar la unión entre largueros y cuadernas, de manera que la fijación entre ellos fuera posible. Para ello, se extrajeron las superficies exteriores de cada larguero de manera que se pudiera hacer un *Split* con cada cuaderna, quedando entonces el resultado expuesto en el siguiente apartado, **¡Error! No se encuentra el origen de la referencia.**, en lo que fue la tercera y última iteración de las cuadernas del fuselaje.

2.2.3 Tercera iteración de la creación de las cuadernas del Kawasaki Ki-45 Nick

En este apartado se finaliza la modelización de las cuadernas del Kawasaki Ki-45 Nick. Para ello, y como se ha mencionado anteriormente, es importante hacer posible la unión entre cuadernas y largueros. Para tener una interfaz perfectamente ajustada entre ambos, se extrajeron los planos límites de los largueros, quedando el resultado mostrado en la siguiente Figura 24.

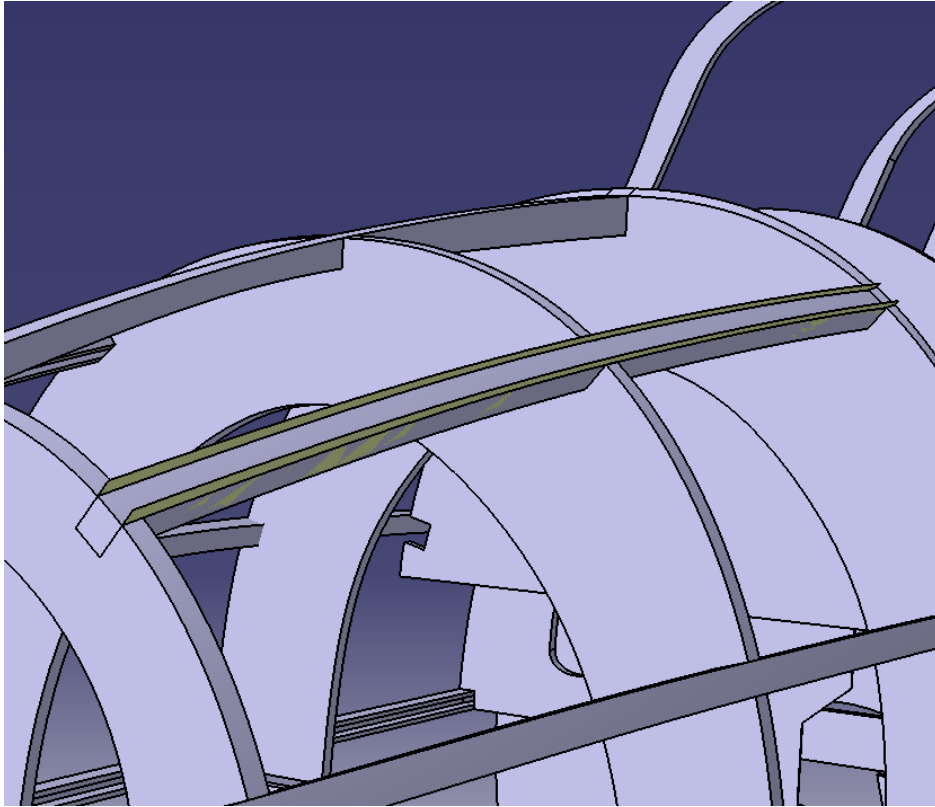


Figura 24 – Superficies extraídas de uno de los largueros del Kawasaki Ki-45 Nick

Así, teniendo estos planos de apoyo, y mediante el uso de la herramienta *Split*, se llega al siguiente resultado (Figura 25).

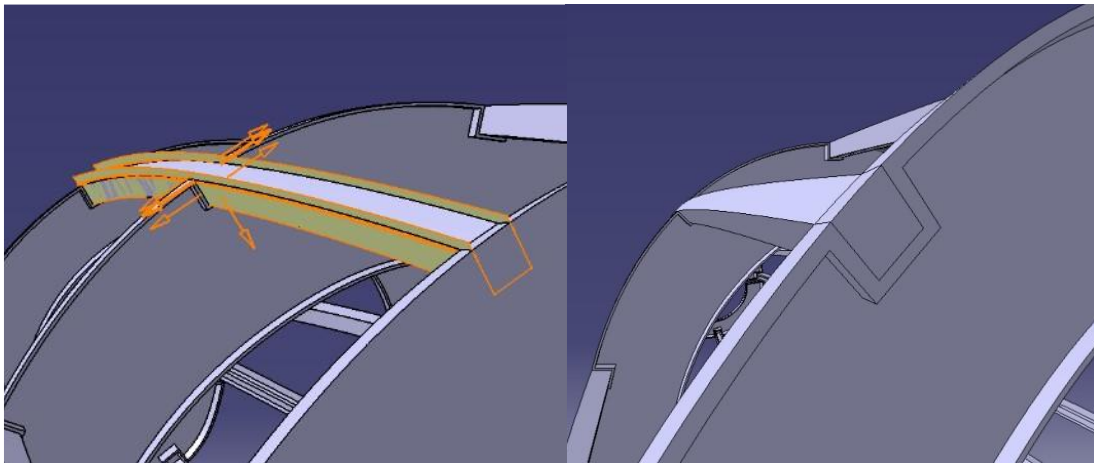


Figura 25 – Uso de *Split* para hacer la unión entre largueros y cuadernas del Kawasaki Ki-45 Nick

Finalmente, con el uso de la herramienta *Shell* en ambas piezas, se posibilitó la unión de ambas entre ellas y con la piel del Kawasaki Ki-45 Nick. Extrapolando esto al resto de largueros y cuadernas, quedó el siguiente resultado (Figuras 26 y 27).

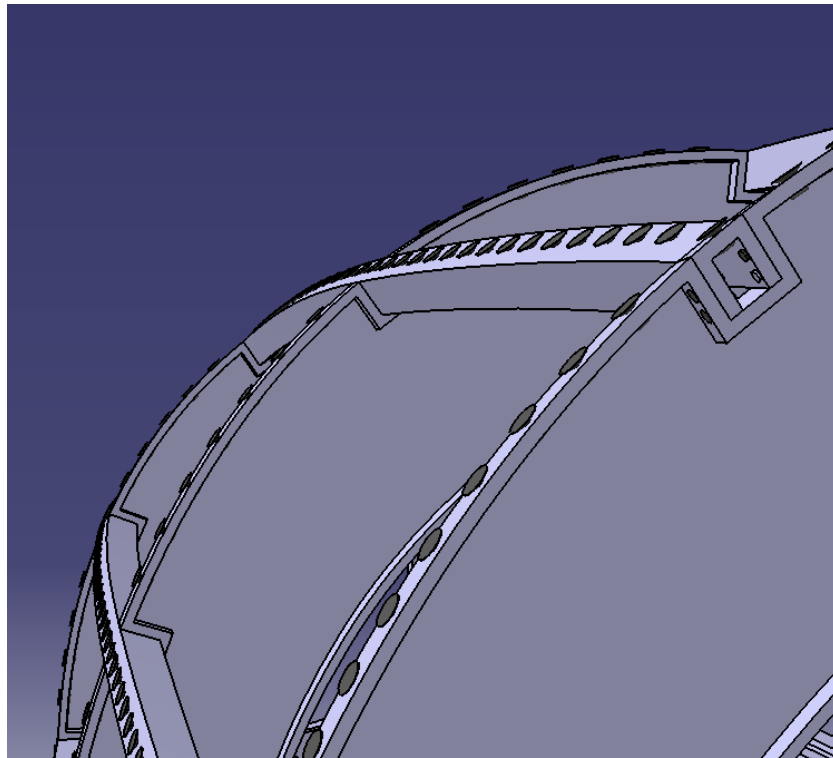


Figura 26 – Unión entre largueros y cuadernas con remaches del Kawasaki Ki-45 Nick

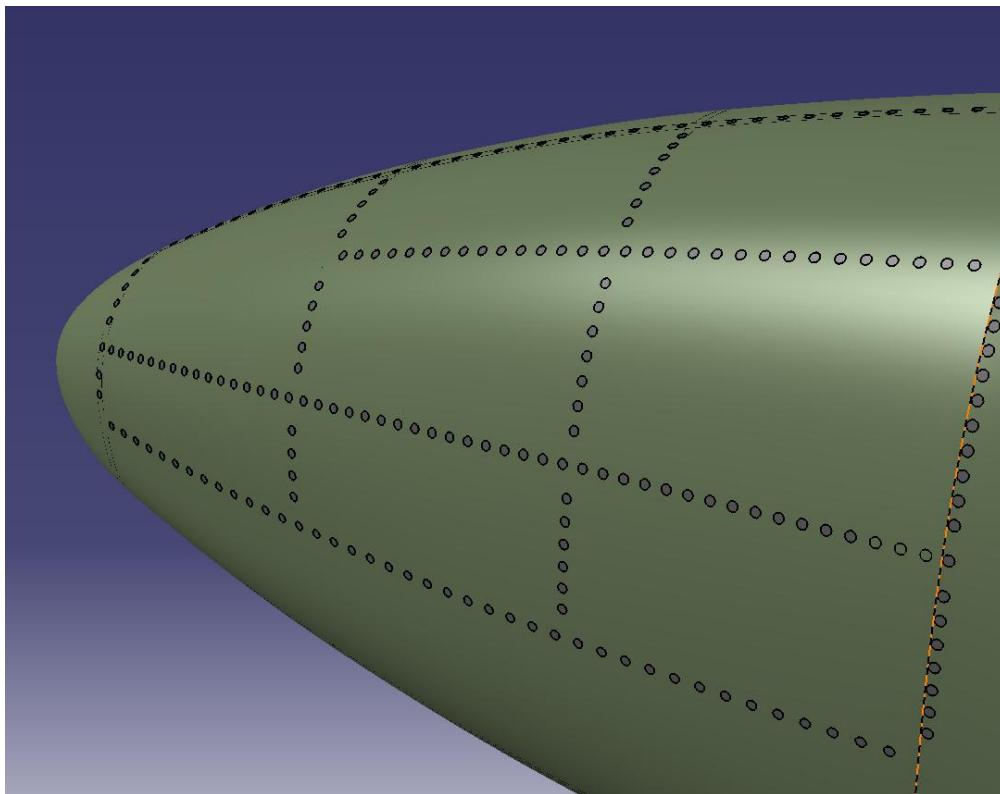


Figura 27 – Resultado final de la unión entre cuadernas, largueros y revestimiento del Kawasaki Ki-45 Nick

2.2.4 Modelado de las ventanas del Kawasaki Ki-45 Nick

En este punto se mostrará el modelado de las ventanas del Kawasaki Ki-45 Nick. Para ello, el procedimiento seguido ha sido el descrito a continuación.

Al sólido bruto del revestimiento que se modeló previamente, era necesario crearle las ventanas. Para ello, se realizaron las aperturas necesarias usando la herramienta *Pocket* dando lugar al resultado mostrado a continuación (Figura 28).

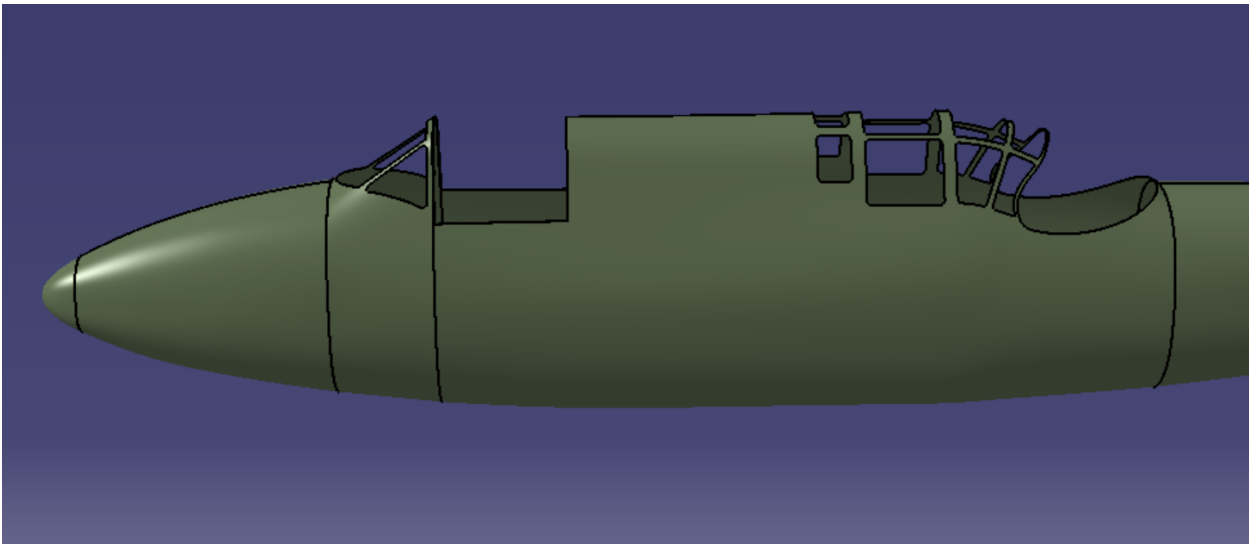


Figura 28 – Cortes generados en la superficie del Kawasaki Ki-45 Nick

Una vez hecho esto, y usando los cortes previamente mencionados, se extrajeron las superficies correspondientes a cada uno de los huecos cuyo destino era tener una ventana en él. Como se puede ver en la siguiente imagen (Figura 29), se tienen todas las superficies necesarias en este proceso.

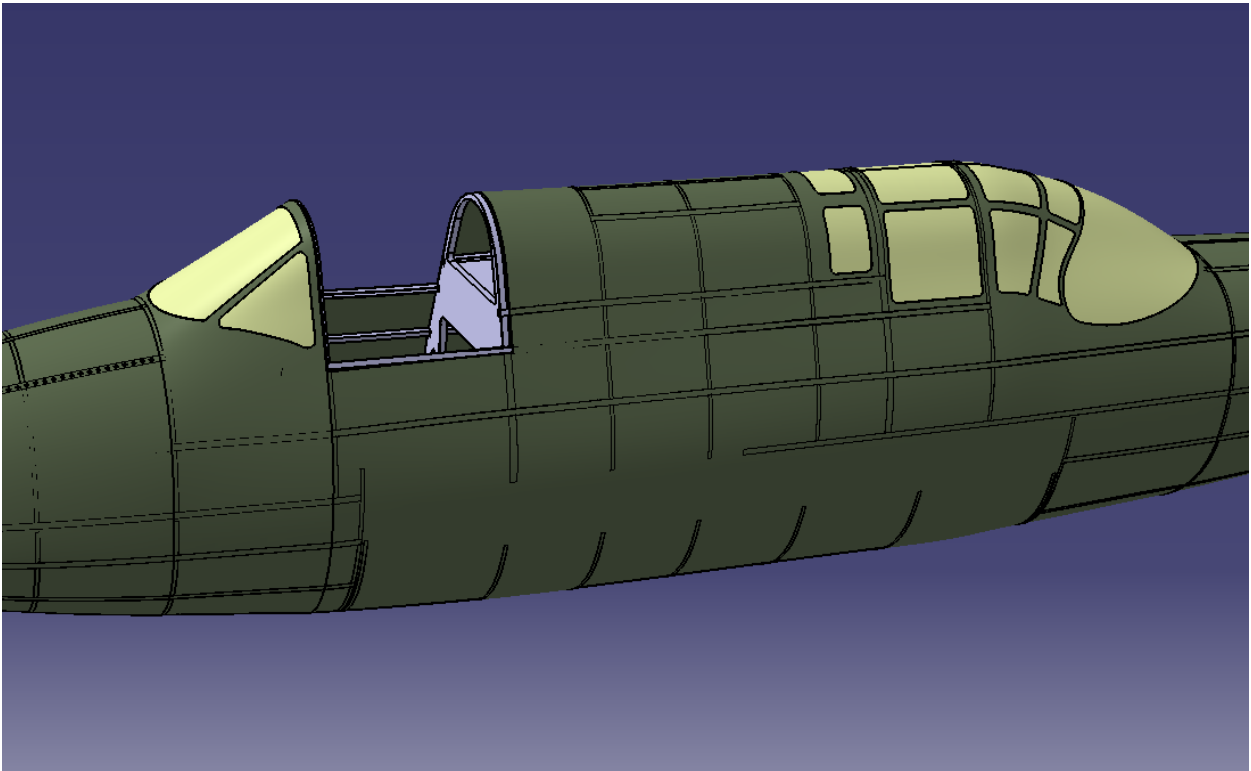


Figura 29 – Superficies utilizadas en la creación de las ventanas del Kawasaki Ki-45 Nick

Una vez se tuvieron todas las superficies, solo quedaba hacer un *ThickSurface* para dar espesor, crear los sólidos y darle transparencia de tal manera que se asemejara más a cómo debería verse una ventana (Figura 30).

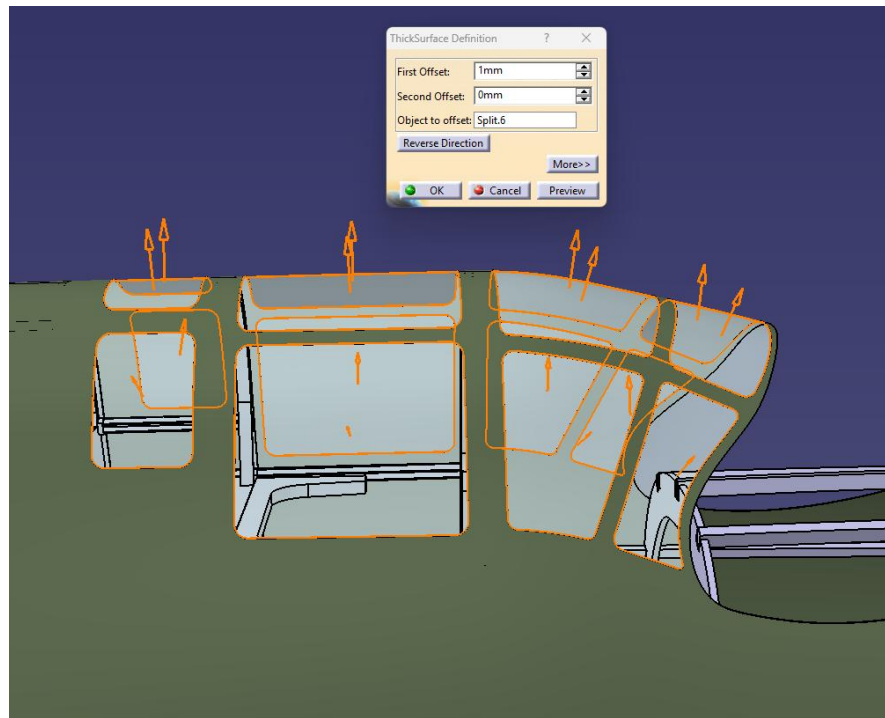


Figura 30 – *ThickSurface* para la creación de las ventanas del Kawasaki Ki-45 Nick

2.2.5 Creación de la compuerta del piloto del Kawasaki Ki-45 Nick

En este punto se mostrará el proceso seguido para la creación de la compuerta del piloto del Kawasaki Ki-45 Nick. Para ello, se usó la superficie original del fuselaje y mediante un *Split* se consiguió la sección requerida para esto (véase la siguiente Figura 31).

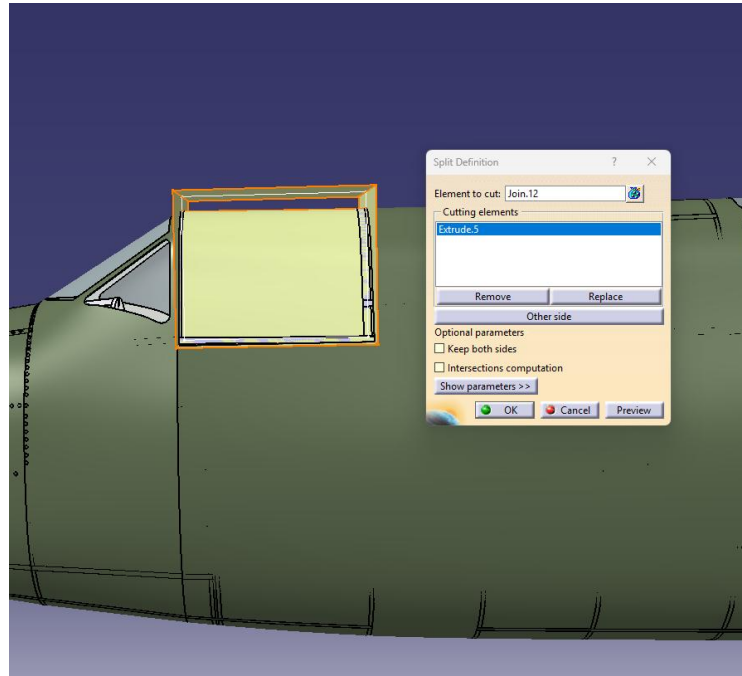


Figura 31 – Sección extraída con la herramienta *Split* para la compuerta del piloto del Kawasaki Ki-45 Nick

Tal y como se ha hecho con el resto de las superficies para crear el sólido, se ha usado la herramienta *ThickSurface*. En este caso, para poder hacer los cortes necesarios para las ventanas de la compuerta, se tomó la opción de la herramienta *MultiPocket* como se ve en la siguiente imagen (Figura 32).

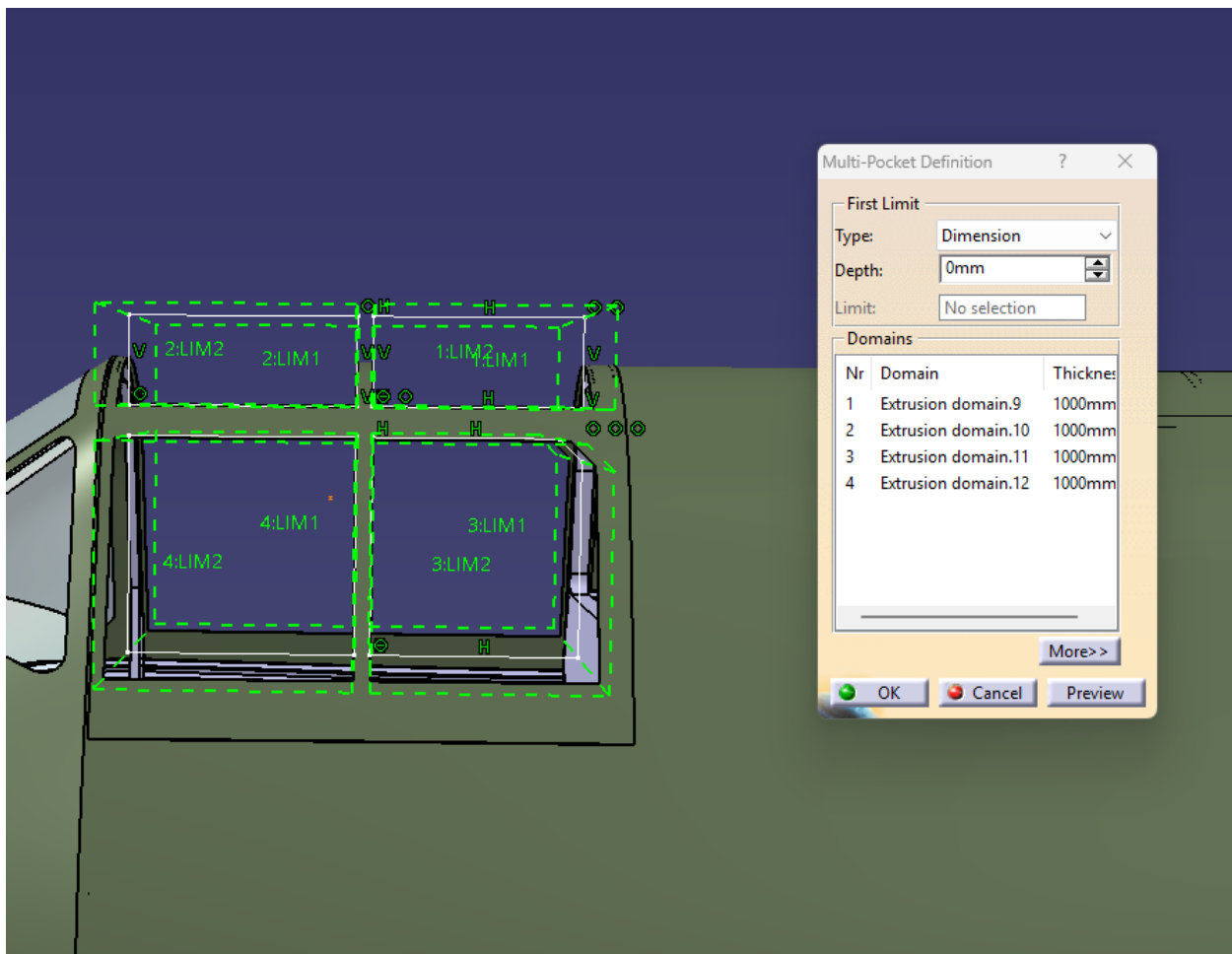


Figura 32 – Cortes de las ventanas de la compuerta del piloto del Kawasaki Ki-45 Nick

Igual que se ha hecho con el resto de las ventanas, el resultado de usar la herramienta *ThickSurface* para cada hueco es el mostrado a continuación (Figura 33).

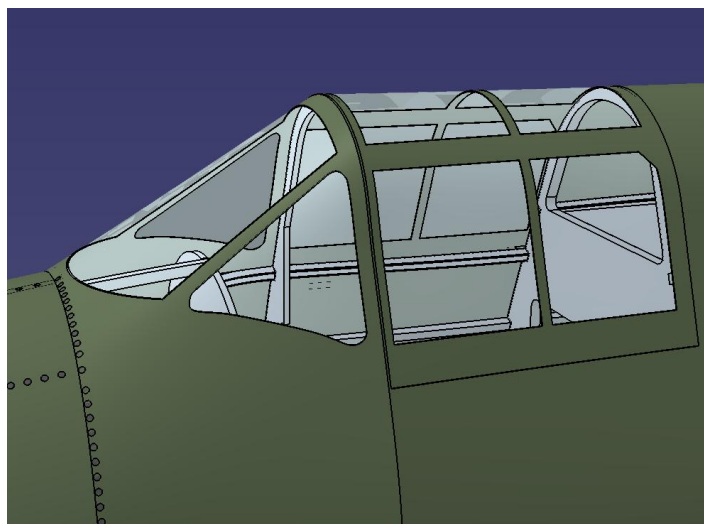


Figura 33 – Compuerta del piloto del Kawasaki Ki-45 Nick

2.2.6 Resultado final del fuselaje del Kawasaki Ki-45 Nick

Con todo lo expuesto en los apartados anteriores, en la siguiente imagen (Figura 34) se muestra el modelo final del fuselaje del Kawasaki Ki-45 Nick.

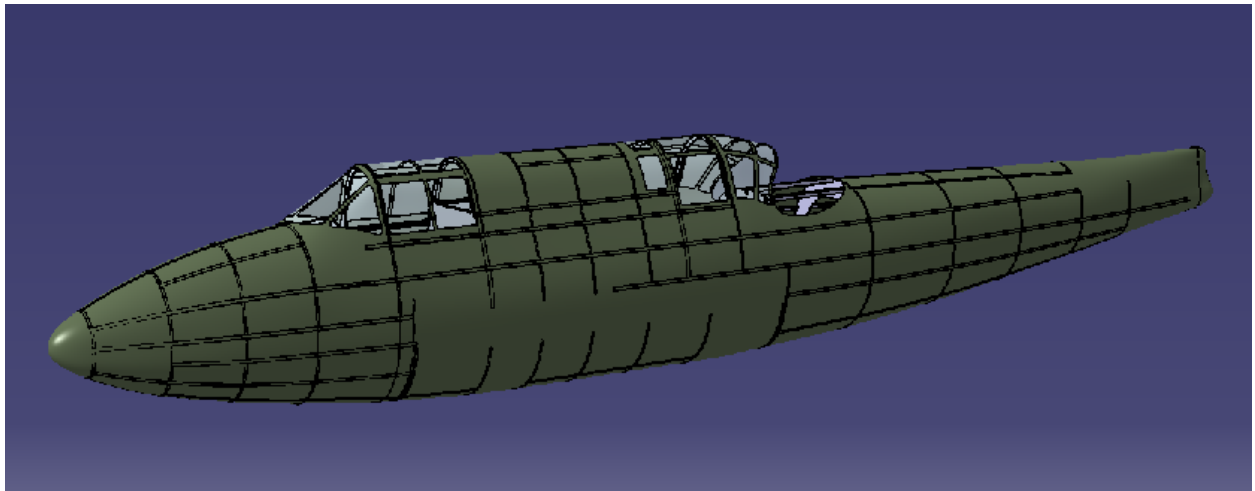


Figura 34 – Fuselaje final del Kawasaki Ki-45 Nick

2.3 Construcción de las alas

Este apartado reunirá el proceso completo que se ha seguido para la modelización de las alas del Kawasaki Ki-45 Nick. En él, se describirá el proceso para el ala izquierda, ya que el ala derecha será simplemente una copia simétrica de esta.

2.3.1 Creación de las costillas

Para este punto, se ha seguido el mismo procedimiento que en la construcción de las cuerdas del fuselaje, usando la herramienta *SketchTracer* para introducir el plano que contiene la información de las costillas y con la herramienta *Sketch* para ir creando cada una de ellas.

A continuación (Figura 35), se muestra el plano insertado en CATIA V5 para el proceso mencionado.

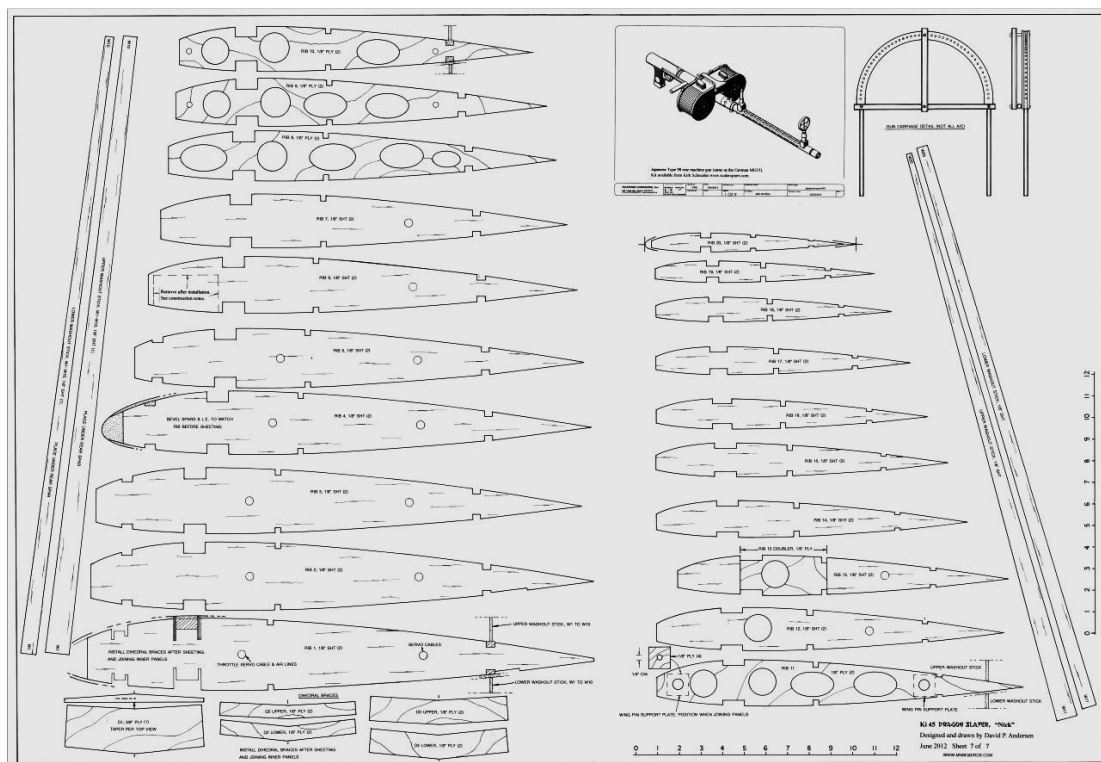


Figura 35 – Plano de las costillas de las alas del Kawasaki Ki-45 Nick

Calcando del perfil de la misma forma que con las cuerdas, y haciendo un *Pad* para crear el sólido, la primera versión de la costilla 20 quedó como se puede ver en la siguiente figura (Figura 36).



Figura 36 – Modelo bruto de la costilla 20 de las alas del Kawasaki Ki-45 Nick

Y extrapolando esto a todas las demás costillas, queda el siguiente resultado (Figura 37).

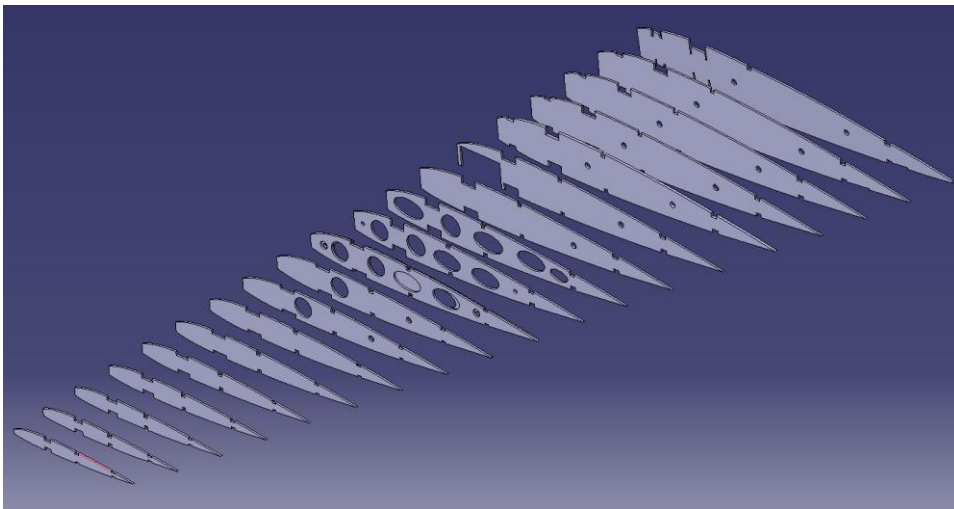


Figura 37 – Costillas del ala izquierda del Kawasaki Ki-45 Nick

2.3.2 Creación del revestimiento

Para este caso, se usó la herramienta *Multi-Sections Surface* con 3 perfiles para hacer la superficie lo más homogénea posible (véase la Figura 38).

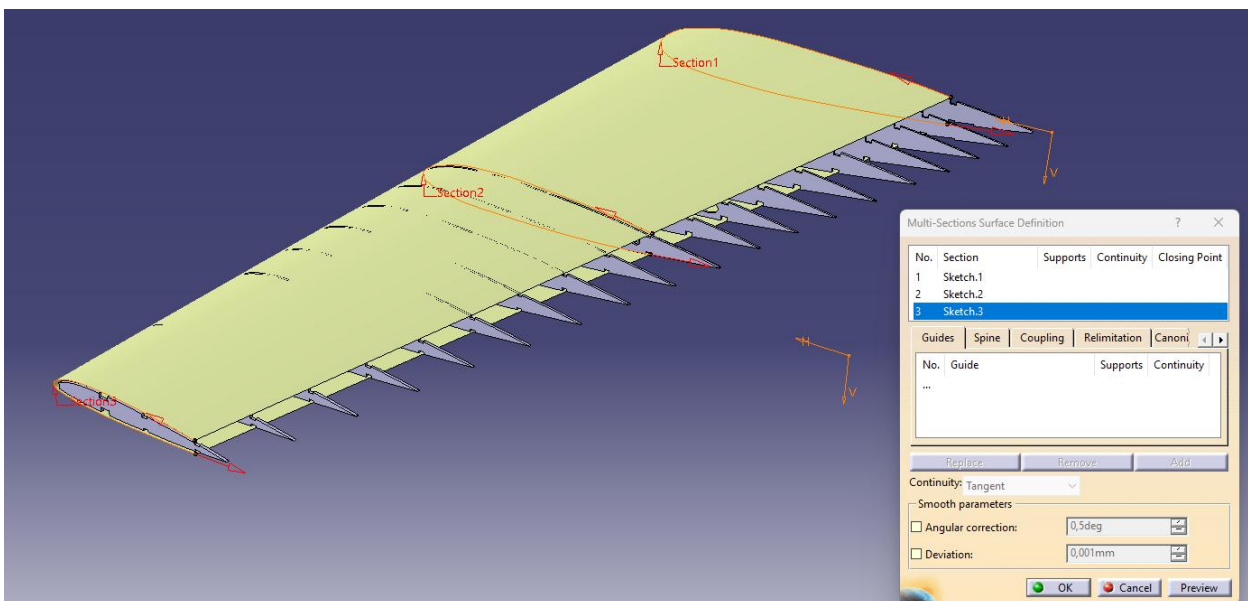


Figura 38 – Superficie principal del ala izquierda del Kawasaki Ki-45 Nick

Tras esto, se pasó a la creación de la zona de punta de ala. Este caso era algo más complejo, ya que superficies

con tanta curvatura a menudo dan errores durante su creación en CATIA V5. Es por ello por lo que se optó por crearla por partes, haciendo así más sencillo su cálculo para el software.

La primera sección, que se muestra a continuación en la Figura 39, fue conformada usando la herramienta *Multi-Sections Surface* usando dos perfiles perpendiculares entre ellos.

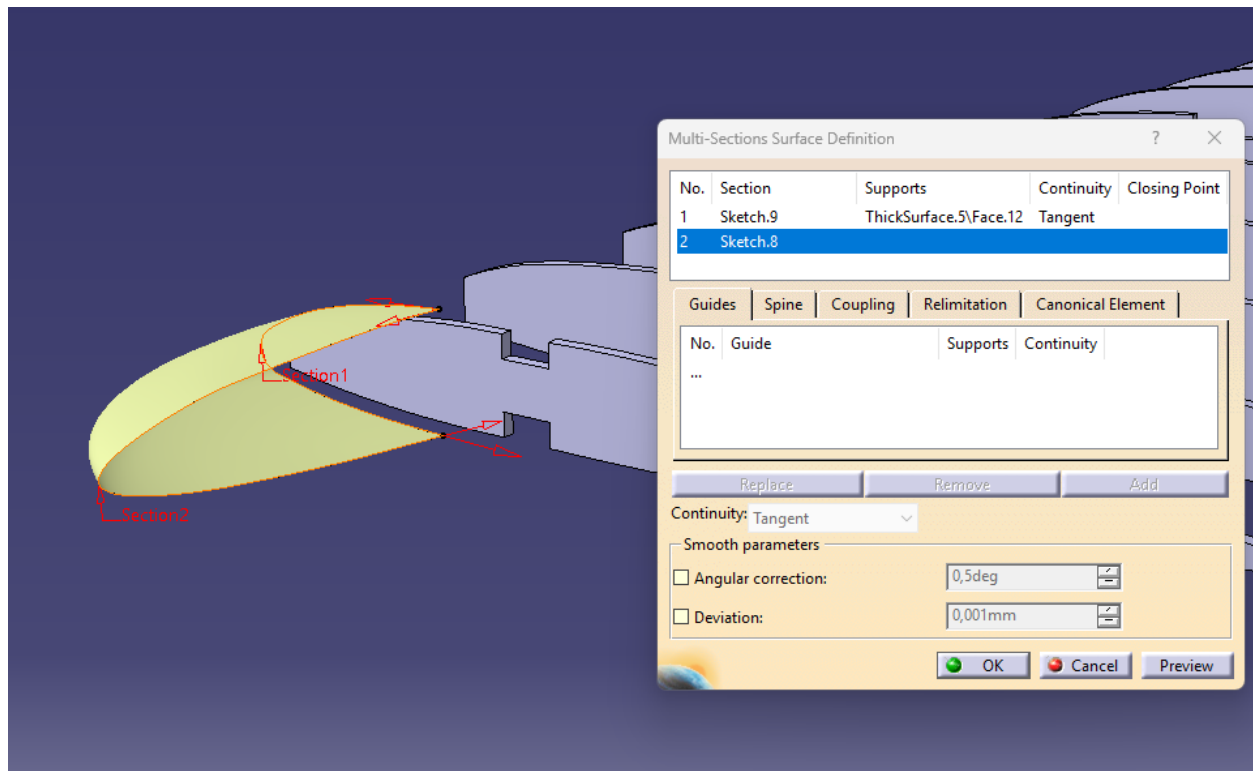


Figura 39 – Primera sección de la superficie de punta de ala del Kawasaki Ki-45 Nick

Para la segunda sección se siguió el mismo método, como se muestra en la siguiente imagen (Figura 40).

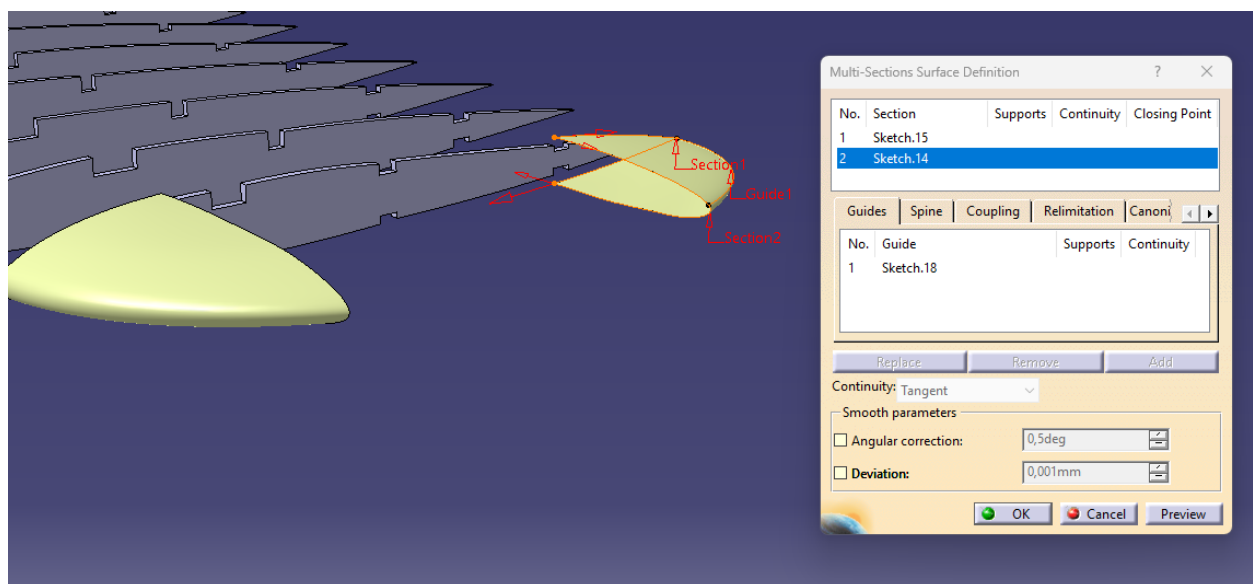


Figura 40 – Segunda sección de la superficie de punta de ala del Kawasaki Ki-45 Nick

La tercera sección, la intermedia entre las creadas hasta ahora, sigue el mismo proceso y se puede ver el resultado a continuación en la Figura 41.

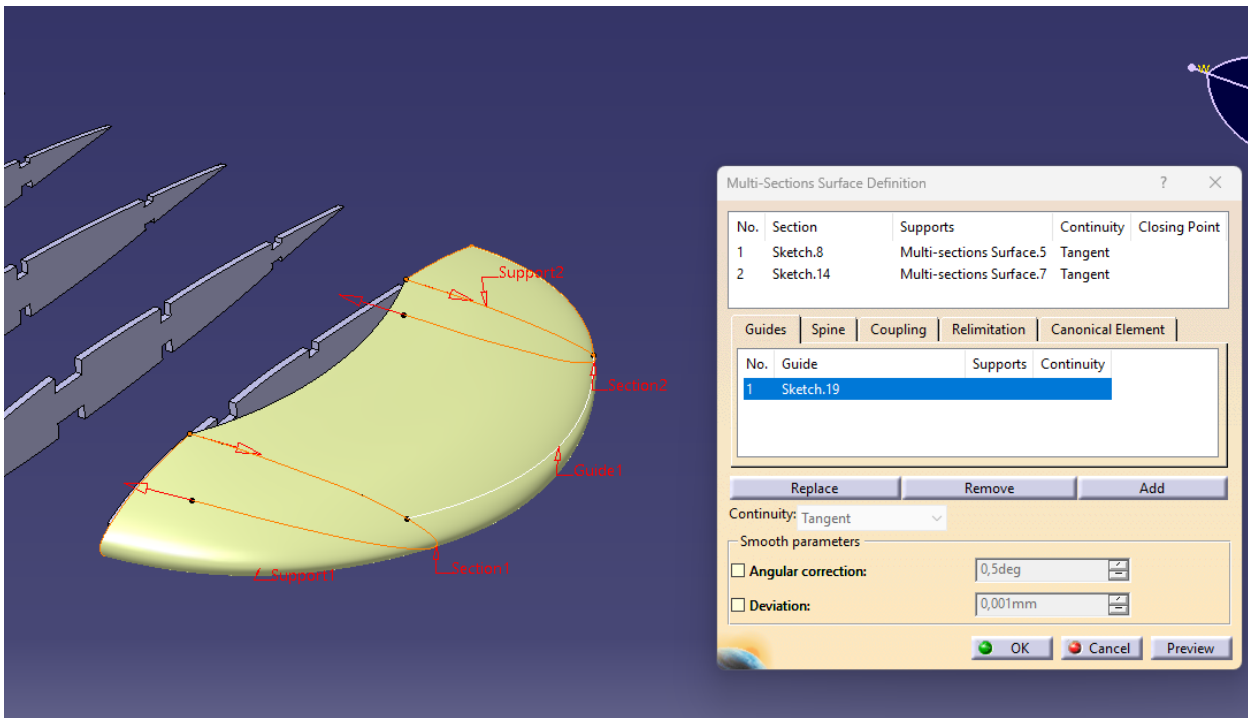


Figura 41 – Tercera sección de la superficie de punta de ala del Kawasaki Ki-45 Nick

Se puede observar que, en esta última superficie creada, existe una zona que no está completa. Esto se debe a la potencia de cálculo de CATIA V5. En ocasiones, si el cambio de forma entre las secciones es muy abrupto, especialmente con continuidad tangente, el software no es capaz de encontrar una solución válida para todo el dominio. Es por ello por lo que una solución típica en estos casos es usar la herramienta *Fill* para poder cerrar la superficie.

En la siguiente figura (Figura 42) se muestra la superficie de punta de ala terminada.

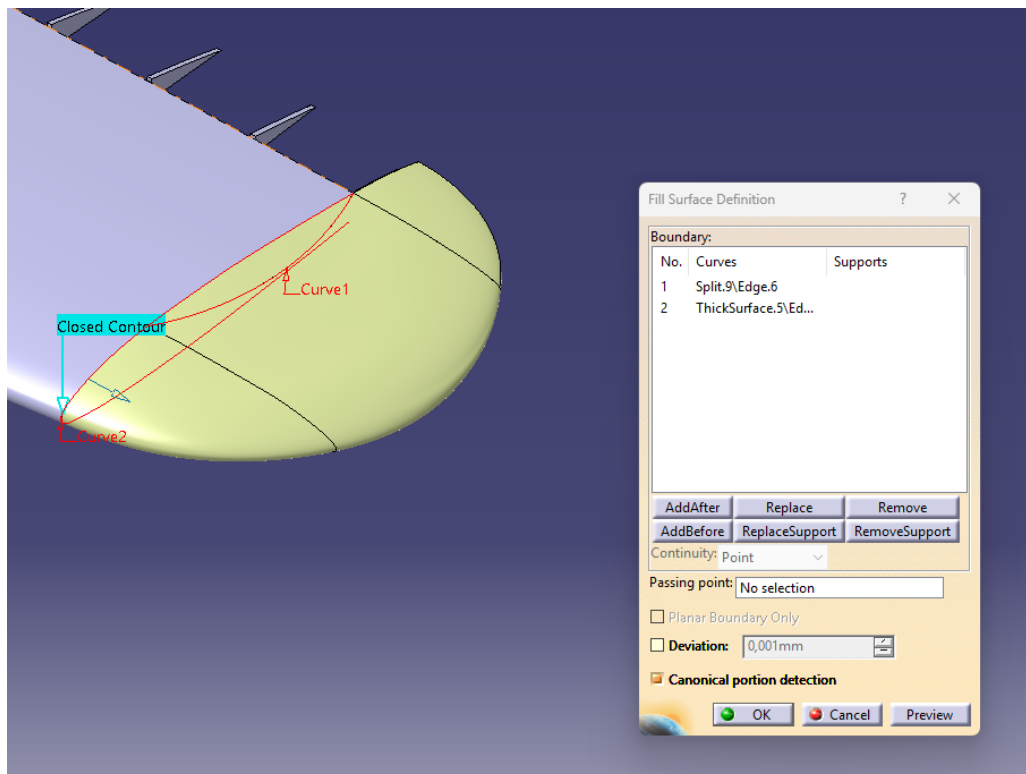


Figura 42 – Superficie de punta de ala del Kawasaki Ki-45 Nick

Una vez se tiene tanto la superficie principal del ala y la punta de ala, como parte fija del ala sólo queda modelar la zona del extradós del flap. Así, usando de nuevo la herramienta *Multi-Sections Surface*, se obtuvo el siguiente

resultado (Figura 43).

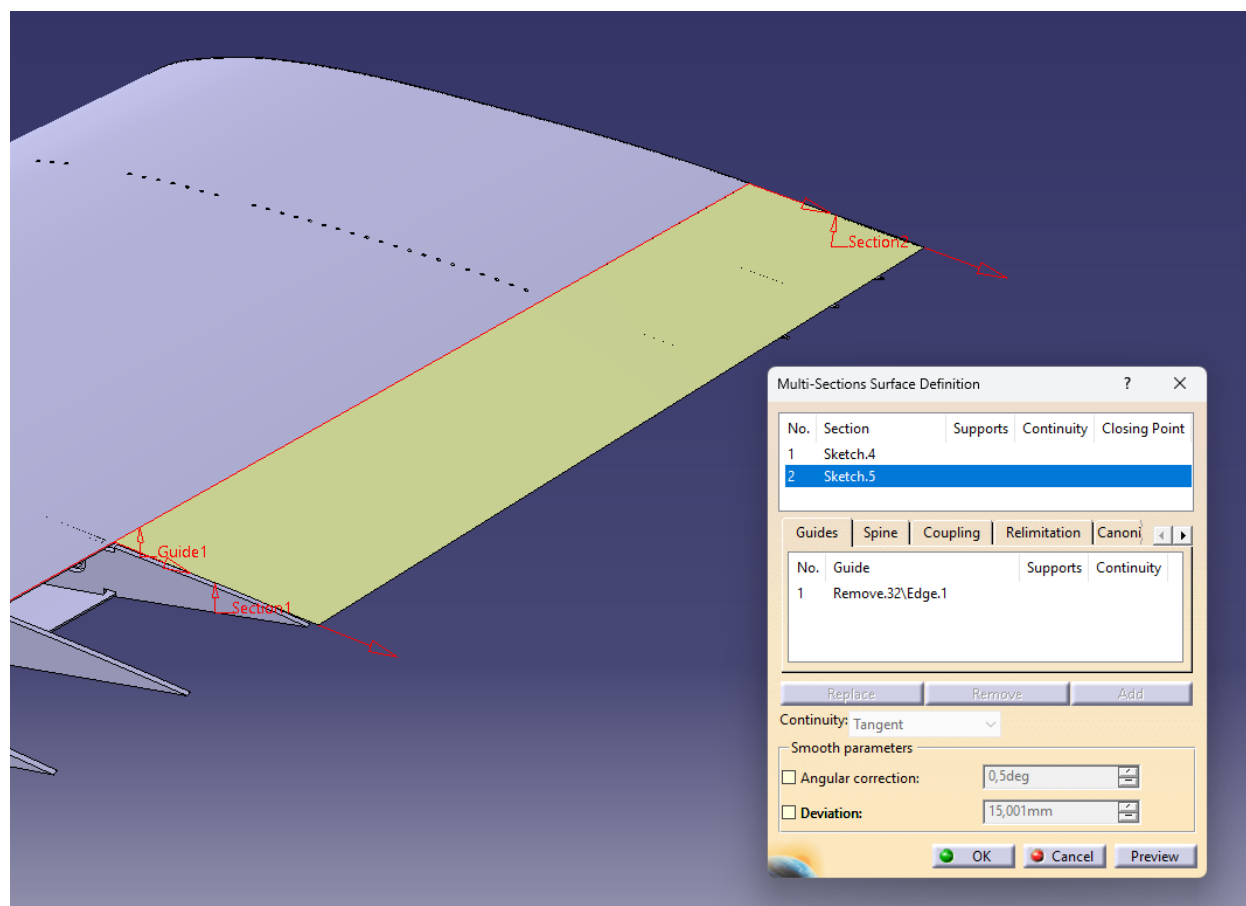


Figura 43 – Superficie superior de la zona del flap del ala del Kawasaki Ki-45 Nick

Para finalizar con el revestimiento del ala, se aplicó *ThickSurface*, consiguiendo el revestimiento final (véase la Figura 44).

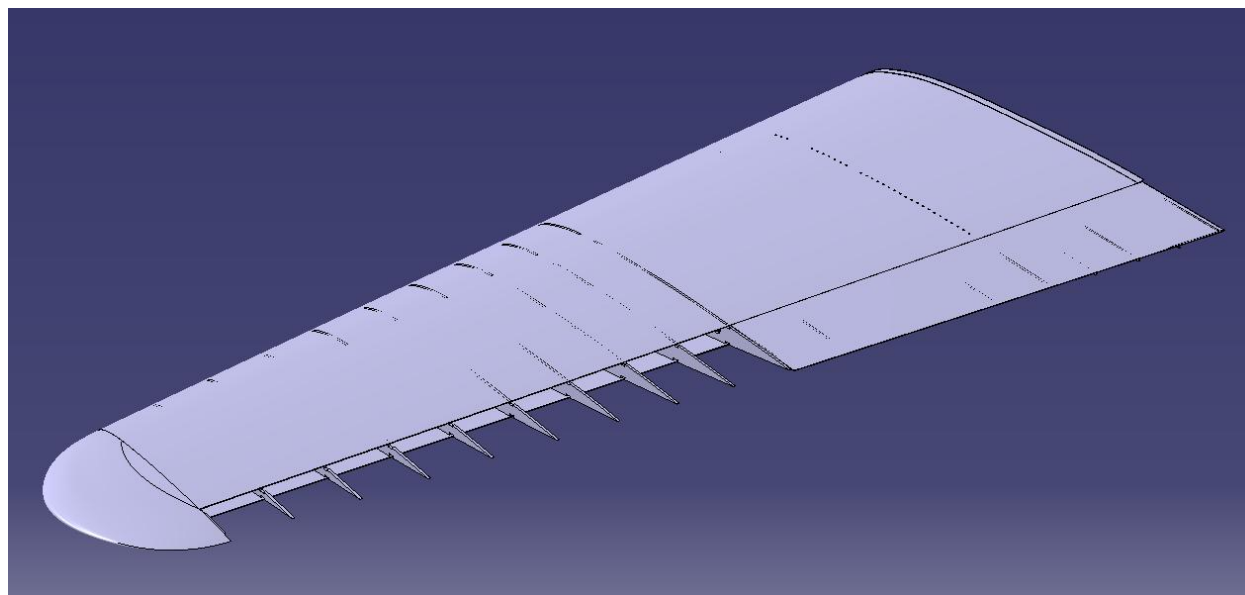


Figura 44 – Revestimiento del ala del Kawasaki Ki-45 Nick

2.3.3 Segunda iteración de la creación de las costillas

En este apartado se muestra un proceso homólogo al que se hizo para las cuadernas del fuselaje. El motivo de esto es el mismo, hacer que las costillas queden perfectamente ajustadas al revestimiento, en este caso, del ala. En la siguiente figura (Figura 45) se puede ver el *gap* que existe entre la costilla y la piel del ala actualmente.

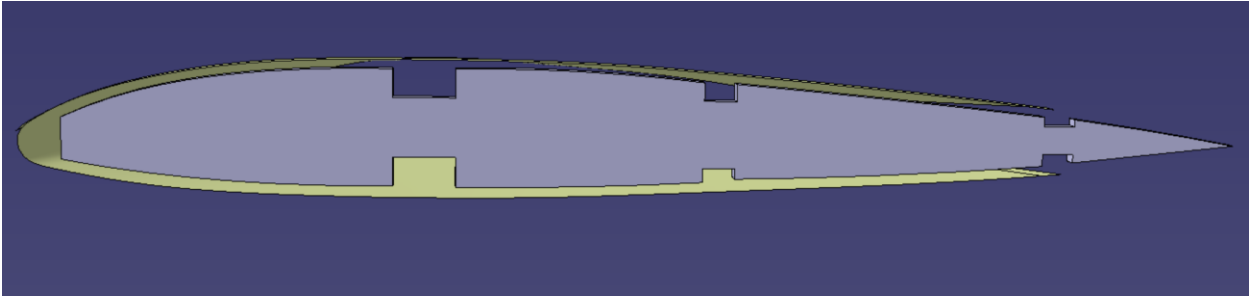


Figura 45 – Costilla 20 antes de la segunda iteración del ala del Kawasaki Ki-45 Nick

Además de ajustar la costilla a la superficie, es necesario hacer que, desde la costilla 20 hasta la costilla 11, la parte final de estas se eliminen para formar parte, posteriormente, del alerón. A continuación (Figura 46), se puede ver el resultado de las peticiones descritas, quedando la costilla ajustada al revestimiento del ala y con el final libre para el alerón.

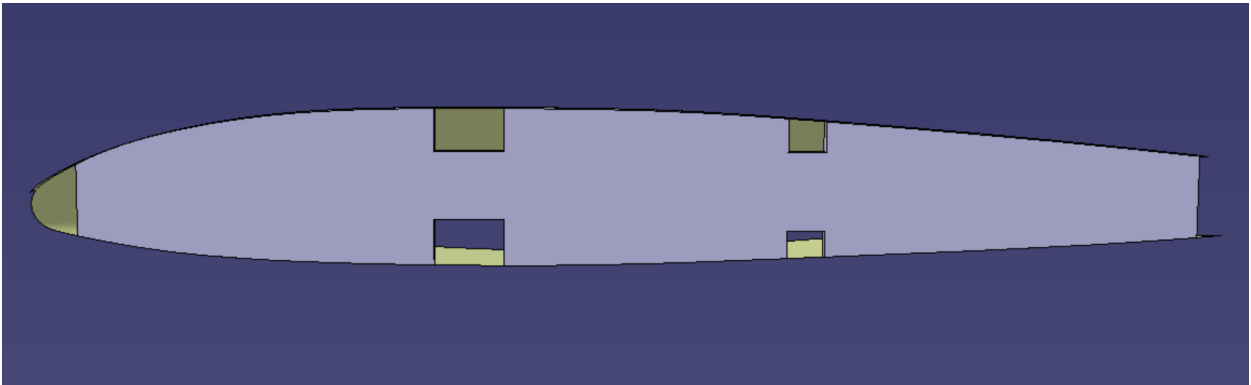


Figura 46 – Costilla 20 tras la segunda iteración del ala del Kawasaki Ki-45 Nick

Haciendo el resto de las costillas de la misma forma, el resultado de esta iteración es el siguiente (Figura 47).

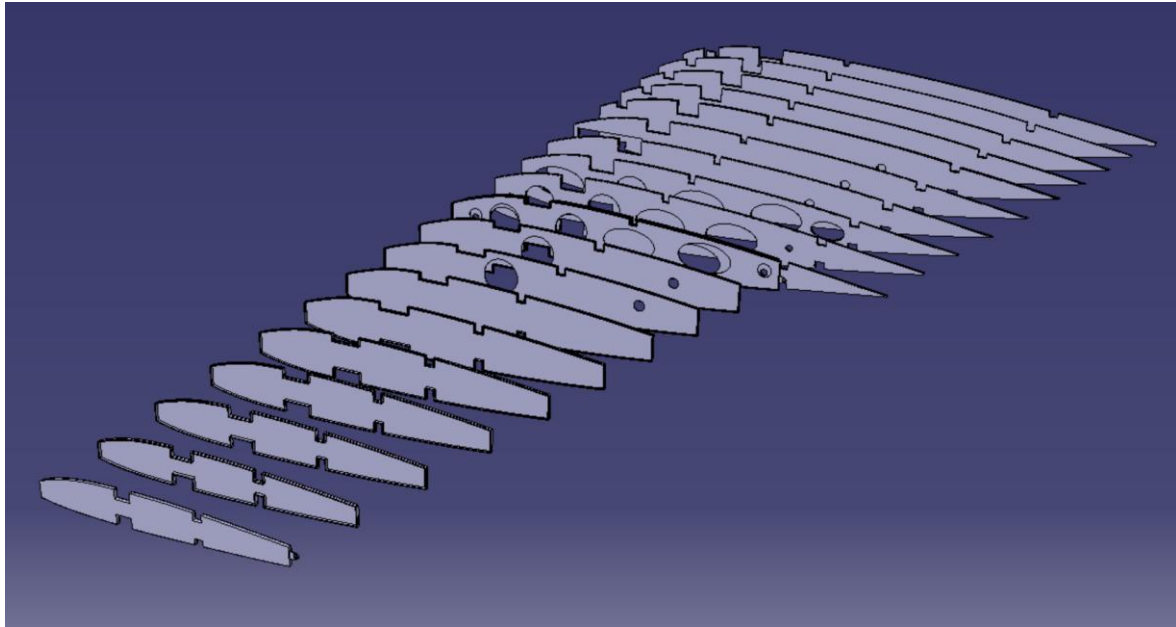


Figura 47 – Costillas del ala del Kawasaki Ki-45 Nick tras la segunda iteración de su modelado

Esto permitió hacer las uniones remachadas entre superficie y costillas como se ilustra en la siguiente figura (Figura 48).

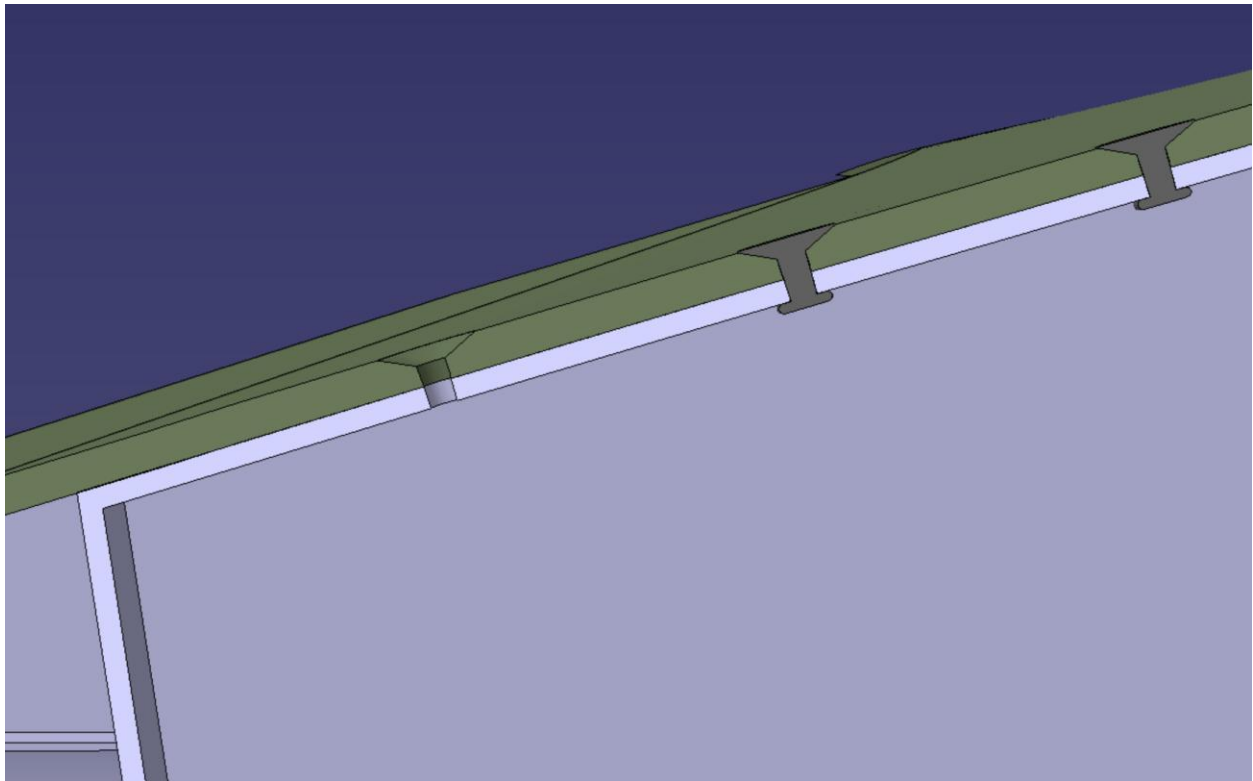


Figura 48 – Detalle de la unión remachada entre costillas y revestimiento del ala del Kawasaki Ki-45 Nick
Para la unión remachada fue necesario hacer el modelo de un remache con la altura exacta del sándwich entre revestimiento y costilla (véase la Figura 49).



Figura 49 – Remache usado en las uniones revestimiento-costilla en el ala del Kawasaki Ki-45 Nick
Tras arreglar el problema existente con las costillas, se pasó al modelado de los largueros, larguerillos y borde de ataque. Para ello, se siguió el mismo procedimiento que el que se siguió en el modelado de los largueros del fuselaje. Para no sobrecargar el estudio, simplemente se mostrará el resultado del ala con el conjunto de la estructura modelada (Figura 50).

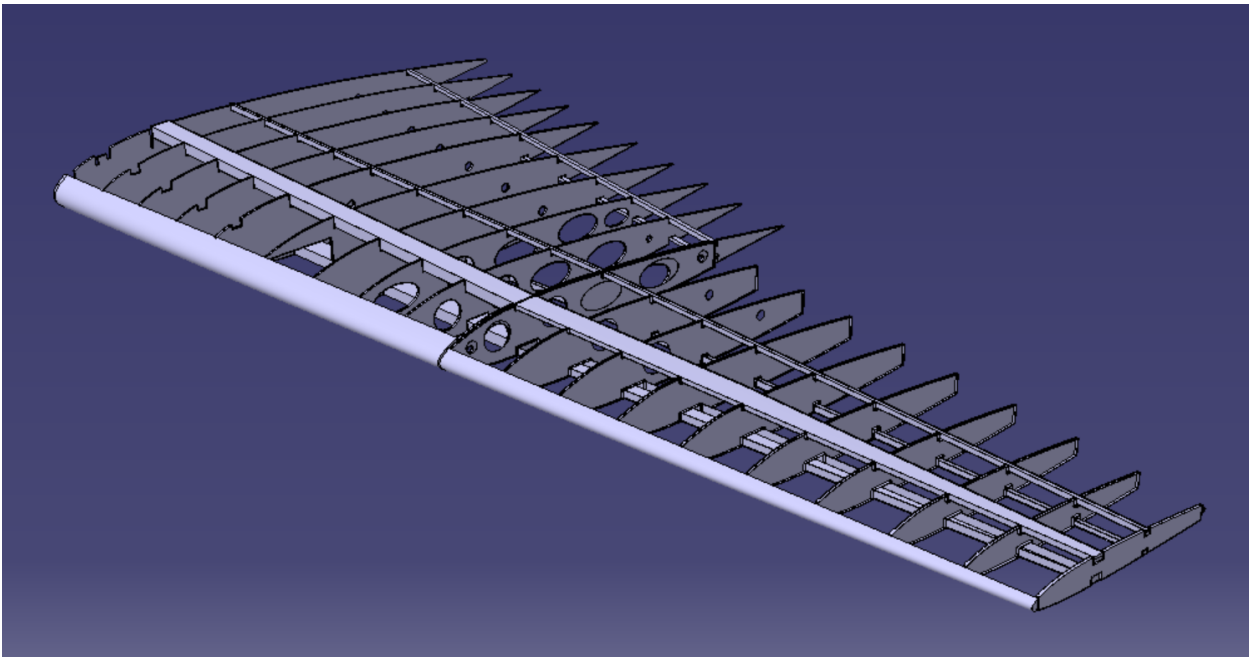


Figura 50 – Conjunto estructural del ala del Kawasaki Ki-45 Nick

Que, uniéndolo al revestimiento del ala, se tiene el resultado de la Figura 51.

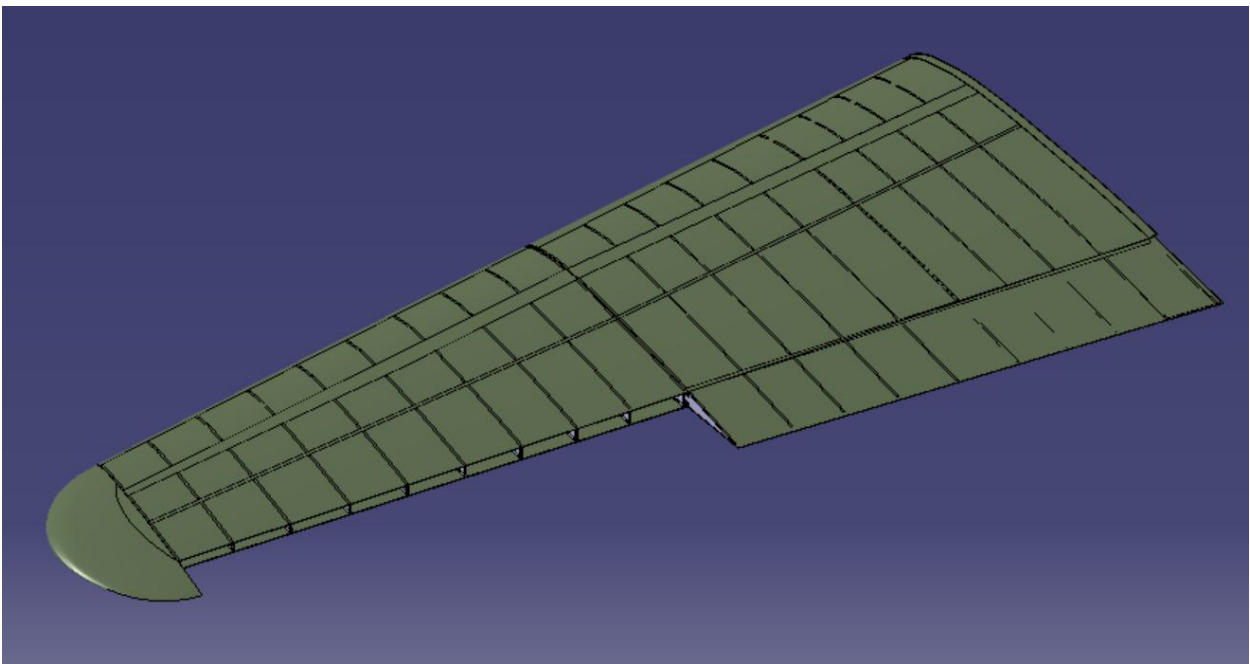


Figura 51 – Conjunto estructural del ala del Kawasaki Ki-45 Nick con el revestimiento

2.3.4 Creación del alerón

La creación del alerón se llevó a cabo usando la herramienta *Multi-Sections Surface*, como se puede ver en la Figura 52.

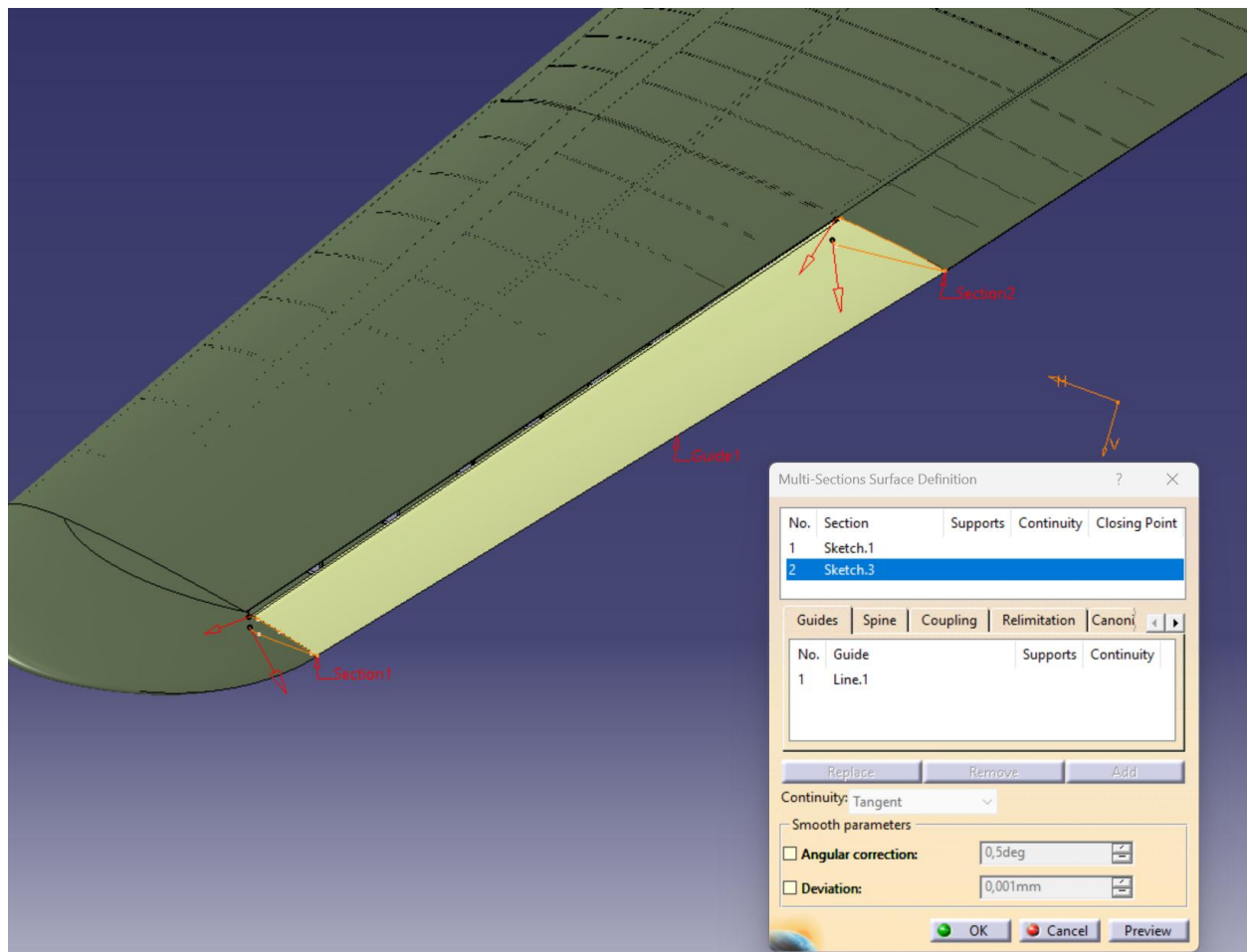


Figura 52 – Superficie del alerón del Kawasaki Ki-45 Nick

Tras esto, y como se ha hecho hasta ahora, usando la herramienta *ThickSurface* se le dio espesor al alerón. En la Figura 53 se puede observar el revestimiento del alerón.

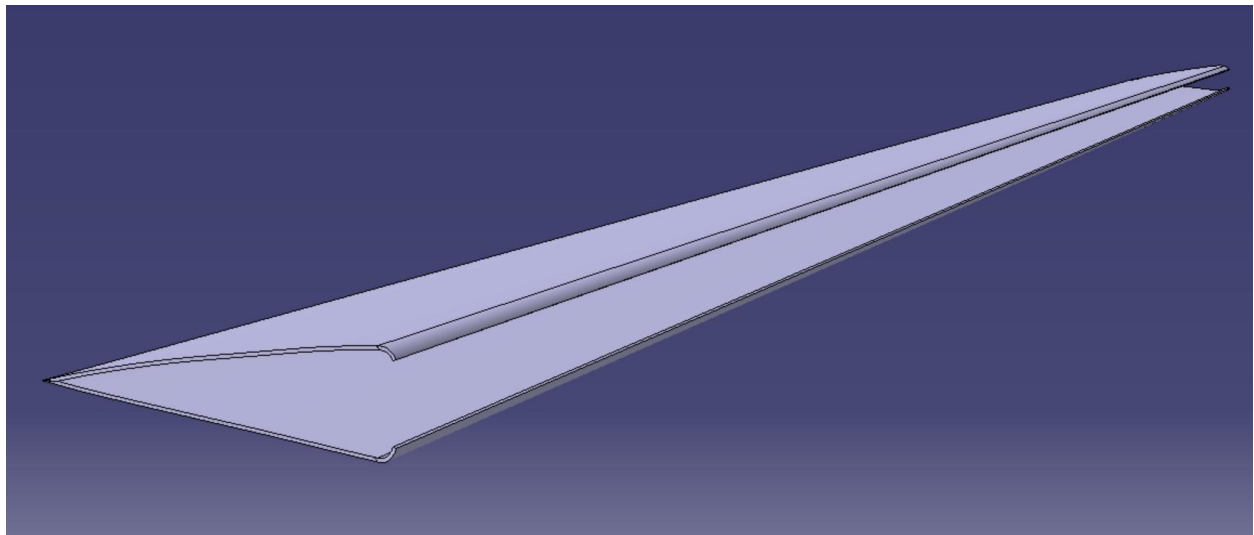


Figura 53 – Revestimiento del alerón del Kawasaki Ki-45 Nick

Una vez se tuvo el revestimiento, era necesario crear las costillas correspondientes a los cortes hechos en las costillas de la 11 a la 20 del ala. Se creó un sólido bruto e intersecándolo con las superficies internas del revestimiento del alerón, quedó el resultado mostrado en la Figura 54.

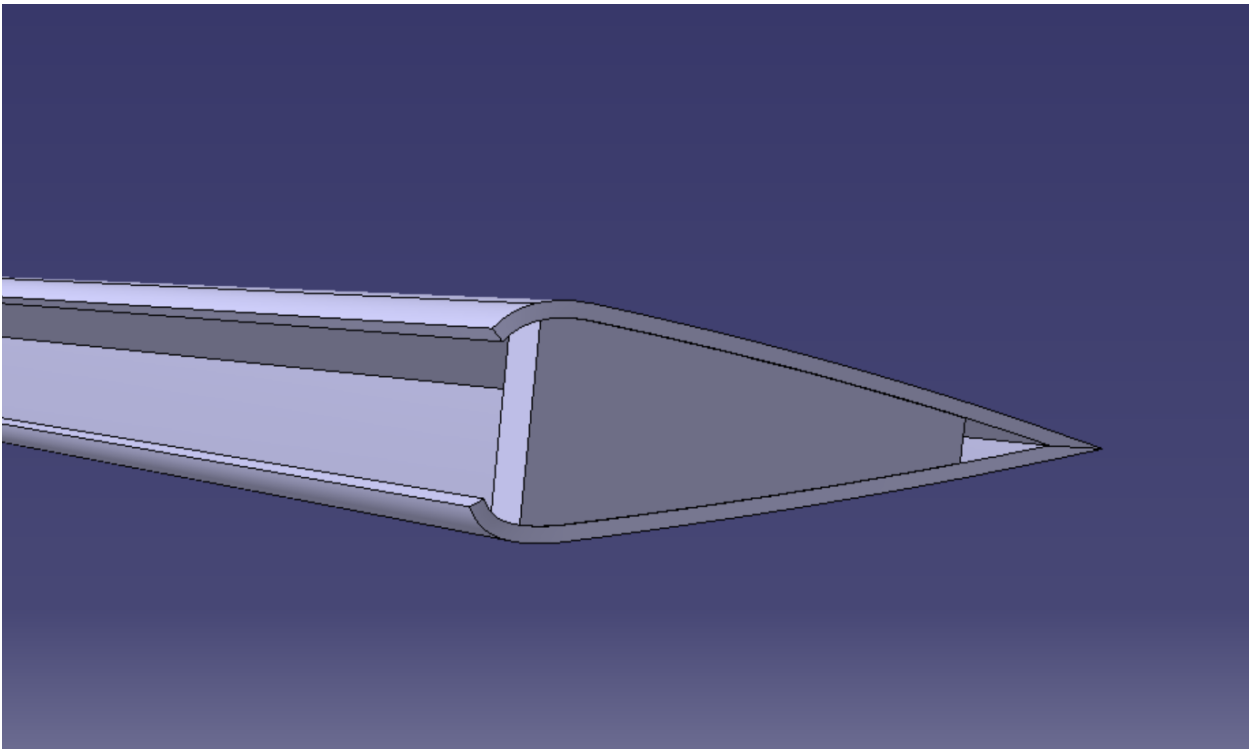


Figura 54 – Sólido bruto de la costilla 20 del alerón del Kawasaki Ki-45 Nick

Tras haber creado el bruto del sólido, mediante la herramienta *Shell* se le hizo un vaciado a la costilla y, siguiendo el mismo proceso descrito para el remachado, quedó el resultado de la Figura 55.

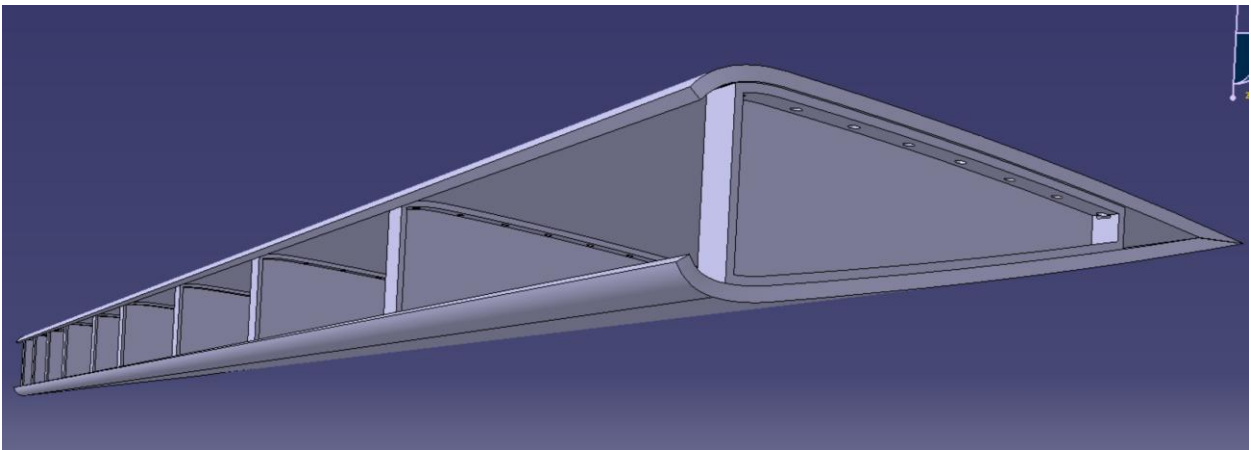


Figura 55 – Conjunto de costillas y revestimiento del alerón del Kawasaki Ki-45 Nick

Por último, para crear la unión móvil entre el alerón y el ala del Kawasaki Ki-45 Nick, se añadió un eje entre ambos que permitiría el giro, el cual se puede apreciar en la Figura 56.

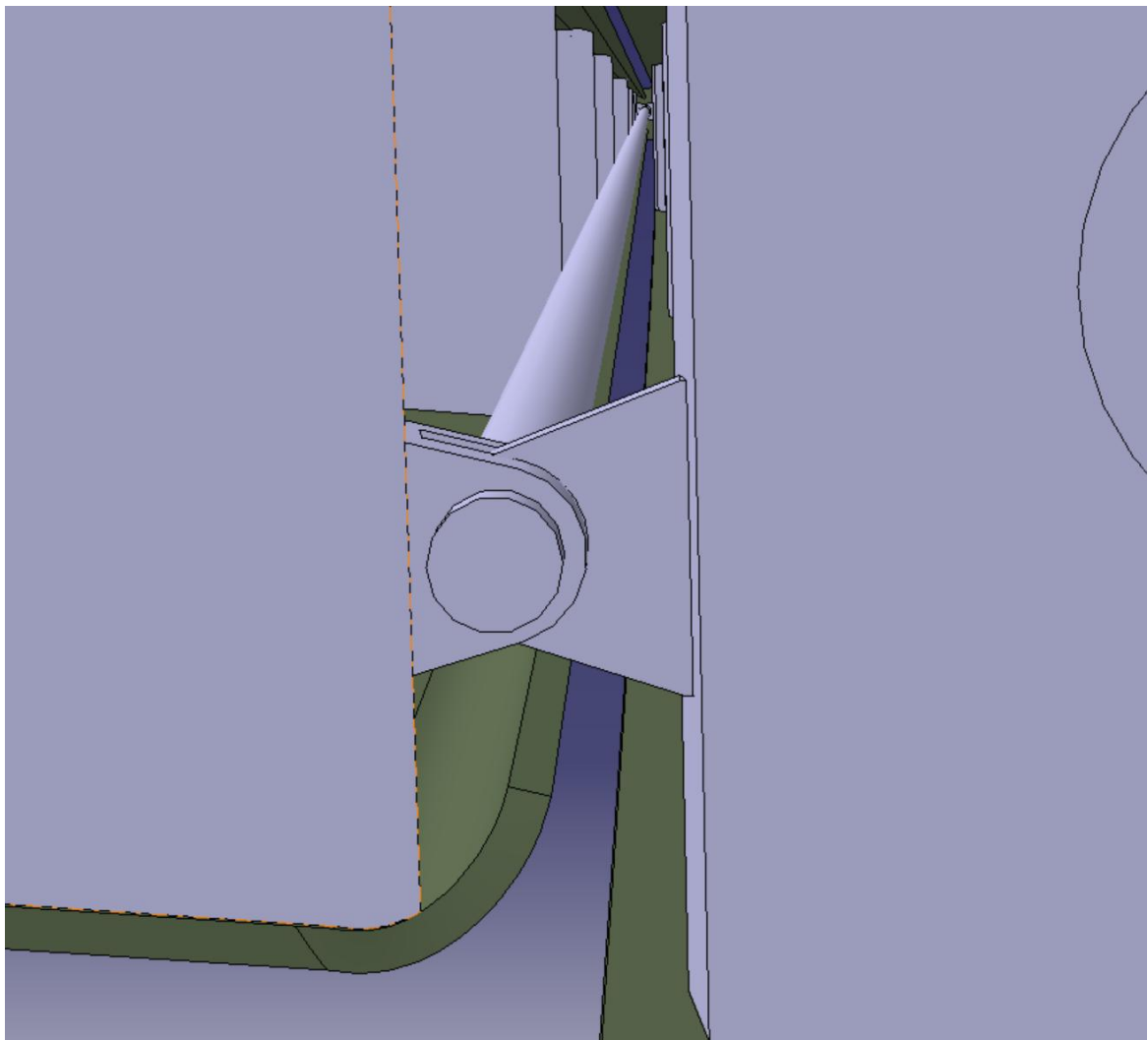


Figura 56 – Eje de giro entre el alerón y el ala del Kawasaki Ki-45 Nick

2.3.5 Creación del tubo de Pitot

Este apartado contendrá el proceso de creación del tubo de Pitot. La información de la que se partía se puede ver en la Figura 57.

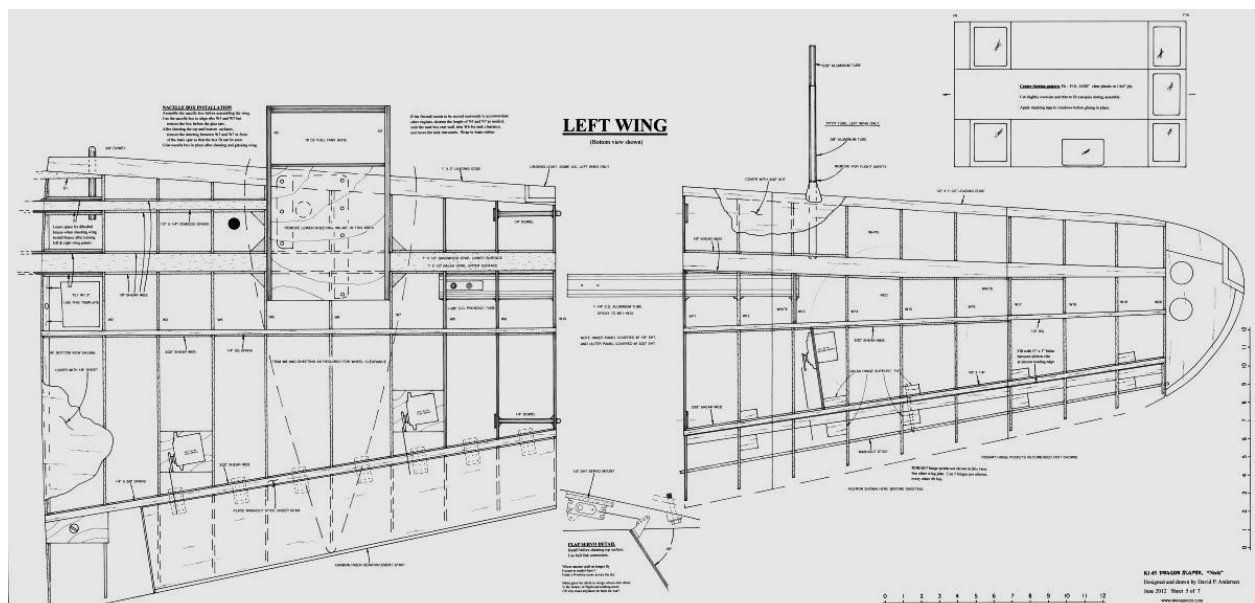


Figura 57 – Plano del ala del Kawasaki Ki-45 Nick

En este plano se encuentran la posición y dimensiones del tubo de Pitot. Así, usando herramientas simples de modelado como *Pad* y *Shaft*, se llegó al modelo final de la Figura 58.

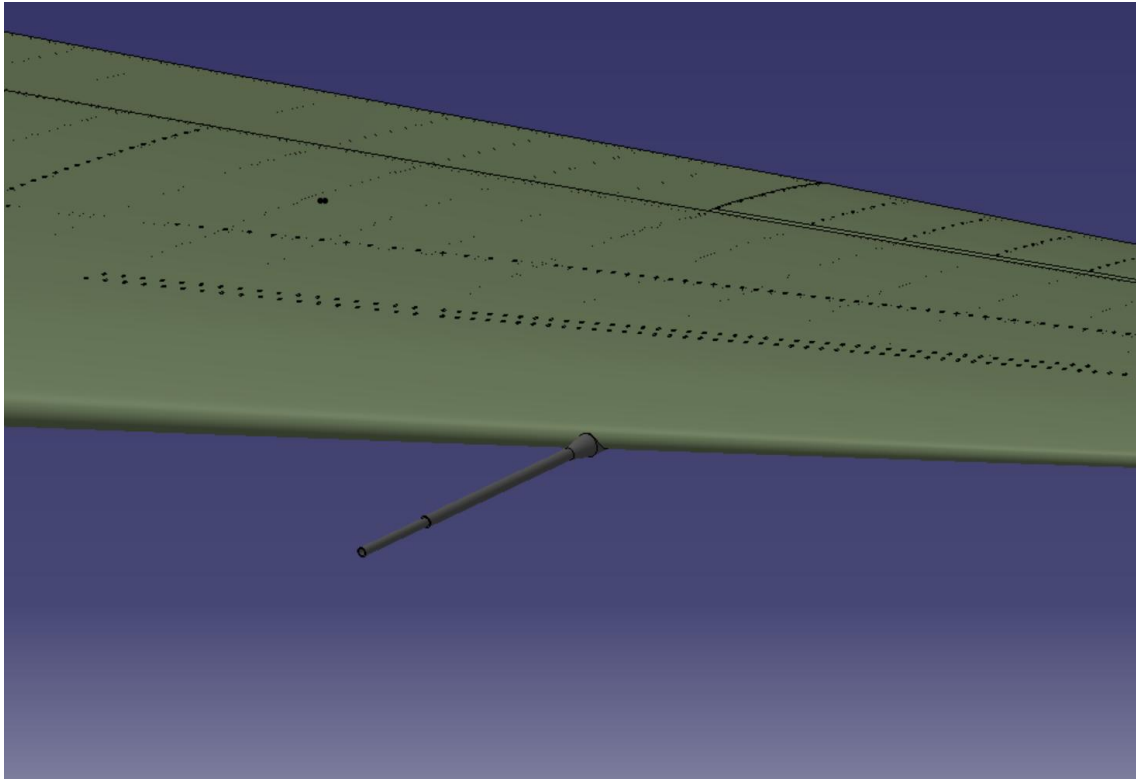


Figura 58 – Tubo de Pitot del Kawasaki Ki-45 Nick

2.3.6 Creación del flap

Este punto contiene el modelado de la superficie hipersustentadora del ala, el flap. Para ello, y como ya se ha hecho en otros apartados, se comienza creando la superficie con la herramienta *Multi-Sections Surface* (véase la Figura 59).

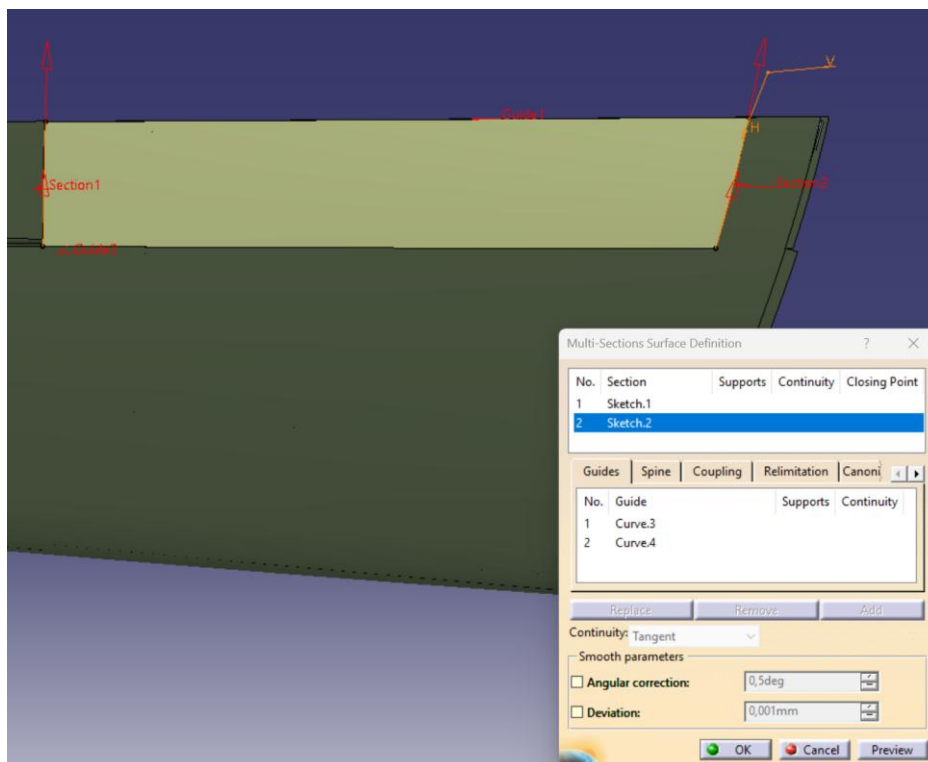


Figura 59 – Superficie del flap del ala del Kawasaki Ki-45 Nick

Usando las herramientas *ThickSurface* y *Split*, se ha obtenido el resultado final del flap que se muestra en la Figura 60.

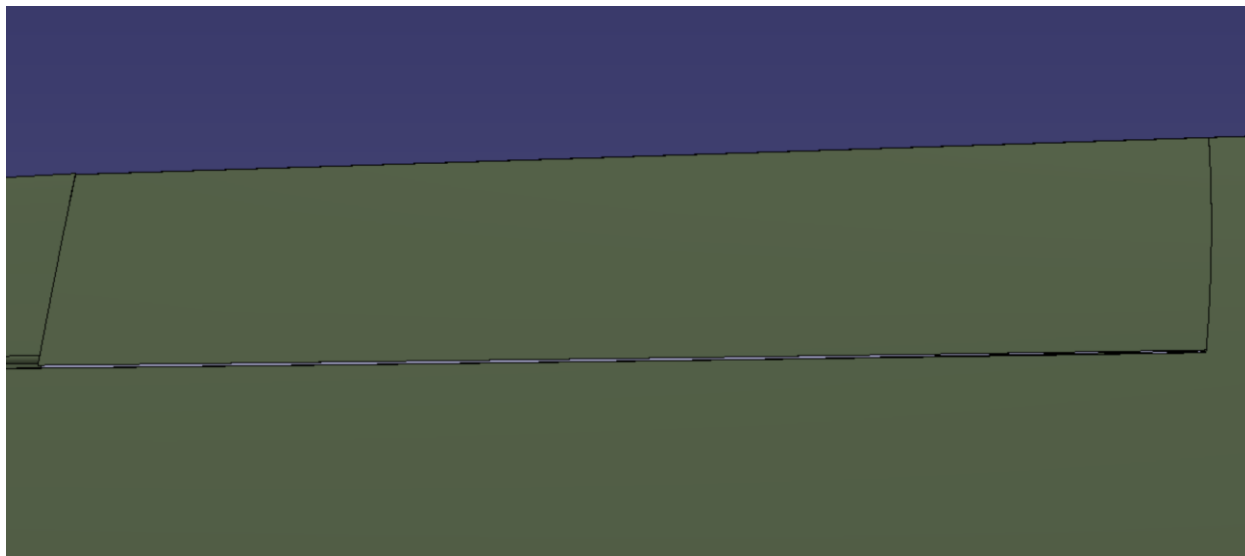


Figura 60 – Flap del ala del Kawasaki Ki-45 Nick

2.3.7 Conclusiones

En este apartado de conclusiones del modelado de las alas, cabe recalcar que, como ya se dijo al comienzo del apartado Construcción de las alas, el ala derecha se ha modelado haciendo un simétrico de todas las piezas de la izquierda, quedando entonces el conjunto fuselaje más alas como se ve en las Figura 61, 62 y 63.

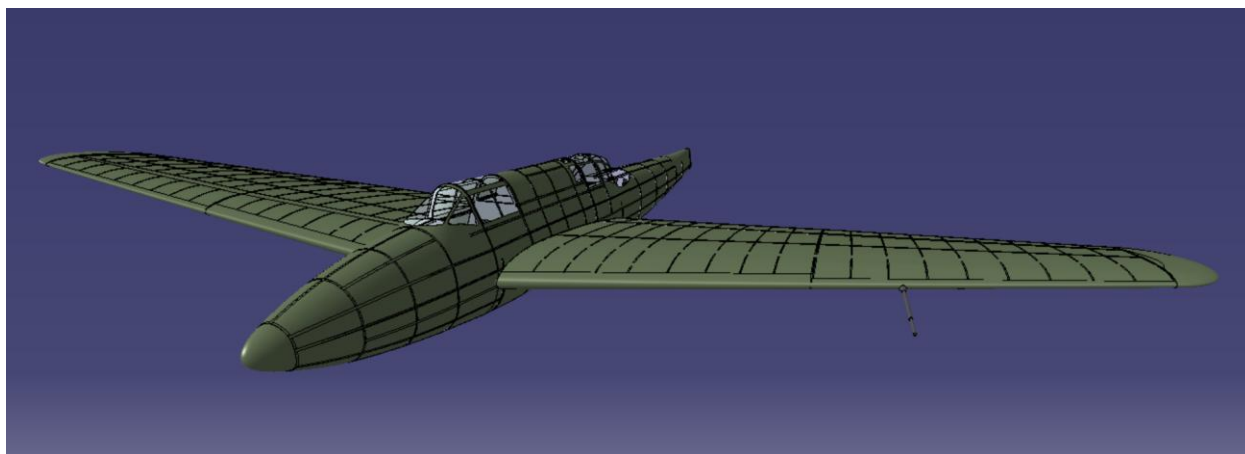


Figura 61 – Vista con perspectiva del Kawasaki Ki-45 Nick

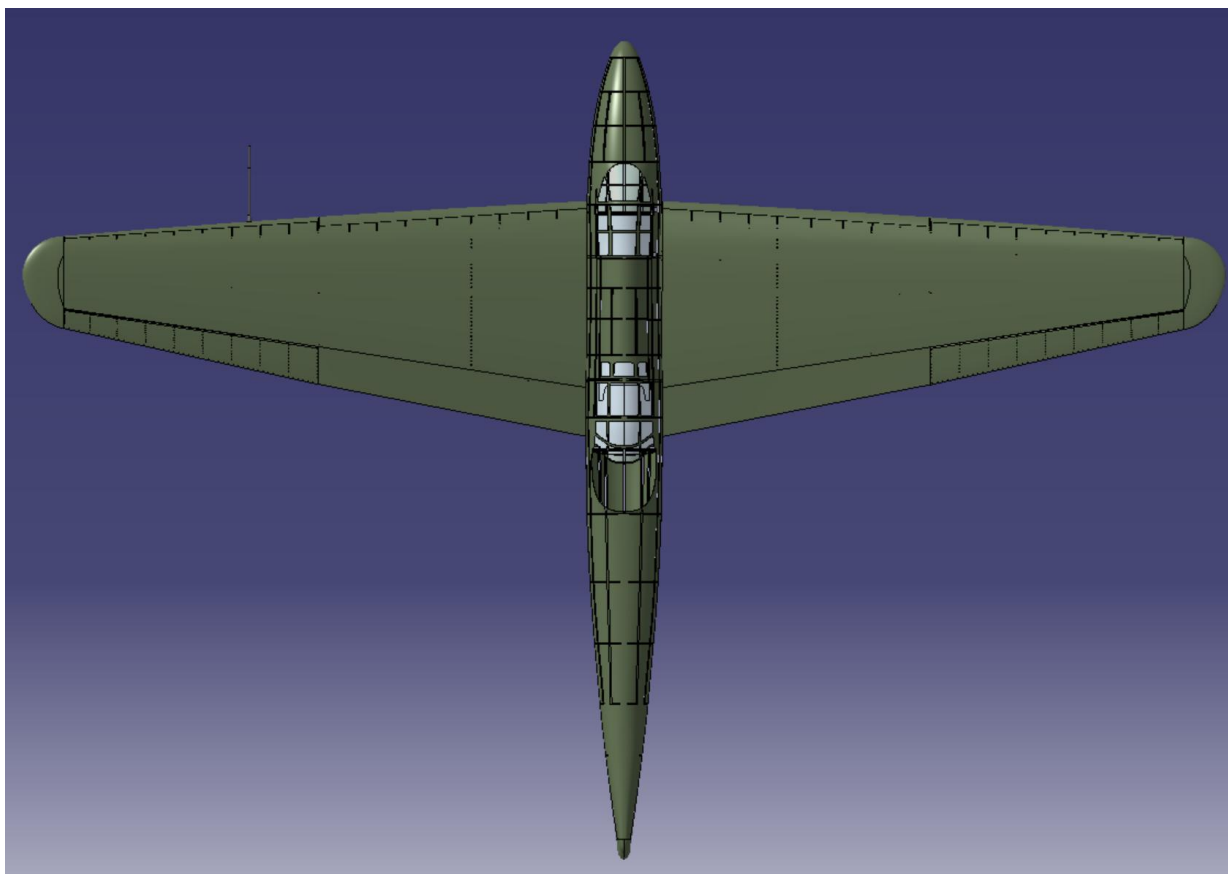


Figura 62 – Planta del Kawasaki Ki-45 Nick

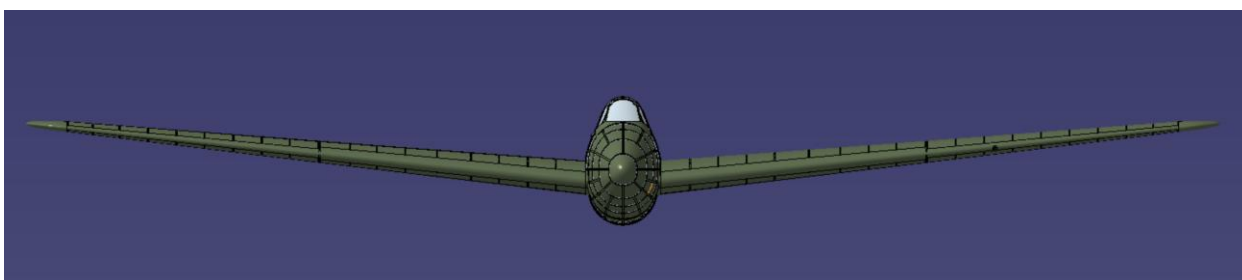


Figura 63 – Vista frontal del Kawasaki Ki-45 Nick

2.4 Construcción del empenaje

El empenaje es el conjunto de superficies aerodinámicas ubicadas en la parte posterior de una aeronave, cuya función principal es proporcionar estabilidad y control durante el vuelo. Está compuesto habitualmente por dos elementos fundamentales: el empenaje horizontal (HTP), que incluye el estabilizador horizontal y el timón de profundidad (elevador), y el empenaje vertical (VTP), que comprende el estabilizador vertical y el timón de dirección. En conjunto, estas superficies permiten controlar el movimiento de cabeceo y guiñada, y estabilizan el avión en los tres ejes principales de rotación (longitudinal, transversal y vertical).

En aviones bimotores convencionales como el Kawasaki Ki-45 Nick, el empenaje presenta una configuración clásica en cruz, con estabilizadores diferenciados. Su diseño debe garantizar un equilibrio entre resistencia estructural, eficiencia aerodinámica y buena respuesta a las órdenes de control, todo ello adaptado al perfil de misión de la aeronave.

Se diferenciarán entonces dos apartados, el primero de ellos para el HTP y el segundo para el VTP.

2.4.1 Construcción del HTP

Este apartado contendrá la explicación del modelado del HTP izquierdo. Sin embargo, la parte estructural

(costillas, largueros, revestimiento...) se explicará de manera escueta, ya que es muy similar al modelado del ala detallado en el apartado **¡Error! No se encuentra el origen de la referencia.**, y el estudio se centrará más en el elevador. De la misma manera que pasó con las alas, el HTP derecho se modelará haciendo simetría en las piezas del HTP izquierdo.

2.4.1.1 Creación de la estructura del HTP

Como ya se ha mencionado, el modelado de las costillas, largueros, revestimiento y demás partes del HTP es muy similar a la metodología usada en el ala. Es por ello por lo que simplemente se mostrarán los resultados obtenidos en este apartado.

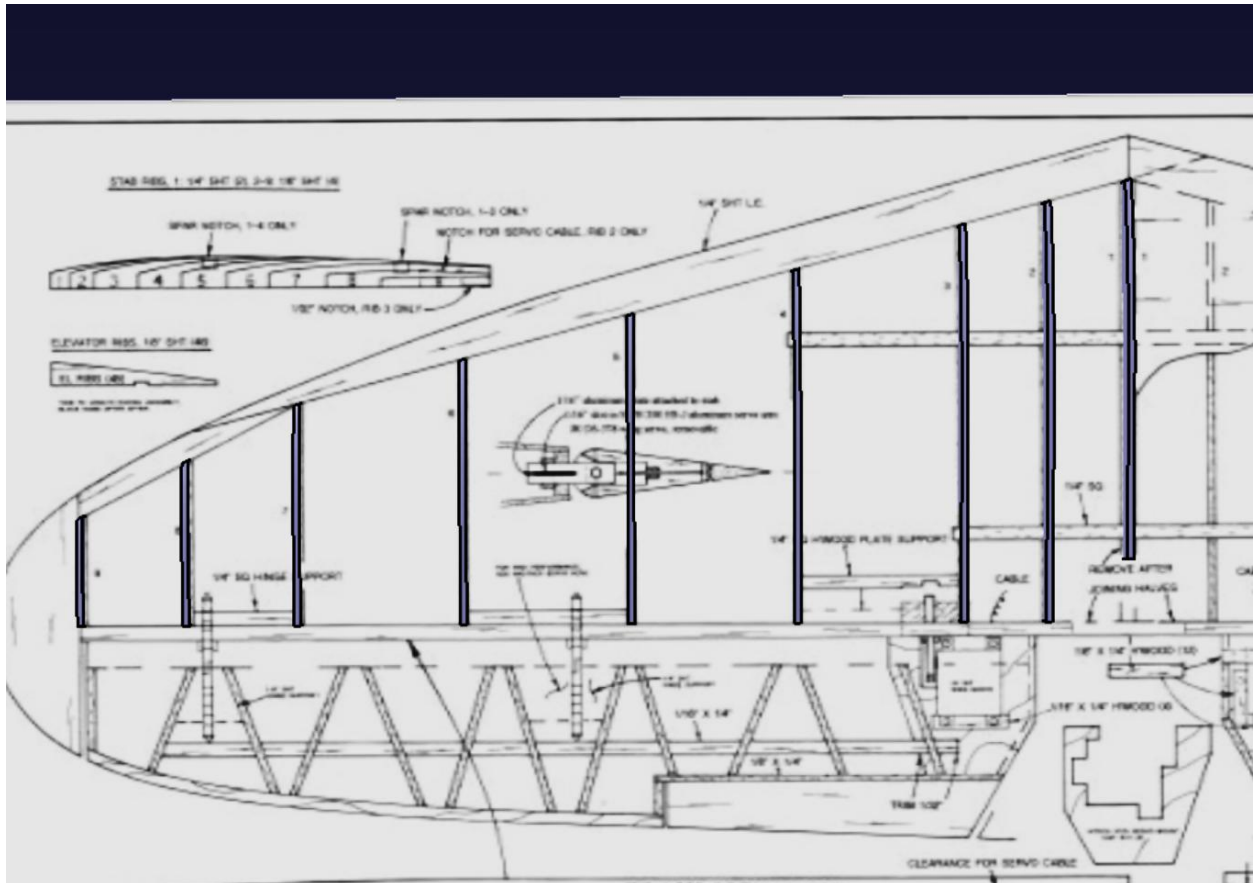


Figura 64 – Posicionado de las costillas del HTP del Kawasaki Ki-45 Nick

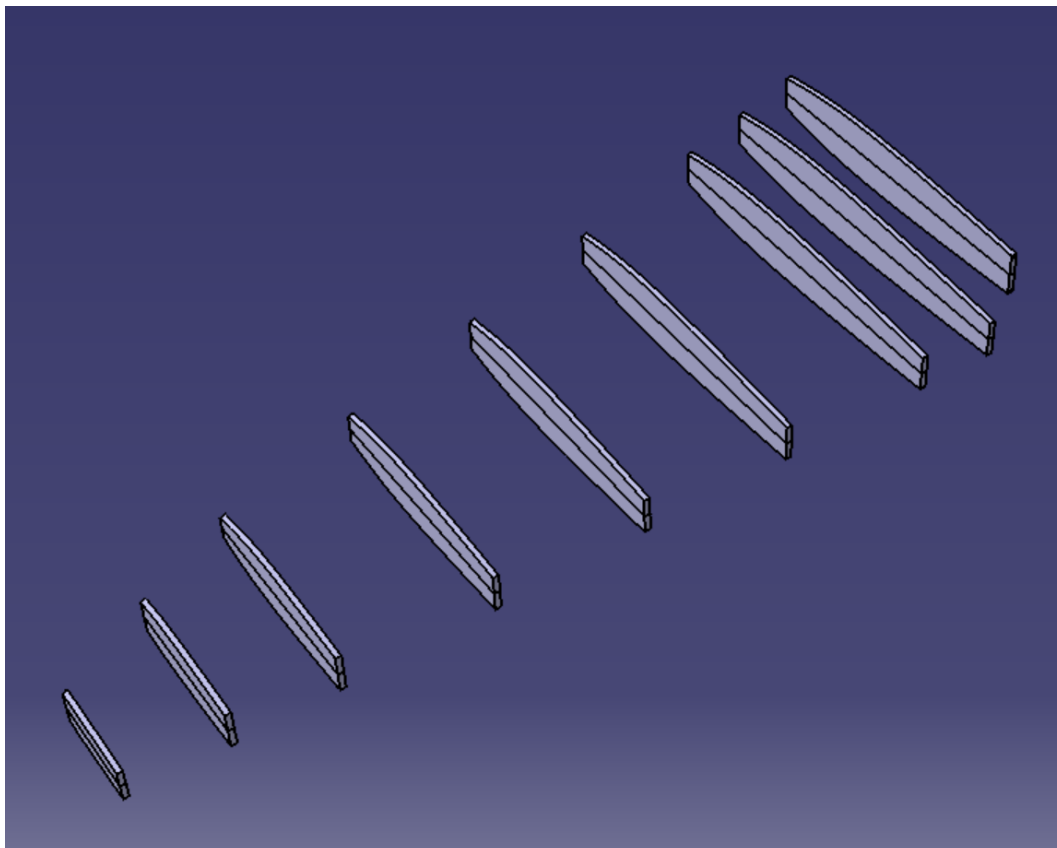


Figura 65 – Costillas del HTP del Kawasaki Ki-45 Nick

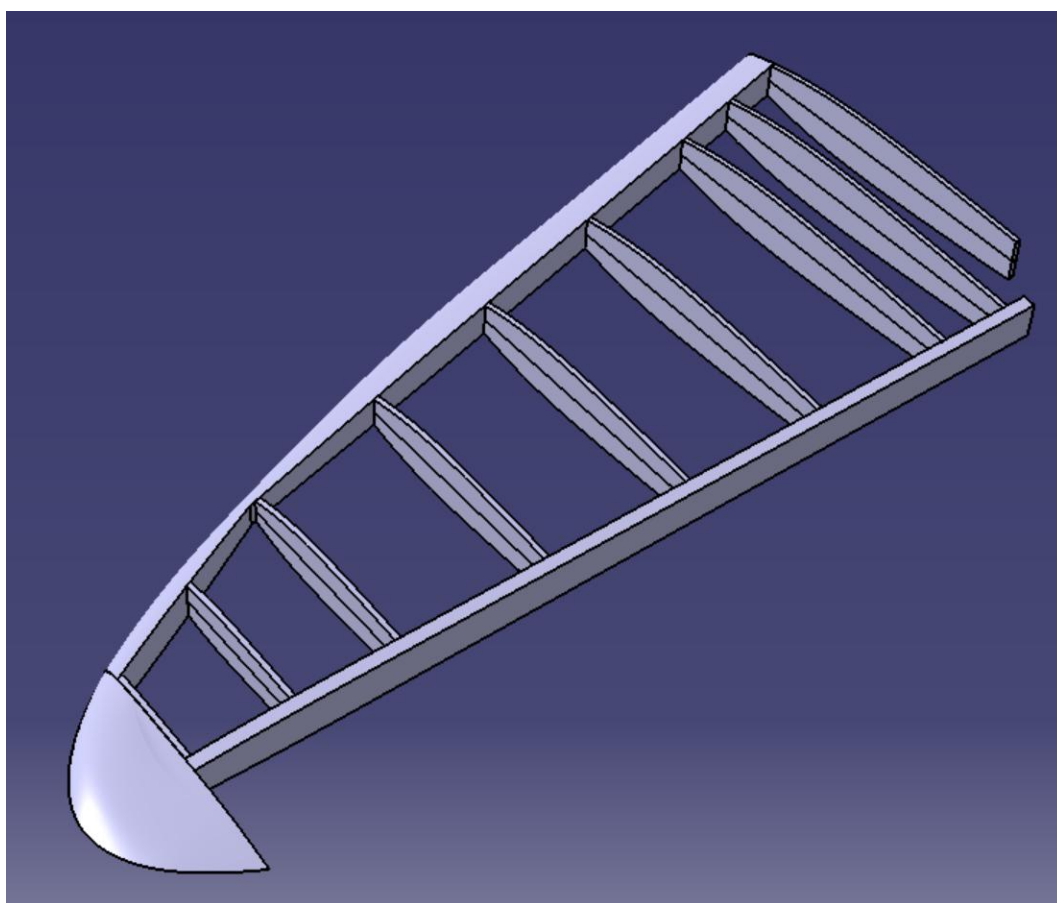


Figura 66 – Costillas, borde de ataque, languero y punta de ala del HTP del Kawasaki Ki-45 Nick

En cuanto al revestimiento, cabe destacar los cortes hechos con la herramienta *Split* para que este se ajuste al

fuselaje y para dejar el hueco del elevador. En las siguientes imágenes (Figuras 67 y 68) se pueden ver tanto las superficies utilizadas en los cortes como el resultado final de la estructura del HTP.

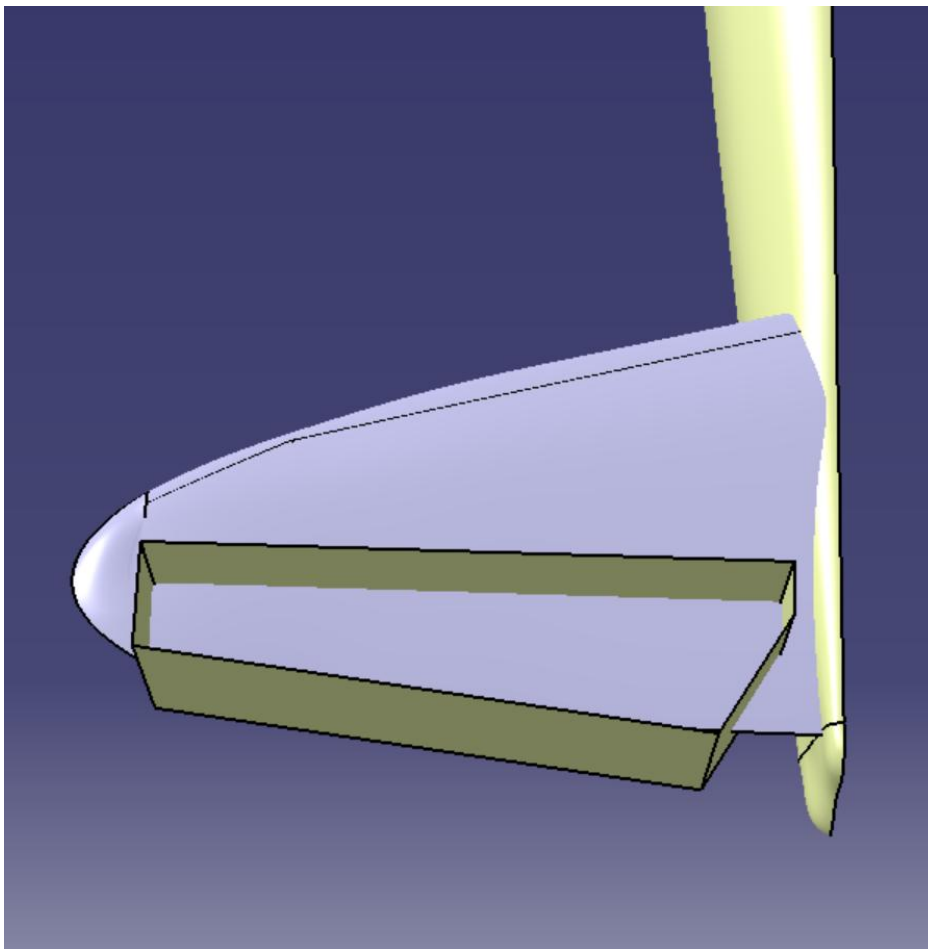


Figura 67 – Superficies de corte del revestimiento del HTP del Kawasaki Ki-45 Nick

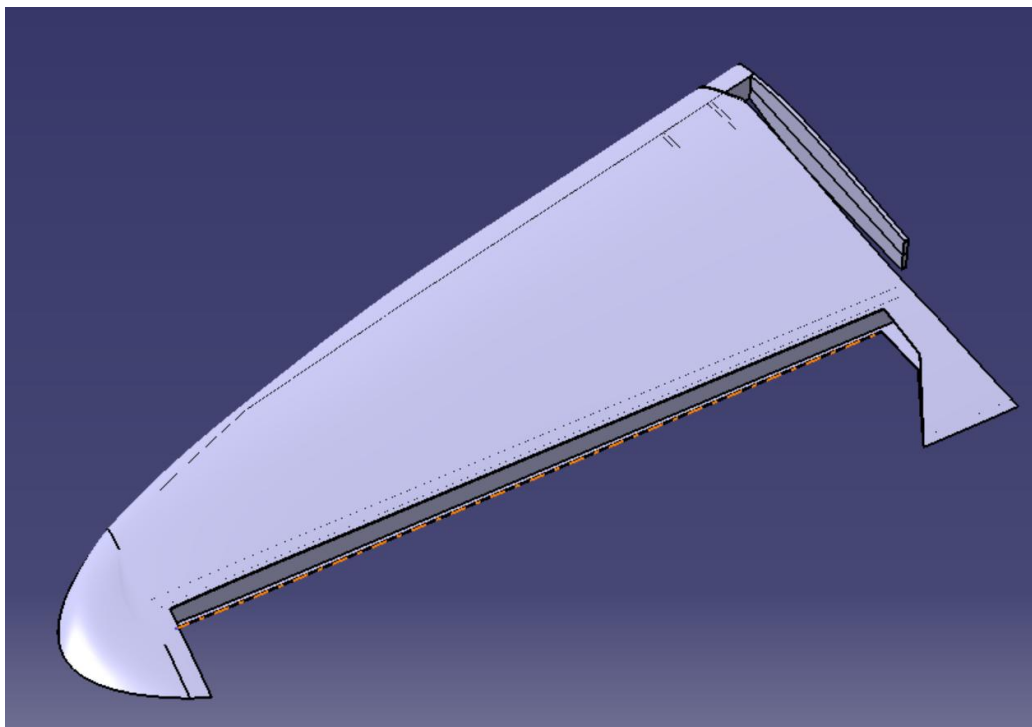


Figura 68 – HTP izquierdo (sin elevador) del Kawasaki Ki-45 Nick

2.4.1.2 Creación del elevador

Para crear el elevador, así como se ha hecho con otras superficies sustentadoras o hipersustentadoras, se ha tomado la superficie completa del HTP, pero esta vez haciendo el *Split* inverso para mantener la zona del elevador (véase la Figura 69).

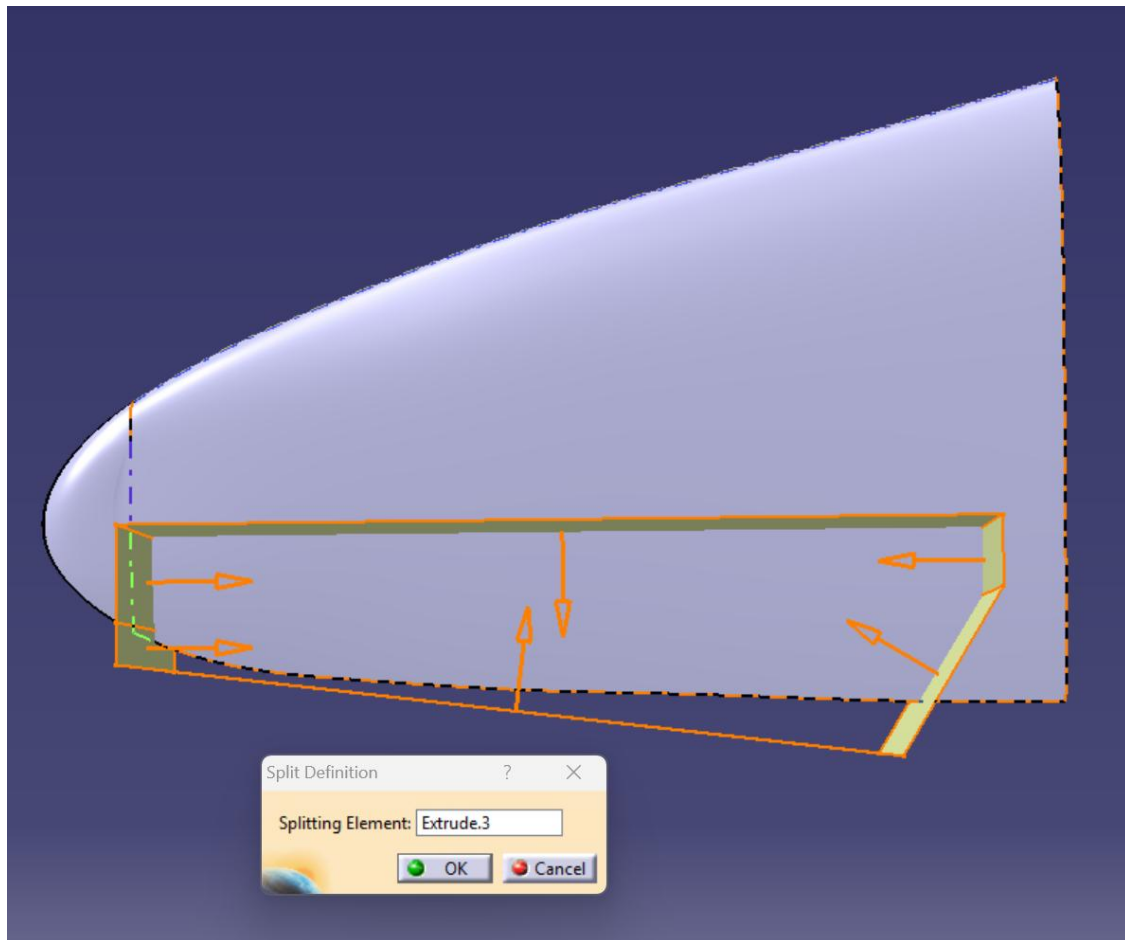


Figura 69 – Superficie del elevador del HTP del Kawasaki Ki-45 Nick

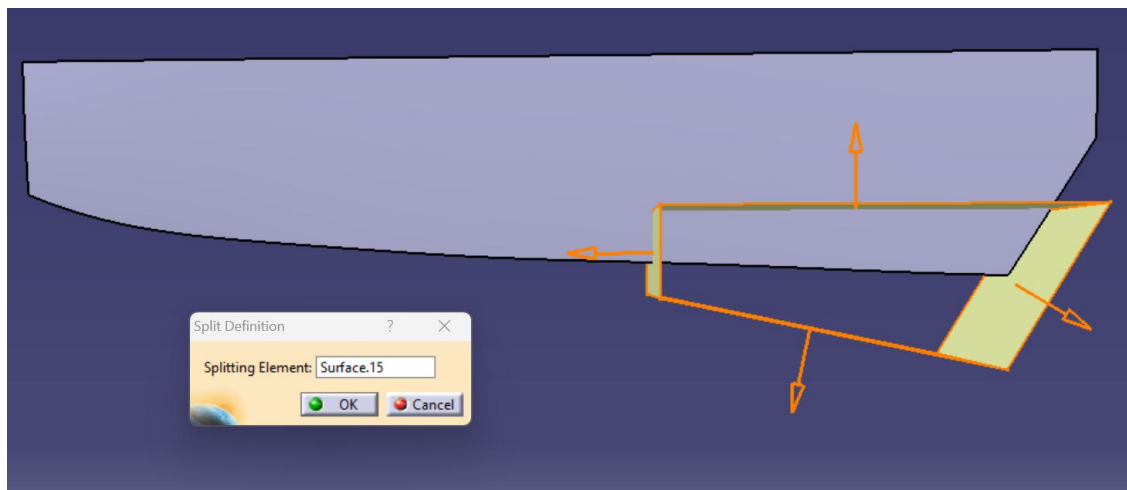


Figura 70 – Corte para el *Trim Tab* de la superficie del elevador del HTP del Kawasaki Ki-45 Nick

Finalmente, el revestimiento del elevador queda como se ve en la Figura 71.

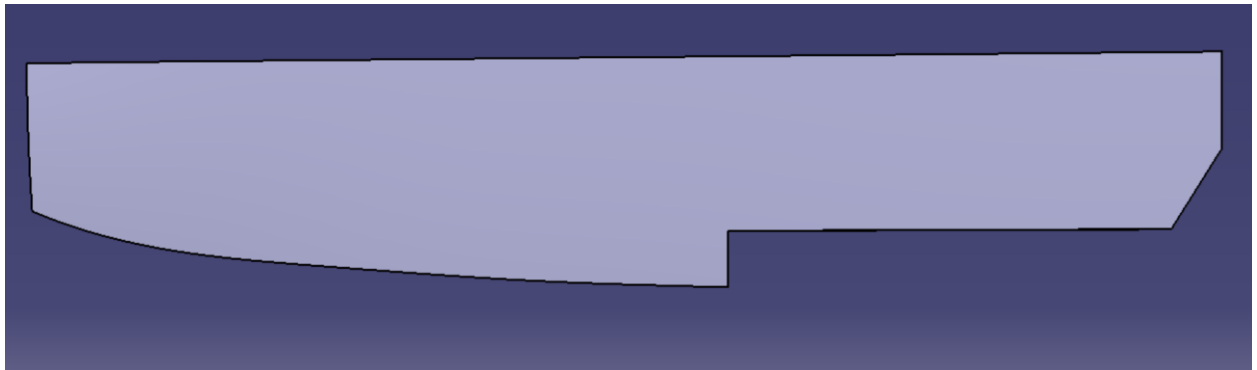


Figura 71 – Revestimiento del elevador del HTP del Kawasaki Ki-45 Nick

Para continuar con la construcción del elevador, se mostrará a continuación el modelado de las costillas. Como se ha hecho en apartados anteriores, se utilizará como apoyo un plano insertado en CATIA V5 con la información necesaria de posición y espesor (Figuras 72 y 73).

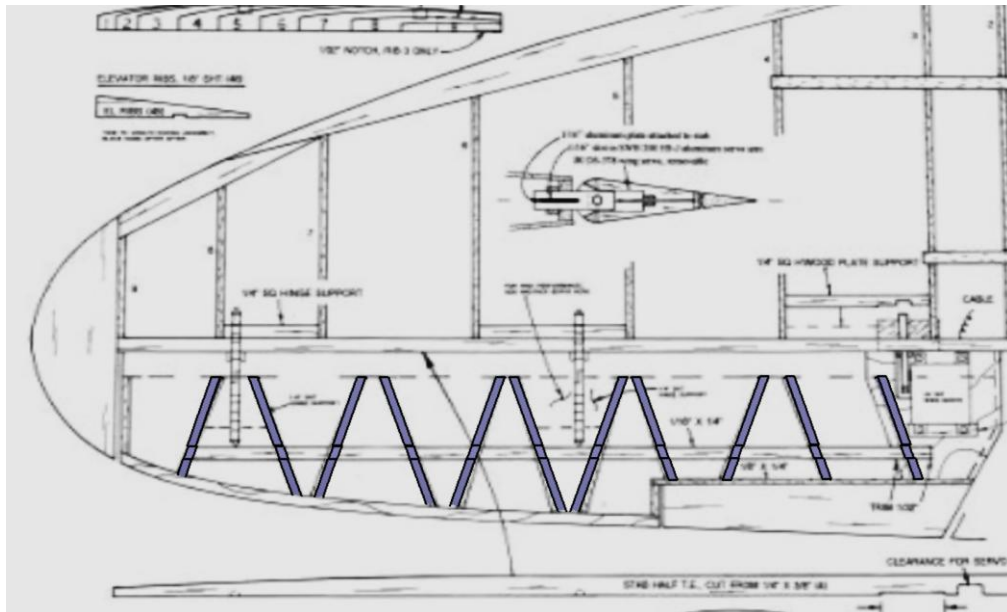


Figura 72 – Costillas del elevador del HTP del Kawasaki Ki-45 Nick

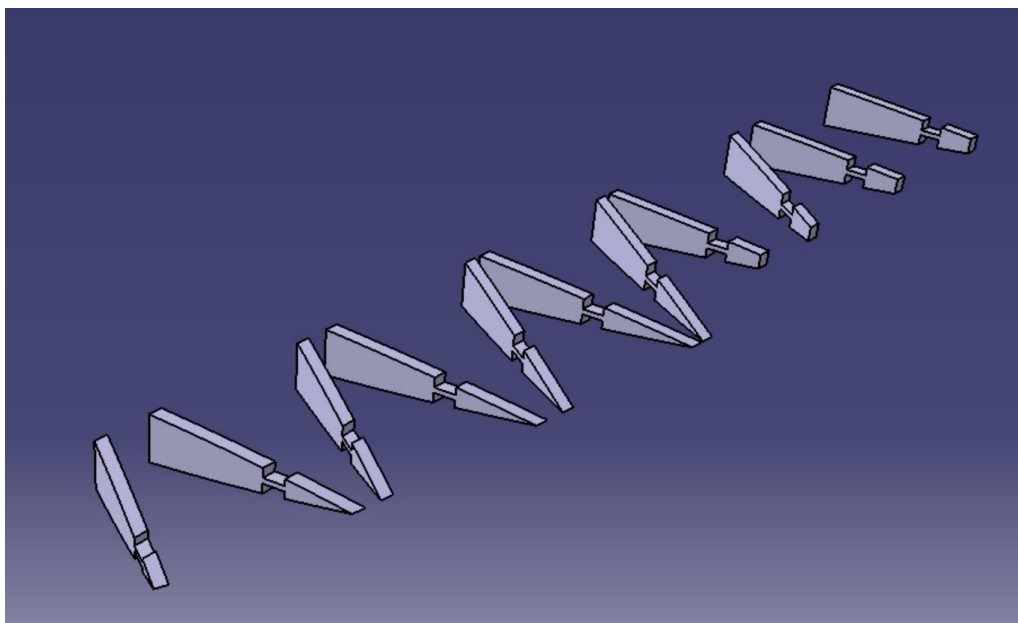


Figura 73 – Costillas del elevador del HTP del Kawasaki Ki-45 Nick

A continuación, se mostrarán los largueros que han sido necesarios generar para aportar rigidez a la estructura

del elevador. Estos se han hecho mediante un *Pad* de un sólido bruto y haciendo un *Split* con la superficie interior del revestimiento del elevador. En la Figura 74 puede verse el conjunto costillas-largueros.

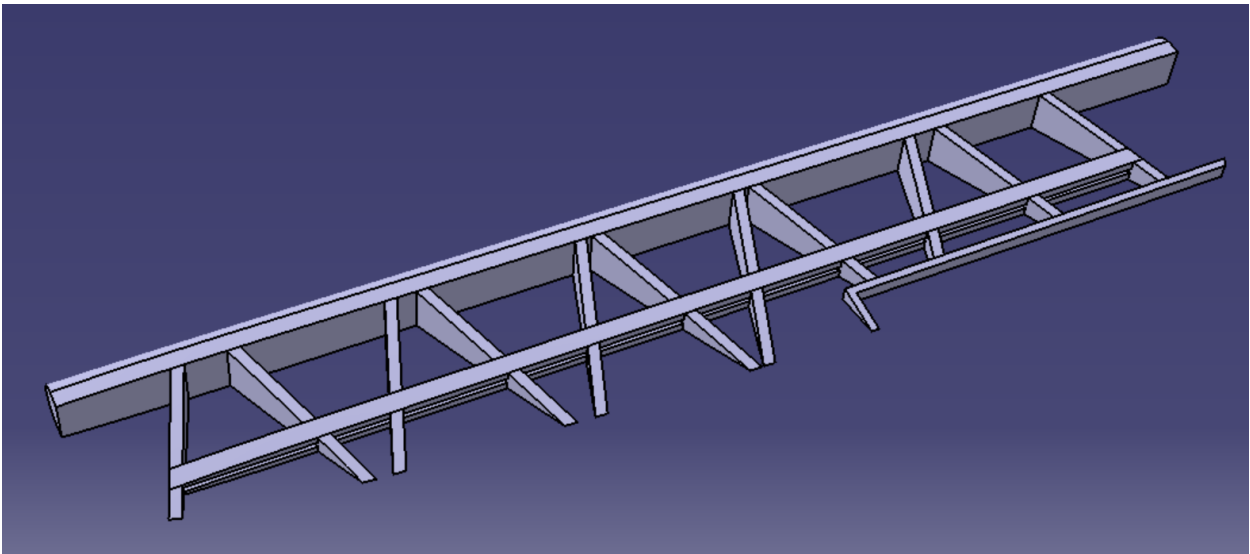


Figura 74 – Conjunto costillas-largueros del elevador del Kawasaki Ki-45 Nick

Finalmente, haciendo para el *Trim Tab* lo mismo que con la superficie del larguero, se obtiene el sólido final de la construcción del elevador del HTP (Figura 75).

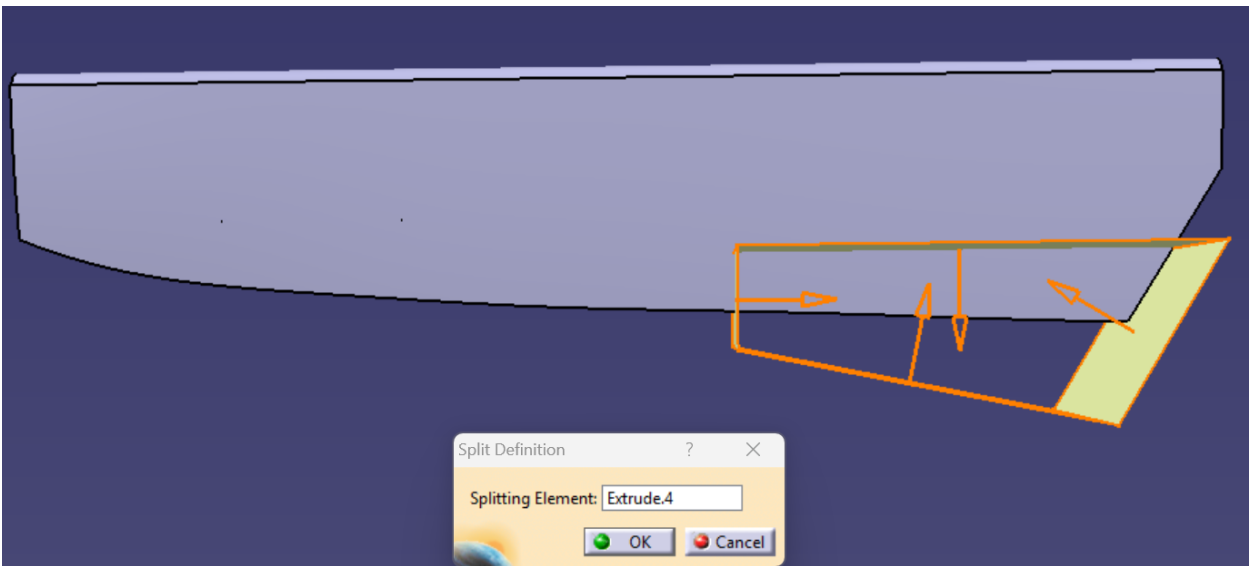


Figura 75 – Trim Tab del elevador del Kawasaki Ki-45 Nick

Haciendo la unión de todos los sólidos creados para el elevador, queda el conjunto de la Figura 76.

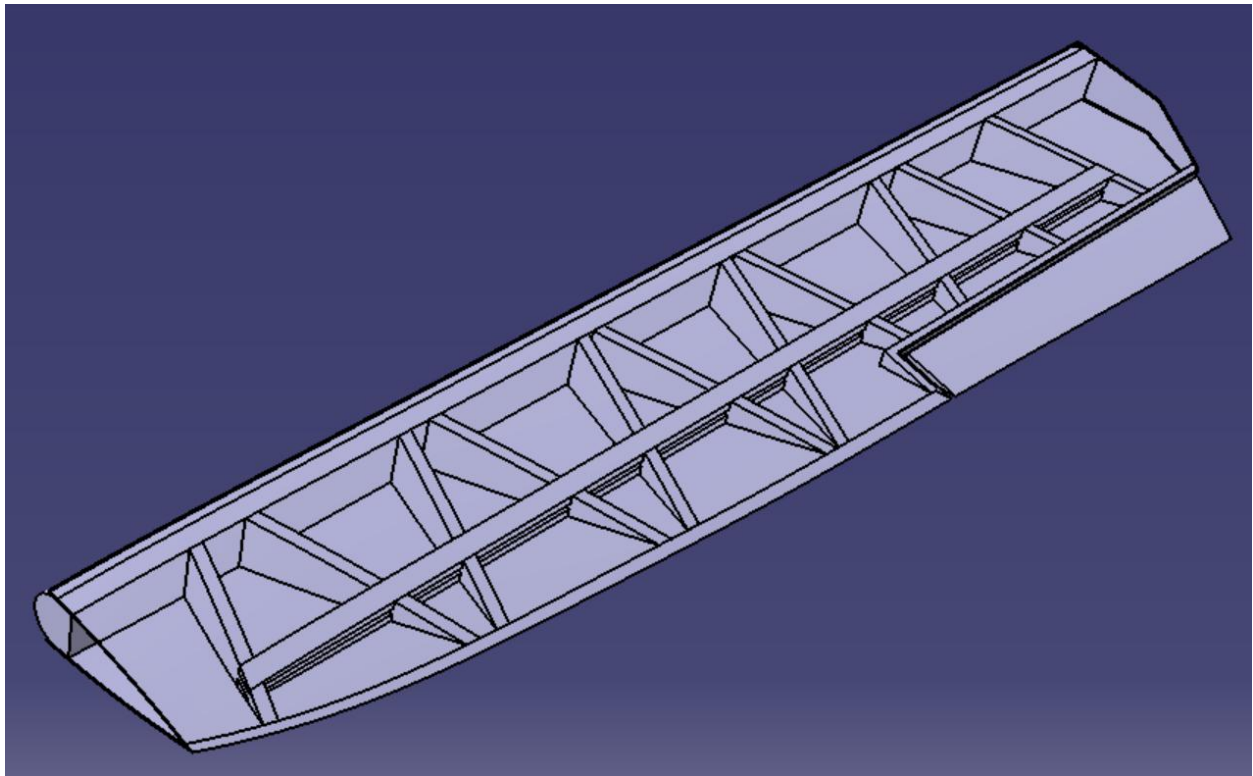


Figura 76 – Elevador y Trim Tab del Kawasaki Ki-45 Nick

2.4.1.3 Conclusiones

Como se ha mencionado al principio de este capítulo, el ala derecha del HTP se hace utilizando la herramienta de simetría en cada modelo del HTP izquierdo. De esta manera, en la Figura 77 se puede ver el conjunto final del HTP completo.

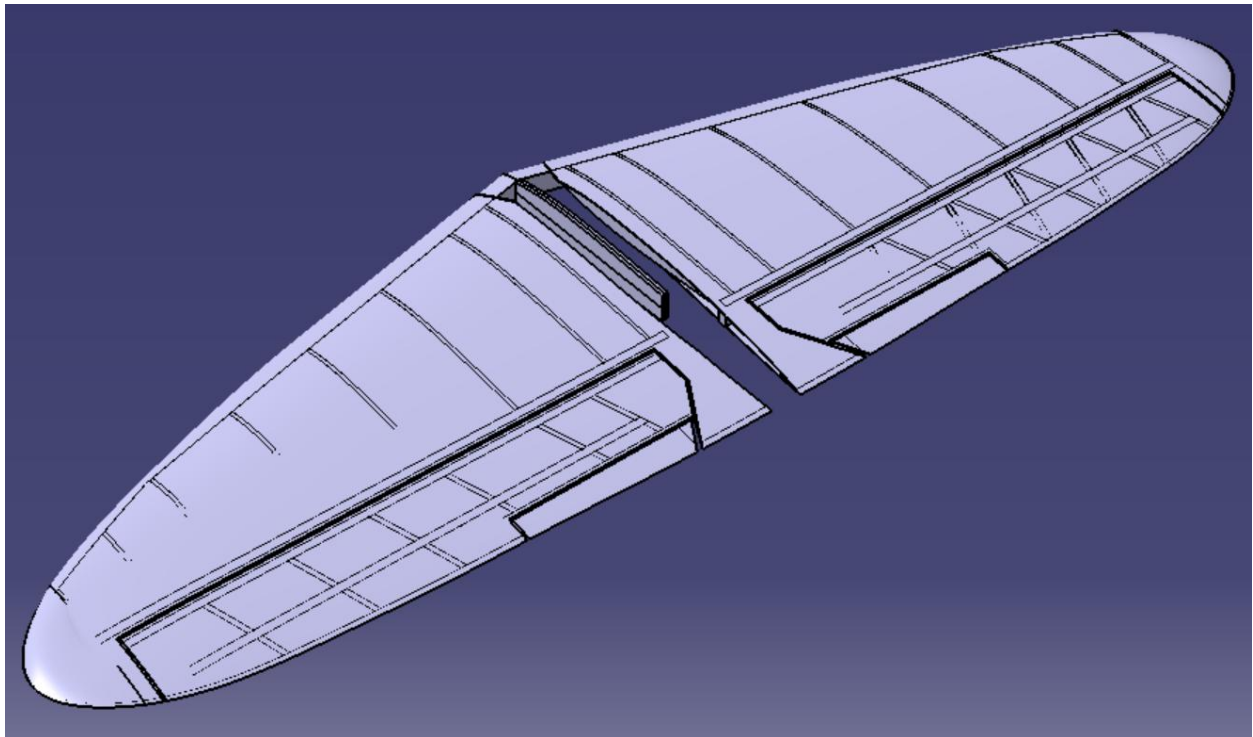


Figura 77 – HTP del Kawasaki Ki-45 Nick

2.4.2 Construcción del VTP

Este apartado contendrá la explicación del modelado del VTP. Sin embargo, la parte estructural (costillas,

largueros, revestimiento...) se explicará de manera escueta, ya que es muy similar al modelado del ala detallado en el apartado **¡Error! No se encuentra el origen de la referencia.**, y el estudio se centrará más en el timón de dirección.

Como ya se ha mencionado, el modelado de las costillas, largueros, revestimiento y demás partes del VTP es muy similar a la metodología usada en el ala y en el HTP. Es por ello por lo que simplemente se mostrarán los resultados obtenidos en este apartado.

Figura 78 – Posicionado de las costillas del VTP del Kawasaki Ki-45 Nick

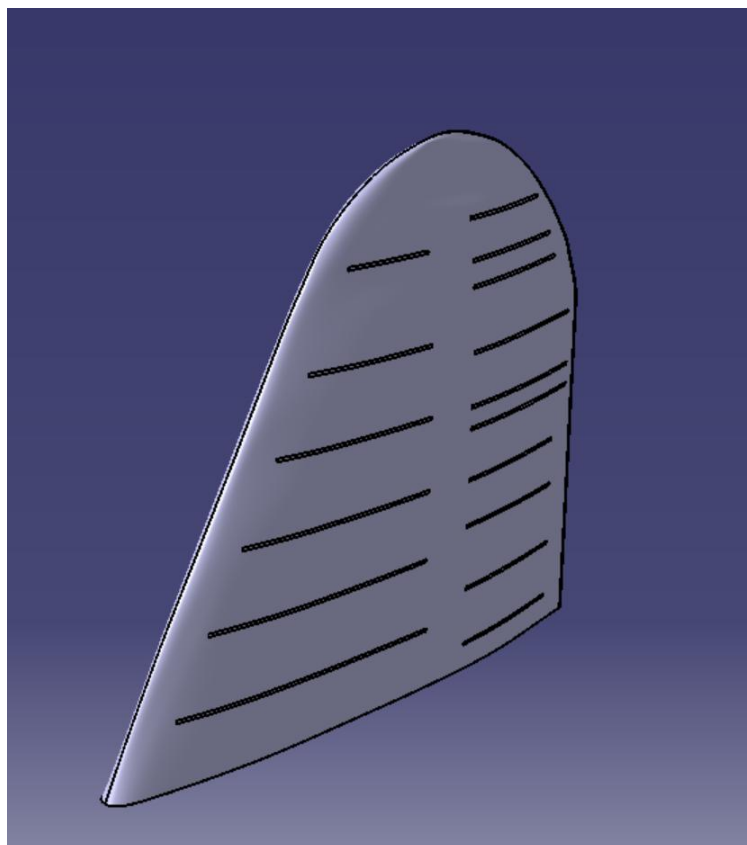


Figura 79 – Revestimiento del VTP del Kawasaki Ki-45 Nick

Haciendo entonces los sólidos brutos para los largueros y el resto de las piezas necesarias en el ensamblaje, y utilizando la herramienta *Split* para ajustarlas a la superficie, el resultado de la estructura interna de la parte fija del VTP puede verse en la Figura 80.

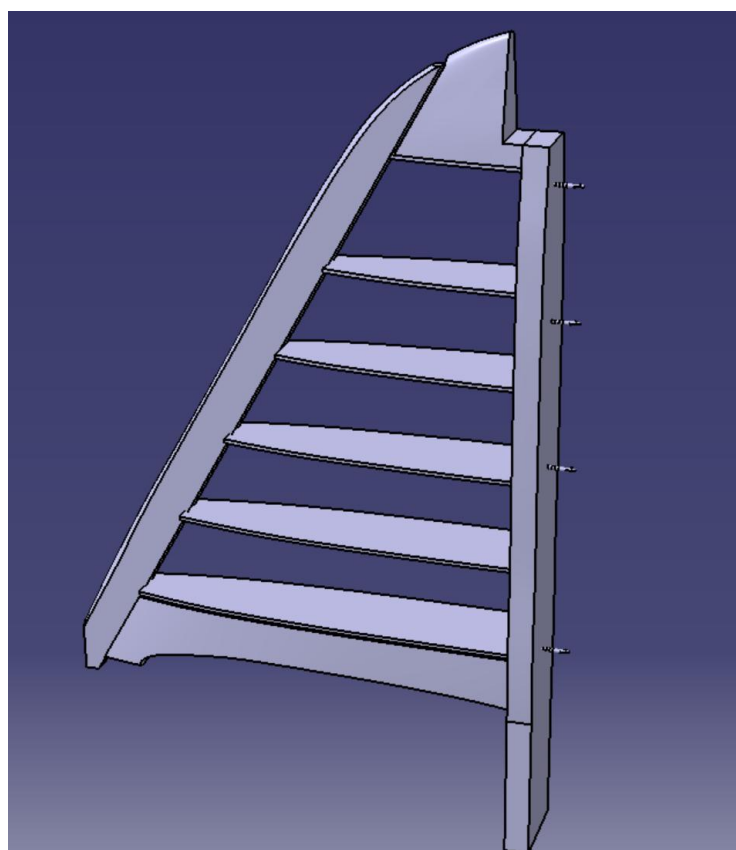


Figura 80 – Estructura interna de la parte fija del VTP del Kawasaki Ki-45 Nick

2.4.2.2 Creación del timón de dirección

Tal y como se explicó en el apartado Creación del elevador, en este punto se hará lo mismo. Tomando la superficie completa del VTP y haciendo un *Split*, el resultado del revestimiento del timón de dirección es el que se puede apreciar en las Figuras 81 y 82.

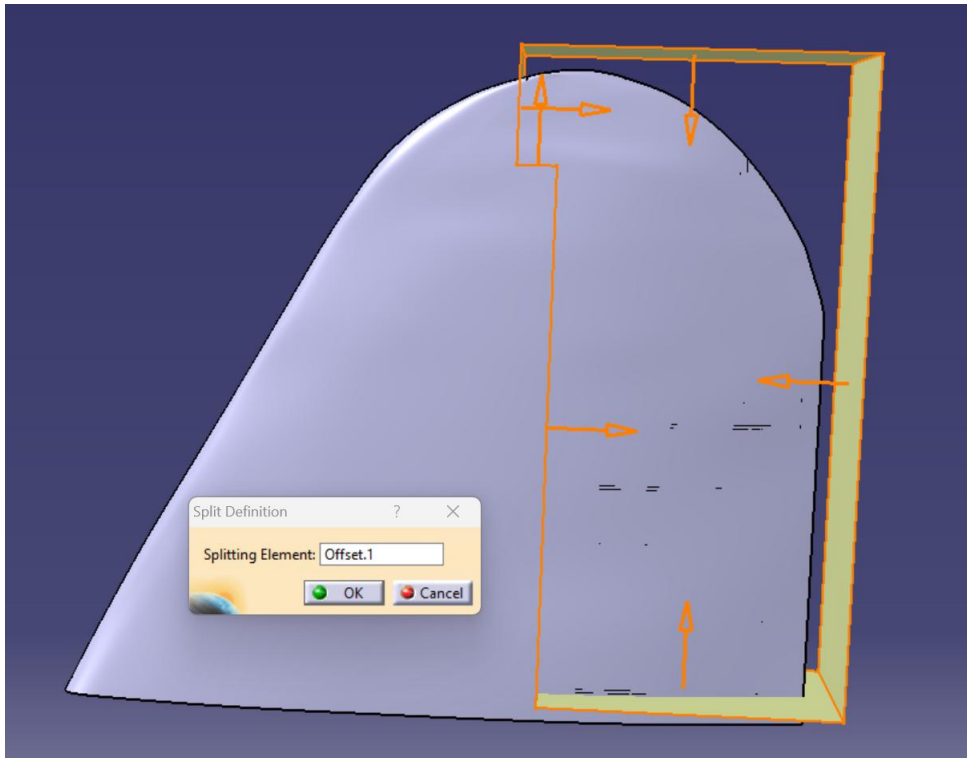


Figura 81 – Split del revestimiento del timón de dirección del VTP del Kawasaki Ki-45 Nick

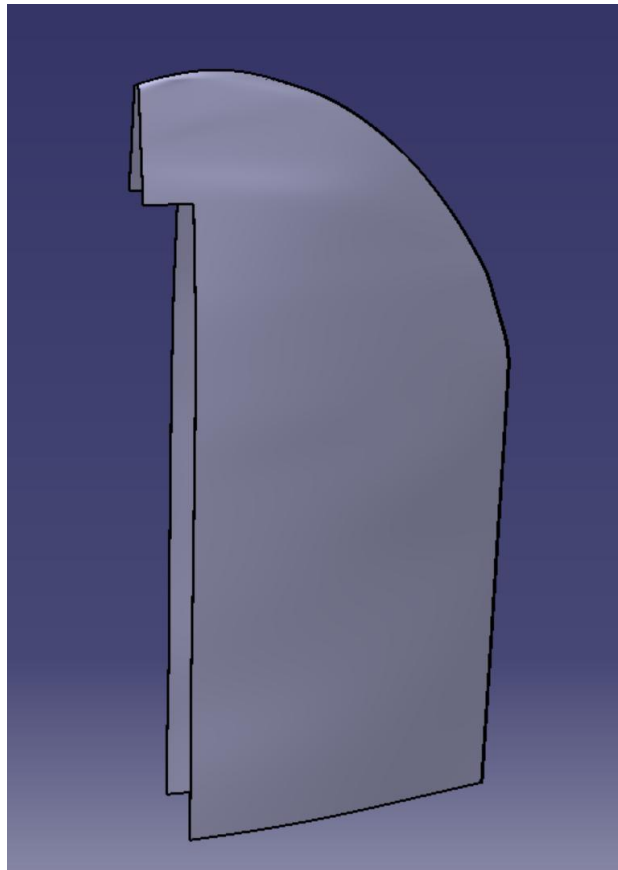


Figura 82 – Revestimiento del timón de dirección del VTP del Kawasaki Ki-45 Nick

Para terminar con el revestimiento del timón de dirección, en la Figura 83 se puede ver el corte necesario para el *Rudder Trim* que sería el homólogo del *Trim Tab* del HTP.

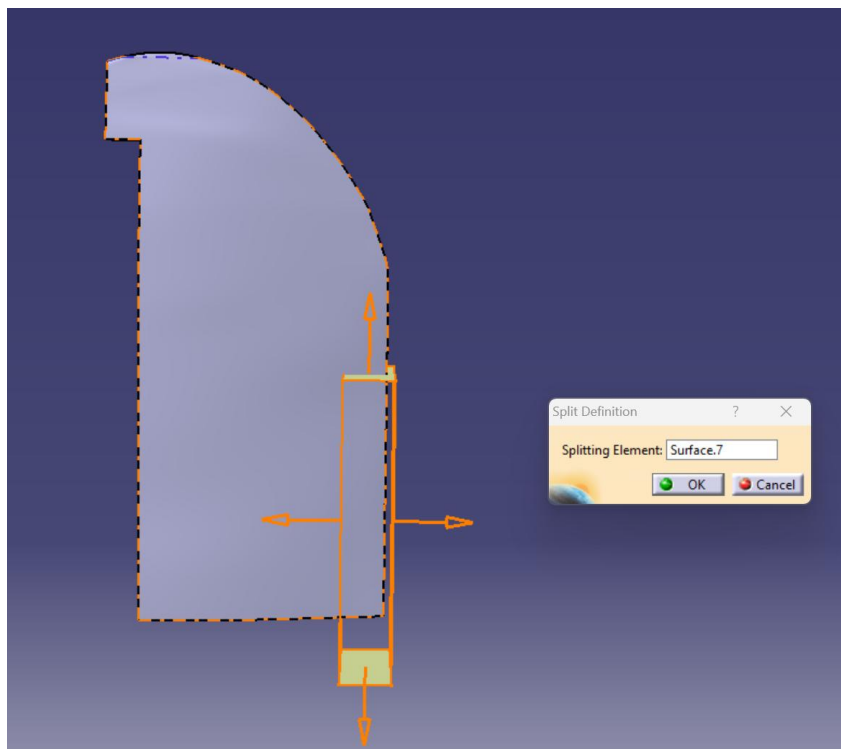


Figura 83 – Corte del revestimiento del timón de dirección del VTP del Kawasaki Ki-45 Nick para el Rudder Trim

Modelando entonces sólidos brutos, y haciéndolos intersectar con el revestimiento creado, el resultado de la estructura interna del timón de dirección del VTP se puede ver en la Figura 84.

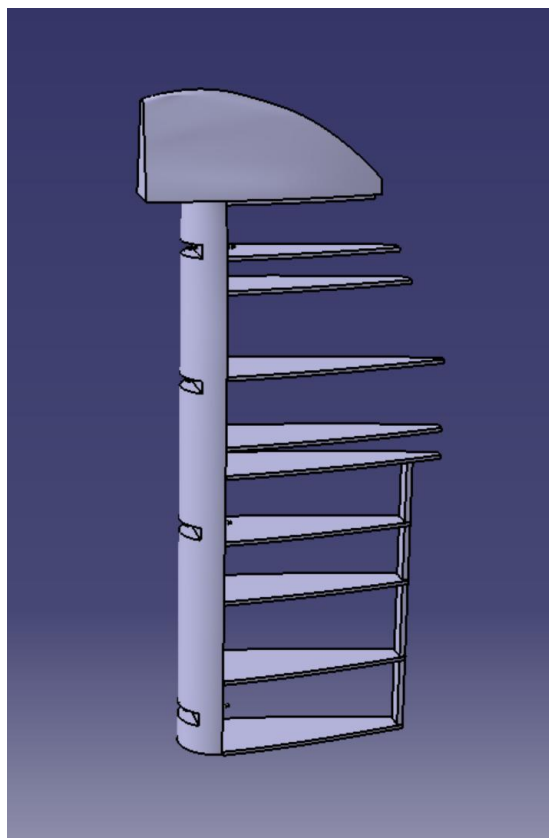


Figura 84 – Estructura interna del timón de dirección del VTP del Kawasaki Ki-45 Nick

Para finalizar, y tal y como se ha hecho para el *Trim Tab* del HTP, el modelado del *Rudder Trim* del VTP se

hizo de la misma manera (Figuras 85 y 86).

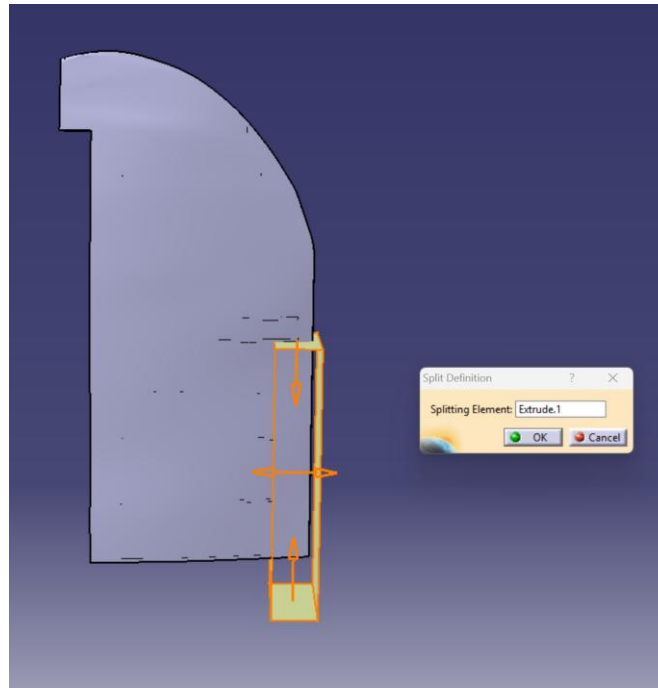


Figura 85 – Corte del Rudder Trim del timón de dirección del VTP del Kawasaki Ki-45 Nick

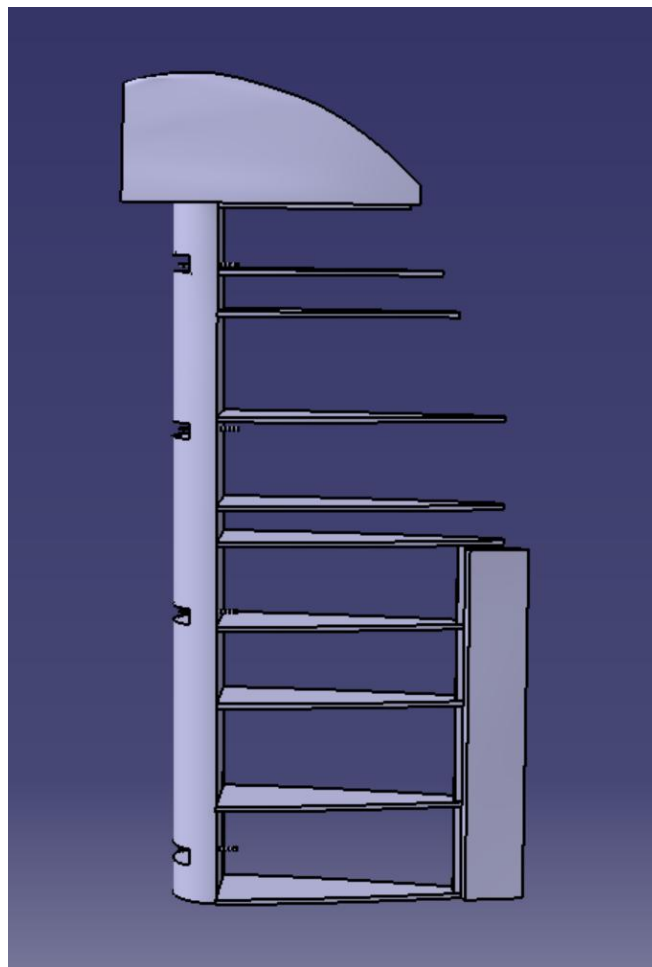


Figura 86 – Rudder Trim del timón de dirección del VTP del Kawasaki Ki-45 Nick

Haciendo la unión de todos los sólidos creados, el timón de dirección final puede verse en la Figura 87.

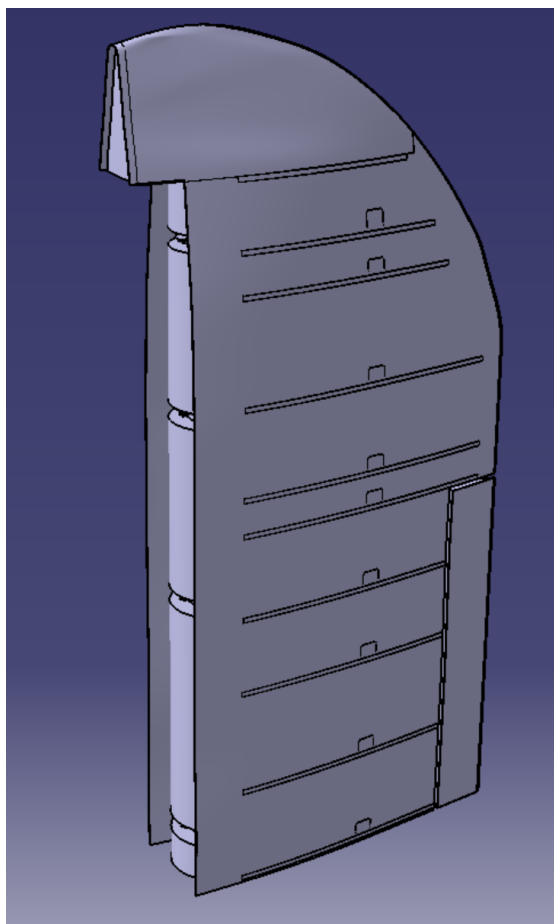


Figura 87 – Timón de dirección del VTP del Kawasaki Ki-45 Nick

2.4.2.3 Conclusiones

En la Figura 88 se mostrará el conjunto completo del VTP con el timón de dirección.

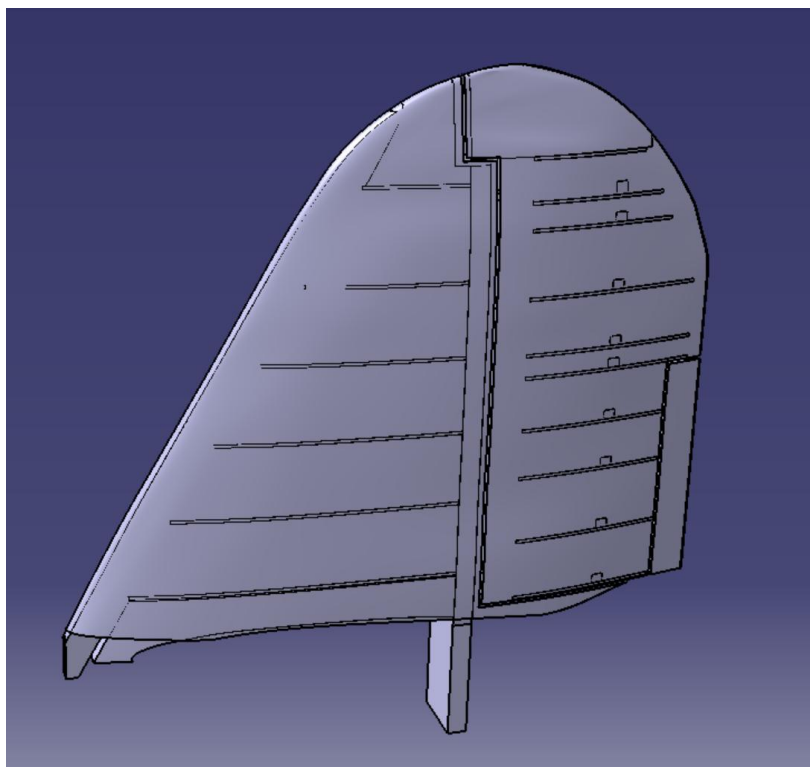


Figura 88 – VTP del Kawasaki Ki-45 Nick

2.4.3 Conclusiones

Para terminar con el apartado de modelado del empenaje, se mostrará en la Figura 89 el conjunto formado por ambas estructuras, HTP y VTP.

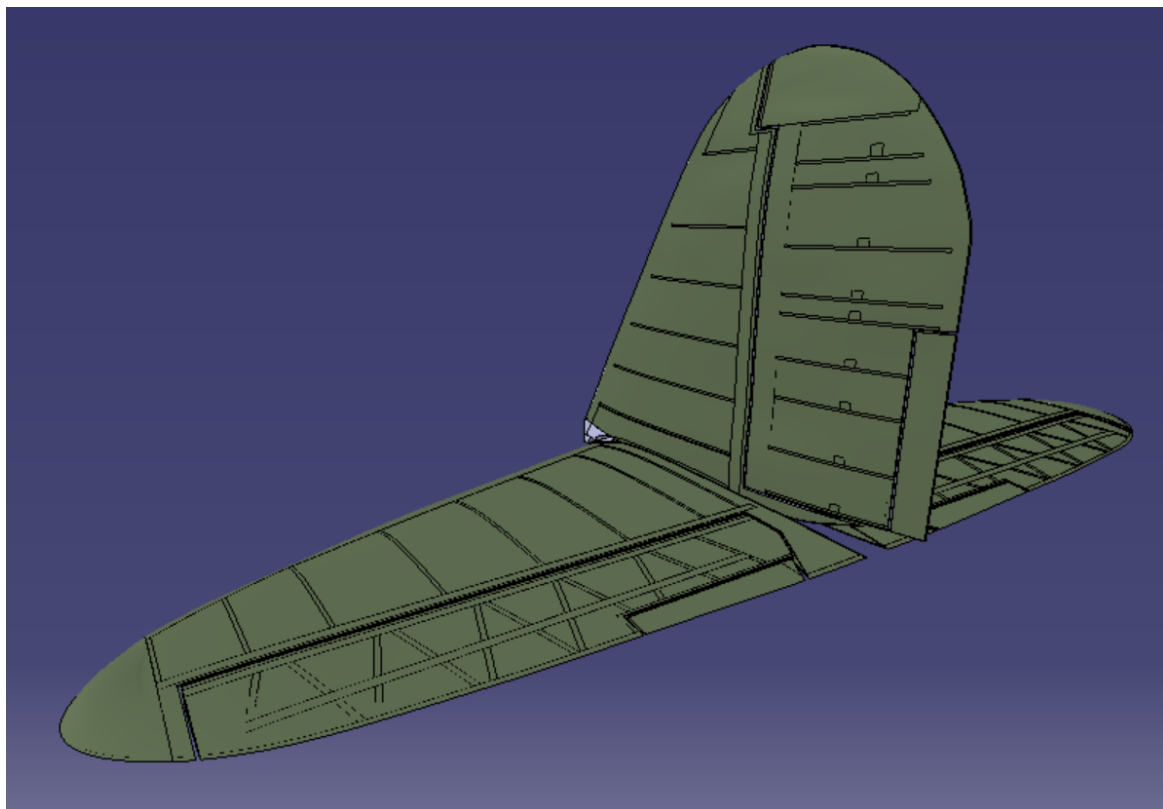


Figura 89 – Empenaje del Kawasaki Ki-45 Nick

Así mismo, en la Figura 90, se puede ver el estado de la aeronave completa hasta el momento.

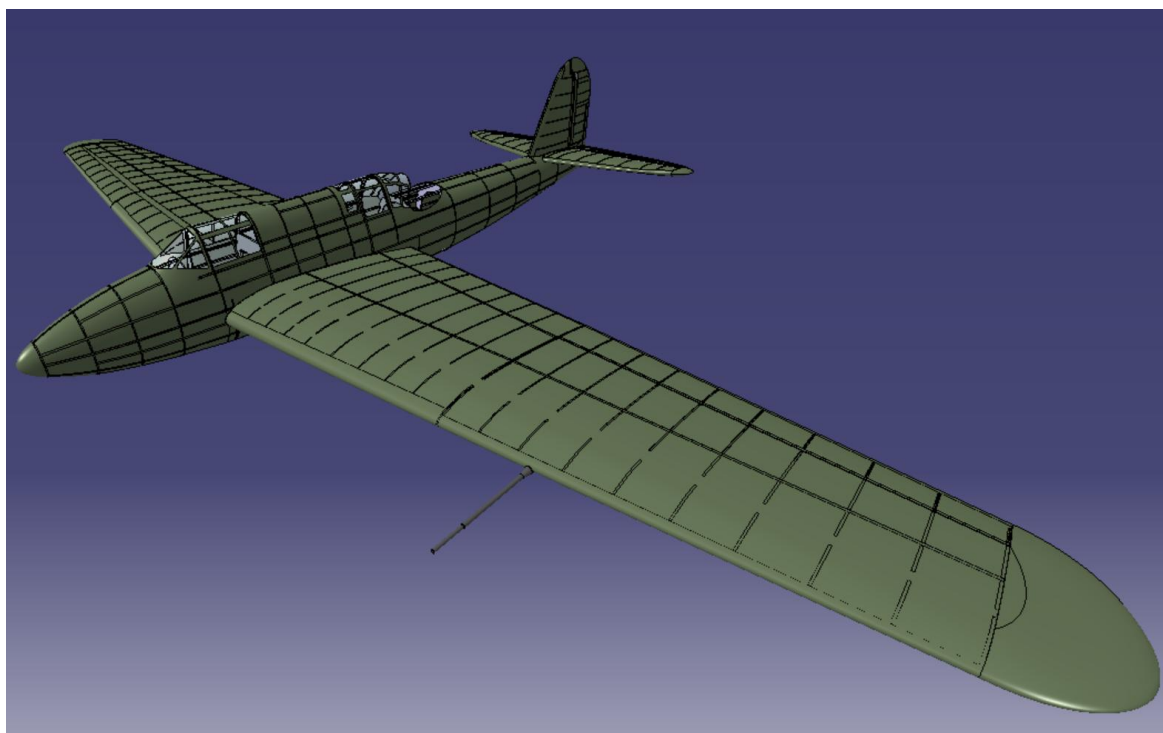


Figura 90 – Modelado del Kawasaki Ki-45 Nick (Fuselaje, alas y empenaje)

2.5 Construcción de la planta de potencia

Este capítulo reunirá el proceso de modelado de la planta de potencia del Kawasaki Ki-45 Nick. Se obviará toda la parte mecánica interna del motor, ya que la modelización esta, sería suficiente para un proyecto completo. El plano de la Figura 91 ha servido como base para comenzar con el diseño.

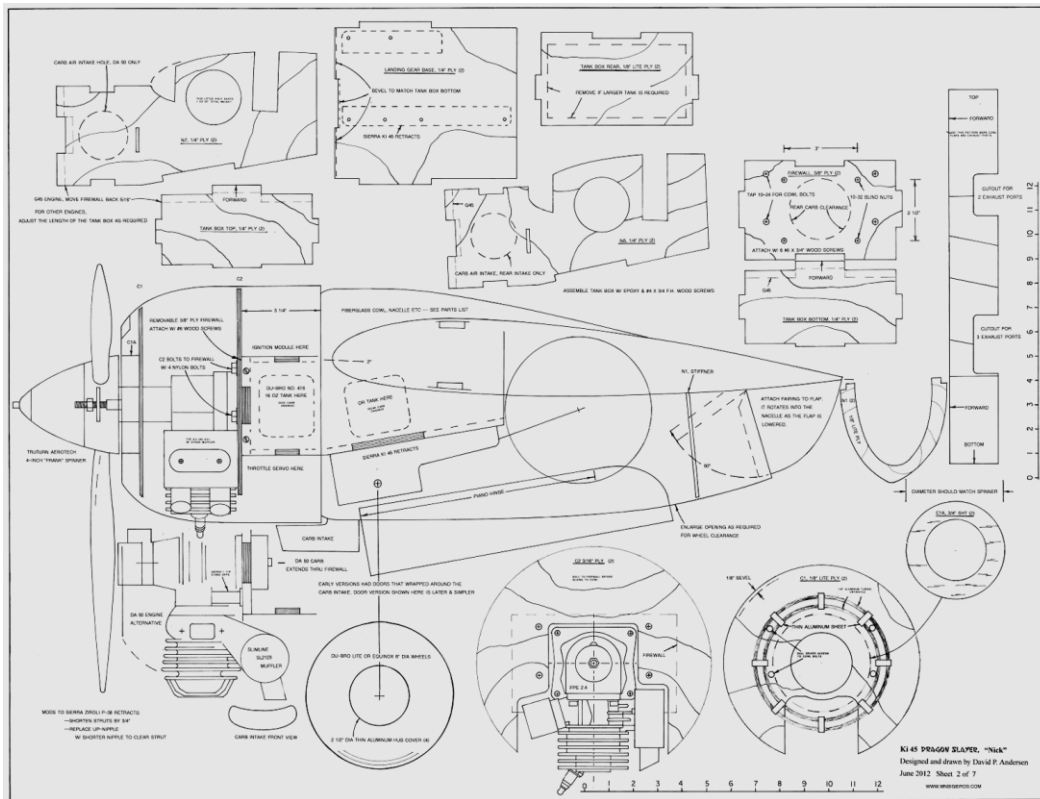


Figura 91 – Plano de la planta de potencia del Kawasaki Ki-45 Nick

Como se ha hecho en capítulos anteriores, se comenzó modelando las piezas del plano y montando el conjunto pertinente. En este caso, se puede ver en la Figura 92.

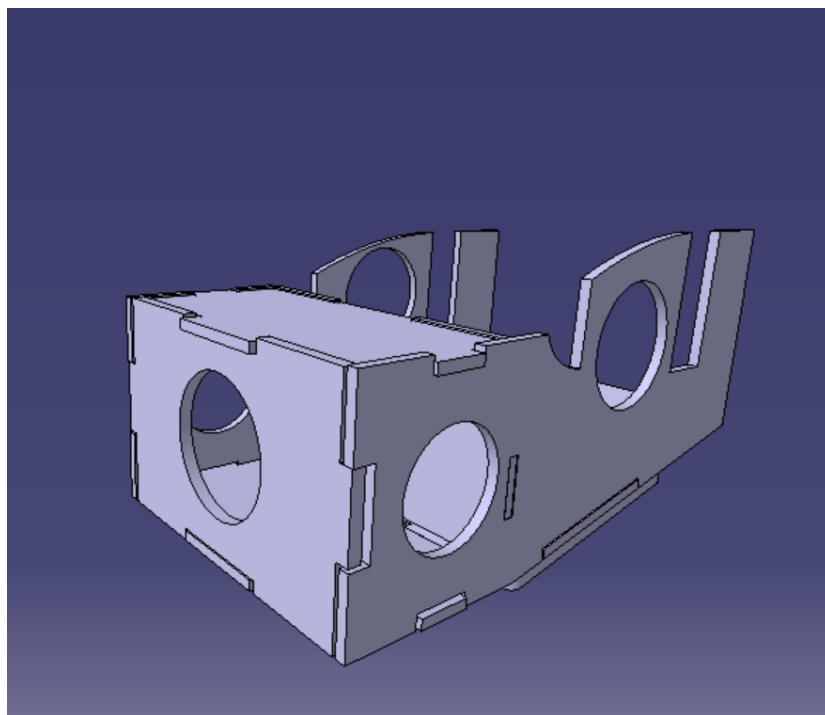


Figura 92 – Estructura interna de la planta de potencia del Kawasaki Ki-45 Nick

Tras el modelado de la caja interna del motor, y usando como referencia el plano insertado en CATIA V5, se pudo modelar la parte trasera de la góndola de la siguiente manera mostrada en la Figura 93.

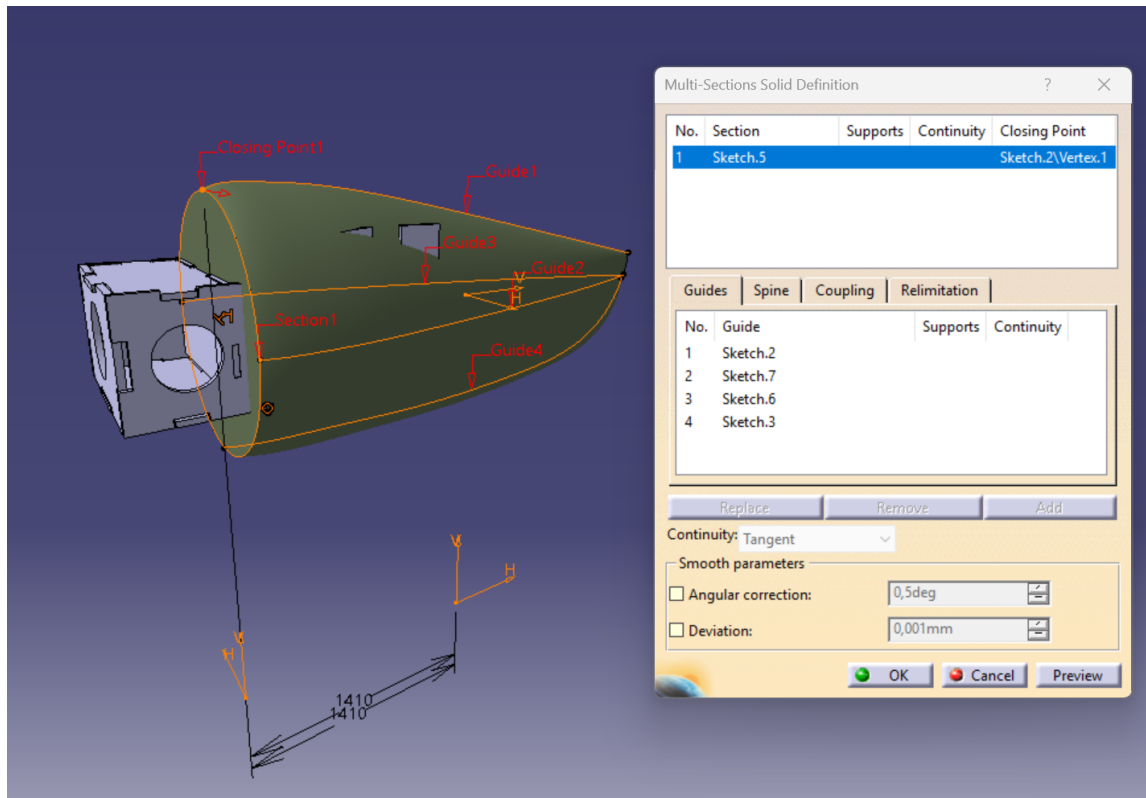


Figura 93 – Parte trasera de la góndola de la planta de potencia del Kawasaki Ki-45 Nick

Para poder adaptarlo al ala, es necesario hacer un corte en la góndola con la superficie del ala. En la Figura 94 se puede ver el *Split* usado en este proceso.

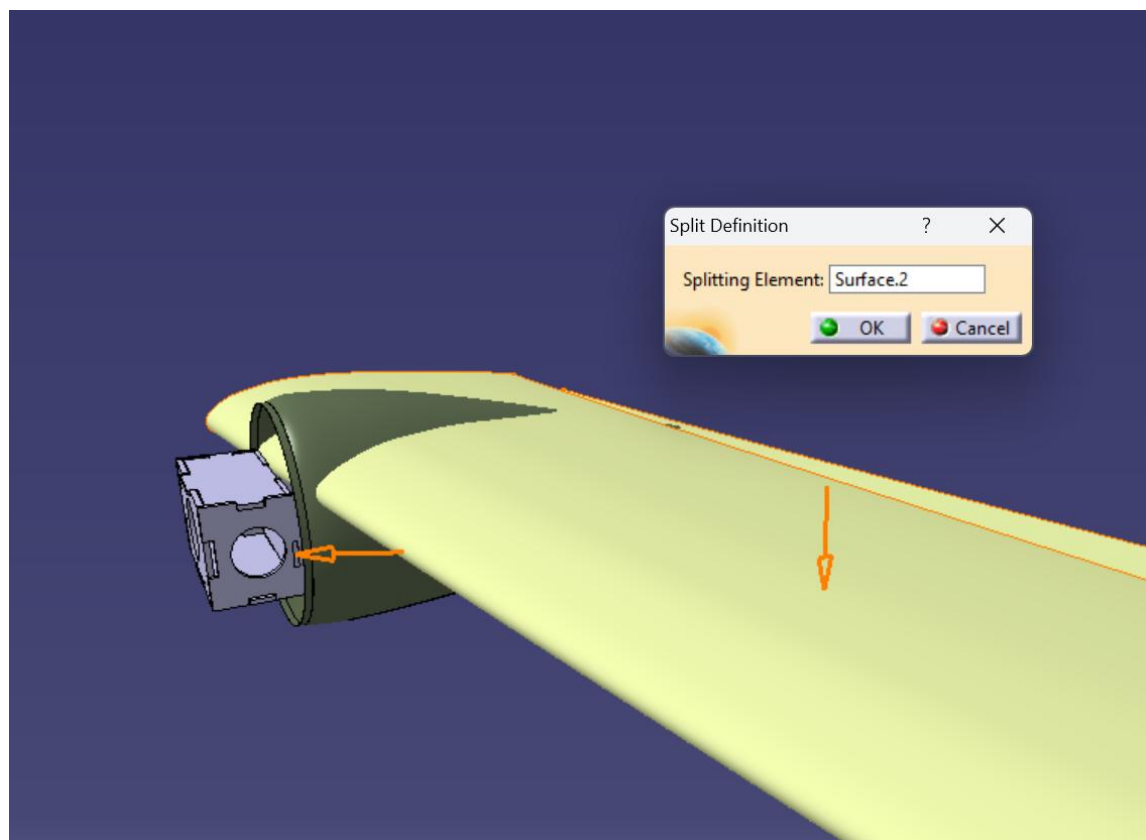


Figura 94 – Split de la góndola de la planta de potencia del Kawasaki Ki-45 Nick para ajustarse al ala

Esto, junto con la parte delantera de la góndola forman el siguiente conjunto de la Figura 95.

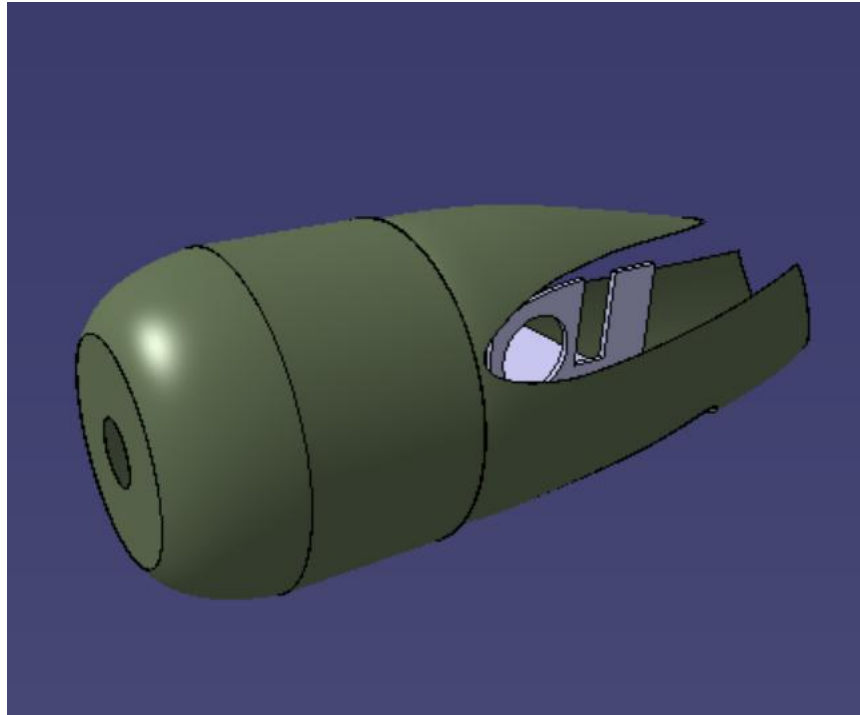


Figura 95 – Góndola de la planta de potencia del Kawasaki Ki-45 Nick

Para poder hacer el tren de aterrizaje delantero, es necesario hacer las aperturas correspondientes en la góndola. Para ello, tal y como se ve en la Figura 96, se ha hecho un *Split* con la forma necesaria para ello.

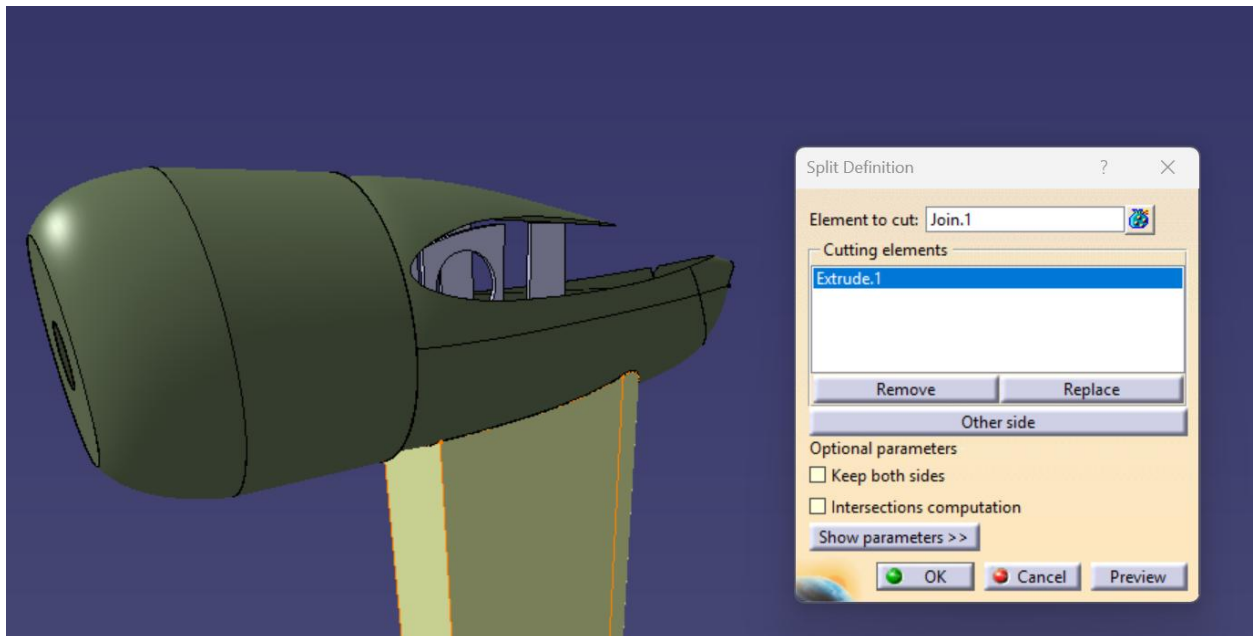


Figura 96 – Split para el tren de aterrizaje delantero del Kawasaki Ki-45 Nick

Quedando como resultado las siguientes compuertas mostradas en la Figura 97.

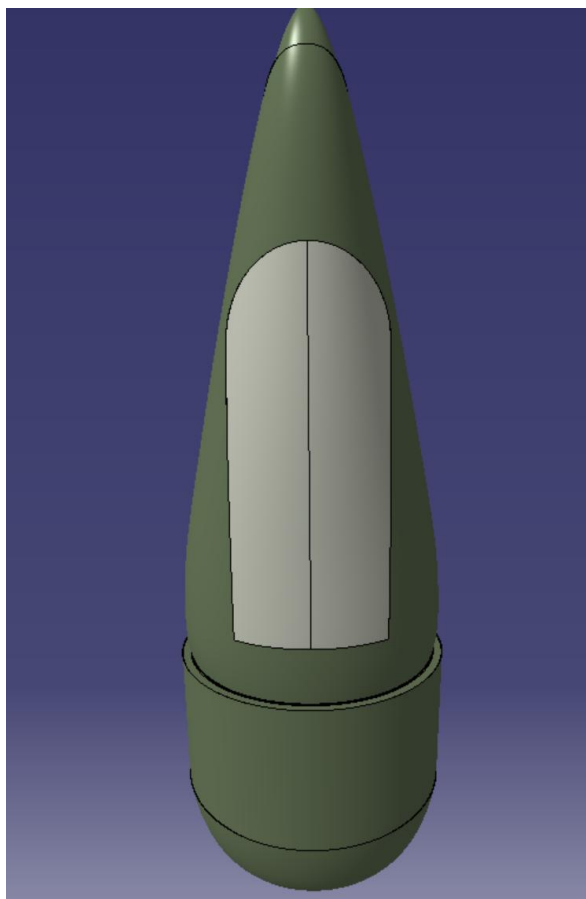


Figura 97 – Compuertas para el tren de aterrizaje delantero del Kawasaki Ki-45 Nick

A estas compuertas, se le han modelado unas bisagras para el mecanismo que se explicará en el capítulo dedicado a ello. Así, en la Figura 98, se pueden ver las bisagras modeladas.

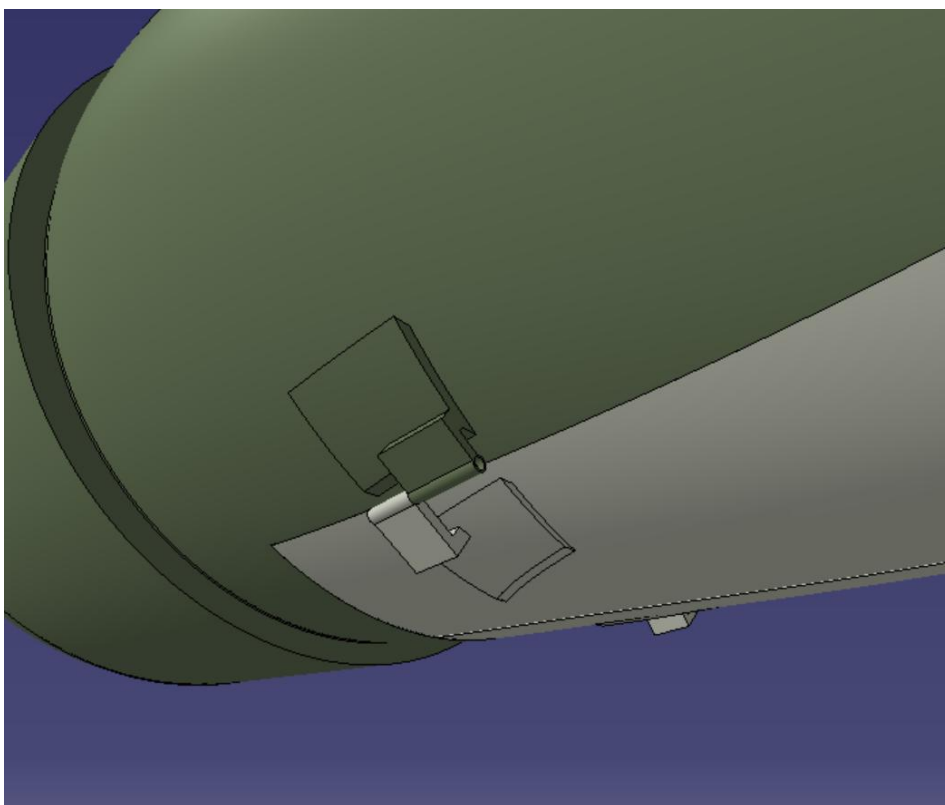


Figura 98 – Bisagras de las compuertas para el tren de aterrizaje delantero del Kawasaki Ki-45 Nick

A continuación, se modeló la entrada de aire al motor. Esta se hizo tomando las medidas del plano y usando herramientas como *Pad*, *Multi-Sections Solid* y *Shell*. Se puede ver el resultado final en la Figura 99.

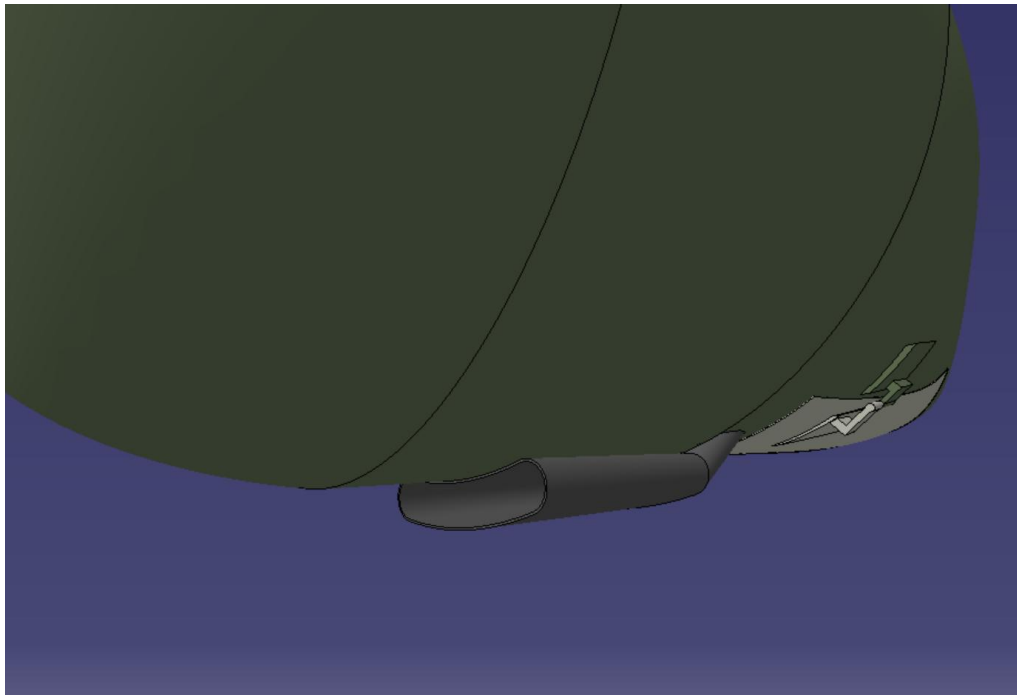


Figura 99 – Toma de aire de la planta de potencia del Kawasaki Ki-45 Nick

Para terminar la planta de potencia, el modelado de las hélices se realizó usando la herramienta *Multi-Sections Solid* principalmente, y finalizando la punta de pala con la herramienta *Fill* (Figura 100).

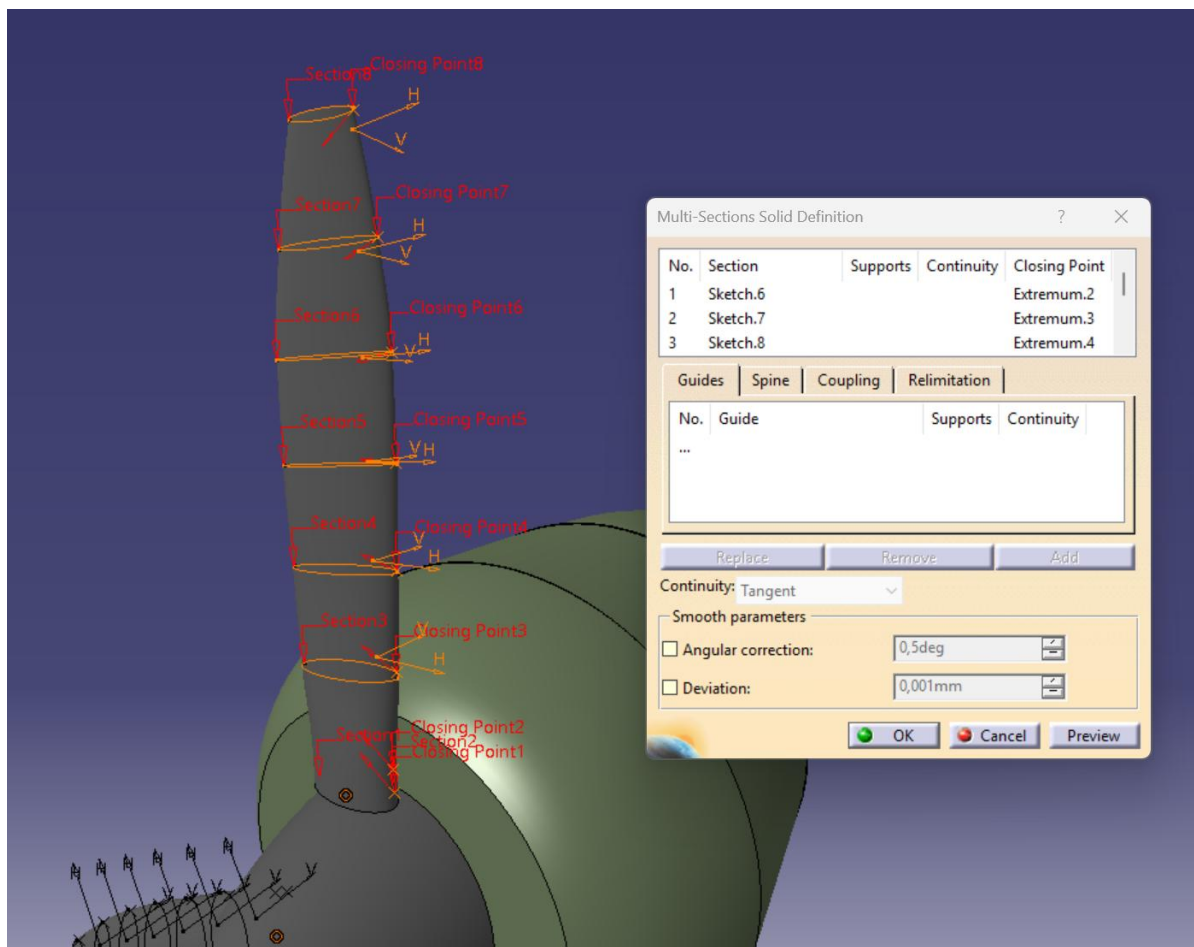


Figura 100 – Hélices de la planta de potencia del Kawasaki Ki-45 Nick

Siendo el resultado final de la planta de potencia del Kawasaki Ki-45 Nick, el que se muestra en la Figura 101.

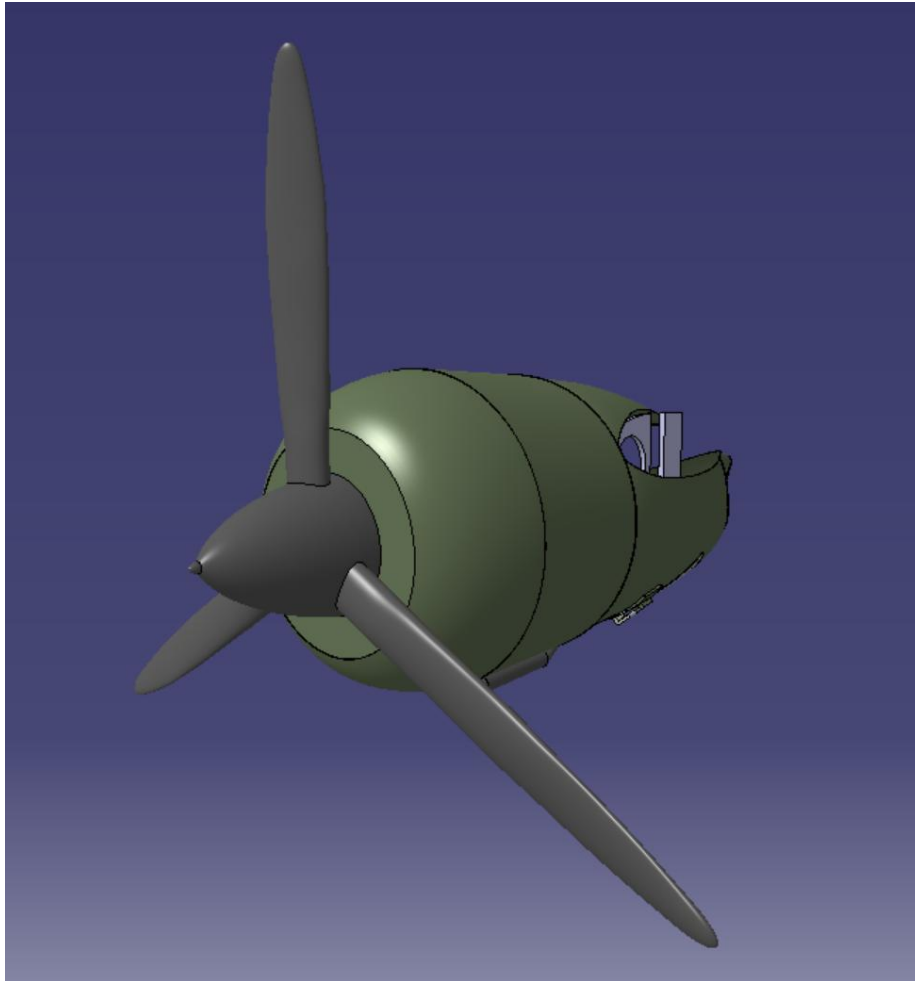


Figura 101 – Planta de potencia del Kawasaki Ki-45 Nick

2.5.1 Conclusiones

Tal y como se hizo tanto en las alas, como en el HTP, ya que esta aeronave consta de 2 plantas de potencia simétricas, y ya que la modelada este capítulo ha sido la correspondiente al ala izquierda, el motor derecho se modeló haciendo uso de la herramienta de simetría. En la siguiente imagen, la Figura 102, se puede ver el conjunto de la aeronave con los motores incluidos.

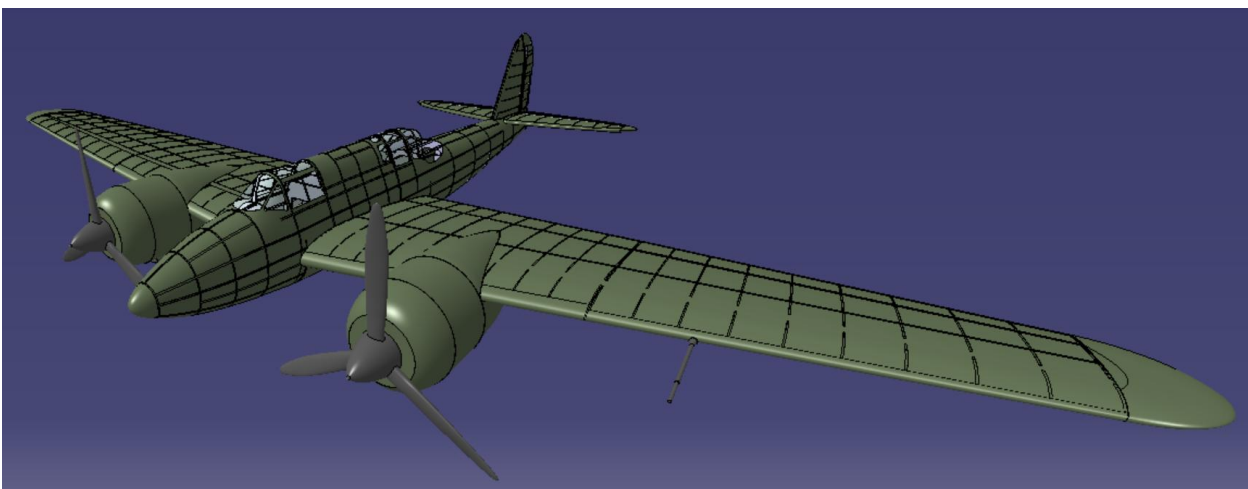


Figura 102 – Modelado del Kawasaki Ki-45 Nick (Fuselaje, alas, empenaje y planta de potencia)

2.6 Construcción del tren de aterrizaje

Este capítulo contendrá el proceso de modelado del tren de aterrizaje, tanto delantero como trasero, del Kawasaki Ki-45 Nick. Para ello, se ha utilizado la información de los planos para las dimensiones generales de estos. Se dividirá este capítulo en dos: tren de aterrizaje delantero y tren de aterrizaje trasero.

2.6.1 Construcción del tren de aterrizaje delantero

Como ya se mencionó en el apartado Construcción de la planta de potencia, el tren de aterrizaje delantero se sitúa en las góndolas de los motores. Por esto, la información usada para su modelado viene del mismo plano usado previamente (Figura 91). En él solo se tiene la información de la longitud del brazo del tren de aterrizaje y del diámetro de la rueda. Por esto, el modelado se ha realizado lo más sencillo posible, siendo un sistema de barras cilíndricas en forma de T. El modelado se ha basado en la herramienta *Pad* para con apoyo en planos en las direcciones pertinentes. En las siguientes imágenes (Figuras 103, 104, 105, 106 y 107) se puede ver el proceso de creación de la estructura.

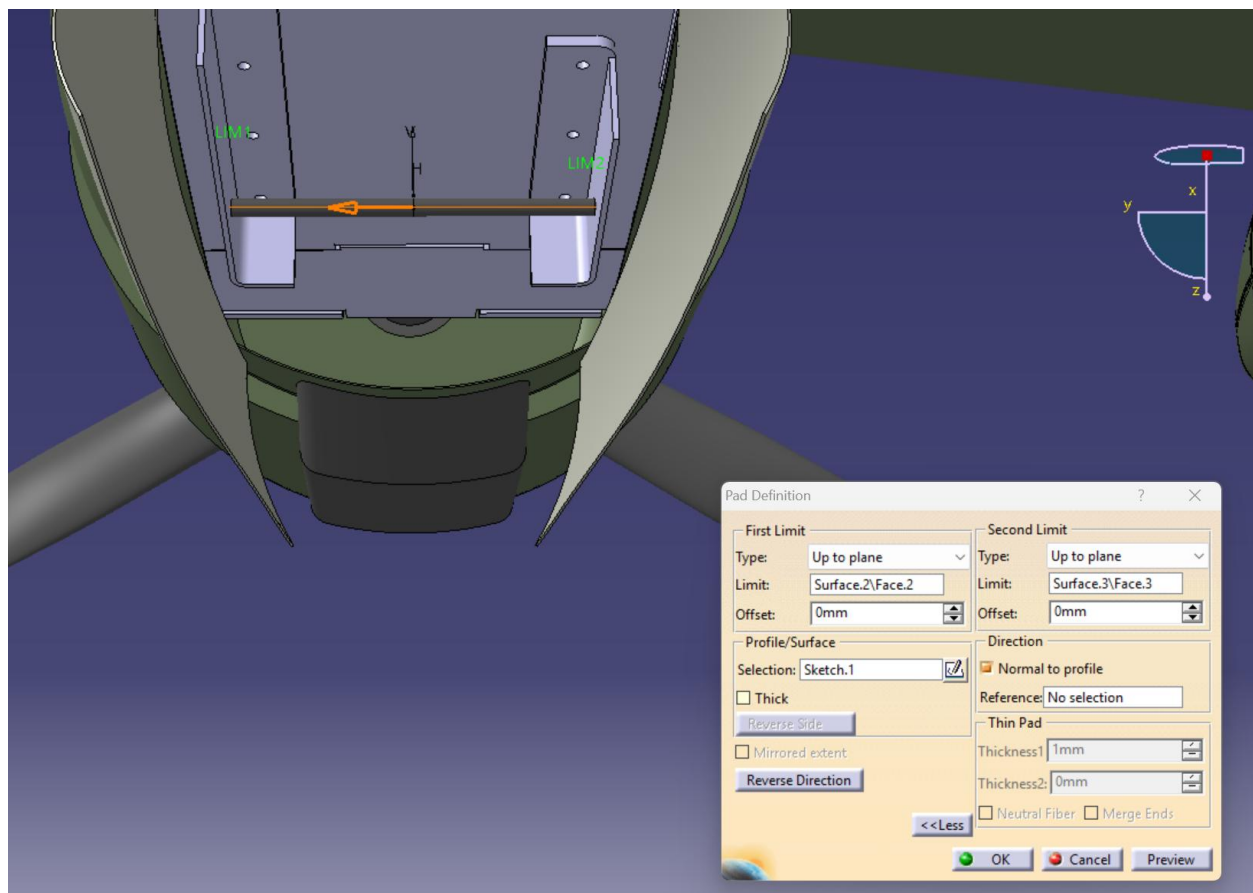


Figura 103 – Primer paso del modelado de la estructura del tren de aterrizaje delantero del Kawasaki Ki-45 Nick

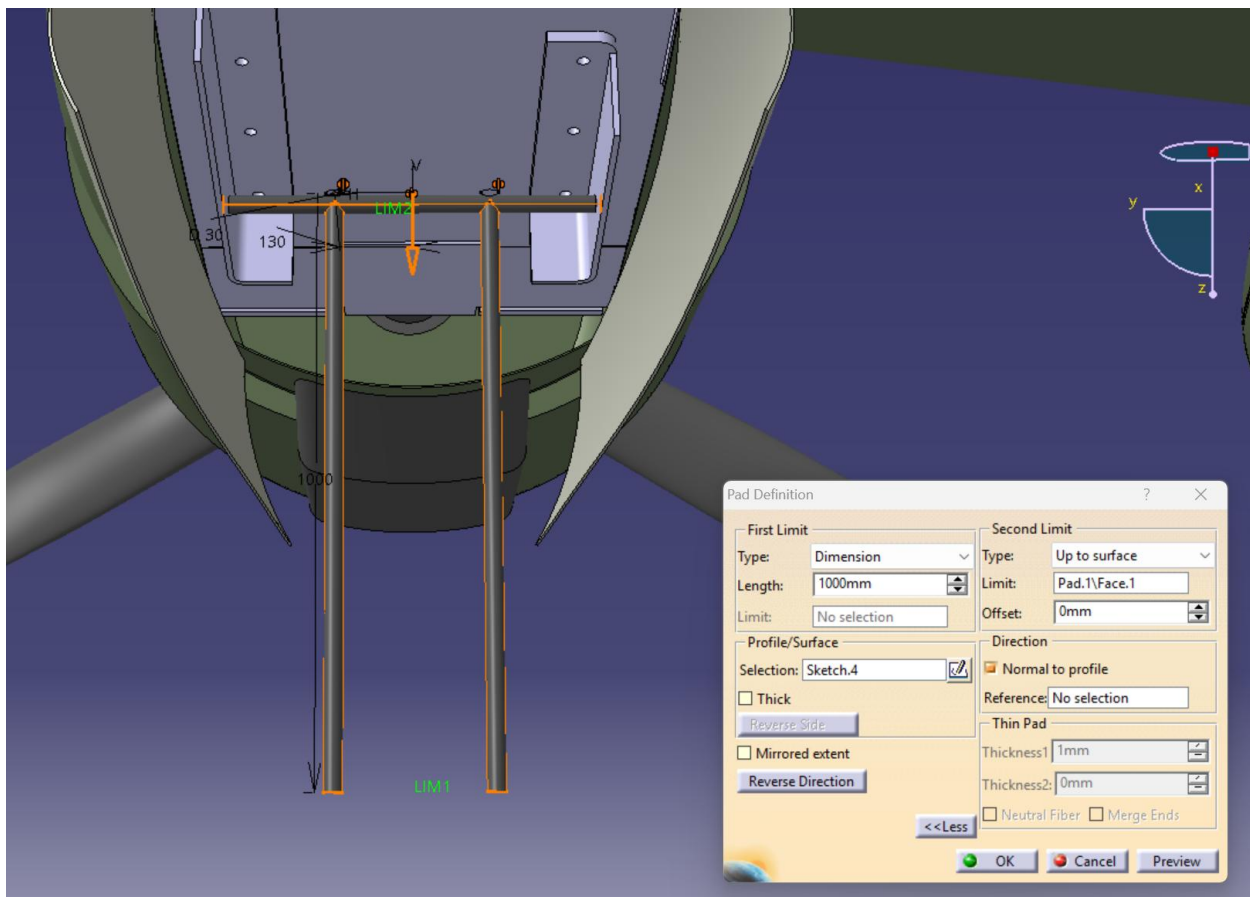


Figura 104 – Segundo paso del modelado de la estructura del tren de aterrizaje delantero del Kawasaki Ki-45 Nick

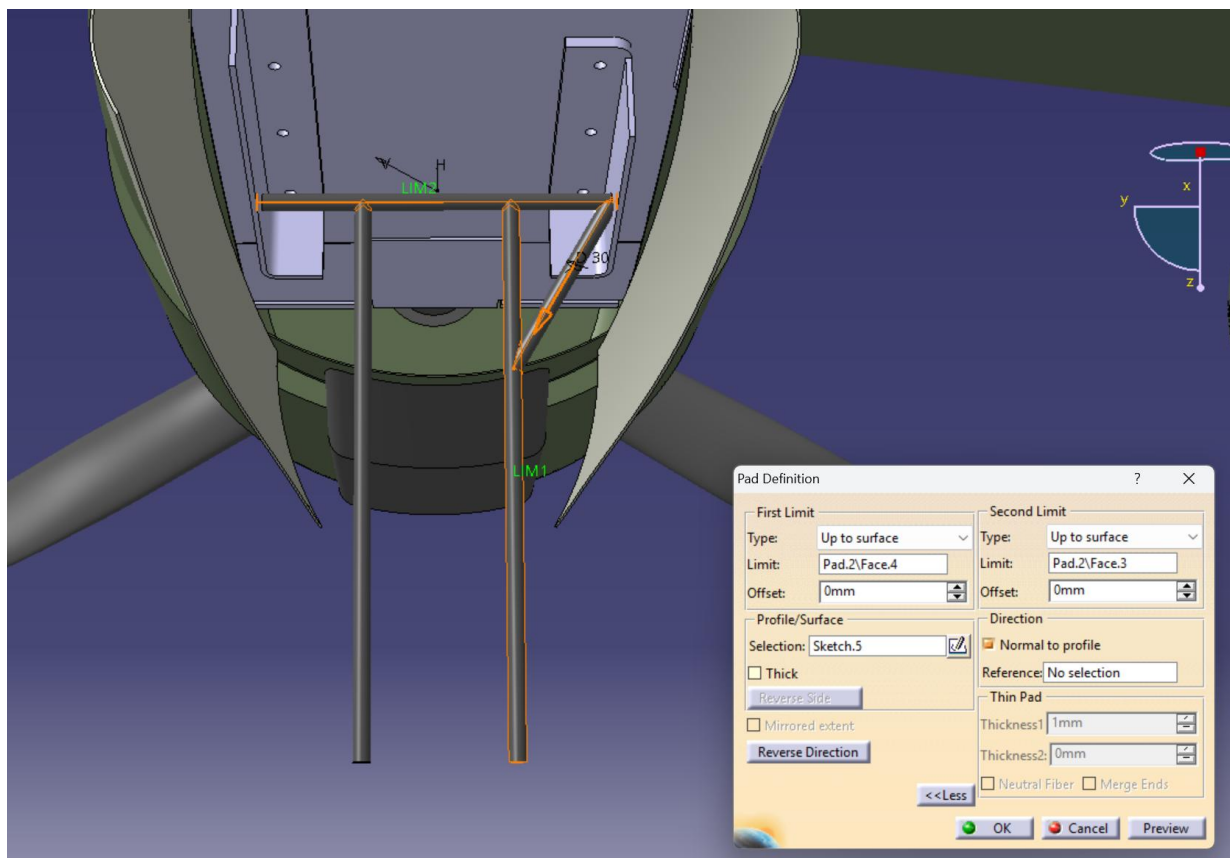


Figura 105 – Tercer paso del modelado de la estructura del tren de aterrizaje delantero del Kawasaki Ki-45 Nick

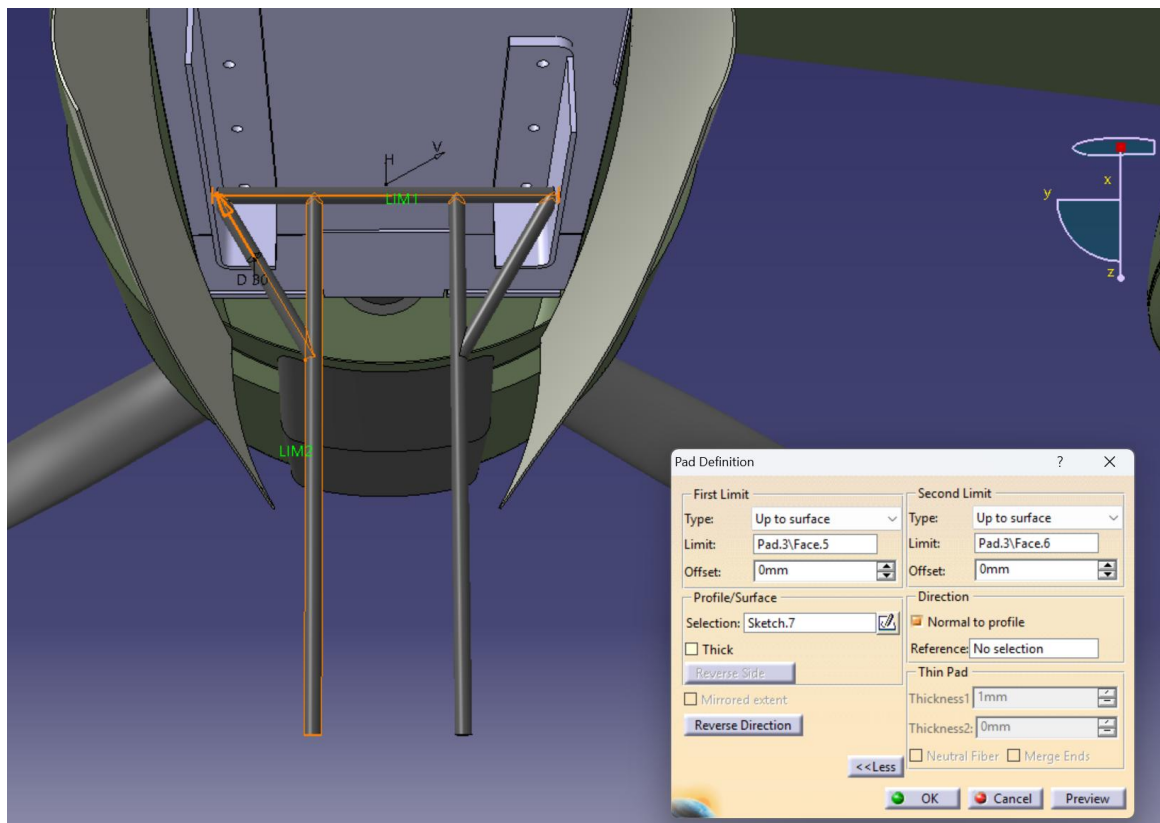


Figura 106 – Tercer paso del modelado de la estructura del tren de aterrizaje delantero del Kawasaki Ki-45
Nick

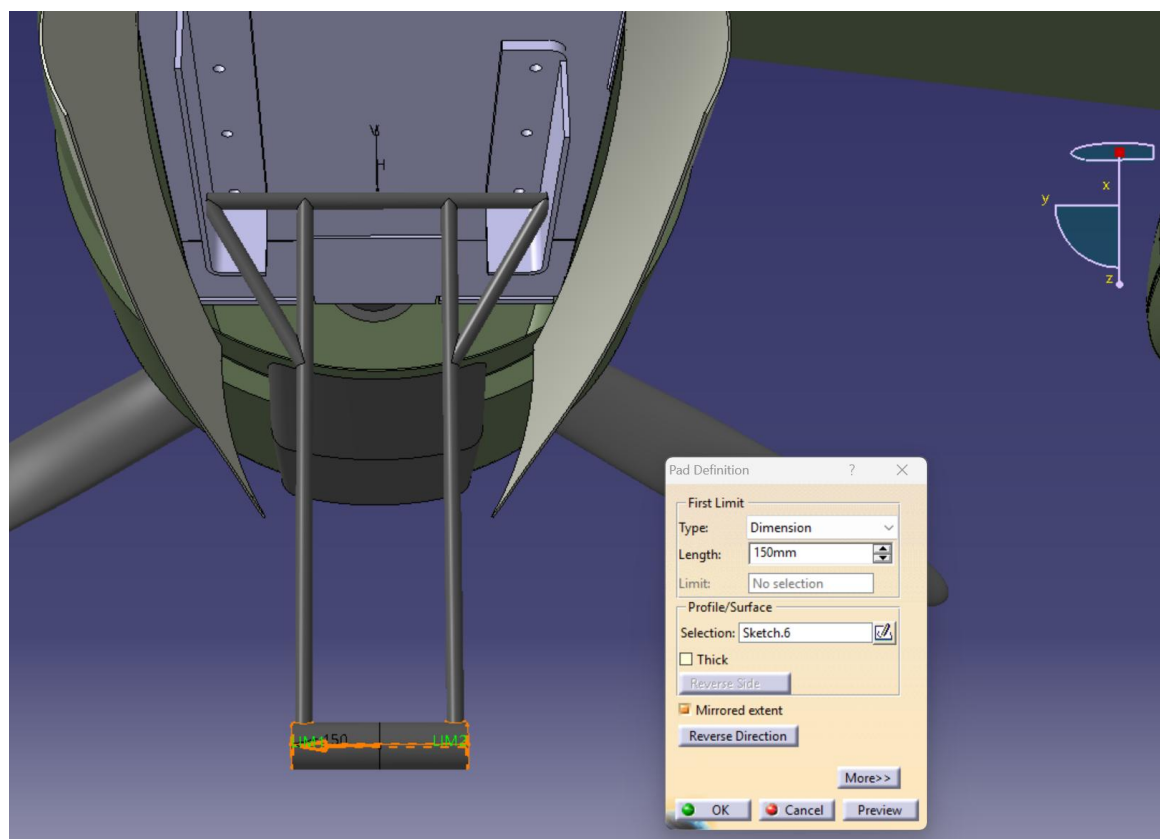


Figura 107 – Cuarto paso del modelado de la estructura del tren de aterrizaje delantero del Kawasaki Ki-45
Nick

En cuanto a la rueda, el modelado se ha hecho mediante la herramienta *Shaft* como se puede ver en la Figura 108.

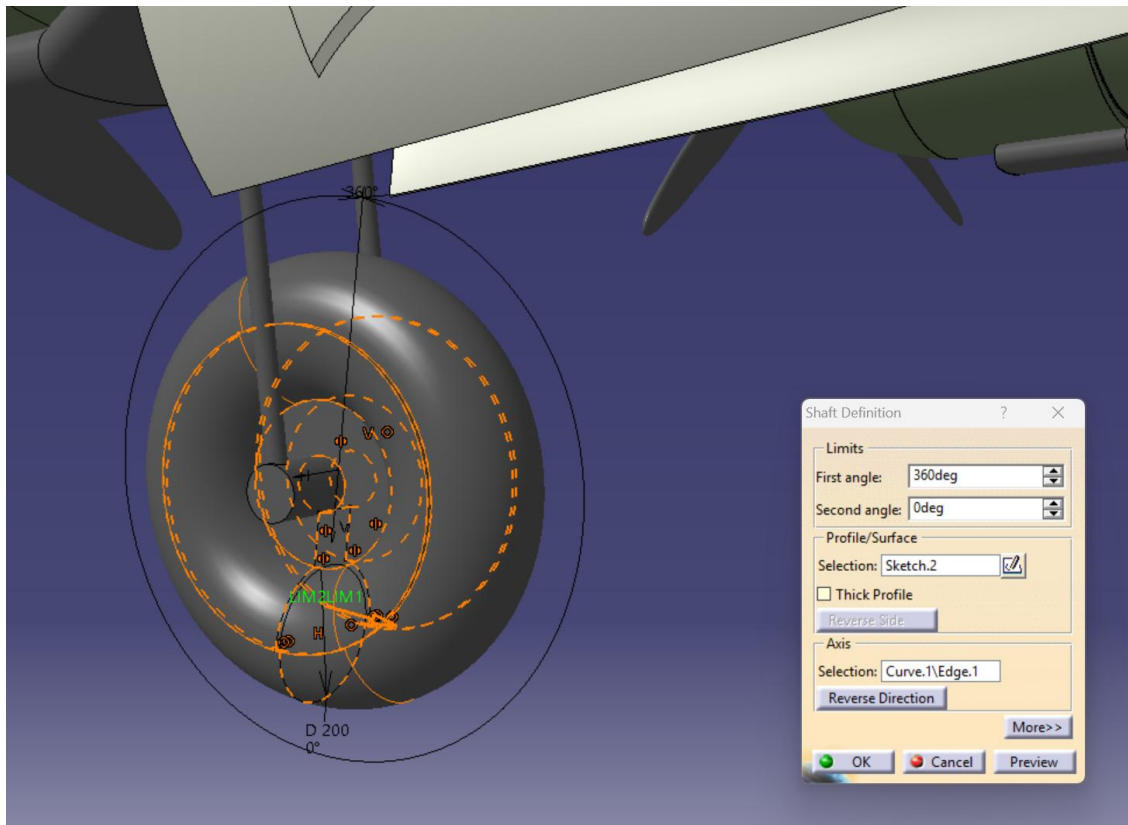


Figura 108 – Modelado de la rueda del tren de aterrizaje delantero del Kawasaki Ki-45 Nick
En las Figuras 109, 110 y 111 se puede ver el resultado final.

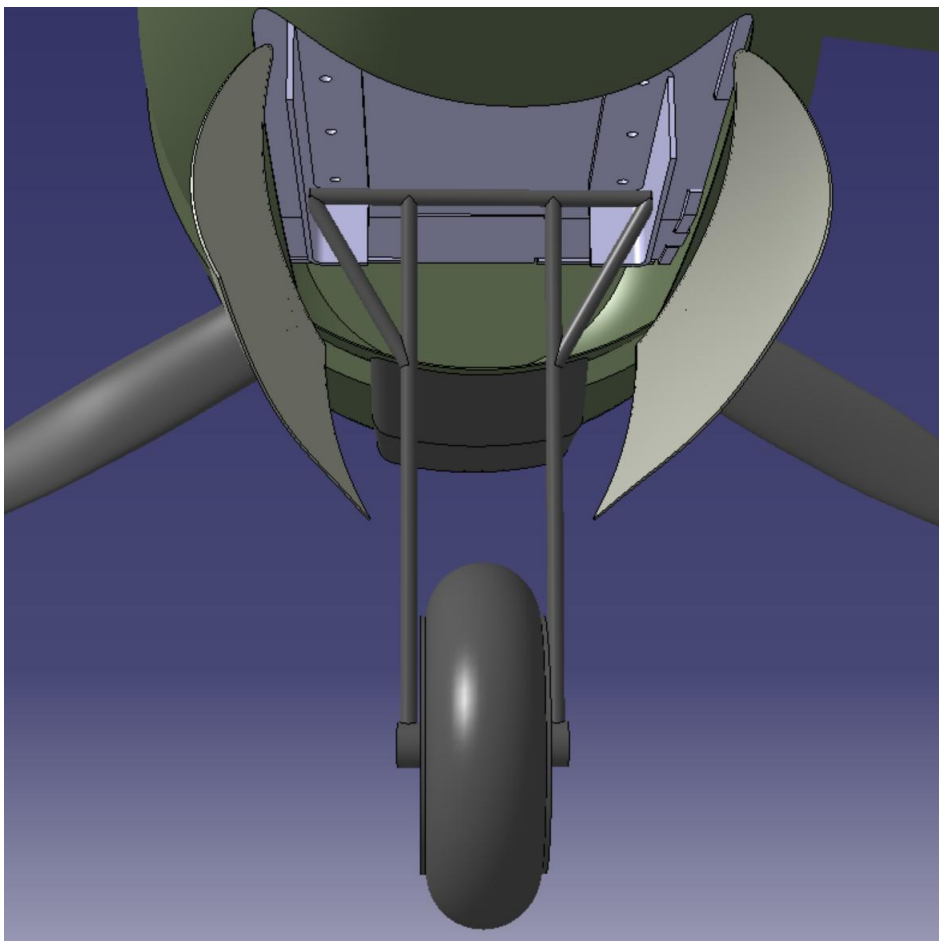


Figura 109 – Vista trasera del tren de aterrizaje delantero del Kawasaki Ki-45 Nick

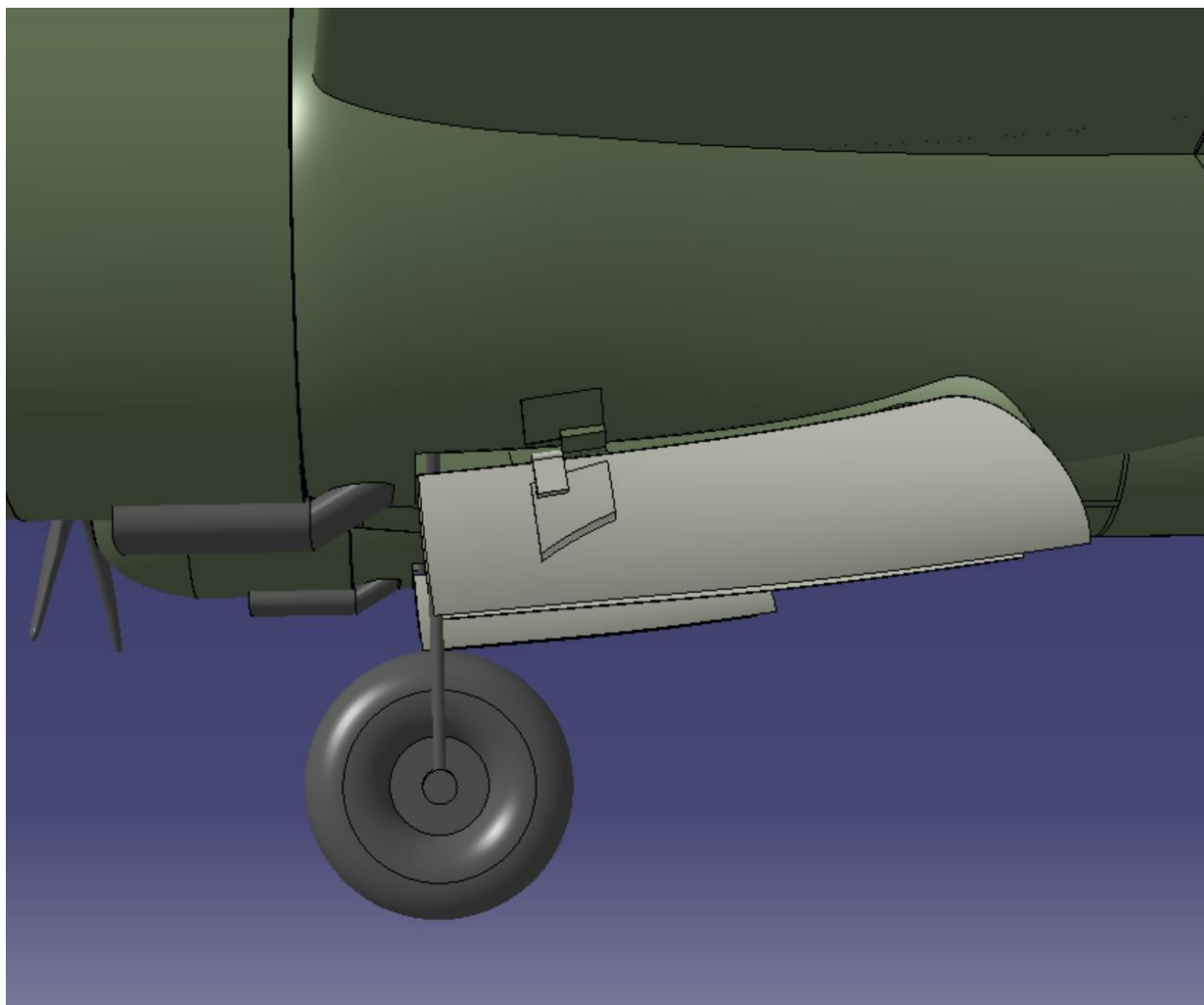


Figura 110 – Vista lateral del tren de aterrizaje delantero del Kawasaki Ki-45 Nick

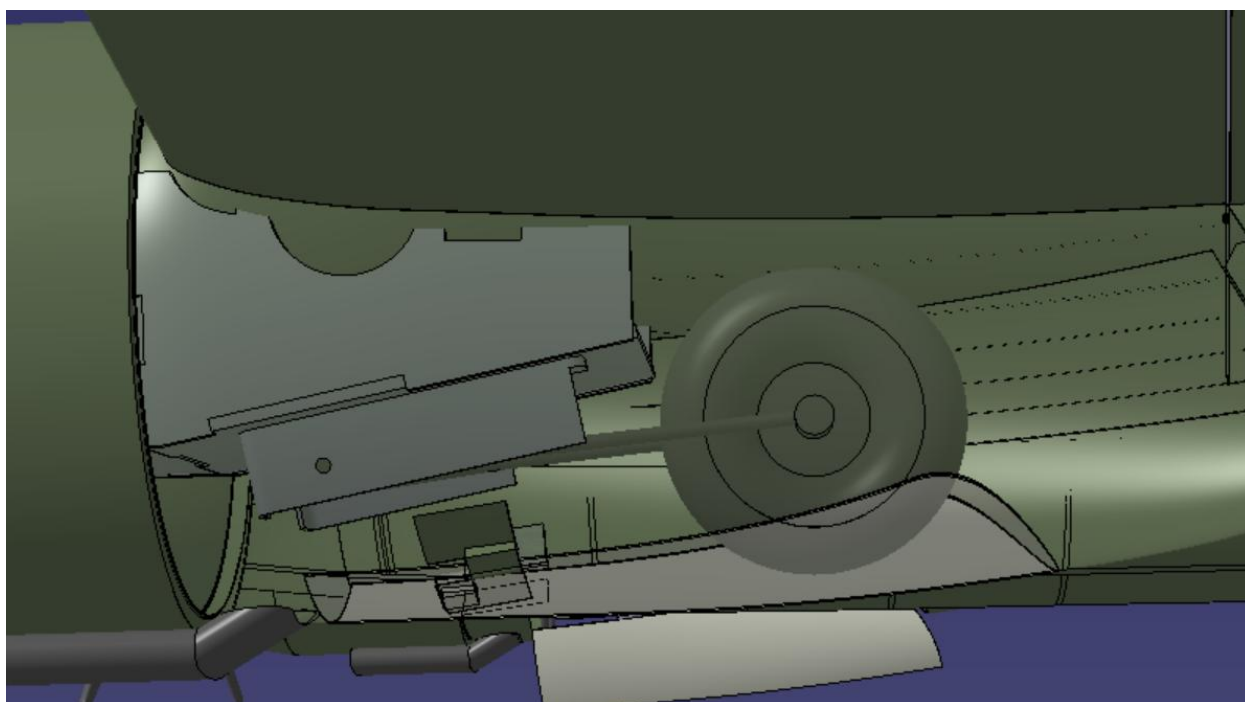


Figura 111 – Vista lateral del tren de aterrizaje delantero retraído del Kawasaki Ki-45 Nick

2.6.2 Tren de aterrizaje trasero

En este caso se tenía algo más de información gracias al uso del siguiente fragmento de un plano completo del fuselaje (Figura 112).

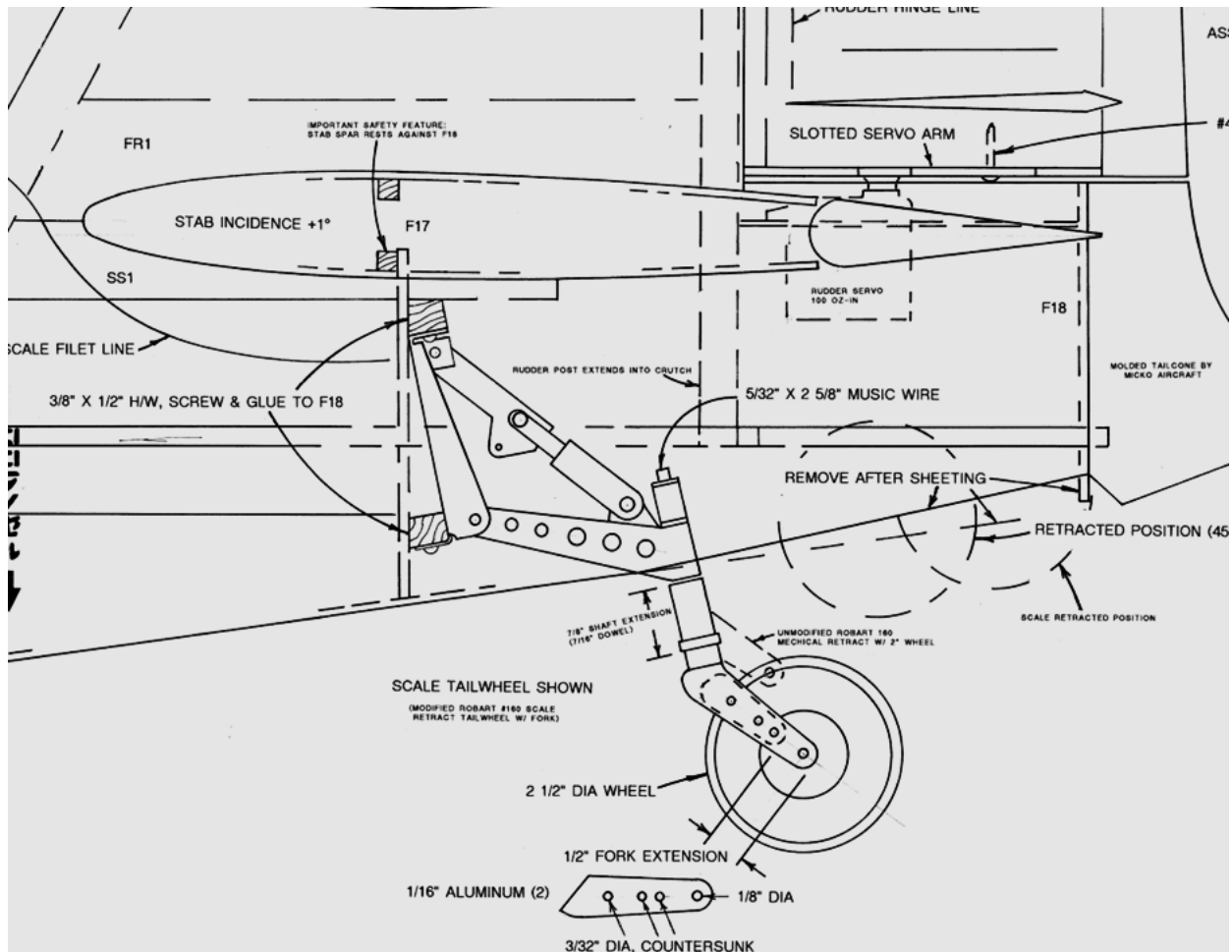


Figura 112 – Información en plano del tren de aterrizaje trasero del Kawasaki Ki-45 Nick

Aun teniendo la información mostrada en plano, gran parte de su modelado se ha hecho de manera creativa y tratando de resolver los problemas encontrados en la zona debido al escaso espacio del que se disponía. Para este caso, ya que ha sido necesario modelar varias piezas para el conjunto, no se hará tanto hincapié en cada función usada durante el proceso.

En primer lugar, se modeló el denominado “Soporte del tren de aterrizaje trasero” usando fundamentalmente las herramientas *Pad* y *Pocket* (Figura 113).

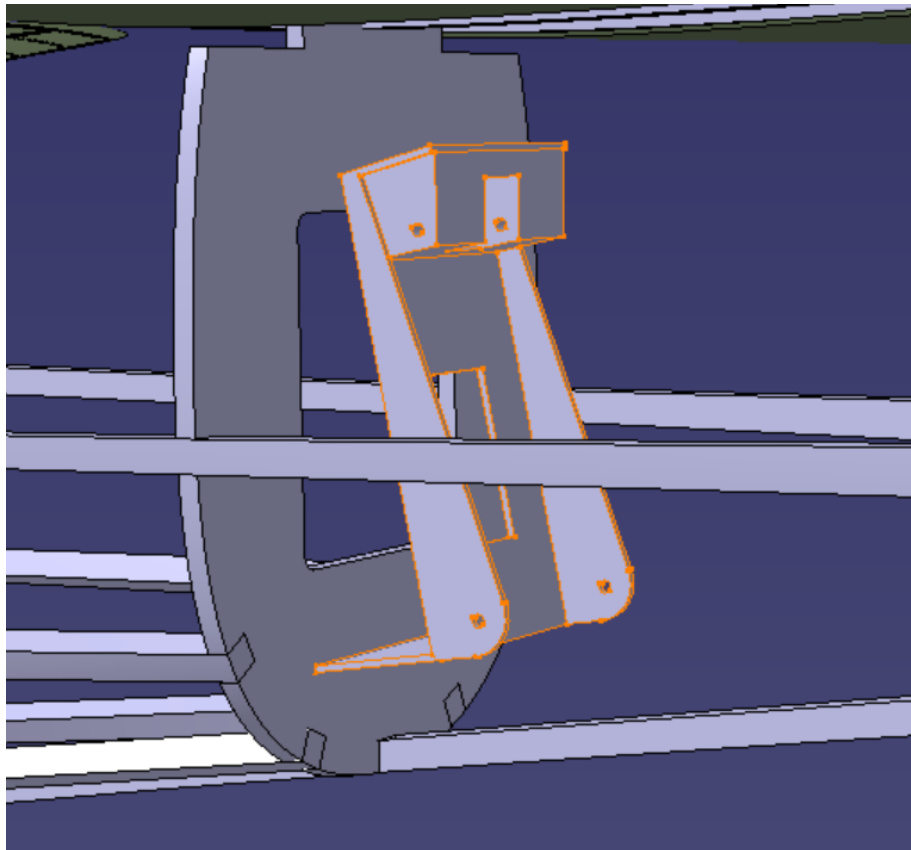


Figura 113 – Soporte del tren de aterrizaje trasero del Kawasaki Ki-45 Nick

En segundo lugar, se modeló el “Brazo secundario del tren de aterrizaje trasero”. En este, siguiendo el perfil del plano de la Figura 112, solo fue necesario el uso de la herramienta *Pad* (Figura 114).

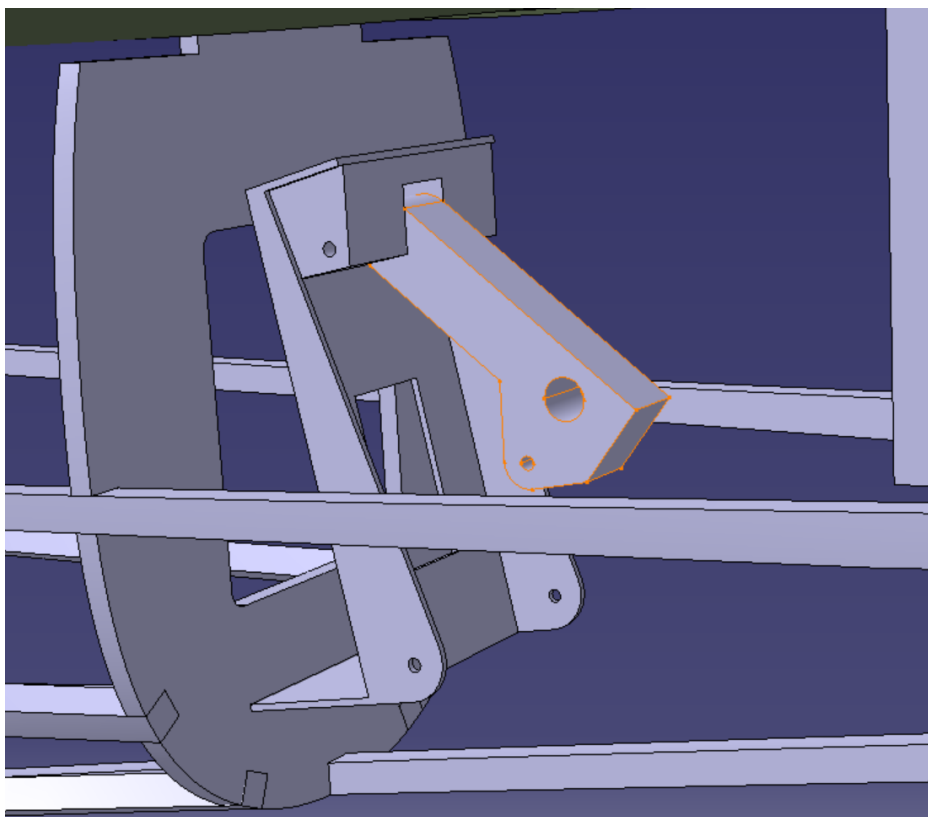


Figura 114 – Brazo secundario del tren de aterrizaje trasero del Kawasaki Ki-45 Nick

Tras esto, los brazos de suspensión fueron modelados con el uso de herramientas como *Pad* y *Shaft* (Figura 115).

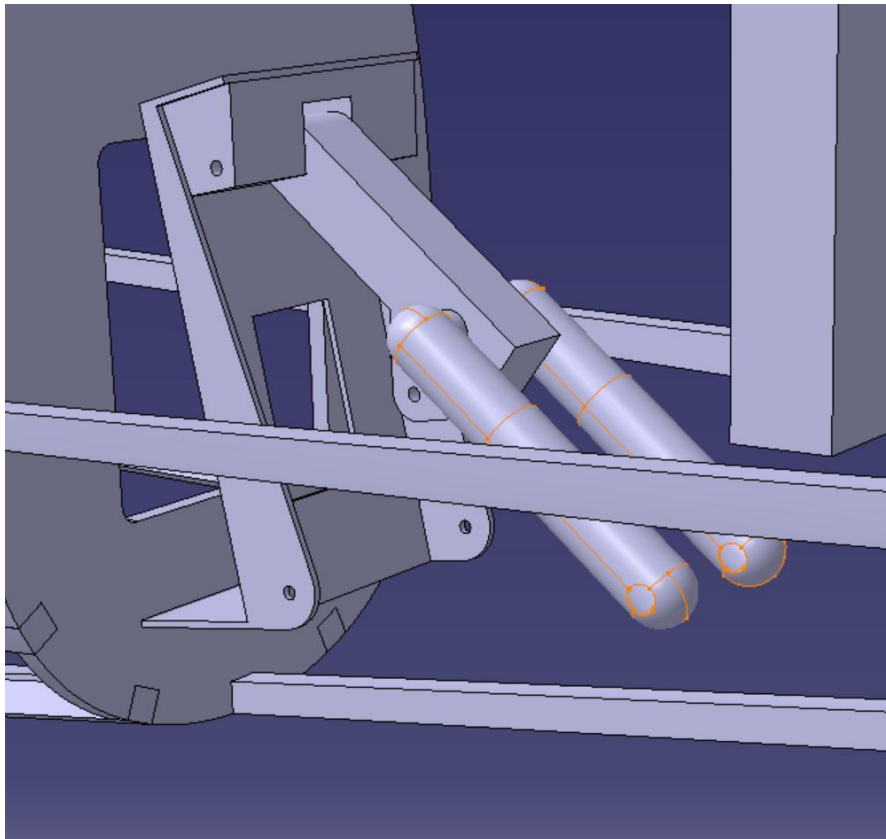


Figura 115 – Brazos de suspensión del tren de aterrizaje trasero del Kawasaki Ki-45 Nick

A continuación, el brazo principal del tren de aterrizaje trasero fue modelado con el uso de herramientas como *Pad* y *Pocket* (Figuras 116 y 117).

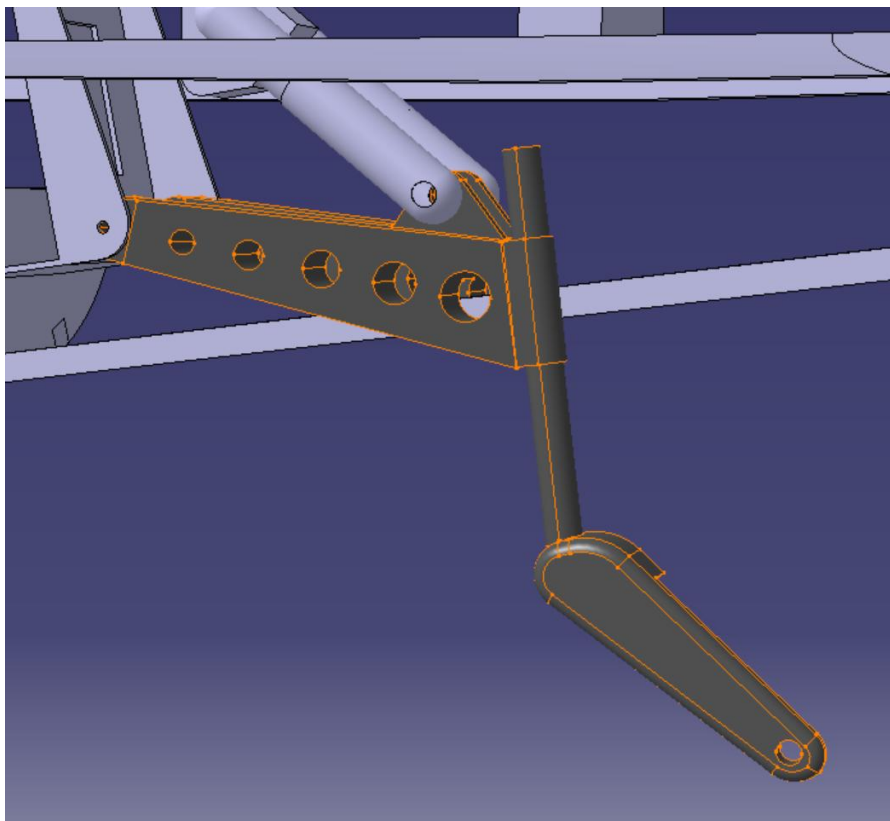


Figura 116 – Vista lateral del brazo principal del tren de aterrizaje trasero del Kawasaki Ki-45 Nick

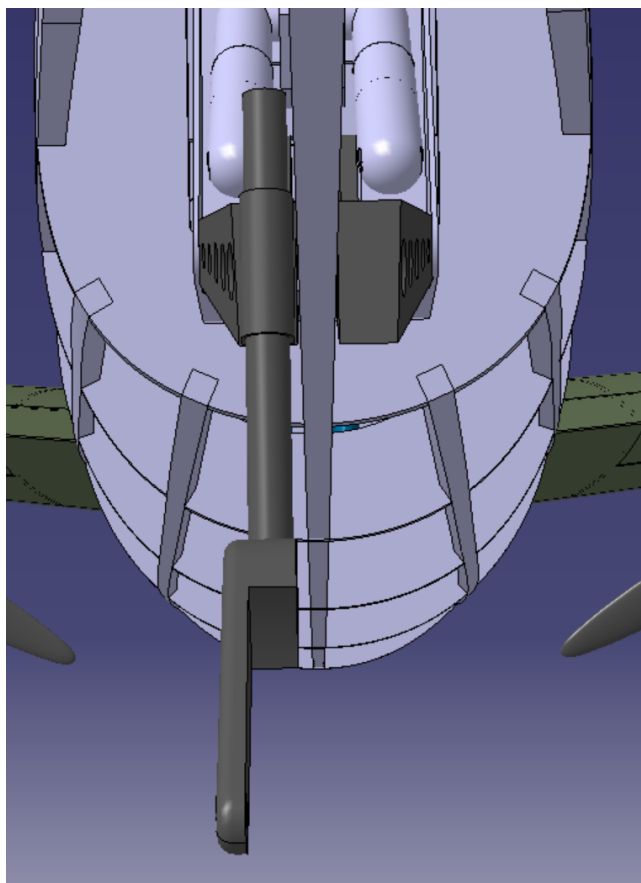


Figura 117 – Vista trasera del brazo principal del tren de aterrizaje trasero del Kawasaki Ki-45 Nick
 Por último, se modeló la rueda con el uso de la herramienta *Pad* (Figura 118).

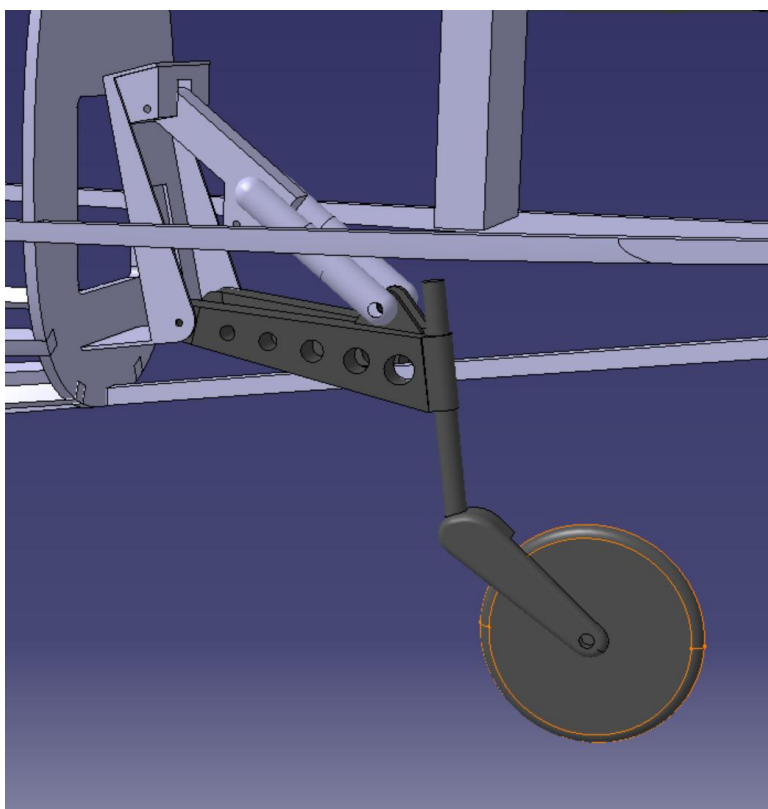


Figura 118 – Rueda del tren de aterrizaje trasero del Kawasaki Ki-45 Nick

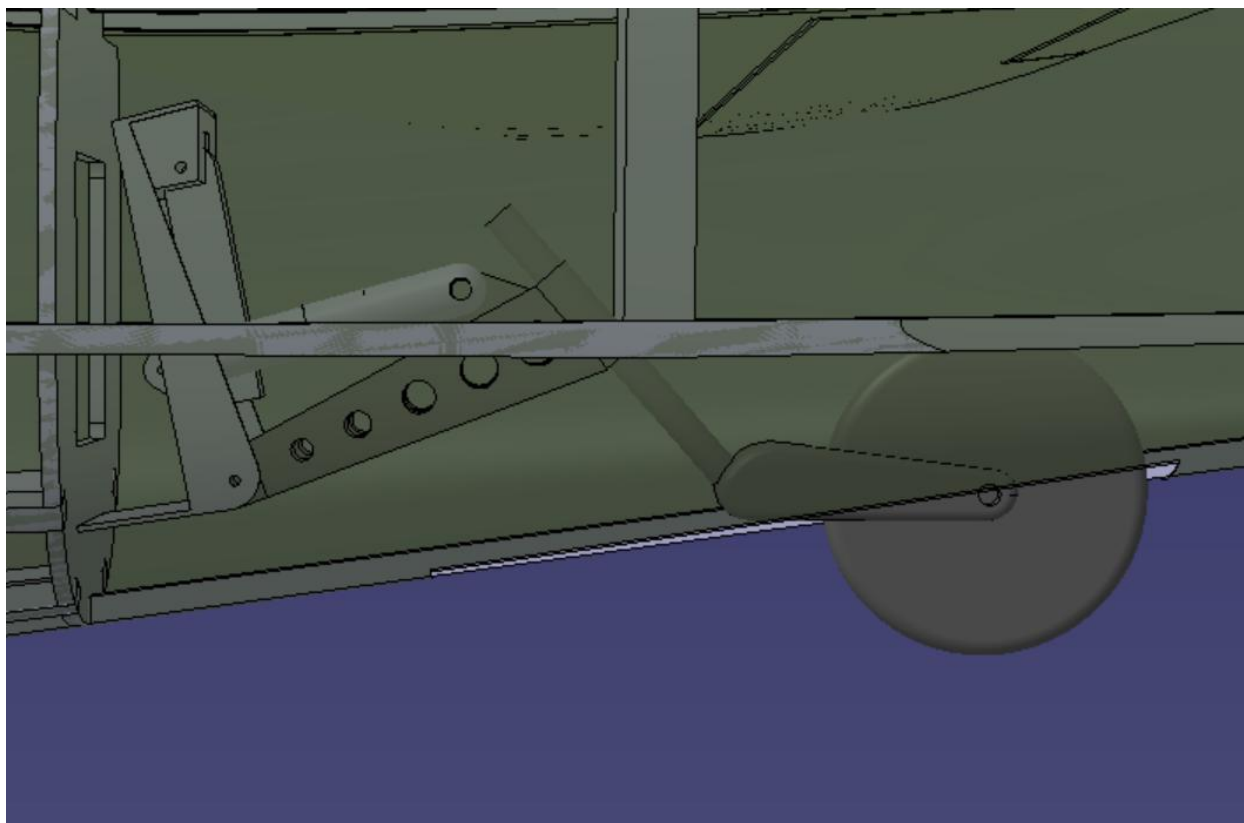


Figura 119 – Posición retraída del tren de aterrizaje trasero del Kawasaki Ki-45 Nick

2.6.3 Conclusiones

En este punto se mostrará una imagen actualizada de la aeronave incluyendo el tren de aterrizaje desplegado para tener una visión clara del punto en el que se encuentra el proyecto.

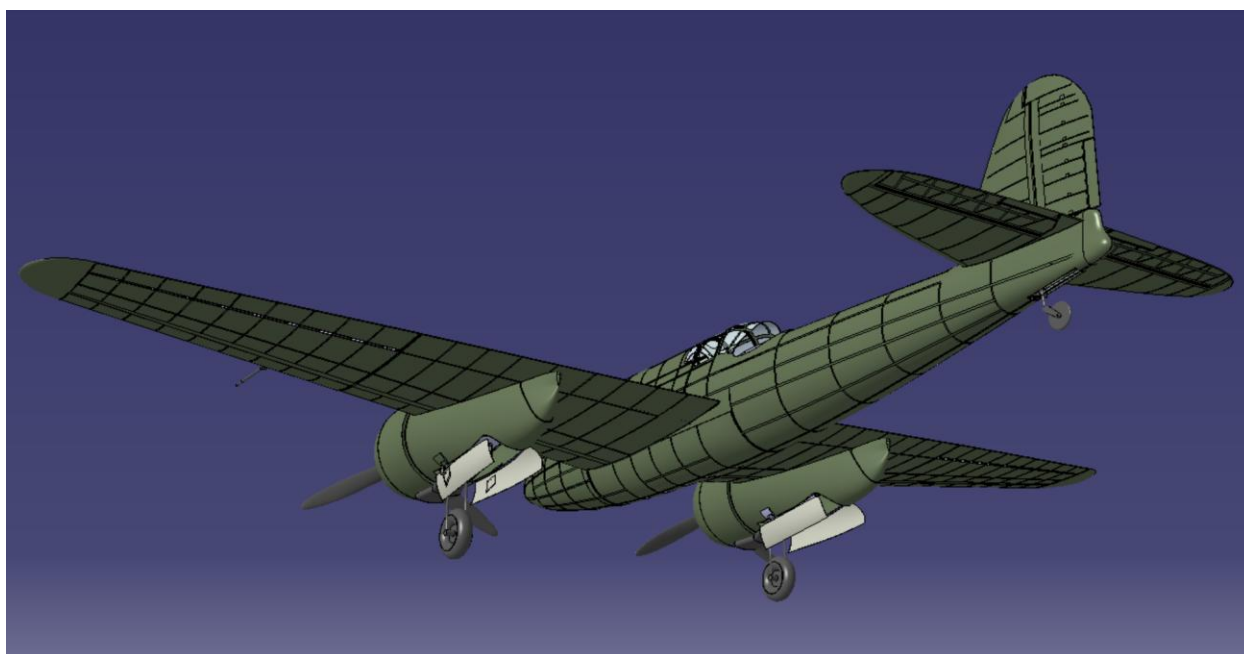


Figura 120 – Modelado del Kawasaki Ki-45 Nick (Fuselaje, alas, empenaje, planta de potencia y tren de aterrizaje)

2.7 Detalles finales del modelado

En este capítulo se hará una vista rápida de los detalles que se han añadido al modelo para darle más realismo y hacerlo más similar al real. Además de agregar elementos sólidos como los asientos y antenas, se ha replicado la pintura del Kawasaki Ki-45 Nick.

En las siguientes imágenes (Figuras 121 y 122) se pueden ver los asientos y la antena principal de telecomunicaciones del Kawasaki Ki-45 Nick, así como una de las armas que iban montadas en la parte trasera de la aeronave.

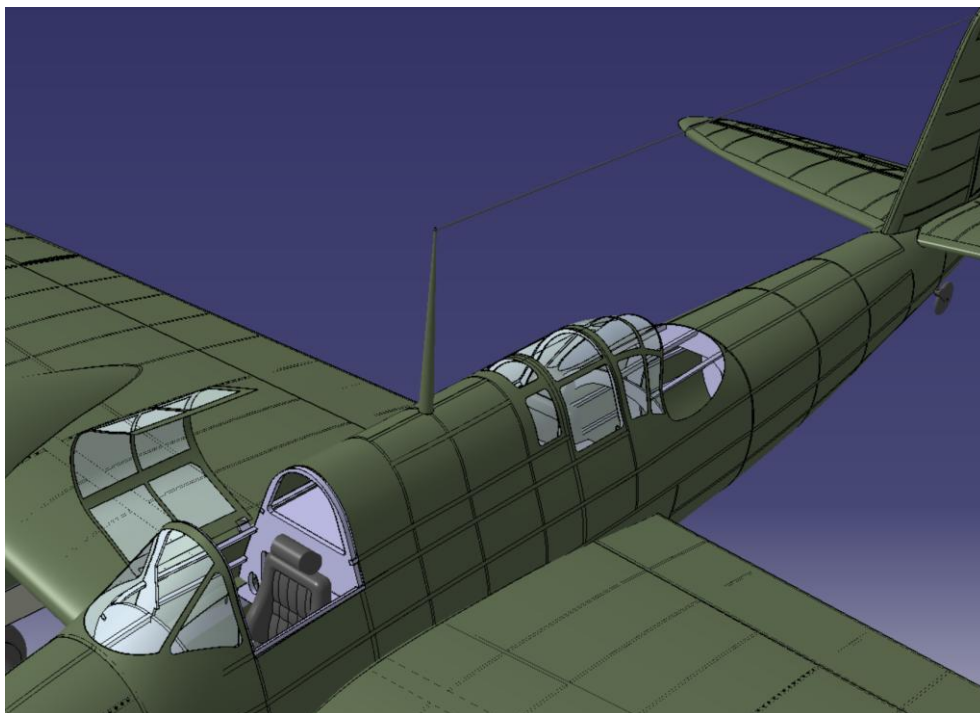


Figura 121 – Asiento delantero y antena del Kawasaki Ki-45 Nick

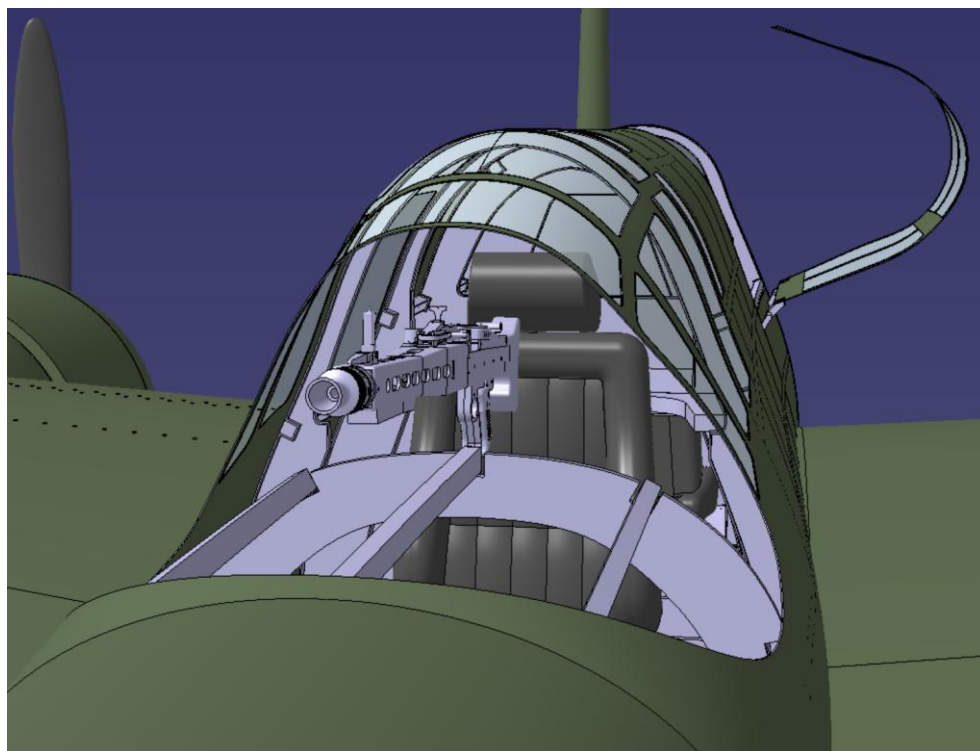


Figura 122 – Asiento y arma trasera del Kawasaki Ki-45 Nick

Para terminar con este apartado, y como ya se ha mencionado al principio de este, ahora se hará una breve

explicación sobre el pintado del modelo. Se ha tomado como referencia la siguiente imagen [5] (Figura 123).



Figura 123 – Modelo de referencia para el pintado del Kawasaki Ki-45 Nick

El módulo usado para pintar la aeronave ha sido *Photo Studio* dentro de *Infraestructure*, en concreto usando la herramienta *Apply Sticker*. Todas las “pegatinas” usadas en este proceso han sido creadas por el autor. En la Figura 124 se puede ver la aplicación de una de las “pegatinas”.

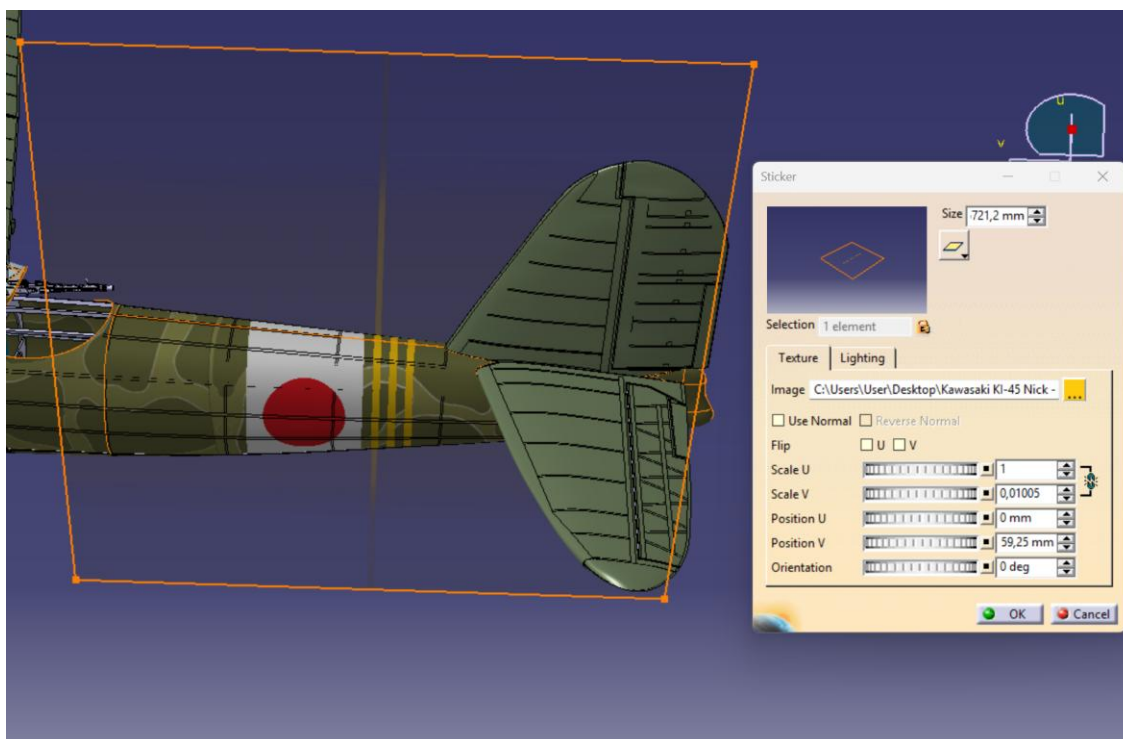


Figura 124 – Aplicación del pintado del Kawasaki Ki-45 Nick

Quedando el resultado final de la Figura 125.

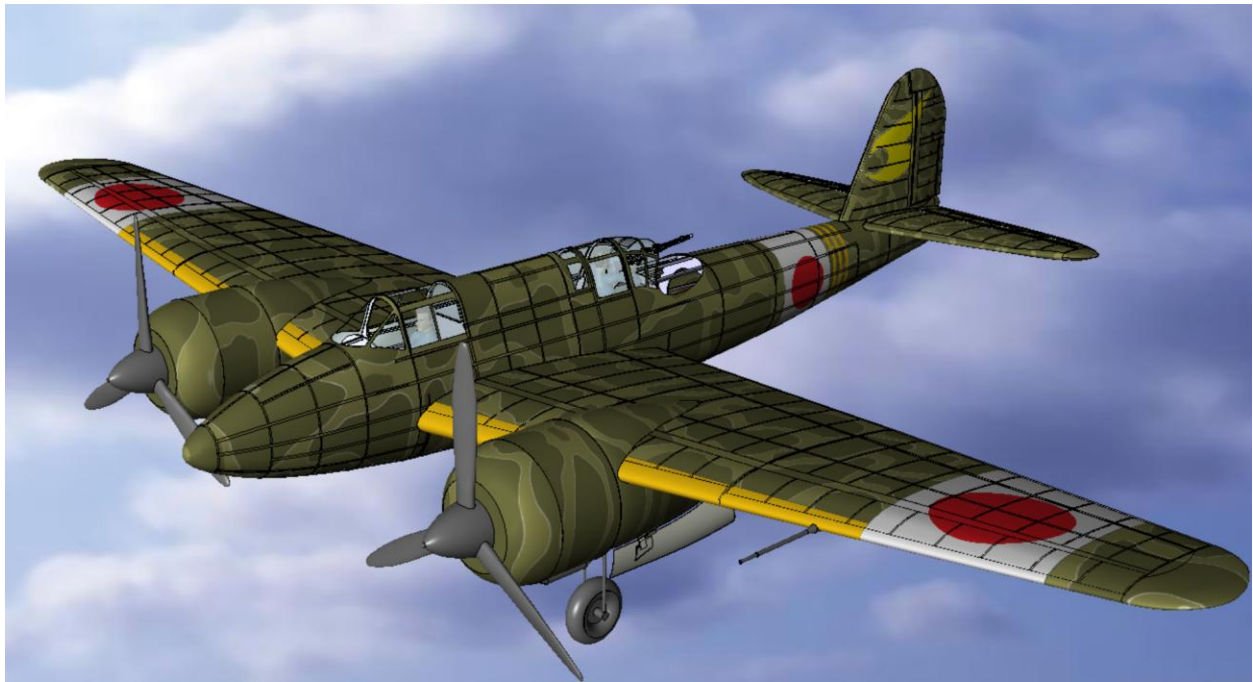


Figura 125 – Resultado final del pintado del Kawasaki Ki-45 Nick

2.8 Simulaciones

Este capítulo contendrá dos estudios que se han hecho una vez el modelo estaba terminado. Por ello, dividiremos el capítulo en dos subapartados que reunirán la información del estudio ergonómico de la aeronave y el estudio cinemático de las partes móviles de la aeronave.

2.8.1 Estudio ergonómico

Este estudio se basará en el método RULA. El método RULA [6] (Rapid Upper Limb Assessment) es una herramienta de evaluación ergonómica diseñada para analizar posturas del miembro superior, el cuello y el tronco durante actividades laborales. Fue desarrollado por McAtamney y Corlett en 1993 con el objetivo de detectar riesgos de trastornos musculoesqueléticos derivados de posturas forzadas o mantenidas. Es especialmente útil en tareas de diseño industrial y evaluación de estaciones de trabajo.

En el entorno Human Activity Analysis de CATIA V5, RULA permite evaluar de forma semiautomática la postura de un maniquí digital en una determinada posición, generando una puntuación que refleja el nivel de riesgo y la urgencia de intervención. El análisis considera:

- Ángulos articulares del cuello, tronco, brazos y muñecas.
- Actividad muscular.
- Fuerzas o cargas aplicadas.
- Tipo de soporte postural.

El resultado final es una puntuación del 1 al 7, donde:

- 1-2 indica riesgo bajo (postura aceptable),
- 3-4 requiere cambios posteriores,
- 5-6 sugiere cambios pronto,
- 7 indica necesidad de cambios inmediatos.

Una vez se tiene el contexto de la herramienta y su uso, se pasarán a estudiar ambos maniquíes que representan los dos tripulantes que puede llevar la aeronave Kawasaki Ki-45 Nick.

En cuanto al piloto, puede verse que, en un ejercicio de *Pull* para elevar la aeronave, sufre en los brazos y

muñecas. Este resultado tiene sentido, al igual que la puntuación final, ya que en este caso se ha hecho el estudio para el caso estático que es el más restrictivo (Figura 126).

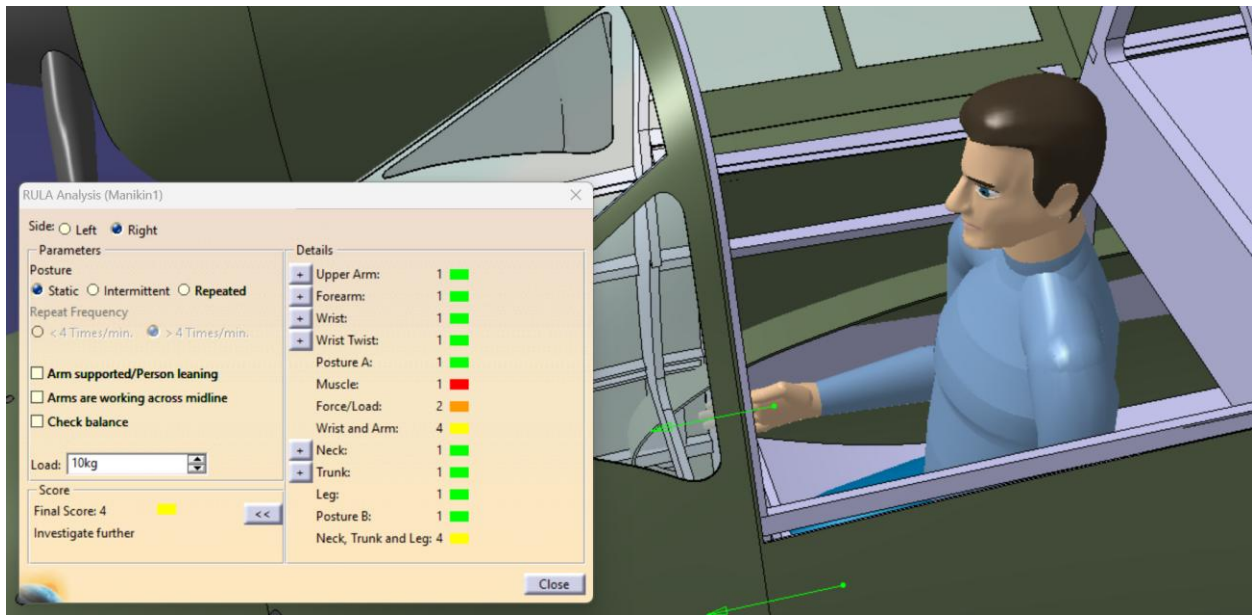


Figura 126 – Estudio RULA estático del piloto del Kawasaki Ki-45 Nick

Sin embargo, si se hace el mismo estudio teniendo en cuenta que el esfuerzo y la posición serán intermitentes, aunque la máxima puntuación la sigan teniendo los brazos y muñecas, se podrá ver en la Figura 127 que el maniquí no tiene problema en hacer esta maniobra.

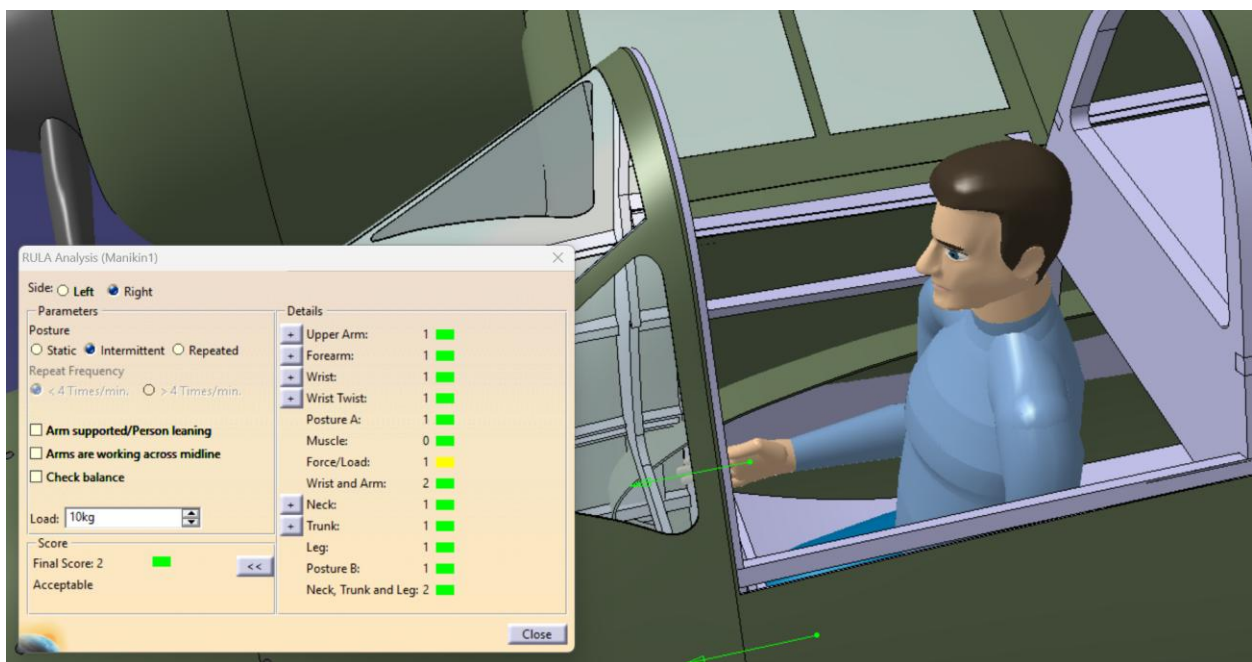


Figura 127 – Estudio RULA intermitente del piloto del Kawasaki Ki-45 Nick

A continuación, se pasará a hacer el mismo estudio en el segundo tripulante de la aeronave, el artillero. En la configuración estudiada, en la que debe tener los brazos elevados para poder manipular la ametralladora que va encastrada en la estructura de la aeronave, este sufre de manera más acentuada en brazos, antebrazos y muñecas. De nuevo, este estudio se ha hecho primero de manera estática en la Figura 128.



Figura 128 – Estudio RULA estático del artillero del Kawasaki Ki-45 Nick

Haciendo el estudio de manera intermitente, se puede observar en la Figura 129 que sigue siendo un trabajo bastante demandante, aunque según la puntuación no requeriría cambios inmediatos y la operación se podría llevar a cabo.

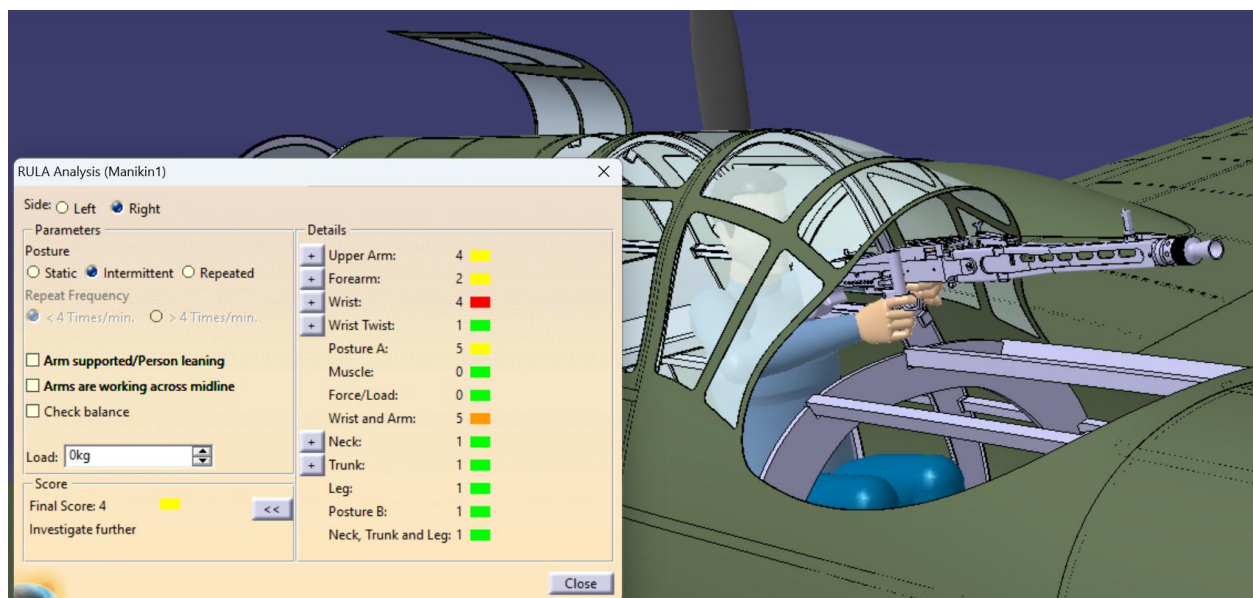


Figura 129 – Estudio RULA intermitente del artillero del Kawasaki Ki-45 Nick

2.8.2 Estudio cinemático

Con el objetivo de analizar y validar el funcionamiento de los mecanismos móviles del Kawasaki Ki-45 Nick, se ha utilizado el módulo *Kinematics* de CATIA V5 para llevar a cabo diversos estudios cinemáticos. Esta herramienta permite simular con precisión los movimientos relativos entre componentes dentro de un ensamblaje, verificar interferencias, evaluar rangos de movimiento y estudiar la coherencia funcional del diseño.

La finalidad del uso de la herramienta de cinemática ha sido verificar el comportamiento funcional de mecanismos clave del avión, detectar interferencias o colisiones durante el movimiento, obtener trayectorias realistas para representar animaciones y simulaciones visuales y aportar una validación técnica complementaria al modelado 3D estático.

Para ello, se han definido varios subconjuntos móviles entre los que se encuentran: los trenes de aterrizaje delantero y trasero, las hélices de la planta de potencia, superficies de control como alerones o elevadores y otras partes móviles de la aeronave.

Cada uno de estos mecanismos ha sido definido a partir de *Joints* cinemáticos (*revolute*, *prismatic*, *sliding*, etc.)

y se han establecido leyes de movimiento para animar su funcionamiento en condiciones controladas.

Debido a las limitaciones del formato Word, los videos que contienen los movimientos cinemáticos de varios elementos estudiados en el modelo, se encuentran pinchando en los siguientes enlaces:

- Alerón del Kawasaki Ki-45 Nick: <https://youtu.be/walQjw4FneI>
- Compuerta piloto del Kawasaki Ki-45 Nick: <https://youtu.be/tzx8I6E7mNI>
- Tren de aterrizaje delantero del Kawasaki Ki-45 Nick: <https://youtu.be/fn4pxJFovF0>
- Hélices del Kawasaki Ki-45 Nick: <https://youtu.be/FH-FdZ2d1sM>
- Tren de aterrizaje trasero del Kawasaki Ki-45 Nick: <https://youtu.be/MzdUc0gbRf4>
- HTP del Kawasaki Ki-45 Nick: <https://youtu.be/rJT3ULSqIbc>
- VTP del Kawasaki Ki-45 Nick: https://youtu.be/feHZ0a2l_Xo

3 CONCLUSIONES Y COMENTARIOS DEL AUTOR

Una vez finalizado este proyecto, me dispongo a hacer una breve explicación de los problemas encontrados y las mejoras futuras, así como una serie de conclusiones y comentarios al respecto

- **Problemas encontrados**

Es evidente que el mayor problema que me he encontrado, ya que era precisamente el reto de este proyecto, es la escasez de información en los planos. Esto ha hecho que haya tenido que sacar el mejor potencial a mi creatividad, uniendo investigación y conocimientos previos como diseñador aeronáutico, para poder plantear las soluciones necesarias para que el modelado fuera lo más cercano a la realidad posible.

Otro de los grandes problemas de realizar un TFG de modelado tridimensional, es el hecho de necesitar un ordenador con buenas capacidades gráficas y de cálculo, ya que en muchas ocasiones el programa de modelado se quedaba bloqueado, llegando a perder el progreso en algunas ocasiones.

- **Mejoras futuras**

Algunas posibles mejoras futuras que se podrían implementar en este proyecto, sería el hecho de hacer estudios de elasticidad y resistencia a los elementos claves de la aeronave. Para ello, CATIA V5 tiene módulos específicos de elementos finitos que podrían ayudar a llevar a cabo este punto.

A su vez, y centrando el foco en el diseño, sería de interés modelar cada estación de montaje y ensamblado de cada subconjunto de la aeronave, así como la grada de montaje final de esta. En este apartado, podría hacerse un estudio más exhaustivo de la ergonomía de las gradas.

Por último, me gustaría dejar plasmadas algunas reflexiones a modo de conclusión:

Uno de los sentimientos más recurrentes que he sentido mientras realizaba el modelado del Kawasaki Ki-45 Nick es la admiración hacia los diseñadores industriales. En concreto, a los diseñadores aeronáuticos por estar mi estudio centrado en este campo. Esto se debe a la gran dificultad que tiene crear algo de forma tridimensional, teniendo en cuenta su funcionalidad, su fabricación, su ensamblado y una larga lista de cosas a tener en cuenta para hacer cambios hasta en el más mínimo detalle. Durante mi corta carrera profesional como ergonomista y simulador de procesos, tras haber pasado por diversos proyectos tales como FALCON 10X, EURODRONE o GALILEO, siempre he tenido la misma sensación en todos ellos: “la culpa la tiene diseño”. Esa frase, y otras muchas reformulaciones de esta, han ido llegando a mi de muchos de mis compañeros, haciendo que en cierto momento llegara a pensar que los diseñadores no sabían lo que hacían y que así cualquiera podría hacer su trabajo. Este proyecto me ha hecho sentir empatía por los diseñadores aeronáuticos, ya que, una vez he terminado un proyecto como este, puedo llegar a imaginarme (en mucha menor medida que la realidad) la dificultad que tiene este trabajo.

A su vez, este trabajo ha creado en mi una sensación agri dulce. Haber podido aprender tanto sobre una herramienta tan potente y presente en nuestro campo, ha aumentado aun más mis ganas de seguir aprendiendo sobre ella. Sin embargo, que durante el Grado en Ingeniería Aeroespacial el aprendizaje adquirido sobre la herramienta sea tan escaso, me hace ver que, aunque sepamos mucho sobre matemática, física, aerodinámica y todas las otras grandes ramas de nuestro conocimiento como ingenieros, el hecho de que una aplicación de nuestros conocimientos, tan gráfica y directa sobre la aeronave, no se lleve a un nivel mayor, me hace sentir, en parte, tristeza por aquellos que no tienen la oportunidad de aprender sobre el modelado 3D.

Referencias

- [1] «Enciclopedia del holocausto - Cronología de la Segunda Guerra Mundial,» 5 Agosto 2022. [En línea]. Available: <https://encyclopedia.ushmm.org/content/es/article/world-war-ii-key-dates#:~:text=6%20de%20diciembre%20de%201941,en%20la%20Segunda%20Guerra%20Mundial..>
- [2] D. Rodríguez, «National Geographic,» 31 Mayo 2024. [En línea]. Available: https://historia.nationalgeographic.com.es/a/dunkerque-batalla-desconocida-segunda-guerra-mundial_11729.
- [3] «Enciclopedia del holocausto - La Segunda Guerra Mundial en profundidad,» 7 Junio 2019. [En línea]. Available: <https://encyclopedia.ushmm.org/content/es/article/world-war-ii-in-depth#:~:text=Estados%20Unidos%20entra%20a%20la%20Segunda%20Guerra%20Mundial&text=Un%20d%C3%ADa%20despu%C3%A9s%2C%20el%207,la%20guerra%20a%20Estados%20Unidos..>
- [4] E. Castillo, «1939-1945 - La Segunda Guerra Mundial - Los años que cambiaron el mundo,» Abril 2006. [En línea]. Available: <http://www.de1939a1945.com/armas/063ki45toryu.htm#arriba>.
- [5] Peaceful Deal, «ZKMK29615 1:32 Zoukei-Mura Kawasaki Ki-45 Kai Tei Toryu (Nick) [Kit de construcción de modelos],» 14 Abril 2019. [En línea]. Available: <https://www.amazon.es/ZKMK29615-Zoukei-Mura-Kawasaki-construcci%C3%B3n-Modelos/dp/B07M981KWH>.
- [6] McAtamney, L., & Corlett, E. N. (1993). RULA: A survey method for the investigation of work-related upper limb disorders. *Applied Ergonomics*, 24(2), 91–99. [https://doi.org/10.1016/0003-6870\(93\)90080-S](https://doi.org/10.1016/0003-6870(93)90080-S)

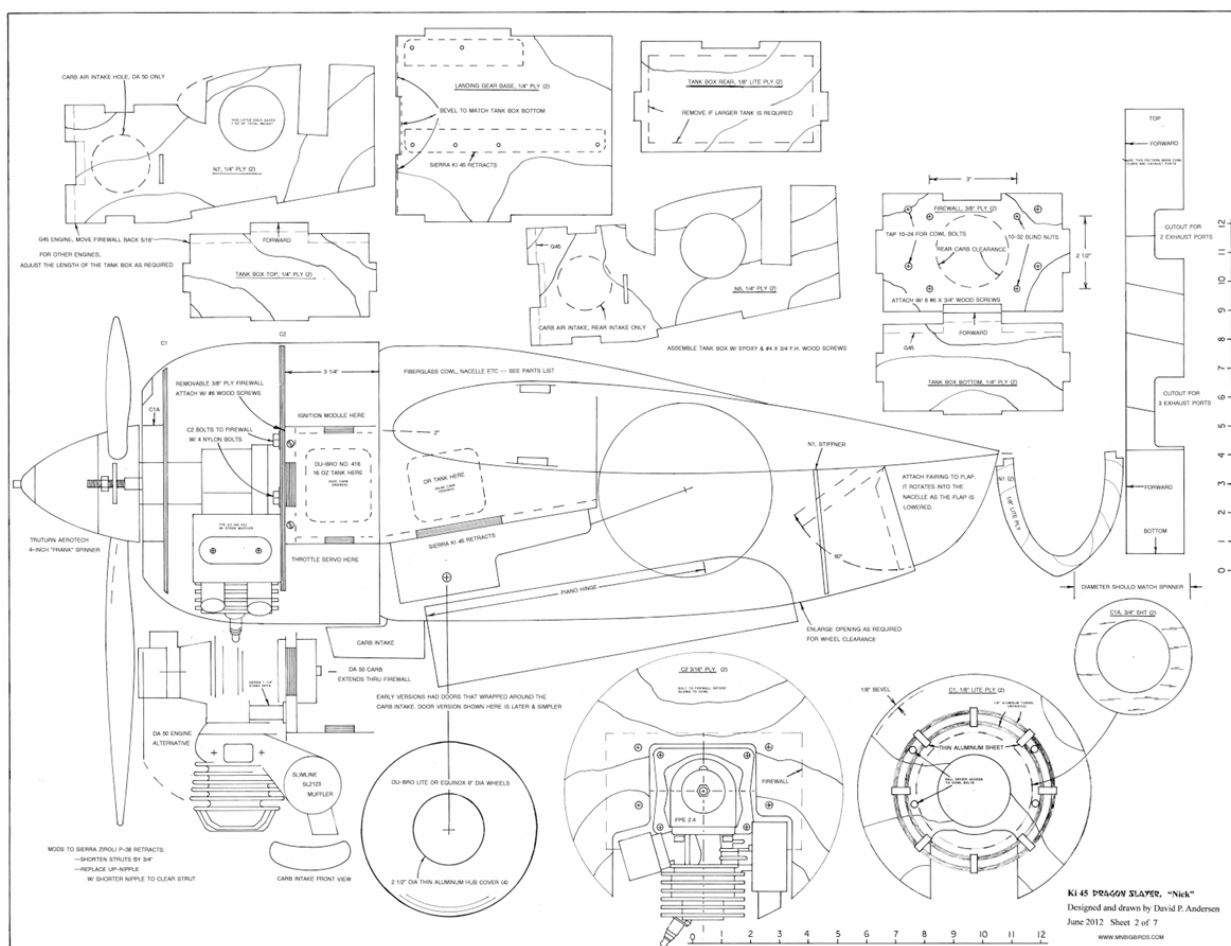


Ilustración 2 – Plano 2

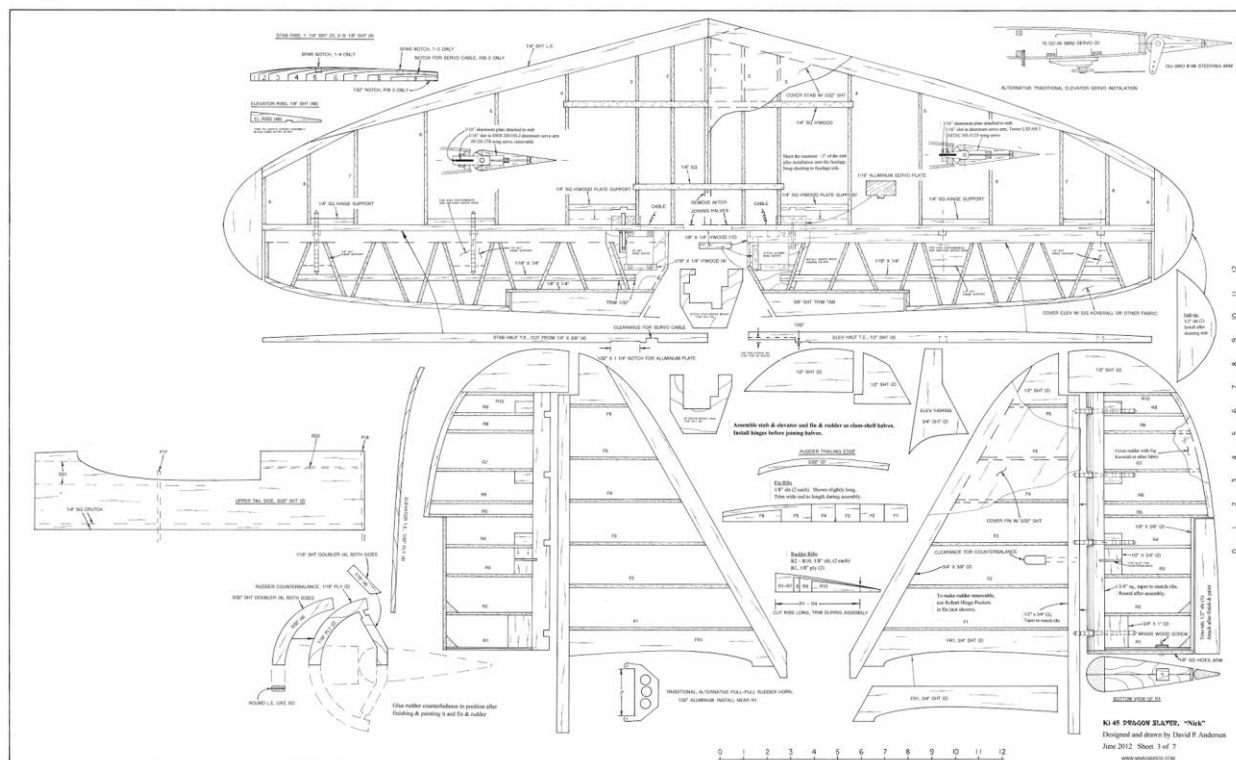


Ilustración 3 – Plano 3

Ilustración 6 – Plano 6

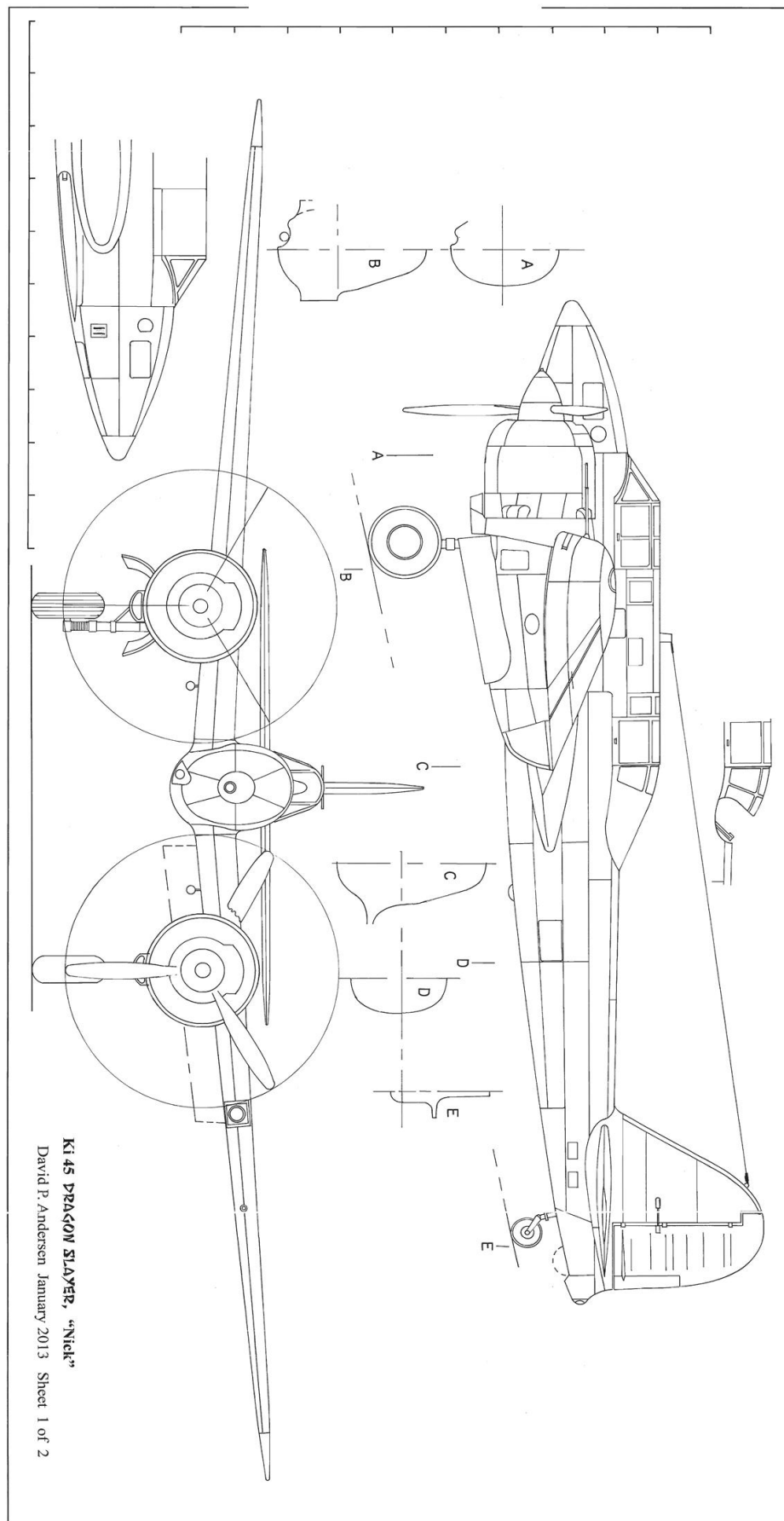


Ilustración 8 – Plano 8

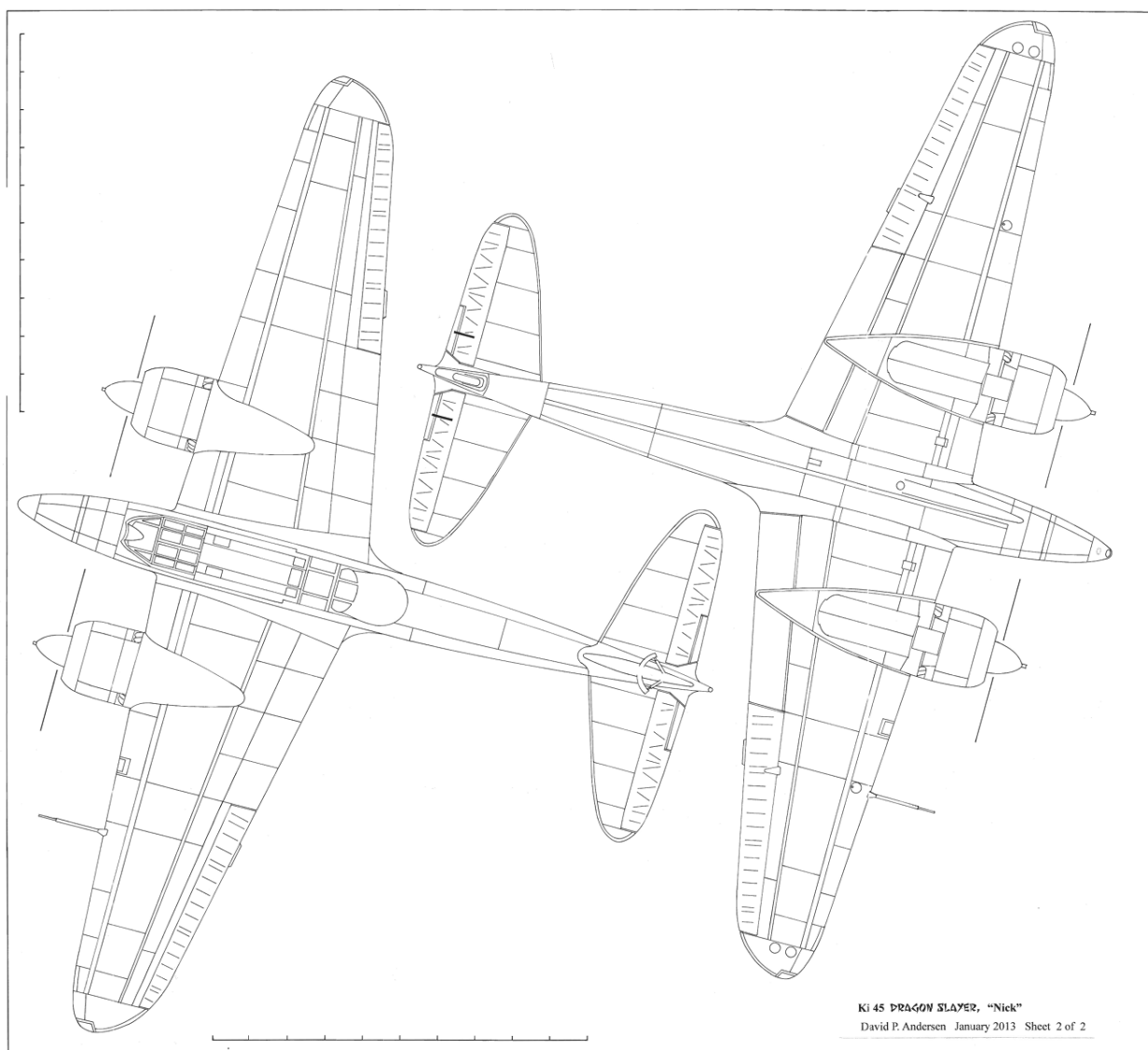


Ilustración 9 – Plano 9