



UNIVERSITAT  
POLITÈCNICA  
DE VALÈNCIA



Escuela Técnica Superior de Ingeniería del Diseño

UNIVERSITAT POLITÈCNICA DE VALÈNCIA  
ESCUELA TÉCNICA SUPERIOR DE INGENIERÍA DEL DISEÑO

---

**LEVANTAMIENTO INDUSTRIAL Y  
MODELIZACIÓN 3D DE UN  
HELICÓPTERO MILITAR BO-105**

TRABAJO FINAL DEL GRADO EN INGENIERÍA  
AEROESPACIAL

---

REALIZADO POR:  
FEDERICO NAHUEL RAMÍREZ

TUTORIZADO POR:  
JOSÉ ENRIQUE PRIEGO DE LOS SANTOS

11 de Julio de 2019



# Agradecimientos

Me gustaría utilizar este apartado para agradecer a todas las personas gracias a la cuales este proyecto ha sido posible y, sobre todo, gracias a las cuales he podido llegar hasta aquí.

En primer lugar querría darle las gracias a Enrique por darme la oportunidad de realizar este proyecto, y a Marco por su inestimable ayuda tanto a la hora de aconsejarme sobre como proceder con el modelado como a la hora de realizar la impresión 3D.

Quiero dar las gracias también a mis compañeros de trabajo en esta última etapa del grado por el apoyo y ayuda que nos hemos prestado. Gracias Rodrigo, Fita, Pachés, Raúl y Bea.

Además me veo en la obligación de dedicar unas líneas a todos los amigos que me han acompañado a lo largo de mi vida y con los que guardo momentos inolvidables, tanto de secundaria y bachillerato como de la universidad. Gracias a todos por haber hecho estos años de estudio mucho más amenos y por haber estado ahí siempre que lo he necesitado.

A mi familia, especialmente a mi madre y mis hermanas, quiero agradecerles también todo el apoyo que me han mostrado y el esfuerzo que han realizado para ayudarme siempre. Esto no hubiera sido posible de otra forma.

Y, por último, quiero dedicar este trabajo de final de grado a Raúl y Jose Antonio, dos de los mejores amigos que podría haber llegado a tener nunca y con los que he compartido algunos de los mejores momentos de mi vida.

# Resumen

El presente trabajo tiene como finalidad la obtención e impresión de un modelo 3D del helicóptero militar BO 105 y la comprobación de la utilidad de las herramientas de láser escáner en el ámbito aeronáutico.

Se realiza un levantamiento industrial con un láser escáner TX6 y un modelado del helicóptero para, posteriormente, comprobar la precisión dimensional del resultado obtenido y su utilidad a la hora de realizar de análisis aerodinámicos.

# Índice de figuras

3.1. Láser escáner de la marca Leica Geosystems . . . . .	3
3.2. Esquema de la tecnología basada en la triangulación . . . . .	5
3.3. Esquema de la tecnología basada en el tiempo de vuelo . . . . .	5
4.1. BO 105 volando invertido . . . . .	8
4.2. BO 105 armado . . . . .	8
4.3. BO 105 realizando un looping . . . . .	10
5.1. Foto del hangar 1 . . . . .	11
5.2. Foto del hangar 2 . . . . .	11
5.3. Helicóptero BO 105 del hangar . . . . .	11
5.4. Avión Mirage F1 del hangar . . . . .	11
5.5. Descripción del Trimble TX6 Scanner . . . . .	13
5.6. Menú del Trimble TX6 Scanner . . . . .	14
5.7. Esquema preliminar de la posición de los estacionamientos . . . . .	15
6.1. Trimble TX6 durante uno de los escaneos . . . . .	16
6.2. Trimble TX6 siendo configurado para realizar un escaneo . . . . .	16
6.3. Posición final de los estacionamientos . . . . .	17
6.4. Posición de los nuevos estacionamientos . . . . .	17
7.1. Selección de punto común para registro . . . . .	19
7.2. Listado de uniones (Cyclone) . . . . .	20
7.3. Nube de puntos completa vista desde arriba . . . . .	20
7.4. Nube de puntos completa vista de frente . . . . .	21
7.5. Nube de puntos completa vista desde dentro 1 . . . . .	21
7.6. Nube de puntos completa vista desde dentro 2 . . . . .	22
7.7. Limpieza de la nube de puntos . . . . .	22
7.8. Nube de puntos del hangar visto desde arriba . . . . .	23
7.9. Vista general de la nube de puntos del hangar . . . . .	23
7.10. Nube de puntos del hangar sin el techo visto desde arriba . . . . .	23
7.11. Vista general de la nube de puntos del hangar sin techo . . . . .	23

7.12. Paso 1 de la limpieza del helicóptero desde arriba . . . . .	24
7.13. Vista general del paso 1 de la limpieza del helicóptero . . . . .	24
7.14. Vista lateral 1 del paso 2 de la limpieza del helicóptero . . . . .	24
7.15. Vista lateral 2 del paso 2 de la limpieza del helicóptero . . . . .	24
7.16. Nube de puntos del helicóptero desde arriba . . . . .	24
7.17. Nube de puntos del helicóptero desde un lado . . . . .	24
7.18. Nube de puntos del helicóptero de frente . . . . .	25
7.19. Nube de puntos del helicóptero desde atrás . . . . .	25
7.20. Vista general de la nube de puntos del helicóptero . . . . .	25
7.21. Malla inicial de lado . . . . .	26
7.22. Malla inicial de frente . . . . .	26
7.23. Malla inicial por arriba . . . . .	27
7.24. Malla inicial por mboxabajo . . . . .	27
7.25. Análisis de Netfabb desde el lateral . . . . .	28
7.26. Análisis de Netfabb desde arriba . . . . .	28
7.27. Vista general de la malla reparada . . . . .	29
7.28. Malla reparada vista desde un lateral . . . . .	29
7.29. Malla reparada vista desde arriba . . . . .	29
7.30. Malla reparada abierta en Meshmixer . . . . .	30
7.31. Fuselaje en Meshmixer . . . . .	31
7.32. Fuselaje en Meshmixer tras ser modificado . . . . .	31
7.33. Planos de corte del patín . . . . .	32
7.34. Corte del patín en distintos planos . . . . .	32
7.35. Patín obtenido por ingeniería inversa . . . . .	32
7.36. Estabilizador en la malla reparada . . . . .	33
7.37. Estabilizador en la malla original . . . . .	33
7.38. Comparación entre malla y modelado del estabilizador . . . . .	34
7.39. Fuselaje con estabilizador horizontal y patín . . . . .	34
7.40. Perfil aerodinámico de la malla . . . . .	35
7.41. Nube de puntos abierta en Rhinoceros 6 . . . . .	36
7.42. Rotor de la nube de puntos . . . . .	36
7.43. Pala de la nube de puntos . . . . .	36
7.44. Planos cortando la pala . . . . .	37
7.45. Puntos de la pala encerrados entre los planos . . . . .	37
7.46. Perfil de la pala obtenido por ingeniería inversa . . . . .	37
7.47. Rotor modelado . . . . .	38
7.48. Modelo del BO 105 visto de frente . . . . .	38
7.49. Modelo del BO 105 visto de lado . . . . .	38
7.50. Vista general del modelo del BO 105 . . . . .	39
8.1. Impresora Prusa I3 MK3 . . . . .	40

8.2.	Relación velocidad-temperatura de impresión del PLA . . . . .	41
8.3.	Simulación del proceso de impresión . . . . .	42
8.4.	Modelo impreso visto desde arriba . . . . .	43
8.5.	Vista general del modelo impreso . . . . .	43
8.6.	Antipar del modelo impreso . . . . .	43
8.7.	Vista de frente del modelo impreso . . . . .	43
9.1.	Algoritmo creado en Grasshopper . . . . .	46
9.2.	Perfil discretizado . . . . .	46
9.3.	Comparación entre el perfil obtenido y el real . . . . .	47
9.4.	Distribución del CP del perfil a $0^\circ$ . . . . .	47
9.5.	Distribución del CP del perfil real a $0^\circ$ . . . . .	47
9.6.	Distribución del CP del perfil a $5^\circ$ . . . . .	48
9.7.	Distribución del CP del perfil real a $5^\circ$ . . . . .	48
9.8.	Comparación del coeficiente de sustentación . . . . .	49
9.9.	Comparación de la eficiencia aerodinámica . . . . .	49

# Índice de tablas

4.1. Datos del BO 105 . . . . .	10
5.1. Niveles del Trimble TX6 . . . . .	12
7.1. Comparación entre la malla original y la reparada . . . . .	29
9.1. Comparación tamaño real vs tamaño de la malla original . . .	44
9.2. Comparación tamaño real vs tamaño de la malla reparada . .	44
9.3. Comparación tamaño real vs tamaño del modelo impreso . . .	45
11.1. Coste del ingeniero . . . . .	52
11.2. Coste del escaneo y modelado . . . . .	53
11.3. Coste de la impresión . . . . .	53
11.4. Coste total . . . . .	53
11.5. Presupuesto . . . . .	53

# Índice general

Agradecimientos	I
Resumen	II
Índice de figuras	III
Índice de cuadros	VI
<b>1. Introducción</b>	<b>1</b>
<b>2. Objetivos</b>	<b>2</b>
<b>3. Sistemas láser escáner</b>	<b>3</b>
3.1. Tipos de láser escáner . . . . .	4
3.2. Ventajas del láser escáner . . . . .	5
3.3. Campos de aplicación . . . . .	6
3.3.1. Topografía . . . . .	6
3.3.2. Industria . . . . .	6
3.3.3. Patrimonio . . . . .	6
3.3.4. Entretenimiento . . . . .	7
3.3.5. Ingeniería inversa . . . . .	7
<b>4. Helicóptero BO 105</b>	<b>8</b>
<b>5. Materiales de trabajo</b>	<b>11</b>
5.1. Zona de trabajo . . . . .	12
5.2. Instrumentalización utilizada . . . . .	12
5.3. Esquema de estacionamientos . . . . .	15
<b>6. Escaneo</b>	<b>16</b>

<b>7. Modelación 3D</b>	<b>18</b>
7.1. Trimble RealWorks . . . . .	18
7.2. Leica Geosystems HDS Cyclone . . . . .	18
7.3. 3DReshaper . . . . .	25
7.4. Netfabb . . . . .	27
7.5. Meshmixer . . . . .	30
7.6. Ingeniería inversa con Fusion 360 . . . . .	31
7.7. Ingeniería inversa con Rhinoceros 6 . . . . .	35
<b>8. Impresión 3D</b>	<b>40</b>
8.1. Impresora . . . . .	40
8.2. Material . . . . .	41
8.3. Impresión . . . . .	42
<b>9. Análisis</b>	<b>44</b>
9.1. Análisis dimensional . . . . .	44
9.2. Análisis del perfil . . . . .	45
<b>10. Conclusiones</b>	<b>50</b>
<b>11. Presupuesto</b>	<b>52</b>
<b>12. Bibliografía</b>	<b>54</b>
<b>13. Anexos</b>	<b>55</b>
13.1. Datos del registro . . . . .	55
13.2. Planos BO 105 . . . . .	64

# 1. Introducción

El presente trabajo, realizado para la obtención del título de Ingeniería Aeroespacial en la Escuela Técnica Superior de Ingeniería del Diseño de la Universitat Politècnica de València, consiste en el levantamiento industrial mediante un láser escáner, posterior modelado e impresión 3D de un helicóptero BO 105 y comprobación dimensional y aerodinámica de los resultados obtenidos con el fin de concluir la utilidad de las herramientas utilizadas en el ámbito de la ingeniería aeroespacial.

En primer lugar se explicará el tecnología en la que se basan los sistemas láser escáner así como las ventajas que ofrecen y las razones por las que son cada vez más utilizados en ámbitos de lo más diversos como pueden ser la ingeniería o la industria del entretenimiento.

Tras esto se darán unos datos generales sobre la historia del helicóptero militar BO 105, así como los distintos usos que se le han dado.

En el siguiente capítulo se expondrá la zona en la que se realizará el escaneo, la instrumentalización a utilizar, y el esquema que se planea seguir a la hora de realizar los escaneos.

A continuación se mostrará el proceso seguido para el escaneo de la aeronave y, en los siguientes dos apartados se explicará la metodología seguida en el modelado y la impresión 3D. Hay que resaltar que se han obtenido dos modelos 3D. El primero es la malla que se obtiene tras el posprocesado de la nube de puntos, y el segundo se obtiene tras aplicar ingeniería inversa a algunas partes de la aeronave y simplificar otras para obtener un modelo válido para ser impreso en 3D a una escala razonable.

Por último se realizará un análisis dimensional de los modelos y un análisis aerodinámico del perfil para obtener las conclusiones finales del presente estudio.

## 2. Objetivos

Los principales objetivos del presente trabajo son:

- La obtención de un modelo tridimensional con la mayor exactitud posible del helicóptero militar BO 105.
- La impresión 3D de un modelo a escala del helicóptero.
- Comprobar la exactitud del modelo y su validez a la hora de realizar análisis aerodinámicos de la aeronave.

Por tanto se espera finalizar el trabajo tras la impresión del modelo a escala y haber obtenido una conclusión sobre la validez del uso de un láser escáner para realizar ingeniería inversa sobre helicópteros y aeronaves similares.

### 3. Sistemas láser escáner

El láser escáner es un instrumento ampliamente utilizado en topografía, aunque su uso se extiende cada vez más a distintas áreas como la ingeniería o la industria del entretenimiento. La toma de datos en los escáneres activos, que son los que se utilizan para este tipo de trabajos, se realiza gracias a un haz láser que, mediante distintos servomotores y espejos, realiza un barrido alrededor del escáner captando miles de puntos por segundo. De esta forma se obtienen nubes de cientos de miles e incluso millones de puntos con información tridimensional sobre los objetos que rodean al escáner. Combinando distintas nubes de puntos obtenidas desde localizaciones diferentes alrededor del objeto que se desea escanear se obtiene un modelo que, aunque está formado exclusivamente de puntos sueltos, proporciona gran información sobre el objeto escaneado debido a la densidad de la nube obtenida. De esta forma se puede obtener rápidamente información geométrica de casi cualquier objeto en un periodo de tiempo relativamente corto, así como un modelo 3d del mismo.



Figura 3.1: Láser escáner de la marca Leica Geosystems

Además, muchos escáneres incluyen una cámara digital de alta resolución gracias a la cual se pueden obtener imágenes del ambiente que rodea al escáner, las cuales, combinadas con los puntos obtenidos, ayudan a dotar de realismo a la nube de puntos y, en muchos casos, a interpretarla.

Las principales características que diferencian a un láser escáner de otro son:

- Tecnología de barrido.
- Alcance.
- Velocidad.
- Precisión.
- Integración de imágenes.

### 3.1. Tipos de láser escáner

Todas las tecnologías usadas por los sistemas de láser escáner se basan en la detección del haz de láser tras rebotar contra la superficie a medir y ser reflejado de nuevo hacia el escáner. De esta forma se obtiene información tanto de la distancia a la superficie en la que el haz se ha reflejado como la intensidad con la que este retorna, variando la intensidad tanto con el material de la superficie como con la inclinación de esta con respecto al haz láser.

Existen tres tecnologías de barrido distintas:

- Tecnología basada en la triangulación.
- Tecnología basada en el tiempo de vuelo.
- Tecnología basada en la diferencia de fase.

Los equipos con tecnología de triangulación calculan la distancia gracias al triángulo que se forma entre los componentes internos del escáner (láser y sensor) con el objeto a medir. Esta tecnología consigue una precisión altísima de entorno a 0.1 mm pero permite una distancia máxima entre el láser y el objeto a medir del orden de metros. Se puede observar su funcionamiento en la figura 3.2.

Los escáneres basados en el tiempo de vuelo obtienen los datos mediante la medición del tiempo que tarda la onda en regresar en la misma dirección en la que fue emitida. Esta medición se realiza con una precisión de picosegundos. Trabajan con frecuencias comprendidas entre 2 y 100 MHz, por lo que permite velocidades de escaneo bastante limitadas. No obstante esto se compensa con un amplio rango de hasta 2 Km, y una precisión que oscila entre 4 mm y

3 cm. En la figura 3.3 se puede observar un esquema del funcionamiento de este tipo de escáner.

Los escáneres basados en la medida de la diferencia de fase obtienen los puntos al comparar la diferencia entre la fase de la onda emitida y la onda reflejada y detectada por el escáner. Al trabajar con frecuencias de hasta 1000 MHz permiten obtener velocidades mucho mayores que la tecnología de pulsos, llegando hasta los 1200000 puntos por segundo además de precisiones de entre 2 mm y 10 mm. Por otro lado, el rango está limitado a distancias mucho menores para evitar ambigüedades en las medidas, normalmente este no es mayor a un centenar de metros.

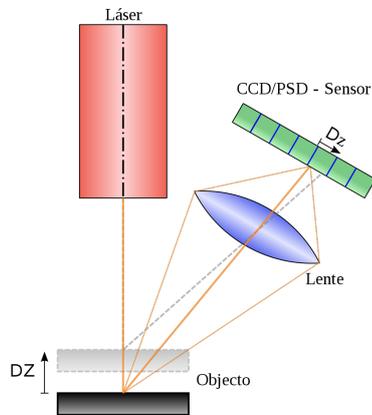


Figura 3.2: Esquema de la tecnología basada en la triangulación

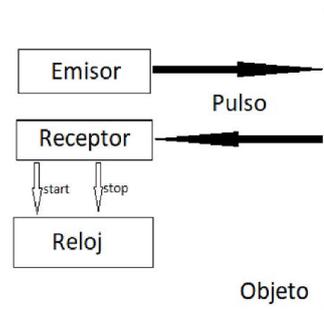


Figura 3.3: Esquema de la tecnología basada en el tiempo de vuelo

## 3.2. Ventajas del láser escáner

La utilización del láser escáner para el modelado 3D presenta numerosas ventajas con respecto a otros métodos más tradicionales. Entre ellas se encuentran la disminución del trabajo de campo y del presupuesto necesario, ya que las medidas necesarias se pueden tomar en cuestión de horas, tras lo cual solo es necesario trabajo en oficina para la obtención del modelo. Además, gracias a esto se pueden realizar comprobaciones dimensionales de una forma relativamente rápida durante el proceso de construcción de edificios o maquinaria, por ejemplo.

Otra de sus mayores ventajas es la capacidad de modelar grandes volúmenes como edificios o incluso extensiones de terreno, campo en el que está comenzando a sustituir a la fotogrametría. De esta forma se pueden obtener

modelos de gran definición de edificios que constituyen patrimonio cultural y que podrían ayudar a la reconstrucción en caso de que sea necesario. Un buen ejemplo de este uso es el modelo 3D existente de la Catedral de Notre Dame gracias a Andrew Tallon, un profesor de arte estadounidense que decidió realizar un escaneado 3D de la misma entre 2011 y 2012.

Además, utilizando los escáneres correctos y con los suficientes estacionamientos de medida se puede obtener una muy alta resolución y precisión en el modelo, lo cual permite el uso de esta tecnología en áreas como la ingeniería naval o la aeronáutica.

### **3.3. Campos de aplicación**

#### **3.3.1. Topografía**

El levantamiento 3D mediante láser escáner es cada vez más usado en topografía debido a las ventajas que presenta respecto a procesos de fotogrametría más convencionales. Estas ventajas son la velocidad de captación de datos y la menor influencia de las condiciones lumínicas, lo cual permite la toma de datos incluso en días nublados o con poco sol. Gracias a esto existe una disminución de tiempo y, por lo tanto, costes.

#### **3.3.2. Industria**

Gracias a la gran precisión que se puede obtener el láser escáner es muy usado en la industria para el control dimensional durante la fabricación de diversas piezas o herramientas con tolerancias muy limitadas. De esta forma se puede comparar la nube de puntos obtenida con el modelo 3D teórico y comprobar de forma muy exacta si existe algún error en la producción.

#### **3.3.3. Patrimonio**

El escaneado láser puede ser utilizado también para la obtención de modelos 3D precisos de edificios o lugares considerados patrimonio cultural. De esta forma se amplía la documentación existente del lugar, además de poder realizar maquetas precisas que ayuden a la divulgación. Por otro lado, estos modelos pueden ser de gran ayuda tanto para comprobar el estado de deterioro del monumento (se pueden detectar problemas estructurales, deformaciones, etc.) como para obtener datos para una posible reconstrucción en caso de que sea necesario.

Ejemplos de esta aplicación se pueden encontrar en el escaneado de las estatuas de Miguel Ángel, la Pietà de Florencia, el Monticello, o la catedral de Notre Dame.

### **3.3.4. Entretenimiento**

El modelado mediante escáneres 3D es cada vez más usado en la industria del entretenimiento, tanto en el mundo de los videojuegos como en películas y series. Debido a que es más rápido crear un modelo 3D a través de un escaneo que modelándolo completamente mediante computador los artistas suelen crear una maqueta del personaje o escenario que desean para más tarde escanearla y obtener un modelo digital del mismo.

### **3.3.5. Ingeniería inversa**

La precisión que es capaz de proporcionar el método de escaneo mediante láser escáner posibilita que pueda ser usado en el campo de la ingeniería inversa.

Una vez obtenida la nube de puntos del objeto a escanear se procede a un trabajo exhaustivo de reconstrucción para obtener un modelo 3D lo más parecido posible al objeto real. Esto se puede realizar mediante la obtención de una malla o, en caso de que la nube de puntos no sea lo suficientemente densa, realizando manualmente un modelo CAD a partir de secciones de la nube de puntos.

## 4. Helicóptero BO 105

El BO 105 es un helicóptero ligero bimotor cuyo primer vuelo se dio en 1967, desarrollado por el fabricante alemán Bölkow, el cual se encargó de su producción hasta el año 1991. A partir de este año la producción de la aeronave pasa a manos del Grupo Eurocopter, el cual se encargará de esta hasta el año 2001, momento en el cual es sustituido por el Eurocopter EC135.

Diseñado en el contexto de las restricciones impuestas a Alemania tras la Segunda Guerra Mundial, este helicóptero se caracterizó por ser el primero del mundo equipado con palas sin articulaciones de resistencia aerodinámica y batido, además de por su ligereza, seguridad, y facilidad de pilotaje. Entre sus logros se encuentra también el de ser el primer helicóptero con la capacidad de realizar loopings de 360° (figura 4.3), entre otras maniobras como toneles, immelmans, o vuelo invertido (figura 4.1).

La prueba de la fiabilidad de esta aeronave es que para el 50 aniversario de su vuelo inaugural, cumplido hace más de un año, aún seguían en servicio unos 400 helicópteros, lo cual supone aproximadamente un tercio del total de helicópteros fabricados.

Tanto la gran maniobrabilidad como la fiabilidad de la aeronave se deben, al menos en parte, a el hecho de que el rotor principal sea rígido (solo permite la articulación del paso) y a la construcción mixta de las palas que combina titanio y plástico reforzado con fibra de vidrio.



Figura 4.1: BO 105 volando invertido



Figura 4.2: BO 105 armado

El helicóptero dispone además de estabilizadores tanto horizontal como vertical, y su tren de aterrizaje es no retráctil.

Debido al éxito del helicóptero y a su fiabilidad se desarrollaron múltiples variantes para distintas misiones:

- Unidades antitanques.
- Unidades de reconocimiento.
- Transporte.
- Recreo.
- Ambulancia.
- Policial.
- Rescate.
- Suministro.

En concreto existen tres versiones militares del Bölkow BO 105.

- El BO 105M (VBH), desarrollado por Alemania con el objetivo de cumplir misiones de reconocimiento armado y entrenamiento entre otras.
- El BO 105P (PAH-1), variante desarrollada también por el ejército alemán y dotada con seis misiles antitanque HOT.
- El BO-105 (GSH), versión producida por España y armada con un cañón Rheinmetall de 20mm.

Los datos a destacar del BO 105 son los que se muestran en la tabla 4.1.



Figura 4.3: BO 105 realizando un looping

Longitud fuselaje	8.56 m
Diámetro del rotor principal	9.84 m
Altura	3 m
Peso en vacío	1301 Kg
Peso máximo al despegue	2500 Kg
Planta motriz	2 x Turboeje Allison 250-C20B
Velocidad de crucero	204 Km/h
Velocidad máxima operativa	242 Km/h
Alcance	575 Km
Techo de vuelo	5180 m
Régimen de ascenso	8 m/s

Tabla 4.1: Datos del BO 105

## 5. Materiales de trabajo

El helicóptero del cual se ha realizado el modelo 3D (figura 5.3) se encuentra estacionado en el hangar Pedro Duque de la Escuela Técnica Superior de Ingeniería del Diseño (figuras 5.1 y 5.2) junto con el avión Mirage F1 (figura 5.4). Para aprovechar al máximo el día de trabajo de campo y toma de datos se planificaron los estacionamientos de forma que se obtuviera información suficiente para realizar el modelado de ambas aeronaves. De esta forma se puede observar el resultado obtenido del modelado del Mirage F1 en el trabajo de fin de grado «Levantamiento son sistemas láser escáner de un avión Mirage F1 y estudio de la influencia de la impresión 3D sobre la resistencia aerodinámica» llevado a cabo por Rodrigo Antonio Casar Tena.



Figura 5.1: Foto del hangar 1



Figura 5.2: Foto del hangar 2



Figura 5.3: Helicóptero BO 105 del hangar



Figura 5.4: Avión Mirage F1 del hangar

## 5.1. Zona de trabajo

El primer paso fue analizar la zona alrededor de las aeronaves para planificar correctamente la toma de datos.

Primero se tuvo que limpiar el hangar intentando evitar, en la medida de lo posible, que algún objeto interfiriera en las medidas. Esto se debe a que, como se puede observar en las figuras 5.1, 5.2, 5.3 y 5.4 hay multitud de elementos en el hangar que molestan a la hora de realizar el escaneo. Tras esto se cerraron tantas puertas y compartimentos de las aeronaves como fue posible y se frenaron los elementos móviles para evitar que estos se desplazaran durante la toma de datos, lo que provocaría tener que empezar desde cero.

## 5.2. Instrumentalización utilizada

Los dispositivos que fueron necesarios para llevar a cabo la toma de datos son el láser escáner Trimble TX6 Scanner, el trípode y la estrella para su correcto posicionamiento, y un pendrive para guardar los datos.

El Trimble TX6 Scanner es un escáner con un campo de visión de  $360^\circ \times 317^\circ$ , una velocidad de escaneo de 500000 puntos por segundo y un alcance de serie de 80 m, aunque en este caso dicho alcance ha sido ampliado hasta 120 m mediante una actualización.

En las figuras 5.5 y 5.6 se pueden observar tanto una descripción del escáner y sus partes como el menú de su pantalla táctil junto con la función de cada botón, procedentes de la guía de iniciación del escáner.

Los datos técnicos de los distintos niveles de precisión que permite se pueden observar en la tabla 5.1. Además el escáner dispone de una cámara HDR integrada de 10 mega píxeles de resolución que permiten obtener fotografías para combinarlas con la nube de puntos.

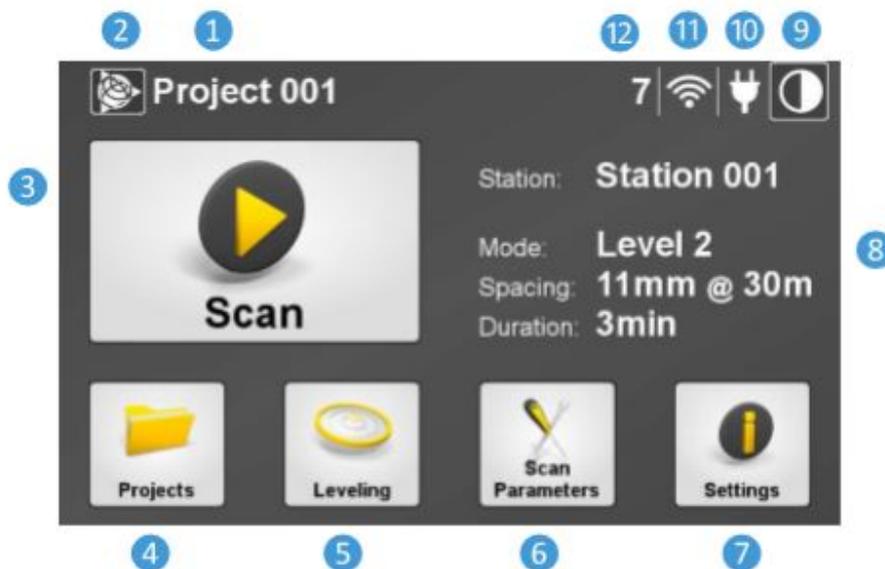
Parámetros de escaneo	Nivel 1	Nivel 2	Nivel 3
Alcance máximo	80/120 m	80/120 m	80/120 m
Duración (minutos)	03:00	05:00	19:00
Espacio entre puntos a 30 m	22.6 mm	11.3 mm	5.7 mm
Número de puntos (millones)	34	138	555

Tabla 5.1: Niveles del Trimble TX6



Elemento	Descripción
1	Botón On / Off
2	Pantalla táctil
3	Manija
4	Ranura de medición
5	Puerta de acceso a la llave USB y al compartimiento de la batería
6	Pestillo
7	Conector de comunicación (cuando corresponda)
8	Conector 12V

Figura 5.5: Descripción del Trimble TX6 Scanner



Elemento	Descripción
1	Nombre del proyecto actual
2	Botón Trimble
3	Botón Escaneo
4	Botón Proyectos
5	Botón de nivelación
6	Botón de parámetros de escaneo
7	Botón de configuración
8	Parámetros actuales de escaneo
9	Icono de alto contraste
10	Icono de estado de energía
11	Muestra el número de escaneos que todavía pueden escribirse en la unidad USB con las configuraciones actuales.
12	Señal Wi-Fi

Figura 5.6: Menú del Trimble TX6 Scanner

### 5.3. Esquema de estacionamientos

Una parte muy importante del levantamiento 3D mediante láser escáner es la planificación. Se debe decidir con anterioridad el número de estacionamientos y en que posición se colocarán ya que todo el resultado posterior depende de esta planificación.

En este caso se ha decidido que 21 estacionamientos serían suficientes, en la figura 5.7 se puede observar la disposición que se había planificado para estos. Las marcas azules corresponden a los estacionamientos realizados con el láser escáner sobre el trípode, las marcas rojas corresponden a los estacionamientos realizados con el escáner sobre el suelo directamente sin trípode y, por último, las marcas verdes corresponden a los estacionamientos realizados colocando el escáner sobre una plataforma que le proporciona mayor altura que el trípode.

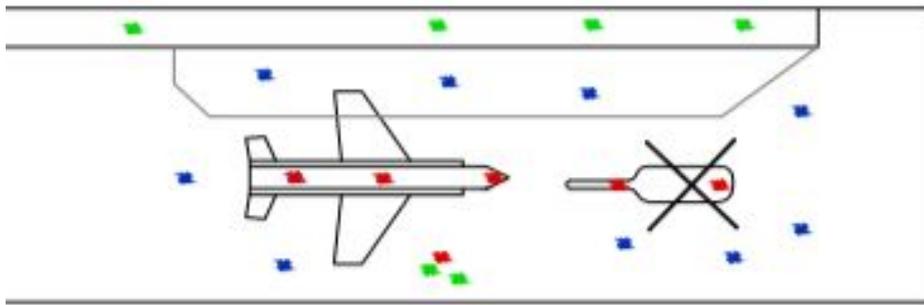


Figura 5.7: Esquema preliminar de la posición de los estacionamientos

## 6. Escaneo

La planificación realizada contemplaba 21 estacionamientos. Se decidió que todos los estacionamientos se iban a realizar en el nivel 1 debido a que los medios computacionales de los que se disponían no permitían trabajar con esa cantidad de escaneos a niveles mayores de forma fluida, por tanto, se esperaba que la duración de la toma de datos fuera de aproximadamente 3 horas (desde las 11:00 de la mañana hasta las 14:00 del mediodía).



Figura 6.1: Trimble TX6 durante uno de los escaneos



Figura 6.2: Trimble TX6 siendo configurado para realizar un escaneo

El helicóptero se estaba escaneando sin una de la tapas que cubren los motores debido a que esta se encontraba en paradero desconocido. Poco antes de terminar los 21 escaneos originalmente planteados se consiguió dar con la pieza desaparecida, así que se optó por colocarla y realizar cuatro nuevos escaneos centrados en esa zona del helicóptero para obtener suficientes datos como para no tener problemas posteriormente en la etapa de modelado.

De esta forma, en la figura 6.3 se puede observar la disposición que tomaron finalmente los 25 escaneos realizados. En la figura 6.4 se puede ver la altura a la que se realizaron los cuatro nuevos estacionamientos que se añadieron.



Figura 6.3: Posición final de los estacionamientos



Figura 6.4: Posición de los nuevos estacionamientos

Una vez realizados todos los escaneos el primer paso es realizar una copia de seguridad de los mismos para evitar cualquier pérdida de datos. Una vez llevado a cabo este paso se puede comenzar con el registro de los datos y el modelado 3D.

## 7. Modelación 3D

Una vez realizados todos los estacionamientos se deben combinar todos ellos en una misma nube de puntos, limpiarla eliminando los puntos que no nos interesan y obtener el modelo 3D de la aeronave a partir de esta.

Para esto se han utilizado distintos programas, los cuales se describen a continuación.

### 7.1. Trimble RealWorks

Trimble RealWorks es el programa propietario de la marca Trimble que se debe usar para poder abrir y trabajar con los archivos obtenidos por el escáner Trimble TX6.

Como en este caso se ha preferido trabajar con el programa Leica Cyclone el único uso que se le ha dado a este programa es la conversión de los archivos del formato TZF a PTX para poder abrirlos con otros programas. El hecho de preferir Leica Cyclone sobre Trimble RealWorks se debe a la cantidad de información que proporciona el primero sobre los errores cometidos al unir los distintos escaneos, lo que permite hacerse una idea de lo buena que es la unión.

Dicha conversión elimina los archivos originales provocando que no se pueda deshacer, por esto es importante realizar primero una copia de seguridad para asegurarnos poder usar Trimble RealWorks en caso de que lo deseemos. Esta es una de las desventajas que presentan ahora mismo los sistemas láser escáner, ya que no existen formatos compatibles ni programas de licencia abierta, sino que las empresas que desarrollan los escáneres intentan forzar al usuario a utilizar su programa.

### 7.2. Leica Geosystems HDS Cyclone

Este es el equivalente a Trimble RealWorks pero de la marca Leica Geosystems.

Es el programa que ha sido utilizado tanto para el registro como la limpieza de la nube de puntos.

El registro es la operación gracias a la cual se consigue tener todos los escaneos referidos a un sistema de referencia común. Es por esto que es una operación totalmente necesaria para poder trabajar con todos los escaneos a la vez.

El primer paso para realizar el registro es crear una nueva carpeta dentro del proyecto, y seleccionar la opción de crear un nuevo registro. Una vez realizada esta acción se van cargando los escaneos en grupos de 5, evitando así saturar al programa y disminuyendo la posibilidad de error. Estos cinco escaneos iniciales se unen entre sí dos a dos. Para ellos se deben seleccionar tres puntos comunes a ambos escaneos (figura 7.1) para ayudar al programa a realizar la unión. Una vez están seleccionados los tres puntos se selecciona la opción *Add Cloud Constraint* y, si no existe error en la selección de los puntos, la unión se realizará correctamente. Tras esto, con la opción *Optimize Cloud Alignment* se realizará un proceso iterativo en el que se intentará disminuir al máximo el error de la unión.

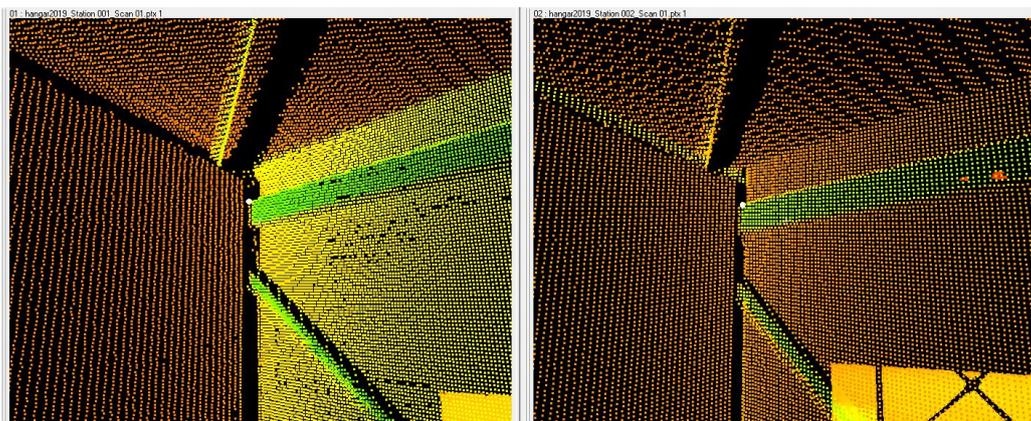


Figura 7.1: Selección de punto común para registro

Una vez realizadas las cuatro uniones (1-2, 2-3, 3-4 y 4-5) se procede a seleccionar la opción *Registration/Register*, la cual une las cuatro parejas entre sí, obteniendo una sola nube de puntos.

Tras esta primera fase se introducen los cuatro siguientes escaneos y se sigue el mismo procedimiento, uniendo primero los escaneos dos a dos (5-6, 6-7, 7-8 y 8-9), y realizando el *Register* de las ocho uniones que existen ahora.

Repetiendo este proceso hasta unir todos los escaneos obtendremos un total de 24 *Constraint* o restricciones entre ellos, las cuales habrán ido además uniéndose entre sí poco a poco. Se puede observar en la figura 7.2 la lista de

uniones junto con el error medio cuadrático cometido en cada una.

Constraint ID	ScanWorld	ScanWorld	Type	Status	Weight	Error	Error Vector	Group Error	Group Error Vector	Group
Cloud/Mesh 1	01	02	Cloud: Cloud/Mesh - Cloud/Mesh	On	1.0000	0.000 m	aligned [0.008 m]	n/a	aligned [0.008 m]	Ungrouped
Cloud/Mesh 2	02	03	Cloud: Cloud/Mesh - Cloud/Mesh	On	1.0000	0.000 m	aligned [0.011 m]	n/a	aligned [0.011 m]	Ungrouped
Cloud/Mesh 3	03	04	Cloud: Cloud/Mesh - Cloud/Mesh	On	1.0000	0.000 m	aligned [0.012 m]	n/a	aligned [0.012 m]	Ungrouped
Cloud/Mesh 4	04	05	Cloud: Cloud/Mesh - Cloud/Mesh	On	1.0000	0.000 m	aligned [0.010 m]	n/a	aligned [0.010 m]	Ungrouped
Cloud/Mesh 5	05	06	Cloud: Cloud/Mesh - Cloud/Mesh	On	1.0000	0.000 m	aligned [0.012 m]	n/a	aligned [0.012 m]	Ungrouped
Cloud/Mesh 6	06	07	Cloud: Cloud/Mesh - Cloud/Mesh	On	1.0000	0.000 m	aligned [0.010 m]	n/a	aligned [0.010 m]	Ungrouped
Cloud/Mesh 7	07	08	Cloud: Cloud/Mesh - Cloud/Mesh	On	1.0000	0.000 m	aligned [0.012 m]	n/a	aligned [0.012 m]	Ungrouped
Cloud/Mesh 8	08	09	Cloud: Cloud/Mesh - Cloud/Mesh	On	1.0000	0.000 m	aligned [0.008 m]	n/a	aligned [0.008 m]	Ungrouped
Cloud/Mesh 9	09	10	Cloud: Cloud/Mesh - Cloud/Mesh	On	1.0000	0.000 m	aligned [0.008 m]	n/a	aligned [0.008 m]	Ungrouped
Cloud/Mesh 10	10	11	Cloud: Cloud/Mesh - Cloud/Mesh	On	1.0000	0.000 m	aligned [0.009 m]	n/a	aligned [0.009 m]	Ungrouped
Cloud/Mesh 11	11	12	Cloud: Cloud/Mesh - Cloud/Mesh	On	1.0000	0.000 m	aligned [0.011 m]	n/a	aligned [0.011 m]	Ungrouped
Cloud/Mesh 12	12	13	Cloud: Cloud/Mesh - Cloud/Mesh	On	1.0000	0.000 m	aligned [0.009 m]	n/a	aligned [0.009 m]	Ungrouped
Cloud/Mesh 13	13	14	Cloud: Cloud/Mesh - Cloud/Mesh	On	1.0000	0.000 m	aligned [0.007 m]	n/a	aligned [0.007 m]	Ungrouped
Cloud/Mesh 14	14	15	Cloud: Cloud/Mesh - Cloud/Mesh	On	1.0000	0.000 m	aligned [0.010 m]	n/a	aligned [0.010 m]	Ungrouped
Cloud/Mesh 15	15	16	Cloud: Cloud/Mesh - Cloud/Mesh	On	1.0000	0.000 m	aligned [0.009 m]	n/a	aligned [0.009 m]	Ungrouped
Cloud/Mesh 16	16	17	Cloud: Cloud/Mesh - Cloud/Mesh	On	1.0000	0.000 m	aligned [0.010 m]	n/a	aligned [0.010 m]	Ungrouped
Cloud/Mesh 17	17	18	Cloud: Cloud/Mesh - Cloud/Mesh	On	1.0000	0.000 m	aligned [0.006 m]	n/a	aligned [0.006 m]	Ungrouped
Cloud/Mesh 18	18	19	Cloud: Cloud/Mesh - Cloud/Mesh	On	1.0000	0.000 m	aligned [0.007 m]	n/a	aligned [0.007 m]	Ungrouped
Cloud/Mesh 19	19	20	Cloud: Cloud/Mesh - Cloud/Mesh	On	1.0000	0.000 m	aligned [0.006 m]	n/a	aligned [0.006 m]	Ungrouped
Cloud/Mesh 20	20	21	Cloud: Cloud/Mesh - Cloud/Mesh	On	1.0000	0.000 m	aligned [0.007 m]	n/a	aligned [0.007 m]	Ungrouped
Cloud/Mesh 21	21	22	Cloud: Cloud/Mesh - Cloud/Mesh	On	1.0000	0.000 m	aligned [0.008 m]	n/a	aligned [0.008 m]	Ungrouped
Cloud/Mesh 22	22	23	Cloud: Cloud/Mesh - Cloud/Mesh	On	1.0000	0.000 m	aligned [0.010 m]	n/a	aligned [0.010 m]	Ungrouped
Cloud/Mesh 23	23	24	Cloud: Cloud/Mesh - Cloud/Mesh	On	1.0000	0.000 m	aligned [0.007 m]	n/a	aligned [0.007 m]	Ungrouped
Cloud/Mesh 24	24	25	Cloud: Cloud/Mesh - Cloud/Mesh	On	1.0000	0.000 m	aligned [0.010 m]	n/a	aligned [0.010 m]	Ungrouped

Figura 7.2: Listado de uniones (Cyclone)

Se ha intentado mantener en todos los casos el error medio cuadrático en un valor igual o inferior a 0.010 m, pero se puede observar que en ocasiones esto no ha sido posible.

Una vez se han unido todos los escaneos entre si se bloquean las uniones con la opción *Freeze Registration* y se crea un *Model Space*, que es la nube de puntos obtenida al unir todos los estacionamientos. Esta nube de puntos se mantendrá sin tocar, de forma que se mantenga como una copia de seguridad que contiene todos los datos. El resultado obtenido se puede observar en las figuras 7.3, 7.4, 7.5 y 7.6.

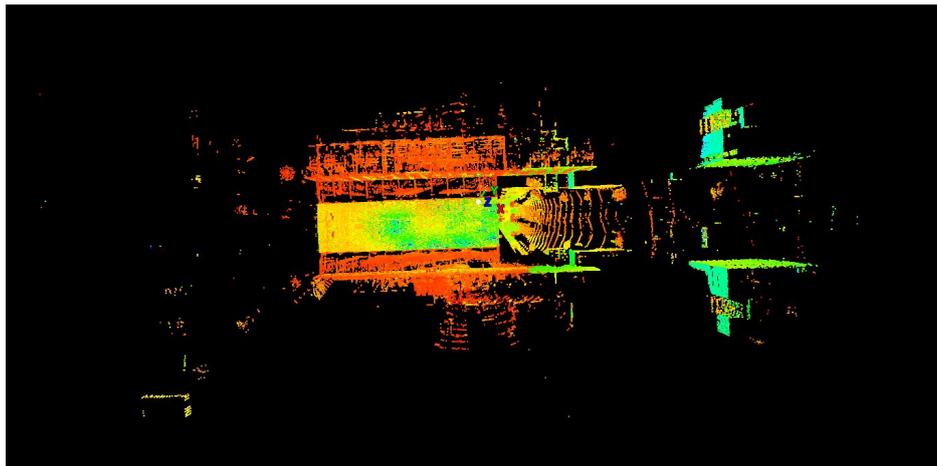


Figura 7.3: Nube de puntos completa vista desde arriba

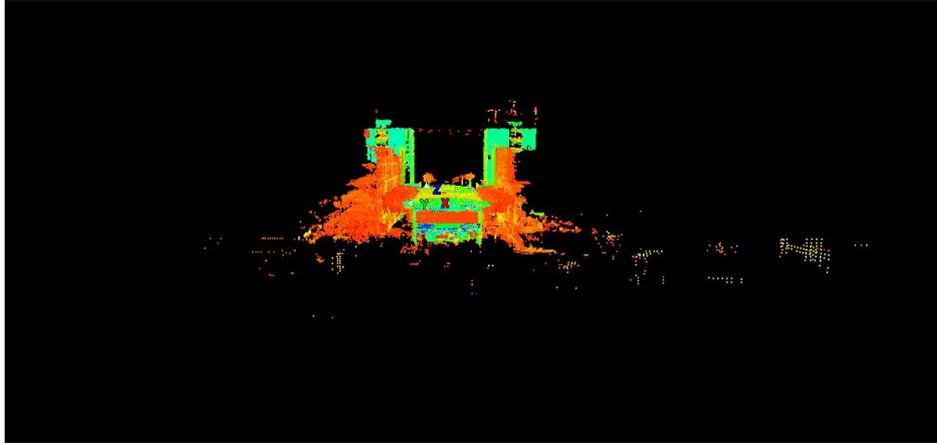


Figura 7.4: Nube de puntos completa vista de frente

En las figuras 7.3 y 7.4 se puede observar que existen puntos en el exterior del hangar, esto se debe al alcance del láser escáner y a que es capaz de medir a través de las ventanas del hangar. No obstante, estos puntos exteriores no son de interés.

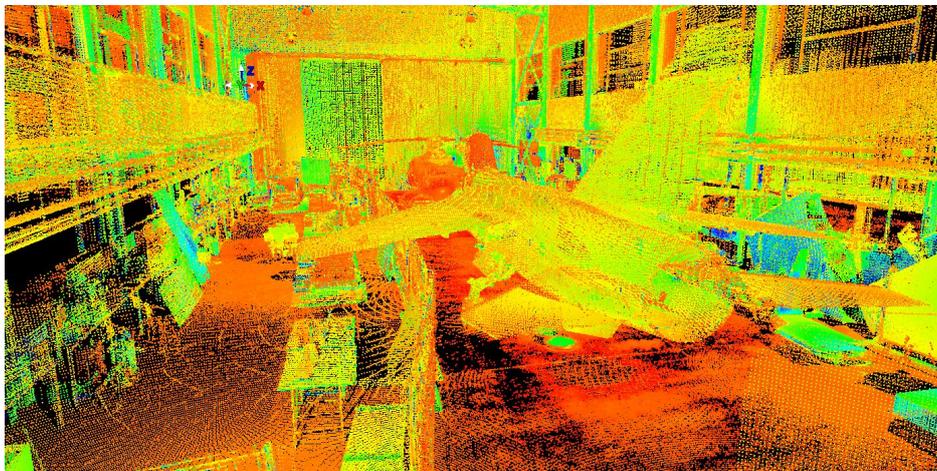


Figura 7.5: Nube de puntos completa vista desde dentro 1

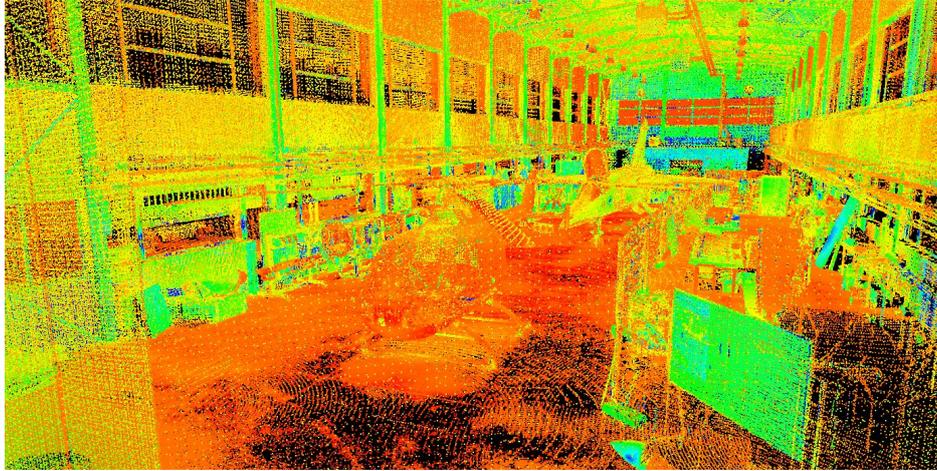


Figura 7.6: Nube de puntos completa vista desde dentro 2

Una vez llegados a este punto se procede a realizar la limpieza de los puntos que no nos interesan. Para ello se realiza una copia nueva a cada paso que se realiza con el fin de poder retroceder al estado anterior en caso de necesitarlo.

El primer paso es eliminar los puntos exteriores. Para ellos se hace uso de la herramienta *fence*, la cual crea un cercado permitiendo eliminar los puntos interiores o exteriores a este según se desee. Se debe tener cuidado con esta herramienta ya que el cercado es en 2D pero afecta a la nube de puntos tridimensional, por ello en este primer paso se realiza el corte observando la nube de puntos desde arriba, tal y como se observa en la figura 7.7.

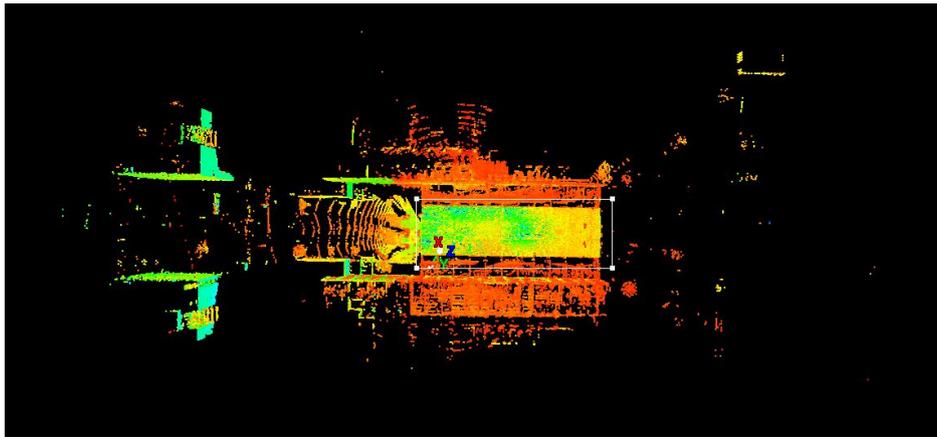


Figura 7.7: Limpieza de la nube de puntos

El resultado de esta operación se muestra en las figuras 7.8 y 7.9, en la

que se puede observar que ahora solo se mantienen los puntos pertenecientes al hangar.

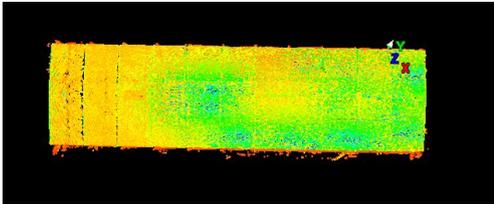


Figura 7.8: Nube de puntos del hangar visto desde arriba

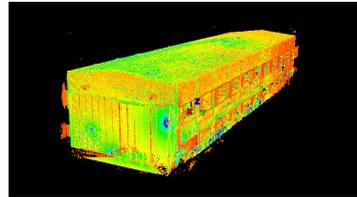


Figura 7.9: Vista general de la nube de puntos del hangar

Se puede ver también que el origen de coordenadas se encuentra en la posición en la que se realizó el primero de los escaneos.

El siguiente paso es eliminar los puntos correspondientes al techo del hangar para poder observar cómodamente el interior y facilitar el resto de la limpieza. El resultado de esta operación se puede observar en las figuras 7.10 y 7.11.

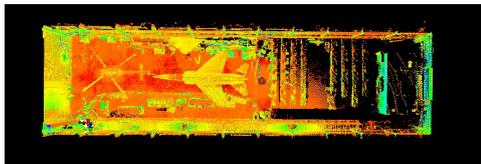


Figura 7.10: Nube de puntos del hangar sin el techo visto desde arriba

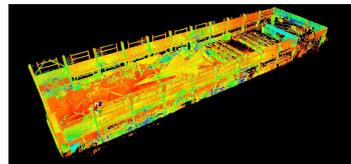


Figura 7.11: Vista general de la nube de puntos del hangar sin techo

A partir de ahora se pasa a centrarse en el helicóptero. Para ello se eliminan todos los puntos no necesarios dejando solo los pertenecientes al helicóptero y los más cercanos y difíciles de borrar sin afectar a este, tal y como se muestra en las figuras 7.12 y 7.13. Para facilitar la interpretación de la nube de puntos se muestran estos coloreados por la imagen de la cámara del escáner en vez de por su intensidad.

Ahora solo queda continuar limpiando los puntos que no pertenecen al helicóptero. El resultado de la siguiente etapa de limpieza se puede observar en las figuras 7.14 y 7.15.

Finalmente, el resultado de la limpieza es el mostrado en las figuras 7.16, 7.17, 7.18, 7.19 y 7.20.

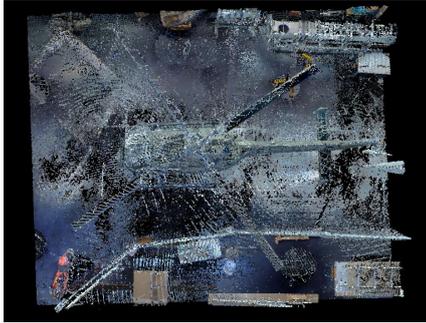


Figura 7.12: Paso 1 de la limpieza del helicóptero desde arriba

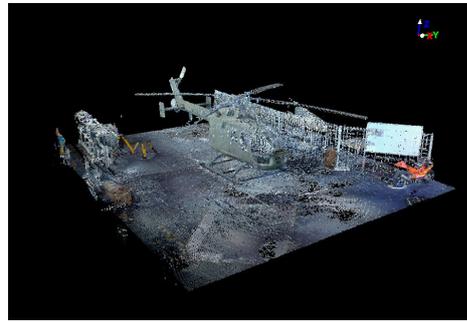


Figura 7.13: Vista general del paso 1 de la limpieza del helicóptero



Figura 7.14: Vista lateral 1 del paso 2 de la limpieza del helicóptero

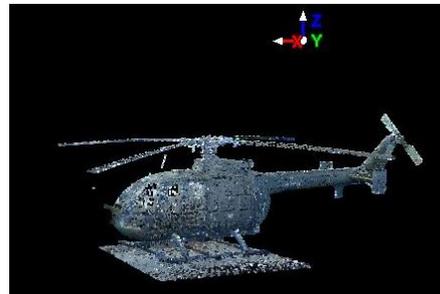


Figura 7.15: Vista lateral 2 del paso 2 de la limpieza del helicóptero

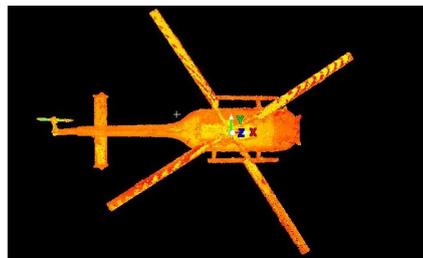


Figura 7.16: Nube de puntos del helicóptero desde arriba

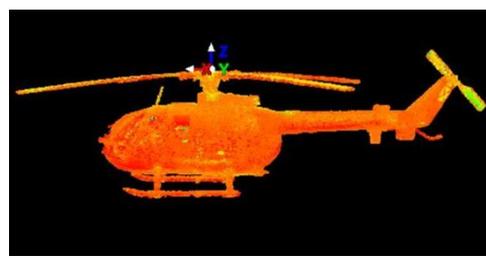


Figura 7.17: Nube de puntos del helicóptero desde un lado



Figura 7.18: Nube de puntos del helicóptero de frente

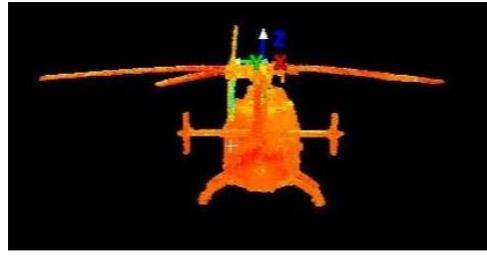


Figura 7.19: Nube de puntos del helicóptero desde atrás



Figura 7.20: Vista general de la nube de puntos del helicóptero

Se puede observar además que se ha cambiado el origen del sistema de coordenadas para que coincida con el eje del rotor. Esto se ha hecho simplemente por comodidad a la hora de exportar la nube de puntos a otros programas.

Una vez tenemos solo la nube de puntos perteneciente al helicóptero unificamos la misma, de forma que la unión de los escaneos sea definitiva y se pueda exportar la nube para poder abrirla con otros archivos.

El siguiente paso será obtener una malla a partir de la nube de puntos, por lo que se exporta la misma en formato PTS.

### 7.3. 3DReshaper

Una vez obtenida la nube de puntos del helicóptero exportada en formato PTS se procede a obtener la malla 3D.

Para ello se utiliza el software 3DReshaper, el cuál es un programa especializado en el procesamiento de nubes de puntos ampliamente usado en industrias como la ingeniería civil, la arquitectura e incluso la ingeniería naval. En este caso será utilizado para obtener la malla tridimensional del helicóptero.

La malla se ha obtenido con los parámetros que recomienda 3DReshaper por defecto, ya que se ha comprobado que es con los que mejor resultado se obtiene.

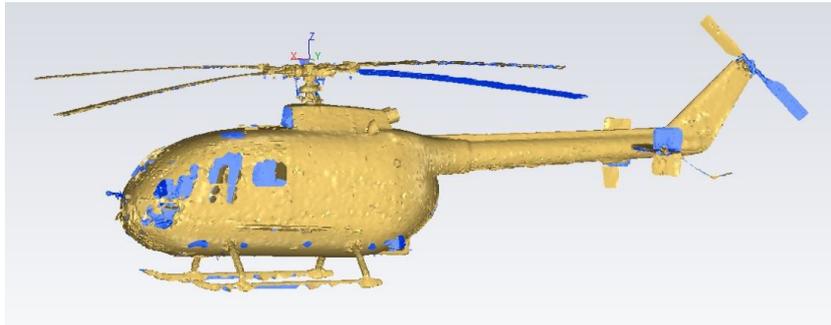


Figura 7.21: Malla inicial de lado



Figura 7.22: Malla inicial de frente

Se puede observar que la malla presenta diversos fallos, como caras invertidas (superficies azules) o agujeros. Además, también hay información del interior del helicóptero obtenida debido a que el haz atravesaba las ventanas de la aeronave y el agujero que existe en el techo de esta. Dado que la información del interior no es relevante deberá ser eliminada para evitar problemas y errores.

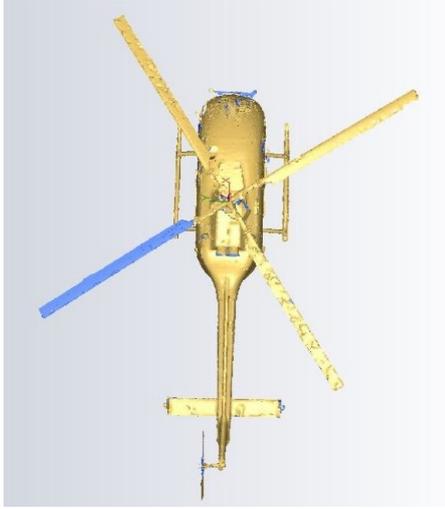


Figura 7.23: Malla inicial por arriba

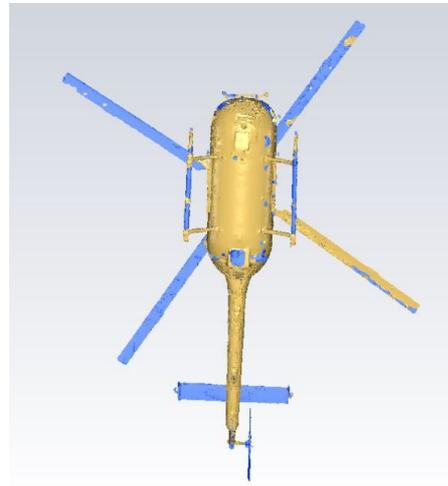


Figura 7.24: Malla inicial por mbo-xabajo

Debido a que a partir de este momento se ha pasado a manipular la malla con otros programas en los que se posee más experiencia se debe exportar el modelo 3D en formato OBJ que es un formato aceptado por la mayoría de programas.

## 7.4. Netfabb

Netfabb es un herramienta de Autodesk creada para la impresión 3D, por lo que es idónea para trabajar con mallas.

En este caso ha sido usada para analizar la malla obtenida en 3DReshaper y reparar los errores que esta presentaba, tales como agujeros, elementos separados de la malla o elementos internos.

Se ha preferido utilizar este programa en vez de 3DReshaper ya que facilita la eliminación de los elementos internos y el cierre automático de los agujeros existentes en la malla, lo cual es muy útil en este caso teniendo en cuenta que la malla presenta diversos errores debidos, entre otras causas, a las ventanas, el agujero del techo y el hecho de haber colocado la tapa de uno de los motores a mitad del proceso de escaneo.

En las imágenes 7.25 y 7.26 se pueden observar todos los problemas que presenta la malla. Una vez analizados estos problemas se procede a resolverlos mediante la herramienta *extended repair* de Netfabb, obteniéndose el resultado visible en las imágenes 7.27, 7.28 y 7.29



Figura 7.25: Análisis de Netfabb desde el lateral



Figura 7.26: Análisis de Netfabb desde arriba

En la tabla 7.1 se puede observar que se han conseguido eliminar todos los errores obteniéndose de esta forma una malla continua y estanca, facilitando así cualquier tipo de análisis posterior o impresión 3D.

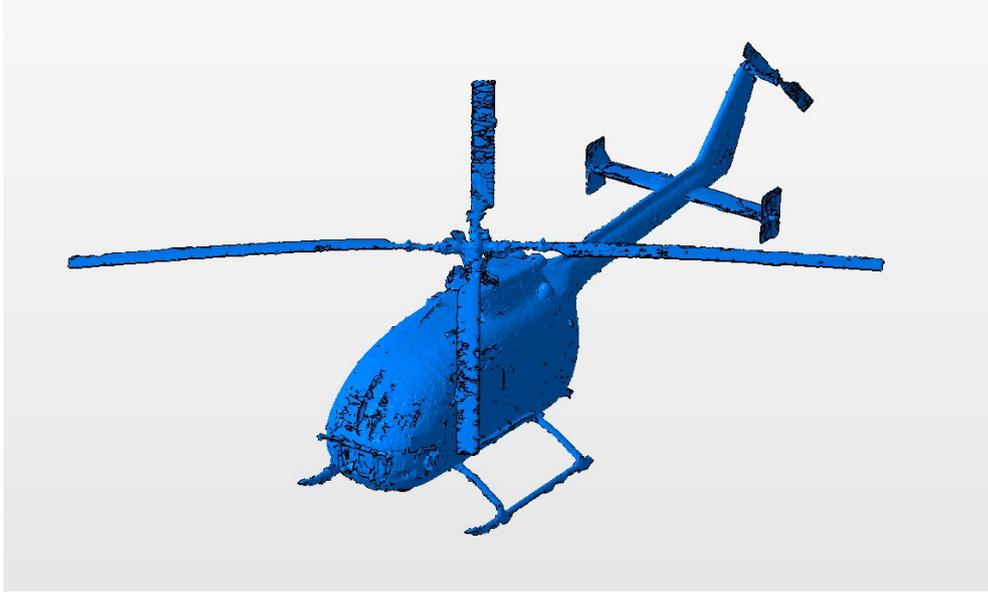


Figura 7.27: Vista general de la malla reparada



Figura 7.28: Malla reparada vista desde un lateral

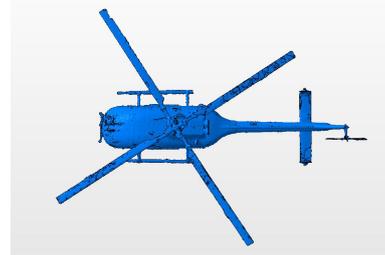


Figura 7.29: Malla reparada vista desde arriba

	Malla original	Malla reparada
Volumen ( $m^3$ )	0	9.0692
Área ( $m^2$ )	54.3638	64.7604
Puntos	59568	57756
Triángulos	113394	122552
Agujeros	285	0
Bordes abiertos	7998	0

Tabla 7.1: Comparación entre la malla original y la reparada

## 7.5. Meshmixer

Teniendo en cuenta que uno de los objetivos del presente trabajo es la impresión 3D del modelo obtenido la malla anterior debe ser mejorada, ya que en el estado actual no es válida para ser impresa debido a las múltiples discontinuidades e imperfecciones.

La primera parte que ha sido arreglada es el fuselaje del helicóptero. Para esto se ha utilizado Meshmixer, ya que es un programa gratuito y que permite manipular fácilmente mallas tridimensionales.

En la figura 7.30 se puede ver el resultado de la reparación extendida aplicada en Netfabb. Una vez se ha importado este archivo a Meshmixer se cortan los elementos que no interesan en este momento, dejando el fuselaje aislado, tal y como se observa en la figura 7.31.



Figura 7.30: Malla reparada abierta en Meshmixer

Ahora, haciendo uso de las herramienta del menú *sculpt* de Meshmixer se procede a rellenar y alisar los huecos y protuberancias existentes en el fuselaje, así como suavizarlo. En la figura 7.32 se puede observar el resultado. Aunque se ha perdido un poco de detalle, sobre todo en zonas como los conductos de circulación de aire del motor, la malla ahora es mucho más fácilmente imprimible.

Más tarde se comprobará si al realizar esta operación se ha variado demasiado la geometría del helicóptero para poder concluir si ha sido una solución óptima o no.



Figura 7.31: Fuselaje en Meshmixer

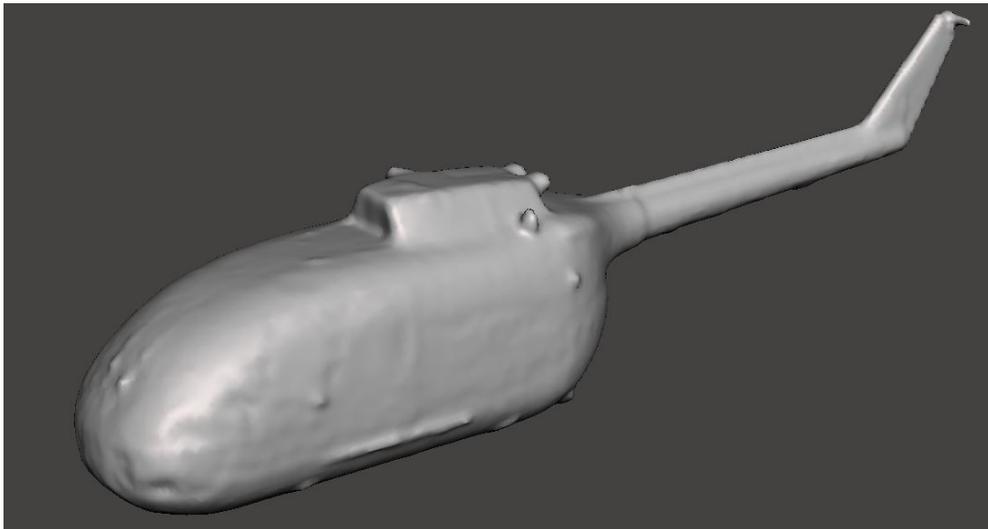


Figura 7.32: Fuselaje en Meshmixer tras ser modificado

## 7.6. Ingeniería inversa con Fusion 360

Fusion 360 es una herramienta de autodesk especializada en el diseño 3D con fines industriales. Se trata de un software muy potente basado en la nube que permite trabajar tanto con documentos CAD como con mallas, así como

realizar animaciones, simulaciones y diseñar el proceso de fabricación de las piezas modeladas.

En este caso, dado que tanto el patín de aterrizaje como los estabilizadores no tienen una geometría complicada se ha optado por realizar ingeniería inversa a partir de la malla para obtener una geometría continua y con más sentido que la obtenida al mallar la nube de puntos. Además, de esta forma será también una geometría más fácil de imprimir en 3D.

El primer paso ha sido aislar el patín del resto de la malla y crear diversos planos que lo corten perpendicularmente, tal y como se observa en las figuras 7.33 y 7.34. Una vez realizados los cortes se crea un sketch que coincida con la forma y tamaño del patín en cada sección para, una vez realizados todos los sketches, extruirlos obteniendo la geometría deseada.

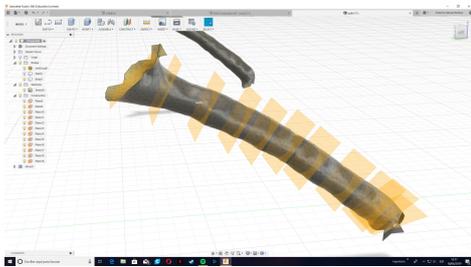


Figura 7.33: Planos de corte del patín

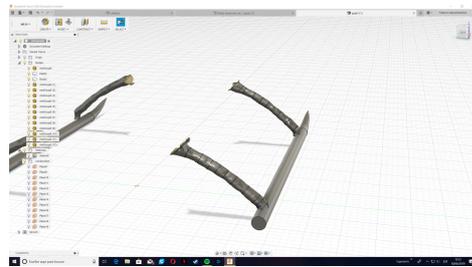


Figura 7.34: Corte del patín en distintos planos

El resultado de la operación una vez se ha realizado a todo el patín en su conjunto se puede observar en la figura 7.35.

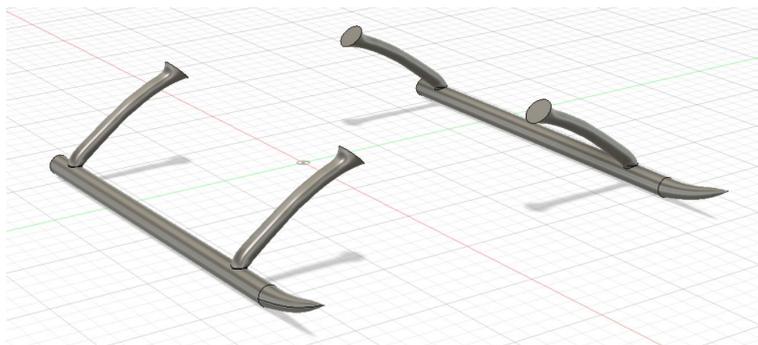


Figura 7.35: Patín obtenido por ingeniería inversa

Después se ha repetido la operación para el estabilizador horizontal.

En este caso se puede observar en la figura 7.36 que la malla reparada en Netfabb tiene demasiadas imperfecciones, por lo que se ha decidido utilizar

la malla original (figura 7.37).



Figura 7.36: Estabilizador en la malla reparada



Figura 7.37: Estabilizador en la malla original

La comparación entre la malla original y el resultado del modelado mediante Fusion 360 se puede observar en la figura 7.38.



Figura 7.38: Comparación entre malla y modelado del estabilizador

Una vez añadidos tanto el patín como el estabilizador al fuselaje del helicóptero se obtiene el modelo mostrado en la figura 7.39.



Figura 7.39: Fuselaje con estabilizador horizontal y patín

Para el estabilizador vertical y los perfiles aerodinámicos del rotor principal y el antipar es imposible seguir el mismo procedimiento esperando un resultado medianamente coherente. Esto se debe a que el estabilizador horizontal es casi inexistente en la malla original y desaparece completamente en la malla reparada, y los perfiles aerodinámicos tienen demasiados errores en

cualquiera de las dos mallas, como se puede observar en la figura 7.40 en la que se muestra un corte de una de las palas.

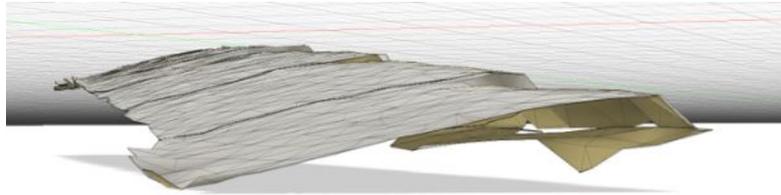


Figura 7.40: Perfil aerodinámico de la malla

Debido a esto se ha decidido realizar ingeniería inversa a partir de la nube de puntos para obtener el modelo de estas partes.

## 7.7. Ingeniería inversa con Rhinoceros 6

Rhinoceros es un software de modelado en tres dimensiones usado en multitud de ambientes, como arquitectura, diseño industrial, ingeniería naval, diseño automovilístico, ingeniería inversa, etc.

Su fama se debe a su versatilidad al ser capaz de trabajar con una gran variedad de formatos, siendo incluso usado en ocasiones únicamente para convertir archivos de un formato a otro para poder evitar la incompatibilidad entre programas.

En este caso se ha usado para realizar ingeniería inversa desde la nube de puntos, ya que es un programa muy potente para trabajar con esta.

Se puede observar en las figuras 7.42 y 7.43 que la cantidad de información existente en la nube de puntos es mucho mayor que la existente en la malla, por lo que el detalle que se puede conseguir es mucho mayor también.

Para poder obtener el perfil de la pala se realizan dos planos que corten a esta perpendicularmente de forma que se muestren solo los puntos encerrados entre ambos planos, tal y como se muestra en las figuras 7.44 y 7.45.

En la figura 7.45 se puede observar que aún trabajando con la nube de puntos el perfil no aparece completo, incluso buscando la sección de la pala en la que se obtiene mejor resultado.

Tras buscar la sección en la que la información es la mayor posible sin mucha ambigüedad debida al error del escáner se traza el perfil que parece corresponder al perfil de la pala del helicóptero. El resultado puede observarse en la figura 7.46.



Figura 7.41: Nube de puntos abierta en Rhinoceros 6

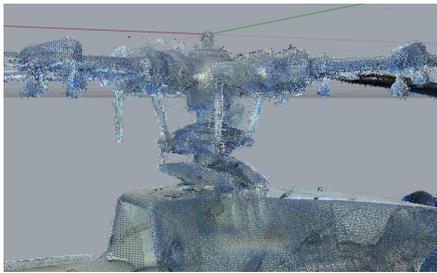


Figura 7.42: Rotor de la nube de puntos

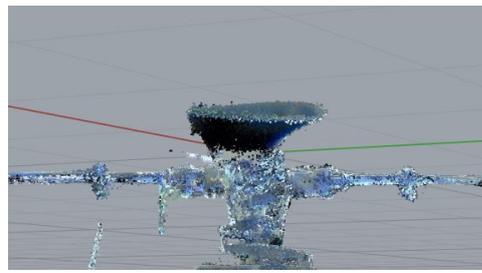


Figura 7.43: Pala de la nube de puntos

Una vez obtenido el perfil en Rhinoceros 6 se ha exportado el sketch para proceder a modelar el rotor en Fusion 360. Se ha optado por simplificarlo para hacer posible la impresión 3D a una escala razonable. El resultado se puede observar en la figura 7.47.

Siguiendo los mismos pasos con el estabilizador vertical y el antipar el resultado del modelado final del helicóptero BO 105 es el que se observa en las figuras 7.48, 7.49 y 7.50.

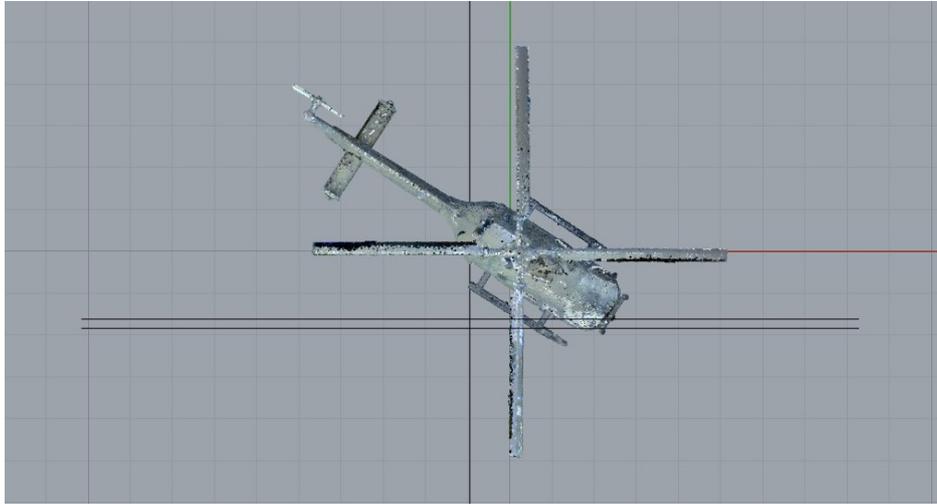


Figura 7.44: Planos cortando la pala

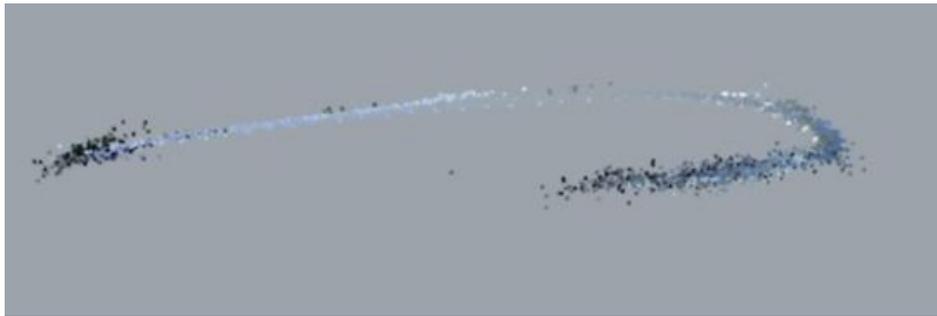


Figura 7.45: Puntos de la pala encerrados entre los planos



Figura 7.46: Perfil de la pala obtenido por ingeniería inversa

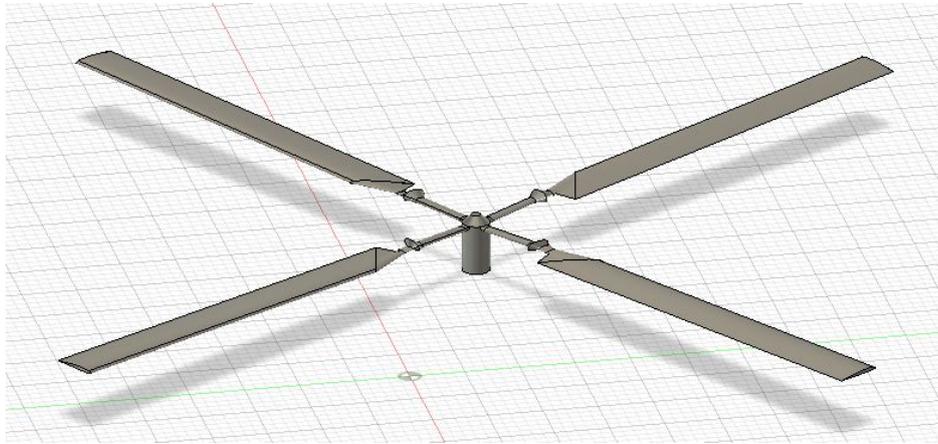


Figura 7.47: Rotor modelado



Figura 7.48: Modelo del BO 105 visto de frente

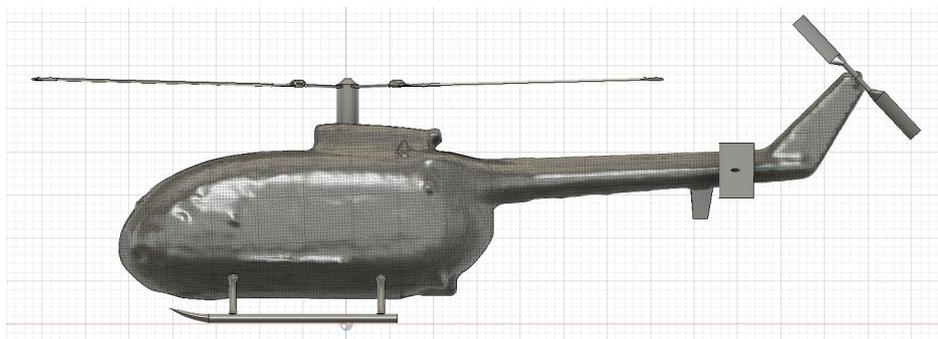


Figura 7.49: Modelo del BO 105 visto de lado



Figura 7.50: Vista general del modelo del BO 105

## 8. Impresión 3D

### 8.1. Impresora

La impresora utilizada es una Prusa I3 MK3 (figura 8.1), la sucesora de la Prusa I3 MK2.

Se trata de una impresora de fabricación por deposición de filamento fundido de código abierto y es uno de los modelos con mejor fama y más utilizados en todo el mundo debido a su reducido precio y a los buenos resultados que ofrece. Además, el hecho de ser de código abierto facilita la adición de mejoras, pudiendo llegar incluso a imprimir piezas que sirvan para mejorar la propia impresora.

Posee un volumen de impresión de 250 x 210 x 200 mm, el cual es más que suficiente para la impresión que se desea realizar.



Figura 8.1: Impresora Prusa I3 MK3

## 8.2. Material

El material utilizado para realizar la impresión es el ácido poliláctico o PLA, el cuál se obtiene a partir del almidón del maíz, lo que lo convierte en un ácido biodegradable.

Se ha escogido este material debido a que es el más ampliamente utilizado en impresión 3D debido a su coste (aproximadamente 20 €/Kg) y a su baja temperatura de fusión, pudiendo imprimirse correctamente a partir de los 195 grados centígrados. Además de ofrecer muy buenos resultados sin necesidad de utilizar impresoras de precio elevado, al contrario que otros materiales como el ABS, con el cual es muy complicado obtener buenos resultados a no ser que se disponga de una impresora profesional y cerrada, ya que precisa de temperaturas muy elevadas y constantes.

En la figura 8.2 se puede observar la relación recomendada entre temperatura y velocidad de impresión del PLA. No obstante, la relación óptima depende de la marca del plástico e incluso de la impresora que se este utilizando.

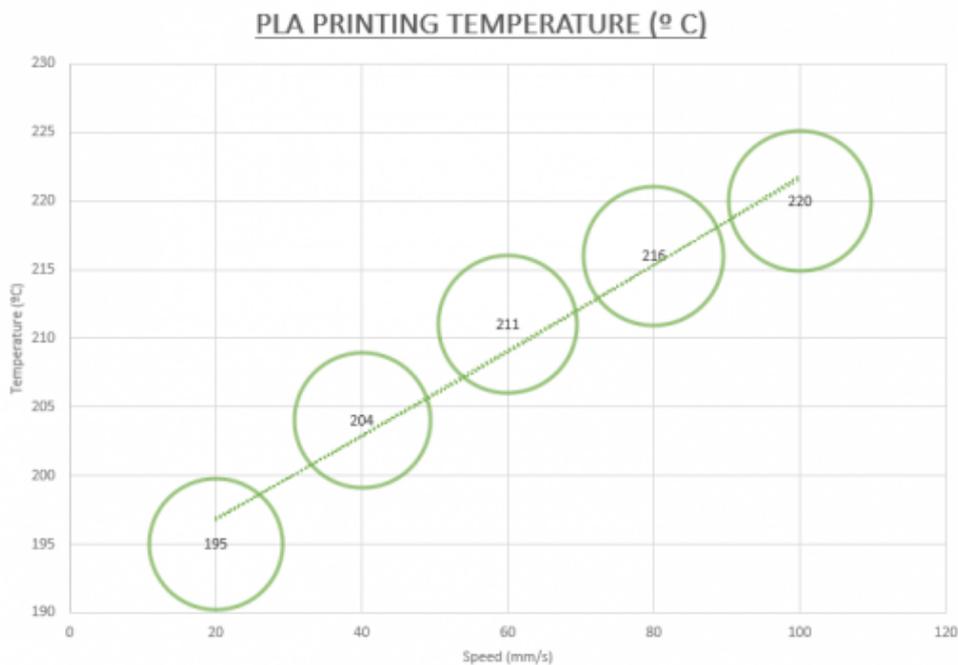


Figura 8.2: Relación velocidad-temperatura de impresión del PLA

### 8.3. Impresión

La impresión del modelo se ha realizado en distintas secciones, las cuales se han unido posteriormente aplicando calor con un soldador de temperatura regulable. La escala escogida es 1:35, ya que se adapta muy bien al tamaño de la impresora. Si se deseara imprimir el modelo en una escala mayor habría que dividirlo en más secciones.

La impresión de todas las piezas ha durado en total 10 horas y 20 minutos, gastando 107.50 gramos de material entre las piezas propiamente dichas y los soportes que han sido necesarios crear para su correcta impresión.

En la figura 8.3 se puede observar como será impreso el modelo. En las zonas interiores se utilizó una estructura de relleno de forma que se evita malgastar demasiado plástico a la vez que se asegura una cierta resistencia. En este caso el porcentaje de relleno no es elevado ya que la maqueta no va a ser sometida a ningún tipo de esfuerzo.

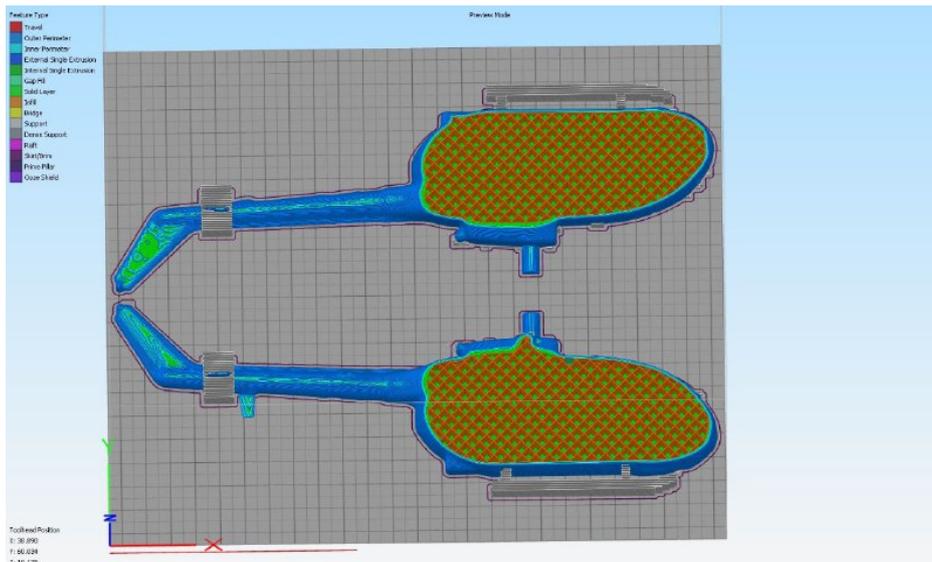


Figura 8.3: Simulación del proceso de impresión

En las figuras 8.4, 8.5, 8.6 y 8.7 se puede observar el resultado final una vez se han impreso y unido todas las partes que componen la maqueta.

Hay que señalar que las palas de los rotores no están exactamente a escala, sino que han tenido que ser ligeramente deformadas para conseguir un espesor suficiente como para poder ser impresos correctamente.



Figura 8.4: Modelo impreso visto desde arriba



Figura 8.5: Vista general del modelo impreso



Figura 8.6: Antipar del modelo impreso



Figura 8.7: Vista de frente del modelo impreso

Se puede observar que las palas presentan un cierto ángulo de caída, similar a lo que ocurre en la vida real. Esto se debe a que la longitud de las palas es muy elevada en comparación con su espesor y con el tamaño de la unión al fuselaje.

# 9. Análisis

## 9.1. Análisis dimensional

El primer análisis a realizar es un análisis dimensional. De esta forma se podrá comprobar en primera aproximación como de bueno es el modelo obtenido.

Se ha realizado la comprobación dimensional de la malla original, de la malla reparada en Netfabb y del modelo diseñado para imprimir en 3D. En las tablas 9.1, 9.2 y 9.3 se pueden observar los resultados obtenidos.

	Valor real (m)	Valor medido (m)	Error relativo
Diámetro rotor	9.84	9.755	0.86 %
Largo cabina	4.30	4.335	0.81 %
Altura	3.00	2.915	2.83 %
Ancho patín	2.53	2.503	1.07 %
Diámetro antipar	1.90	1.907	0.37 %
Largo fuselaje	8.56	8.559	0.01 %

Tabla 9.1: Comparación tamaño real vs tamaño de la malla original

	Valor real (m)	Valor medido (m)	Error relativo
Diámetro rotor	9.84	9.742	1.00 %
Largo cabina	4.30	4.31	0.23 %
Altura	3.00	2.917	2.77 %
Ancho patín	2.53	2.514	0.63 %
Diámetro antipar	1.90	1.894	0.32 %
Largo fuselaje	8.56	8.608	0.56 %

Tabla 9.2: Comparación tamaño real vs tamaño de la malla reparada

	Valor real (m)	Valor medido (m)	Error relativo
Diámetro rotor	9.84	9.856	0.16 %
Largo cabina	4.30	4.307	0.16 %
Altura	3.00	2.846	5.13 %
Ancho patín	2.53	2.541	0.43 %
Diámetro antipar	1.90	1.897	0.16 %
Largo fuselaje	8.56	8.664	1.21 %

Tabla 9.3: Comparación tamaño real vs tamaño del modelo impreso

Se observa que el error relativo medio en la malla original es de un 1 %, y que este aumenta ligeramente en el modelo diseñado para ser impreso en 3D. Esto último se explica debido a simplificaciones tomadas en algunas zonas del helicóptero para facilitar su impresión. No obstante al mayor error dimensional, el modelo impreso es más fiel a la realidad que la malla en algunos aspectos, como puede ser en el perfil aerodinámico de las palas, ya que tanto la malla original como la malla reparada tienen demasiadas imperfecciones en esta zona.

## 9.2. Análisis del perfil

Además del análisis dimensional se ha realizado un pequeño análisis aerodinámico del perfil obtenido mediante ingeniería inversa con la finalidad de comprobar hasta que punto el resultado obtenido se parece a la realidad y si el modelo es aceptable.

Para ello el primer paso a realizar es obtener la geometría del perfil discretizada. Con este fin se ha hecho uso de un algoritmo (figura 9.1) facilitado por Marco, un investigador de la Escuela Técnica Superior de Ingeniería de Caminos, Canales y Puertos de la UPV. Dicho algoritmo, creado mediante el plug-in Grasshopper de Rhinoceros 6, se encarga de discretizar el perfil en el número de puntos deseado y exportar el resultado en formato texto a un bloc de notas.

En este caso se ha discretizado la curva en 200 puntos, tal y como se puede observar en la figura 9.2.

Una vez obtenidas las coordenadas de los 200 puntos se reordenan de forma que empiecen en el borde de salida, recorran todo el extradós, y vuelvan al borde de salida recorriendo el intradós. Esto se hace ya que es la forma correcta de ordenar los puntos para no tener problemas de convergencia más adelante.

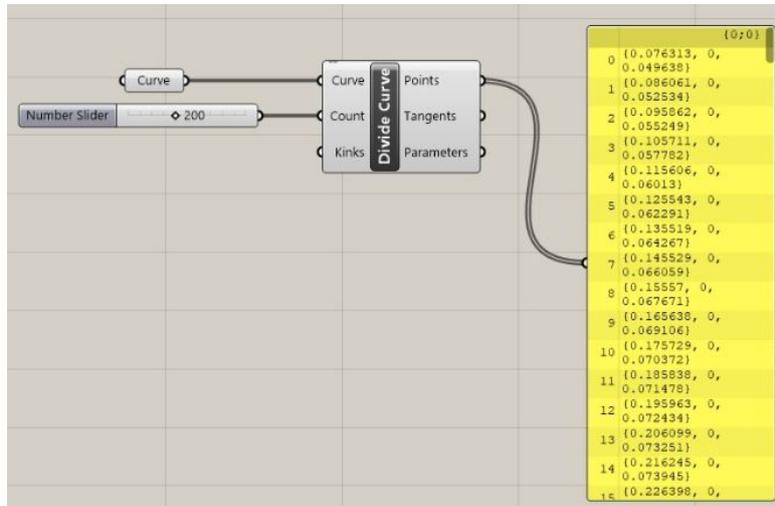


Figura 9.1: Algoritmo creado en Grasshopper

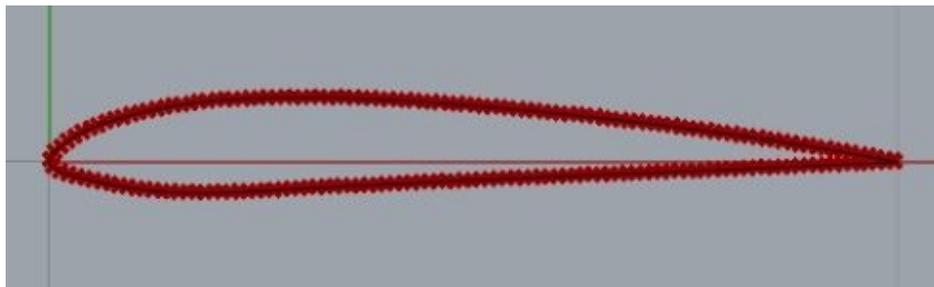


Figura 9.2: Perfil discretizado

Para realizar el análisis se ha utilizado el programa XFLR5, el cuál está basado en el proyecto XFOil y se distribuye, al igual que este, con licencia GPL.

Aunque este programa ha sido diseñado para el estudio y diseño de planeadores es útil para el estudio a realizar, ya que lo único que se quiere comprobar son los valores del coeficiente de sustentación y eficiencia aerodinámica que entregan los perfiles bidimensionales.

Para realizar el estudio el primer paso es cargar el perfil. Se han cargado tanto el perfil obtenido por ingeniería inversa como el perfil real del helicóptero (NACA 23012), tal y como se puede observar en la figura 9.3.

Se puede comprobar que el extradós es bastante semejante, no obstante no ocurre lo mismo en el intradós. Esto se explica debido a la falta de información que existe en la nube de puntos sobre el intradós de las palas, tal y como se observaba en las figuras 7.45 y 7.46.

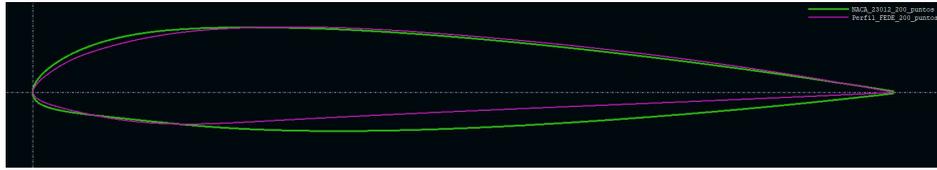


Figura 9.3: Comparación entre el perfil obtenido y el real

El primer estudio realizado sobre los perfiles es una comparación entre la distribución del coeficiente de presión. Dicha comparación se ha realizado tanto con los perfiles a  $0^\circ$  como a  $5^\circ$ .



Figura 9.4: Distribución del CP del perfil a  $0^\circ$

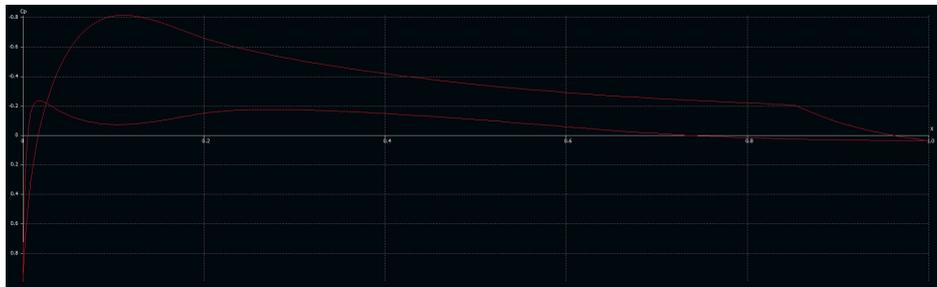


Figura 9.5: Distribución del CP del perfil real a  $0^\circ$

En las figuras 9.4 y 9.5 se puede observar que las diferencias en la distribución del coeficiente de presiones a ángulo de ataque nulo son bastante notables.

De la misma forma, de las figuras 9.6 y 9.7 se extraen las mismas conclusiones que de las dos figuras anteriores.

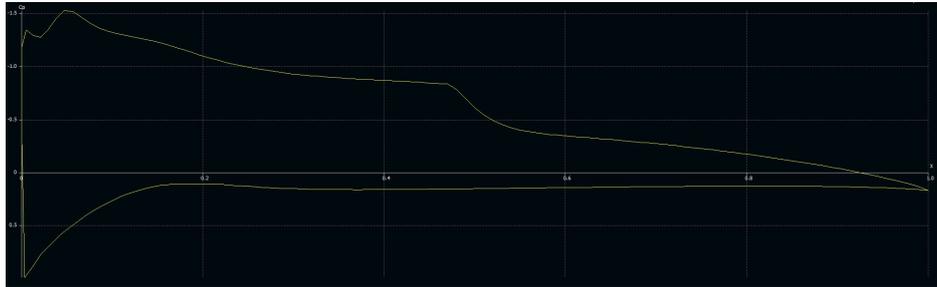


Figura 9.6: Distribución del CP del perfil a 5°

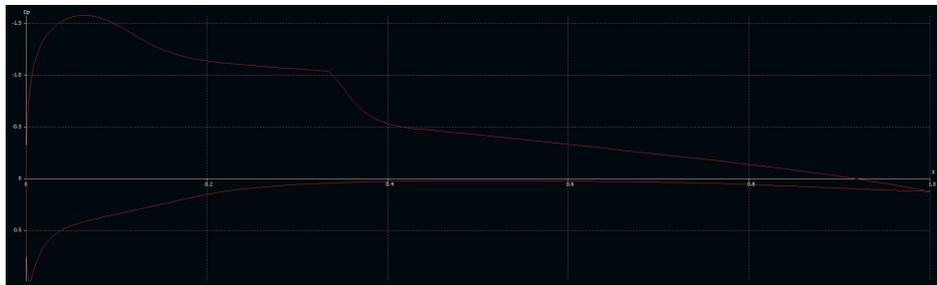


Figura 9.7: Distribución del CP del perfil real a 5°

Tras esto se calculan las polares de ambos perfiles para valores de Reynolds adecuados, en este caso se han tomado los valores:

- 120000
- 130000
- 140000
- 150000

Si se comparan el coeficiente de sustentación (figura 9.8) y la eficiencia aerodinámica (figura 9.9) se observa que la diferencia en los resultados es bastante significativa, obteniéndose mayores valores en ambos casos para el modelo obtenido por ingeniería inversa que los valores del perfil real.

Se puede concluir, por tanto, que el perfil obtenido por ingeniería inversa difiere demasiado del perfil real como para poder considerarlo válido.

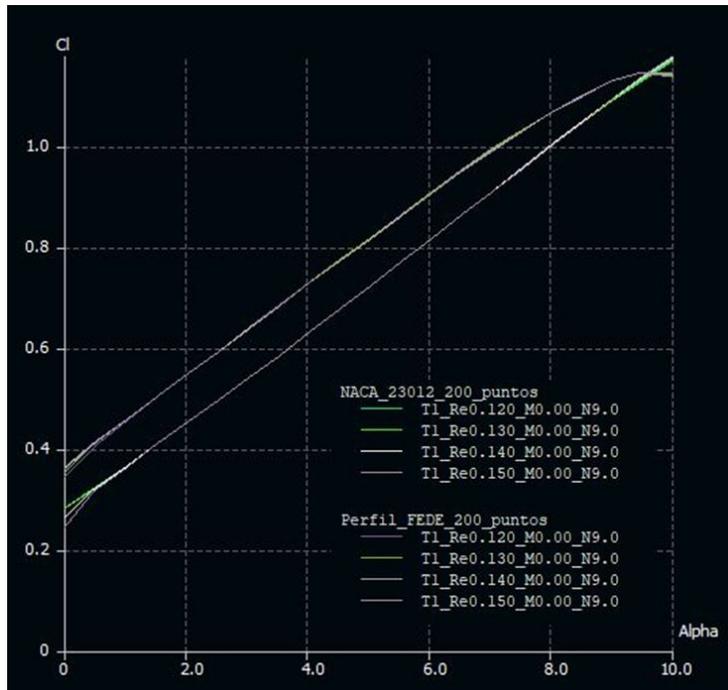


Figura 9.8: Comparación del coeficiente de sustentación

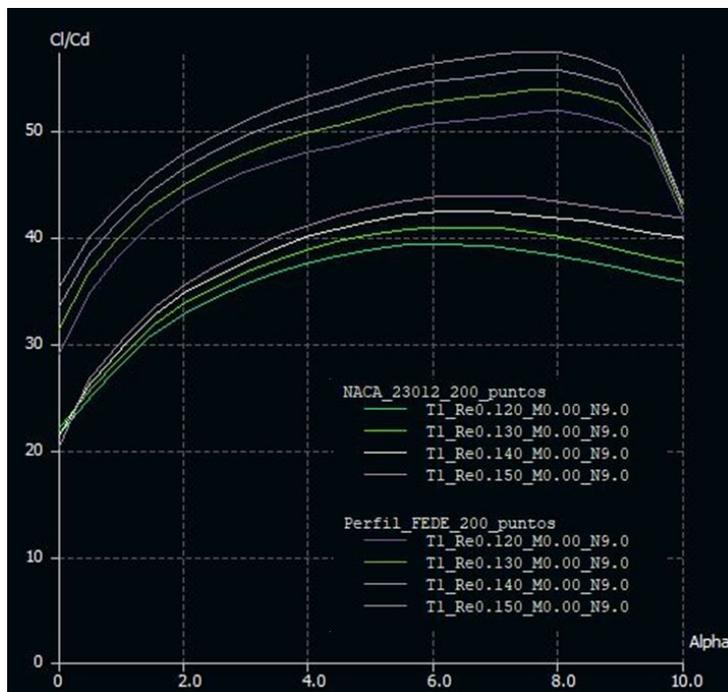


Figura 9.9: Comparación de la eficiencia aerodinámica

## 10. Conclusiones

Una vez realizado el escaneado, modelado e impresión a escala de la aeronave, y tras los análisis oportunos, se puede concluir que la precisión dimensional de la malla es elevada pero no lo suficientemente exacta en partes complicadas o pequeñas como son las palas del rotor principal o del antipar.

Se podría obtener mayor precisión aumentando el número de escaneos y colocándolos en lugares estratégicos, como podría ser debajo de las palas de la aeronave, pero esto supone también un aumento de la carga de trabajo en la etapa de posprocesado a la vez que un aumento de los recursos informáticos necesarios para ser capaz de mover con fluidez la cantidad de datos generada.

Por otro lado, aunque se aumente el número de escaneos, el error del escáner seguirá siendo demasiado elevado como para obtener resultados totalmente fiables a la hora de realizar estudios aerodinámicos precisos. Este último inconveniente deberá ser resuelto utilizando otro tipo de tecnología, como pueden ser los láser escáner basados en triangulación, cuyo error de medida es considerablemente menor a los basados en el tiempo de vuelo. Esta tecnología parece óptima para este tipo de trabajo, ya que no se precisa de un gran rango, por lo que no se ve afectado por la mayor desventaja de los escáneres basados en triangulación que es su corta distancia de medida.

En cuanto a la diferencia entre la malla y los modelos obtenidos por ingeniería inversa hay que resaltar que, obviamente, un modelo obtenido por ingeniería inversa a partir de la nube de puntos es mucho más exacto que uno obtenido a partir de la malla, o que la propia malla en sí. No obstante, el aumento en la carga de trabajo para obtener un modelo preciso de esta forma es excesivo y solo merece la pena para zonas puntuales de la aeronave como pueden ser el rotor y las palas.

En resumen, el levantamiento 3D mediante láser escáner es una herramienta con futuro en la industria aeroespacial y que permite obtener resultados bastante buenos en un tiempo relativamente corto, pero que no llega a la precisión necesaria para obtener modelos a los que realizar detallados análisis aerodinámicos, al menos en lo referente a aeronaves con superficies alares pequeñas como los helicópteros. Sin embargo, estos resultados podrían ser

mejorados e incluso conseguir una precisión más que aceptable si se dispone de mayores recursos computacionales y se utilizan otro tipo de tecnologías que parecen más adecuadas, tal y como se ha mencionado anteriormente.

# 11. Presupuesto

Para realizar una estimación del presupuesto del proyecto se ha considerado como sueldo bruto de un ingeniero aeroespacial unos 25€/hora.

En cuanto al láser escáner se ha considerado que este fue alquilado el día de la toma de medidas, lo que supone un coste de 600 €. Teniendo en cuenta que la aeronave analizada se encontraba en hangar de la universidad no se consideran gastos debidos al desplazamiento para la toma de datos.

En cuanto al coste del posprocesado se ha tomado como precio de la electricidad 0.147 €/kWh y se ha considerado del coste de las licencias de los programas que no eran de libre acceso solamente la fracción que equivale a los días que estos se usaron. La licencia de Rhinoceros 6, al no caducar, se ha considerado válida durante dos años, tomando este como el tiempo en el que el programa pasaría a estar desfasado por una nueva versión. Además, se ha considerado que el tiempo de vida útil del ordenador es de dos años.

Por último, hay que considerar el coste de impresión de los modelos, teniendo en cuenta tanto el valor de la impresora como del material y la electricidad consumida. Se ha tomado como vida útil de la impresora 3D dos años, exactamente igual que con el ordenador.

Si consideramos un beneficio del 10% con respecto al total del coste del proyecto obtendríamos, finalmente, el resultado mostrado en la tabla 11.5

Concepto	Precio	Cantidad	Coste
Ingeniero	25 €/hora	300 horas	7500€

Tabla 11.1: Coste del ingeniero

Concepto	Precio	Cantidad	Coste
Trimble TX6	600 €/día	1 día	600 €
Ordenador	1200 €/2 años	2 meses	100 €
Energía del ordenador (500 W)	0.147 €/kWh	300 horas	22.05 €
Trimble Realworks	1800 €/año	1 día	4.93 €
Leica Cyclone	1840 €/año	1 semana	35.38 €
3DReshaper	1820 €/año	1 día	4.99 €
Netfabb	302.50 €/año	1 día	0.83 €
Fusion 360	502.15 €/año	3 semanas	28.97 €
Rhinoceros 6	995 €/2 años	1 semana	9.57 €
COSTE ESCANEEO Y MODELADO			806.72 €

Tabla 11.2: Coste del escaneo y modelado

Concepto	Precio	Cantidad	Coste
Impresora 3D	999 €	1 día	1.37 €
Electricidad (250 W)	0.147 €/kWh	10h 20min	0.38 €
Material	20 €/Kg	107.50 g	2.15 €
COSTE IMPRESIÓN 3D			3.90 €

Tabla 11.3: Coste de la impresión

Concepto	Coste
Ingeniero	7500 €
Escaneo y modelado	806.72 €
Impresión 3D	4.72 €
COSTE TOTAL	8311.44 €

Tabla 11.4: Coste total

Concepto	Coste
Coste total	8311.44 €
Beneficio	831.14 €
Coste final	9142.58 €

Tabla 11.5: Presupuesto

## 12. Bibliografía

- [https://es.wikipedia.org/wiki/Escáner\\_3D](https://es.wikipedia.org/wiki/Escáner_3D)
- <https://www.elheraldo.co/mundo/el-modelo-3d-mas-exacto-de-notre-dame-espera-en-unos-discos-duros-en-eeuu-621368>
- Priego, Enrique. Topografía, instrumentación y observaciones topográficas (2015). Libro nº 296 de la Editorial Universitat Politècnica de València
- [https://es.wikipedia.org/wiki/MBB\\_Bo\\_105](https://es.wikipedia.org/wiki/MBB_Bo_105)
- <https://leica-geosystems.com/es-mx>
- TX6-TX8\_Guía de iniciación
- <https://www.prusa3d.es>
- <http://soloelectronicos.com/2017/11/10/cual-es-la-temperatura-ideal-del-extrusor-para-imprimir-en-pla-y-abs/>
- <http://www.xflr5.com/docs/Acerca%20de%20XFLR5%20%20V6.03.pdf>

# 13. Anexos

## 13.1. Datos del registro

- Cloud/Mesh 1 [01 : 02]
  - Objective Function Value: 2.95045e-05 sq m
  - Iterations: 59
  - Overlap Point Count: 597100
  - Overlap Error Statistics:
    - RMS: 0.00831446 m
    - AVG: 0.00473942 m
    - MIN: 1.10053e-07 m
    - MAX: 0.0966203 m
  - Overlap Center: (-1.411, -2.137, 1.682) m
  - Error after global registration: 4.7227e-31 sq m
  - Translation: (-4.371, -2.567, -0.005) m
  - Rotation: (0.0199, 0.0155, 0.9997):2.408 deg
  
- Cloud/Mesh 2 [02 : 03]
  - Objective Function Value: 4.26925e-05 sq m
  - Iterations: 25
  - Overlap Point Count: 511133
  - Overlap Error Statistics:
    - RMS: 0.0112282 m
    - AVG: 0.00645036 m
    - MIN: 1.37775e-07 m
    - MAX: 0.0941129 m
  - Overlap Center: (-3.089, -2.593, 2.269) m
  - Error after global registration: 1.32812e-30 sq m
  - Translation: (-7.326, -3.552, 0.005) m
  - Rotation: (0.0038, -0.0008, -1.0000):8.210 deg

- Cloud/Mesh 3 [03 : 04]
  - Objective Function Value: 6.0803e-05 sq m
  - Iterations: 37
  - Overlap Point Count: 168000
  - Overlap Error Statistics:
    - RMS: 0.0120857 m
    - AVG: 0.00727484 m
    - MIN: 1.33576e-07 m
    - MAX: 0.0971692 m
  - Overlap Center: (-4.729, -6.702, 2.303) m
  - Error after global registration: 4.73564e-30 sq m
  - Translation: (-13.013, -9.728, -0.002) m
  - Rotation: (-0.0086, 0.0008, 1.0000):4.796 deg
  
- Cloud/Mesh 4 [04 : 05]
  - Objective Function Value: 4.48981e-05 sq m
  - Iterations: 39
  - Overlap Point Count: 366600
  - Overlap Error Statistics:
    - RMS: 0.0103963 m
    - AVG: 0.00627055 m
    - MIN: 3.00856e-07 m
    - MAX: 0.0991833 m
  - Overlap Center: (4.045, -1.085, 2.618) m
  - Error after global registration: 6.08919e-30 sq m
  - Translation: (6.362, 1.356, -3.514) m
  - Rotation: (-0.0003, 0.0000, 1.0000):117.469 deg
  
- Cloud/Mesh 5 [05 : 06]
  - Objective Function Value: 5.5943e-05 sq m
  - Iterations: 19
  - Overlap Point Count: 451900
  - Overlap Error Statistics:
    - RMS: 0.0119078 m
    - AVG: 0.00687236 m
    - MIN: 3.40512e-07 m
    - MAX: 0.0954461 m

Overlap Center: (-0.484, -5.196, 4.762) m  
Error after global registration: 2.24222e-30 sq m  
Translation: (0.448, -11.023, -0.013) m  
Rotation: (0.0000, -0.0001, 1.0000):104.215 deg

■ Cloud/Mesh 6 [06 : 07]

Objective Function Value: 3.46821e-05 sq m  
Iterations: 32  
Overlap Point Count: 504333  
Overlap Error Statistics:  
- RMS: 0.0103484 m  
- AVG: 0.00591997 m  
- MIN: 5.28531e-07 m  
- MAX: 0.0899987 m  
Overlap Center: (-2.840, 1.669, 5.172) m  
Error after global registration: 2.14562e-30 sq m  
Translation: (-5.999, 2.186, 0.030) m  
Rotation: (0.0000, 0.0002, -1.0000):68.316 deg

■ Cloud/Mesh 7 [07 : 08]

Objective Function Value: 5.70197e-05 sq m  
Iterations: 6  
Overlap Point Count: 419500  
Overlap Error Statistics:  
- RMS: 0.0121901 m  
- AVG: 0.00713741 m  
- MIN: 1.4361e-06 m  
- MAX: 0.098506 m  
Overlap Center: (-3.107, -2.751, 5.351) m  
Error after global registration: 7.05805e-30 sq m  
Translation: (-6.025, -8.404, -0.004) m  
Rotation: (0.0001, 0.0001, -1.0000):58.481 deg

■ Cloud/Mesh 8 [08 : 09]

Objective Function Value: 2.0858e-05 sq m  
Iterations: 29  
Overlap Point Count: 607066  
Overlap Error Statistics:

- RMS: 0.00771625 m  
- AVG: 0.00416618 m  
- MIN: 5.70666e-07 m  
- MAX: 0.0986083 m  
Overlap Center: (-3.425, -0.533, 3.211) m  
Error after global registration: 6.14434e-30 sq m  
Translation: (-5.358, -2.781, -0.011) m  
Rotation: (0.0001, 0.0001, 1.0000):27.334 deg

■ Cloud/Mesh 9 [09 : 10]

Objective Function Value: 1.83078e-05 sq m  
Iterations: 44  
Overlap Point Count: 669133  
Overlap Error Statistics:  
- RMS: 0.00765469 m  
- AVG: 0.00426581 m  
- MIN: 3.65069e-08 m  
- MAX: 0.0934913 m  
Overlap Center: (-0.296, 2.635, 2.776) m  
Error after global registration: 5.0005e-30 sq m  
Translation: (-1.769, 5.548, -0.004) m  
Rotation: (-0.0001, 0.0003, -1.0000):-27.926 deg

■ Cloud/Mesh 10 [10 : 11]

Objective Function Value: 3.66845e-05 sq m  
Iterations: 38  
Overlap Point Count: 522700  
Overlap Error Statistics:  
- RMS: 0.00942135 m  
- AVG: 0.00555249 m  
- MIN: 3.68481e-07 m  
- MAX: 0.0944684 m  
Overlap Center: (2.113, 1.628, 4.227) m  
Error after global registration: 2.15555e-30 sq m  
Translation: (3.736, 4.920, -0.004) m  
Rotation: (0.0004, -0.0002, -1.0000):9.416 deg

■ Cloud/Mesh 11 [11 : 12]

Objective Function Value: 5.3371e-05 sq m  
Iterations: 42  
Overlap Point Count: 412633  
Overlap Error Statistics:  
- RMS: 0.0110089 m  
- AVG: 0.00644783 m  
- MIN: 8.51027e-08 m  
- MAX: 0.0950904 m  
Overlap Center: (2.407, 1.803, 4.888) m  
Error after global registration: 2.08505e-30 sq m  
Translation: (2.515, 5.534, -0.474) m  
Rotation: (-0.0002, 0.0001, -1.0000):-41.877 deg

■ Cloud/Mesh 12 [12 : 13]

Objective Function Value: 2.60392e-05 sq m  
Iterations: 20  
Overlap Point Count: 732100  
Overlap Error Statistics:  
- RMS: 0.00936835 m  
- AVG: 0.00528254 m  
- MIN: 1.23478e-07 m  
- MAX: 0.089322 m  
Overlap Center: (-0.873, -2.482, 6.822) m  
Error after global registration: 2.30506e-30 sq m  
Translation: (-2.281, 0.897, 1.027) m  
Rotation: (-0.0413, -0.0237, 0.9989):161.558 deg

■ Cloud/Mesh 13 [13 : 14]

Objective Function Value: 1.71585e-05 sq m  
Iterations: 44  
Overlap Point Count: 1339333  
Overlap Error Statistics:  
- RMS: 0.00729976 m  
- AVG: 0.00390628 m  
- MIN: 4.94516e-09 m  
- MAX: 0.0954407 m  
Overlap Center: (-1.569, 0.446, 4.263) m  
Error after global registration: 8.40545e-31 sq m  
Translation: (-2.393, -1.371, -0.055) m

Rotation: (-0.0061, -0.0145, 0.9999):-21.904 deg

- Cloud/Mesh 14 [14 : 15]
  - Objective Function Value: 3.7964e-05 sq m
  - Iterations: 36
  - Overlap Point Count: 418066
  - Overlap Error Statistics:
    - RMS: 0.00971912 m
    - AVG: 0.00584468 m
    - MIN: 3.75583e-07 m
    - MAX: 0.0923863 m
  - Overlap Center: (-2.823, -3.504, 4.090) m
  - Error after global registration: 4.25098e-30 sq m
  - Translation: (-2.929, -6.214, -1.888) m
  - Rotation: (-0.0247, -0.0411, 0.9989):176.997 deg
  
- Cloud/Mesh 15 [15 : 16]
  - Objective Function Value: 2.7963e-05 sq m
  - Iterations: 39
  - Overlap Point Count: 533200
  - Overlap Error Statistics:
    - RMS: 0.00897641 m
    - AVG: 0.00500022 m
    - MIN: 2.21122e-08 m
    - MAX: 0.0965022 m
  - Overlap Center: (2.526, 0.906, 4.859) m
  - Error after global registration: 4.92314e-30 sq m
  - Translation: (5.458, 2.324, 0.562) m
  - Rotation: (0.0000, 0.0001, -1.0000):-32.048 deg
  
- Cloud/Mesh 16 [16 : 17]
  - Objective Function Value: 1.96808e-05 sq m
  - Iterations: 46
  - Overlap Point Count: 471766
  - Overlap Error Statistics:
    - RMS: 0.00950303 m
    - AVG: 0.00444111 m
    - MIN: 2.5068e-07 m

- MAX: 0.0959114 m  
Overlap Center: (-2.310, -1.322, 0.922) m  
Error after global registration: 2.24139e-29 sq m  
Translation: (-4.381, -3.301, -1.501) m  
Rotation: (-0.0168, 0.0053, 0.9998):-119.822 deg

■ Cloud/Mesh 17 [17 : 18]

Objective Function Value: 7.57207e-06 sq m  
Iterations: 34  
Overlap Point Count: 1654300  
Overlap Error Statistics:  
- RMS: 0.00626757 m  
- AVG: 0.00280096 m  
- MIN: 9.88378e-08 m  
- MAX: 0.096287 m  
Overlap Center: (2.447, -0.931, 1.310) m  
Error after global registration: 2.75548e-30 sq m  
Translation: (4.821, -1.883, 0.149) m  
Rotation: (0.8185, -0.4549, 0.3508):1.094 deg

■ Cloud/Mesh 18 [18 : 19]

Objective Function Value: 1.26136e-05 sq m  
Iterations: 54  
Overlap Point Count: 1176633  
Overlap Error Statistics:  
- RMS: 0.00677744 m  
- AVG: 0.00332828 m  
- MIN: 7.12846e-08 m  
- MAX: 0.0895825 m  
Overlap Center: (2.886, -0.974, 3.095) m  
Error after global registration: 3.56697e-30 sq m  
Translation: (6.395, -2.550, 0.167) m  
Rotation: (-0.0191, 0.0343, 0.9992):114.845 deg

■ Cloud/Mesh 19 [19 : 20]

Objective Function Value: 1.95551e-05 sq m  
Iterations: 77  
Overlap Point Count: 1513633

Overlap Error Statistics:

- RMS: 0.00561419 m

- AVG: 0.00341078 m

- MIN: 2.33931e-08 m

- MAX: 0.0895637 m

Overlap Center: (-1.087, -0.752, 4.806) m

Error after global registration: 1.44577e-30 sq m

Translation: (-2.901, -1.966, 0.007) m

Rotation: (-0.0085, 0.0253, 0.9996):-103.962 deg

■ Cloud/Mesh 20 [20 : 21]

Objective Function Value: 1.39819e-05 sq m

Iterations: 69

Overlap Point Count: 894966

Overlap Error Statistics:

- RMS: 0.00688608 m

- AVG: 0.00345096 m

- MIN: 4.93409e-08 m

- MAX: 0.0902983 m

Overlap Center: (2.278, -1.016, 5.590) m

Error after global registration: 7.60517e-32 sq m

Translation: (4.842, -2.672, 0.073) m

Rotation: (-0.0078, 0.0058, 1.0000):120.011 deg

■ Cloud/Mesh 21 [21 : 22]

Objective Function Value: 2.13425e-05 sq m

Iterations: 34

Overlap Point Count: 1049300

Overlap Error Statistics:

- RMS: 0.00840351 m

- AVG: 0.00439193 m

- MIN: 6.17308e-08 m

- MAX: 0.0977731 m

Overlap Center: (-0.399, 1.318, 6.189) m

Error after global registration: 3.63911e-30 sq m

Translation: (1.036, 5.409, 1.423) m

Rotation: (0.0000, 0.0000, 1.0000):-43.369 deg

- Cloud/Mesh 22 [22 : 23]
  - Objective Function Value: 3.53773e-05 sq m
  - Iterations: 22
  - Overlap Point Count: 674666
  - Overlap Error Statistics:
    - RMS: 0.0103199 m
    - AVG: 0.0057453 m
    - MIN: 1.86743e-07 m
    - MAX: 0.0959099 m
  - Overlap Center: (1.371, 0.872, 3.081) m
  - Error after global registration: 4.80662e-30 sq m
  - Translation: (2.337, 2.837, -0.496) m
  - Rotation: (0.0054, -0.0025, -1.0000):0.867 deg
  
- Cloud/Mesh 23 [23 : 24]
  - Objective Function Value: 2.0237e-05 sq m
  - Iterations: 48
  - Overlap Point Count: 628533
  - Overlap Error Statistics:
    - RMS: 0.00717972 m
    - AVG: 0.00418923 m
    - MIN: 1.02203e-07 m
    - MAX: 0.0921477 m
  - Overlap Center: (-0.175, -0.824, 4.011) m
  - Error after global registration: 5.32853e-30 sq m
  - Translation: (-1.235, -0.597, 1.526) m
  - Rotation: (-0.0108, 0.0041, 0.9999):150.189 deg
  
- Cloud/Mesh 24 [24 : 25]
  - Objective Function Value: 3.29091e-05 sq m
  - Iterations: 33
  - Overlap Point Count: 608100
  - Overlap Error Statistics:
    - RMS: 0.00986622 m
    - AVG: 0.00546628 m
    - MIN: 8.12172e-09 m
    - MAX: 0.0920432 m
  - Overlap Center: (-2.116, 4.272, 3.044) m

Error after global registration: 5.05065e-30 sq m  
Translation: (-2.579, 7.215, -0.048) m  
Rotation: (-0.0112, 0.0102, 0.9999):-107.737 deg

## 13.2. Planos BO 105

