

TRABAJO FINAL DE GRADO

Ingeniería inversa: Estudio de modelización 3D con diferentes equipos de medida láser escáner para aplicaciones aeronáuticas

Grado en Ingeniería Aeroespacial

Autora: Gema Martínez Esteve

Tutor: Dr. Enrique Priego de los Santos

Valencia, julio 2020

Por lo que supone para mí la realización de este trabajo, quiero dedicarlo a mis padres, Francis y María José, a mi hermano, Quico, y a Fernando.

Agradecimientos

- A mi tutor, el Dr. Ingeniero en Geodesia y Cartografía D. Enrique Priego de los Santos, por ofrecerme la oportunidad de adentrarme en el conocimiento de la tecnología láser escáner y su aplicación al sector aeronáutico. Gracias por su constante atención, ha sido un proceso muy bonito.
- Al Departamento de Ingeniería Cartográfica, Geodesia y Fotogrametría de la Escuela Técnica Superior de Ingeniería Geodésica, Cartográfica y Topográfica, por permitirme hacer uso tanto de la instrumentación láser escáner que dispone como del laboratorio técnico de trabajo.
- Al Dr. Ingeniero en Geodesia y Cartografía D. Fernando Berenguer Sempere y al Ingeniero Técnico en Topografía D. Fernando Berenguer Cerdá, por darme la oportunidad de trabajar con la nueva tecnología láser escáner de la casa Faro.
- A la Escuela Técnica Superior de la Ingeniería del Diseño, por concederme los permisos para realizar la parte experimental de levantamientos 3D del proyecto en el Hangar Pedro Duque de la Universidad Politécnica de Valencia.
- Especiales agradecimientos a la empresa *Leica Geosystems* por proporcionarme una licencia individual de sus softwares *Leica Cyclone Basic* y *Leica Cyclone 3DR*, motivo que hizo posible que pudiera reprender este proyecto ante la pandemia mundial Covid-19.

Resumen

El presente documento recoge un estudio basado en la ingeniería inversa aplicada al sector aeronáutico. Mediante la tecnología láser escáner se realiza un levantamiento topográfico 3D de la aeronave *Dassault Mirage F1M*, fabricada a finales de 1965 para la Fuerza Aérea francesa. En concreto, se trata de un modelo situado en el laboratorio Pedro Duque de la Universidad Politécnica de Valencia.

Aplicando esta tecnología avanzada se pretende obtener un modelo CAD de la aeronave que permita justificar el auge de la aplicación del láser escáner a la ingeniería aeroespacial. En este proceso se realiza la medición tridimensional con dos equipos distintos, de forma que sea posible estudiar las diferencias obtenidas en función del equipo empleado y escoger el que alcance mayor precisión.

Palabras clave: Dassault Mirage F1M, Ingeniería inversa, levantamiento topográfico 3D, mallado 3D, análisis dimensional.

Abstract

This document contains a study based on reverse engineering applied to aeronautical engineering. By using laser scanner technology is performed a 3D topographic survey of the Dassault Mirage F1M aircraft, manufactured in 1965 for the French Air Force. Specifically, it is a model located in Pedro Duque laboratory of the Polytechnic University of Valencia.

Applying this advanced technology, the aim is to obtain a CAD model of the aircraft that justifies the rise of the application of the laser scanner to aerospace engineering. In this process, two topographic surveys are carried out with two different teams, so that it is possible to study the differences obtained depending on the equipment used and choose the one that achieves the greatest precision.

Key words: Dassault Mirage F1M, Trimble TX6, Faro Focus S 350, Reverse Engineering, 3D Topographic survey, 3D Meshing, Dimensional Analysis.

Resum

El present document recull un estudi basat en l'enginyeria inversa aplicada al sector aeronàutic. Mitjançant la tecnologia làser escàner es realitza un aixecament 3D de l'aeronau *Dassault Mirage F1M*, fabricada a finals de 1965 per a la Força Aèria francesa. En concret es tracta d'un model situat al laboratori Pedro Duque de la Universitat Politècnica de València.

Aplicant aquesta tecnologia avançada es pretén obtenir un model CAD de l'aeronau que permeta justificar l'auge de l'aplicació de la tecnologia làser escàner a l'enginyeria aeroespacial. En aquest projectes es realitzen dos aixecaments amb dos equips diferents, de manera que siga possible estudiar les diferències obtingudes en funció del dispositiu de mesura emprat i escollir el que obtinga major precisió.

Paraules clau: Dassault Mirage F1M, Trimble TX6, Faro Focus S 350, Enginyeria inversa, aixecament topogràfic 3D, mallat 3D, anàlisi dimensional.

Índice

Nomenclatura.....	17
Introducción.....	19
Capítulo 1 – Ingeniería inversa en el sector aeronáutico: la tecnología láser escáner como solución.....	21
1.1.Planteamiento inicial: la ingeniería inversa	21
1.1.1.Orígenes.....	21
1.1.2.Aplicaciones, ventajas y técnicas de la ingeniería inversa.....	22
1.2.Antecedentes: láser escáner en la aeronáutica	23
1.3.Objetivos	24
1.4.Alcance del proyecto.....	25
Capítulo 2 – Objeto de estudio: aeronave <i>Dassault Mirage F1M</i>	27
2.1.Descripción general de la aeronave	27
2.2.Especificaciones técnicas	29
Capítulo 3 – Fundamentos de la tecnología láser escáner	31
3.1.El escaneado láser.....	31
3.1.1.Escaneado estático y dinámico	32
3.2.Toma de medidas mediante luz.....	32
3.2.1.Medición basada en tiempo.....	33
3.2.1.1.Medición por tiempo de vuelo.....	33
3.2.1.1.1.Características de láseres con medición por tiempo de vuelo.....	34
3.2.1.2.Medición por diferencia de fase	34
3.2.1.2.1.Características de láseres con medición por diferencia de fase.....	36
Capítulo 4 – Instrumentación	37
4.1. Equipos láser escáner	37
4.1.1.Láser escáner Trimble TX6	37
4.1.2.Láser escáner Faro Focus S 350.....	39
4.1.3.Complementos para la medición	41
4.1.3.1. Trípodes	41
4.1.3.2. Dianas esféricas.....	41
4.2. Software	41
4.2.1.Leica Cyclone Basic	41
4.2.2.Faro Scene	42

4.2.3. Leica Cyclone 3DR.....	42
4.2.4. AutoCAD.....	42
4.2.5. Trimble RealWorks.....	43
Capítulo 5 –Medición 3D.....	45
5.1. Proceso de trabajo.....	45
5.1.1. Objetivos del levantamiento.....	46
5.1.2. Análisis del objeto.....	46
5.1.3. Instrumentación.....	47
5.2. Levantamiento 3D –equipo 1–.....	48
5.2.1. Medición 3D con Trimble TX-6.....	49
5.2.2. Registro con <i>Leica Cyclone</i>	49
5.2.3. Análisis de los resultados del registro.....	55
5.2.4. Edición con Leica Cyclone.....	57
5.3. Levantamiento 3D –equipo 2–.....	61
5.3.1. Medición 3D con Faro Focus S 350.....	61
5.3.2. Registro con Faro Scene.....	63
5.3.3. Edición con Faro Scene.....	66
Capítulo 6 – Modelización 3D.....	71
6.1. Proceso de modelización 3D.....	71
6.2. Mallado de la nube de puntos obtenida, equipo 1.....	72
6.3. Mallado de la nube de puntos obtenida, equipo 2.....	76
6.4. Análisis del mallado y extracción del modelo CAD.....	82
Capítulo 7 – Presentación de resultados, planos del modelo.....	87
7.1. Análisis de las dimensiones.....	92
Capítulo 8 – Pliego de condiciones.....	93
8.1. Objeto de estudio.....	93
8.2. Condiciones de instrumentación.....	93
8.3. Condiciones de software.....	94
Capítulo 9 – Presupuesto.....	99
8.1. Levantamiento Trimble TX6.....	99
8.2. Levantamiento Faro Focus S 350.....	100
Capítulo 10 – Conclusiones.....	102
Bibliografía.....	104
ANEXOS.....	107
Anexo 1 – Clasificación de riesgos láser. Norma UNE EN 60825-1/A2:2002.....	108
Anexo 2 – Ficha técnica completa Trimble TX6.....	109

Anexo 3 – Índices de protección en acorde a DIN EN IEC 60529/ UNE EN 60529:2018	112
Anexo 4 – Ficha técnica completa Faro Focus S 350	113
Anexo 5 – Resultados del registro, levantamiento Trimble TX6.....	117

Nomenclatura

Símbolo	Definición	Dimensiones
b	Envergadura del ala	m
L	Longitud de la aeronave	m
S	Superficie alar	m ²
h	Altura	m
c_r	Cuerda en la raíz	m
c_t	Cuerda en la punta	m
W_{TO}	Peso máximo al despegue	kg
$W_{TO-Clean}$	Peso máximo al despegue en configuración limpia	kg
W_E	Peso en vacío	kg

Introducción

El proceso de ingeniería inversa consiste en el análisis de un objeto real con el objetivo de obtener información del mismo. En la actualidad, la ingeniería y la producción industrial no pueden entenderse de forma separada a la ingeniería inversa. Si bien es un sector de la ingeniería que la ha acompañado desde sus orígenes, actualmente es imprescindible. Estos procesos permiten realizar muchas aplicaciones, como puede ser el análisis geométrico y dimensional, la obtención de modelos CAD para realizar correcciones de piezas, documentar diseños o corregir procesos incorrectos.

Los procesos de ingeniería inversa son de capital importancia en el sector aeronáutico, ya que está estrechamente ligado a la inspección constante para controles de calidad y muchas otras aplicaciones. La tecnología láser escáner, que en los últimos años ha tenido un auge importante en el mercado es una técnica de levantamiento 3D que ofrece gran cantidad de información con un alto grado de precisión y en un intervalo corto de tiempo. En la actualidad, el sector aeronáutico empieza a hacer uso de esta tecnología, que consiste en la obtención de las coordenadas de nubes de puntos que definen la geometría de cualquier objeto, independientemente del volumen del mismo. Ante esta novedosa metodología, el presente proyecto plantea un estudio sobre las aplicaciones que ofrece la tecnología láser escáner y su posterior modelización 3D en la ingeniería aeronáutica.

Como objetivo principal, se pretende verificar la aplicación de esta tecnología al sector aeroespacial y analizar la información que proporcionan diferentes equipos de medida láser escáner. Para lograr este fin se han llevado a cabo dos levantamientos topográficos 3D de la aeronave *Dassault Mirage F1M*. El primero se ha realizado con un equipo de la marca Trimble modelo TX6, y el segundo con un equipo de la marca Faro, modelo Focus S-350, líder en el mercado actual.

Para realizar el levantamiento se emplean diferentes métodos en cada caso, y una vez se obtiene la nube de puntos se procede a crear una malla para los datos obtenidos con cada uno de los equipos. Posteriormente, se ha seleccionado una de las triangulaciones para seguir el proceso y realizar su modelización 3D.

Con el modelo 3D obtenido es posible realizar mediciones lineales, superficiales y volumétricas. Estas pueden emplearse, por ejemplo, para comparar las medidas conocidas de la aeronave con las del modelo creado, es decir, realizar análisis

dimensionales. Asimismo, dado que se pueden obtener diferentes perspectivas del modelo, es posible extraer planos 2D de una forma ágil y dinámica. Este proceso posibilitará la consecución de los objetivos planteados.

De este modo, el presente documento se estructura en 9 capítulos que describen el proceso realizado. Inicialmente se plantea la cuestión de la ingeniería inversa y la aplicación de la tecnología láser escáner para definir y justificar los objetivos y el alcance concreto del trabajo. Una vez definidos, en el capítulo 2 se describe el objeto de estudio. Seguidamente, el capítulo siguiente cuenta con una explicación de los fundamentos que rigen el funcionamiento de los escáneres láser escogidos para realizar el estudio.

Ya terminado este proceso teórico, se procede a concretar las características de toda la instrumentación empleada. Así, se prosigue explicando detalladamente el proceso de levantamiento 3D con los dos equipos. En esta sección se incluye un estudio exhaustivo sobre la planificación del trabajo experimental, el trabajo de campo y su posterior procesado.

Posteriormente se genera la triangulación de la nube de puntos, y tras explicar el proceso de mallado se procede a la extracción del modelo CAD a partir de la red de triángulos que ha ofrecido mejores resultados.

Seguidamente, una vez obtenido el modelo CAD se realiza un estudio de inspección en relación a la nube de puntos y se extraen planos con las medidas conocidas de la aeronave. Posteriormente, finaliza el estudio con un breve pliego de condiciones que complementa a los planos, así como un presupuesto del proyecto

Capítulo 1 – Ingeniería inversa en el sector aeronáutico: la tecnología láser escáner como solución

En el presente capítulo se presenta el concepto de ingeniería inversa y su importancia en los procesos industriales en la actualidad. A partir del rumbo que emprende el sector aeronáutico en esta área, se explicita claramente el fin de este estudio. Se definen así los antecedentes, los objetivos del proyecto y el alcance con el que cuenta. Estos se plantean en relación con el auge de la tecnología láser escáner en los procesos de ingeniería inversa, siendo un campo de gran interés de estudio.

1.1. Planteamiento inicial: la ingeniería inversa

1.1.1. Orígenes

El ser humano, desde sus inicios, ha sentido curiosidad y necesidad por crear objetos que le permitan mejorar sus condiciones de vida a partir de los recursos naturales. La palabra ‘ingeniería’ proviene del latín, *ingenium*, término que hace referencia a la invención práctica.¹ Por tanto, la ingeniería ha sido intrínseca a él desde sus orígenes, y como se podrá ver a continuación, la ingeniería inversa es un concepto que surge de la ingeniería misma, se remite a sus mismos orígenes y en la actualidad, la ingeniería no se puede entender sin ella.

El proceso de ingeniería inversa consiste en el análisis de un objeto real con el fin de obtener información sobre el mismo, de modo que sea posible comprender las relaciones que guarda con su esencia, es decir, crear un modelo de referencia que

¹ (Ocampo, 2007, pág. 1)

permita proceder a su estudio.² Desde sus inicios, el ser humano ha tratado de reproducir herramientas, métodos de caza y mejoras en todo aquello que atañe a sus condiciones de vida: el primer primitivo ya pensaría en cómo mejorar sus armas de caza, en extraer la información de lo que ya está construido para mejorar su funcionamiento y hacerlo eficaz.

Ya en el siglo XVIII la Revolución Industrial supuso un cambio estrechamente ligado al progreso tecnológico, donde los intereses de cualquier invento no dejaban al margen los proyectos realizados por su competencia, de modo que fuese posible estudiarlos en profundidad y descubrir la eficacia de su funcionamiento.³ En este momento la ingeniería inversa empezó a revolucionar el sector ingenieril, pero fue realmente en la Segunda Guerra Mundial cuando encauzó un camino que, aún siendo duro, dejaría huella: las potencias del eje y los aliados, con cualquier captura que conseguían sobre el armamento de sus rivales, trataban de descubrir las características técnicas que lo describían con el objetivo de mejorar su estrategia de combate.⁴

Con raíces en estos contextos históricos, y con un rumbo que deja de ser violento, en la actualidad la ingeniería inversa es inherente al proceso de ingeniería general. Esta cuenta con numerosas aplicaciones en la era tecnológica, y los principales fines que persigue, según la revista SOMIM, son las que se exponen a continuación:⁵

- Análisis geométrico y dimensional.
- Análisis de manufacturas, materiales y procesos.
- Análisis de funcionalidad.

De este modo, la ingeniería inversa permite focalizar el rumbo de la tecnología hacia procesos más eficaces, ofreciendo grandes ventajas y aplicaciones como se describe en el siguiente punto.

1.1.2. Aplicaciones, ventajas y técnicas de la ingeniería inversa

Actualmente la ingeniería inversa tiene numerosas aplicaciones en la industria, y su aplicación a los procesos de producción industrial supone una oportunidad de mejora tanto en eficiencia como en desarrollo.

El sector de la ingeniería requiere técnicas que hagan factibles y eficaces tareas como el mantenimiento de maquinaria, controles de calidad, modificaciones de elementos producidos, etc. Centrando este estudio en la aplicación de la ingeniería inversa a la producción industrial, se puede considerar que las principales aplicaciones que proporciona, y que hacen que sus técnicas y procesos se sitúen en un eje principal de investigación y mejora son las siguientes:⁶

- Diseño de productos nuevos.
- Modificaciones de mejora de diseños ya existentes.

² (Hernández García, Ramos Trejo, Trujillo-Barragán, Romero, & Jiménez-Arévalo, 2017, pág. 198)

³ (Guillén, s.f.)

⁴ (Sanz Romero, 2019)

⁵ (Hernández García, Ramos Trejo, Trujillo-Barragán, Romero, & Jiménez-Arévalo, 2017, pág. 198)

⁶ (Hernández García, Ramos Trejo, Trujillo-Barragán, Romero, & Jiménez-Arévalo, 2017, pág. 198)

- Estudio y sustitución de secciones deterioradas de una pieza.
- Alineación de ensamblajes.
- Inspecciones de control.
- Documentación de diseños.

Estas aplicaciones industriales, generalmente se basan en la obtención de modelos CAD/CAM. Esto permite, como se mostrará a lo largo de este proyecto, estudiar piezas que ya no están en producción, lo que supone una gran ventaja para la industria. A esta se unen otras, algunas de las cuales se exponen a continuación:⁷

- Recuperación de información de la pieza.
- Reducir los costes de producción.
- Mejorar la calidad de los procesos.
- Detectar fallos de productos.
- Estudios para posibles mejoras de los productos.

En cuanto a las técnicas empleadas para la ingeniería inversa, cabe decir que son múltiples. Gracias a la variedad de herramientas disponible en la actualidad, este proceso se puede llevar a cabo por técnicas básicas como la medición manual directa⁸ –con galgas y calibradores para estudios de geometría, por ejemplo–.⁹ Sin embargo, existen técnicas avanzadas que recaban gran interés en el sector industrial, como el láser de última generación y los sistemas digitales de escaneo mediante luz. Este estudio se centrará en la tecnología láser escáner 3D, que como se verá más adelante, proporciona grandes avances en el sector aeronáutico.

1.2. Antecedentes: láser escáner en la aeronáutica

La ingeniería inversa tiene un papel de capital importancia en el sector aeronáutico, ya que requiere inspecciones frecuentes de control dimensional con el fin de realizar controles de calidad y garantía precisos.¹⁰ A día de hoy, los controles geométricos se realizan en muchas ocasiones mediante estaciones totales y en algunos casos, con equipos monitorizados. El objetivo es obtener coordenadas tridimensionales de todos los puntos que se miden. Es cierto que esta instrumentación ofrece precisión, pero la tecnología láser escáner proporciona una definición geométrica que aporta mucha información en un intervalo de tiempo menor, motivo por el que ha sido muy bien recibida en el sector aeroespacial, que requiere de alta precisión.¹¹ Son muchos los estudios y proyectos que se han realizado con esta técnica avanzada.

A continuación, se exponen algunos de ellos, que dejando clara la implantación de esta tecnología en la aeronáutica, impulsan a la realización de este proyecto.

⁷ (Hernández García, Ramos Trejo, Trujillo-Barragán, Romero, & Jiménez-Arévalo, 2017, pág. 198)

⁸ (Kuzu, 2017)

⁹ (Botero, 2011)

¹⁰ (Priego de los Santos, De las Heras Bellido, & Viudes Martínez, Control dimensional y levantamiento topográfico tridimensional de estructuras navales y aeronáuticas con sistemas láser escáner 3D, 2012, pág. 1)

¹¹ (Priego de los Santos, De las Heras Bellido, & Viudes Martínez, Control dimensional y levantamiento topográfico tridimensional de estructuras navales y aeronáuticas con sistemas láser escáner 3D, 2012, pág. 1)

La revista SOMIM, expone un estudio en el que se ha determinado un material compuesto termoplástico con alto contenido de fibras para la fabricación de hélices. En este se presenta un análisis de los esfuerzos de *Von-Misses* a partir del modelado 3D con láser escáner, además de ensayos de temperaturas.¹²

La universidad australiana RMIT, realiza un estudio a partir de esta tecnología para analizar la derivación de parámetros dinámicos en aeronaves de seis grados de libertad.¹³

La empresa *Laserscan* trabaja en control de calidad óptica en la fundición de precisión para la dimensión de ruedas de turbina.¹⁴ La empresa FARO, que es una de las más destacadas en láser escáner en la actualidad, ofrece equipos altamente preparados para la precisión requerida en la industria aeronáutica. De hecho, Airbus, en los últimos años ha empezado a emplear equipos de medida láser en el proceso de montaje de la sección principal del fuselaje de sus modelos A380 y A350. Estos láseres han sido diseñados por la casa FARO explícitamente para la aeronáutica.¹⁵

Así pues, es evidente que la aplicación de la tecnología láser escáner 3D en la aeronáutica está siendo de gran interés, ya que son muchos los proyectos en los que se está empleando por los motivos de fiabilidad y rapidez expuestos antes. Estos breves, pero importantes estudios, dejan claro que es una herramienta importante, motivo que impulsa a la realización de este proyecto, cuyo objetivo versa sobre esta tecnología, como se podrá ver en el siguiente punto.

1.3. Objetivos

Una vez se ha dejado constancia de la importancia de la ingeniería inversa en el sector industrial aeronáutico y la introducción de la tecnología láser escáner en este, por ser una técnica avanzada, se procede a definir los objetivos que persigue el presente proyecto, cuyo fundamento y justificación recae sobre el tema presentado. El proyecto cuenta con un objetivo general y otros específicos, que se exponen a continuación.

Objetivo general:

- Justificar la aplicación de la tecnología láser escáner a la ingeniería aeroespacial y analizar la efectividad que proporcionan diferentes equipos de medida.

Objetivos específicos:

- Obtener un levantamiento 3D de la aeronave *Dassault Mirage F1M* con un equipo láser escáner de la marca Trimble, modelo TX6.
- Obtener un levantamiento 3D de la aeronave *Dassault Mirage F1M* con un equipo láser escáner de la marca Faro, modelo Focus S 350.

¹² (Hernández García, Ramos Trejo, Trujillo-Barragán, Romero, & Jiménez-Arévalo, 2017)

¹³ (Martin Burston, 2014)

¹⁴ (Laserscan, s.f.)

¹⁵ (Mena, s.f.)

- Realizar el proceso de triangulación de las nubes de puntos o mallado de ambos levantamientos topográficos.
- Obtener un modelo CAD tridimensional de la malla que ofrezca mejor resultado.
- Realizar un análisis de dimensiones del modelo 3D CAD y compararlas con las principales de la aeronave real.

1.4. Alcance del proyecto

Ante las numerosas aplicaciones que presenta la ingeniería inversa, y la gran cantidad de información que se puede obtener con la tecnología láser escáner, en relación con los objetivos expuestos, se expone en este punto el alcance de este estudio.

De las líneas principales expuestas que sigue la ingeniería inversa, este proyecto se centra en la realización de un análisis de dimensiones de la aeronave *Dassault Mirage F1M*, extrayendo planos 2D sobre los resultados obtenidos en este proceso. Se trata de realizar un modelo que, aunque podría tener muchos fines, se centra en este. Se realizará un estudio exhaustivo del proceso de levantamiento con los dos equipos láser escáner, atendiendo a las condiciones de medición y a las características técnicas de cada uno de los dispositivos. Por tanto, se presta especial atención en la obtención de la nube de puntos, realizando un análisis comparativo que permita extraer conclusiones sobre la eficiencia y eficacia de los equipos escogidos Trimble TX6 y Faro Focus S-350, y de diferentes formas de realizar registros de nubes de puntos.

Capítulo 2 – Objeto de estudio: aeronave *Dassault Mirage F1M*

En este capítulo se describe el objeto de estudio del proyecto: la aeronave de combate Dassault Mirage F1M. Se realiza una descripción general del avión y se presentan sus especificaciones técnicas.

2.1. Descripción general de la aeronave

La aeronave *Dassault Mirage F1* es un monoplaza de combate que fue fabricado a finales de 1965 por la compañía *Dassault Aviation*. Fue diseñada inicialmente para la Fuerza Aérea francesa, como aeronave que sustituyera los antiguos *Mirage III*, que tenía configuración de ala delta. Este nuevo caza tendría que mejorar en la capacidad de aterrizaje a velocidades más bajas en comparación con sus predecesores.¹⁶ La construcción de este prototipo se basaba en el diseño del proyecto F2 –que fue cancelado–. El F1, sería un interceptor ligero, monomotor y monoplaza.¹⁷ Fue considerada una aeronave muy avanzada en la época.

Este diseño tenía como objetivo alcanzar mayor radio de misión y autonomía y conseguir el aterrizaje en pistas más cortas, de forma que pudiera librarse de las pistas grandes, fáciles de detectar y expuestas.¹⁸

Se trata de un caza que puede volar hasta Mach 2 y aterrizar cerca de los 125 nudos. Está equipado con un motor a reacción Snecma Atar 9 K 31. El primer vuelo se realizó el 23 de diciembre de 1966 en Melun-Villaroche, en manos del piloto René Bigand. Fue en su cuarto vuelo, el 7 de enero de 1967, cuando alcanzó Mach 2. En este, el prototipo sufrió un accidente, pero a pesar de ello, el ejército francés tenía claro que esta aeronave superaba su modelo *Mirage III*. De este modo, se realizaron

¹⁶ (Dassault, s.f.)

¹⁷ (EcuRed, 2019)

¹⁸ (Dassault, s.f.)

pruebas y modificaciones, terminando los procesos de producción con éxito el 17 de junio de 1970.¹⁹

Finalmente, fue entregado a la Fuerza Aérea el 14 de marzo de 1974. Este modelo fue diseñado en diferentes versiones. En primer lugar, el *Mirage F1 C*, fue la versión para la defensa aérea, cubriendo necesidades de clima y baja altitud. El *Mirage F1 A*, fue una versión basada en la anterior que contó con una simplificación del equipo electrónico y la posibilidad de añadir combustible adicional. Por otra parte, el modelo F1 B, era similar al F1 C en versión de dos asientos para el entrenamiento de pilotos. Posteriormente, el F1 R fue una versión optimizada para misiones de reconocimiento diurnas y nocturnas.²⁰ Finalmente, el F1M, fue la versión más modernizada, contando con un radar nuevo IVMR –con grupo de mapeo adicional y rango aire-tierra–, plataforma inercial renovada, sistema de navegación nuevo y sistema de asientos eyectables.²¹

Esta aeronave se adquirió en el Ejército del Aire español en 1975, fue encargada por nuestro ejército tres años antes debido a las tensiones crecientes con Marruecos. España llegó a disponer de noventa y una aeronaves *Mirage F1M*, que fueron operativas durante treinta y ocho años en las Alas 11, 14 y 46.²²

En concreto, el modelo de estudio es el *Dassault Mirage F1M* disponible en el Hangar Pedro Duque de la Universidad Politécnica de Valencia. Esta aeronave, después de veintidós años de servicio en el Ejército del Aire de España, fue ofrecida a la universidad para contribuir a la formación educativa de los ingenieros aeronáuticos. Se recibió en la UPV en el año 2002, tras darse de baja en el ejército. En el hangar se dispone de la estructura de la aeronave, que se encuentra desprovista de motor y armamento.²³ En la figura 2.1.1. se ilustra su estado actual.



Figura 1.–Aeronave F1M Mirage – Laboratorio Pedro Duque, UPV.

La aeronave de estudio tiene las compuertas abiertas, el tren de aterrizaje y la cúpula desplegados. Se ha decidido considerar como objeto de estudio únicamente el fuselaje y el ala de la aeronave, es decir, sin cúpula, compuertas ni tren de aterrizaje. El modelo por crear incluirá los aspectos mencionados.

¹⁹ (Dassault, s.f.)

²⁰ (Dassault, s.f.)

²¹ (Air Force, 1988)

²² (López, 2019)

²³ (Vergara, 2012)

Esta aeronave puede contar con diferente armamento: cañones, bombas, misiles y cohetes. A continuación, se mencionan los modelos:²⁴

Bombas

2 x SAMP 25	2 x Matra Durandal
2 x Belouga	2 x Matra ARMAT
2 x BAP	

Misiles

2x Vympel R-73	2 x AIM-9 Sidewinder
2x R.550 Magic	2 x Matra Super 530
2x RAFAEL Derby	1 x AM.39 Exocet
1 x AS-30	2 x Kh-29

Cohetes SNEB

Cañones 2 x DEFA 553

Este armamento no se integra en la aeronave completo, sino que se escoge lo necesario en función de la misión programada.

2.2. Especificaciones técnicas

En este punto se procede a exponer las especificaciones técnicas de la aeronave de estudio *Dassault Mirage F1M*. Se expondrán los siguientes datos: las dimensiones, pesos, velocidades, alcance, techo de vuelo y armamento.

Dimensiones principales y superficie alar

b (m)	8,4
L (m)	15,2
h (m)	4,5
S (m ²)	25,0

Tabla 1.– Dimensiones y superficie alar de la aeronave Mirage F1M.²⁵

Pesos principales de la aeronave

W_{TO} (kg)	14.900
$W_{TO-CLEAN}$ (kg)	10.900
W_E (kg)	7.600

Tabla 2.– Desglose de pesos de la aeronave Mirage F1M.²⁶

Velocidad, alcance y techo de vuelo

Techo de servicio (m)	20.000
Mach máximo (-)	2,2
Velocidad de crucero (m/s)	243,84

Tabla 3.– Velocidad, alcance y techo de vuelo de la aeronave Mirage F1M.²⁷

²⁴ (AvionesdeCombate, s.f.)

²⁵ (Francillon, 1986)

²⁶ (Francillon, 1986)

²⁷ (Francillon, 1986)

Capítulo 3 – Fundamentos de la tecnología láser escáner

Este capítulo explica los fundamentos de la tecnología láser escáner. Tras una introducción, se presentan los principios que la gobiernan, los posibles tipos de escaneado láser y los fundamentos de las mediciones mediante luz. Seguidamente, se detallan con exhaustividad los principios de medición en los que están basados los escáneres láser empleados en el proyecto: la medición por tiempo de vuelo y la medición por tiempo de fase.

3.1. El escaneado láser

La tecnología láser escáner terrestre tiene como objeto la extracción de información tridimensional de elementos físicos. Tal y como se ha mencionado en el capítulo 1, es una técnica para la captura masiva de datos. Los equipos láser escáner capturan puntos en el espacio tridimensional generando modelos que hacen eficientes las reconstrucciones digitales, la extracción de planos, secciones 2D, cálculos de superficies, etc. Es por este motivo que esta técnica está destinada a muchas aplicaciones en la actualidad, como puede ser la reconstrucción de accidentes, la inspección de daños materiales o la protección de patrimonios culturales, entre otros.²⁸ Tal y como se ha explicitado en el primer capítulo, por los fines que consigue, es una herramienta de gran interés en la ingeniería inversa aeronáutica.

Los sistemas láser escáner consiguen modelos tridimensionales de puntos mediante barridos de superficies con haces de luz láser. Como resultado de las mediciones de estos barridos, se obtienen coordenadas tridimensionales (x, y, z) de nubes de puntos muy densas que pueden estar formadas de miles o millones de puntos.²⁹

²⁸ (Romero Guerrero & Cuellar Vázquez, 2013)

²⁹ (Priego de los Santos, Topografía, instrumentación y observaciones topográficas, 2015)

Para realizar un escaneo, el equipo se estaciona y realiza barridos de puntos de la superficie que capta dentro de su campo de visualización. El registro de diferentes escaneos proporciona una nube de puntos ajustada con detalle y precisión al objeto tridimensional escaneado. La visualización puede llegar a ofrecer resultados muy realistas con la incorporación de una cámara fotográfica de alta resolución al equipo láser escáner. Si está integrada, se establecen relaciones entre los puntos medidos y el color de píxel de la fotografía tomada como referencia. Si no está integrada, también puede procesarse una vez obtenida la nube de puntos con software.³⁰

3.1.1. Escaneado estático y dinámico

El proceso de escaneado puede ser tanto estático como dinámico. Se considera estático si el escáner se sitúa en posiciones fijas durante las mediciones, y dinámico si es móvil en la toma de datos. En el caso del escaneado dinámico está montado en alguna plataforma móvil.

El escaneado estático ofrece alta precisión y alta densidad de puntos –si así se configura–, el dinámico supone costes más altos debido a que requiere sistemas de posicionamiento como GPS, es menos común y se usa en aplicaciones como puede ser la toma de datos desde vehículos aéreos no tripulados.

Puesto que en este estudio se pretende realizar un análisis dimensional de la aeronave *Dassault Mirage F1M*, se empleará el método de escaneado estático.

3.2. Toma de medidas mediante luz

El láser es un instrumento que genera ondas de luz empleando la banda del espectro electromagnético denominada láser. Los láseres comunes emiten luz en un haz estrecho de longitud de onda bien definida. Las técnicas de medición que hacen uso luz se clasifican en activas y pasivas, que es lo primero que se va a tratar.³¹

En primer lugar, las pasivas no emiten radiación, sino que detectan radiación en el ambiente. Gran parte de los láseres que se clasifican en esta sección detectan luz visible o, por ejemplo, infrarrojo. Estos métodos son económicos, pero tienen limitaciones, ya que requieren un mínimo de cámara digital. La precisión que ofrece esta técnica recae sobre la resolución de la imagen y la densidad de elementos identificables.³²

Por otra parte, las activas son aquellas que emiten radiación y detectan su reflexión para examinar un objeto. Los requerimientos de estas técnicas son mayores, ya que se necesita un transmisor láser y un receptor. Este aumento de complejidad produce un aumento del coste frente a las pasivas, pero ofrece una serie de ventajas interesantes: no requieren de luz ambiental, capturan mucha información en la medición de forma automática y sin depender de parámetros externos, se pueden emplear para el escaneado de cualquier superficie y procesan la obtención de información en un intervalo de tiempo corto.³³

³⁰ (Priego de los Santos, Topografía, instrumentación y observaciones topográficas, 2015)

³¹ (García, y otros, 2008, pág. 19)

³² (García, y otros, 2008, pág. 19)

³³ (García, y otros, 2008, pág. 20)

Las técnicas de medición de láser escáner que se han empleado en este estudio son activas. Dentro de estas se distinguen las medidas por triangulación y las basadas en tiempo. En este caso, los instrumentos empleados corresponden a las técnicas activas de medición basadas en tiempo, por lo que el siguiente apartado detallará los fundamentos concretos de estas dos categorías.

Cabe mencionar que, aunque las técnicas activas generan radiación por sí mismas y no requieren de luz ambiental, las mediciones pueden verse afectadas por causas externas. De este modo, como se verá más adelante, en el proceso de medición es fundamental hacer una correcta distribución de los escaneos que permita la obtención de medidas que no estén afectadas en grado considerable o nocivo por causas de reflectividad.

3.2.1. Medición basada en tiempo

En este punto se van a explicar los fundamentos de la medición basada en tiempo, que corresponde al tipo de medición de los escáneres láser escogidos para este estudio. Este tipo de mediciones se llevan a cabo mediante equipos activos que toman los datos midiendo el intervalo de tiempo que se da entre dos sucesos.³⁴ En primer lugar, se presentará la medición por tiempo de vuelo o pulsos, que es la metodología que usa el primer equipo Trimble TX6, el primer láser escáner escogido. Por otra parte, se encuentra la medición por diferencia de pase, utilizada por el segundo equipo Faro Focus, el segundo láser escáner con el que se ha trabajado.

3.2.1.1. Medición por tiempo de vuelo

Las ondas de luz se propagan con velocidad finita y constante por un medio. El principio fundamental de este tipo de medición es la velocidad de la luz a potencia constante.³⁵ Si se mide el retardo con el que la luz viaja de un equipo a un objeto reflectante y vuelve al equipo, la distancia existente se puede calcular con la ecuación (1). Esto significa que, cuando el dispositivo emite un haz de luz láser, se mide el tiempo que tarda en regresar. Los instrumentos son capaces de detectar la luz de ese retorno.

$$D = \frac{1}{2} \cdot ct \quad (1)$$

Donde, en la ecuación (1):

- D : distancia entre el dispositivo y el objeto a escanear.
- c : velocidad de la luz en el aire, valor: $c=3,108 \text{ km/s}$.
- t : tiempo de ida y vuelta.

La velocidad de la luz en el aire se obtiene aplicando un factor de corrección igual al índice de refracción a la velocidad de propagación de la luz en el vacío, que tiene un valor de 299,458 km/s.³⁶ Estos escáneres son capaces, por tanto, de medir intervalos muy de tiempo muy pequeños con alta precisión. En la figura 2 se muestra un esquema del proceso descrito.

³⁴ (García, y otros, 2008, pág. 20)

³⁵ (García, y otros, 2008, pág. 24)

³⁶ (Romero Guerrero & Cuellar Vázquez, 2013, pág. 4)

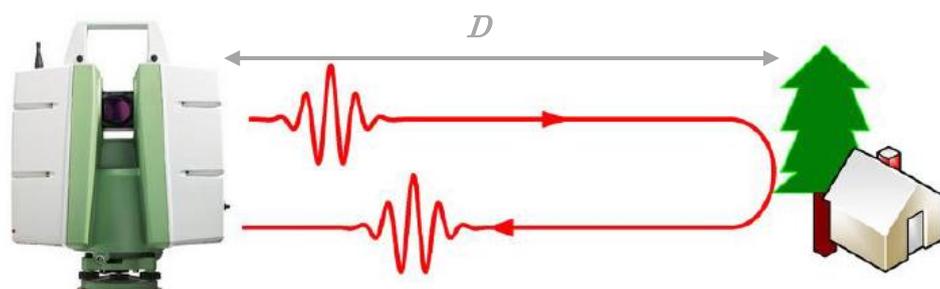


Figura 2.– Esquema básico de funcionamiento láser escáner por tiempo de vuelo.³⁷

Para poder obtener las medidas de muchos puntos, los equipos cuentan con un sistema de espejos rotatorios que van estableciendo direcciones de la trayectoria en los planos vertical y horizontal, dentro del campo de visión que disponen.³⁸ Es importante remarcar que, para que se den medidas correctas, es necesario que el tiempo medido en la ecuación (1) sea mayor a la amplitud del pulso.³⁹

Finalmente, cabe decir que, para poder realizar este procedimiento de medida, los equipos cuentan con un emisor de pulsos y un conversor digital que obtiene la medición la distancia a partir de la medida del tiempo en picosegundos.⁴⁰

3.2.1.1.1. Características de láseres con medición por tiempo de vuelo

Este tipo de láser trabaja con frecuencias comprendidas entre 2 y 100 MHz. La velocidad de escaneo es moderada, puede llegar a los 128Khz, que consigue escanear 128.000 puntos por segundo. La precisión del equipo se comprende entre los 4 mm y los 3 cm. Son equipos que interesan, principalmente, por su rango de medida elevado, que puede llegar a la toma de datos de hasta 2 km de distancia.⁴¹

3.2.1.1.2. Medición por diferencia de fase

La metodología de medición por diferencia de fase se basa en la modulación de la potencia del haz láser. El equipo emite una onda portadora que es reflejada cuando llega al objeto, calcula la diferencia de fase existente y a partir de esta, se obtiene la distancia entre equipo y objeto a escanear. Es decir, el haz de luz emitido se modula en amplitud y se envía a la superficie de escaneo. La reflexión dispersa del haz se captura, y el circuito mide la diferencia de fase existente entre la onda enviada y la recibida, $\Delta\Phi$. A partir de esta se obtiene el retardo y después la distancia. A continuación, se explicará el desarrollo matemático de ecuaciones que gobiernan este proceso.⁴² En la siguiente figura se expone un esquema de este proceso.

³⁷ Imagen base extraída de (Romero Guerrero & Cuellar Vázquez, 2013, pág. 4)

³⁸ (Castella, 2018)

³⁹ (García, y otros, 2008, pág. 26)

⁴⁰ (Priego de los Santos, Topografía, instrumentación y observaciones topográficas, 2015)

⁴¹ (Priego de los Santos, Topografía, instrumentación y observaciones topográficas, 2015)

⁴² (García, y otros, 2008, pág. 27)

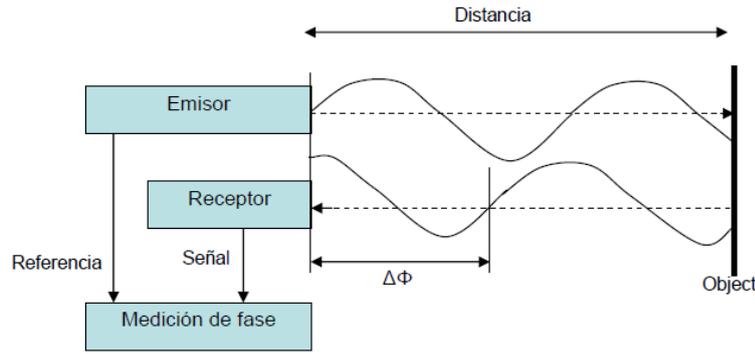


Figura 3.—Esquema básico de funcionamiento láser escáner por diferencia de fase.⁴³

Los escáneres basados en este principio, que emplean una señal sinusoidal modulada, hallan la diferencia de fase, pero también el desplazamiento y la amplitud de la señal. A continuación, se expone este procedimiento de cálculo, según explican los autores de *Teoría y práctica del Escaneado Láser Terrestre*⁴⁴. La demodulación de la luz reflejada se lleva a cabo a partir de la medición de cuatro puntos que se disparan a la onda emitida. En primer lugar, el desplazamiento B se obtiene a partir de los cuatro puntos, según la ecuación (2).

$$B = \frac{c(\tau_0) + c(\tau_1) + c(\tau_2) + c(\tau_3)}{4} \quad (2)$$

Donde, en la ecuación (2):

- B : desplazamiento.
- $c(\tau_n)$: punto n medido.

Por otra parte, la amplitud, también a partir de los cuatro puntos medidos, se obtiene según la ecuación (3).

$$A = \frac{\sqrt{(c(\tau_0) - c(\tau_2))^2 + (c(\tau_1) - c(\tau_3))^2}}{2} \quad (3)$$

Donde:

- A : amplitud.

La diferencia de fase que calcula el equipo se basa también en los cuatro puntos medidos, a partir de la ecuación (4).

$$\Delta\Phi = \arctan\left(\frac{c(\tau_0) - c(\tau_2)}{c(\tau_1) - c(\tau_3)}\right) \quad (4)$$

Donde:

- $\Delta\Phi$: diferencia de fase.

⁴³ (García, y otros, 2008, pág. 27)

⁴⁴ (García, y otros, 2008)

Para poder calcular la distancia entre el equipo y el punto medido, la diferencia de fase se puede relacionar con el tiempo con el retardo asociado al medido en los equipos basados en pulsos –véase ecuación (1)–. En primer lugar, se presenta la ecuación (5):

$$t = \frac{\Delta\Phi}{2\pi \cdot f_m} \quad (5)$$

Donde:

- f_m : frecuencia modulada.
- t : retardo.

Finalmente, si se sustituye la ecuación (4), que define el retardo, en la ecuación (1) del apartado anterior, que define la distancia, se obtiene como resultado la ecuación que calcula la distancia D en función de la diferencia de fase y la frecuencia modulada para este tipo de equipos, tal y como se ilustra en la ecuación (6):

$$D = \frac{1}{2} \cdot ct = \frac{1}{4} \cdot \frac{c \cdot \Delta\Phi}{\pi \cdot f_m} \quad (6)$$

Donde todos los parámetros son conocidos.

3.2.1.2.1. Características de láseres con medición por diferencia de fase

En primer lugar, cabe decir que la precisión del láser escáner con medición por diferencia de fase depende y se ve limitada por diferentes factores:⁴⁵

- La frecuencia de la señal o modulación.
- La precisión en el ciclo de medida de cada fase –esta depende a su vez de parámetros como la fuerza de la señal o el ruido–.
- La estabilidad del oscilador de modulación.
- Las variaciones del índice de refracción del aire.
- Las turbulencias en el aire.

Estos equipos trabajan a frecuencias muy elevadas, y permiten un escaneo de velocidad mucho más alta a los descritos anteriormente –tiempo de vuelo–. Pueden llegar a ser capaces de captar 1.200.000 puntos por segundo. Sin embargo, están limitados a distancias de medición más bajas.⁴⁶

En definitiva, las características de los escáneres láser disponibles en el mercado hacen que disten unos de otros en función de diferentes parámetros: la velocidad del barrido de puntos, la densidad de puntos proporcionados en el escaneo, la precisión de la medición y el alcance. Además, en función de las necesidades de escaneo, se puede tener en cuenta para escoger un equipo que algunos de estos llevan cámara integrada y proporcionan la integración de imágenes de la zona de captura de datos, tal y como se ha mencionado anteriormente.⁴⁷

⁴⁵ (García, y otros, 2008, pág. 28)

⁴⁶ (Priego de los Santos, Topografía, instrumentación y observaciones topográficas, 2015)

⁴⁷ (Priego de los Santos, Topografía, instrumentación y observaciones topográficas, 2015, pág. 1)

Capítulo 4 – Instrumentación

En este capítulo, una vez explicitado el fundamento de la tecnología láser escáner, se procede a la exposición de toda la instrumentación empleada en el proyecto. Se detalla la información necesaria para el estudio de los equipos láser escáner empleados para la medición y de los softwares destinados al procesamiento de datos.

4.1. Equipos láser escáner

4.1.1. Láser escáner Trimble TX6⁴⁸

El primer equipo empleado para el estudio es un láser escáner con medida basada en tiempo de vuelo de la casa Trimble. El modelo es el Trimble TX6.

Este dispositivo es una solución que ofrece tanto alcance óptimo para rango medio como velocidad de escaneado y precisión, lo que lo hace un equipo destacable entre los basados en tiempo de vuelo. Como se ha comentado, los escáneres basados en tiempo de vuelo interesan por capacidad de alcance, pero alcanzan velocidades más bajas. Este equipo combina ambas dentro de su rango de posibilidades, sin comprometer ninguno de estos tres parámetros al aumentar alguno de ellos, está diseñado para rango medio. En la figura 4 se presenta una imagen del instrumento.

⁴⁸ Si no se indica lo contrario, la información de este punto corresponde a (Trimble, 2016)



Figura 4.– Láser escáner Trimble TX6.

Certificado de seguridad y protección

Este escáner posee la certificación de clase 1 según el estándar europeo IEC 60825-1 –UNE EN 60825-1/A2:2002–, que informa sobre las clases y las precauciones a tener en cuenta en la tecnología láser escáner. Esta clase indica que el equipo es seguro en condiciones de uso previsibles, pudiendo hacer uso de instrumentos ópticos en la visión intrahaz. Esto significa que, a diferencia de la clase 2M, por ejemplo, que es peligrosa si el usuario emplea lentes con el haz, no es necesario tener en cuenta este parámetro entre otros.⁴⁹ En el anexo 1 se presentan las clases establecidas según el Ministerio de Trabajo y Asuntos Sociales de España⁵⁰, donde se puede consultar, si se desea, todas las diferencias que presenta esta clase de seguridad frente a otras.

Además, cuenta con un grado de protección IP54 en acorde a la norma IEC 60529 –UNE EN 60529:2018–. Esta norma hace relación a la protección de personas, de materiales y equipos. Las letras IP son constantes, el primer índice ‘5’ indica el grado de protección frente a la introducción de cuerpos sólidos. El valor en cuestión indica un grado de protección contra el contacto entre piezas móviles interiores y el ingreso de polvo, es decir, el polvo no puede penetrar en el equipo en cantidades que alteren su correcto funcionamiento. Por otra parte, el segundo índice ‘4’ indica el grado de protección frente al agua. Este valor significa que las salpicaduras de agua desde cualquier dirección no afectan al interior del equipo. En el anexo 3 se presenta la tabla de índices definida.⁵¹

A continuación, se van a exponer las especificaciones técnicas más relevantes del equipo. En el anexo 2 se presentan todos los datos de la ficha técnica.

⁴⁹ (García, y otros, 2008, pág. 18)

⁵⁰ (Diego Segura & Rupérez Calvo, pág. 2)

⁵¹ (HellermannTyton)

Velocidad de escaneado máxima (pts/s)	500.000
Alcance máximo (m)	80, posibilidad de ampliación a 120
Alcance mínimo (m)	0,6
Campo de visión (°)	360 (horz.) x 317 (vert)
Cámara íntegra	Sí – HDR
Dimensiones (mm)	335x386
Rango de temperaturas de funcionamiento (°C)	[-0,40]
Condiciones de luminosidad	Sin limitaciones

Tabla 4.– Especificaciones técnicas relevantes Trimble TX6.

Para los parámetros de escaneo, Trimble TX6 dispone de cuatro niveles predefinidos, estos se ilustran en la tabla 5.

Parámetros de escaneo	Vista preliminar	Nivel 1	Nivel 2	Nivel 3
Alcance máximo (m)	80/120	80/120	80/120	80/120
Duración de escaneo (min)	02:00	03:00	05:00	19:00
Número de puntos (Mpts)	8,7	34	138	555

Tabla 5.– Parámetros principales de escaneo Trimble TX6.

Tal y como se podrá ver en la fase de levantamiento, la configuración empleada fue Nivel 1.

Además, este equipo permite el escaneo para visualizar en color la nube de puntos. Los tiempos se modifican según la tabla 6.

Niveles	Duración de escaneo (min)		
	Sin color	Color estándar	Color HDR
Vista preliminar	02:00	03:00	04:00
Nivel 1	03:00	04:00	05:00
Nivel 2	05:00	06:00	07:00
Nivel 3	19:00	20:00	21:00

Tabla 6.– Duración de escaneo según la configuración de color.⁵²

Cada equipo láser escáner dispone de un software asociado de la misma casa, pero los datos se pueden procesar también en otros. En este caso, Trimble TX6 se podría procesar con los softwares *Trimble RealWorks* y *Trimble Scan Explorer*.

4.1.2. Láser escáner Faro Focus S 350.⁵³

El segundo equipo utilizado ha sido el láser escáner Faro Focus S 350, que pertenece a la serie de equipos más reciente lanzada al mercado por la casa FARO: la serie Focus S. Estos escáneres láser son pioneros en la combinación de ligereza, procesos intuitivos y compromiso entre velocidad y alcance. Se trata de escáneres láser líderes en la industria actual.

El modelo Focus S 350 dispone de funciones innovadoras que permiten, junto a su software asociado Faro Scene 7.0, realizar mediciones rápidas pudiendo obtener la nube de puntos *in situ* en un intervalo de tiempo corto. Esta es una ventaja fundamental, ya que se puede comprobar el resultado del levantamiento de forma rápida y eficaz.

⁵² (Jackson & Lepere, pág. 2)

⁵³ Si no se indica lo contrario, la información de este punto se ha extraído de (FARO, Hoja de especificaciones técnicas para las series Focus M y S, 2020)

Se trata de un equipo cuyo principio de medición está basado en la diferencia de fase. Tal y como se ha mencionado en el capítulo 3, estos equipos suelen alcanzar velocidades de escaneo superiores, pero disminuye su alcance. Faro Focus S es una serie muy optimizada, y su liderazgo en el mercado es producto de un compromiso alto con velocidad, calidad y alcance al mismo tiempo, tanto en espacios abiertos como cerrados y entornos complejos. En la figura 5 se presenta una imagen del equipo.



Figura 5.– Láser escáner Faro Focus S 350.

En cuanto a la certificación del equipo, es de clase 1 con IP54, igual que el equipo anterior. A continuación, se exponen las características técnicas más relevantes. En el anexo 4 se puede consultar la ficha completa.

Velocidad de escaneado máxima (pts/s)	976.000
Alcance máximo (m)	350
Alcance mínimo (m)	0,6
Campo de visión (°)	317 (horz.) x 300 (vert.)
Cámara íntegra	Sí – HDR
Dimensiones (mm)	230x183x103
Rango de temperaturas de funcionamiento (°C)	[5,40]
Condiciones de luminosidad	Sin limitaciones

Tabla 7.– Especificaciones técnicas relevantes Faro Focus S 350.

Respecto a las configuraciones de escaneo, Faro Focus S permite emplear perfiles de configuración establecidos o configuración manual. Los perfiles establecidos son muy intuitivos:

Perfiles para interior	Perfiles para exterior
Hasta 10 m	Hasta 20 m
A partir de 10 m	A partir de 20 m
Interior HDR	Exterior HDR

Tabla 8.– Perfiles predefinidos por Faro Focus S 350.⁵⁴

Los perfiles que se muestran en la tabla 8 son las indicaciones que aparecen en pantalla. Si se selecciona uno de ellos, se pueden consultar las configuraciones específicas que el dispositivo ha seleccionado. Estos perfiles son modificables. Sin embargo, el equipo también dispone de configuración manual de escaneo. Esta

⁵⁴ (FARO, Manual del usuario de FARO Focus Laser Scanner, 2019)

última opción fue la que se decidió emplear en el proceso de medida de este proyecto. En el capítulo referente al levantamiento se expondrán claramente los parámetros de escaneo empleados.

4.1.3. Complementos para la medición

4.1.3.1. Trípodes

TRIMBLE

El trípode empleado es un trípode elevador de la marca Trimble que dispone de una altura mínima de 1,0 m, máxima 1,20 m y soporta una carga máxima de 11,33 kg.

FARO

El equipo incluye todos sus accesorios para funcionar, pero no el trípode. En esta medición se ha empleado un trípode de carbono para Faro Focus, de carga máxima 16 kg, altura mínima 0,4 m y altura máxima 1,87 m.

4.1.3.2. Dianas esféricas

Las dianas son objetos de referencias que en la tecnología láser escáner sirven para facilitar la georreferenciación, ya que permiten realizar registros de escaneos entre ellos. En el caso del levantamiento con Faro Focus S 350, se han empleado dianas esféricas de 223 mm de diámetro con sus imanes correspondientes. En la figura 6 se muestra una fotografía.

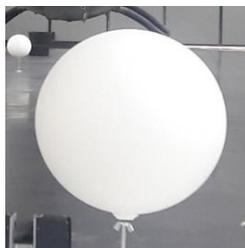


Figura 6.– Diana esférica para el levantamiento con Faro Focus S 350.

4.2. Software

Para la realización del proyecto se han empleado diferentes softwares para llevar a cabo todo el proceso de medición y modelización 3D. En este apartado se explica en qué parte y con qué fin se ha hecho uso de cada uno de ellos.

4.2.1. Leica Cyclone Basic

Uno de los softwares empleados es *Leica Cyclone Basic*. Este pertenece a la casa *Leica Geosystems* y sirve para procesar y trabajar nubes de puntos. Con esta herramienta se pueden hacer registros de escaneos, limpiezas de nubes de puntos, medidas sobre los puntos, etc.

Este software se ha empleado para realizar el registro de la nube de puntos a partir de los escaneos medidos con el equipo Trimble TX6 y para realizar la limpieza

definida de ambas nubes medidas. Este programa permite realizar registros de forma manual, de forma que se pueden analizar los errores estadísticos y los parámetros importantes del registro. Como se verá en el próximo capítulo, permite extraer mucha información del levantamiento.

4.2.2. Faro Scene

Faro Scene es un producto de la casa FARO. Este software se utiliza también para procesar nubes de puntos, tanto para registro como limpiezas. La versión empleada es la 7.0. Este software ha sido diseñado especialmente para equipos Faro Focus, aunque también pueden introducirse escaneos de otros fabricantes.

El objetivo principal de *Faro Scene* es proporcionar registros rápidos de forma sencilla y eficiente, por lo que es un software muy intuitivo que permite registro *in situ* o en un intervalo de tiempo corto. Si se emplean dianas, el programa detecta los objetos de referencia de forma automática, y permite una visualización rápida del registro realizado. Ha sido empleado para realizar el proceso de registro con Faro Focus S.

4.2.3. Leica Cyclone 3DR

Leica Cyclone 3DR es un programa de última generación de la empresa *Leica Geosystems*. Este software permite procesar nubes de puntos –no registro–, pero está centrado en el proceso de mallado y generación de modelos sólidos CAD. Se trata de una combinación entre el antiguo *3DReshaper* y nuevas herramientas para conseguir un procesado más eficaz.

Está destinado a la generación de mallas en base a nubes de puntos de forma sencilla e intuitiva, a realizar inspecciones en la nube de puntos, comparaciones analíticas entre diferentes elementos, limpiezas de nubes de puntos y finalmente, extracciones de modelos CAD y de ortoimágenes. Sobre estas áreas permite generar informes en PDF y documentar los resultados de los análisis o inspecciones realizadas.

Este programa dispone, además, de un *plug-in* ‘AutoCAD’, un comando que permite enviar ficheros a *AutoCAD* sin necesidad de exportar.

Este software se ha empleado para la creación de mallas y la extracción del modelo CAD.

4.2.4. AutoCAD

AutoCAD es un programa de Autodesk de diseño asistido por ordenador, tanto para dibujos 2D como 3D. Una aplicación fundamental de este software es, por tanto, la extracción de planos.

En este proyecto se ha empleado para realizar dos planos que presenten los resultados obtenidos del modelado a través de ortoimágenes extraídas directamente del software *Leica Cyclone 3DR*.

4.2.5. Trimble RealWorks

Trimble RealWorks es el programa asociado a los escáneres láser de la casa Trimble para el procesamiento de nubes de puntos. Este software se empleará en el proyecto para convertir los archivos de los escaneos y pasarlos a un formato que acepta *Leica Cyclone*.

Capítulo 5 –Medición 3D

El presente capítulo contiene el proceso de medición 3D. Se explica el proceso de trabajo llevado a cabo para realizar la toma de datos. Así, se describe la planificación en función de los objetivos, el proceso de medición y el procesamiento posterior de la nube de puntos. Este procedimiento se detalla para las medidas realizadas en campo con los dos equipos de medida: Trimble TX6 y Faro Focus S 350.

5.1. Proceso de trabajo

Llegados al momento de realizar el levantamiento 3D, cabe definir y describir el proceso empleado. En primer lugar, es necesario establecer los objetivos concretos del escaneo, pues son estos los que permiten, junto al análisis de la zona, escoger el láser escáner adecuado y posteriormente establecer una u otra configuración, tanto de posiciones de escaneo, uso o no de dianas, software para el registro, y en definitiva, todo lo que se ha tratado acerca del funcionamiento láser escáner.

El segundo paso es analizar el objeto a levantar y ver su complejidad. En este momento es recomendable determinar el software para procesar los datos. Se debe pensar inicialmente en un esbozo de los escaneos necesarios, ver si se necesita un trípode capaz de disponerse en posiciones críticas y analizar las condiciones ambientales para tenerlas en cuenta en la elección de un láser escáner que pueda funcionar correctamente. Observando estos parámetros se decidió emplear los equipos que se han expuesto en el capítulo anterior. En el siguiente punto se detallarán concretamente.

Posteriormente, se detallan las posiciones óptimas de escaneo, de las dianas si se ha decidido emplearlas y de la configuración del láser. Después se procede a la preparación del equipo y se toman las medidas según lo detallado.

Una vez realizados los escaneos, se importan los datos al software escogido para el registro, se realiza la unión de los escaneos y cuando se obtiene la nube de puntos

única se procede a la limpieza, de modo que quede sólo la nube de puntos de interés. En la figura 7 se presenta un esquema resumen de los pasos mencionados.

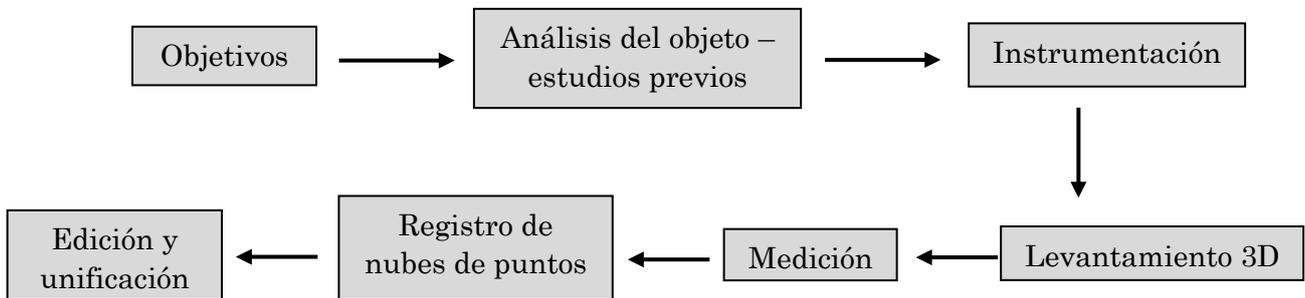


Figura 7.– Resumen del proceso de levantamiento.

Una vez explicado el proceso, se procede a explicar la justificación de los equipos escogidos frente a la necesidad de escaneo.

5.1.1. Objetivos del levantamiento

En primer lugar, se debe tener en cuenta cual es el objetivo por el que se realiza la medición y tomar una serie de decisiones en función de la precisión requerida, el acceso a las zonas ocultas del objeto a medir, así como la instrumentación a utilizar, la planificación y programación de la medición. En este caso, se pretende:

- Realizar dos métodos de registro: manual y automático.
- Evaluar la precisión que ofrecen en sistemas aeroespaciales dos equipos diferentes de medida.
- Realizar dos levantamientos, sin exceder las 4h de tiempo de medida por cada uno.

5.1.2. Análisis del objeto

La zona de escaneo es interior, el laboratorio Pedro Duque de la Universidad Politécnica de Valencia, donde se sitúa la aeronave descrita en el capítulo 2: *Dassault Mirage F1M*.

En este lugar hay una sección para la docencia y otra donde se dispone la aeronave junto a un helicóptero. En la parte derecha superior se dispone de una plataforma, que se empleará para escanear desde arriba. En la figura 8 se ilustra una imagen de la disposición de la aeronave, donde se observan estos detalles



Figura 8.– Disposición de la aeronave *Dassault Mirage F1M* en el laboratorio Pedro Duque.

Puesto que se trata de una nave con fines docentes, no es un espacio donde se llegue a temperaturas extremas que podrían afectar al funcionamiento de un láser escáner de gama usual en el mercado.

Teniendo en cuenta que las temperaturas de la zona no requieren de módulos externos que aumenten el rango de temperatura de trabajo, y que se trata de una zona interior con suficiente espacio y posibilidad para efectuar diferentes escaneos, tanto desde vista superior como inferior, sin necesidad de situar el escáner en zonas complejas, se tomaron las decisiones que se expondrán a continuación.

5.1.3. Instrumentación

Bajo las condiciones expuestas, para dar respuesta a los objetivos del trabajo y verificar la aplicación de sistemas láser escáner comparando entre dos equipos, se emplearon los equipos Trimble TX6 y Faro Focus S. Como se ha expuesto en el capítulo anterior, estos equipos son adecuados para interiores, en el intervalo de tiempo establecido pueden obtener un escaneo óptimo y trabajan en un rango de temperaturas adecuado para el laboratorio.

En cuanto al uso de dianas, se decidió emplearlas en Faro Focus S y realizar registro punto a punto en Trimble TX6. Esto se debe a las decisiones que se tomaron, a su vez, de los softwares empleados. Faro Scene, para realizar el registro de la nube obtenida con Faro, proporciona un registro casi automático, muy rápido e intuitivo si se emplean dianas. Por otra parte, *Leica Cyclone* ofrece la posibilidad de realizar registros manuales sin dianas en los que el proceso de aprendizaje acerca del registro es óptimo. Por la información que proporciona este software se decidió escanear sin dianas con Trimble TX6, y analizar así los datos registrados en comparación al uso de dianas.

5.2. Levantamiento 3D –equipo 1–

En primer lugar, se procede a la explicación del levantamiento realizado con el equipo láser escáner Trimble TX6. Primeramente, se presenta un croquis de las posiciones de escaneo que, como se ha mencionado en el punto anterior, se decidió realizar. Posteriormente se explica el proceso de registro realizado con *Leica Cyclone*.

Puesto que esta medida debía cubrir los dos objetos del hangar, se decidió realizar un total de 17 estacionamientos, dispuestos como se presenta en el croquis de la figura 9. A la derecha, en el croquis expuesto, se observa que el punto 14 también es elevado. En esta sección se disponía un objeto que permitió colocar el láser en esta parte también, de modo que junto a los estacionamientos de la plataforma, el láser coja bien la planta de los objetos de estudio.

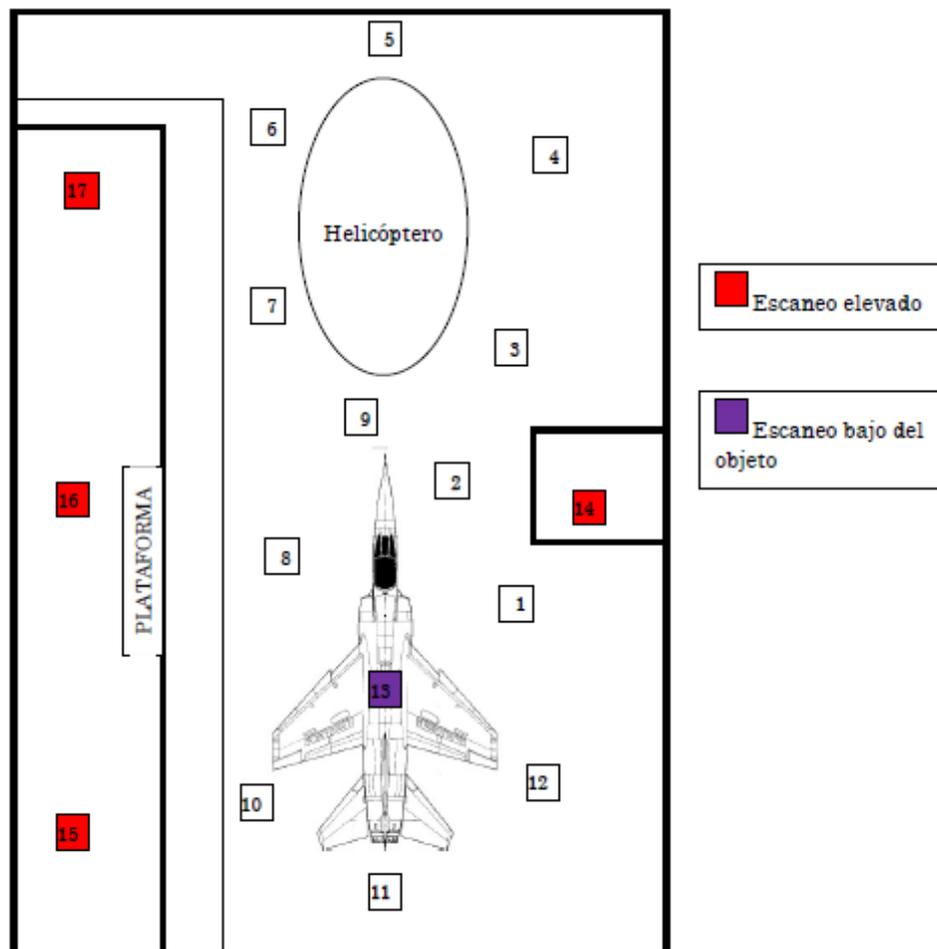


Figura 9.– Trimble TX6.Croquis de los estacionamientos.

La configuración de los escaneos debe estudiarse bien para evitar zonas de sombra y medidas no deseables. A partir de los escaneos dispuestos en la figura 9 se procedió a realizar las mediciones. En este punto entra el siguiente paso: la medición.

5.2.1. Medición 3D con Trimble TX-6

El siguiente paso es definir la **configuración**. En base al croquis expuesto en la figura 9, al realizar 17 escaneos en un tiempo razonable se decidió emplear el nivel 1 de escaneo. Como se había visto en la tabla 6, este nivel, configurado en color estándar, proporciona una precisión considerable para cumplir con las necesidades de escaneo. Cada escaneo duró unos 5 min, tomando unos $34,7 \cdot 10^6$ puntos. En la tabla 9 se figura un resumen de la configuración empleada.

Configuración	Nivel 1
Color	Estándar
Número de escaneos	17
Tiempo de un escaneo (min)	~5
Puntos por escaneo (Mpts)	34
Tiempo total de escaneado (min)	~85

Tabla 9.– Configuración del escáner y tiempo de escaneo, levantamiento Trimble TX6.

En la figura 10 se muestran imágenes del proceso de medida, con el láser escáner estacionado y realizando barridos.



Figura 10.– Trimble TX6 escaneando, proceso de medida.

5.2.2. Registro con *Leica Cyclone*

Una vez se han obtenido las medidas planificadas, tal y como se ha expuesto en la figura 7, se procede a realizar el registro. Lo que se obtiene en las medidas son diferentes escaneos, y cada uno de ellos cuenta con un sistema de referencia propio. El proceso de registro consiste en realizar la unión de todos los escaneos para obtener una única nube de puntos que contenga todos los puntos escaneados y unificados del objeto de interés en un mismo sistema de referencia. A partir de esta nube será posible realizar el posterior proceso de mallado y estudiar los aspectos necesarios para responder a los objetivos del proyecto.

Para realizar este proceso, en el levantamiento con Trimble TX6, se emplea el programa *Leica Cyclone*. Como se ha comentado antes, la elección de este programa se debe a que se pueden realizar registros de forma manual, lo que hace posible analizar los errores del registro y trabajarlos para conseguir que sean mínimos.

Sin embargo, previamente a importar los archivos en *Leica Cyclone* es necesario realizar una conversión de estos. Los archivos que contienen los escaneos del equipo, al pertenecer a la empresa Trimble TX6, se guardan en las dos extensiones exclusivas de Trimble que admite su programa asociado *Trimble RealWorks*, que son **.tcf* y **.tzf*, no se pueden importar directamente a *Leica Cyclone*. Para realizar la conversión de archivos se acudió al programa *Trimble RealWorks* y se transformaron a la extensión **.ptx*, que es aceptada por la gran mayoría de los programas para tratamiento de nube de puntos.

Una vez convertidos los 17 escaneos, se importaron a *Leica Cyclone*. Para importar los datos se selecciona el servidor y se indica *Databases – Add – Database name*, se asignó el nombre ‘trimbletx6’ –ver figura 11–. Así, se obtiene una carpeta de proyecto donde se almacenan los escaneos importados.

Para proceder al registro, es necesario conocer la estructura de almacenamiento del software. Una vez creada la *database* que contiene todos los escaneos, aparecen diferentes carpetas:

1. *ScanWorld*: cada posición de escaneo se denomina así. Cuando se realiza un registro, es un *ScanWorld* único –en la figura 11 aparece el registro–.
2. *ControlSpace*: esta sección contiene todos los escaneos, y cuando se realizan registros de diferentes escaneos, el programa lo almacena aquí, esta no se debe tocar.
3. *ModelSpace*: es el espacio que contiene la nube de puntos y sobre el que se debe de trabajar. Estas carpetas se pueden duplicar para guardar diferentes trabajos.

En la figura 11 se muestra la disposición:

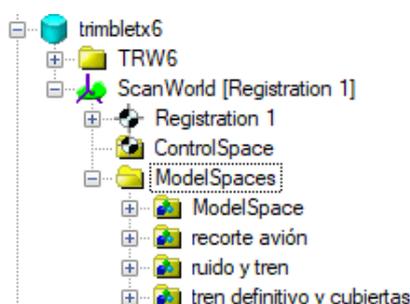


Figura 11.– Estructura de trabajo en *Leica Cyclone*.

Para proceder al registro, se selecciona la carpeta que contiene los escaneos y se indica *Create – Registration*. De este modo, se abre la pestaña del registro creado. En esta, se selecciona *ScanWorld – Add ScanWorld* y se añaden todos los escaneos, sólo hay que seleccionarlos.

En la pestaña de registro, aparece también otro apartado nuevo: *Constraint List*. En este, para cada unión realizada, el software da indicaciones de los errores, como se verá posteriormente. Una vez los escaneos están dentro del *ScanWorld* que se va a crear, hay uno que aparece en negrita. Esto significa que el software va a tomar como origen el sistema de referencia de ese escaneo. En la figura 12 se puede observar que el registro se va a referenciar tomando como origen el sistema de referencia del primer escaneo.

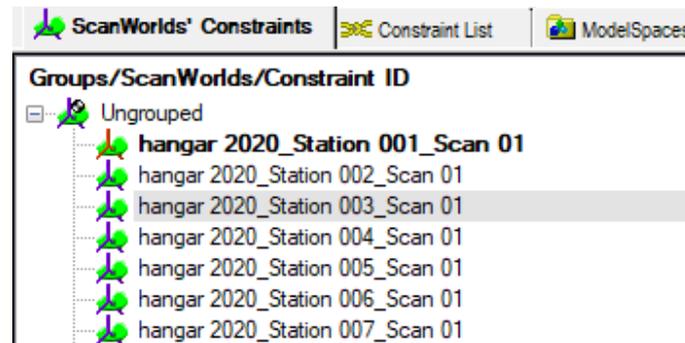


Figura 12.– Primer estacionamiento como Sistema de Referencia.

Como se puede observar en la figura 12, los escaneos tenían el nombre *hangar_Station 001_Scan 01*. Esto indica el número del estacionamiento y el número de escaneo. Para facilitar a nivel visual el proceso de registro, donde se han realizado muchas uniones, dado que no se realizó más de un escaneo en ninguna opción, se cambiaron los nombres al siguiente formato: *hangar 1 –primer escaneo–*. De este modo, aparecerán a partir de ahora con este nombre.

Seguidamente, habrá que realizar uniones de forma en que los estacionamientos terminen estando unificados. Puesto que no se ha hecho uso de dianas, el método escogido para la unión es *Cloud to Cloud*, según *Leica Geosystems*.⁵⁵ Este proceso debe realizarse poco a poco, ya que el número de estacionamientos es elevado. Para realizar el registro se debe crear el máximo número de uniones posibles de dos en dos –para conseguir buenos resultados–. Para explicarlo se realizará una ejemplificación conceptual visual referente a la unión de los 5 primeros escaneos. El proceso consiste, en primer lugar, en unir los escaneos en pares de la siguiente forma:

Inicial: 1,2,3,4,5 – Final: 1-2, 2-3, 3-4, 4-5

Para realizar estas uniones es conveniente abrir la pestaña *Cloud Constraints Wizard*. En esta pestaña aparecen los nombres de los escaneos en la sección horizontal y en la vertical. Tal y como se ilustra en la figura 13, permite seleccionar directamente la unión que se quiere realizar.

⁵⁵ (Kennedy & Company, 2017)



Figura 13.– Pestaña *Cloud Constraints Wizard*.

Una vez seleccionados los escaneos, se clicla *update* y el programa abre para cada uno de los casos dos ventanas que muestran los dos estacionamientos que se quieren unir. Esto se da para cada una de las uniones, es decir, la unión 1-2, la 2-3, la 3-4 y la 4-5. En la figura 14 se muestra un ejemplo. En estas dos ventanas hay que identificar y marcar, como mínimo, tres puntos comunes en ambos escaneos.

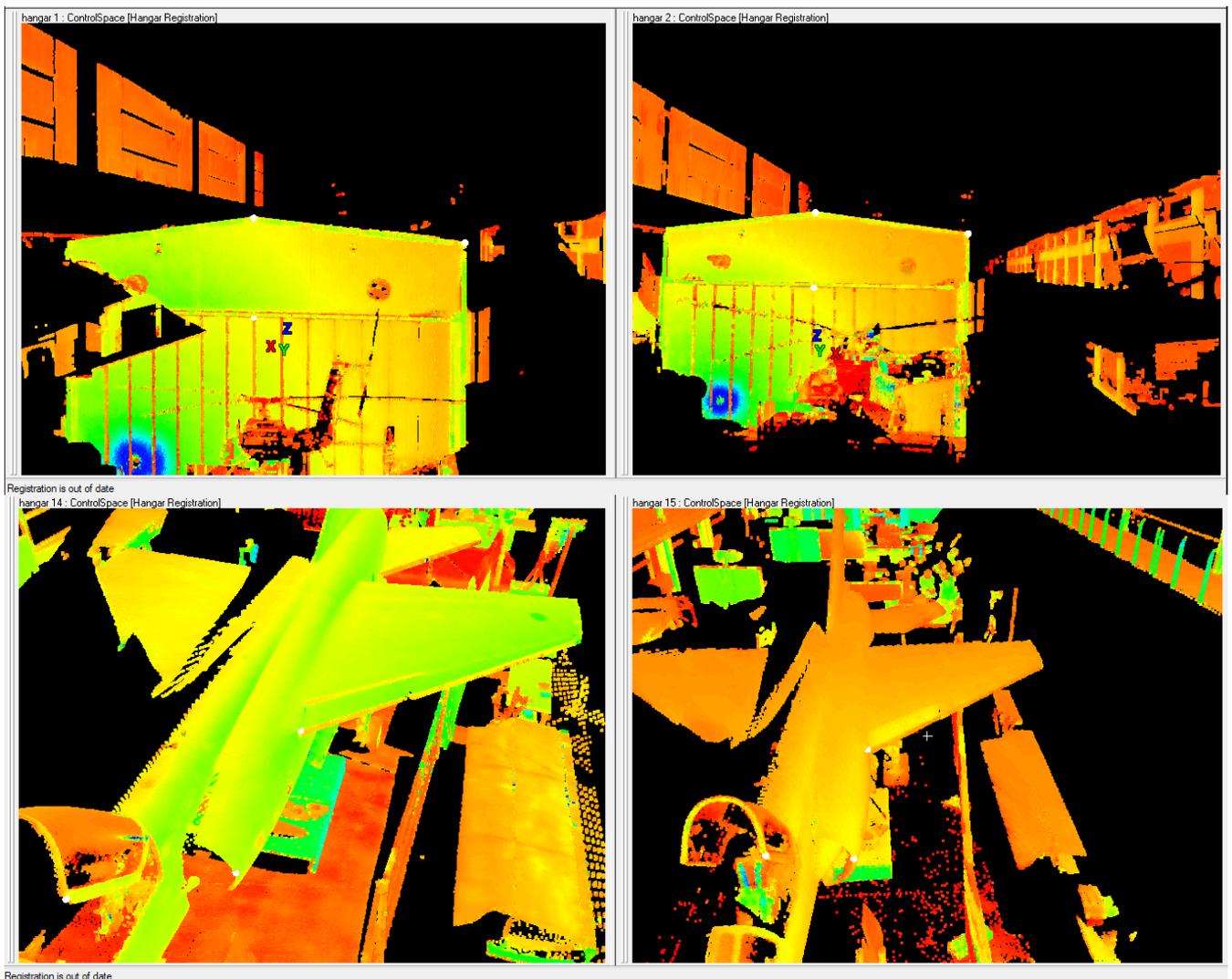


Figura 14.– Unión de escaneos en el software *Leica Cyclone*.

Cuando un punto está mal identificado o dista lo suficiente como para crear un error considerable, el programa vuelve a abrir las ventanas indicando un cuadrado azul dentro del punto que no es correcto, como se puede ver en la figura 15. si no hay un mínimo de 100 mm de precisión, cyclone no los considera correctos.

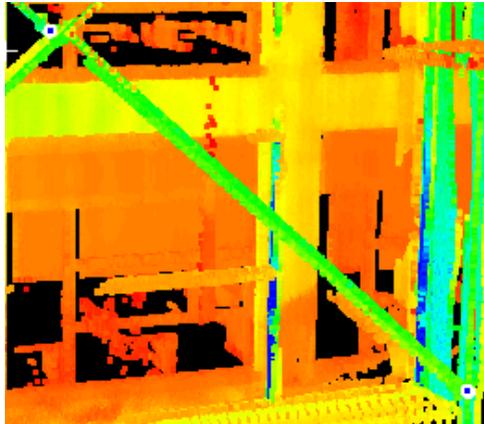


Figura 15.– Error detectado en el proceso de unión.

Una vez seleccionados los puntos en las dos ventanas, para seguir realizando uniones conviene visualizarlas y comprobar que efectivamente, son válidas –ver figura 16–. Para ello hay que seleccionar *preview* en el panel de *Cloud Constraints Wizard*.

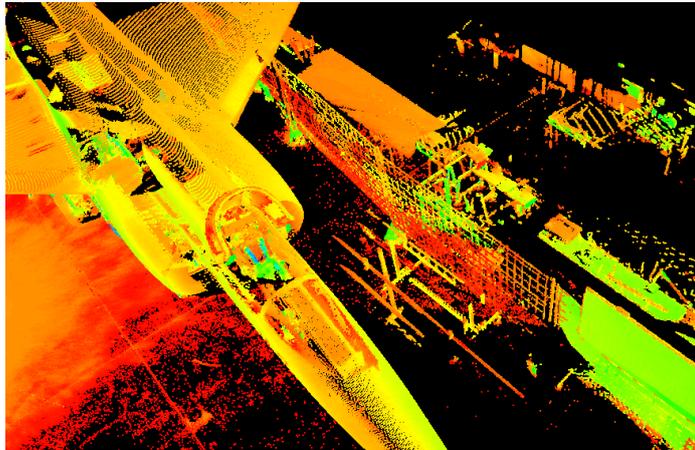


Figura 16.– Visualización de la unión de dos estacionamientos.

Una vez se comprueba que la unión es correcta, para confirmar la unión se selecciona *Constrain* en la pestaña *Cloud Constraint Wizard*. A continuación, la tabla programa las siguientes uniones, y se repite este procedimiento hasta conseguir la unión de dos en dos entre todos los estacionamientos.

Cabe decir que las uniones también se pueden realizar sin la tabla, pero al tener que manejar muchos datos, es importante usar esta pestaña para llevar una metodología ordenada, ya que, al no usar dianas, no se pueden añadir uniones automáticas.

En este caso se ha realizado un total de 136 uniones para combinar los 17 estacionamientos. El resultado es una matriz como la que muestra la figura 17, que

es la pestaña *Constraint Wizard* cuando se han rellenado los escaneos. Esta dispone de 136 casillas marcadas en negro.

Scan World	hangar 2	hangar 3	hangar 4	hangar 5	hangar 6	hangar 7	hangar 8	hangar 9	hangar 10	hangar 11	hangar 12	hangar 13	hangar 14	hangar 15	hangar 16	hangar 17
hangar 1	<input checked="" type="checkbox"/>															
hangar 2	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>
hangar 3	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>
hangar 4	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>
hangar 5	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>
hangar 6	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>
hangar 7	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>				
hangar 8	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>					
hangar 9	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>						
hangar 10	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>							
hangar 11	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>								
hangar 12	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>									
hangar 13	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>										
hangar 14	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>											
hangar 15	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>												
hangar 16	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>													
hangar 17	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>														

Figura 17.– Matriz de uniones *Cloud Constraint Wizard* completa.

El hecho de realizar las uniones poco a poco se debe a que cuando estas han sido confirmadas con *constraint*, aparecen en la pestaña *Constraint List*, donde se puede visualizar información de la unión respectiva como figura el ejemplo de la imagen 18.

Constraint ID	ScanWorld	ScanWorld	Type	Status	Weight	Overlap Points	Error	Error Vector
Cloud/Mes...	hangar 1	hangar 5	Cloud: Cloud/Mesh - Cloud...	On	1.0000	630582	0.001 m	aligned [0.008 m]

Figura 18.– Información de la unión entre el estacionamiento 1 y 5.

En esta tabla hay que tener en cuenta varios parámetros a tener en cuenta antes de realizar el registro final. A continuación, se expone el significado de cada una de estas columnas:

- *Constraint ID*: es la identificación de la unión.
- *ScanWorld*: estas dos columnas indican los estacionamientos que se han unido.
- *Type*: indica simplemente que es una unión de nubes de puntos. (Cloud/Mesh – Cloud/Mesh).
- *Status*: admite valor *on/off*. Si indica *on* está activa, si indica *off* significa que la unión no se activa porque los estacionamientos no tienen zonas comunes, es decir, la información común entre ambos no es suficiente para realizar la unión.
- *Weight*: es el peso de esta unión respecto al resto.
- *Overlap points*: indica los puntos de solape entre ambos estacionamientos de la unión, este parámetro tener como mínimo un valor de 10.000.
- *Error*: error total del estacionamiento.
- *Error vector*: es el vector del error de alineamiento. El óptimo debe estar entre 6 mm, que es el mínimo para el equipo Trimble TX6, y 8 mm.

Una vez se comprueba que estos parámetros son correctos, se procede a registrar. En la pestaña *Registration* se selecciona la opción *Register*, que combina las uniones de todos los estacionamientos realizados. Posteriormente se crea un

modelo que pueda ser editado en el programa con el comando *Create ModelSpace View*. Así, en la sección *ModelSpace* principal aparecerá el registro con la nube de puntos resultante.

El resultado del registro se presenta en la figura 19. Se verá con detalle en el apartado de limpieza de la nube de puntos.

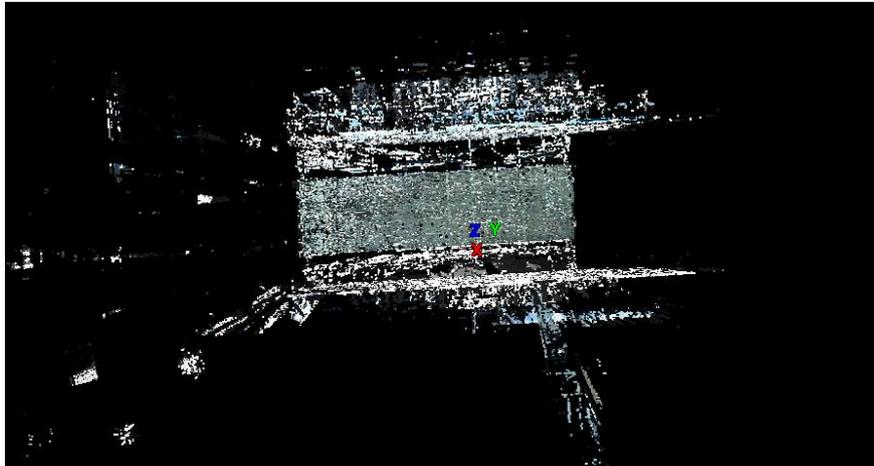


Figura 19.– Trimble TX6. Planta superior del hangar registrado.

5.2.3. Análisis de los resultados del registro

Una vez realizado el registro de las 17 nubes de puntos que se disponían tras la medición, *Leica Cyclone* permite extraer un informe que presenta tanto los parámetros expuestos en la figura 18 como otros errores estadísticos. Para consultarlo hay que emplear el comando *Registration – Show Diagnostics*. Este se presenta completo en el Anexo 5.

La forma de la que el programa calcula la alineación de las nubes de puntos es producto de la transformación Helmert de 6 parámetros –3 traslaciones y 3 giros– que presenta la siguiente ecuación:⁵⁶

$$\begin{pmatrix} X' \\ Y' \\ Z' \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \Delta X \\ \Delta Y \\ \Delta Z \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} 1 & -\Delta k & \Delta \varphi \\ \Delta k & 1 & -\Delta w \\ \Delta \varphi & \Delta w & 1 \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} X \\ Y \\ Z \end{pmatrix} \quad (7)$$

Donde:

- $[X', Y', Z']$: coordenadas nuevas.
- $[X, Y, Z]$: coordenadas de entrada.
- $[\Delta X, \Delta Y, \Delta Z], (\varphi, k, w)$ parámetros de orientación relativa, traslación y rotación.

El programa proporciona parámetros de rotación y traslación, así como diferentes parámetros que se verán a continuación.

⁵⁶ (Berenguer Cerdá, 2013, pág. 250)

Al inicio del informe, el programa muestra lo que ilustra la figura 20, que indica que el registro es válido y que se ha dado un error medio de todos los estacionamientos de 0,001 m.

```
Status: VALID Registration
Mean Absolute Error:
    for Enabled Constraints = 0.001 m
```

Figura 20.– Error medio de todos los estacionamientos.

Seguidamente, aparece la tabla con los parámetros que ya se podían ver en el apartado anterior –figura 18–. Se comprueba que todos los parámetros antes mencionados cumplen los rangos establecidos. Sólo hay una unión que no se ha realizado, que es la 3-4 –*Status off*–.

Por otra parte, el índice más importante para saber que el registro es correcto es el valor del error del vector de alineación. En todos los casos se ha obtenido un resultado que oscila entre 6 mm y 9 mm, lo que indica que el rango es un resultado bueno. Cabe decir que este error cuenta con el error propio en la medida del láser escáner –6 mm–, al que se añaden los posibles errores de captura de datos o de registro.

Seguidamente, una vez comprobada esta tabla, se presentan en el informe los siguientes datos:

```
Cloud/Mesh 2 [hangar 2 : hangar 1]
Objective Function Value: 2.2287e-05 sq m
Iterations: 190
Overlap Point Count: 393802
Overlap Error Statistics
  RMS: 0.00566962 m
  AVG: 0.00377003 m
  MIN: 1.46009e-08 m
  MAX: 0.0463941 m
Overlap Center: (1.030, -2.658, 8.734) m
Error after global registration: 1.09656e-06 sq m
Translation: (0.421, 6.916, -0.101) m
Rotation: (0.0099, 0.0065, 0.9999):174.887 deg
```

Figura 21.– Errores estadísticos de la unión 1-2.

En esta imagen se pueden observar diferentes parámetros:

- *Iterations*: número de iteraciones realizadas.
- *Overlap Point Count*: número de puntos de solape entre los dos estacionamientos.
- *RMS*: error medio cuadrático.
- *AVG*: valor promedio en el ajuste.
- *MIN*: valor del error mínimo.
- *MAX*: valor del error máximo.
- *Overlap Center*: punto central del solape.
- *Translation & rotation*: vectores de traslación y rotación.

Al observar estos datos, se comprueba que el error medio cuadrático –RMS– no exceda de los 6 mm, que es el error de medida del láser escáner. Se observa que para

todas las uniones, este parámetro tiene un valor entre 6 mm y 9 mm, lo que indica que es un error muy aceptable. Por otra parte, se puede ver que el *AVG* tampoco alcanza valores altos.

Tras la comprobación de todos estos indicadores, se visualiza el registro y se observa que es válido, pues no posee desalineaciones, la nube de puntos se ha alineado correctamente.

5.2.4. Edición con Leica Cyclone

Una vez se valida el registro, sólo resta obtener la nube de puntos 3D del objeto de interés, la aeronave *Dassault Mirage F1M*. Para lograr este fin hay que limpiar la nube, es decir, eliminar todo aquello que no sea el objeto de estudio. Para llevar a cabo este proceso, será necesario primero unificar la nube de puntos. Mediante el comando *Unify* se crea una única nube de puntos. Hasta ahora se tenía una nube registrada formada por 17 nubes. Con este comando se convierte la nube en única definitivamente.

Como se ha comentado en el capítulo 1, se obtendrá un modelo de la aeronave sin tren de aterrizaje y sin las cubiertas que dispone abiertas.

El resultado del registro se muestra en la figura 22 desde diferentes perspectivas.

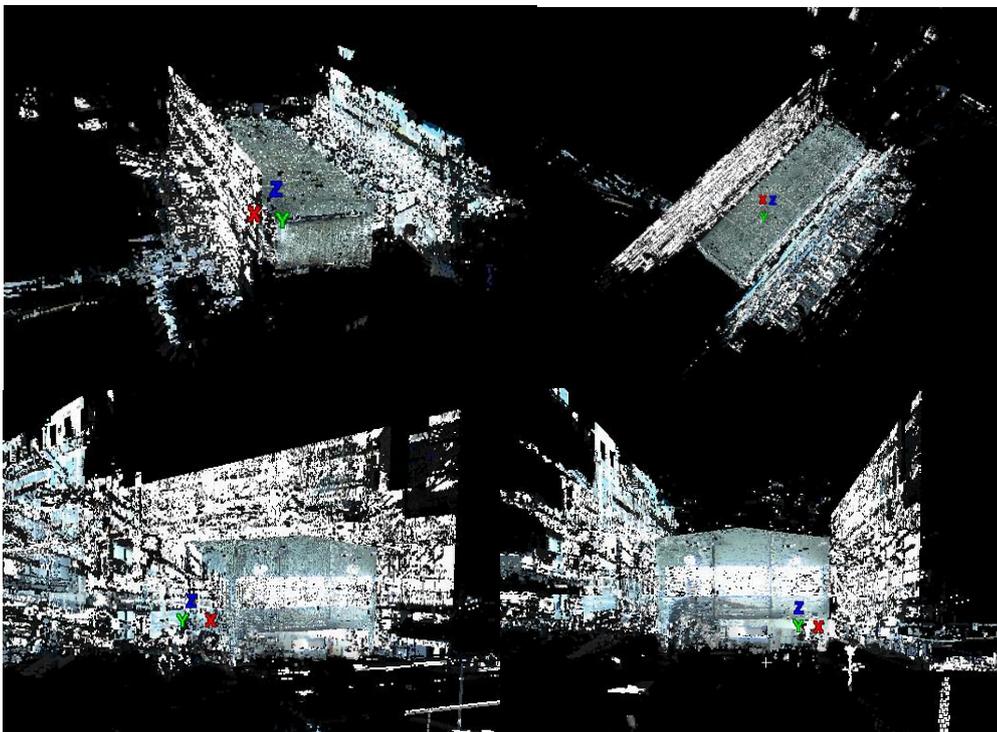


Figura 22.– Trimble TX6. Nube de puntos registrada y unificada.

En la figura anterior, los puntos que se observan al lado de la forma del hangar corresponden al reflejo que ha captado el láser escáner por la entrada de la luz del día.

A continuación, se muestra el procedimiento seguido de limpieza. Para poder eliminar puntos se emplea la herramienta *Fence*. En primer lugar, se dibuja una polilínea que encierre la sección que se desea extraer. Después se selecciona la opción *delete inside* o *delete outside*. En el primer caso, se elimina el ruido exterior al hangar y se recorta la aeronave, por lo que se ha empleado la opción *delete outside*. En la figura 23 se presenta a la izquierda la nube inicial, en el centro el hangar sin ruido y a la derecha la silueta de la aeronave recortada. Excepto el primer y segundo caso, todo ha sido realizado con la opción *delete inside*. Las figuras posteriores muestran las limpiezas respecto a las anteriores.

Limpieza ruido exterior al hangar y recorte del avión:

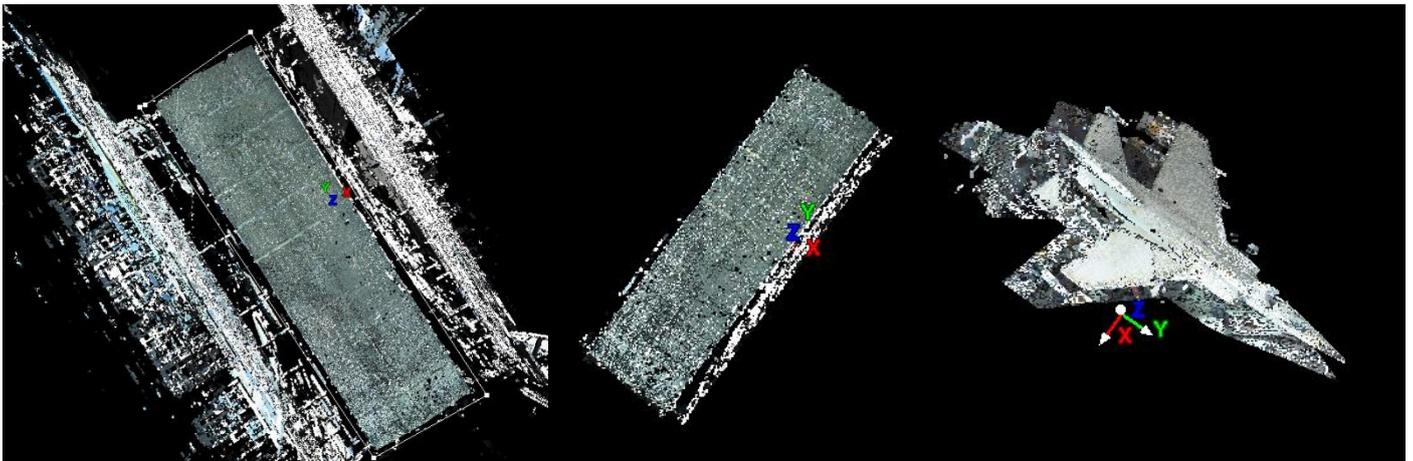


Figura 23.– Trimble TX6. Limpieza del ruido exterior del hangar y recorte de la aeronave.

Limpieza del ruido externo a la aeronave y tren de aterrizaje:

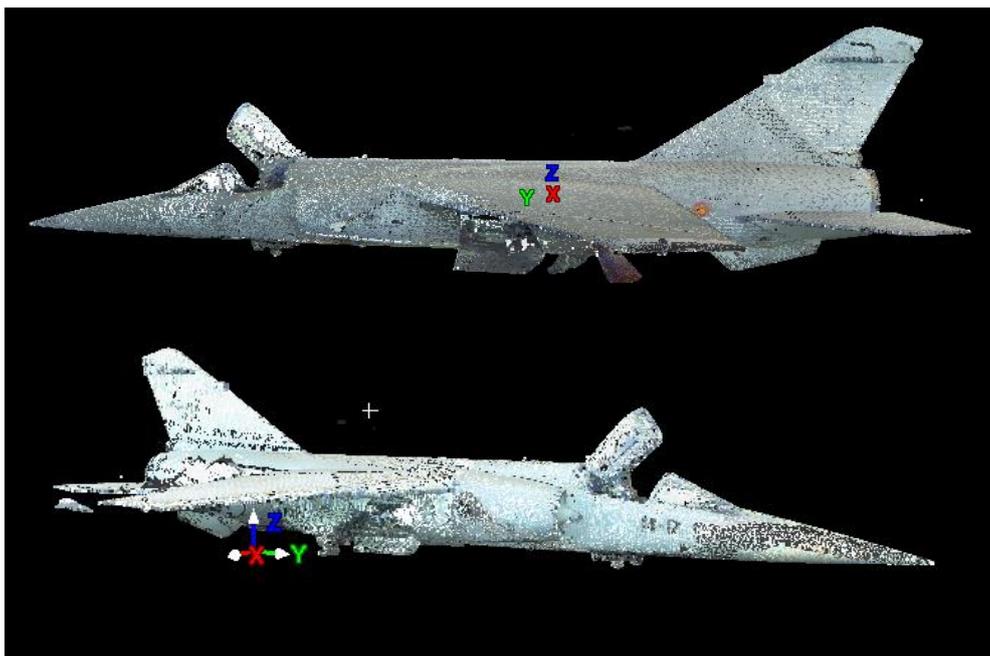


Figura 24.– Trimble TX6. Limpieza del ruido exterior de la aeronave y del tren de aterrizaje.

Limpieza perfilada del tren de aterrizaje y de las cubiertas:

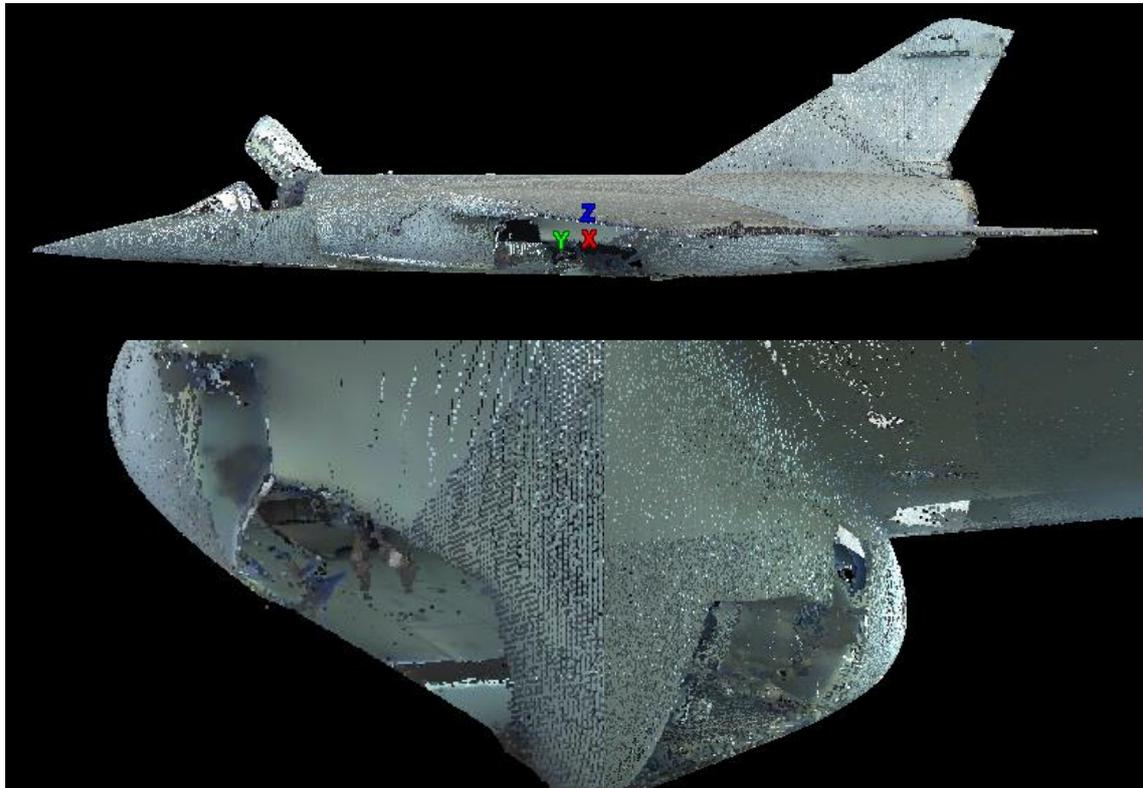


Figura 25.– Trimble TX6. Limpieza perfilada del tren de aterrizaje y cubiertas.

Limpieza cúpula y asiento:

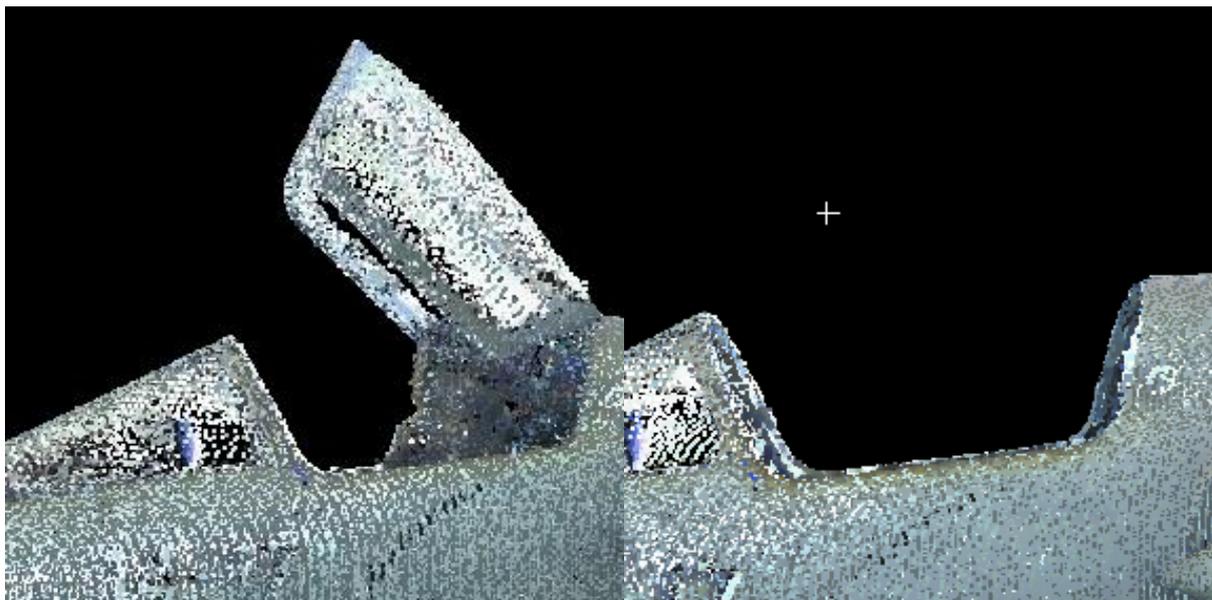


Figura 26.– Trimble TX6. Limpieza cúpula y asiento.

Limpeza final: perfilado de ala delantera y trasera, eliminación de ruido



Figura 27.- Trimble TX6. Resultado final de la nube de puntos.

En definitiva, es posible observar que se ha obtenido una nube de puntos con bastante nivel de detalle. Llegados a este punto se exporta al formato *.e57, que es admitido con alta resolución en el programa para el posterior modelado.

Cabe decir que aunque se ha obtenido una nube de puntos con bastante detalle y color, es apreciable que hay una zona de sombra en el estabilizador horizontal. Esto es debido a que el escáner no ha medido esa parte. A pesar de ello, esta cuestión no supone un problema, ya que con las técnicas de modelado posteriores es posible obtener un acabado liso de esta superficie.

En el resultado se observa que la planta inferior presenta ruido, de modo que en el siguiente levantamiento se trató de situar más estacionamientos debajo de la aeronave para conseguir mejor resolución de la nube de puntos.

5.3. Levantamiento 3D –equipo 2–

En este apartado se describe el levantamiento 3D de la aeronave *Dassault Mirage F1M* realizado mediante el láser escáner Faro Focus S 350, actual líder en el mercado. La zona de estudio y el proceso realizado son los mismos que en el levantamiento anterior, ha sido explicado en el apartado 5.1.

A diferencia del levantamiento con Trimble TX6, en este caso se ha hecho uso de dianas esféricas y se ha escaneado directamente la aeronave. En primer lugar, se expondrá la disposición de los estacionamientos y de las dianas, la configuración del equipo empleada y el proceso de medida.

5.3.1. Medición 3D con Faro Focus S 350

En primer lugar, se expone el croquis que se realizó en la fase de planificación del levantamiento acerca de la posición de los diferentes estacionamientos y de la colocación de las dianas, cuya importancia debe versar sobre evitar obtener zonas de sombra o obstáculos que puedan generar problemas en la medida. Las dianas a escoger pueden ser de diferentes tipos, y se optó por emplear dianas esféricas debido a que el software con el que se han procesado los puntos dispone de un módulo que las detecta automáticamente. En cuanto a la disposición de las dianas, hay que distribuir las de forma que cada estacionamiento sea capaz de detectar al menos tres dianas. En total se emplearon 9 dianas para complementar 14 estacionamientos. Las dianas son los elementos que permitirán realizar, junto a la alta eficiencia de *Faro Scene*, un registro prácticamente automático. En la figura 28 se muestra el croquis planificado sobre la zona de levantamiento.

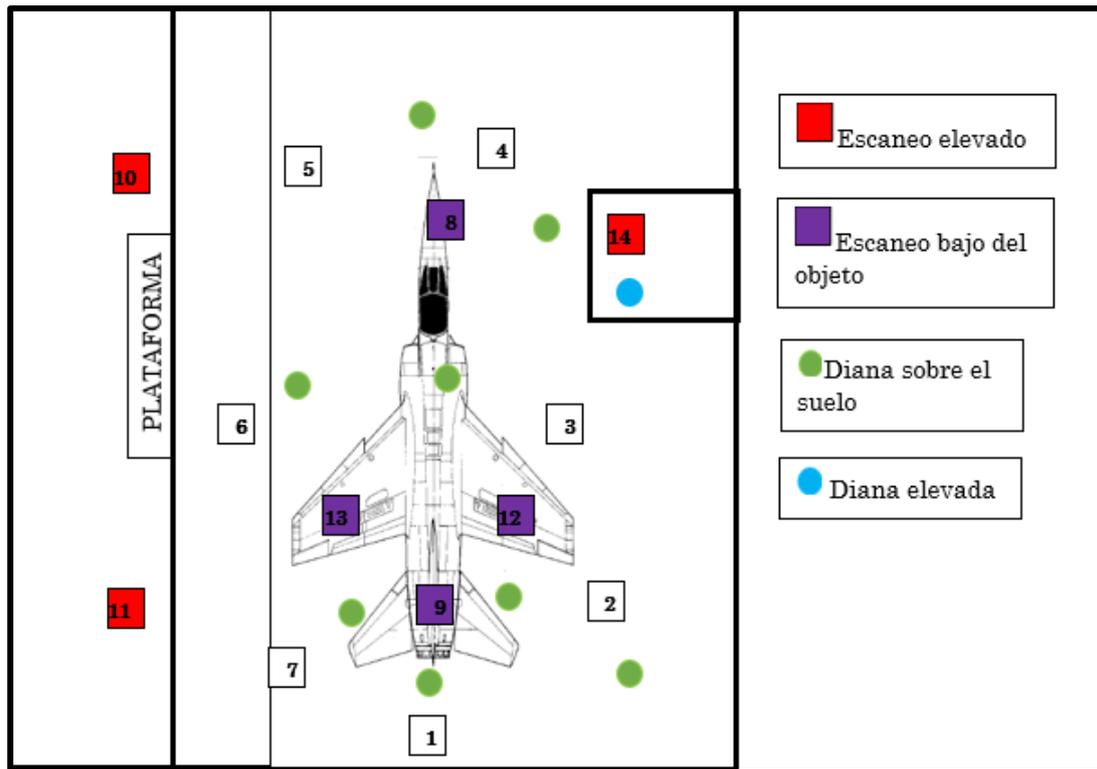


Figura 28.– Faro Focus S. Croquis del levantamiento planificado.

En el croquis se puede observar que se realizaron cuatro escaneos por la planta inferior de la aeronave, de modo que se pueda alcanzar alto nivel de detalle.

En cuanto a la configuración del equipo, se optó por realizar configuración manual. Como se ha comentado, Faro Focus S admite tanto perfiles de escaneo directamente configurados como configuración manual. Se decidió indicarlo desde cero, y tras estudiar diferentes posibilidades, se decidió emplear una configuración sin color con las características que se presentan en la tabla 10.

Configuración	Manual
Color	No – tonos grises
Número de escaneos	14
Resolución (Mpts)	1/5
Calidad	3x
Puntos por escaneo (Mpts)	~15,65
Tiempo de un escaneo (min)	~5
Tiempo total de escaneado (min)	~70

Tabla 10.– Configuración del escáner y tiempo de escaneo, levantamiento Faro Focus S.

Como se puede observar, esta configuración ofrece menos puntos que la anterior, sin embargo, es posible definir la calidad y la resolución de los puntos, que puede resultar una calidad alta en el levantamiento.

En cuanto al proceso de medida es el mismo al anterior. El trabajo de campo inicia planificando los estacionamientos y verificando la posibilidad de cumplir con el croquis previsto. Después se prepara el equipo láser escáner con sus baterías correspondientes y la tarjeta de memoria, anclándolo al trípode y realizando el ajuste

necesario. Se inicia el equipo y se nivela, en este caso, también mediante nivelación digital. Después se crea un proyecto para que guarde los escaneos y se procede a realizar las medidas.

5.2.2. Registro con Faro Scene

Una vez finalizado el proceso de medición, se procede a registrar los estacionamientos. En este caso no es necesario convertir los archivos, ya que el software a usar es *Faro Scene*, y acepta directamente las extensiones de los equipos Faro, que son **.fls*. Como ya se ha comentado y se verá a continuación, este proceso es muy intuitivo. A continuación, se explicará por pasos.

En primer lugar, se abre *Faro Scene* y se crea un proyecto nuevo. En la parte superior del programa aparecen los pasos que se tienen que seguir, tal y como se ilustra en la figura 29.



Figura 29.– Pasos para el registro indicados en el portal de *Faro Scene*.

Para crear el proyecto se indica el nombre que se le quiere dar y la ubicación en el ordenador donde se va a guardar. Se selecciona *create* y ya está completado el primer paso. Así, el software procede al segundo. En la pestaña que se puede ver en la figura 29 se activa *Import*. En este momento se seleccionan los archivos a importar.

Una vez seleccionados se activa la pestaña *Processing*. Este paso significa, simplemente, que se deben procesar los archivos, es decir, cargarlos en el software para proceder a realizar el registro.

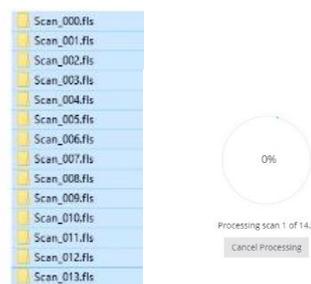


Figura 30.– Escaneos importados al software *Faro Scene*.

Una vez termina el procesamiento y los estacionamientos están cargados en el software, se pueden visualizar los registros. Para proceder a registrar, el programa reconoce automáticamente las dianas esféricas. De este modo, el registro es directo. Cuando se activa la pestaña *Registration* el software registra los estacionamientos prácticamente sin ayuda manual. En las siguientes figuras que se presentan, se ilustra cómo el software expone en los diferentes estacionamientos que se han detectado las esferas correctamente. Si es cierto, aparecen en color verde, y de no serlo se podría modificar de forma manual.



Figura 31.– Verificación de las esferas en *Faro Scene*, escaneo 11.



Figura 32.– Verificación de las esferas en *Faro Scene*, escaneos 2 y 3.

Esta visualización se realiza en todos los escaneos. Se comprueba además, que como se observa en las figuras anteriores, todos los escaneos detectan más de tres esferas, con lo cual la estrategia de planificación del levantamiento proporciona un resultado muy bueno.

Una vez comprobadas las esferas, se selecciona la opción *Register and Verify*. El software, con el registro ofrece la vista de la posición de los escaneos, de forma que se pueda verificar según lo planeado. En las siguientes figuras se puede observar el resultado del registro.

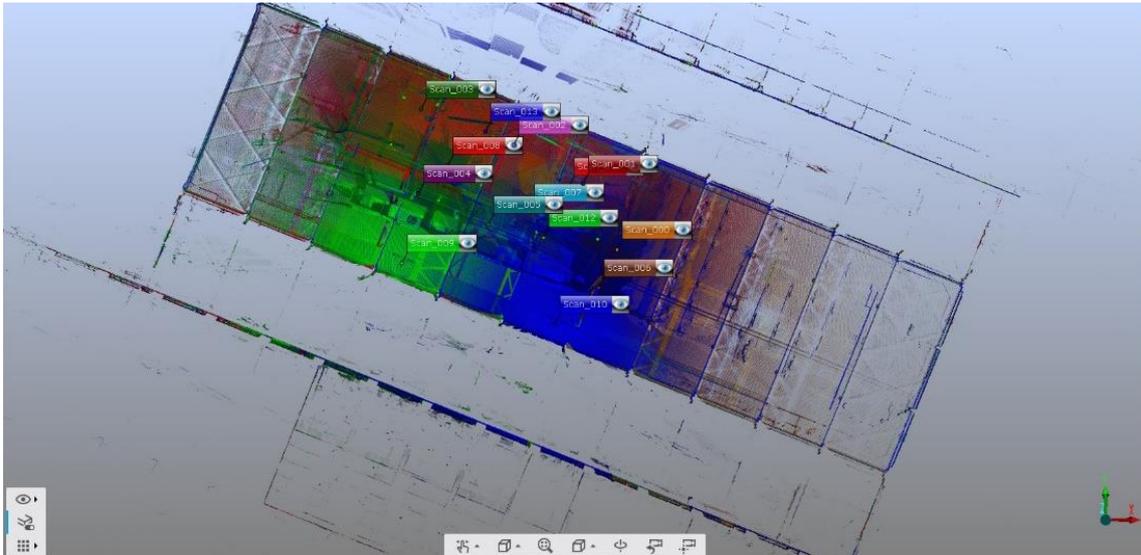


Figura 33.– Resultado del registro con *Faro Scene*.

Se realiza una vista desde otra posición para comprobar que la nube de puntos está bien registrada.

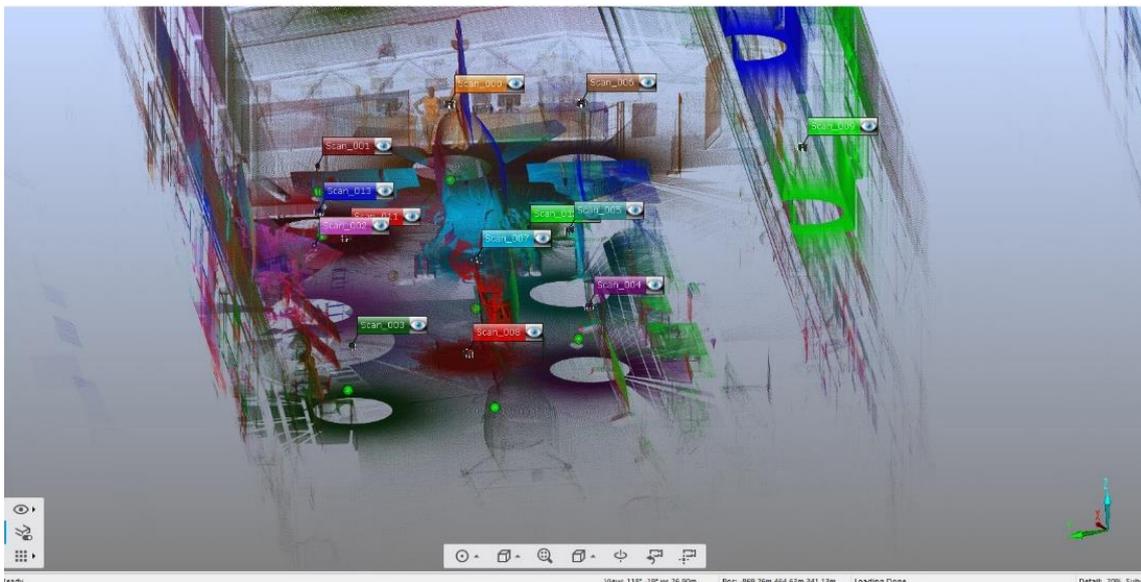


Figura 34.– Resultado del registro con *Faro Scene*, vista dos.

Ahora sólo resta crear un proyecto que disponga de la nube de puntos unificada, de modo que no sea una nube registrada formada por distintos estacionamientos, sino una única nube de puntos. Para realizar esta unificación se emplea la opción *Create Project Point Cloud*.

Este software ha proporcionado resultados óptimos en un intervalo de tiempo breve, el propio programa optimiza la nube y gestiona la minimización del error. Seguidamente se procede a la limpieza de la nube de puntos.

5.3.3. Edición con Faro Scene

Igual que en el caso del levantamiento anterior, ahora se dispone una nube que contiene toda la información que ha captado el equipo láser escáner. De este modo, se procede a realizar la limpieza de la nube para obtener únicamente el objeto de interés. Esta limpieza se inicia en *Faro Scene*. En la pestaña siguiente, *Explore*, aparecen varias herramientas. Se indica la parte que se desea eliminar y se emplea el comando *Select – Delete Selected Points*. En la figura 34 se muestra un ejemplo de la primera limpieza.

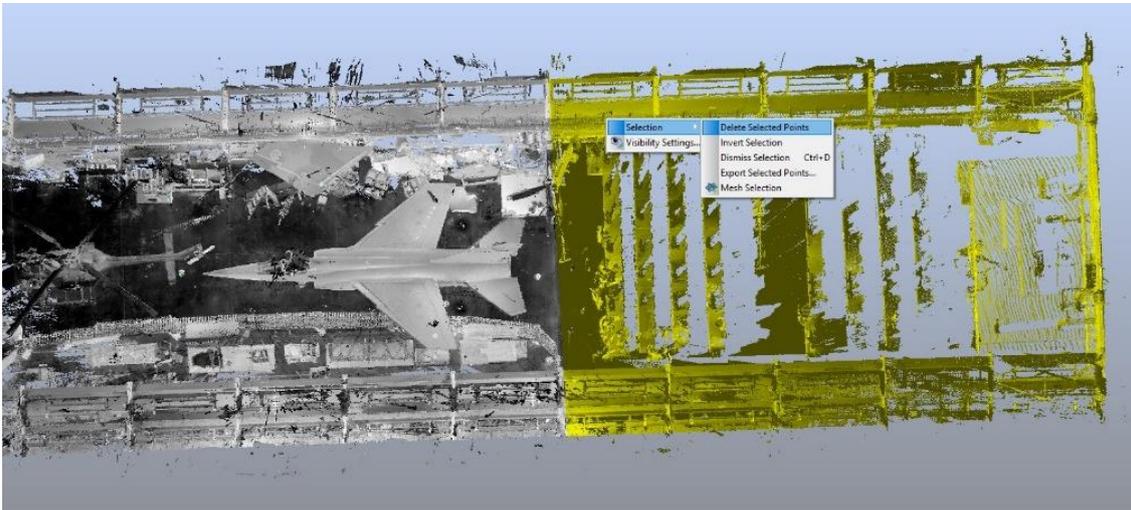


Figura 35.– Inicio del proceso de limpieza en *Faro Scene*.

Una vez se recorta el entorno del hangar, la aeronave queda como se ilustra en la figura 36.

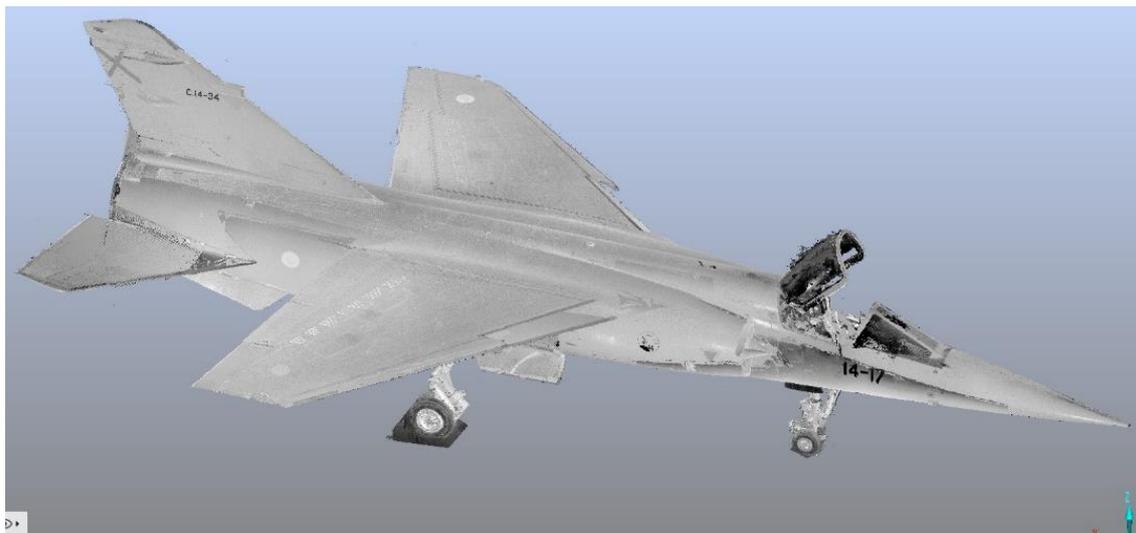


Figura 36.– Nube de puntos de la aeronave recortada en *Faro Scene*.

Seguidamente, se exportó el archivo al formato *.e57 y se importó la nube a *Leica Cyclone*, de modo que se pudiera terminar la limpieza completa, ya que el software *Faro Scene* sólo se pudo disponer en las horas posteriores al proceso de medida.

Una vez importado a *Leica Cyclone* se modificó el sistema de referencia, de modo que en vez de situarse en la posición del primer escaneo realizado, estuviese en una posición que fuese más sencilla de manejar con los comandos de ratón que dispone este programa. Para ello se dibujó un plano de referencia, se activaron *pans* y *rotate* en las opciones de herramientas y se movió el sistema de referencia a la posición de interés.

Finalmente, se exponen las imágenes de las limpiezas que se realizaron posteriormente con la herramienta *Fence – delete inside* de *Leica Cyclone*.

Tren de aterrizaje:

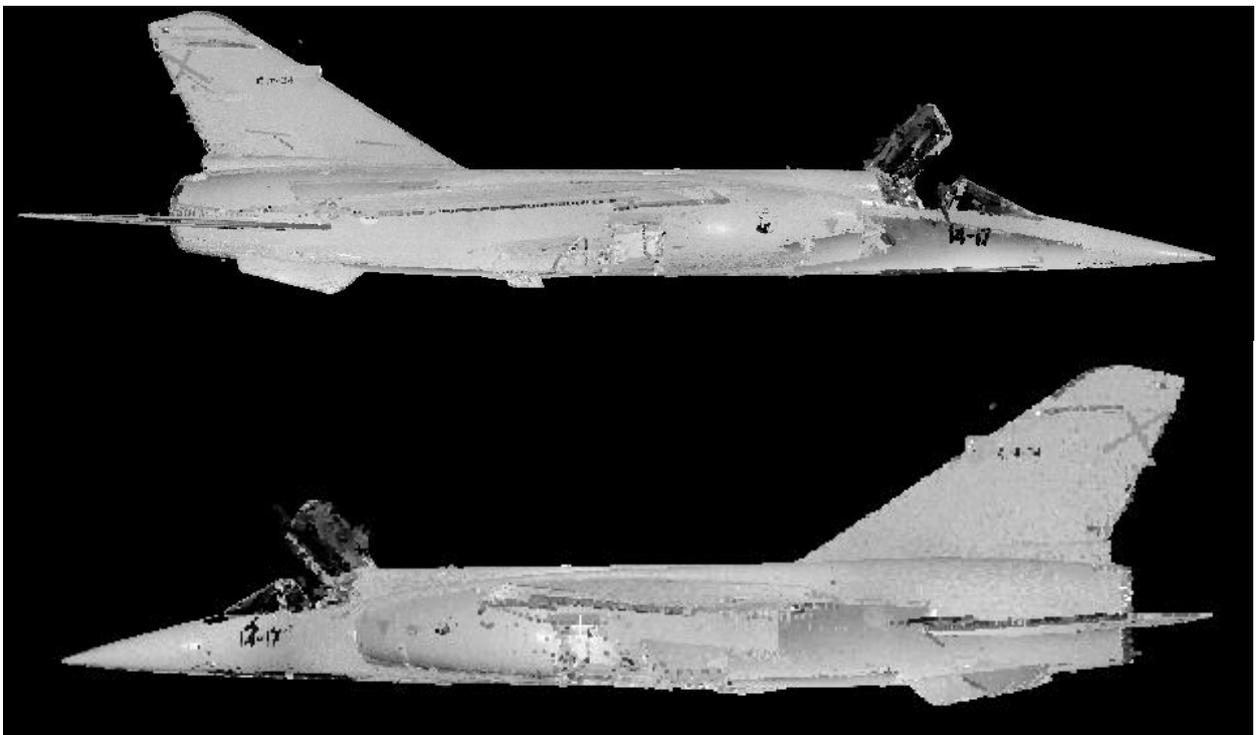


Figura 37.–Faro Focus S. Limpieza del tren de aterrizaje.

Cúpula y asiento:



Figura 38.—Faro Focus S. Limpieza de cúpula y asiento.

Limpieza de cubiertas:

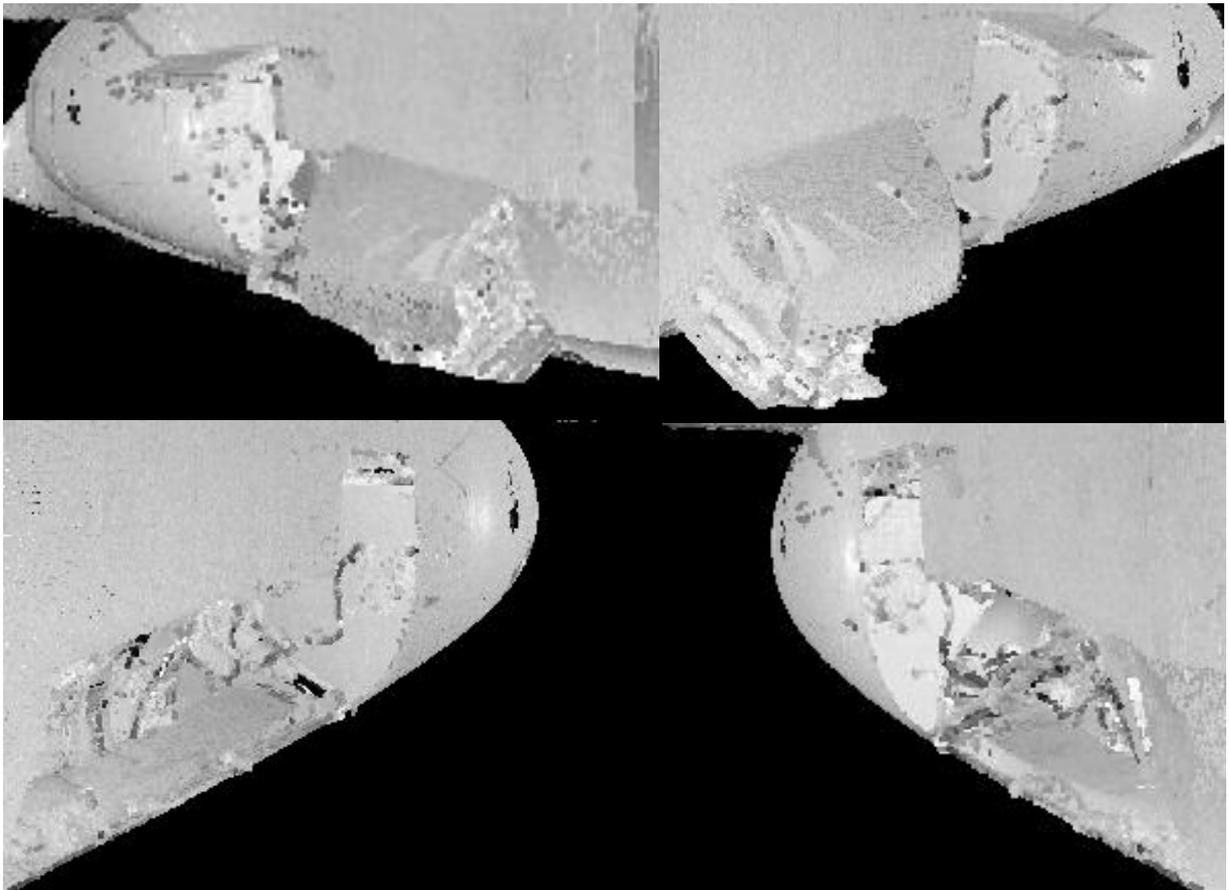


Figura 39.—Faro Focus S. Limpieza de cubiertas.

Limpieza final: perfilado de ala delantera y trasera, eliminación de ruido:

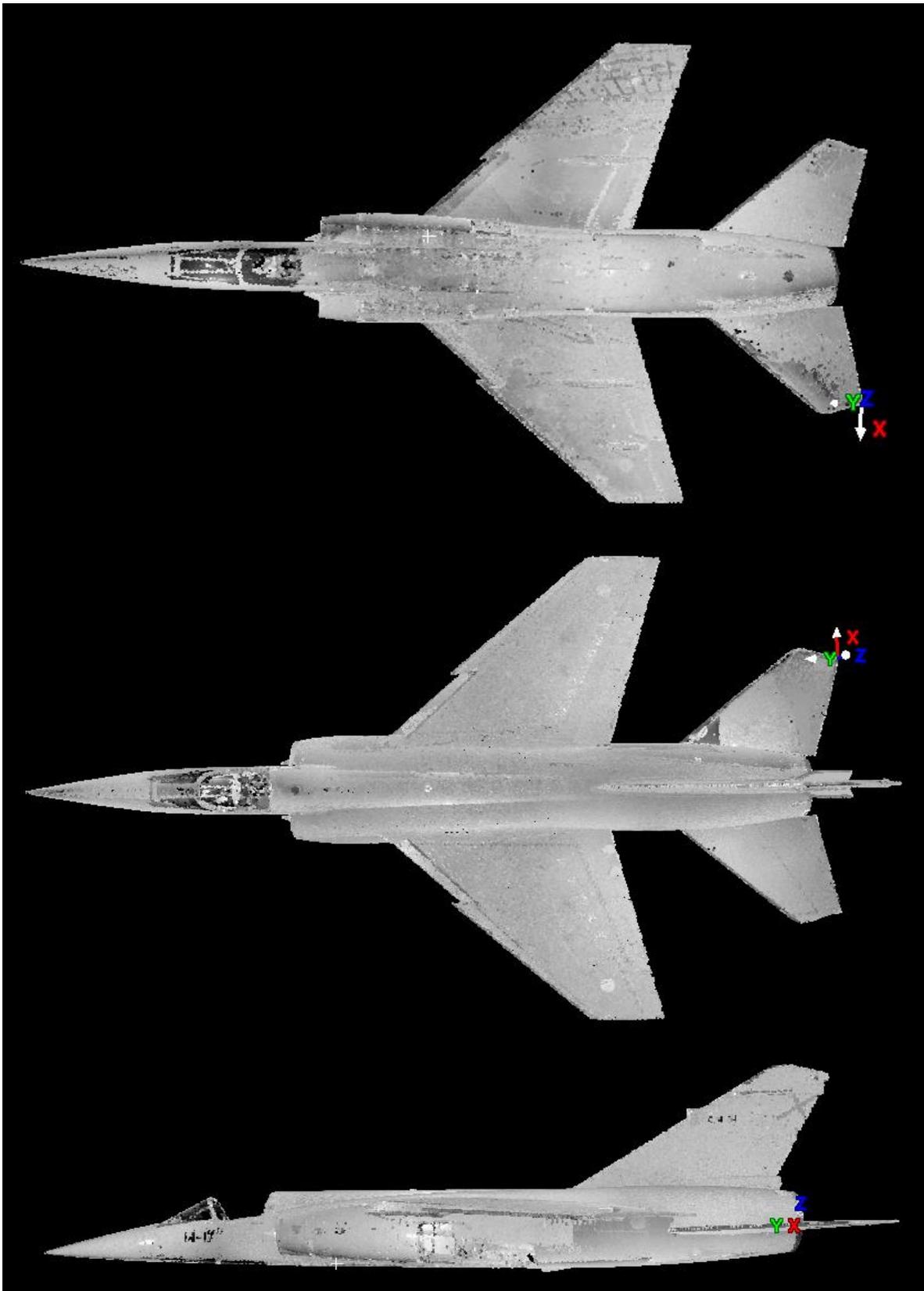


Figura 40.—Faro Focus S. Resultado final de la nube de puntos.

Tal y como se puede observar en la figura 40, este equipo láser escáner ha proporcionado una resolución muy alta en un tiempo bajo de medida. Ahora el nivel de detalle es mucho más alto. A continuación, se exponen zonas concretas donde se aprecia que esta nube de puntos es óptima. A pesar de no haberse realizado escaneo con color, se presenta una definición muy alta, se aprecian incluso las letras más camufladas de la aeronave.

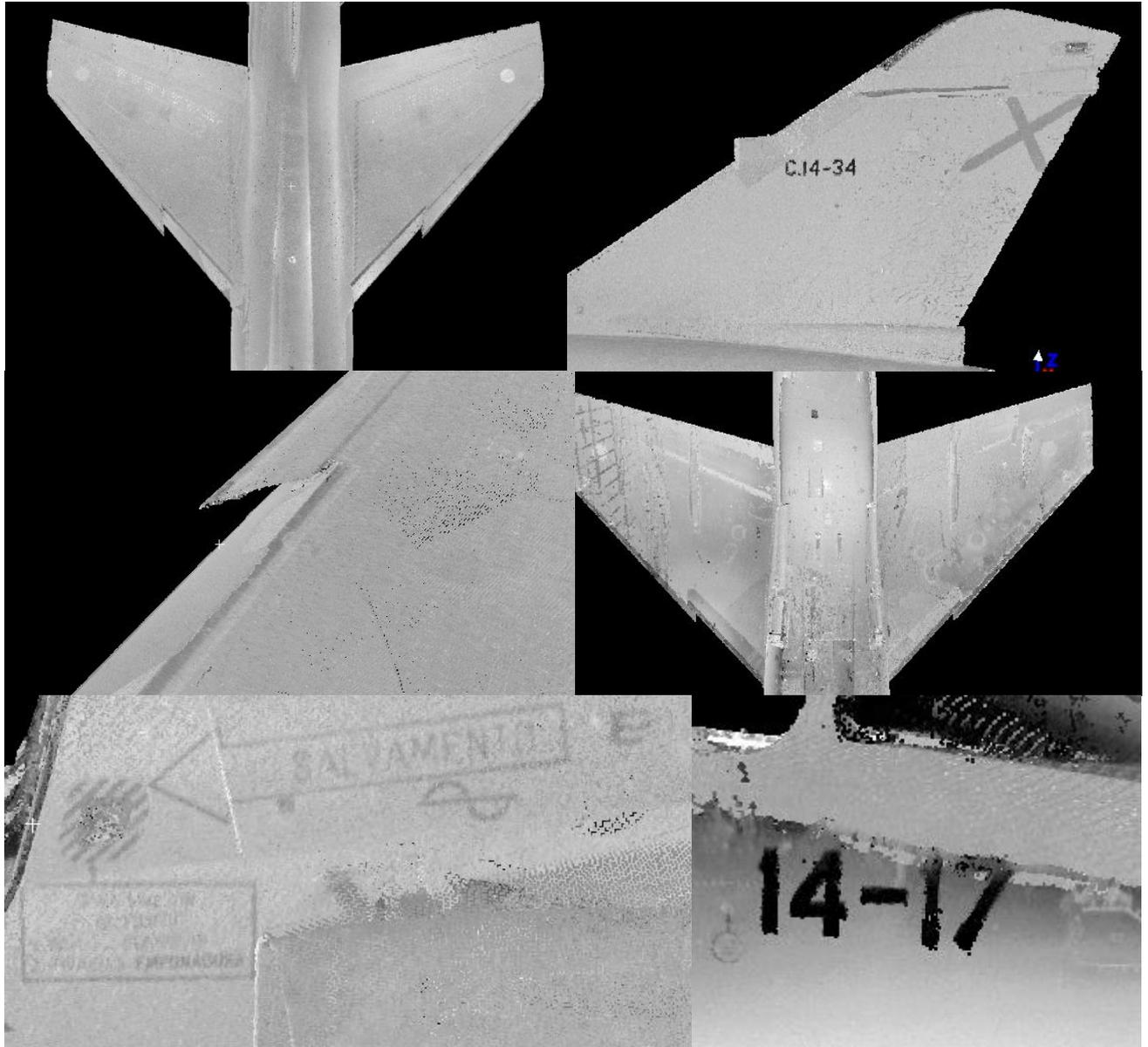


Figura 41.–Faro Focus S. Detalle del resultado final.

Una vez realizado este proceso, se exporta la nube de puntos en formato **.e57* para poder procesarla en el software de modelado.

Las nubes de puntos obtenidas y registradas en un único sistema de referencia, tienen una gran calidad métrica, con precisión milimétrica, que permiten extraer gran información, realizar medidas y extraer conclusiones al respecto, una cuestión de gran importancia en el sector aeronáutico.

Capítulo 6 – Modelización 3D

Una vez se han obtenido las dos nubes de puntos, en el presente capítulo se presenta el proceso de modelización 3D. Inicialmente se realiza la triangulación de las dos nubes de puntos con Leica Cyclone 3DR. Posteriormente se escoge el mallado que ofrece mejores resultados y se extrae un modelo sólido CAD del mismo. El capítulo finaliza con un análisis del modelo frente a la nube de puntos de la que se ha partido para extraerlo.

6.1. Proceso de modelización 3D

Llegados al punto en que se han obtenido las dos nubes de puntos con los diferentes equipos de medida, se va a realizar en este capítulo un proceso de triangulación de las nubes de puntos. Tras el proceso de mallado, se escogerá la red de triángulos que ofrezca más precisión para extraer un modelo 3D de esta.

La nube de puntos permite extraer mucha información del modelo, pero realmente no es un modelo sólido y consistente que pueda tener versatilidad de aplicaciones. Es por esto que se generará el modelo CAD, de modo que el modelo tridimensional sea una superficie sólida.

El objetivo de esta parte del proyecto es, por tanto, conseguir generar superficies que definan un modelo sólido de la nube de puntos obtenida en el levantamiento topográfico 3D. Para ello se empleará el software *Leica Cyclone 3DR*. En este programa se puede texturizar, inspeccionar y generar modelos CAD. En este caso el estudio se centra sobre la obtención de mallas para generar el modelo definitivo sobre el que se analizarán las dimensiones conocidas de la aeronave.

El proceso de mallado consiste en generar una gran cantidad de superficies triangulares por cada tres puntos que el software detecta en la nube. A través de diferentes métodos de mallado, se debe encontrar el óptimo para cada caso y después, generar un sólido a partir de la malla. Hay que tener en cuenta que la malla no es

una superficie continua, sino una superficie formada por una gran cantidad de triángulos. En el siguiente punto se explicará el proceso de mallado del levantamiento realizado con Trimble TX6.

6.2. Mallado de la nube de puntos obtenida, equipo 1

Al introducir la nube el Cyclone 3DR se pueden obtener los datos que se muestran en la figura 42. La nube a mallar tiene más de 13 millones de puntos. La dimensión máxima que indica corresponde a la longitud de la aeronave.

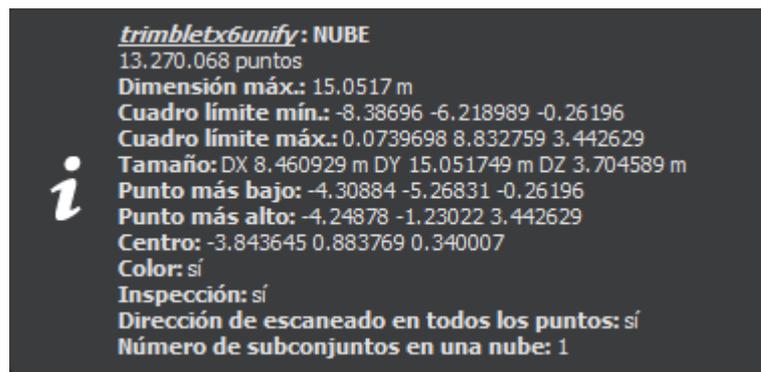


Figura 42.– Trimble TX6. Información de la nube de puntos final.

Para proceder a la triangulación de la nube de puntos con estas características, contando que en el resultado se observaba ruido en algunas partes, se decidió emplear la malla en dos pasos. Se escogió esta metodología para generar primero una malla rugosa y refinarla posteriormente.

Los parámetros que se introdujeron en el primer paso –creación de malla rugosa– son los siguientes. El programa detecta y asigna directamente los parámetros óptimos para el mallado. En este caso se empleó el comando *3D Mesh – Mallado en dos pasos*.

Parámetros de configuración de la primera malla rugosa:

- Distancia promedio entre puntos: 0.08118 m.
- Detección de orificios – Tamaño del triángulo: 0.16354 m.
- No ignorar direcciones de escaneo.

Los resultados de la malla se muestran en la siguiente figura.

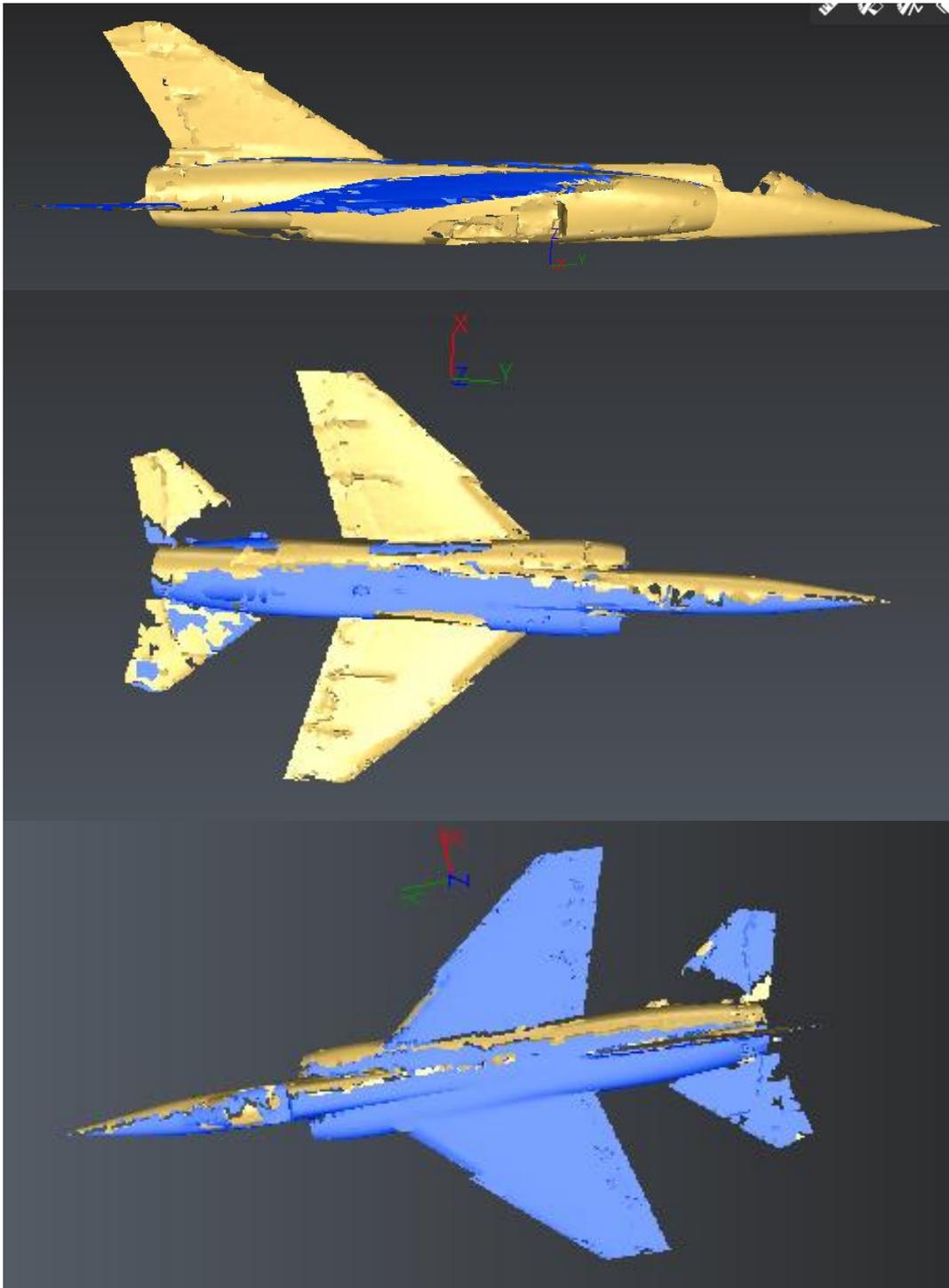


Figura 43.– Trimble TX6. Primer mallado rugoso.

El siguiente paso fue realizar un refinado, inicialmente se planteó la siguiente configuración de refinado:

- Refinado desde nube.
- Método: mantener sólo los mejores puntos.
- Error de desviación: 0.00041 m.
- Sin modificación de borde libre.

En la figura 44 se presenta el resultado de este refinado.

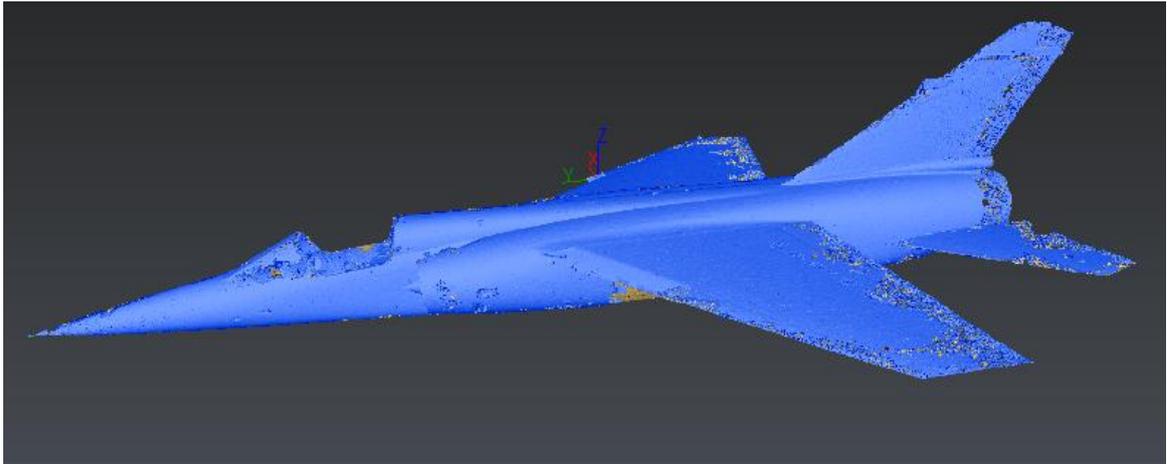


Figura 44.– Trimble TX6. Primer refinado, descartado.

Este refinado fue descartado. Como se puede ver en la figura anterior, sobre todo en bordes de salida de ala había demasiado ruido, el error de desviación era demasiado pequeño para mejorar la malla rugosa. De este modo, se canceló la vista previa y se introdujeron los siguientes nuevos parámetros.

- Refinado desde nube.
- Método: mantener sólo los mejores puntos.
- Error de desviación: 0.7 m.
- Distancia: 0,32018 m.
- Sin modificación de borde libre.

Con esta configuración se obtuvo la malla que se ilustra en la figura 45.

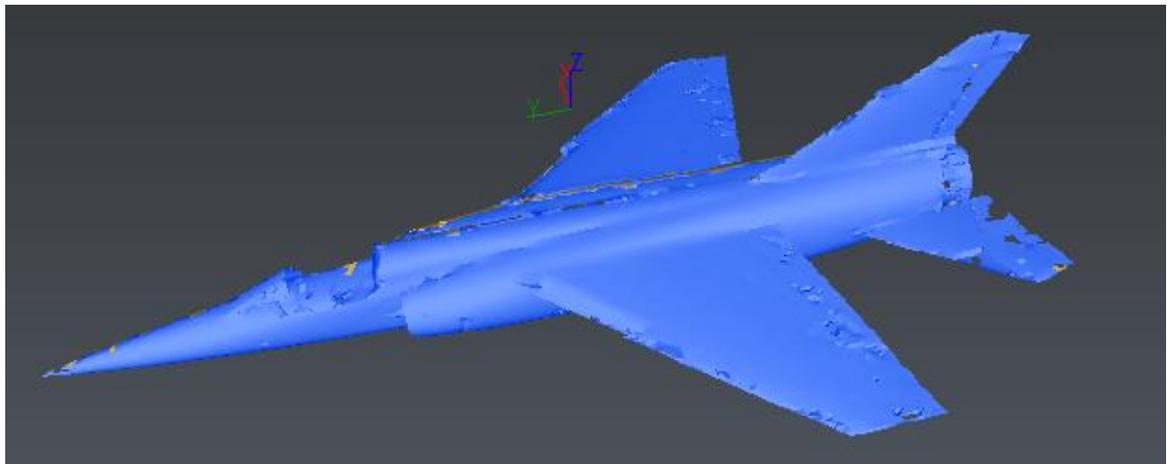


Figura 45.– Trimble TX6. Segundo refinado, aceptado.

Con este resultado se presentaba una malla aún bastante irregular, pero sin exceso ruido. De este modo, se decidió procesarla y posteriormente realizar otro último refinado.

Como se ilustra en la figura anterior, la aeronave tenía orificios. Con la herramienta *llenar orificios* se trató de rellenar todos los que se podía

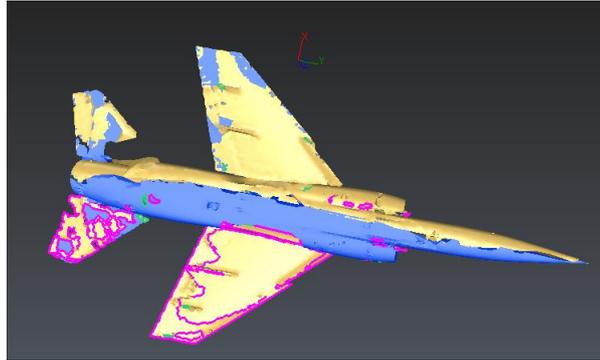


Figura 46.– Trimble TX6. Rellenado de orificios.

Una vez rellenados todos los orificios corregibles, se procedió a realizar un segundo refinado de la malla, esta vez por interpolación de la nube de puntos. Esta forma de refinado es conveniente para casos en los que la nube de puntos dispone de mucho ruido. La configuración del mallado fue la siguiente:

Parámetros de configuración del primer refinado:

- Refinar con error de desviación.
- Error de desviación: 0.00039 m.
- Número máximo de triángulos: 661990.
- Distancia: 0.07819 m.
- Reorganización local.

El resultado se expone en la figura 47.

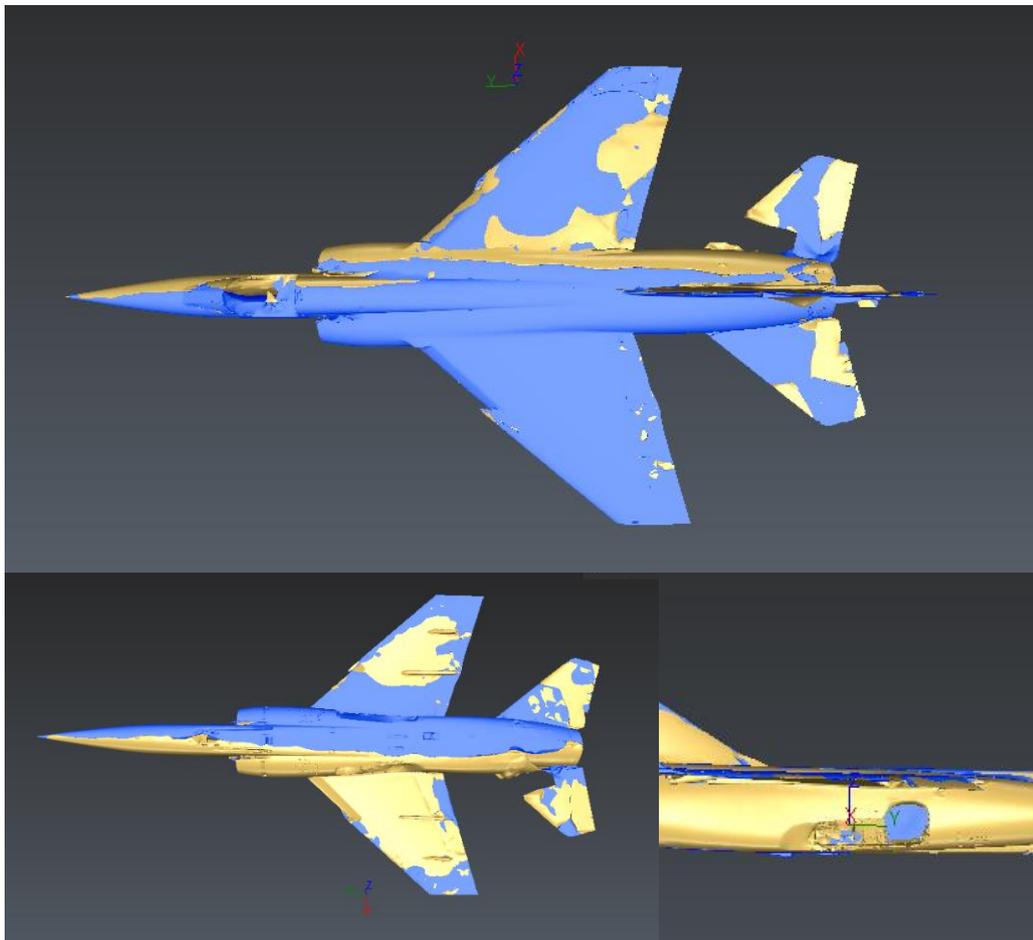


Figura 47.– Trimble TX6. Resultado del segundo refinado.

Finalmente, se procedió a corregir el error del estabilizador horizontal que se había comentado anteriormente. Ha sido sencillo suplantar la superficie mediante la herramienta *Extractor de edificios*. En esta se dibuja una superficie lisa por donde se pretende dibujar una superficie y en su modo manual permite extraerla. En la siguiente imagen se expone dicha corrección.

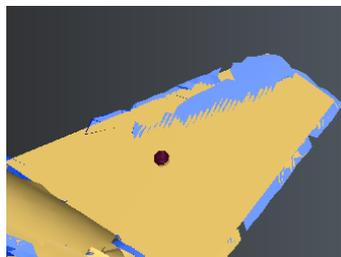


Figura 48.– Trimble TX6. Corrección del error del estabilizador horizontal.

Tras esta corrección, se dio por finalizado el proceso de mallado. Se intentó rellenar más orificios, refinados y suavizados. Sin embargo, el programa no permitía más rellenos, en los refinados extraía demasiado ruido y los suavizados disminuían el tamaño de la malla.

Es importante tener en cuenta que el proceso de mallado se debe realizar con mucha delicadeza. En caso de forzar herramientas como, por ejemplo, realizar suavizados cuando el modelo no admite más refinado, se pueden modificar las dimensiones de la aeronave real y caer en errores considerables que no se puedan asumir.

A continuación, se explicará el proceso de mallado con el levantamiento realizado mediante Faro Focus S y se analizarán los resultados de ambas mallas.

6.3. Mallado de la nube de puntos obtenida, equipo 2

En primer lugar, se presenta la información acerca de la nube de puntos final que ofrece el programa:

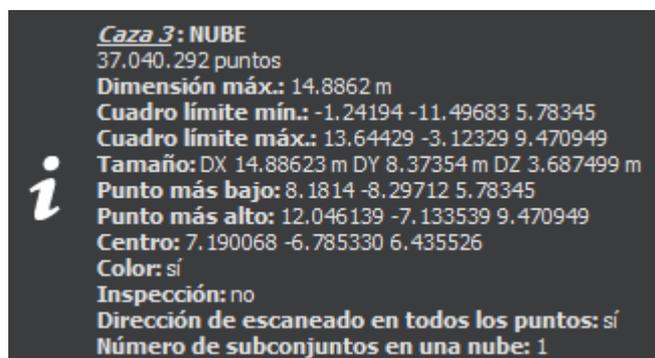


Figura 49.– Faro Focus S. Información de la nube de puntos importada.

Se puede ver que, aunque los escaneos con Faro Focus S estaban programados para menos puntos por escaneo que en Trimble TX6, la densidad obtenida es mayor. Esto es debido a que los escaneos se centralizaron directamente en la aeronave.

En el caso del modelo de Faro Focus S también se empezó a realizar el mallado mediante una malla regular rugosa. Es importante que, para que se elimine el ruido sin ser excesivo, la primera malla no sea perfecta. Así los indican los manuales de *Leica Cyclone 3DR*.

En primer lugar, la primera malla disponía la siguiente configuración:

Parámetros de configuración de la primera malla rugosa:

- Mallado de muestreo regular.
- Distancia promedio entre puntos: 0.007 m.
- Detección de orificios. Tamaño del triángulo: 0.6 m.

El resultado de este mallado se expone en la figura 50.

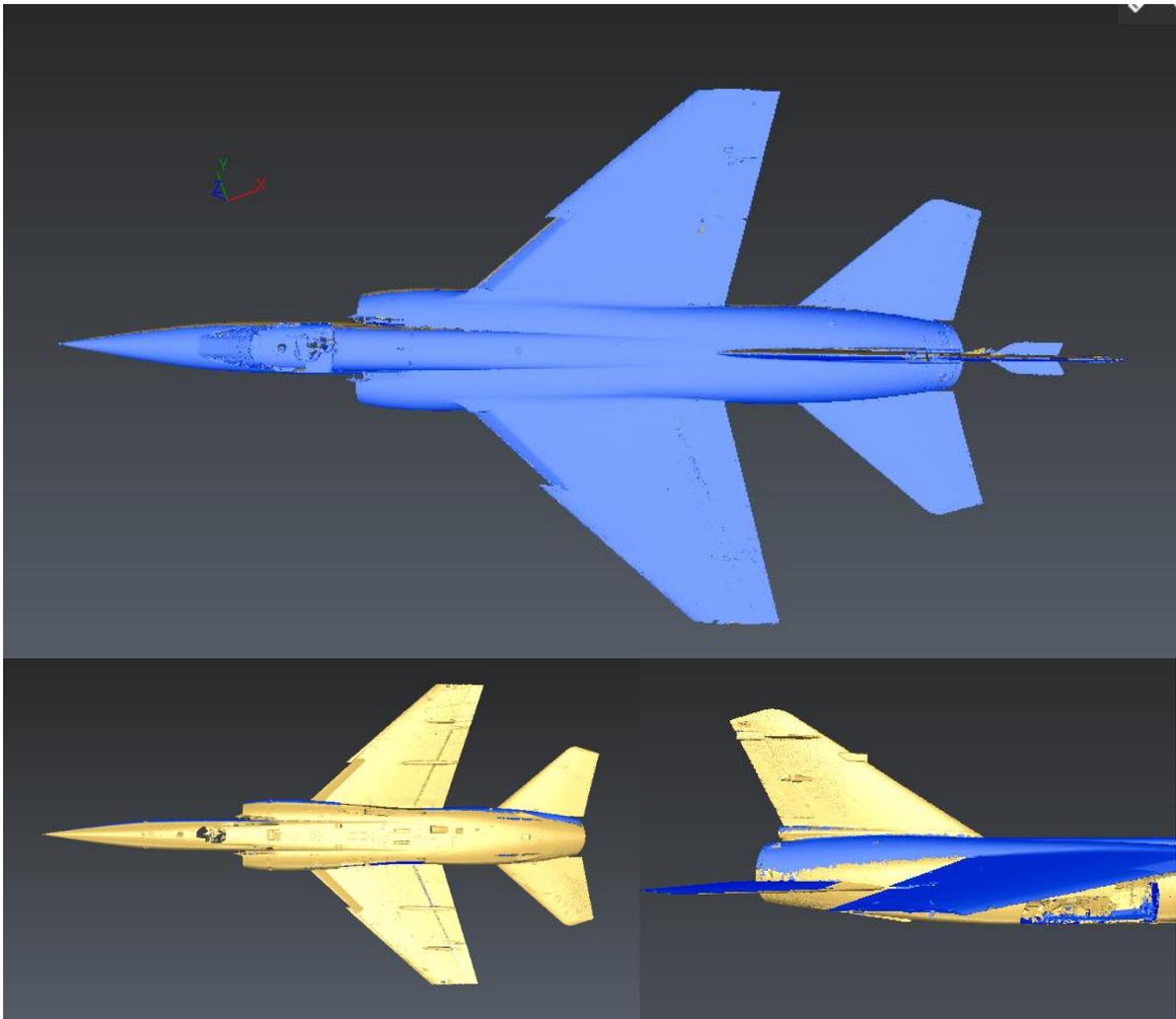


Figura 50.– Faro Focus S. Malla regular 1 generada.

Como se observa en la figura 50, este mallado generaba mejores resultados. Sin embargo, había aspectos que se podían mejorar, de modo que se procedió a trabajar la malla. En primer lugar, se procedió a rellenar los agujeros laterales en la medida de lo posible.

En primer lugar, para el perfil derecho se empleó la herramienta *rellenar orificio*, se seleccionó la opción de intentar adaptar a la curvatura. Primero se rellenaron los orificios internos según muestra la figura 51. Después se realizó el rellenado del contorno exterior, ilustrado en la figura 52. Finalmente, para mejorar el acabado se separó la malla con la herramienta *Limpiar/separar* y se realizó un suavizado en la zona. Se empleó una desviación de control relativamente alta para que desapareciese la zona rugosa –ver figura 53–.

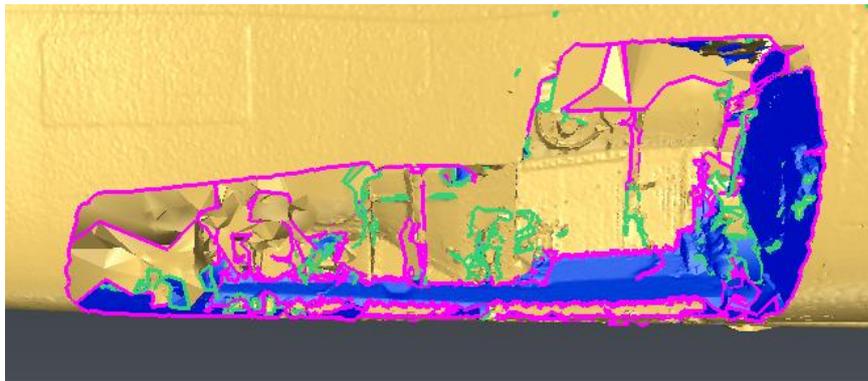


Figura 51.– Faro Focus S. Malla 1, rellenado contornos internos del orificio lateral derecho.

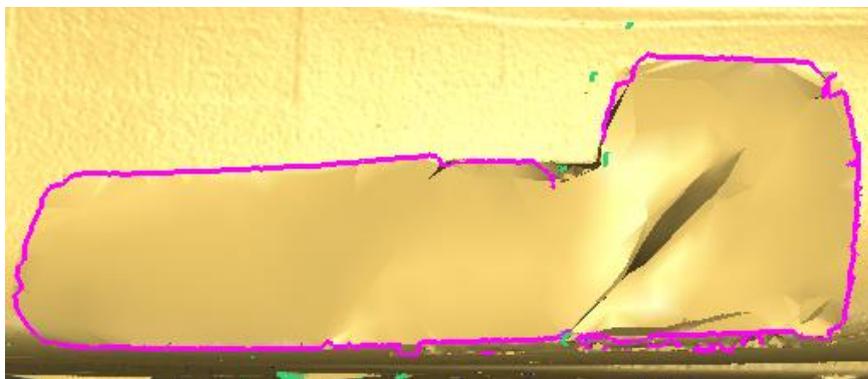


Figura 52.– Faro Focus S. Malla 1, rellenado contorno externo del orificio lateral derecho.

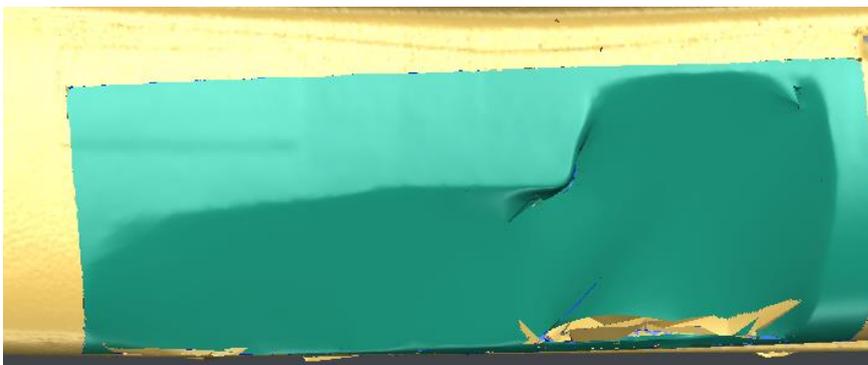


Figura 53.– Faro Focus S. Malla 1, suavizado del orificio lateral derecho.

El orificio no permitió mejorar más con las herramientas disponibles, si fuese necesario podría mejorarse en otros softwares de CAD/CAM. Después se agruparon las mallas de nuevo indicando *coser bordes*.

En cuanto al agujero izquierdo, el proceso realizado fue el mismo. La diferencia se dio en que este lado tuvo que ser rellenado con triángulos en su interior mediante la opción *Manual Mesh*. Una vez realizado este paso se realizó el mismo procedimiento al agujero anterior.

Por otra parte, el fuselaje disponía de algunas pequeñas líneas de separación. Para solucionar este problema se empleó el comando *Fusionar bordes comunes*, seleccionando a la vez, *intentar llenar orificios para conservar sólo el borde exterior*.

Adicionalmente, se realizó una mejora en la cúpula, que presentaba muchos bordes puntiagudos libres. En primer lugar, se separó la parte que figura de color rosa en la figura 53 con la herramienta *Limpiar/Separar*. Se realizó un suavizado ligero para que no suponga una reducción del tamaño real de la superficie.

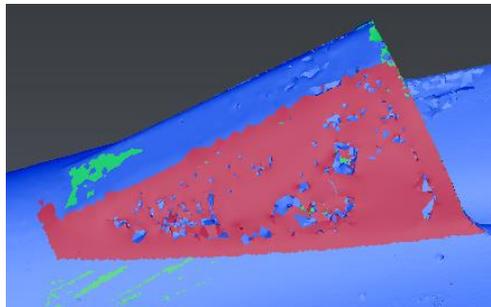


Figura 54.– Faro Focus S. Malla 1, suavizado de la cúpula.

Posteriormente, con la herramienta *Rellenar Orificios* se rellenaron los huecos que se observan en la figura anterior, quedando el resultado como se muestra en la figura 54.

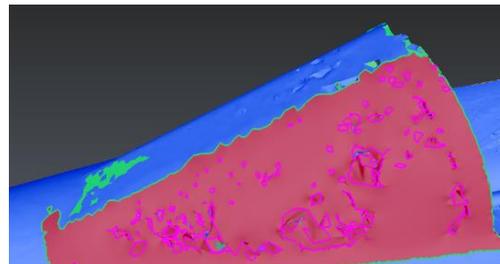


Figura 55.– Faro Focus S. Malla 1, relleno de orificios en la cúpula.

Seguidamente se eliminó el ruido interior –ver figura 55– y se procedió a realizar el mismo procedimiento en el lateral opuesto.

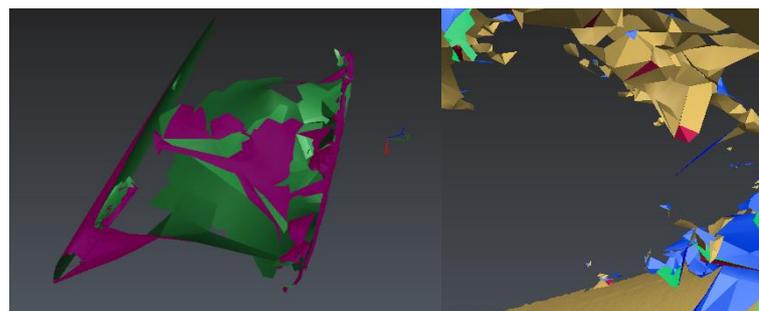


Figura 56.– Faro Focus S. Malla 1, limpieza de ruido en el interior de la cúpula.

Por otra parte, en la planta inferior de la aeronave había un orificio grande, tal y como se muestra en la figura 57. Este era debido a la extracción del tren de aterrizaje.

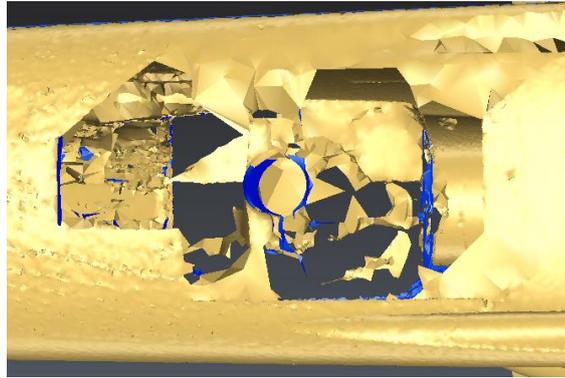


Figura 57.– Faro Focus S. Orificio planta inferior.

Este fue recortado con la herramienta *limpiar/separar* y se pudo rellenar completamente, tal y como muestra la figura 58.

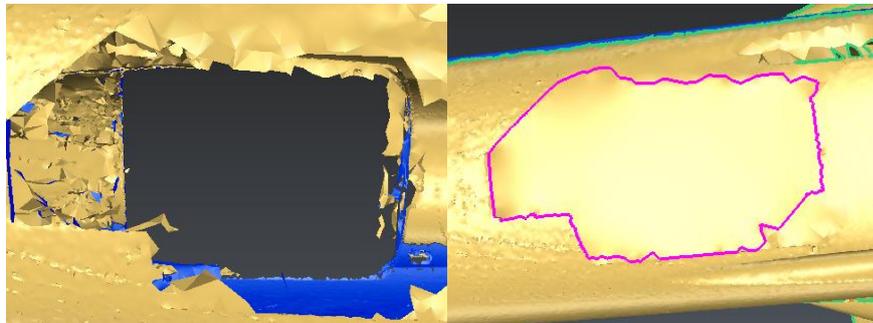


Figura 58.– Faro Focus S. Orificio planta inferior corregido.

Una vez se eliminó el ruido que aún restaba en la parte derecha de la figura 55 y se solucionó el orificio más grande de la planta inferior de la aeronave, se unificaron todas las mallas separadas y se cosieron de nuevo todos los bordes con la herramienta antes expuesta. En este proceso se seleccionó la opción *intentar crear una malla estanca*, y se obtuvo el resultado que se expone en la figura 59.

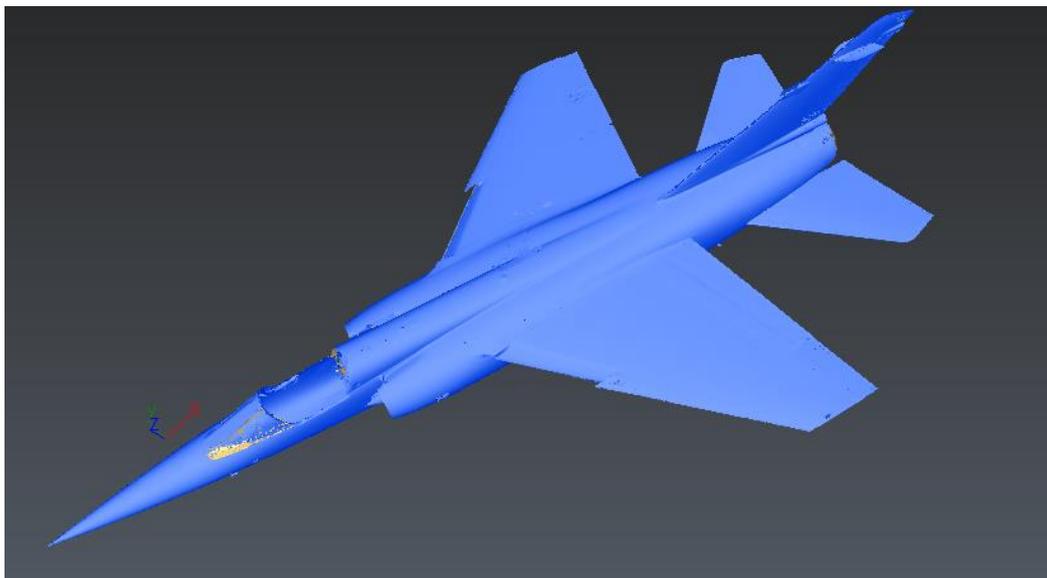


Figura 59.– Faro Focus S. Malla 1, unión de mallas y creación de malla estanca.

Finalmente, se obtuvo el mallado que se expone en la figura 60.

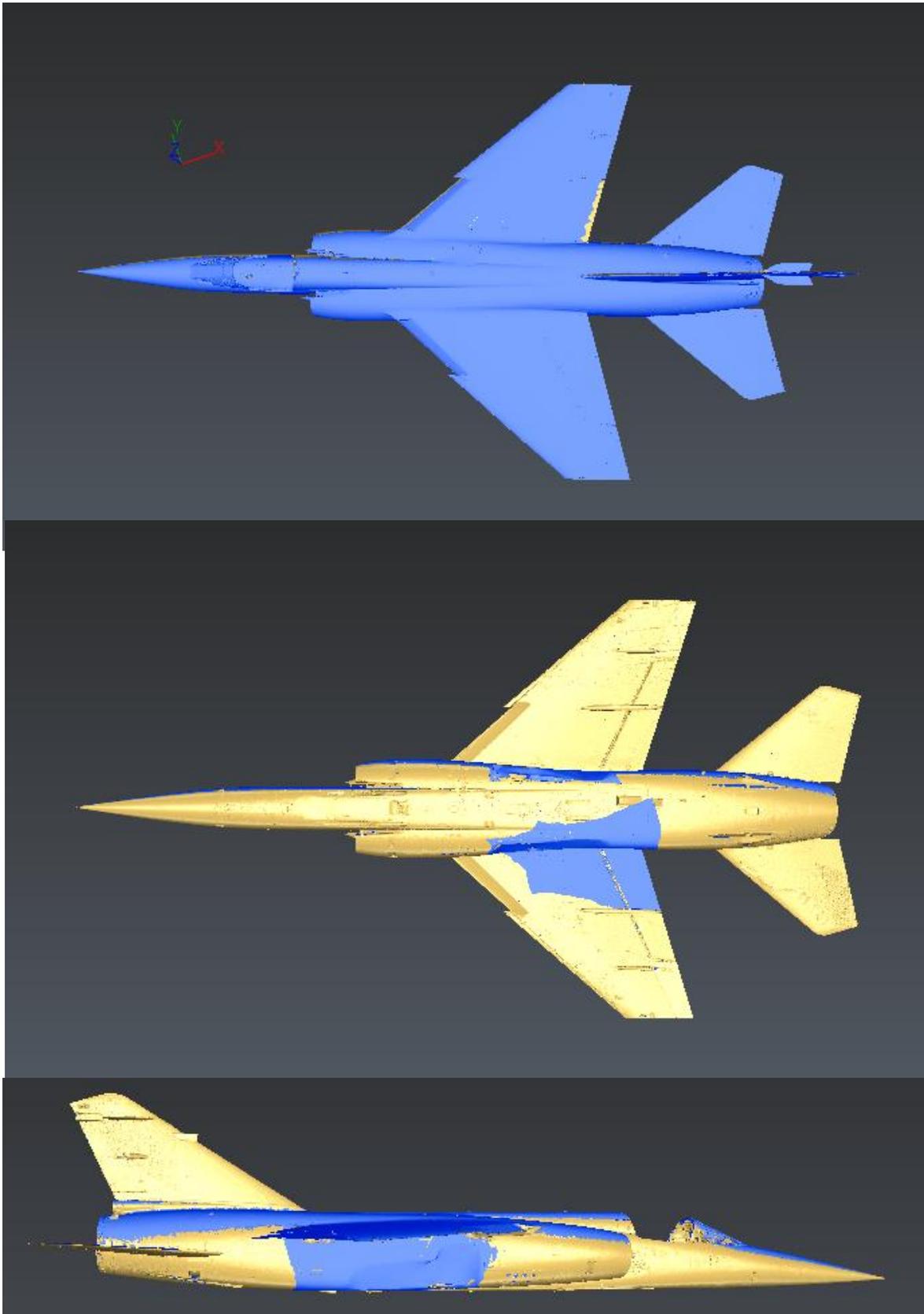


Figura 60.– Faro Focus S. Mallado final.

6.4. Análisis del mallado y extracción del modelo CAD

Tal y como se ha podido ver en los apartados anteriores, la malla generada con el levantamiento de Trimble TX6 es de inferior calidad a la generada con el de Faro Focus S. Incluso la nube inicial presenta más puntos en Faro que en Trimble, teniendo en cuenta que los escaneos estaban programados para menos puntos en la medición con Faro Focus. Esto se debe a diferentes factores.

En primer lugar, cabe decir que la precisión de Faro Focus S es mayor a la de Trimble TX6. La serie Focus, como se ha comentado a lo largo del proyecto, es líder en el mercado industrial actual. Se ha obtenido una nube de puntos de alta calidad y detalle. Esto no significa que con Trimble TX6 no se pueda realizar el modelado, sino que es más costoso y requeriría de otros softwares.

Otro parámetro a considerar es la disposición de escaneos. Aunque una buena disposición no influye en que se escanee un mayor o menor rango, en el levantamiento de Faro Focus S se han realizado más estacionamientos rodeando a la aeronave, además del uso de dianas que aumenta la precisión.

Por estos motivos, la nube de puntos es más precisa en el modelo Faro Focus S, que es el modelo del cual se ha extraído el CAD. El aumento de precisión en la nube de puntos supone un mallado con mejor acabado. En la figura 61 se ilustra una imagen comparativa donde se aprecia el acabado del ala y del estabilizador horizontal.

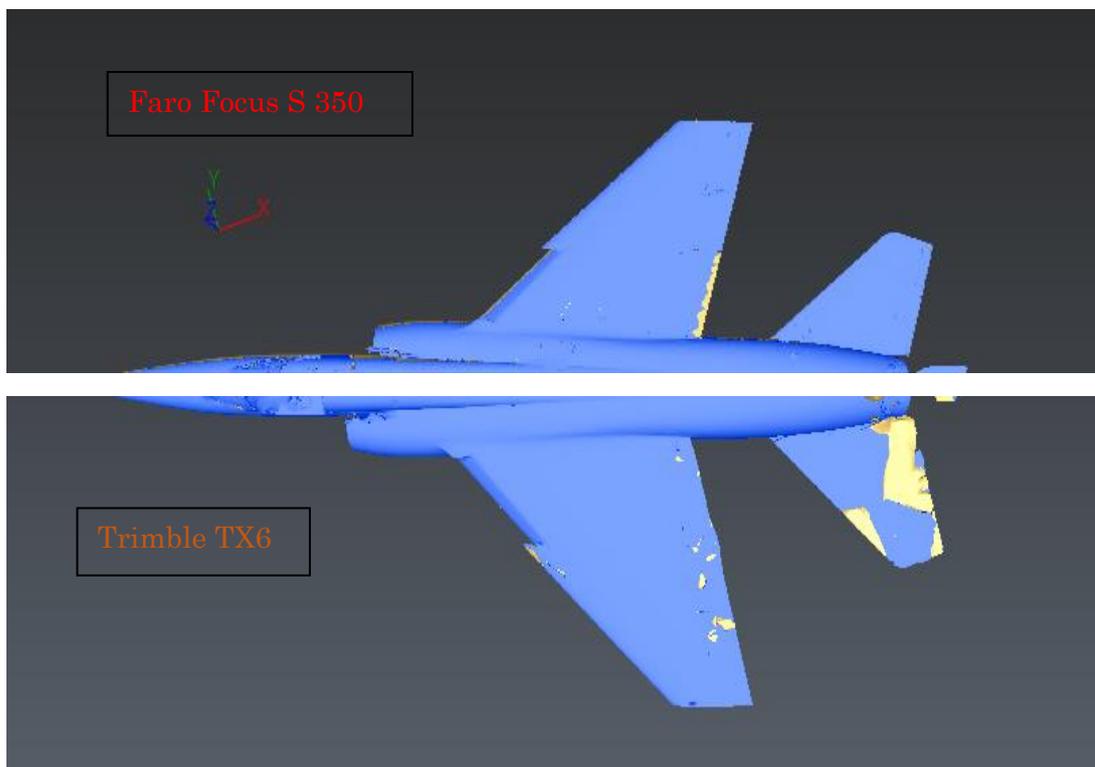


Figura 61.– Comparativa de mallados.

Así pues, se procede a la extracción del modelo CAD para la malla del levantamiento realizado con Faro Focus S 350. En el módulo *Extraer* de *Leica Cyclone 3DR* se emplea el comando *Surface CAD – From Mesh*. Así se llega al modelo expuesto en la figura 62.

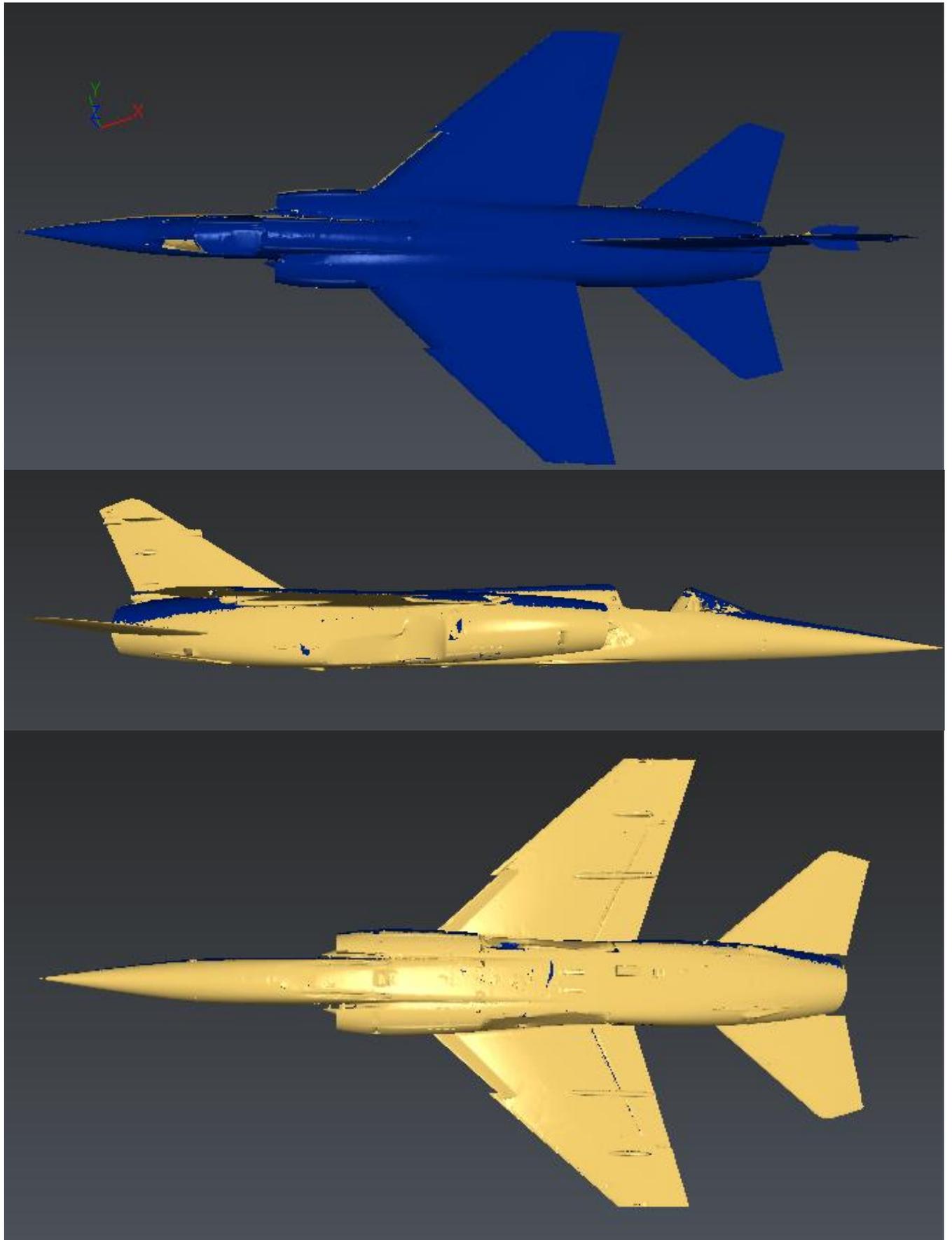


Figura 62.– Modelo CAD final.

Previamente al análisis de dimensiones con el modelo cad, se expone a continuación una inspección realizada con *Leica Cyclone 3DR*. Esta consiste en comparar el modelo CAD frente a la nube de puntos. Para realizarla se emplea el comando *Analisis –Cloud to CAD*. En el programa se ha realizado el informe que se presenta. En esta inspección se ha coloreado el modelo CAD, y se puede observar que el 99,9% de puntos del modelo corresponden a la nube. Respecto a las zonas no identificadas se puede ver que son los agujeros tapados en el mallado, por lo que es posible concluir que el proceso de modelado es bueno visto desde la comparación nube–CAD. Sin embargo, como ya se ha visto, las técnicas de mallado y modelado son mejorables.

Seguidamente, además del informe, que asigna la vista de forma automática, se presenta una imagen que permite apreciar los detalles de los huecos no identificados en relación a la nube de puntos.

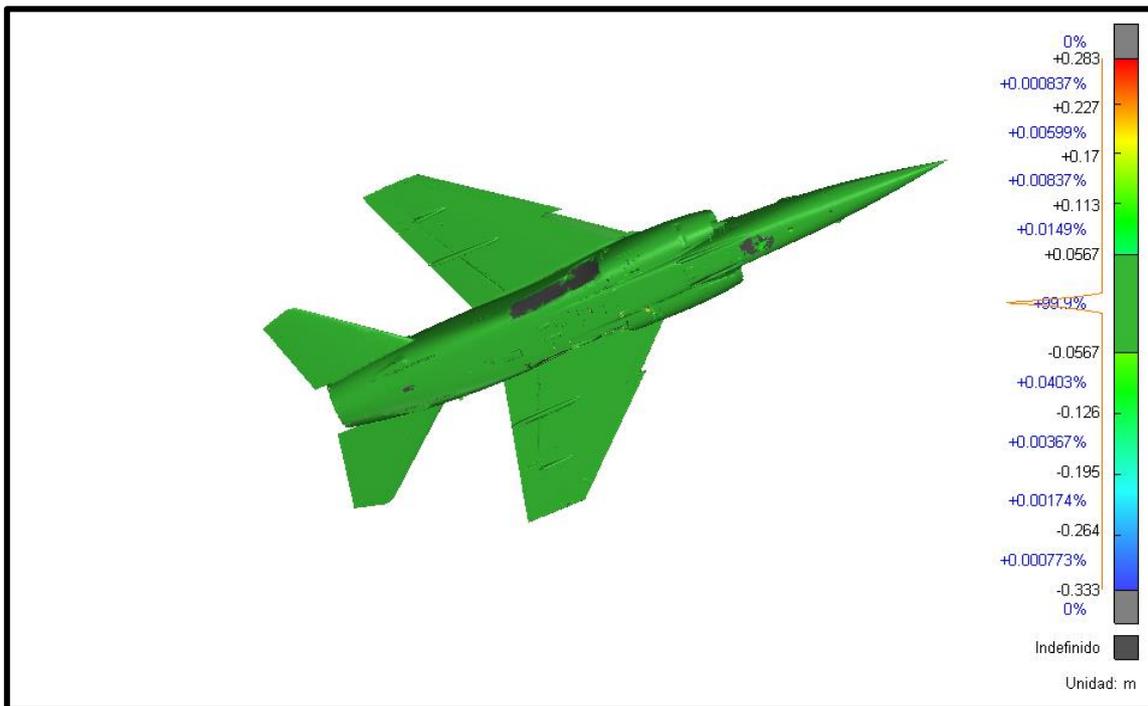
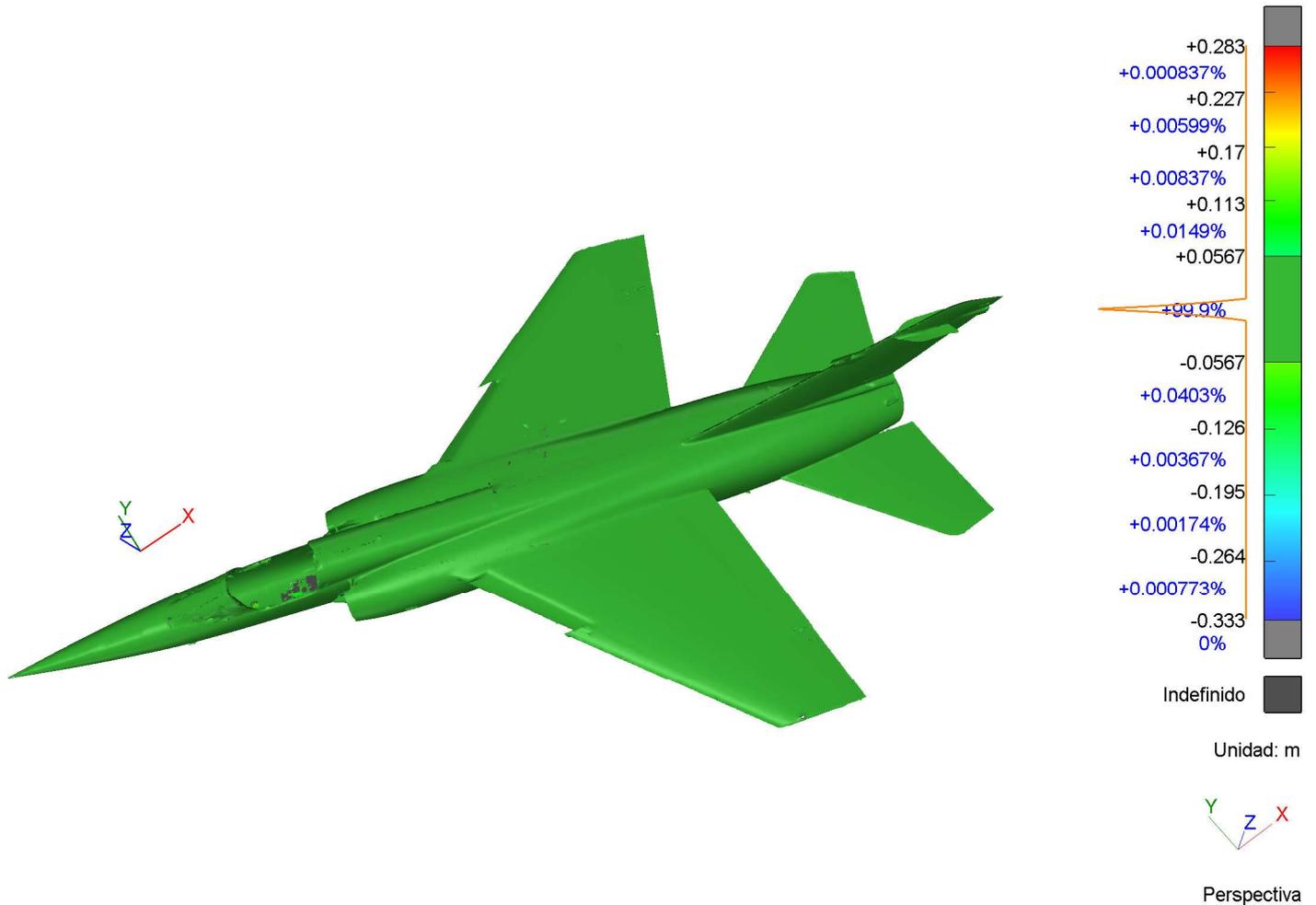


Figura 63.– Imagen complementaria al informe de inspección CAD–Nube.



Análisis

-Inspección del modelo CAD frente a la nube de puntos- Color aplicado al modelo CAD



Modelo realizado con un equipo láser escáner Faro Focus S 350

Capítulo 7 – Presentación de resultados, planos del modelo

En el presente capítulo se explica el proceso de obtención de planos 2D a partir de ortoimágenes del modelo CAD extraído. Seguidamente se adjuntan los resultados de AutoCAD y se realiza el análisis de dimensiones.

Para presentar los resultados, se ha decidido emplear la herramienta del software *Leica Cyclone 3DR* de extracción de ortoimágenes. Las mallas son muy pesadas y dificultan el procesamiento de extracción de planos, por lo que se ha empleado esta metodología que agiliza mucho el proceso.

Las ortoimágenes son fotografías georreferenciadas, es decir, se puede medir directamente en estas. En el programa se accede al panel *Texturización* y se encuentra el comando *Extraer Ortoimagen*.

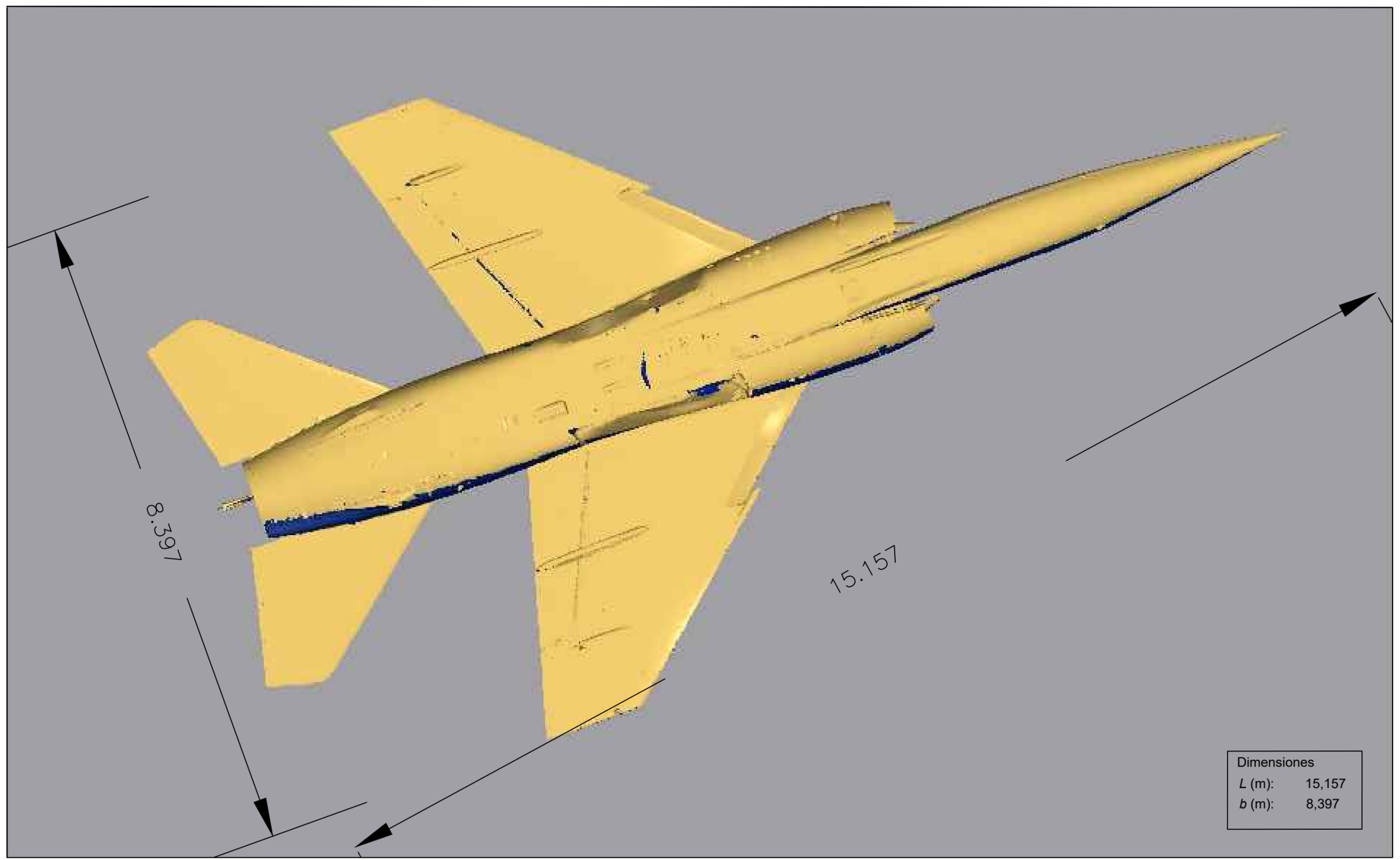
Empleando esta función, el programa asocia directamente las perspectivas correspondientes desde las que se puede medir. Una vez validado el comando se exporta al formato **.tif*, que permite medir directamente desde AutoCAD.

Cuando se exporta el fichero se guarda la imagen y un fichero **.txt* que AutoCAD puede leer directamente.

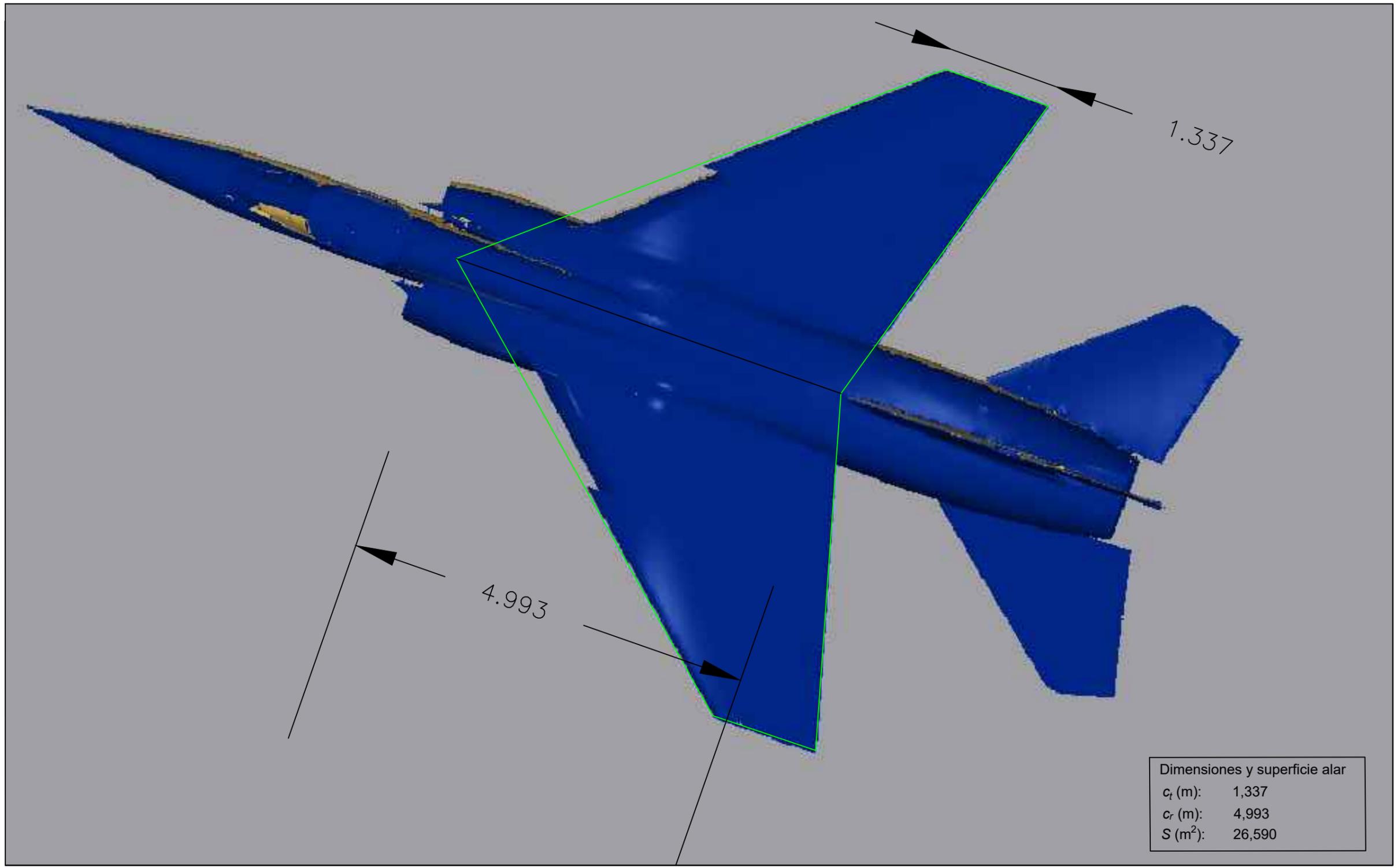
De este modo, se accede a AutoCAD y se teclea en la barra de comandos *insertmap*. Se selecciona la ortoimagen y el programa detecta directamente el fichero **.txt*. De este modo, se validan los puntos que introduce automáticamente y se puede proceder a escalar la ortoimagen y extraer medidas.

Con esta metodología se han realizado los dos planos que se muestran a continuación, donde se miden las dimensiones conocidas de la aeronave real para poder analizar los resultados.

Para calcular la superficie alar se ha realizado una aproximación trapezoidal dibujando una polilínea que la encierra. Tecleando en la barra de comandos *list* se obtiene una lista de datos que contiene el valor de la superficie que encierra la polilínea. En las siguientes páginas se muestra el resultado obtenido



DASSAULT MIRAGE F1M - PLANTA INFERIOR		
ESTUDIANTE:	Gema Martínez Esteve	
TUTOR:	Dr. Enrique Priego de los Santos	HOJA Nº
GRADO EN INGENIERÍA AEROESPACIAL		1 DE 2
Escala: 1:50		UPV
ESCUELA TÉCNICA SUPERIOR DE LA INGENIERÍA DEL DISEÑO		



Dimensiones y superficie alar	
c_t (m):	1,337
c_r (m):	4,993
S (m ²):	26,590



DASSAULT MIRAGE F1M - PLANTA		
ESTUDIANTE:	Gema Martínez Esteve	
TUTOR:	Dr. Enrique Priego de los Santos	HOJA Nº
GRADO EN INGENIERÍA AEROSPAICIAL		2 DE 2
Escala: 1:50	Fecha: Julio 2020	UPV
ESCUELA TÉCNICA SUPERIOR DE LA INGENIERÍA DEL DISEÑO		

7.1. Análisis de las dimensiones

Según las medidas que se han obtenido y que se indican en los planos, en la tabla 11 se muestran los resultados obtenidos y el cálculo del error absoluto de las medidas.

Medida	Valor teórico	Valor medido	Error absoluto
L (m)	15,200	15,167	0,033
b (m)	8,400	8,397	0,003
S (m ²)	25,000	26,590	1,590
c_t (m)	–	1,337	–
c_r (m)	–	4,993	–

Tabla 11.– Resultados obtenidos y comparación con los teóricos de la aeronave.

En la tabla anterior se pueden observar diferentes aspectos respecto al error obtenido. En primer lugar, en la medida de la envergadura se obtiene un error de tan sólo 3 mm, con lo que se puede concluir que es una medida de alta precisión.

Sin embargo, cabe analizar los motivos por los que el error aumenta en las otras dos medidas que se conocen de la aeronave real. En primer lugar, respecto a la longitud se observa que el error aumenta a 3 cm. En este punto no es posible conocer las causas exactas de este aumento. En las fuentes que presentan estas medidas, la aeronave aparece dibujada con un pequeño punto al final que esta aeronave no dispone. Es posible que dicho error sea referido a que esa medida incluye el pequeño pico final o que no corresponde realmente al modelo concreto F1M –en la envergadura, según la información es igual para todos los modelos–. Sin embargo, cabe decir que también es posible que en el proceso de mallado, al realizar algún refinado se hayan eliminado puntos del extremo de forma automática, o incluso que en el escaneo no se hayan cogido.

Finalmente, respecto a la superficie alar se obtiene un error considerable, de 1,6 m². En este punto entran en juego dos factores. En primer lugar, lo que se ha hecho para calcularla es aplicar el método de simplificar el ala de flecha positiva a dos trapecios. De este modo, ya de entradas va a existir un error. Por otra parte, el trapecio se ha dibujado teniendo en cuenta los elementos hipersustentadores, y es posible que si se hubiese realizado sin incluirlos se generara un error menor. Además, cabe decir que las dimensiones de la cuerda en la raíz y en la punta corresponden a esta aproximación realizada concretamente.

Capítulo 8 – Pliego de condiciones

En este capítulo se presenta un pliego de condiciones que muestra las características principales para el proceso de realización del proyecto en cada una de sus partes.

El presente pliego de condiciones abarca las características básicas principales para la ejecución del proyecto. El proceso cuenta con el levantamiento topográfico 3D de una aeronave con dos equipos de medición diferentes, mallado posterior y extracción de un modelo CAD, así como los planos bidimensionales correspondientes.

8.1. Objeto de estudio

Aeronave *Dassault Mirage F1M*.

Modelo: disponible en el laboratorio Pedro Duque.

Ubicación: Universidad Politécnica de Valencia.

8.2. Condiciones de instrumentación

▪ Equipos de medición:

Equipo 1: láser escáner Trimble TX6

Equipo 2: láser escáner Faro Focus S 350

Accesorios: Trípode Trimble – Trípode Faro – Dianas esféricas.

▪ Certificación de los equipos:

- Equipo 1: Trimble TX6
 - Certificación de calibración por Trimble – actualizado
 - Grado de protección IP54
 - Láser de clase 1

Según la certificación, se ha de cumplir con las protecciones que exigen las normas que proceden a continuación:

- UNE EN 60825-1/A2:2002
Riesgo láser
- UNE EN 60529:2018
Grados de protección proporcionados por las envolventes
- Equipo 2: Faro Focus S 350
 - Certificación de calibración por Faro Technologies – actualizado
 - Grado de protección IP54
 - Láser de clase 1

Según la certificación, se ha de cumplir con las protecciones que exigen las siguientes normas:

- UNE EN 60825-1/A2:2002
Riesgo láser
- UNE EN 60529:2018
Grados de protección proporcionados por las envolventes
- Especificaciones técnicas de la instrumentación

Equipo 1: Láser escáner Trimble TX6

- Especificaciones principales: se presentan detalladamente en el capítulo 4.
- Ficha técnica completa: Detallada en el Anexo 2.

Equipo 2: Láser escáner Faro Focus S 350

- Especificaciones principales: se presentan detalladamente en el capítulo 4.
- Ficha técnica completa: Detallada en el Anexo 4.

Accesorios: Detallado en el capítulo 4.

8.3. Condiciones de software

Los softwares que se explicitan se asignan a cada parte del proyecto: levantamiento topográfico 3D y edición de la nube de puntos, proceso de modelización y presentación de resultados.

- Procesamiento del levantamiento topográfico 3D y edición

Leica Cyclone Basic 9.1. – Leica Geosystems

- Descripción: software empleado para el registro de la nube de puntos con el equipo Trimble TX6 y la edición de ambas nubes.
- Requisitos técnicos

Procesador

- Mínimo: 2 GHz Dual Core o superior
- Recomendado: 3.0 GHz Quad Core i7 o superior

RAM

- Mínimo: 2 GB (4 GB para Windows Vista o Windows 7)
- Recomendado: 4 GB para 32 bit OS y 8 GB o más 64 bit OS

Disco Duro

- Mínimo: 40 GB
- Recomendado: 500 GB SSD / RAID 5,6,10. Drivers SATA o SAS

Tarjeta gráfica

- Mínimo: aceleradora SVGA o OpenGL con últimos drivers
- Recomendado: Nvidia GeForce 680 o ATI 7850 o mejor, con 2 GB de memoria mínimo

Sistema Operativo

- Windows 7 (32 o 64bit)
- Windows 8 y 8.1 (64bit)
- Windows 10 (64bit)

Faro Scene – Faro Technologies

- Descripción: software empleado para el registro de la medición obtenida con Faro Focus S 350.
- Requisitos técnicos

Procesador

- Quad-core X64, Intel Core i7/i9/Xeon, 8 núcleos físicos, 64 GB de RAM, OpenGL 4.1 o superior

RAM

- 64 GB

Disco Duro

- Estado sólido de 1 TB y HDD convencional.

Resolución de pantalla

- 1920x1080 px.

Tarjeta gráfica

- Para el renderizado Renderización y visualización en estéreo: NVIDIA Quadro.
- Para el renderizado de la realidad virtual: NVIDIA 1080GTX o similar.
- Para el uso de SteamVR deben estar instaladas Gafas compatibles con realidad virtual: Oculus Rift o HTC Vive con controladores táctiles.

Sistema operativo

- Windows 7 SP1 de 64 bits o superior.

- Proceso de modelización 3D

Leica Cyclone 3DR – Leica Geosystems

- Descripción: software empleado para el tratamiento del proceso de triangulación de las nubes de puntos y la obtención del modelo CAD.
- Requisitos técnicos

Procesador

- Mínimo: 2.5 GHz Dual Core o superior
- Recomendado: 3.5 GHz Quad Core i7 o superior

RAM

- Mínimo: 8 GB o más (64 bit OS)
- Recomendado: 64 GB

Disco Duro

- Mínimo: 1GB libre para la instalación
- Recomendado: 500 GB con drivers SSD

Tarjeta gráfica

- Mínimo: OpenGL 3.3 o más con 1 GB de memoria vídeo
- Recomendado: NVIDIA GTX 900 o 1000, series con 8GB de memoria vídeo, o NVIDIA Quadro P5500 o equivalente

Sistema Operativo

- Windows 7 (64bit)
- Windows 10 (64bit)

- Obtención de resultados, planos de dimensiones

AutoCAD 2018 – AutoDesk

- Descripción: software empleado para la extracción de planos con las medidas principales del modelo CAD.

- Requisitos técnicos:

Tipo CPU

- 32 bit: procesador de 1 GHz o más rápido de 32 bit (x86)
- 64 bit: procesador de 1 GHz o más rápido de 64 bit (x64)

RAM

- Mínimo: 2 GB (32 bit) – 4 GB (64 bit OS)
- Recomendado: 4 GB (32 bit) – 8 GB (64 bit OS)

Resolución de pantalla

- Pantallas convencionales: 1360 x 768 (se recomienda 1920 x 1080)
- Pantallas de alta resolución y 4K: 3840 x 2160 en sistemas de 64 bit

Disco Duro

- 4 GB para instalación

Tarjeta gráfica

- Debe admitir 1360 x 768 con funciones de color verdadero y DirectX® 9.
- Recomendado: compatible con DirectX 11.

Sistema Operativo

- Windows 7 (32 y 64bit)
- Windows 8 con actualización KB2919355 (32 y 64bit)
- Windows 10 (64bit)

- Requisitos adicionales para nubes de puntos y modelado 3D

RAM

- Mínimo 8 GB

Disco Duro

- 6 GB de espacio disponible sin incluir requisitos instalación

Tarjeta gráfica

- Adaptador de vídeo de 1920 x 1080 mínimo, con color verdadero
- VRAM de 128 MB o superior
- Pixel Shader 3.0 o superior
- Tarjeta gráfica para estación de trabajo compatible con Direct3D®

Capítulo 9 – Presupuesto

Una vez presentados los resultados y especificar todo lo necesario para la ejecución del proyecto, se procede en este capítulo a realizar una estimación del presupuesto del mismo. Se detallan los costes de cada uno de los levantamientos y el coste total.

Una vez finalizado el proyecto se procede a realizar un presupuesto que presente de la forma más aproximada posible los gastos económicos que supone la realización del trabajo. La estructura del presupuesto se dividirá en tres bloques: el coste del personal para realizarlo, el coste de software y el coste de instrumentación.

El fin de realizar un presupuesto recae sobre varios factores. En primer lugar, es fundamental en un proyecto de ingeniería conocer el coste total que supone. En este caso concreto permitirá valorar si es rentable la aplicación de la tecnología láser escáner con los equipos empleados y analizar la economía que supone cada uno de ellos.

Estos costes se van a evaluar para cada levantamiento. Es necesario tener en cuenta que se ha asumido el coste del tiempo empleado, es decir, la universidad dispone de estas licencias, y los costes que se incluyen en el presupuesto corresponden a la tasa del tiempo empleado en el mismo. Por ejemplo, una licencia de AutoCAD no se puede comprar un día. Sin embargo, se realiza así por tratarse de licencias propias del departamento que ha proporcionado instrumentación y software para la realización de este proyecto. Se asume, además, que el trípode viene incluido con el equipo láser escáner.

8.1. Levantamiento Trimble TX6

En primer lugar, se obtienen los costes de instrumentación para el levantamiento con Trimble TX6.

Concepto	Tiempo	Precio	Coste
Láser escáner Trimble TX6	1 día	300,00€/día	300,00€
TOTAL			300,00 €

Tabla 12.– Costes de instrumentación levantamiento Trimble TX6.

Seguidamente, la tabla 13 expone los costes de software necesario.

Concepto	Tiempo de uso	Precio	Coste
Trimble RealWorks	4 h	1800,00 €/año	00,84 €
Leica Cyclone Basic	144 h	1840,00 €/año	30,67 €
Leica Cyclone 3DR	160 h	2100,00 €/año	38,88 €
TOTAL			70,39 €

Tabla 13.– Costes de software levantamiento Trimble TX6.

Por otra parte, los costes de personal necesario se presentan en la tabla 14.

Concepto	Tiempo de uso	Precio	Coste
Ingeniero (alumno)	30 días	1200,00 €/mes	1200,00 €
Ingeniero superior (tutor)	6 días	1800,00 €/mes	360,00 €
TOTAL			1.560,00 €

Tabla 14.– Costes de personal, levantamiento Trimble TX6.

COSTES	Coste	Coste final (+IVA)
Instrumental	300,00 €	363,00 €
Software	70,39 €	85,32 €
Personal	1.560,00 €	1.887,60 €
TOTAL	1.930,39 €	2.335,78 €

Tabla 15.– Costes totales, levantamiento Trimble TX6.

8.2. Levantamiento Faro Focus S 350

En este apartado se presentan los costes de instrumentación, personal y software del levantamiento realizado con el equipo Faro Focus S 350. En primer lugar, la tabla 16 expone los costes de instrumentación.

Concepto	Tiempo	Precio	Coste
Láser escáner Faro Focus S 350	1 día	360,00 €/día	360,00€
Dianas esféricas	1 día	100,00 €/día	100,00 €
TOTAL			460,00 €

Tabla 16.– Costes de instrumentación levantamiento Faro Focus S.

A continuación, los costes de software se ilustran en la tabla 17.

Concepto	Tiempo de uso	Precio	Coste
Faro Scene	2 h	1800,00 €/año	0,83 €
Leica Cyclone Basic	15 h	1840,00 €/año	3,20 €
Leica Cyclone 3DR	80 h	2100,00 €/año	19,044 €
AutoCAD	2 h	507,00 €/año	0,12 €
TOTAL			23,194 €

Tabla 17.– Costes de software levantamiento Faro Focus S.

Seguidamente, los costes del personal necesario se definen en la tabla 18.

Concepto	Tiempo de uso	Precio	Coste
Ingeniero (alumno)	15 días	1200,00 €/mes	600,00 €
Ingeniero superior (tutor)	3 días	1800,00 €/mes	160,00 €
TOTAL			760,00 €

Tabla 18.– Costes de personal, levantamiento Faro Focus S.

A continuación, los costes totales del levantamiento se ilustran en la tabla 19, asumiendo el 21% de IVA.

COSTES	Coste	Coste final (+IVA)
Instrumental	460,00 €	566,00 €
Software	23,1941 €	28,06 €
Personal	760,00 €	919,60 €
TOTAL	1.243,19 €	1.504,26 €

Tabla 19.– Costes totales, levantamiento Faro Focus S.

Finalmente se calculan los costes de ambos levantamientos juntos y con el IVA incluido:

COSTES	Coste (IVA incluido)
Levantamiento Trimble TX6	2.335,78 €
Levantamiento Faro Focus S	1.504,26 €
TOTAL	3.840,18 €

Tabla 20.– Costes totales del proyecto.

Ante los resultados obtenidos hasta ahora, ya se podía ver claramente que el equipo que mejor precisión ofrece es el Faro Focus S, pero aquí se confirma, porque además resulta ser mucho más económico. El hecho de que sea un proceso muy automatizado, además de ofrecer calidad por ser un láser de gama alta, proporciona una reducción considerable del trabajo del ingeniero, reduciendo así el coste. Este coste disminuye a pesar de ser más caro el alquiler del equipo. En general, los costes totales no son excesivos para la realización de dos levantamientos, ya que se trata de una tecnología avanzada que está en auge en el mercado.

Capítulo 10 – Conclusiones

Una vez terminado el proyecto, es necesario comprobar y analizar el cumplimiento de objetivos, así como tomar varias consideraciones del proceso empleado, ya que se pueden extraer varias conclusiones.

En primer lugar, se recurrirá a los objetivos. En relación al objetivo principal, cabe decir que se ha cumplido correctamente, ya que el proceso realizado consigue verificar el proceso de aplicación de la tecnología láser escáner al sector aeronáutico. Asimismo, se ha conseguido extraer un análisis comparativo entre los dos equipos empleados para el levantamiento. En cuanto a los objetivos específicos, también han sido cumplidos, ya que se ha conseguido llegar a extraer la comparación entre las dimensiones del modelo creado y las conocidas del modelo real.

Sin embargo, es necesario atender al proceso. En cuanto al levantamiento 3D de la nube de puntos, se ha logrado obtener los dos modelos como se planteaba, extrayendo mayor calidad en el equipo Faro Focus S 350. En este punto, en el levantamiento de Trimble TX6 apareció una zona de sombra, pero este problema pudo ser solucionado durante el proceso de mallado. En definitiva, se han obtenido dos nubes de puntos que, aún estando registradas de formas diferentes y medidas con equipos distintos, podrían ser útiles para la extracción de mucha información y destinadas a muchas aplicaciones. Llegados a este punto, cabe decir también que, aunque este proceso podría tener muchas aplicaciones, se ha cumplido con el alcance concreto del proyecto, centrando el estudio en este y analizando exhaustivamente todas las partes del proceso.

En cuanto a la realización de los registros, se ha demostrado que el registro con *Faro Scene* es mucho más eficiente en tiempo, pero es cierto que en el levantamiento realizado con Trimble TX6 se ha podido profundizar en la comprensión del proceso de registro. Este factor es importante para el aprendizaje que supone este trabajo, ya que con este software se puede analizar mucha información del registro. En cuanto a costes del proyecto si fuese real, lo ideal sería realizar el levantamiento con

el equipo Faro Focus S por la precisión, el tiempo de trabajo reducido y el coste en consecuencia.

Aunque Faro Focus S ha resultado obtener mejores resultados, cabe decir que en este punto influyen muchos factores. Es cierto que se trata de un equipo líder en el mercado actual y con muchas facilidades, pero Trimble TX6 podría haber obtenido mayor resolución y calidad si se hubiesen realizado más escaneos por la parte inferior, es una cuestión que se sacó como conclusión al comparar ambas nubes de puntos y observar las disposiciones de los croquis. También hay que tener en cuenta que emplear dianas aumenta la precisión, pero como se ha comentado, el registro manual ha permitido un aprendizaje mucho más profundo.

Por otra parte, cabe mencionar el proceso de mallado. Como se ha visto en el proceso de modelización, las mallas no han podido corregirse al completo. Esto no ha impedido cumplir con los objetivos del trabajo, pero si se quisieran realizar otras aplicaciones como puede ser la impresión 3D habría que recurrir a otros softwares que permitan unificar la malla correctamente. Aquí es importante tener en cuenta que, mientras que el antiguo *3DReshaper* estaba destinado al mallado de terreno en aplicaciones topográficas principalmente, el nuevo *Leica Cyclone 3DR* dispone de un módulo que permite trabajar mucho mejor la ingeniería inversa. Sin embargo, a pesar de que se intentó trabajar más el modelo, se trata de herramientas muy potentes que requieren de un equipo con tarjeta gráfica y procesador de alta calidad, motivo por el que no fue accesible mejorar más las mallas. De este modo, este punto queda como frente abierto, sería interesante tratar de procesar, en base a los resultados obtenidos en Faro Focus, un modelo que esté disponible para la impresión 3D u otros.

Por otra parte, en cuanto al análisis de dimensiones se ha conseguido realizar la comparación. Sin embargo, el error es muy variado en cada caso, y deben considerarse diferentes factores. Esto puede provenir de diferentes fuentes. Por un lado, las fuentes de dimensiones de la aeronave disponen en los planos un pequeño pico que tiene la aeronave al final, cosa que el objeto de estudio no disponía. Sin embargo, podría ser también debido a que en el proceso de levantamiento se haya realizado alguna medida inexacta o a que en el proceso de mallado se haya recortado algún centímetro en los refinados, ya que estos reducen el ruido.

Por otra parte, cabe decir que el error obtenido en la superficie alar es probable que sea debido a que el método empleado para el cálculo en sí es aproximado. Además, se han asumido las superficies hipersustentadoras dentro del cálculo, y tal vez, el dato no las incluya.

Finalmente, cabe decir que el proceso realizado ha sido de gran aprendizaje en la introducción a la tecnología láser escáner y sus posibles aplicaciones. Se ha aprendido, tanto en la teoría como en la práctica, acerca de los fundamentos que rigen esta tecnología. De este modo, el trabajo realizado ha aportado conocimiento de nuevas tecnologías que complementan todo lo que se ha aprendido a lo largo de la carrera.

Bibliografía

- Air Force, A. (1988). Reconnaissance and Special Mission Aircraft. *Air Force Magazine*, 91.
- AvionesdeCombate. (s.f.). *Dassault Mirage F1*. Obtenido de avionesdecombate.org: <https://avionesdecombate.org/cazas/dassault-mirage-f1/#tab-con-2>
- Berenguer Cerdá, F. (2013). *Aplicación de técnicas geodésicas y técnicas avanzadas de captura, escáner láser y termografía, en el estudio patológico de la estructura y la cimentación en la restauración integral de la Catedral de Santa María de la Asunción de Coria*. Cáceres: Universidad de Extremadura.
- Botero, F. (2011). *Ingeniería inversa aplicada: Metodología y aplicaciones industriales*. Medellín.
- Castella, E. (1 de febrero de 2018). *Qué es un escáner láser 3D*. Obtenido de INSTOP: <http://blog.instop.es/qu%C3%A9-%C3%A9s-un-escaner-laser-3d>
- Dassault, A. C. (s.f.). *Mirage F1*. Obtenido de dassault-aviation.com: <https://www.dassault-aviation.com/en/passion/aircraft/military-dassault-aircraft/mirage-f1/>
- Diego Segura, B., & Rupérez Calvo, M. J. (s.f.). *NTP: Láseres: nueva clasificación del riesgo (UNE EN 60825-1/A2:2002)*. Ministerio de Trabajo y Asuntos Sociales de España.
- EcuRed. (noviembre de 2019). *Dassault Mirage F1*. Obtenido de ecured.cu: https://www.ecured.cu/Dassault_Mirage_F1
- FARO. (2019). *Manual del usuario de FARO Focus Laser Scanner*.
- FARO. (3 de marzo de 2020). *Hoja de especificaciones técnicas para las series Focus M y S*. Obtenido de es-knowledge.faro.com: <https://faro.app.box.com/s/hh1rz58882xwmx982svfm02ffuoz44ig>
- Francillon, R. (1986). *Aerofax Minigraph 17, Dassault Mirage F1*. Arlington, Texas.
- García, J. L., Taronger, J. M., Quintero, M. S., Van, B., Bruyne, M. D., Poelman, R., . . . Reiner, E. H. (2008). *Teoría y práctica del Escaneado Láser Terrestre. Material de aprendizaje en aplicaciones prácticas*. Proyecto Herramientas de aprendizaje para el levantamiento tridimensional avanzado en la conciencia de riesgos (3DRiskMapping).
- Guillén, R. (s.f.). *Ingeniería inversa*. Obtenido de Rice fundiciones: <http://fundicionesrice.com/assets/frontend/cartas/TNL92/TNL92esp.htm>
- HellermannTyton. (s.f.). *Definición y Tabla del Grado de Protección (IP), acorde a DIN EN IEC 60529*. Obtenido de aprendemergencias.es: <https://www.aprendemergencias.es/app/download/6396825011/resumen+IP.pdf?t=1497548832>
- Hernández García, J., Ramos Trejo, E., Trujillo-Barragán, M., Romero, A., & Jiménez-Arévalo, O. (2017). Determinación de un material compuesto

- termoplástico con alto contenido de fibras mediante el proceso de ingeniería inversa para la fabricación de hélices para UAV's. *Sociedad Mexicana de Ingeniería Mecánica (SOMIM)*, 198.
- Jackson, G., & Lepere, G. (s.f.). *White Paper. Inside Trimble TX6 and TX8. Color Acquisition*. Obtenido de www.trimble.com/3Dscanning:
https://www.buildingpointpartners.com/wp-content/uploads/2018/04/WP_Inside-Trimble-TX6.pdf
- Kennedy, C., & Company. (2017). *Leica Cyclone Basic User Manual. Leica Geosystems*, 21.
- Kuzu. (2 de mayo de 2017). *La ingeniería inversa: algo muy práctico*. Obtenido de kuzudecoletaje.es: <https://kuzudecoletaje.es/la-ingenieria-inversa-algo-muy-practico/>
- Laserscan. (s.f.). *Ingeniería inversa aeronáutica*. Obtenido de laserscan.es:
<https://www.laserscan.es/casos-de-exito/ingenieria-inversa-aeronautica/>
- López, E. (11 de diciembre de 2019). *Las "abuelas" del Ejército del Aire vuelven a volar*. Obtenido de vadeaviones.com:
<https://www.vadeaviones.com/2019/12/11/las-abuelas-del-ejercito-del-aire-vuelven-a-volar/>
- Martin Burston, R. S. (2014). Reverse Engineering of a Fixed Wing Unmanned Aircraft 6-DoF Model Based on Laser Scanner Measurements. En *IEEE Metrology for Aerospace (MetroAeroSpace)* (págs. 144-149). Benevento.
- Mena, P. (s.f.). *Soluciones de Faro Spain para la portabilidad y precisión en la industria aeronáutica*. Obtenido de blogs.faro-europe.com: <https://blogs.faro-europe.com/es/2013/02/08/soluciones-de-faro-spain-para-la-portabilidad-y-precision-en-la-industria-aeronautica/>
- Ocampo, J. D. (mayo de 2007). *Etimología del término ingeniero*. Obtenido de juliangiraldofiles.wordpress.com:
<https://juliangiraldofiles.wordpress.com/2007/05/etimologia-del-termino-ingeniero.pdf>
- Online-Shop, L. S. (s.f.). *Escáner láser de trípode de carbono para FARO Focus 3D y Trimble TX5*. Obtenido de shop.laserscanning-europe.com:
<https://shop.laserscanning-europe.com/Laser-Scanner-Carbon-Tripod-for-FARO-Focus-3D-and-Trimble-TX5>
- Priego de los Santos, E. (2015). *Topografía, instrumentación y observaciones topográficas*. Valencia: Universitat Politècnica de València.
- Priego de los Santos, E., De las Heras Bellido, J., & Viudes Martínez, I. (2012). *Control dimensional y levantamiento topográfico tridimensional de estructuras navales y aeronáuticas con sistemas láser escáner 3D*. I Congreso iberoamericano de geomática y C.C. de la Tierra.
- Romero Guerrero, J. A., & Cuellar Vázquez, J. L. (2013). *Estudio comparativo entre las tecnologías de escaneo láser terrestre*.

Sanz Romero, M. (30 de marzo de 2019). *¿Qué es y en qué consiste la Ingeniería Inversa?* Obtenido de Computer hoy:
<https://computerhoy.com/reportajes/tecnologia/consiste-ingenieria-inversa-396691>

Trimble, G. (2016). *Trimble TX6. Escaneo láser 3D*. Obtenido de es-la.geospatial.trimble.com: <https://es-la.geospatial.trimble.com/products-and-solutions/trimble-tx6>

Vergara, E. (11 de julio de 2012). *Spain - Air Force, Dassault Mirage F1M, Valencia*. Obtenido de aviationcorner.net:
http://www.aviationcorner.net/gallery_en.asp?registration=C.14-34%20%2014-17

ANEXOS

Anexo 1 – Clasificación de riesgos láser. Norma UNE EN 60825-1/A2:2002

Fuente: (Diego Segura & Rupérez Calvo)

TABLA 1
Clasificación de láseres según UNE EN 60825-1 /A2-2002

Clase 1	Productos láser que son seguros en todas las condiciones de utilización razonablemente previsibles, incluyendo el uso de instrumentos ópticos en visión directa.
Clase 1M	Láseres que emitiendo en el intervalo de longitudes de onda (λ) entre 302,5 y 4000 nm son seguros en condiciones de utilización razonablemente previsibles, pero que pueden ser peligrosos si se emplean instrumentos ópticos para visión directa. (Ver 8.2 en la norma).
Clase 2	Láseres que emiten radiación visible en el intervalo de longitudes de onda comprendido entre 400 y 700 nm. La protección ocular se consigue normalmente por las respuestas de aversión, incluido el reflejo parpebral. Esta reacción puede proporcionar la adecuada protección aunque se usen instrumentos ópticos.
Clase 2M	Láseres que emiten radiación visible (400 y 700 nm). La protección ocular se consigue normalmente por las respuestas de aversión, incluido el reflejo parpebral, pero la visión del haz puede ser peligrosa si se usan instrumentos ópticos. (Ver 8.2)
Clase 3R	Láseres que emiten entre 302,5 y 106 nm, cuya visión directa del haz es potencialmente peligrosa pero su riesgo es menor que para los láseres de Clase 3B. Necesitan menos requisitos de fabricación y medidas de control del usuario que los aplicables a láseres de Clase 3B. El límite de emisión accesible es menor que 5 veces el LEA de la Clase 2 en el rango 400-700 nm, y menor de 5 veces el LEA de la Clase 1 para otras longitudes de onda.
Clase 3B	Láseres cuya visión directa del haz es siempre peligrosa (por ej. dentro de la Distancia Nominal de Riesgo Ocular). La visión de reflexiones difusas es normalmente segura (véase también la nota 12.5.2c).
Clase 4	Láseres que también pueden producir reflexiones difusas peligrosas. Pueden causar daños sobre la piel y pueden también constituir un peligro de incendio. Su utilización precisa extrema precaución.

Figura 1
Resumen de la clasificación láser

Clase 1	Seguros en condiciones razonables de utilización
Clase 1M	Como la Clase 1, pero no seguros cuando se miran a través de instrumentos ópticos como lupas o binoculares.
Clase 2	Láseres visibles (400 a 700 nm). Los reflejos de aversión protegen el ojo aunque se utilicen con instrumentos ópticos.
Clase 2M	Como la Clase 2, pero no seguros cuando se utilizan instrumentos ópticos.
Clase 3R	Láseres cuya visión directa es potencialmente peligrosa pero el riesgo es menor y necesitan menos requisitos de fabricación y medidas de control que la Clase 3B.
Clase 3B	La visión directa del haz es siempre peligrosa, mientras que la reflexión difusa es normalmente segura.
Clase 4	La exposición directa de ojos y piel siempre es peligrosa y la reflexión difusa normalmente también. Pueden originar incendios.

Figura A.1.– Clasificación de riesgos láser según la norma UNE EN 60825-1/A2:2002.

Anexo 2 – Ficha técnica completa Trimble TX6

RENDIMIENTO

Fuente: (Trimble, 2016)

<u>VISION GENERAL</u>	
Principio del escaneado	Espejo rotativo vertical sobre una base rotativa horizontal
Principio de alcance	Tiempo de vuelo ultra rápido impulsado por la tecnología Trimble Lightning
Velocidad del escaneado ²	500.000 puntos por segundo
Alcance máximo	80 m en la mayoría de las superficies con actualización opcional de 120 m
Ruido del alcance ^{5,6}	< 2 mm en la mayoría de las superficies
<u>MEDICION DEL ALCANCE</u>	
Clase de láser	Con protección de los ojos, de conformidad con IEC EN60825-1
Longitud de la onda láser	1,5 μM. INVISIBLE
Diámetro del rayo láser	6-10-34 mm a 10-30-100 m
Alcance mínimo	0.6 m
Alcance estándar max	80 m en superficies reflectantes 18-90%
Extensión del alcance ¹	120 m en superficies reflectantes 18-90%
	100 m en superficies muy poco reflectantes (5%)
Ruido del alcance ⁵	<2 mm en 2 m a 120 m en superficies reflectantes 18-90% en modo de extensión de alcance
Error sistemático del alcance ⁵	< 2 mm
<u>ESCANEO</u>	
Campo de visión	360° x 317°
Precisión angular ⁵	80 μrad

PARÁMETROS DE ESCANEEO	VISTA PRELIMINAR	NIVEL 1	NIVEL 2	NIVEL 3
Alcance máximo ¹	80/120 m	80/120 m	80/120 m	80/120 m
Duración del escaneado (minutos) ³	02:00	03:00	05:00	19:00
Espaciamiento entre puntos a 10 m	15,1 mm	-----	-----	-----
Espaciamiento entre puntos a 30 m	-----	22,6 mm	11,3 mm	5,7 mm
Espaciamiento entre puntos a 300 m	-----	-----	-----	-----
Número de puntos	8,7 Mpts	34 Mpts	138 Mpts	555 Mpts

ADQUISICIÓN DE IMÁGENES

Cámara HDR integrada 10 megapíxeles de resolución, campo de visión completo

Duración de la captura de la imagen 1 para estándar, 2 min para HDR

Kits de cámara externa disponibles para imágenes HDR y de alta resolución

OTRAS

Pantalla táctil	TFT-LCD a color de 24 bits
Tamaño (mm)	93 (H) x 55.8 (V), equivalente a 4.3" diagonal
Resolución	800 x 480 (WVGA)
Resolución de luminancia	8 bits
Nivelación	Burbuja externa, burbuja electrónica integrada
Compensador de doble eje	Seleccionable Sí/No
Resolución	0,3"
Alcance	± 5
Precisión⁵	1"
Almacenamiento de datos	USB 3.0 Flash
Control Remoto	Operar con una tableta de Trimble u otro dispositivo móvil con WLAN, o con una OC o tableta con Windows 7 o superior mediante conexión de cable USB ⁴

1 Actualización opcional que aumenta el alcance de 80 m 120 m.

2 Velocidad de escaneo efectiva para obtener la calidad de escaneo óptima.

3 Tiempos de duración del escaneo en los modos de escaneo estándar.

4 El control remoto por cable, requiere el cable USB opcional NP 2370403.

5 Especificación dada como sigma 1.

6 A una distancia de 1.5 mm a 100 m para un albedo >20%.

ESPECIFICACIONES FÍSICAS

Dimensiones 335 mm de ancho x 386 mm de alto x 242 mm de profundidad

Peso	10,7 kg con plataforma nivelante y sin batería 11,2 kg con plataforma nivelante y con batería
Suministro de alimentación eléctrica	76 mm de ancho x 20.1 mm de alto x 149.1 mm de profundidad
Dimensiones de la batería	89.2 mm de ancho x 20.1 mm de alto x 149.1 mm de profundidad
Peso de la batería	0.46 kg
Consumo de potencia	72 W
Tiempo de escaneado por batería	> 2 horas
Carcasa del instrumento	500 mm de ancho x 366 mm de alto x 625 mm de profundidad

ESPECIFICACIONES MEDIOAMBIENTALES

Rango de temperatura de funcionamiento (sin condensación atmosférica)	-0° C a + 40° C
Temperatura de almacenamiento	-20°C a + 50° C
Rango de humedad de funcionamiento	Sin condensación
Condición de luminosidad	Todas las condiciones interiores y exteriores en todo el alcance del escáner láser (sin limitaciones de luminosidad)
Clase de protección	IP54

Anexo 3 – Índices de protección en acorde a DIN EN IEC 60529/ UNE EN 60529:2018

Fuente: (HellermannTyton)

Grado de protección contra la introducción de cuerpos sólidos			Grado de protección al agua		
Primer Índice	Descripción	Alcance de la protección	Segundo Índice	Descripción	Alcance de la Protección
0	Sin protección	Sin especial protección para personas contra un contacto directo de piezas móviles internas y las externas con vida. Sin protección a los equipamientos contra el ingreso de objetos sólidos externos.	0	Sin protección	Sin ninguna protección especial
1	Protección contra los cuerpos sólidos grandes	Protección contra el contacto accidental de grandes áreas con vida y partes interiores con movimiento, por ejemplo: la parte posterior de la mano. Pero sin protección contra el acceso deliberado del mismo. Protección contra el ingreso de objetos sólidos con un diámetro mayor que 50 mm.	1	Protección contra el goteo de agua vertical (condensación)	La caída vertical de gotas de agua no debe causar daños
2	Protección contra los cuerpos sólidos medianos	Protección contra el contacto entre los dedos y las partes interiores móviles. Protección contra el ingreso de objetos sólidos con un diámetro mayor a 12,5mm.	2	Protección contra el goteo de agua inclinada verticalmente	La caída de gotas de agua con hasta un ángulo de 15° de la vertical desde cualquier dirección, no debe causar daño.
3	Protección contra los cuerpos sólidos pequeños	Protección contra el contacto entre las piezas móviles internas y herramientas, cables, hilos... con un espesor mayor a 2,5mm. Protección contra el ingreso de objetos sólidos con un diámetro mayor a 2,5mm.	3	Protección contra agua en spray	La caída de gotas de agua con hasta un ángulo de 60° de la vertical desde cualquier dirección, no debe causar daño. (lluvia)
	los cuerpos sólidos muy pequeños (granulados)	las piezas móviles interiores y herramientas, cables, hilos... con un espesor mayor a 1mm. Protección contra el ingreso de objetos sólidos con un diámetro mayor a 1mm.	4	Protección contra las salpicaduras de agua	Las salpicaduras de agua desde cualquier dirección, no deben de causar daños al interior.
5	Protección contra los residuos de polvo	Protección contra el contacto entre las piezas móviles interiores y el ingreso de polvo. El ingreso no se previene completamente, pero el polvo no puede penetrar en tales cantidades que puedan afectar al funcionamiento correcto del mismo.	5	Protección contra chorros de agua de cualquier dirección con manguera	Los chorros de agua producidos con manguera y desde cualquier dirección, no deben de causar daño al interior.
6	Protección total contra la penetración de cualquier cuerpo sólido (estanqueidad)	Protección total contra el contacto de las piezas móviles interiores. Protección contra cualquier ingreso de polvo.	6	Protección contra inundaciones	La cantidad de agua que se introduzca, en casos de inundación esporádica o temporal, no debe dañar el interior, por ejemplo, los golpes de mar.
				la inmersión temporal	duzca, en caso de sumergir el equipamiento en específicas condiciones de presión entre 1 y 30 minutos, no debe dañar las piezas internas del mismo.
			8	Protección durante inmersión continua	El agua que se pueda introducir, si sumergimos el equipamiento al menos con 2 horas y con una presión de 2 bares (para los racores HelaGuard IP68 No Metálicos) y de 5 horas y con una presión de 5 bares (para los racores HelaGuard IP68 Metálicos), no deben producir daño en el interior.
			9k	Protección contra la introducción de agua usando pistolas de limpieza de alta presión	El agua que se introduzca en el interior, producida al utilizar pistolas de limpieza con agua de alta presión, no deben causar daño interior.

Figura A.3.– Índices del Grado de Protección según IEC 60529

Anexo 4 – Ficha técnica completa Faro Focus S 350

Fuente: (FARO, Hoja de especificaciones técnicas para las series Focus M y S, 2020)

Especificaciones sobre el rendimiento. Modelo Focus^s 350

	Unidad de Alcance
INTERVALO DE UNIVOCIDAD	614 M PARA 0.5 MIL PTS/SEC 370 m a 1 mil pts/sec
	Alcance¹ (mm)
90% de reflectividad (blanco)	0.6 a 350m
10% de reflectividad (gris oscuro)	0.6 a 150 m
2% de reflectividad (negro)	0.6 a 50 m
	Ruido de alcance² (mm)
A 10 m 90% (blanco)	0.3
A 10 m 10% (gris oscuro)	0.4
A 10 m 2% (negro)	1.3
A 25 m 90% (blanco)	0.3
A 25 m 10% (gris oscuro)	0.5
A 25 m 2% (negro)	2.0
Velocidad máxima de medición (mil pts/s)	Hasta 1
Error de alcance ³ (mm)	± 1
Precisión angular ⁴ verticales/horizontales	19 arcosegundos en ángulos
Precisión de posición 3D ⁵	10 m; 2 mm/25 m: 3.5 mm

Especificaciones adicionales

	Unidad de color
Resolución	Color de hasta 165 megapíxeles
Cámara HDR	Horquillado de exposición 2x, 3x, 5x.
Paralaje	Minimizado debido al diseño coaxial

Unidad de desviación

Campo de visión	300° vertical ⁶ / 360° horizontal
Tamaño del paso	0.0009 (40,960 pixeles 3D EN 360° Vertical/ 0.0009 (40,960 pixeles 3 D en 360°) Horizontal
Velocidad máxima de escaneo	97 Hz (vertical)

Láser (transmisor óptico)

Clase de Láser	Láser clase 1
Longitud de onda	1550 nm
Divergencia de haz	0.3 mrad (1/e)
Diámetro de haz en la salida	2.12 mm (1/e)

Control y gestión de datos

Almacenamiento de datos	Tarjeta SD, SDHC TM , SDXC TM , – 32 GB
Control del escáner mediante	Mediante pantalla táctil y conexión WLAN. Acceso Dispositivos móviles con HTML5

Conexión de interfaz

WLAN redes existentes	802.11 n (150 Mbit/s), como punto de acceso en
---------------------------------	--

Características adicionales

Compensador de doble eje	Realiza una nivelación de escaneo con una precisión de 19 arcosegundos válida dentro de un margen de $\pm 2^\circ$
Sensor de altura	Mediante un barómetro electrónico se puede detectar la altura con respecto a un punto fijo, que se puede agregar al escaneo
Brujula⁷	La brújula electrónica le da una orientación al escaneo
GNSS	GPS y GLONASS integrados
Compensación in-situ*	Crea un informe de calidad actual y mejora la compensación automáticamente

Puerto para accesorios*	El puerto para accesorios conecta accesorios versátiles al escáner
Montaje invertido	Sí
Registro in situ y en tiempo real en SCENE*	Se conecta a SCENE, procesamiento y registro del escaneo en tiempo real, mapa de perspectivas
Interfaz de automatización electrónica*	Disponible como opción, solo en el punto de venta
Función de hash digital	Los escaneos están encriptados con hash y firmados por el escáner
Reescaneo de objetos distantes	Áreas definidas son recapturadas en mayor resolución a mayor distancia
Repetición de fotos	Seleccione fotografías individuales con objetos no deseados y vuelva a tomarlas

Especificaciones generales

Fuente de alimentación	19 V (fuente externa), 14,4 V (batería interna)
Consumo de energía	15 W durante inactividad, 25 W durante el escaneo, 80 W durante la carga
Duración de la batería	4.5 horas
Temperatura	Funcionamiento: 5 a 40°C / funcionamiento extendido ⁸ : -20° a 55° - Almacenamiento: -10° a 60°C
Certificado de protección de entrada (IP)	IP54
Resistencia a la humedad	Sin condensación
Peso	4.2 kg. (incluida la batería)
Tamaño/Dimensiones	230 x 183 x 103 mm
Mantenimiento/Calibración	Se recomienda anual

CLASS 1 LASER PRODUCT

1. Para un dispersador lambertiano.
2. El ruido de alcance hace referencia a la desviación estándar de los valores con respecto al plano de ajuste óptimo para la velocidad de medición de 122,000 puntos/segundo.
3. El error de alcance es un error sistemático de medición entre los 10 m y 25 m.
4. Compensación in situ obligatoria.
5. para distancias mayores a 25 m se debe agregar 0.1 mm/m de incertidumbre.
6. 2 x 150°, no se garantiza el espacio homogéneo entre puntos.
7. Los objetos ferromagnéticos pueden alterar el campo magnético y generar mediciones imprecisas.
8. Funcionamiento en bajas temperaturas se debe prender el escaner cuando la temperatura interna sea de 15°C o más, funcionamiento en altas temperaturas se necesita un accesorio adicional.

Todas las especificaciones de precisión son de una sigma, después del tiempo de preparación y dentro del rango de temperatura de funcionamiento, a menos que se indique lo contrario. Sujeto a cambios.

Anexo 5 – Resultados del registro, levantamiento Trimble TX6

Status: VALID Registration

Mean Absolute Error:

for Enabled Constraints = 0.001 m

for Disabled Constraints = 0.000 m

Database name : trimbletx6

ScanWorlds

- hangar 16
- hangar 1
- hangar 2
- hangar 3
- hangar 4
- hangar 5
- hangar 6
- hangar 7
- hangar 8
- hangar 9
- hangar 10
- hangar 11
- hangar 12
- hangar 13
- hangar 14
- hangar 15
- hangar 17

Constraints

Constraint ID	ScanWorld	ScanWorld	Type	Status	Weight	Overlap Points	Error	Error Vector
HorzVert								
Cloud/Mesh 1	hangar 16	hangar 1	Cloud: Cloud/Mesh - Cloud/Mesh	On	1.0000	729146	0.000 m	aligned [0.008 m]
Cloud/Mesh 2	hangar 2	hangar 1	Cloud: Cloud/Mesh - Cloud/Mesh	On	1.0000	393802	0.001 m	aligned [0.006 m]
Cloud/Mesh 3	hangar 2	hangar 4	Cloud: Cloud/Mesh - Cloud/Mesh	On	1.0000	951356	0.000 m	aligned [0.007 m]
Cloud/Mesh 4	hangar 5	hangar 4	Cloud: Cloud/Mesh - Cloud/Mesh	On	1.0000	881682	0.000 m	aligned [0.007 m]
Cloud/Mesh 5	hangar 5	hangar 3	Cloud: Cloud/Mesh - Cloud/Mesh	On	1.0000	821790	0.000 m	aligned [0.008 m]
Cloud/Mesh 6	hangar 16	hangar 2	Cloud: Cloud/Mesh - Cloud/Mesh	On	1.0000	686694	0.000 m	aligned [0.009 m]
Cloud/Mesh 7	hangar 16	hangar 3	Cloud: Cloud/Mesh - Cloud/Mesh	On	1.0000	613834	0.000 m	aligned [0.008 m]
Cloud/Mesh 8	hangar 16	hangar 4	Cloud: Cloud/Mesh - Cloud/Mesh	On	1.0000	521870	0.000 m	aligned [0.008 m]
Cloud/Mesh 9	hangar 16	hangar 5	Cloud: Cloud/Mesh - Cloud/Mesh	On	1.0000	484582	0.001 m	aligned [0.009 m]
Cloud/Mesh 10	hangar 1	hangar 3	Cloud: Cloud/Mesh - Cloud/Mesh	On	1.0000	905254	0.001 m	aligned [0.008 m]
Cloud/Mesh 11	hangar 1	hangar 4	Cloud: Cloud/Mesh - Cloud/Mesh	On	1.0000	810608	0.000 m	aligned [0.008 m]
Cloud/Mesh 12	hangar 1	hangar 5	Cloud: Cloud/Mesh - Cloud/Mesh	On	1.0000	630582	0.001 m	aligned [0.008 m]
Cloud/Mesh 13	hangar 2	hangar 3	Cloud: Cloud/Mesh - Cloud/Mesh	On	1.0000	1193918	0.000 m	aligned [0.007 m]
Cloud/Mesh 14	hangar 2	hangar 5	Cloud: Cloud/Mesh - Cloud/Mesh	On	1.0000	868530	0.000 m	aligned [0.008 m]
Cloud/Mesh 15	hangar 3	hangar 4	Cloud: Cloud/Mesh - Cloud/Mesh	Off	1.0000	0	0.000 m	not aligned
Cloud/Mesh 16	hangar 6	hangar 7	Cloud: Cloud/Mesh - Cloud/Mesh	On	1.0000	945166	0.000 m	aligned [0.009 m]
Cloud/Mesh 17	hangar 17	hangar 7	Cloud: Cloud/Mesh - Cloud/Mesh	On	1.0000	1031206	0.000 m	aligned [0.008 m]
Cloud/Mesh 18	hangar 17	hangar 8	Cloud: Cloud/Mesh - Cloud/Mesh	On	1.0000	856618	0.000 m	aligned [0.008 m]
Cloud/Mesh 19	hangar 9	hangar 8	Cloud: Cloud/Mesh - Cloud/Mesh	On	1.0000	648098	0.000 m	aligned [0.008 m]
Cloud/Mesh 20	hangar 9	hangar 6	Cloud: Cloud/Mesh - Cloud/Mesh	On	1.0000	728410	0.000 m	aligned [0.009 m]
Cloud/Mesh 21	hangar 10	hangar 8	Cloud: Cloud/Mesh - Cloud/Mesh	On	1.0000	733304	0.000 m	aligned [0.008 m]
Cloud/Mesh 22	hangar 12	hangar 11	Cloud: Cloud/Mesh - Cloud/Mesh	On	1.0000	366226	0.001 m	aligned [0.008 m]
Cloud/Mesh 23	hangar 12	hangar 13	Cloud: Cloud/Mesh - Cloud/Mesh	On	1.0000	344734	0.001 m	aligned [0.008 m]
Cloud/Mesh 24	hangar 14	hangar 13	Cloud: Cloud/Mesh - Cloud/Mesh	On	1.0000	1492932	0.000 m	aligned [0.008 m]
Cloud/Mesh 25	hangar 14	hangar 15	Cloud: Cloud/Mesh - Cloud/Mesh	On	1.0000	1268276	0.001 m	aligned [0.008 m]

Cloud/Mesh 26	hangar 14	hangar 4	Cloud: Cloud/Mesh - Cloud/Mesh	On	1.0000	778744	0.000 m	aligned [0.008 m]
Cloud/Mesh 27	hangar 9	hangar 15	Cloud: Cloud/Mesh - Cloud/Mesh	On	1.0000	641180	0.001 m	aligned [0.009 m]
Cloud/Mesh 28	hangar 16	hangar 6	Cloud: Cloud/Mesh - Cloud/Mesh	On	1.0000	496592	0.000 m	aligned [0.009 m]
Cloud/Mesh 29	hangar 16	hangar 7	Cloud: Cloud/Mesh - Cloud/Mesh	On	1.0000	574316	0.000 m	aligned [0.009 m]
Cloud/Mesh 30	hangar 16	hangar 17	Cloud: Cloud/Mesh - Cloud/Mesh	On	1.0000	517668	0.001 m	aligned [0.009 m]
Cloud/Mesh 31	hangar 16	hangar 8	Cloud: Cloud/Mesh - Cloud/Mesh	On	1.0000	540154	0.000 m	aligned [0.009 m]
Cloud/Mesh 32	hangar 16	hangar 9	Cloud: Cloud/Mesh - Cloud/Mesh	On	1.0000	485102	0.001 m	aligned [0.009 m]
Cloud/Mesh 33	hangar 16	hangar 10	Cloud: Cloud/Mesh - Cloud/Mesh	On	1.0000	565272	0.000 m	aligned [0.009 m]
Cloud/Mesh 34	hangar 16	hangar 11	Cloud: Cloud/Mesh - Cloud/Mesh	On	1.0000	748310	0.001 m	aligned [0.008 m]
Cloud/Mesh 35	hangar 16	hangar 12	Cloud: Cloud/Mesh - Cloud/Mesh	On	1.0000	222038	0.001 m	aligned [0.008 m]
Cloud/Mesh 36	hangar 16	hangar 13	Cloud: Cloud/Mesh - Cloud/Mesh	On	1.0000	545288	0.001 m	aligned [0.009 m]
Cloud/Mesh 37	hangar 16	hangar 14	Cloud: Cloud/Mesh - Cloud/Mesh	On	1.0000	601966	0.000 m	aligned [0.009 m]
Cloud/Mesh 38	hangar 16	hangar 15	Cloud: Cloud/Mesh - Cloud/Mesh	On	1.0000	529796	0.000 m	aligned [0.009 m]
Cloud/Mesh 39	hangar 1	hangar 6	Cloud: Cloud/Mesh - Cloud/Mesh	On	1.0000	693288	0.000 m	aligned [0.008 m]
Cloud/Mesh 40	hangar 1	hangar 7	Cloud: Cloud/Mesh - Cloud/Mesh	On	1.0000	754020	0.000 m	aligned [0.008 m]
Cloud/Mesh 41	hangar 1	hangar 17	Cloud: Cloud/Mesh - Cloud/Mesh	On	1.0000	682870	0.000 m	aligned [0.008 m]
Cloud/Mesh 42	hangar 1	hangar 8	Cloud: Cloud/Mesh - Cloud/Mesh	On	1.0000	718600	0.000 m	aligned [0.008 m]
Cloud/Mesh 43	hangar 1	hangar 9	Cloud: Cloud/Mesh - Cloud/Mesh	On	1.0000	578682	0.001 m	aligned [0.008 m]
Cloud/Mesh 44	hangar 1	hangar 10	Cloud: Cloud/Mesh - Cloud/Mesh	On	1.0000	626598	0.001 m	aligned [0.008 m]
Cloud/Mesh 45	hangar 1	hangar 11	Cloud: Cloud/Mesh - Cloud/Mesh	On	1.0000	975892	0.000 m	aligned [0.008 m]
Cloud/Mesh 46	hangar 1	hangar 12	Cloud: Cloud/Mesh - Cloud/Mesh	On	1.0000	344010	0.000 m	aligned [0.008 m]
Cloud/Mesh 47	hangar 1	hangar 13	Cloud: Cloud/Mesh - Cloud/Mesh	On	1.0000	682106	0.001 m	aligned [0.009 m]
Cloud/Mesh 48	hangar 1	hangar 14	Cloud: Cloud/Mesh - Cloud/Mesh	On	1.0000	767978	0.000 m	aligned [0.008 m]
Cloud/Mesh 49	hangar 1	hangar 15	Cloud: Cloud/Mesh - Cloud/Mesh	On	1.0000	751834	0.000 m	aligned [0.009 m]
Cloud/Mesh 50	hangar 2	hangar 6	Cloud: Cloud/Mesh - Cloud/Mesh	On	1.0000	834400	0.000 m	aligned [0.008 m]
Cloud/Mesh 51	hangar 2	hangar 7	Cloud: Cloud/Mesh - Cloud/Mesh	On	1.0000	947870	0.000 m	aligned [0.008 m]
Cloud/Mesh 52	hangar 2	hangar 17	Cloud: Cloud/Mesh - Cloud/Mesh	On	1.0000	855846	0.000 m	aligned [0.008 m]
Cloud/Mesh 53	hangar 2	hangar 8	Cloud: Cloud/Mesh - Cloud/Mesh	On	1.0000	964986	0.000 m	aligned [0.008 m]
Cloud/Mesh 54	hangar 2	hangar 9	Cloud: Cloud/Mesh - Cloud/Mesh	On	1.0000	687692	0.000 m	aligned [0.008 m]
Cloud/Mesh 55	hangar 2	hangar 10	Cloud: Cloud/Mesh - Cloud/Mesh	On	1.0000	747780	0.001 m	aligned [0.008 m]
Cloud/Mesh 56	hangar 2	hangar 11	Cloud: Cloud/Mesh - Cloud/Mesh	On	1.0000	1143926	0.000 m	aligned [0.008 m]
Cloud/Mesh 57	hangar 2	hangar 12	Cloud: Cloud/Mesh - Cloud/Mesh	On	1.0000	448860	0.000 m	aligned [0.008 m]
Cloud/Mesh 58	hangar 2	hangar 13	Cloud: Cloud/Mesh - Cloud/Mesh	On	1.0000	821822	0.000 m	aligned [0.009 m]
Cloud/Mesh 59	hangar 2	hangar 14	Cloud: Cloud/Mesh - Cloud/Mesh	On	1.0000	882846	0.000 m	aligned [0.008 m]
Cloud/Mesh 60	hangar 2	hangar 15	Cloud: Cloud/Mesh - Cloud/Mesh	On	1.0000	854424	0.000 m	aligned [0.008 m]
Cloud/Mesh 61	hangar 3	hangar 6	Cloud: Cloud/Mesh - Cloud/Mesh	On	1.0000	813748	0.000 m	aligned [0.008 m]
Cloud/Mesh 62	hangar 3	hangar 7	Cloud: Cloud/Mesh - Cloud/Mesh	On	1.0000	917178	0.000 m	aligned [0.008 m]
Cloud/Mesh 63	hangar 3	hangar 17	Cloud: Cloud/Mesh - Cloud/Mesh	On	1.0000	802408	0.000 m	aligned [0.008 m]
Cloud/Mesh 64	hangar 3	hangar 8	Cloud: Cloud/Mesh - Cloud/Mesh	On	1.0000	900304	0.000 m	aligned [0.008 m]
Cloud/Mesh 65	hangar 3	hangar 9	Cloud: Cloud/Mesh - Cloud/Mesh	On	1.0000	651412	0.000 m	aligned [0.008 m]
Cloud/Mesh 66	hangar 3	hangar 10	Cloud: Cloud/Mesh - Cloud/Mesh	On	1.0000	692856	0.001 m	aligned [0.008 m]
Cloud/Mesh 67	hangar 3	hangar 11	Cloud: Cloud/Mesh - Cloud/Mesh	On	1.0000	1089246	0.000 m	aligned [0.008 m]
Cloud/Mesh 68	hangar 3	hangar 12	Cloud: Cloud/Mesh - Cloud/Mesh	On	1.0000	394854	0.001 m	aligned [0.008 m]
Cloud/Mesh 69	hangar 3	hangar 13	Cloud: Cloud/Mesh - Cloud/Mesh	On	1.0000	800206	0.001 m	aligned [0.009 m]
Cloud/Mesh 70	hangar 3	hangar 14	Cloud: Cloud/Mesh - Cloud/Mesh	On	1.0000	885410	0.000 m	aligned [0.008 m]
Cloud/Mesh 71	hangar 3	hangar 15	Cloud: Cloud/Mesh - Cloud/Mesh	On	1.0000	877260	0.001 m	aligned [0.008 m]
Cloud/Mesh 72	hangar 4	hangar 6	Cloud: Cloud/Mesh - Cloud/Mesh	On	1.0000	830578	0.000 m	aligned [0.008 m]
Cloud/Mesh 73	hangar 4	hangar 7	Cloud: Cloud/Mesh - Cloud/Mesh	On	1.0000	814090	0.000 m	aligned [0.008 m]
Cloud/Mesh 74	hangar 4	hangar 17	Cloud: Cloud/Mesh - Cloud/Mesh	On	1.0000	733762	0.000 m	aligned [0.008 m]
Cloud/Mesh 75	hangar 4	hangar 8	Cloud: Cloud/Mesh - Cloud/Mesh	On	1.0000	836298	0.000 m	aligned [0.008 m]
Cloud/Mesh 76	hangar 4	hangar 9	Cloud: Cloud/Mesh - Cloud/Mesh	On	1.0000	566634	0.000 m	aligned [0.008 m]
Cloud/Mesh 77	hangar 4	hangar 10	Cloud: Cloud/Mesh - Cloud/Mesh	On	1.0000	579884	0.001 m	aligned [0.008 m]
Cloud/Mesh 78	hangar 4	hangar 11	Cloud: Cloud/Mesh - Cloud/Mesh	On	1.0000	952690	0.000 m	aligned [0.008 m]
Cloud/Mesh 79	hangar 4	hangar 12	Cloud: Cloud/Mesh - Cloud/Mesh	On	1.0000	398034	0.001 m	aligned [0.008 m]
Cloud/Mesh 80	hangar 4	hangar 13	Cloud: Cloud/Mesh - Cloud/Mesh	On	1.0000	714088	0.001 m	aligned [0.009 m]
Cloud/Mesh 81	hangar 4	hangar 15	Cloud: Cloud/Mesh - Cloud/Mesh	On	1.0000	832124	0.000 m	aligned [0.008 m]
Cloud/Mesh 82	hangar 5	hangar 6	Cloud: Cloud/Mesh - Cloud/Mesh	On	1.0000	958546	0.000 m	aligned [0.007 m]

Cloud/Mesh 83	hangar 5	hangar 7	Cloud: Cloud/Mesh - Cloud/Mesh	On	1.0000	909960	0.000 m	aligned [0.008 m]
Cloud/Mesh 84	hangar 5	hangar 17	Cloud: Cloud/Mesh - Cloud/Mesh	On	1.0000	793094	0.001 m	aligned [0.008 m]
Cloud/Mesh 85	hangar 5	hangar 8	Cloud: Cloud/Mesh - Cloud/Mesh	On	1.0000	872296	0.000 m	aligned [0.008 m]
Cloud/Mesh 86	hangar 5	hangar 9	Cloud: Cloud/Mesh - Cloud/Mesh	On	1.0000	483684	0.001 m	aligned [0.009 m]
Cloud/Mesh 87	hangar 5	hangar 10	Cloud: Cloud/Mesh - Cloud/Mesh	On	1.0000	624402	0.000 m	aligned [0.008 m]
Cloud/Mesh 88	hangar 5	hangar 11	Cloud: Cloud/Mesh - Cloud/Mesh	On	1.0000	816512	0.001 m	aligned [0.008 m]
Cloud/Mesh 89	hangar 5	hangar 12	Cloud: Cloud/Mesh - Cloud/Mesh	On	1.0000	461018	0.001 m	aligned [0.008 m]
Cloud/Mesh 90	hangar 5	hangar 13	Cloud: Cloud/Mesh - Cloud/Mesh	On	1.0000	598146	0.001 m	aligned [0.009 m]
Cloud/Mesh 91	hangar 5	hangar 14	Cloud: Cloud/Mesh - Cloud/Mesh	On	1.0000	722638	0.001 m	aligned [0.009 m]
Cloud/Mesh 92	hangar 5	hangar 15	Cloud: Cloud/Mesh - Cloud/Mesh	On	1.0000	842552	0.000 m	aligned [0.008 m]
Cloud/Mesh 93	hangar 6	hangar 17	Cloud: Cloud/Mesh - Cloud/Mesh	On	1.0000	848394	0.000 m	aligned [0.008 m]
Cloud/Mesh 94	hangar 6	hangar 8	Cloud: Cloud/Mesh - Cloud/Mesh	On	1.0000	851872	0.000 m	aligned [0.008 m]
Cloud/Mesh 95	hangar 6	hangar 10	Cloud: Cloud/Mesh - Cloud/Mesh	On	1.0000	660198	0.001 m	aligned [0.009 m]
Cloud/Mesh 96	hangar 6	hangar 11	Cloud: Cloud/Mesh - Cloud/Mesh	On	1.0000	806974	0.000 m	aligned [0.008 m]
Cloud/Mesh 97	hangar 6	hangar 12	Cloud: Cloud/Mesh - Cloud/Mesh	On	1.0000	425500	0.001 m	aligned [0.008 m]
Cloud/Mesh 98	hangar 6	hangar 13	Cloud: Cloud/Mesh - Cloud/Mesh	On	1.0000	747760	0.001 m	aligned [0.009 m]
Cloud/Mesh 99	hangar 6	hangar 14	Cloud: Cloud/Mesh - Cloud/Mesh	On	1.0000	832806	0.001 m	aligned [0.008 m]
Cloud/Mesh 100	hangar 6	hangar 15	Cloud: Cloud/Mesh - Cloud/Mesh	On	1.0000	934274	0.000 m	aligned [0.008 m]
Cloud/Mesh 101	hangar 7	hangar 8	Cloud: Cloud/Mesh - Cloud/Mesh	On	1.0000	967918	0.000 m	aligned [0.008 m]
Cloud/Mesh 102	hangar 7	hangar 9	Cloud: Cloud/Mesh - Cloud/Mesh	On	1.0000	793068	0.001 m	aligned [0.008 m]
Cloud/Mesh 103	hangar 7	hangar 10	Cloud: Cloud/Mesh - Cloud/Mesh	On	1.0000	812294	0.001 m	aligned [0.008 m]
Cloud/Mesh 104	hangar 7	hangar 11	Cloud: Cloud/Mesh - Cloud/Mesh	On	1.0000	915408	0.000 m	aligned [0.008 m]
Cloud/Mesh 105	hangar 7	hangar 12	Cloud: Cloud/Mesh - Cloud/Mesh	On	1.0000	476024	0.000 m	aligned [0.008 m]
Cloud/Mesh 106	hangar 7	hangar 13	Cloud: Cloud/Mesh - Cloud/Mesh	On	1.0000	795076	0.000 m	aligned [0.008 m]
Cloud/Mesh 107	hangar 7	hangar 14	Cloud: Cloud/Mesh - Cloud/Mesh	On	1.0000	898994	0.000 m	aligned [0.008 m]
Cloud/Mesh 108	hangar 7	hangar 15	Cloud: Cloud/Mesh - Cloud/Mesh	On	1.0000	940362	0.000 m	aligned [0.008 m]
Cloud/Mesh 109	hangar 17	hangar 9	Cloud: Cloud/Mesh - Cloud/Mesh	On	1.0000	631126	0.001 m	aligned [0.009 m]
Cloud/Mesh 110	hangar 17	hangar 10	Cloud: Cloud/Mesh - Cloud/Mesh	On	1.0000	681846	0.001 m	aligned [0.008 m]
Cloud/Mesh 111	hangar 17	hangar 11	Cloud: Cloud/Mesh - Cloud/Mesh	On	1.0000	804106	0.000 m	aligned [0.008 m]
Cloud/Mesh 112	hangar 17	hangar 12	Cloud: Cloud/Mesh - Cloud/Mesh	On	1.0000	440380	0.001 m	aligned [0.008 m]
Cloud/Mesh 113	hangar 17	hangar 13	Cloud: Cloud/Mesh - Cloud/Mesh	On	1.0000	649124	0.001 m	aligned [0.009 m]
Cloud/Mesh 114	hangar 17	hangar 14	Cloud: Cloud/Mesh - Cloud/Mesh	On	1.0000	751712	0.000 m	aligned [0.009 m]
Cloud/Mesh 115	hangar 17	hangar 15	Cloud: Cloud/Mesh - Cloud/Mesh	On	1.0000	806840	0.000 m	aligned [0.008 m]
Cloud/Mesh 116	hangar 8	hangar 11	Cloud: Cloud/Mesh - Cloud/Mesh	On	1.0000	819212	0.000 m	aligned [0.008 m]
Cloud/Mesh 117	hangar 8	hangar 12	Cloud: Cloud/Mesh - Cloud/Mesh	On	1.0000	601832	0.001 m	aligned [0.008 m]
Cloud/Mesh 118	hangar 8	hangar 13	Cloud: Cloud/Mesh - Cloud/Mesh	On	1.0000	702086	0.001 m	aligned [0.009 m]
Cloud/Mesh 119	hangar 8	hangar 14	Cloud: Cloud/Mesh - Cloud/Mesh	On	1.0000	775188	0.000 m	aligned [0.009 m]
Cloud/Mesh 120	hangar 8	hangar 15	Cloud: Cloud/Mesh - Cloud/Mesh	On	1.0000	810524	0.000 m	aligned [0.008 m]
Cloud/Mesh 121	hangar 9	hangar 10	Cloud: Cloud/Mesh - Cloud/Mesh	On	1.0000	985622	0.001 m	aligned [0.007 m]
Cloud/Mesh 122	hangar 9	hangar 11	Cloud: Cloud/Mesh - Cloud/Mesh	On	1.0000	817114	0.000 m	aligned [0.008 m]
Cloud/Mesh 123	hangar 9	hangar 12	Cloud: Cloud/Mesh - Cloud/Mesh	On	1.0000	275430	0.001 m	aligned [0.008 m]
Cloud/Mesh 124	hangar 9	hangar 13	Cloud: Cloud/Mesh - Cloud/Mesh	On	1.0000	946234	0.001 m	aligned [0.008 m]
Cloud/Mesh 125	hangar 9	hangar 14	Cloud: Cloud/Mesh - Cloud/Mesh	On	1.0000	826990	0.000 m	aligned [0.008 m]
Cloud/Mesh 126	hangar 10	hangar 11	Cloud: Cloud/Mesh - Cloud/Mesh	On	1.0000	823222	0.000 m	aligned [0.008 m]
Cloud/Mesh 127	hangar 10	hangar 12	Cloud: Cloud/Mesh - Cloud/Mesh	On	1.0000	341808	0.001 m	aligned [0.007 m]
Cloud/Mesh 128	hangar 10	hangar 13	Cloud: Cloud/Mesh - Cloud/Mesh	On	1.0000	852496	0.001 m	aligned [0.008 m]
Cloud/Mesh 129	hangar 10	hangar 14	Cloud: Cloud/Mesh - Cloud/Mesh	On	1.0000	780178	0.001 m	aligned [0.008 m]
Cloud/Mesh 130	hangar 10	hangar 15	Cloud: Cloud/Mesh - Cloud/Mesh	On	1.0000	579082	0.001 m	aligned [0.009 m]
Cloud/Mesh 131	hangar 11	hangar 13	Cloud: Cloud/Mesh - Cloud/Mesh	On	1.0000	905518	0.000 m	aligned [0.008 m]
Cloud/Mesh 132	hangar 11	hangar 14	Cloud: Cloud/Mesh - Cloud/Mesh	On	1.0000	954876	0.000 m	aligned [0.008 m]
Cloud/Mesh 133	hangar 11	hangar 15	Cloud: Cloud/Mesh - Cloud/Mesh	On	1.0000	870430	0.000 m	aligned [0.008 m]
Cloud/Mesh 134	hangar 12	hangar 14	Cloud: Cloud/Mesh - Cloud/Mesh	On	1.0000	419102	0.001 m	aligned [0.008 m]
Cloud/Mesh 135	hangar 12	hangar 15	Cloud: Cloud/Mesh - Cloud/Mesh	On	1.0000	437662	0.001 m	aligned [0.009 m]
Cloud/Mesh 136	hangar 13	hangar 15	Cloud: Cloud/Mesh - Cloud/Mesh	On	1.0000	1097518	0.001 m	aligned [0.008 m]
Cloud/Mesh 1	[hangar 16 : hangar 1]							

Objective Function Value: 3.86296e-05 sq m

Iterations: 19

Overlap Point Count: 729146

Overlap Error Statistics

RMS: 0.00836122 m

AVG: 0.00563075 m

MIN: 1.41463e-09 m

MAX: 0.076523 m

Overlap Center: (2.736, -3.112, 6.636) m

Error after global registration: 1.37217e-07 sq m

Translation: (0.633, -0.508, -0.151) m

Rotation: (0.0014, 0.0008, 1.0000):156.072 deg

Cloud/Mesh 2 [hangar 2 : hangar 1]

Objective Function Value: 2.2287e-05 sq m

Iterations: 190

Overlap Point Count: 393802

Overlap Error Statistics

RMS: 0.00566962 m

AVG: 0.00377003 m

MIN: 1.46009e-08 m

MAX: 0.0463941 m

Overlap Center: (1.030, -2.658, 8.734) m

Error after global registration: 1.09656e-06 sq m

Translation: (0.421, 6.916, -0.101) m

Rotation: (0.0099, 0.0065, 0.9999):174.887 deg

Cloud/Mesh 3 [hangar 2 : hangar 4]

Objective Function Value: 2.96961e-05 sq m

Iterations: 29

Overlap Point Count: 951356

Overlap Error Statistics

RMS: 0.00707769 m

AVG: 0.00456874 m

MIN: 1.6811e-09 m

MAX: 0.0497151 m

Overlap Center: (3.843, 3.414, 7.613) m

Error after global registration: 5.78402e-08 sq m

Translation: (-0.902, -10.299, 0.156) m

Rotation: (0.0066, 0.0134, 0.9999):-64.623 deg

Cloud/Mesh 4 [hangar 5 : hangar 4]

Objective Function Value: 2.43704e-05 sq m

Iterations: 33

Overlap Point Count: 881682

Overlap Error Statistics

RMS: 0.00707665 m

AVG: 0.00435722 m

MIN: 1.60362e-09 m

MAX: 0.0498895 m

Overlap Center: (-5.840, 8.319, 5.910) m

Error after global registration: 7.96046e-08 sq m

Translation: (-3.366, -0.095, -0.309) m

Rotation: (-0.0889, 0.0630, 0.9940):-15.239 deg

Cloud/Mesh 5 [hangar 5 : hangar 3]

Objective Function Value: 2.63616e-05 sq m

Iterations: 43

Overlap Point Count: 821790

Overlap Error Statistics

RMS: 0.00765799 m

AVG: 0.00482345 m

MIN: 1.11128e-09 m

MAX: 0.0495454 m
 Overlap Center: (-6.483, 10.187, 6.170) m
 Error after global registration: 1.28306e-07 sq m
 Translation: (-7.202, 3.226, -0.323) m
 Rotation: (0.0248, -0.0284, -0.9993):53.326 deg
 Cloud/Mesh 6 [hangar 16 : hangar 2]
 Objective Function Value: 4.45008e-05 sq m
 Iterations: 41
 Overlap Point Count: 686694
 Overlap Error Statistics
 RMS: 0.00851632 m
 AVG: 0.00575482 m
 MIN: 5.33934e-09 m
 MAX: 0.0498245 m
 Overlap Center: (4.338, -3.198, 7.091) m
 Error after global registration: 6.95229e-08 sq m
 Translation: (-1.997, -6.922, -0.131) m
 Rotation: (0.0211, -0.0594, -0.9980):18.854 deg
 Cloud/Mesh 7 [hangar 16 : hangar 3]
 Objective Function Value: 3.83043e-05 sq m
 Iterations: 50
 Overlap Point Count: 613834
 Overlap Error Statistics
 RMS: 0.00834033 m
 AVG: 0.0057102 m
 MIN: 2.89777e-08 m
 MAX: 0.0493021 m
 Overlap Center: (4.208, -3.184, 7.319) m
 Error after global registration: 3.6974e-08 sq m
 Translation: (-4.508, -11.588, -0.122) m
 Rotation: (0.0004, -0.0191, -0.9998):121.597 deg
 Cloud/Mesh 8 [hangar 16 : hangar 4]
 Objective Function Value: 3.65962e-05 sq m
 Iterations: 49
 Overlap Point Count: 521870
 Overlap Error Statistics
 RMS: 0.00816726 m
 AVG: 0.00563466 m
 MIN: 6.04725e-08 m
 MAX: 0.0490329 m
 Overlap Center: (3.757, -4.387, 7.191) m
 Error after global registration: 2.5584e-08 sq m
 Translation: (-6.174, -16.380, -0.095) m
 Rotation: (-0.0052, 0.0194, 0.9998):-83.453 deg
 Cloud/Mesh 9 [hangar 16 : hangar 5]
 Objective Function Value: 4.00102e-05 sq m
 Iterations: 37
 Overlap Point Count: 484582
 Overlap Error Statistics
 RMS: 0.00853203 m
 AVG: 0.00570463 m
 MIN: 6.4183e-09 m
 MAX: 0.0514217 m
 Overlap Center: (3.597, -6.974, 7.068) m
 Error after global registration: 1.28837e-07 sq m
 Translation: (-4.840, -19.471, 0.214) m
 Rotation: (-0.0026, 0.0015, -1.0000):68.297 deg

Cloud/Mesh 10 [hangar 1 : hangar 3]
 Objective Function Value: 3.19268e-05 sq m
 Iterations: 42
 Overlap Point Count: 905254
 Overlap Error Statistics
 RMS: 0.00764329 m
 AVG: 0.00512994 m
 MIN: 7.59543e-09 m
 MAX: 0.0488747 m
 Overlap Center: (-2.263, 3.903, 8.232) m
 Error after global registration: 1.40745e-07 sq m
 Translation: (0.204, 12.213, 0.004) m
 Rotation: (-0.0247, -0.0081, -0.9997):-82.358 deg

Cloud/Mesh 11 [hangar 1 : hangar 4]
 Objective Function Value: 3.59386e-05 sq m
 Iterations: 33
 Overlap Point Count: 810608
 Overlap Error Statistics
 RMS: 0.00811836 m
 AVG: 0.00539715 m
 MIN: 9.06727e-10 m
 MAX: 0.0570818 m
 Overlap Center: (-2.919, 5.178, 7.727) m
 Error after global registration: 6.08841e-08 sq m
 Translation: (-0.215, 17.269, 0.021) m
 Rotation: (0.0143, 0.0087, 0.9999):120.491 deg

Cloud/Mesh 12 [hangar 1 : hangar 5]
 Objective Function Value: 3.09354e-05 sq m
 Iterations: 52
 Overlap Point Count: 630582
 Overlap Error Statistics
 RMS: 0.0078748 m
 AVG: 0.00522288 m
 MIN: 2.5793e-08 m
 MAX: 0.0482331 m
 Overlap Center: (-4.663, 8.463, 7.000) m
 Error after global registration: 2.73183e-07 sq m
 Translation: (-2.688, 19.554, 0.331) m
 Rotation: (-0.0002, 0.0002, -1.0000):-135.631 deg

Cloud/Mesh 13 [hangar 2 : hangar 3]
 Objective Function Value: 2.31459e-05 sq m
 Iterations: 39
 Overlap Point Count: 1193918
 Overlap Error Statistics
 RMS: 0.00747266 m
 AVG: 0.00479658 m
 MIN: 6.9441e-09 m
 MAX: 0.0497235 m
 Overlap Center: (3.795, 3.700, 7.387) m
 Error after global registration: 3.13565e-08 sq m
 Translation: (-0.870, -5.226, 0.076) m
 Rotation: (-0.0090, -0.0188, -0.9998):102.765 deg

Cloud/Mesh 14 [hangar 2 : hangar 5]
 Objective Function Value: 3.43021e-05 sq m
 Iterations: 22
 Overlap Point Count: 868530
 Overlap Error Statistics

RMS: 0.0080534 m
AVG: 0.00515967 m
MIN: 3.76508e-09 m
MAX: 0.0499643 m
Overlap Center: (4.937, -0.866, 6.554) m
Error after global registration: 6.15795e-08 sq m
Translation: (1.364, -12.792, 0.449) m
Rotation: (-0.0237, 0.0160, -0.9996):49.497 deg
Cloud/Mesh 15 [hangar 3 : hangar 4]
Has Been Partially Aligned
Current Alignment Transform:
Cloud/Mesh 16 [hangar 6 : hangar 7]
Objective Function Value: 3.90454e-05 sq m
Iterations: 47
Overlap Point Count: 945166
Overlap Error Statistics
RMS: 0.00913026 m
AVG: 0.00522869 m
MIN: 5.74445e-08 m
MAX: 0.096644 m
Overlap Center: (-14.154, 1.597, 6.407) m
Error after global registration: 2.51114e-08 sq m
Translation: (-6.987, 0.388, 0.005) m
Rotation: (0.0051, 0.0073, 1.0000):-98.287 deg
Cloud/Mesh 17 [hangar 17 : hangar 7]
Objective Function Value: 2.67034e-05 sq m
Iterations: 24
Overlap Point Count: 1031206
Overlap Error Statistics
RMS: 0.00782564 m
AVG: 0.00500306 m
MIN: 1.05201e-08 m
MAX: 0.0492559 m
Overlap Center: (0.287, -3.614, 6.448) m
Error after global registration: 1.85964e-08 sq m
Translation: (-1.042, 2.437, 0.004) m
Rotation: (0.0270, -0.0688, 0.9973):10.363 deg
Cloud/Mesh 18 [hangar 17 : hangar 8]
Objective Function Value: 2.52189e-05 sq m
Iterations: 36
Overlap Point Count: 856618
Overlap Error Statistics
RMS: 0.0076825 m
AVG: 0.00488576 m
MIN: 2.26874e-09 m
MAX: 0.0494073 m
Overlap Center: (-0.471, -3.722, 6.527) m
Error after global registration: 1.0127e-07 sq m
Translation: (1.501, 2.584, -0.996) m
Rotation: (0.0002, -0.0005, 1.0000):-151.679 deg
Cloud/Mesh 19 [hangar 9 : hangar 8]
Objective Function Value: 3.68612e-05 sq m
Iterations: 23
Overlap Point Count: 648098
Overlap Error Statistics
RMS: 0.0083354 m
AVG: 0.00548027 m

MIN: 3.03622e-09 m
 MAX: 0.0493661 m
 Overlap Center: (0.334, 1.933, 7.009) m
 Error after global registration: 1.40065e-07 sq m
 Translation: (10.714, 15.415, -0.982) m
 Rotation: (0.0001, -0.0005, 1.0000):175.965 deg
 Cloud/Mesh 20 [hangar 9 : hangar 6]
 Objective Function Value: 4.39081e-05 sq m
 Iterations: 15
 Overlap Point Count: 728410
 Overlap Error Statistics
 RMS: 0.00870586 m
 AVG: 0.00591362 m
 MIN: 1.25581e-09 m
 MAX: 0.0951638 m
 Overlap Center: (0.759, 2.241, 7.143) m
 Error after global registration: 4.40443e-08 sq m
 Translation: (10.523, 23.347, 0.017) m
 Rotation: (0.0004, -0.0002, 1.0000):76.264 deg
 Cloud/Mesh 21 [hangar 10 : hangar 8]
 Objective Function Value: 3.39618e-05 sq m
 Iterations: 36
 Overlap Point Count: 733304
 Overlap Error Statistics
 RMS: 0.00813183 m
 AVG: 0.00537296 m
 MIN: 1.04278e-08 m
 MAX: 0.0495747 m
 Overlap Center: (-2.092, 3.068, 7.127) m
 Error after global registration: 7.7597e-08 sq m
 Translation: (-6.958, 17.072, -1.477) m
 Rotation: (0.0074, -0.0019, 1.0000):-134.139 deg
 Cloud/Mesh 22 [hangar 12 : hangar 11]
 Objective Function Value: 2.24415e-05 sq m
 Iterations: 26
 Overlap Point Count: 366226
 Overlap Error Statistics
 RMS: 0.00791867 m
 AVG: 0.00478823 m
 MIN: 7.44279e-09 m
 MAX: 0.0494827 m
 Overlap Center: (-5.854, -1.463, 6.332) m
 Error after global registration: 2.37943e-07 sq m
 Translation: (0.596, 5.253, 2.174) m
 Rotation: (-0.0153, -0.0582, -0.9982):85.355 deg
 Cloud/Mesh 23 [hangar 12 : hangar 13]
 Objective Function Value: 2.62728e-05 sq m
 Iterations: 63
 Overlap Point Count: 344734
 Overlap Error Statistics
 RMS: 0.0081301 m
 AVG: 0.00508985 m
 MIN: 4.22455e-09 m
 MAX: 0.0496662 m
 Overlap Center: (-4.553, -1.388, 6.787) m
 Error after global registration: 6.75103e-07 sq m
 Translation: (15.071, -5.775, 5.016) m

Rotation: (0.0001, 0.0008, -1.0000):58.627 deg
Cloud/Mesh 24 [hangar 14 : hangar 13]
Objective Function Value: 2.70144e-05 sq m
Iterations: 31
Overlap Point Count: 1492932
Overlap Error Statistics
RMS: 0.00774346 m
AVG: 0.00500491 m
MIN: 4.83999e-09 m
MAX: 0.0495601 m
Overlap Center: (6.558, -6.035, 1.983) m
Error after global registration: 8.33032e-08 sq m
Translation: (-0.082, -12.223, -0.028) m
Rotation: (-0.0006, -0.0003, 1.0000):-155.400 deg
Cloud/Mesh 25 [hangar 14 : hangar 15]
Objective Function Value: 2.94755e-05 sq m
Iterations: 25
Overlap Point Count: 1268276
Overlap Error Statistics
RMS: 0.00791723 m
AVG: 0.00504862 m
MIN: 2.68968e-08 m
MAX: 0.0498206 m
Overlap Center: (7.569, 0.368, 1.664) m
Error after global registration: 1.80309e-07 sq m
Translation: (-0.301, 13.786, -0.009) m
Rotation: (-0.0008, 0.0013, -1.0000):-51.501 deg
Cloud/Mesh 26 [hangar 14 : hangar 4]
Objective Function Value: 3.51386e-05 sq m
Iterations: 15
Overlap Point Count: 778744
Overlap Error Statistics
RMS: 0.0083349 m
AVG: 0.00540451 m
MIN: 8.99297e-09 m
MAX: 0.0837668 m
Overlap Center: (7.342, 0.887, 2.620) m
Error after global registration: 7.25927e-08 sq m
Translation: (10.610, 16.471, -4.009) m
Rotation: (0.0138, 0.0080, 0.9999):121.898 deg
Cloud/Mesh 27 [hangar 9 : hangar 15]
Objective Function Value: 4.22142e-05 sq m
Iterations: 13
Overlap Point Count: 641180
Overlap Error Statistics
RMS: 0.00891839 m
AVG: 0.00591666 m
MIN: 1.64294e-08 m
MAX: 0.0956208 m
Overlap Center: (1.179, 2.136, 6.690) m
Error after global registration: 1.06015e-06 sq m
Translation: (4.595, 21.732, 4.044) m
Rotation: (-0.0018, -0.0003, -1.0000):-26.203 deg
Cloud/Mesh 28 [hangar 16 : hangar 6]
Objective Function Value: 4.64678e-05 sq m
Iterations: 17
Overlap Point Count: 496592

Overlap Error Statistics

RMS: 0.00874411 m

AVG: 0.00596186 m

MIN: 3.43845e-08 m

MAX: 0.0556073 m

Overlap Center: (4.130, -4.277, 7.215) m

Error after global registration: 1.21131e-07 sq m

Translation: (-1.102, -20.232, -0.120) m

Rotation: (0.0019, -0.0007, 1.0000):-103.777 deg

Cloud/Mesh 29 [hangar 16 : hangar 7]

Objective Function Value: 4.32921e-05 sq m

Iterations: 13

Overlap Point Count: 574316

Overlap Error Statistics

RMS: 0.00870808 m

AVG: 0.00588009 m

MIN: 1.26842e-08 m

MAX: 0.0961523 m

Overlap Center: (4.120, -3.851, 7.094) m

Error after global registration: 3.97132e-08 sq m

Translation: (0.939, -13.538, -0.128) m

Rotation: (0.0082, 0.0012, 1.0000):157.938 deg

Cloud/Mesh 30 [hangar 16 : hangar 17]

Objective Function Value: 4.05867e-05 sq m

Iterations: 17

Overlap Point Count: 517668

Overlap Error Statistics

RMS: 0.00861716 m

AVG: 0.00585239 m

MIN: 3.77941e-08 m

MAX: 0.0659022 m

Overlap Center: (3.691, -5.471, 7.127) m

Error after global registration: 1.41689e-07 sq m

Translation: (1.364, -10.922, -0.135) m

Rotation: (0.0014, 0.0007, 1.0000):147.603 deg

Cloud/Mesh 31 [hangar 16 : hangar 8]

Objective Function Value: 4.10518e-05 sq m

Iterations: 9

Overlap Point Count: 540154

Overlap Error Statistics

RMS: 0.00939931 m

AVG: 0.00593332 m

MIN: 1.61158e-08 m

MAX: 0.0988222 m

Overlap Center: (4.320, -3.264, 6.669) m

Error after global registration: 7.65171e-08 sq m

Translation: (-1.289, -12.301, -1.122) m

Rotation: (0.0239, -0.0403, 0.9989):-4.080 deg

Cloud/Mesh 32 [hangar 16 : hangar 9]

Objective Function Value: 3.91161e-05 sq m

Iterations: 27

Overlap Point Count: 485102

Overlap Error Statistics

RMS: 0.00891694 m

AVG: 0.00599891 m

MIN: 4.51346e-08 m

MAX: 0.0498378 m

Overlap Center: (7.711, 1.942, 7.180) m
 Error after global registration: 2.85299e-07 sq m
 Translation: (9.438, 3.106, -0.180) m
 Rotation: (0.0015, 0.0002, 1.0000):179.954 deg
 Cloud/Mesh 33 [hangar 16 : hangar 10]
 Objective Function Value: 4.4578e-05 sq m
 Iterations: 25
 Overlap Point Count: 565272
 Overlap Error Statistics
 RMS: 0.00864148 m
 AVG: 0.00583797 m
 MIN: 1.70216e-08 m
 MAX: 0.0492373 m
 Overlap Center: (6.077, 0.348, 7.184) m
 Error after global registration: 6.7268e-08 sq m
 Translation: (7.318, 4.000, 0.364) m
 Rotation: (-0.0086, 0.0007, -1.0000):-130.062 deg
 Cloud/Mesh 34 [hangar 16 : hangar 11]
 Objective Function Value: 3.49355e-05 sq m
 Iterations: 20
 Overlap Point Count: 748310
 Overlap Error Statistics
 RMS: 0.00843065 m
 AVG: 0.00564277 m
 MIN: 4.19764e-08 m
 MAX: 0.0538061 m
 Overlap Center: (4.583, -2.346, 7.098) m
 Error after global registration: 2.28711e-07 sq m
 Translation: (-1.268, -1.420, 1.038) m
 Rotation: (-0.0397, 0.1612, 0.9861):-27.723 deg
 Cloud/Mesh 35 [hangar 16 : hangar 12]
 Objective Function Value: 3.02056e-05 sq m
 Iterations: 17
 Overlap Point Count: 222038
 Overlap Error Statistics
 RMS: 0.00835681 m
 AVG: 0.0050854 m
 MIN: 4.03209e-08 m
 MAX: 0.0632724 m
 Overlap Center: (1.166, -8.338, 5.280) m
 Error after global registration: 6.90472e-07 sq m
 Translation: (2.862, -4.717, -1.142) m
 Rotation: (-0.0006, -0.0021, -1.0000):-57.898 deg
 Cloud/Mesh 36 [hangar 16 : hangar 13]
 Objective Function Value: 4.31064e-05 sq m
 Iterations: 29
 Overlap Point Count: 545288
 Overlap Error Statistics
 RMS: 0.00887813 m
 AVG: 0.0060244 m
 MIN: 9.41357e-09 m
 MAX: 0.0497397 m
 Overlap Center: (4.897, 0.759, 7.060) m
 Error after global registration: 1.88337e-07 sq m
 Translation: (15.774, 4.980, 3.840) m
 Rotation: (0.0737, -0.2124, 0.9744):-0.756 deg
 Cloud/Mesh 37 [hangar 16 : hangar 14]

Objective Function Value: 3.82101e-05 sq m

Iterations: 26

Overlap Point Count: 601966

Overlap Error Statistics

RMS: 0.00872686 m

AVG: 0.00585761 m

MIN: 1.13135e-08 m

MAX: 0.0494512 m

Overlap Center: (4.278, -1.768, 6.956) m

Error after global registration: 1.19209e-07 sq m

Translation: (10.470, -6.031, 3.881) m

Rotation: (0.0007, 0.0005, 1.0000):154.665 deg

Cloud/Mesh 38 [hangar 16 : hangar 15]

Objective Function Value: 4.55903e-05 sq m

Iterations: 28

Overlap Point Count: 529796

Overlap Error Statistics

RMS: 0.00885703 m

AVG: 0.00595703 m

MIN: 5.8398e-08 m

MAX: 0.0498646 m

Overlap Center: (2.972, -4.335, 6.748) m

Error after global registration: 9.22636e-08 sq m

Translation: (4.842, -18.619, 3.889) m

Rotation: (-0.0015, -0.0003, -1.0000):153.834 deg

Cloud/Mesh 39 [hangar 1 : hangar 6]

Objective Function Value: 3.43297e-05 sq m

Iterations: 18

Overlap Point Count: 693288

Overlap Error Statistics

RMS: 0.00816206 m

AVG: 0.00531355 m

MIN: 1.0865e-09 m

MAX: 0.0758805 m

Overlap Center: (-4.307, 4.697, 7.068) m

Error after global registration: 7.09073e-08 sq m

Translation: (-6.414, 18.732, 0.008) m

Rotation: (0.0001, -0.0001, 1.0000):100.149 deg

Cloud/Mesh 40 [hangar 1 : hangar 7]

Objective Function Value: 3.42165e-05 sq m

Iterations: 28

Overlap Point Count: 754020

Overlap Error Statistics

RMS: 0.00813369 m

AVG: 0.00530206 m

MIN: 1.84776e-09 m

MAX: 0.0494446 m

Overlap Center: (-4.301, 4.334, 7.064) m

Error after global registration: 6.31461e-08 sq m

Translation: (-5.565, 11.786, 0.013) m

Rotation: (0.1022, -0.3686, 0.9239):2.017 deg

Cloud/Mesh 41 [hangar 1 : hangar 17]

Objective Function Value: 3.3192e-05 sq m

Iterations: 29

Overlap Point Count: 682870

Overlap Error Statistics

RMS: 0.0080993 m

AVG: 0.00534722 m
 MIN: 1.46868e-08 m
 MAX: 0.0498487 m
 Overlap Center: (-4.794, 6.064, 7.152) m
 Error after global registration: 3.34759e-08 sq m
 Translation: (-4.893, 9.223, 0.009) m
 Rotation: (-0.0024, -0.0017, -1.0000):8.470 deg
 Cloud/Mesh 42 [hangar 1 : hangar 8]
 Objective Function Value: 3.27648e-05 sq m
 Iterations: 16
 Overlap Point Count: 718600
 Overlap Error Statistics
 RMS: 0.00805754 m
 AVG: 0.00522143 m
 MIN: 2.38254e-08 m
 MAX: 0.0744859 m
 Overlap Center: (-3.606, 3.425, 6.851) m
 Error after global registration: 3.71977e-08 sq m
 Translation: (-3.028, 11.557, -0.987) m
 Rotation: (0.0001, -0.0003, 1.0000):-160.148 deg
 Cloud/Mesh 43 [hangar 1 : hangar 9]
 Objective Function Value: 2.99529e-05 sq m
 Iterations: 18
 Overlap Point Count: 578682
 Overlap Error Statistics
 RMS: 0.00750384 m
 AVG: 0.00470718 m
 MIN: 3.45921e-09 m
 MAX: 0.0695239 m
 Overlap Center: (-4.851, -4.476, 7.184) m
 Error after global registration: 3.68394e-07 sq m
 Translation: (-6.583, -6.876, -0.001) m
 Rotation: (-0.0007, -0.0004, 1.0000):23.881 deg
 Cloud/Mesh 44 [hangar 1 : hangar 10]
 Objective Function Value: 2.95825e-05 sq m
 Iterations: 21
 Overlap Point Count: 626598
 Overlap Error Statistics
 RMS: 0.00802256 m
 AVG: 0.00527661 m
 MIN: 3.80085e-09 m
 MAX: 0.0495327 m
 Overlap Center: (-3.709, -1.831, 7.415) m
 Error after global registration: 3.03335e-07 sq m
 Translation: (-4.282, -6.830, 0.538) m
 Rotation: (0.0009, 0.0304, 0.9995):-26.022 deg
 Cloud/Mesh 45 [hangar 1 : hangar 11]
 Objective Function Value: 2.96388e-05 sq m
 Iterations: 20
 Overlap Point Count: 975892
 Overlap Error Statistics
 RMS: 0.00752109 m
 AVG: 0.00496631 m
 MIN: 3.62663e-09 m
 MAX: 0.04949 m
 Overlap Center: (-3.509, 2.381, 7.527) m
 Error after global registration: 7.29123e-08 sq m

Translation: (1.370, 1.607, 1.183) m
 Rotation: (0.0369, 0.0183, 0.9991):176.574 deg
 Cloud/Mesh 46 [hangar 1 : hangar 12]
 Objective Function Value: 2.73584e-05 sq m
 Iterations: 22
 Overlap Point Count: 344010
 Overlap Error Statistics
 RMS: 0.00754961 m
 AVG: 0.00453163 m
 MIN: 1.14087e-09 m
 MAX: 0.0495466 m
 Overlap Center: (-3.143, 9.552, 5.384) m
 Error after global registration: 5.15813e-08 sq m
 Translation: (-3.746, 2.943, -0.990) m
 Rotation: (0.0005, 0.0001, 1.0000):-98.175 deg
 Cloud/Mesh 47 [hangar 1 : hangar 13]
 Objective Function Value: 3.82051e-05 sq m
 Iterations: 29
 Overlap Point Count: 682106
 Overlap Error Statistics
 RMS: 0.00854116 m
 AVG: 0.00569792 m
 MIN: 1.88831e-08 m
 MAX: 0.0495951 m
 Overlap Center: (-2.533, -1.091, 6.936) m
 Error after global registration: 3.65681e-07 sq m
 Translation: (-11.605, -11.150, 4.039) m
 Rotation: (0.0001, 0.0000, 1.0000):-156.809 deg
 Cloud/Mesh 48 [hangar 1 : hangar 14]
 Objective Function Value: 3.03778e-05 sq m
 Iterations: 26
 Overlap Point Count: 767978
 Overlap Error Statistics
 RMS: 0.00819353 m
 AVG: 0.00531026 m
 MIN: 2.85857e-08 m
 MAX: 0.0493017 m
 Overlap Center: (-3.199, 1.329, 6.989) m
 Error after global registration: 9.52995e-08 sq m
 Translation: (-11.223, 1.066, 4.056) m
 Rotation: (-0.0336, 0.0439, -0.9985):1.409 deg
 Cloud/Mesh 49 [hangar 1 : hangar 15]
 Objective Function Value: 3.85279e-05 sq m
 Iterations: 24
 Overlap Point Count: 751834
 Overlap Error Statistics
 RMS: 0.00855229 m
 AVG: 0.00554397 m
 MIN: 1.85937e-08 m
 MAX: 0.049729 m
 Overlap Center: (-3.760, 4.658, 6.783) m
 Error after global registration: 1.11527e-07 sq m
 Translation: (-11.184, 14.855, 4.036) m
 Rotation: (-0.0004, -0.0003, -1.0000):-50.093 deg
 Cloud/Mesh 50 [hangar 2 : hangar 6]
 Objective Function Value: 3.10212e-05 sq m
 Iterations: 31

Overlap Point Count: 834400
Overlap Error Statistics
RMS: 0.00818164 m
AVG: 0.00525148 m
MIN: 1.00813e-08 m
MAX: 0.0495737 m
Overlap Center: (5.088, 2.109, 6.723) m
Error after global registration: 8.2279e-09 sq m
Translation: (5.141, -12.309, 0.042) m
Rotation: (0.0167, -0.0052, 0.9998):-84.971 deg
Cloud/Mesh 51 [hangar 2 : hangar 7]
Objective Function Value: 2.77409e-05 sq m
Iterations: 32
Overlap Point Count: 947870
Overlap Error Statistics
RMS: 0.00777519 m
AVG: 0.00502073 m
MIN: 2.64133e-09 m
MAX: 0.0497116 m
Overlap Center: (5.494, 3.146, 6.615) m
Error after global registration: 9.33517e-09 sq m
Translation: (4.914, -5.316, -0.032) m
Rotation: (0.0166, 0.0077, 0.9998):176.751 deg
Cloud/Mesh 52 [hangar 2 : hangar 17]
Objective Function Value: 2.95686e-05 sq m
Iterations: 32
Overlap Point Count: 855846
Overlap Error Statistics
RMS: 0.00801069 m
AVG: 0.00522998 m
MIN: 4.53087e-08 m
MAX: 0.0496969 m
Overlap Center: (5.399, 1.962, 6.630) m
Error after global registration: 3.90125e-08 sq m
Translation: (4.472, -2.703, -0.057) m
Rotation: (0.0097, 0.0069, 0.9999):166.419 deg
Cloud/Mesh 53 [hangar 2 : hangar 8]
Objective Function Value: 2.79469e-05 sq m
Iterations: 16
Overlap Point Count: 964986
Overlap Error Statistics
RMS: 0.00791357 m
AVG: 0.00500756 m
MIN: 6.39234e-09 m
MAX: 0.0802765 m
Overlap Center: (4.452, 2.502, 6.372) m
Error after global registration: 6.4941e-08 sq m
Translation: (2.387, -4.873, -0.986) m
Rotation: (0.0377, -0.0845, -0.9957):-14.803 deg
Cloud/Mesh 54 [hangar 2 : hangar 9]
Objective Function Value: 3.32602e-05 sq m
Iterations: 14
Overlap Point Count: 687692
Overlap Error Statistics
RMS: 0.00817474 m
AVG: 0.0054291 m
MIN: 1.19876e-08 m

MAX: 0.0857278 m
 Overlap Center: (7.533, 13.089, 7.070) m
 Error after global registration: 7.63823e-08 sq m
 Translation: (7.588, 13.180, -0.318) m
 Rotation: (0.0113, 0.0040, 0.9999):-161.229 deg
 Cloud/Mesh 55 [hangar 2 : hangar 10]
 Objective Function Value: 3.98128e-05 sq m
 Iterations: 17
 Overlap Point Count: 747780
 Overlap Error Statistics
 RMS: 0.00813531 m
 AVG: 0.00546957 m
 MIN: 6.13723e-09 m
 MAX: 0.0787436 m
 Overlap Center: (6.983, 10.590, 7.371) m
 Error after global registration: 1.91051e-07 sq m
 Translation: (5.303, 13.347, 0.266) m
 Rotation: (-0.0157, -0.0082, -0.9998):-148.877 deg
 Cloud/Mesh 56 [hangar 2 : hangar 11]
 Objective Function Value: 2.68729e-05 sq m
 Iterations: 30
 Overlap Point Count: 1143926
 Overlap Error Statistics
 RMS: 0.00758683 m
 AVG: 0.00492896 m
 MIN: 8.24467e-09 m
 MAX: 0.049848 m
 Overlap Center: (5.334, 5.578, 7.063) m
 Error after global registration: 7.09657e-08 sq m
 Translation: (-1.063, 5.455, 1.134) m
 Rotation: (-0.1254, 0.3490, 0.9287):-9.180 deg
 Cloud/Mesh 57 [hangar 2 : hangar 12]
 Objective Function Value: 2.21303e-05 sq m
 Iterations: 38
 Overlap Point Count: 448860
 Overlap Error Statistics
 RMS: 0.0078758 m
 AVG: 0.00477991 m
 MIN: 2.51366e-08 m
 MAX: 0.0495138 m
 Overlap Center: (1.435, -4.178, 5.744) m
 Error after global registration: 1.06173e-07 sq m
 Translation: (3.868, 3.642, -1.119) m
 Rotation: (-0.0029, -0.0183, -0.9998):-76.720 deg
 Cloud/Mesh 58 [hangar 2 : hangar 13]
 Objective Function Value: 4.00368e-05 sq m
 Iterations: 15
 Overlap Point Count: 821822
 Overlap Error Statistics
 RMS: 0.0085198 m
 AVG: 0.00570786 m
 MIN: 3.43465e-09 m
 MAX: 0.0836281 m
 Overlap Center: (5.159, 9.056, 6.997) m
 Error after global registration: 7.5686e-08 sq m
 Translation: (13.050, 17.036, 3.566) m
 Rotation: (0.0267, -0.0697, -0.9972):-18.131 deg

Cloud/Mesh 59 [hangar 2 : hangar 14]

Objective Function Value: 3.61044e-05 sq m

Iterations: 38

Overlap Point Count: 882846

Overlap Error Statistics

RMS: 0.00819482 m

AVG: 0.00534065 m

MIN: 1.10873e-08 m

MAX: 0.049634 m

Overlap Center: (4.763, 5.725, 6.939) m

Error after global registration: 5.73913e-09 sq m

Translation: (11.584, 4.903, 3.756) m

Rotation: (0.0093, 0.0061, 0.9999):173.482 deg

Cloud/Mesh 60 [hangar 2 : hangar 15]

Objective Function Value: 2.99998e-05 sq m

Iterations: 22

Overlap Point Count: 854424

Overlap Error Statistics

RMS: 0.00829225 m

AVG: 0.00532226 m

MIN: 1.58345e-08 m

MAX: 0.0494996 m

Overlap Center: (4.605, 1.461, 6.665) m

Error after global registration: 8.12664e-08 sq m

Translation: (10.319, -8.827, 3.923) m

Rotation: (-0.0126, -0.0018, -0.9999):135.023 deg

Cloud/Mesh 61 [hangar 3 : hangar 6]

Objective Function Value: 3.27571e-05 sq m

Iterations: 18

Overlap Point Count: 813748

Overlap Error Statistics

RMS: 0.00798379 m

AVG: 0.00506408 m

MIN: 1.49223e-08 m

MAX: 0.061825 m

Overlap Center: (-8.478, 4.076, 6.754) m

Error after global registration: 2.67221e-08 sq m

Translation: (5.576, 7.424, -0.304) m

Rotation: (0.0934, -0.0577, -0.9940):-17.918 deg

Cloud/Mesh 62 [hangar 3 : hangar 7]

Objective Function Value: 3.04008e-05 sq m

Iterations: 19

Overlap Point Count: 917178

Overlap Error Statistics

RMS: 0.00776914 m

AVG: 0.00495429 m

MIN: 1.17043e-08 m

MAX: 0.0645415 m

Overlap Center: (-9.677, 4.286, 6.620) m

Error after global registration: 5.31476e-09 sq m

Translation: (-1.193, 5.659, -0.154) m

Rotation: (0.0298, 0.0173, 0.9994):-80.497 deg

Cloud/Mesh 63 [hangar 3 : hangar 17]

Objective Function Value: 3.1262e-05 sq m

Iterations: 26

Overlap Point Count: 802408

Overlap Error Statistics

RMS: 0.00809589 m
 AVG: 0.00523191 m
 MIN: 1.96512e-09 m
 MAX: 0.0494875 m
 Overlap Center: (-8.059, 4.335, 6.643) m
 Error after global registration: 2.1251e-08 sq m
 Translation: (-3.644, 4.652, -0.093) m
 Rotation: (0.0225, 0.0092, 0.9997):-90.824 deg
 Cloud/Mesh 64 [hangar 3 : hangar 8]
 Objective Function Value: 2.48284e-05 sq m
 Iterations: 29
 Overlap Point Count: 900304
 Overlap Error Statistics
 RMS: 0.00786209 m
 AVG: 0.00494165 m
 MIN: 2.82373e-08 m
 MAX: 0.0496639 m
 Overlap Center: (-8.418, 3.379, 6.226) m
 Error after global registration: 6.35625e-08 sq m
 Translation: (-1.095, 3.083, -1.074) m
 Rotation: (0.0031, -0.0195, -0.9998):-117.524 deg
 Cloud/Mesh 65 [hangar 3 : hangar 9]
 Objective Function Value: 4.05783e-05 sq m
 Iterations: 21
 Overlap Point Count: 651412
 Overlap Error Statistics
 RMS: 0.00848286 m
 AVG: 0.00565066 m
 MIN: 2.63601e-08 m
 MAX: 0.0497041 m
 Overlap Center: (-20.212, 4.468, 7.423) m
 Error after global registration: 5.5358e-08 sq m
 Translation: (-19.823, 4.183, 0.129) m
 Rotation: (0.0353, 0.0037, 0.9994):-58.485 deg
 Cloud/Mesh 66 [hangar 3 : hangar 10]
 Objective Function Value: 3.61275e-05 sq m
 Iterations: 17
 Overlap Point Count: 692856
 Overlap Error Statistics
 RMS: 0.00826138 m
 AVG: 0.00558987 m
 MIN: 6.66401e-09 m
 MAX: 0.0819857 m
 Overlap Center: (-16.905, 4.681, 7.587) m
 Error after global registration: 2.70381e-07 sq m
 Translation: (-19.464, 1.926, 0.735) m
 Rotation: (-0.0238, -0.0171, -0.9996):108.365 deg
 Cloud/Mesh 67 [hangar 3 : hangar 11]
 Objective Function Value: 2.98208e-05 sq m
 Iterations: 26
 Overlap Point Count: 1089246
 Overlap Error Statistics
 RMS: 0.00769364 m
 AVG: 0.00506539 m
 MIN: 2.42478e-08 m
 MAX: 0.049249 m
 Overlap Center: (-11.782, 3.240, 7.480) m

Error after global registration: 6.4351e-08 sq m
 Translation: (-10.339, -2.529, 1.398) m
 Rotation: (-0.0464, -0.0077, -0.9989):-94.231 deg
 Cloud/Mesh 68 [hangar 3 : hangar 12]
 Objective Function Value: 2.17042e-05 sq m
 Iterations: 28
 Overlap Point Count: 394854
 Overlap Error Statistics
 RMS: 0.008068 m
 AVG: 0.00481339 m
 MIN: 3.02204e-08 m
 MAX: 0.0499022 m
 Overlap Center: (-0.824, 2.841, 5.079) m
 Error after global registration: 2.42886e-07 sq m
 Translation: (-9.726, 2.647, -0.948) m
 Rotation: (-0.0069, -0.0157, -0.9999):-179.485 deg
 Cloud/Mesh 69 [hangar 3 : hangar 13]
 Objective Function Value: 4.39838e-05 sq m
 Iterations: 18
 Overlap Point Count: 800206
 Overlap Error Statistics
 RMS: 0.00865895 m
 AVG: 0.00585895 m
 MIN: 2.90473e-08 m
 MAX: 0.0721199 m
 Overlap Center: (-14.511, 2.667, 6.994) m
 Error after global registration: 2.53617e-07 sq m
 Translation: (-24.675, 8.716, 4.094) m
 Rotation: (0.0022, -0.0195, -0.9998):-120.864 deg
 Cloud/Mesh 70 [hangar 3 : hangar 14]
 Objective Function Value: 3.65791e-05 sq m
 Iterations: 32
 Overlap Point Count: 885410
 Overlap Error Statistics
 RMS: 0.00826738 m
 AVG: 0.00534863 m
 MIN: 5.47384e-08 m
 MAX: 0.0492872 m
 Overlap Center: (-11.329, 2.919, 6.780) m
 Error after global registration: 6.42747e-08 sq m
 Translation: (-12.517, 9.964, 3.908) m
 Rotation: (0.0242, 0.0073, 0.9997):-83.765 deg
 Cloud/Mesh 71 [hangar 3 : hangar 15]
 Objective Function Value: 2.90722e-05 sq m
 Iterations: 24
 Overlap Point Count: 877260
 Overlap Error Statistics
 RMS: 0.00812151 m
 AVG: 0.00511882 m
 MIN: 4.49753e-08 m
 MAX: 0.0497069 m
 Overlap Center: (-7.184, 3.384, 6.414) m
 Error after global registration: 1.86486e-07 sq m
 Translation: (1.152, 11.761, 3.648) m
 Rotation: (-0.0604, 0.0072, -0.9981):32.303 deg
 Cloud/Mesh 72 [hangar 4 : hangar 6]
 Objective Function Value: 2.34685e-05 sq m

Iterations: 34
 Overlap Point Count: 830578
 Overlap Error Statistics
 RMS: 0.00763679 m
 AVG: 0.00475931 m
 MIN: 2.99597e-09 m
 MAX: 0.0497071 m
 Overlap Center: (-7.198, 9.602, 6.280) m
 Error after global registration: 3.01445e-08 sq m
 Translation: (4.404, 4.597, -0.192) m
 Rotation: (-0.0776, 0.0262, -0.9966):20.400 deg
 Cloud/Mesh 73 [hangar 4 : hangar 7]
 Objective Function Value: 2.68136e-05 sq m
 Iterations: 29
 Overlap Point Count: 814090
 Overlap Error Statistics
 RMS: 0.00770015 m
 AVG: 0.00487279 m
 MIN: 1.31067e-09 m
 MAX: 0.049898 m
 Overlap Center: (-8.828, 10.878, 6.572) m
 Error after global registration: 3.30093e-08 sq m
 Translation: (-2.012, 7.389, -0.168) m
 Rotation: (-0.0200, -0.0140, -0.9997):118.630 deg
 Cloud/Mesh 74 [hangar 4 : hangar 17]
 Objective Function Value: 2.91485e-05 sq m
 Iterations: 24
 Overlap Point Count: 733762
 Overlap Error Statistics
 RMS: 0.00790857 m
 AVG: 0.00507344 m
 MIN: 4.42204e-09 m
 MAX: 0.0493775 m
 Overlap Center: (-7.431, 10.269, 6.567) m
 Error after global registration: 3.35997e-08 sq m
 Translation: (-4.562, 8.111, -0.154) m
 Rotation: (-0.0133, -0.0092, -0.9999):128.959 deg
 Cloud/Mesh 75 [hangar 4 : hangar 8]
 Objective Function Value: 2.45649e-05 sq m
 Iterations: 27
 Overlap Point Count: 836298
 Overlap Error Statistics
 RMS: 0.00768375 m
 AVG: 0.00480224 m
 MIN: 9.68369e-09 m
 MAX: 0.0494556 m
 Overlap Center: (-8.162, 8.999, 6.332) m
 Error after global registration: 1.0374e-07 sq m
 Translation: (-3.511, 5.295, -1.095) m
 Rotation: (-0.0087, 0.0208, 0.9997):79.383 deg
 Cloud/Mesh 76 [hangar 4 : hangar 9]
 Objective Function Value: 4.20911e-05 sq m
 Iterations: 18
 Overlap Point Count: 566634
 Overlap Error Statistics
 RMS: 0.0084191 m
 AVG: 0.00565458 m

MIN: 1.60503e-08 m
 MAX: 0.0708579 m
 Overlap Center: (-17.013, 17.617, 6.942) m
 Error after global registration: 1.12329e-07 sq m
 Translation: (-17.579, 17.733, -0.224) m
 Rotation: (-0.0185, -0.0063, -0.9998):96.611 deg
 Cloud/Mesh 77 [hangar 4 : hangar 10]
 Objective Function Value: 4.21961e-05 sq m
 Iterations: 15
 Overlap Point Count: 579884
 Overlap Error Statistics
 RMS: 0.00839979 m
 AVG: 0.00576105 m
 MIN: 2.10395e-09 m
 MAX: 0.0860945 m
 Overlap Center: (-14.889, 15.574, 7.406) m
 Error after global registration: 4.91076e-07 sq m
 Translation: (-18.701, 15.741, 0.381) m
 Rotation: (0.0172, 0.0139, 0.9998):-146.500 deg
 Cloud/Mesh 78 [hangar 4 : hangar 11]
 Objective Function Value: 3.28281e-05 sq m
 Iterations: 23
 Overlap Point Count: 952690
 Overlap Error Statistics
 RMS: 0.00787127 m
 AVG: 0.00517192 m
 MIN: 1.0659e-08 m
 MAX: 0.0498976 m
 Overlap Center: (-10.995, 11.582, 6.931) m
 Error after global registration: 1.13249e-07 sq m
 Translation: (-14.285, 6.609, 1.195) m
 Rotation: (0.0560, -0.0230, 0.9982):56.151 deg
 Cloud/Mesh 79 [hangar 4 : hangar 12]
 Objective Function Value: 2.04934e-05 sq m
 Iterations: 50
 Overlap Point Count: 398034
 Overlap Error Statistics
 RMS: 0.00775907 m
 AVG: 0.00463641 m
 MIN: 6.54264e-09 m
 MAX: 0.0491637 m
 Overlap Center: (-3.499, 3.954, 5.922) m
 Error after global registration: 4.91511e-07 sq m
 Translation: (-10.570, 10.282, -1.125) m
 Rotation: (0.0028, 0.0149, 0.9999):141.342 deg
 Cloud/Mesh 80 [hangar 4 : hangar 13]
 Objective Function Value: 3.69098e-05 sq m
 Iterations: 29
 Overlap Point Count: 714088
 Overlap Error Statistics
 RMS: 0.00852866 m
 AVG: 0.00572954 m
 MIN: 1.50555e-08 m
 MAX: 0.0497232 m
 Overlap Center: (-14.081, 12.982, 6.600) m
 Error after global registration: 3.0549e-07 sq m
 Translation: (-18.660, 24.328, 3.666) m

Rotation: (-0.0073, 0.0205, 0.9998):82.724 deg
 Cloud/Mesh 81 [hangar 4 : hangar 15]
 Objective Function Value: 2.68147e-05 sq m
 Iterations: 20
 Overlap Point Count: 832124
 Overlap Error Statistics
 RMS: 0.00803606 m
 AVG: 0.0049631 m
 MIN: 9.04588e-10 m
 MAX: 0.0498409 m
 Overlap Center: (-7.567, 8.953, 6.182) m
 Error after global registration: 1.07853e-07 sq m
 Translation: (3.539, 10.775, 3.693) m
 Rotation: (0.0247, 0.0029, 0.9997):-70.408 deg
 Cloud/Mesh 82 [hangar 5 : hangar 6]
 Objective Function Value: 2.68758e-05 sq m
 Iterations: 21
 Overlap Point Count: 958546
 Overlap Error Statistics
 RMS: 0.00745788 m
 AVG: 0.00463425 m
 MIN: 1.55902e-08 m
 MAX: 0.0494562 m
 Overlap Center: (-5.224, 8.363, 5.662) m
 Error after global registration: 5.14926e-08 sq m
 Translation: (2.088, 3.193, -0.324) m
 Rotation: (-0.0001, -0.0009, 1.0000):-35.483 deg
 Cloud/Mesh 83 [hangar 5 : hangar 7]
 Objective Function Value: 2.7213e-05 sq m
 Iterations: 40
 Overlap Point Count: 909960
 Overlap Error Statistics
 RMS: 0.00795242 m
 AVG: 0.0050312 m
 MIN: 3.47349e-08 m
 MAX: 0.049603 m
 Overlap Center: (-6.451, 9.822, 6.068) m
 Error after global registration: 1.34428e-07 sq m
 Translation: (-3.376, 7.565, -0.315) m
 Rotation: (0.0060, 0.0042, 1.0000):-133.769 deg
 Cloud/Mesh 84 [hangar 5 : hangar 17]
 Objective Function Value: 2.66845e-05 sq m
 Iterations: 31
 Overlap Point Count: 793094
 Overlap Error Statistics
 RMS: 0.00771225 m
 AVG: 0.0048923 m
 MIN: 2.18286e-09 m
 MAX: 0.0494066 m
 Overlap Center: (-6.237, 9.115, 6.380) m
 Error after global registration: 1.5125e-07 sq m
 Translation: (-5.648, 8.927, -0.317) m
 Rotation: (0.0004, -0.0004, 1.0000):-144.104 deg
 Cloud/Mesh 85 [hangar 5 : hangar 8]
 Objective Function Value: 2.25841e-05 sq m
 Iterations: 34
 Overlap Point Count: 872296

Overlap Error Statistics

RMS: 0.00756509 m

AVG: 0.00459528 m

MIN: 1.16687e-08 m

MAX: 0.0496036 m

Overlap Center: (-7.194, 9.904, 6.053) m

Error after global registration: 5.42396e-08 sq m

Translation: (-5.350, 5.955, -1.314) m

Rotation: (0.0000, 0.0001, -1.0000):-64.219 deg

Cloud/Mesh 86 [hangar 5 : hangar 9]

Objective Function Value: 4.10155e-05 sq m

Iterations: 24

Overlap Point Count: 483684

Overlap Error Statistics

RMS: 0.00881959 m

AVG: 0.0059493 m

MIN: 4.20272e-09 m

MAX: 0.0497557 m

Overlap Center: (-11.137, 16.460, 6.629) m

Error after global registration: 2.65453e-07 sq m

Translation: (-15.697, 21.618, -0.316) m

Rotation: (0.0004, -0.0005, 1.0000):-111.751 deg

Cloud/Mesh 87 [hangar 5 : hangar 10]

Objective Function Value: 4.12235e-05 sq m

Iterations: 24

Overlap Point Count: 624402

Overlap Error Statistics

RMS: 0.00848225 m

AVG: 0.00577164 m

MIN: 6.64705e-08 m

MAX: 0.049778 m

Overlap Center: (-11.922, 15.335, 7.055) m

Error after global registration: 7.17451e-08 sq m

Translation: (-17.311, 19.977, 0.223) m

Rotation: (-0.0067, -0.0022, -1.0000):161.645 deg

Cloud/Mesh 88 [hangar 5 : hangar 11]

Objective Function Value: 3.45746e-05 sq m

Iterations: 25

Overlap Point Count: 816512

Overlap Error Statistics

RMS: 0.00825428 m

AVG: 0.00534537 m

MIN: 4.65201e-09 m

MAX: 0.0496672 m

Overlap Center: (-7.072, 11.249, 6.181) m

Error after global registration: 1.55585e-07 sq m

Translation: (-15.450, 9.992, 0.863) m

Rotation: (-0.0886, 0.0769, -0.9931):-41.201 deg

Cloud/Mesh 89 [hangar 5 : hangar 12]

Objective Function Value: 2.85094e-05 sq m

Iterations: 17

Overlap Point Count: 461018

Overlap Error Statistics

RMS: 0.00782658 m

AVG: 0.00467405 m

MIN: 2.55247e-09 m

MAX: 0.092966 m

Overlap Center: (-6.264, 5.168, 6.153) m
 Error after global registration: 4.06043e-07 sq m
 Translation: (-10.860, 12.615, -1.311) m
 Rotation: (-0.0005, 0.0004, -1.0000):-126.188 deg
 Cloud/Mesh 90 [hangar 5 : hangar 13]
 Objective Function Value: 3.5294e-05 sq m
 Iterations: 33
 Overlap Point Count: 598146
 Overlap Error Statistics
 RMS: 0.00862188 m
 AVG: 0.00568352 m
 MIN: 1.06575e-08 m
 MAX: 0.0494846 m
 Overlap Center: (-9.351, 12.074, 6.321) m
 Error after global registration: 2.57304e-07 sq m
 Translation: (-15.096, 28.182, 3.726) m
 Rotation: (-0.0005, -0.0002, -1.0000):-67.565 deg
 Cloud/Mesh 91 [hangar 5 : hangar 14]
 Objective Function Value: 3.45101e-05 sq m
 Iterations: 40
 Overlap Point Count: 722638
 Overlap Error Statistics
 RMS: 0.00853528 m
 AVG: 0.00555069 m
 MIN: 9.58935e-10 m
 MAX: 0.0496836 m
 Overlap Center: (-8.062, 11.207, 6.284) m
 Error after global registration: 3.62865e-07 sq m
 Translation: (-6.826, 19.182, 3.735) m
 Rotation: (-0.0002, -0.0009, 1.0000):-137.035 deg
 Cloud/Mesh 92 [hangar 5 : hangar 15]
 Objective Function Value: 2.41561e-05 sq m
 Iterations: 20
 Overlap Point Count: 842552
 Overlap Error Statistics
 RMS: 0.00802783 m
 AVG: 0.00491623 m
 MIN: 5.32352e-09 m
 MAX: 0.0495476 m
 Overlap Center: (-5.083, 8.463, 5.957) m
 Error after global registration: 1.01546e-07 sq m
 Translation: (2.790, 9.299, 3.706) m
 Rotation: (0.0001, 0.0003, -1.0000):85.540 deg
 Cloud/Mesh 93 [hangar 6 : hangar 17]
 Objective Function Value: 3.089e-05 sq m
 Iterations: 18
 Overlap Point Count: 848394
 Overlap Error Statistics
 RMS: 0.00780418 m
 AVG: 0.00498243 m
 MIN: 4.90614e-09 m
 MAX: 0.0520187 m
 Overlap Center: (-12.324, 1.125, 6.850) m
 Error after global registration: 1.3125e-07 sq m
 Translation: (-9.628, 0.179, 0.002) m
 Rotation: (-0.0003, 0.0001, -1.0000):108.620 deg
 Cloud/Mesh 94 [hangar 6 : hangar 8]

Objective Function Value: 2.458e-05 sq m
Iterations: 34
Overlap Point Count: 851872
Overlap Error Statistics
RMS: 0.00781032 m
AVG: 0.0048862 m
MIN: 1.68183e-08 m
MAX: 0.0497895 m
Overlap Center: (-12.907, 1.454, 6.374) m
Error after global registration: 2.2087e-08 sq m
Translation: (-7.660, -2.069, -0.995) m
Rotation: (-0.0002, -0.0003, 1.0000):99.702 deg

Cloud/Mesh 95 [hangar 6 : hangar 10]
Objective Function Value: 3.99237e-05 sq m
Iterations: 19
Overlap Point Count: 660198
Overlap Error Statistics
RMS: 0.00854385 m
AVG: 0.00586467 m
MIN: 4.4704e-09 m
MAX: 0.0531556 m
Overlap Center: (-21.712, 1.184, 7.522) m
Error after global registration: 8.55686e-07 sq m
Translation: (-25.539, 2.406, 0.533) m
Rotation: (0.0061, 0.0047, 1.0000):-126.169 deg

Cloud/Mesh 96 [hangar 6 : hangar 11]
Objective Function Value: 3.65822e-05 sq m
Iterations: 17
Overlap Point Count: 806974
Overlap Error Statistics
RMS: 0.00828074 m
AVG: 0.00537267 m
MIN: 1.00906e-08 m
MAX: 0.0727987 m
Overlap Center: (-16.086, 1.690, 6.798) m
Error after global registration: 9.57845e-08 sq m
Translation: (-18.229, -4.645, 1.177) m
Rotation: (0.0610, -0.0266, 0.9978):76.547 deg

Cloud/Mesh 97 [hangar 6 : hangar 12]
Objective Function Value: 2.67371e-05 sq m
Iterations: 25
Overlap Point Count: 425500
Overlap Error Statistics
RMS: 0.00798737 m
AVG: 0.00479057 m
MIN: 1.50095e-08 m
MAX: 0.0497396 m
Overlap Center: (-8.085, -0.260, 6.285) m
Error after global registration: 1.76087e-07 sq m
Translation: (-16.012, 0.155, -0.997) m
Rotation: (0.0003, -0.0003, 1.0000):161.676 deg

Cloud/Mesh 98 [hangar 6 : hangar 13]
Objective Function Value: 4.09165e-05 sq m
Iterations: 26
Overlap Point Count: 747760
Overlap Error Statistics
RMS: 0.00851667 m

AVG: 0.00569623 m
 MIN: 4.00425e-08 m
 MAX: 0.0498493 m
 Overlap Center: (-19.865, 1.897, 6.964) m
 Error after global registration: 1.58335e-07 sq m
 Translation: (-28.500, 10.374, 4.035) m
 Rotation: (0.0001, 0.0000, 1.0000):103.045 deg
 Cloud/Mesh 99 [hangar 6 : hangar 14]
 Objective Function Value: 3.6513e-05 sq m
 Iterations: 24
 Overlap Point Count: 832806
 Overlap Error Statistics
 RMS: 0.00835938 m
 AVG: 0.00542824 m
 MIN: 3.77665e-09 m
 MAX: 0.0496481 m
 Overlap Center: (-16.998, 1.551, 6.864) m
 Error after global registration: 1.55444e-07 sq m
 Translation: (-16.542, 7.845, 4.050) m
 Rotation: (0.0001, 0.0009, -1.0000):101.555 deg
 Cloud/Mesh 100 [hangar 6 : hangar 15]
 Objective Function Value: 2.46228e-05 sq m
 Iterations: 21
 Overlap Point Count: 934274
 Overlap Error Statistics
 RMS: 0.00797949 m
 AVG: 0.00493753 m
 MIN: 2.17654e-08 m
 MAX: 0.070356 m
 Overlap Center: (-11.940, 1.203, 6.653) m
 Error after global registration: 8.80076e-08 sq m
 Translation: (-2.975, 5.379, 4.029) m
 Rotation: (-0.0005, 0.0000, 1.0000):-50.057 deg
 Cloud/Mesh 101 [hangar 7 : hangar 8]
 Objective Function Value: 2.40433e-05 sq m
 Iterations: 30
 Overlap Point Count: 967918
 Overlap Error Statistics
 RMS: 0.00756602 m
 AVG: 0.00478907 m
 MIN: 1.11028e-08 m
 MAX: 0.0495402 m
 Overlap Center: (-0.461, -6.640, 6.406) m
 Error after global registration: 2.78317e-08 sq m
 Translation: (2.515, -0.315, -1.032) m
 Rotation: (0.0068, 0.0003, 1.0000):-162.014 deg
 Cloud/Mesh 102 [hangar 7 : hangar 9]
 Objective Function Value: 3.50935e-05 sq m
 Iterations: 36
 Overlap Point Count: 793068
 Overlap Error Statistics
 RMS: 0.00838772 m
 AVG: 0.00561132 m
 MIN: 1.42994e-08 m
 MAX: 0.0496028 m
 Overlap Center: (-1.668, -15.996, 7.067) m
 Error after global registration: 1.88308e-07 sq m

Translation: (-1.624, -18.620, 0.071) m
Rotation: (-0.0031, 0.0346, 0.9994):22.035 deg
Cloud/Mesh 103 [hangar 7 : hangar 10]
Objective Function Value: 3.3185e-05 sq m
Iterations: 23
Overlap Point Count: 812294
Overlap Error Statistics
RMS: 0.00809184 m
AVG: 0.00542649 m
MIN: 1.03186e-08 m
MAX: 0.0496392 m
Overlap Center: (1.176, -14.489, 7.477) m
Error after global registration: 4.29303e-07 sq m
Translation: (0.683, -18.648, 0.580) m
Rotation: (0.0148, 0.0038, 0.9999):-27.882 deg
Cloud/Mesh 104 [hangar 7 : hangar 11]
Objective Function Value: 2.91414e-05 sq m
Iterations: 21
Overlap Point Count: 915408
Overlap Error Statistics
RMS: 0.00788884 m
AVG: 0.00516116 m
MIN: 1.27745e-08 m
MAX: 0.0495996 m
Overlap Center: (0.170, -9.893, 6.821) m
Error after global registration: 1.5223e-08 sq m
Translation: (6.615, -10.396, 1.120) m
Rotation: (0.0436, 0.0197, 0.9989):174.718 deg
Cloud/Mesh 105 [hangar 7 : hangar 12]
Objective Function Value: 2.90464e-05 sq m
Iterations: 30
Overlap Point Count: 476024
Overlap Error Statistics
RMS: 0.00808728 m
AVG: 0.00496138 m
MIN: 2.6869e-09 m
MAX: 0.0497932 m
Overlap Center: (0.956, -1.866, 6.330) m
Error after global registration: 6.66681e-08 sq m
Translation: (1.518, -8.902, -0.993) m
Rotation: (0.0084, -0.0037, 1.0000):-100.042 deg
Cloud/Mesh 106 [hangar 7 : hangar 13]
Objective Function Value: 3.7688e-05 sq m
Iterations: 32
Overlap Point Count: 795076
Overlap Error Statistics
RMS: 0.00848795 m
AVG: 0.00570917 m
MIN: 2.93102e-08 m
MAX: 0.049518 m
Overlap Center: (-0.185, -13.829, 7.207) m
Error after global registration: 7.59303e-08 sq m
Translation: (-6.728, -22.715, 4.192) m
Rotation: (0.0069, 0.0005, 1.0000):-158.669 deg
Cloud/Mesh 107 [hangar 7 : hangar 14]
Objective Function Value: 3.21284e-05 sq m
Iterations: 13

Overlap Point Count: 898994

Overlap Error Statistics

RMS: 0.00825595 m

AVG: 0.0052908 m

MIN: 1.00878e-08 m

MAX: 0.0894399 m

Overlap Center: (-0.077, -10.521, 6.946) m

Error after global registration: 7.11558e-08 sq m

Translation: (-5.950, -10.517, 4.157) m

Rotation: (-0.0781, 0.2380, -0.9681):3.377 deg

Cloud/Mesh 108 [hangar 7 : hangar 15]

Objective Function Value: 2.90304e-05 sq m

Iterations: 18

Overlap Point Count: 940362

Overlap Error Statistics

RMS: 0.00829801 m

AVG: 0.00524538 m

MIN: 5.18024e-09 m

MAX: 0.0619652 m

Overlap Center: (-0.479, -5.439, 6.571) m

Error after global registration: 5.21414e-08 sq m

Translation: (-5.464, 3.264, 4.084) m

Rotation: (-0.0032, -0.0165, -0.9999):-48.233 deg

Cloud/Mesh 109 [hangar 17 : hangar 9]

Objective Function Value: 3.87472e-05 sq m

Iterations: 35

Overlap Point Count: 631126

Overlap Error Statistics

RMS: 0.0087238 m

AVG: 0.00582741 m

MIN: 5.45675e-09 m

MAX: 0.0498044 m

Overlap Center: (-0.386, -12.143, 7.183) m

Error after global registration: 2.24559e-07 sq m

Translation: (0.700, -16.172, -0.015) m

Rotation: (0.0002, -0.0001, 1.0000):32.356 deg

Cloud/Mesh 110 [hangar 17 : hangar 10]

Objective Function Value: 3.54077e-05 sq m

Iterations: 22

Overlap Point Count: 681846

Overlap Error Statistics

RMS: 0.00818839 m

AVG: 0.00543863 m

MIN: 1.00427e-08 m

MAX: 0.0495682 m

Overlap Center: (2.459, -10.403, 7.756) m

Error after global registration: 3.30231e-07 sq m

Translation: (2.969, -15.789, 0.523) m

Rotation: (-0.0028, 0.0437, 0.9990):-17.562 deg

Cloud/Mesh 111 [hangar 17 : hangar 11]

Objective Function Value: 3.70711e-05 sq m

Iterations: 20

Overlap Point Count: 804106

Overlap Error Statistics

RMS: 0.00807287 m

AVG: 0.00531435 m

MIN: 4.5268e-09 m

MAX: 0.0514591 m
 Overlap Center: (0.260, -5.550, 6.888) m
 Error after global registration: 3.94605e-08 sq m
 Translation: (7.317, -6.611, 1.170) m
 Rotation: (0.0356, 0.0209, 0.9991):-174.962 deg
 Cloud/Mesh 112 [hangar 17 : hangar 12]
 Objective Function Value: 2.3317e-05 sq m
 Iterations: 19
 Overlap Point Count: 440380
 Overlap Error Statistics
 RMS: 0.00784664 m
 AVG: 0.00480556 m
 MIN: 1.79748e-08 m
 MAX: 0.0498474 m
 Overlap Center: (0.381, 0.557, 6.344) m
 Error after global registration: 1.38387e-07 sq m
 Translation: (2.060, -6.042, -1.002) m
 Rotation: (0.0005, -0.0002, 1.0000):-89.704 deg
 Cloud/Mesh 113 [hangar 17 : hangar 13]
 Objective Function Value: 4.24777e-05 sq m
 Iterations: 32
 Overlap Point Count: 649124
 Overlap Error Statistics
 RMS: 0.00877382 m
 AVG: 0.00591573 m
 MIN: 4.60212e-08 m
 MAX: 0.0493843 m
 Overlap Center: (0.772, -9.040, 7.259) m
 Error after global registration: 2.89593e-07 sq m
 Translation: (-3.636, -21.141, 4.025) m
 Rotation: (0.0001, -0.0002, 1.0000):-148.333 deg
 Cloud/Mesh 114 [hangar 17 : hangar 14]
 Objective Function Value: 3.85663e-05 sq m
 Iterations: 19
 Overlap Point Count: 751712
 Overlap Error Statistics
 RMS: 0.00856056 m
 AVG: 0.00560723 m
 MIN: 8.30218e-09 m
 MAX: 0.0499067 m
 Overlap Center: (0.538, -5.803, 7.029) m
 Error after global registration: 9.00332e-08 sq m
 Translation: (-5.058, -9.002, 4.046) m
 Rotation: (-0.0047, 0.0102, 0.9999):7.066 deg
 Cloud/Mesh 115 [hangar 17 : hangar 15]
 Objective Function Value: 3.09182e-05 sq m
 Iterations: 29
 Overlap Point Count: 806840
 Overlap Error Statistics
 RMS: 0.00834685 m
 AVG: 0.00537935 m
 MIN: 1.89989e-08 m
 MAX: 0.0496965 m
 Overlap Center: (-0.839, -1.616, 6.714) m
 Error after global registration: 1.30482e-07 sq m
 Translation: (-7.051, 4.643, 4.030) m
 Rotation: (-0.0007, -0.0003, -1.0000):-58.561 deg

Cloud/Mesh 116 [hangar 8 : hangar 11]
 Objective Function Value: 3.23212e-05 sq m
 Iterations: 18
 Overlap Point Count: 819212
 Overlap Error Statistics
 RMS: 0.00806557 m
 AVG: 0.0051581 m
 MIN: 7.33731e-10 m
 MAX: 0.0605406 m
 Overlap Center: (5.510, 8.322, 7.538) m
 Error after global registration: 5.30011e-08 sq m
 Translation: (-0.758, 10.851, 2.178) m
 Rotation: (0.0585, -0.1915, -0.9797):23.748 deg

Cloud/Mesh 117 [hangar 8 : hangar 12]
 Objective Function Value: 2.46578e-05 sq m
 Iterations: 25
 Overlap Point Count: 601832
 Overlap Error Statistics
 RMS: 0.00767175 m
 AVG: 0.00455859 m
 MIN: 1.21938e-10 m
 MAX: 0.0495411 m
 Overlap Center: (0.247, 1.847, 7.186) m
 Error after global registration: 2.82564e-07 sq m
 Translation: (3.600, 7.859, 0.003) m
 Rotation: (0.0005, -0.0010, 1.0000):61.971 deg

Cloud/Mesh 118 [hangar 8 : hangar 13]
 Objective Function Value: 4.27977e-05 sq m
 Iterations: 20
 Overlap Point Count: 702086
 Overlap Error Statistics
 RMS: 0.0088894 m
 AVG: 0.00590482 m
 MIN: 1.81811e-08 m
 MAX: 0.0748117 m
 Overlap Center: (5.568, 11.821, 8.013) m
 Error after global registration: 1.75467e-07 sq m
 Translation: (15.777, 18.442, 5.039) m
 Rotation: (0.0115, -0.0013, 0.9999):3.344 deg

Cloud/Mesh 119 [hangar 8 : hangar 14]
 Objective Function Value: 3.59578e-05 sq m
 Iterations: 24
 Overlap Point Count: 775188
 Overlap Error Statistics
 RMS: 0.00850914 m
 AVG: 0.00543766 m
 MIN: 1.15586e-08 m
 MAX: 0.0497519 m
 Overlap Center: (4.559, 8.604, 7.781) m
 Error after global registration: 4.32844e-08 sq m
 Translation: (11.270, 7.081, 5.048) m
 Rotation: (0.0005, 0.0007, -1.0000):-158.743 deg

Cloud/Mesh 120 [hangar 8 : hangar 15]
 Objective Function Value: 3.75893e-05 sq m
 Iterations: 22
 Overlap Point Count: 810524
 Overlap Error Statistics

RMS: 0.00847168 m
 AVG: 0.00534457 m
 MIN: 5.63419e-09 m
 MAX: 0.0498103 m
 Overlap Center: (3.627, 3.555, 7.489) m
 Error after global registration: 7.63166e-08 sq m
 Translation: (6.552, -5.876, 5.020) m
 Rotation: (-0.0002, -0.0001, 1.0000):-149.759 deg
 Cloud/Mesh 121 [hangar 9 : hangar 10]
 Objective Function Value: 2.94155e-05 sq m
 Iterations: 20
 Overlap Point Count: 985622
 Overlap Error Statistics
 RMS: 0.00744892 m
 AVG: 0.00474802 m
 MIN: 9.41939e-09 m
 MAX: 0.0497446 m
 Overlap Center: (0.263, -2.397, 6.738) m
 Error after global registration: 3.60999e-07 sq m
 Translation: (2.122, -0.891, 0.539) m
 Rotation: (0.0036, 0.0154, 0.9999):-49.900 deg
 Cloud/Mesh 122 [hangar 9 : hangar 11]
 Objective Function Value: 2.92911e-05 sq m
 Iterations: 18
 Overlap Point Count: 817114
 Overlap Error Statistics
 RMS: 0.00798699 m
 AVG: 0.00516822 m
 MIN: 4.38208e-09 m
 MAX: 0.0860362 m
 Overlap Center: (-0.509, -1.514, 6.844) m
 Error after global registration: 8.51675e-08 sq m
 Translation: (10.706, 4.536, 1.184) m
 Rotation: (0.0411, 0.0104, 0.9991):152.714 deg
 Cloud/Mesh 123 [hangar 9 : hangar 12]
 Objective Function Value: 2.47217e-05 sq m
 Iterations: 26
 Overlap Point Count: 275430
 Overlap Error Statistics
 RMS: 0.00805119 m
 AVG: 0.00498754 m
 MIN: 2.74531e-08 m
 MAX: 0.0492769 m
 Overlap Center: (1.481, 9.888, 5.615) m
 Error after global registration: 1.99698e-07 sq m
 Translation: (6.569, 7.830, -0.987) m
 Rotation: (0.0004, -0.0003, 1.0000):-122.058 deg
 Cloud/Mesh 124 [hangar 9 : hangar 13]
 Objective Function Value: 3.13016e-05 sq m
 Iterations: 30
 Overlap Point Count: 946234
 Overlap Error Statistics
 RMS: 0.00820903 m
 AVG: 0.00532762 m
 MIN: 8.42177e-09 m
 MAX: 0.0496867 m
 Overlap Center: (-1.679, -4.108, 6.941) m

Error after global registration: 4.84098e-07 sq m
 Translation: (-6.322, -1.877, 4.040) m
 Rotation: (0.0001, -0.0002, 1.0000):179.315 deg
 Cloud/Mesh 125 [hangar 9 : hangar 14]
 Objective Function Value: 2.96463e-05 sq m
 Iterations: 40
 Overlap Point Count: 826990
 Overlap Error Statistics
 RMS: 0.00819523 m
 AVG: 0.00529594 m
 MIN: 8.3132e-09 m
 MAX: 0.0495915 m
 Overlap Center: (-0.369, -1.506, 6.874) m
 Error after global registration: 5.13591e-08 sq m
 Translation: (-1.026, 9.139, 4.060) m
 Rotation: (-0.0006, 0.0033, -1.0000):25.290 deg
 Cloud/Mesh 126 [hangar 10 : hangar 11]
 Objective Function Value: 3.05591e-05 sq m
 Iterations: 25
 Overlap Point Count: 823222
 Overlap Error Statistics
 RMS: 0.00792212 m
 AVG: 0.00528677 m
 MIN: 8.85654e-09 m
 MAX: 0.0495851 m
 Overlap Center: (-1.970, 1.220, 6.666) m
 Error after global registration: 6.11143e-08 sq m
 Translation: (1.387, 10.064, 0.600) m
 Rotation: (-0.0394, -0.0267, -0.9989):157.421 deg
 Cloud/Mesh 127 [hangar 10 : hangar 12]
 Objective Function Value: 2.03139e-05 sq m
 Iterations: 42
 Overlap Point Count: 341808
 Overlap Error Statistics
 RMS: 0.00739687 m
 AVG: 0.00448084 m
 MIN: 1.20958e-09 m
 MAX: 0.0497192 m
 Overlap Center: (-4.025, 10.600, 6.232) m
 Error after global registration: 3.81832e-07 sq m
 Translation: (-3.826, 9.015, -1.501) m
 Rotation: (-0.0091, 0.0077, -0.9999):72.165 deg
 Cloud/Mesh 128 [hangar 10 : hangar 13]
 Objective Function Value: 3.19194e-05 sq m
 Iterations: 32
 Overlap Point Count: 852496
 Overlap Error Statistics
 RMS: 0.00814284 m
 AVG: 0.00538613 m
 MIN: 6.57748e-09 m
 MAX: 0.049481 m
 Overlap Center: (-0.706, -1.494, 6.679) m
 Error after global registration: 4.99716e-07 sq m
 Translation: (-4.639, -7.084, 3.581) m
 Rotation: (-0.0073, 0.0018, -1.0000):130.792 deg
 Cloud/Mesh 129 [hangar 10 : hangar 14]
 Objective Function Value: 3.90996e-05 sq m

Iterations: 23
 Overlap Point Count: 780178
 Overlap Error Statistics
 RMS: 0.00828117 m
 AVG: 0.00548825 m
 MIN: 1.44187e-09 m
 MAX: 0.0495997 m
 Overlap Center: (-2.227, 1.489, 6.860) m
 Error after global registration: 2.95509e-07 sq m
 Translation: (-9.653, 4.062, 3.637) m
 Rotation: (0.0019, -0.0340, -0.9994):-24.618 deg
 Cloud/Mesh 130 [hangar 10 : hangar 15]
 Objective Function Value: 4.14023e-05 sq m
 Iterations: 28
 Overlap Point Count: 579082
 Overlap Error Statistics
 RMS: 0.00905029 m
 AVG: 0.00612624 m
 MIN: 2.99261e-08 m
 MAX: 0.0498255 m
 Overlap Center: (-3.487, 5.220, 6.757) m
 Error after global registration: 6.73443e-07 sq m
 Translation: (-15.665, 16.473, 3.665) m
 Rotation: (0.0053, 0.0102, 0.9999):76.103 deg
 Cloud/Mesh 131 [hangar 11 : hangar 13]
 Objective Function Value: 3.84475e-05 sq m
 Iterations: 29
 Overlap Point Count: 905518
 Overlap Error Statistics
 RMS: 0.00838578 m
 AVG: 0.00554422 m
 MIN: 5.06462e-09 m
 MAX: 0.0496731 m
 Overlap Center: (6.086, 7.015, 4.759) m
 Error after global registration: 9.94421e-08 sq m
 Translation: (12.345, 13.593, 1.438) m
 Rotation: (-0.0451, 0.1701, 0.9844):27.030 deg
 Cloud/Mesh 132 [hangar 11 : hangar 14]
 Objective Function Value: 3.00362e-05 sq m
 Iterations: 20
 Overlap Point Count: 954876
 Overlap Error Statistics
 RMS: 0.00796858 m
 AVG: 0.00515188 m
 MIN: 1.17754e-08 m
 MAX: 0.0651835 m
 Overlap Center: (6.449, 3.381, 4.870) m
 Error after global registration: 5.54058e-08 sq m
 Translation: (12.712, 1.385, 1.904) m
 Rotation: (-0.0361, -0.0183, -0.9992):177.981 deg
 Cloud/Mesh 133 [hangar 11 : hangar 15]
 Objective Function Value: 3.52566e-05 sq m
 Iterations: 16
 Overlap Point Count: 870430
 Overlap Error Statistics
 RMS: 0.00845477 m
 AVG: 0.00549307 m

MIN: 8.49719e-09 m
MAX: 0.0767064 m
Overlap Center: (6.746, -1.110, 4.706) m
Error after global registration: 9.65863e-08 sq m
Translation: (13.513, -12.374, 2.361) m
Rotation: (0.0460, 0.0013, 0.9989):-126.529 deg
Cloud/Mesh 134 [hangar 12 : hangar 14]
Objective Function Value: 2.53059e-05 sq m
Iterations: 22
Overlap Point Count: 419102
Overlap Error Statistics
RMS: 0.0082121 m
AVG: 0.00504614 m
MIN: 1.42619e-08 m
MAX: 0.049782 m
Overlap Center: (-5.646, -1.911, 6.803) m
Error after global registration: 3.02453e-07 sq m
Translation: (2.924, -7.136, 5.041) m
Rotation: (0.0004, -0.0002, -1.0000):-96.771 deg
Cloud/Mesh 135 [hangar 12 : hangar 15]
Objective Function Value: 2.64841e-05 sq m
Iterations: 35
Overlap Point Count: 437662
Overlap Error Statistics
RMS: 0.00860189 m
AVG: 0.00528267 m
MIN: 8.72689e-09 m
MAX: 0.0496647 m
Overlap Center: (-8.866, -2.300, 6.966) m
Error after global registration: 3.62414e-07 sq m
Translation: (-10.731, -9.059, 5.030) m
Rotation: (0.0004, 0.0002, 1.0000):148.265 deg
Cloud/Mesh 136 [hangar 13 : hangar 15]
Objective Function Value: 3.06799e-05 sq m
Iterations: 38
Overlap Point Count: 1097518
Overlap Error Statistics
RMS: 0.00833864 m
AVG: 0.00535528 m
MIN: 1.04059e-08 m
MAX: 0.0498797 m
Overlap Center: (-11.644, -5.391, 1.836) m
Error after global registration: 9.15066e-07 sq m
Translation: (-10.627, -23.739, -0.002) m
Rotation: (0.0000, 0.0002, 1.0000):-153.097 deg

ScanWorld Transformations

hangar 16
translation: (0.785, -0.207, 0.149) m
rotation: (-0.0014, -0.0008, -1.0000):156.073 deg

hangar 1
translation: (0.000, 0.000, 0.000) m
rotation: (0.0000, 1.0000, 0.0000):0.000 deg

hangar 2
translation: (-0.197, 6.929, 0.006) m

rotation: (-0.0100, -0.0063, -0.9999):174.889 deg

hangar 3

translation: (0.204, 12.213, 0.004) m

rotation: (0.0247, 0.0081, 0.9997):82.357 deg

hangar 4

translation: (-0.215, 17.269, 0.022) m

rotation: (0.0143, 0.0086, 0.9999):120.490 deg

hangar 5

translation: (-2.688, 19.554, 0.332) m

rotation: (0.0002, -0.0003, 1.0000):135.632 deg

hangar 6

translation: (-6.414, 18.732, 0.008) m

rotation: (0.0000, -0.0001, 1.0000):100.149 deg

hangar 7

translation: (-5.565, 11.786, 0.012) m

rotation: (0.1021, -0.3685, 0.9240):2.018 deg

hangar 17

translation: (-4.893, 9.223, 0.009) m

rotation: (-0.0023, -0.0017, -1.0000):8.470 deg

hangar 8

translation: (-3.028, 11.557, -0.988) m

rotation: (-0.0001, 0.0003, -1.0000):160.149 deg

hangar 9

translation: (-6.583, -6.876, -0.001) m

rotation: (-0.0008, -0.0005, 1.0000):23.884 deg

hangar 10

translation: (-4.282, -6.831, 0.538) m

rotation: (-0.0010, -0.0304, -0.9995):26.024 deg

hangar 11

translation: (1.370, 1.606, 1.183) m

rotation: (0.0369, 0.0183, 0.9992):176.575 deg

hangar 12

translation: (-3.746, 2.943, -0.990) m

rotation: (-0.0005, -0.0001, -1.0000):98.176 deg

hangar 13

translation: (-11.604, -11.150, 4.039) m

rotation: (0.0000, 0.0000, -1.0000):156.806 deg

hangar 14

translation: (-11.222, 1.066, 4.056) m

rotation: (-0.0348, 0.0437, -0.9984):1.409 deg

hangar 15

translation: (-11.184, 14.855, 4.036) m

rotation: (0.0004, 0.0003, 1.0000):50.092 deg

