



UNIVERSITAT
POLITÈCNICA
DE VALÈNCIA



Escuela Técnica Superior de Ingeniería del Diseño

UNIVERSITAT POLITÈCNICA DE VALÈNCIA

ESCUELA TÉCNICA SUPERIOR DE INGENIERÍA DEL DISEÑO

GRADO EN INGENIERÍA AEROESPACIAL

Control dimensional de aeronaves con sistemas láser escáner

Autora:

Paula Cabrejas Herrero

Tutor:

José Enrique Priego de los Santos

Agradecimientos

Quiero aprovechar estas líneas para agradecer, en primer lugar, a mi tutor, José Enrique Priego de los Santos, por habernos dado la oportunidad a mí y a cuatro compañeros más de trabajar con él en este tipo de proyectos, por su gran ayuda, su dedicación, su comprensión, y por su enorme esfuerzo por hacer todo lo que estuviera en su mano para que a ninguno nos faltara nunca nada en la ETSITGC.

También quisiera agradecer a todos mis compañeros todos los buenos ratos acumulados a lo largo de estos cuatro años, y su apoyo incesante en los menos buenos. Junto con mis compañeros del FSUPV Team, conforman la gran familia que me llevo de esta Universidad, y les debo mucho a todos ellos.

No puedo dejar pasar la ocasión de dar las gracias a mi familia por su inquebrantable respaldo; en especial a mis padres, ya que sin ellos no sería quien soy, no solo en el ámbito académico sino en el más importante, el personal. Y a mi pareja, Álvaro, agradecerle esa forma de estar siempre ahí, dando un apoyo que a menudo va más allá de los límites humanamente lógicos.

Pero sobre todo, abuelo Julio, va por ti.

Resumen

La modelización 3D es una técnica en auge en ámbitos de ingeniería, puesto que permite trabajar con modelos más realistas que los típicamente bidimensionales. Para obtener estos modelos, es necesario el uso de determinadas herramientas, una de las cuales, muy potente, es el escaneado por láser. Habitualmente, este tipo de técnicas están dedicadas a aplicaciones topográficas, pero su uso se está generalizando cada vez más a otras ramas debido a sus múltiples ventajas, entre las que se cuentan su elevada precisión y su velocidad.

Una aplicación alternativa es el campo de la aeronáutica, donde la tecnología de láser escáner puede ser de utilidad para llevar a cabo un control dimensional de las piezas fabricadas, cuya precisión es determinante. Con este fin, se realiza el presente proyecto, en el que se utiliza la tecnología de escáner por láser para realizar el levantamiento del Mirage F1. Este proceso se lleva a cabo con la ayuda de dos equipos diferentes, uno de 2007 (ScanStation 2) y otro de 2014 (ScanStation P40)

Puesto que el objeto a escanear es de gran tamaño, no bastará con un solo escaneo para abarcarlo por completo. Así pues, se debe llevar a cabo un proceso de planificación para determinar cuántos escaneos son necesarios y desde qué lugares. Se inicia después el trabajo de campo, procediendo a realizar el levantamiento y se encontrará aquí la primera ventaja del escáner más moderno sobre el antiguo: la velocidad de escaneo, hasta 20 veces superior, permite acortar mucho los tiempos de trabajo.

Los escáneres no escanean un continuo, sino un conjunto de puntos, cuya densidad dependerá de la resolución requerida, y almacenan sus coordenadas espaciales. Finalizado el proceso de toma de datos, se tienen por tanto diversas nubes de puntos, y se procede a su procesamiento informático. El primer paso es aunar todos los escaneos en uno solo, unificándolos para obtener el Mirage F1 completo. Esta fase se denomina registro, y se lleva a cabo con el *software* Cyclone. A continuación, se realiza un proceso de filtrado en el que se elimina la información sobrante, como todo el entorno de la aeronave. También se aplican filtros para eliminar parcialmente el ruido procedente de la dispersión de las medidas. Finalmente, se malla la nube de puntos con la ayuda del programa 3DReshaper y se trabaja sobre la malla obtenida para mejorarla, aplicando herramientas de rellenado de huecos y de suavizado.

Por último, puesto que se ha escaneado con dos equipos diferentes, resulta interesante realizar una comparativa entre ellos en términos de precisión. Para ello, se toman medidas de ambos modelos y se comparan con las de la aeronave. De este estudio se extrae que, como cabe esperar debido a su modernidad, el ScanStation P40 es capaz de ofrecer una precisión superior al ScanStation 2.

Índice de figuras

- Figura 1: Esquema de escáner por triangulación
- Figura 2: Ejemplos de patrones para escaneo por triangulación
- Figura 3: Esquema de funcionamiento de escáner basado en tiempo de vuelo
- Figura 4: Esquema de funcionamiento de escáner basado en fase
- Figura 5: Ambigüedad en la distancia para diferentes tipos de escáner
- Figura 6: Reflexión sobre una superficie lambertiana
- Figura 7: Respuesta al escanear superficies con distinta reflectividad
- Figura 8: Efectos de la refracción en materiales semitransparentes no homogéneos
- Figura 9: Mirage F1 en el Laboratorio Pedro Duque
- Figura 10: Vistas en planta de Mirage III y Mirage F1
- Figura 11: BO-105 en el Laboratorio Pedro Duque
- Figura 12: Ejemplos de dianas típicas
- Figura 13: Ordenador portátil ejecutando el software Cyclone
- Figura 14: Esquema de posicionamiento de las dianas
- Figura 15: Huella digital y sombra del láser para diferentes ángulos de incidencia
- Figura 16: Emplazamientos de ScanStation 2 – Vista alzado
- Figura 17: Emplazamientos de ScanStation 2 – Vista planta
- Figura 18: Emplazamientos de ScanStation 2 – Vista tridimensional
- Figura 19: Emplazamientos de ScanStation P40
- Figura 20: ScanStation 2 y ScanStation P40 sobre sus trípodes
- Figura 21: Distribución de dianas verticalmente en las mesas del laboratorio y en el suelo bajo el Mirage F1
- Figura 22: Vista global del Mirage F1
- Figura 23: Vista trasera inferior del Mirage F1
- Figura 24: Vista superior del Mirage F1
- Figura 25: Vista frontal del Mirage F1
- Figura 26: Perspectiva del hangar escaneado
- Figura 27: Diana escaneada en alta resolución

Figura 28: *ScanWorld* fusionados en uno único

Figura 29: *ScanWorld* fusionados en uno único

Figura 30: Hangar escaneado por el ScanStation P40

Figura 31: Corte del hangar con ambas aeronaves.

Figura 32: Nube de ScanStation 2 tras filtrado

Figura 33: Nube de ScanStation P40 tras filtrado

Figura 34: Parámetros de *Noise Reduction* para ScanStation 2 y ScanStation P40

Figura 35: Mallado en un paso (ScanStation 2)

Figura 36: Mallado en dos pasos. Paso 1/2 (ScanStation 2)

Figura 37: Mallado en dos pasos. Paso 2/2 (ScanStation 2)

Figura 38: Mallado en dos pasos. Paso 1/2 (ScanStation P40)

Figura 39: Mallado en dos pasos. Paso 2/2 (ScanStation P40)

Figura 40: Tren de aterrizaje con ScanStation 2 y con ScanStation P40

Figura 41: Ejemplos de huecos en escaneado con ScanStation 2

Figura 42: Ejemplo de aplicación de la herramienta *Rellenar orificios* en ScanStation P40

Figura 43: Ejemplo de aplicación de la herramienta *Puentes* en ScanStation P40

Figura 44: Efecto del suavizado en modelo de ScanStation 2

Figura 45: Planta del modelo obtenido con ScanStation 2

Figura 46: Alzado del modelo obtenido con ScanStation 2. Vista delantera

Figura 47: Alzado del modelo obtenido con ScanStation 2. Vista trasera

Figura 48: Perfil del modelo obtenido con ScanStation 2

Figura 49: Vista tridimensional del modelo obtenido con ScanStation 2

Figura 50: Planta del modelo obtenido con ScanStation P40

Figura 51: Alzado del modelo obtenido con ScanStation P40. Vista delantera.

Figura 52: Alzado del modelo obtenido con ScanStation P40. Vista trasera.

Figura 53: Perfil del modelo obtenido con ScanStation P40

Figura 54: Vista tridimensional del modelo obtenido con ScanStation P40

Figura 55: Histograma del error relativo

Índice de tablas

Tabla 1: Especificaciones del Mirage F1

Tabla 2: Principales características de los equipos usados

Tabla 3: Presupuesto

Índice

1. Objetivos y estructura del trabajo	9
2. Sistemas láser escáner	11
2.1. Láseres	13
2.2. Clasificación de sistemas de escáner láser	13
2.2.1. Sistemas de medición pasivos	13
2.2.2. Sistemas de medición activos	14
2.2.2.1. Medición basada en la triangulación	14
2.2.2.2. Medición basada en el tiempo	15
2.3. Fuentes de error	17
2.3.1. Errores instrumentales	17
2.3.2. Errores relacionados con los objetos	19
2.3.3. Condiciones ambientales	21
2.3.4. Errores metodológicos	22
3. Metodología del levantamiento	24
3.1. Planificación	25
3.1.1. Objetivo: Mirage F1	25
3.1.2. Zona de trabajo	27
3.1.3. Instrumentación	28
3.1.4. Determinación de las posiciones de las dianas	30
3.1.5. Determinación de las posiciones de los estacionamientos	31
3.2. Trabajo de campo	33
3.2.1. Estacionamiento y conexión del escáner	33
3.2.2. Colocación de las dianas	35
3.2.3. Ajustes del escáner	35
3.2.4. Toma de datos	36
4. Modelización 3D	40
4.1. Software	41
4.2. Registro y georreferenciación	41
4.2.1. Clasificación de los métodos de registro	42
4.2.1.1. Métodos indirectos	42
4.2.1.2. Métodos directos	43
4.2.2. Registro y georreferenciación del Mirage F1	43
4.3. Filtrado de datos	46
4.3.1. Eliminación de la información sobrante	46
4.3.2. Reducción de ruido	47
4.4. Reconstrucción de la superficie	48
4.4.1. Mallado	48
4.4.2. Rellenado de huecos	52

4.4.3. Suavizado de la superficie	54
5. Resultados y análisis	56
5.1. Resultados del levantamiento 3D	57
5.2. Comparación de prestaciones	60
6. Conclusiones	62
7. Bibliografía	64
8. Presupuesto	66

1. Objetivos y estructura del trabajo

El objetivo del presente trabajo es la obtención del título de Grado en Ingeniería Aeroespacial por la Escuela Técnica Superior de Ingeniería de Diseño de la Universitat Politècnica de València. Para lograrlo, se realiza dicho proyecto bajo la supervisión y tutoría del doctor Enrique Priego de los Santos, profesor del Departamento de Ingeniería Cartográfica, Geodesia y Fotogrametría.

El propósito del proyecto será realizar el levantamiento tridimensional del Mirage F1 localizado en el Laboratorio Pedro Duque de la Escuela Técnica Superior de Ingeniería de Diseño de la Universitat Politècnica de València. Para ello, se utilizará la tecnología de escáner láser, empleando dos equipos diferentes, el ScanStation 2 y el ScanStation P40, ambos de la marca Leica Geosystems. Posteriormente, se realizará una comparativa entre ambos sistemas, tanto en términos de precisión como en lo relativo a la inversión de tiempo requerido por cada uno.

En cuanto a la estructura del trabajo, en primer lugar se realiza una descripción de los sistemas de láser escáner, exponiendo los principios de su funcionamiento, así como la clasificación existente y las posibles fuentes de error en este tipo de mecanismos.

Seguidamente se presenta la metodología seguida para obtener el conjunto de nubes de puntos proporcionados por los escáneres. Esta requiere una planificación, donde se debe tener en cuenta el objetivo y el área de trabajo, así como las características de los equipos que se van a utilizar. Finalizada la planificación, se inicia el trabajo de campo, instalando los escáneres en los emplazamientos decididos y procediendo al escaneado tras la configuración apropiada de los mismos.

El proceso de escaneado proporciona una serie de datos que es necesario postprocesar para obtener los resultados deseados. Este postproceso se divide en varias fases, presentadas separadamente en este trabajo. En primer lugar, existe una fase de unión de los escaneos desde los diferentes puntos de vista. A continuación se debe realizar un proceso de filtrado, que elimine la información sobrante. Finalmente, se realiza la reconstrucción de la superficie, mediante un mallado y su posterior tratamiento para buscar el resultado lo más fiel posible a la realidad.

Tras exponer este proceso de tratamiento de la información, se presentan los resultados obtenidos con ambos sistemas de escáner. El análisis de los mismos se basa en el estudio de la precisión obtenida con cada uno de ellos, comparando una serie de medidas con las del Mirage F1.

Finalmente, se presentan las conclusiones, la bibliografía y el presupuesto.

2. Sistemas láser escáner

El láser escáner es un instrumento que realiza el barrido de una o múltiples superficies con un haz de láser, recorriendo con éste la ventana angular que le sea establecida, y captando la distancia a la que se encuentra cada uno de los puntos que conforman la superficie. Para ello, emite un haz de láser en dirección al punto que se desea registrar, y obtiene la medición a partir de la reflexión del mismo. De este modo, como resultado de la medición se obtienen las coordenadas tridimensionales de cada uno de ellos, conformando en conjunto una nube de puntos. Así, se obtiene un modelo discreto del objeto tridimensional que, en función de la densidad del escaneado, es capaz de aproximarse muy bien a la realidad.

En cuanto al barrido, los escáner realizan uno esférico: el usuario define la ventana angular que desea medir, tanto horizontal como verticalmente, y este espacio queda dividido en filas y columnas de puntos. Para dirigir el haz de láser en estas direcciones, el equipo cuenta con un sistema de espejos móviles y servomotores. Por otra parte, para obtener la distancia a la que se encuentra cada uno de los puntos escaneados, existen diferentes sistemas, que se explicarán con detalle más adelante, entre los que se encuentran los basados en pulsos o *flight time*, y los basados en fase.

Además, algunos sistemas incluyen también la posibilidad de reflejar el color real de cada punto en la superficie una vez escaneados. Esto se logra mediante la incorporación de una cámara fotográfica de alta resolución, a partir de cuyas imágenes se relaciona cada punto medido con el color del pixel correspondiente en la fotografía de referencia. De esta forma, la visualización del escaneo se asemeja mucho más a la realidad, y se logra un levantamiento más natural.

Por tratarse de un sistema óptico, el escáner solo es capaz de recoger la primera superficie que alcanza el haz. Como consecuencia, genera sombras, zonas de la imagen en las cuales no se detecta ningún punto al encontrarse éstas apantalladas por una superficie. Por ello, para poder escanear completo un objeto de gran tamaño o con curvatura, es necesario realizar diversos escaneados desde bases diferentes, permitiendo así al sistema ser capaz de escanear la mayor superficie posible en conjunto. Para poder posteriormente unir los diferentes escaneados y formar un conjunto único, es necesario establecer unos puntos de referencia, localizables desde todos los emplazamientos del láser escáner. Para ello se emplean las dianas, las cuales se describirán también más adelante.

Lo que se obtiene de los escaneos es, como se expone anteriormente, varias nubes de puntos, conjuntos de coordenadas tridimensionales. Para poder trabajar con una superficie, es necesario, en primer lugar, fusionar los diferentes escaneados, y posteriormente, se debe reconstruir la superficie partir de los puntos. Por todo esto, se hace necesario un tratamiento posterior de la información mediante programas de modelado 3D.

Para realizar el levantamiento se han empleado dos equipos diferentes, ambos de la marca Leica, desarrollados en años diferentes. El primero de ellos se comercializa desde 2006 y tiene una velocidad de escaneado de 50.000 puntos/segundo y una precisión de entre 4 y 6 mm. Estos escáneres se utilizan habitualmente para realizar levantamientos topográficos, por lo que este error puede ser aceptable, aunque para el escaneado que se trata en este proyecto puede ser excesivo. El segundo equipo es mucho más moderno, y mejora las prestaciones del anterior, con una velocidad de escaneado 20 veces mayor y una precisión de entre 1 y 3 mm.

2.1. Láseres

Un láser es un instrumento capaz de generar ondas de luz muy concentradas en una banda estrecha del espectro electromagnético, con una longitud de onda muy concreta, lo que hace que, en caso de operar dentro del espectro visible, su luz se perciba de un color muy definido y puro. En el caso del equipo utilizado, ésta es verde.

La luz láser se genera típicamente en forma de haz estrecho y poco divergente, y con una dirección espacial altamente definida. Es gracias a ello que un haz láser es capaz de propagarse largas distancias, quedando aun así muy focalizado, con escasa dispersión. A esta propiedad se la conoce como coherencia espacial, y conlleva que la señal eléctrica guarda una relación de fase constante a lo largo de diferentes puntos del haz. Así, un haz láser con una longitud de onda visible se percibe del mismo color independientemente de la distancia recorrida, sin perder intensidad. Esta propiedad está también relacionada con la llamada coherencia temporal, que implica que la relación de fase permanece constante a lo largo de intervalos de tiempo largos (lo cual equivale directamente a largas distancias) Una gran ventaja de estas propiedades es que, al dotar a la luz de constancia espacial y temporal, su velocidad de propagación es constante (siempre que trabaje en el mismo medio), lo cual convierte al láser en un buen método para la medición de objetos.

Es por esto que se han desarrollado muchos sistemas de medida basados en el láser, que cuentan con diversas ventajas sobre los métodos tradicionales, como la rapidez y la precisión.

En la mayoría de los casos la luz láser está polarizada linealmente, y, aunque puede ser continua, es común que se emita en pulsos ultra cortos, lo que proporciona máximos de potencia extremadamente altos.

2.2. Clasificación de sistemas de escáner láser

Existen dos grandes categorías que agrupan a todos los sistemas de medición de objetos mediante la luz: activas y pasivas. La diferencia entre estos métodos reside en la necesidad o en la ausencia de emisión de radiación. Los sistemas activos emiten algún tipo de radiación y se centran en detectar su reflexión, mientras que los sistemas pasivos no emiten radiación alguna, sino que se basan en detectar la radiación ambiental reflejada, ya sea visible (luz natural) o no (infrarroja).

2.2.1. Sistemas de medición pasivos

Los sistemas de medición pasivos son aquellos que no emiten radiación alguna, sino que aprovechan la del entorno para llevar a cabo la medida. Estos equipos son habitualmente más baratos, ya que son más sencillos y necesitan de un equipo menos complejo, normalmente sólo una cámara digital. Al mismo tiempo, los métodos pasivos no son útiles en todos los casos, dado que buscan correspondencias entre un conjunto de imágenes 2D para reconstruir un objeto, y estas correspondencias no siempre tienen una solución única, dando lugar a posibles errores, especialmente cuando las imágenes son homogéneas o presentan patrones repetitivos.

Un ejemplo de sistemas de medición pasivos son los sistemas estereoscópicos, se basan en el mismo principio que la visión humana: la superposición de dos imágenes tomadas desde dos puntos de vista apenas separados, identificando los puntos comunes entre ellas para formar una imagen global. Otros ejemplos son el reconocimiento de silueta o el modelado basado en la imagen, siendo este último un método que necesita de la ayuda del usuario para identificar características.

2.2.2. Sistemas de medición activos

Los métodos activos son más complejos que los pasivos, ya que requieren de un equipo capaz de emitir una radiación (luz, ultrasonidos o rayos X) y de detectar su reflexión. Así pues, deben estar compuestos por un transmisor y un receptor, lo cual los hace más complicados. Al mismo tiempo, tienen también ventajas sobre ellos. En primer lugar, al generar su propia radiación, no necesitan de luz natural para poder efectuar las medidas, que, por otra parte, son mucho más automáticas que en el caso de los sistemas pasivos. Además, pueden utilizarse para registrar cualquier superficie, sin necesidad de que ésta tenga rasgos distintivos, sea heterogénea o carezca de patrones. Por último, este tipo de sistemas es capaz de capturar mayor cantidad de información por unidad de tiempo

Existen varios tipos de sistemas activos, entre los cuales se encuentran la medición basada en triangulación y la medición basada en el tiempo. El primero de ellos se tratará de forma más breve, y se describirán con mayor detalle los tipos de escáneres que miden en base al tiempo, ya que son los que se han empleado en el presente proyecto.

2.2.2.1. Medición basada en la triangulación

La medición por triangulación surgió para intentar solucionar el problema de correspondencia que presentan los sistemas pasivos. Como se ha expuesto anteriormente, estos sistemas buscan correspondencias entre imágenes del objeto tomadas desde diferentes ángulos, pero encontrarlas no es sencillo si la imagen es homogénea o repetitiva. Este método marca con un haz láser un punto, haciéndolo así detectable de manera sencilla en la imagen tomada por la cámara.

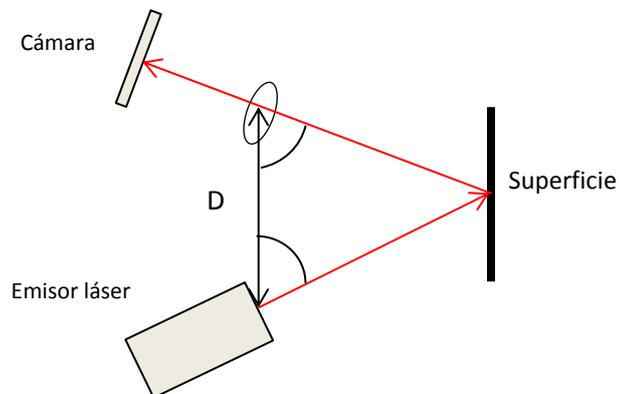


Figura 1: Esquema de escáner por triangulación

Se basa en las relaciones geométricas que determinan que conociendo un lado y dos ángulos de un triángulo es posible determinar las medidas de los dos lados y del ángulo

restante. Para ello, se emplean un emisor láser y una cámara, ambos apuntando hacia el objeto a medir, separados por una distancia conocida. Este será el lado conocido del triángulo que se ha de formar. El ángulo del láser es también conocido, y el de la cámara se determina buscando la localización del haz láser en el campo de visión de la cámara. Así, conocidos estos tres parámetros, se determina la forma y el tamaño del triángulo, y con ello se encuentra la posición del punto medido. La Figura 1 muestra el esquema de lo descrito.

Con el proceso que se ha descrito se escanea un punto, y para obtener la superficie completa es necesario barrerla con el láser. Al hacer esto, el ángulo del láser cambia continuamente. Para evitar tener que variar este ángulo, pudiendo permanecer el emisor inmóvil, una alternativa consiste en proyectar líneas o patrones láser en lugar de un único punto, haciendo así reconocible una parte mayor del objeto sin necesidad de realizar un barrido. Algunos ejemplos se muestran en la Figura 2.

La distancia entre el emisor y la cámara ha de ser limitada, puesto que si se separan demasiado el solape entre los campos de visión de ambos sería muy reducido, y la proyección del láser apenas podría ser capturada por la cámara. Por esta razón, lo normal es emplear estos sistemas en aplicaciones que requieren una distancia de uso menor de diez metros. Esta distancia es mucho más limitada que la que se puede alcanzar con los sistemas de medición basados en tiempo, la medición por triangulación es también más precisa, llegando al orden de micras.

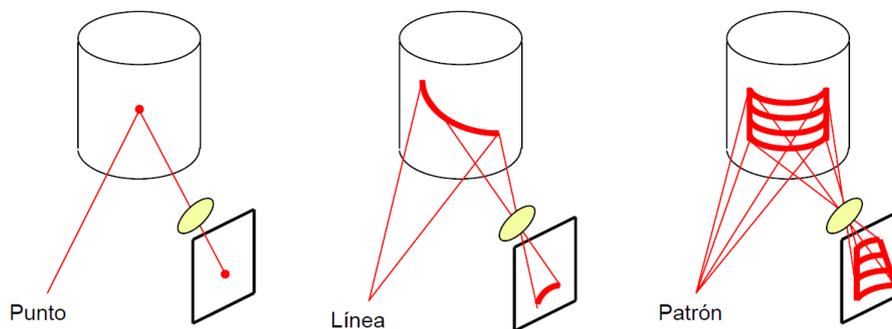


Figura 2: Ejemplos de patrones para escaneo por triangulación
Fuente: "Teoría y práctica del escaneo láser terrestre", 3D RiskMapping

2.2.2.2. Medición basada en el tiempo

Los escáneres de medición basada en el tiempo miden un intervalo temporal entre dos sucesos, y pueden subdividirse en dos tipos: escáneres basados en pulsos (tiempo de vuelo) y escáneres basados en fase.

Escáneres basados en pulso – Tiempo de vuelo

Estos sistemas aprovechan la coherencia espacial y temporal característica de los láseres para medir. Puesto que la luz láser tiene una longitud de onda invariable, se propaga por un medio a una velocidad constante, por lo que se puede conocer la distancia recorrida si se mide el tiempo que ha tardado en hacerla. De este modo, es posible calcular la distancia entre el emisor y la superficie, teniendo en cuenta que será la mitad del espacio recorrido (el láser viaja hasta la superficie y regresa a la fuente) Cabe recordar que la velocidad de propagación de la

luz depende del medio, por lo que será necesario hacer algunas correcciones en función del índice de refracción del medio en que se esté midiendo (por lo general, el aire)

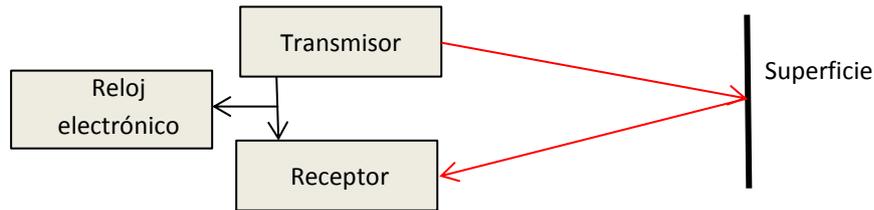


Figura 3: Esquema de funcionamiento de escáner basado en tiempo de vuelo

Lo más común es que los escáneres por tiempo de vuelo no trabajen escaneando de forma continua, sino que emitan pulsos cortos de láser. Así escanean el dominio punto por punto de forma discreta, cambiando la dirección del haz mediante una unidad de desviación, generalmente formada por uno o varios espejos. Hay que destacar que para evitar interferencias el tiempo a medir ha de ser notablemente mayor que la duración del pulso, y que un emisor no puede enviar un nuevo pulso hasta que no se ha recibido de vuelta el anterior.

Este parámetro depende de la frecuencia del pulso, que puede estar entre los 2 y los 100 MHz, y es determinante para la velocidad de escaneo y la precisión del sistema. La primera es moderada, pudiendo alcanzar valores de hasta 128.000 puntos por segundo, mientras que la precisión de estos sistemas suele oscilar entre los 4 mm y los 3 cm.

La principal ventaja de un sistema de pulsos es la elevada concentración de la energía transmitida, alcanzando picos de potencia elevados, lo cual le permite realizar mediciones de larga distancia, que alcanzan un rango de hasta 2 km.

Escáneres basados en la fase

Este sistema elimina la necesidad de relojes internos de alta precisión, y con ello elimina los posibles errores derivados de ellos. El método para lograrlo consiste en modular la amplitud (AMCW) o la frecuencia (FMCW) de la luz emitida antes de enviarla hacia la superficie. Posteriormente, cuando se recibe la reflexión, se mide la diferencia de fase entre las ondas entrante y saliente, es decir, la demora.

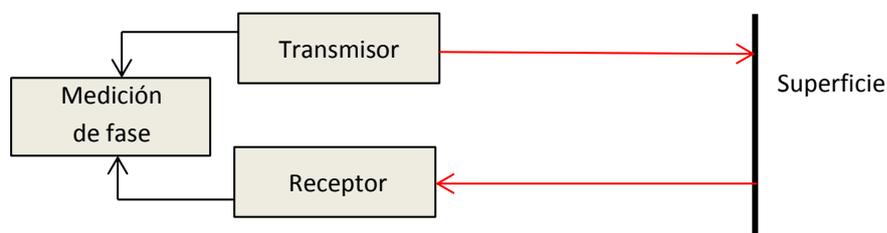


Figura 4: Esquema de funcionamiento de escáner basado en fase

Esta tecnología trabaja a frecuencias muy elevadas, de hasta 1000 MHz, con lo que permite escaneos mucho más rápidos que los sistemas basados en tiempo de vuelo, de hasta 1.200.000 puntos por segundo. Sin embargo, su uso está limitado a distancias más pequeñas

Si bien en los escáneres basados en tiempo la precisión viene dada por la duración del pulso, en estos sistemas el alcance está limitado al que corresponde a un retardo de fase de un ciclo de la onda, generalmente senoidal, que se emplea para modular. En algunos sistemas más actuales se emplean varias longitudes de onda diferentes simultáneamente, con lo que se logra una mayor velocidad de escaneado y una mejor resolución.

2.3. Fuentes de error

Entre las especificaciones que las compañías proporcionan respecto a los escáneres láser se encuentra la precisión en la medida de los mismos. Sin embargo, esta característica que se da como propia de un modelo, no es tal, sino que será diferente para cada unidad concreta, y para cada escaneo que se realice con ella, ya que la precisión de la medida no depende exclusivamente del modelo, sino también del propio objeto a medir, del entorno, las condiciones ambientales y del uso que se le dé a la unidad. Se repasan a continuación las posibles fuentes de error en la medida, explicando brevemente sus causas y consecuencias.

2.3.1. Errores instrumentales

Entre los errores instrumentales, se pueden encontrar los sistemáticos y los aleatorios y ambos se deben al diseño del escáner. Las causas de los errores sistemáticos pueden ser varias: la no linealidad de la unidad de medida del tiempo, la deriva de la temperatura en la electrónica de medida del tiempo, lo que provoca la deriva en la distancia, entre otras. Por su parte, si se habla de los sistemas de medición de vuelo basados en pulsos, los errores aleatorios afectan tanto a la precisión de la medida como a la localización del ángulo.

Propagación del haz láser

La anchura que el haz es capaz de alcanzar con la distancia recorrida se conoce como divergencia de haz. El valor de este parámetro, que está fuertemente relacionado con la resolución de la nube y con la ambigüedad en la posición del punto medido, es proporcional a la longitud de onda y a la distancia, y depende asimismo del radio mínimo a la salida del haz.

La reflexión del haz tiene forma gaussiana. Cuando se trabaja en largas distancias, la divergencia puede considerarse lineal y el diámetro del haz se puede expresar como la posición que abarca el 86% de la energía total del mismo, cuya distribución de irradiación es gaussiana.

No obstante, cuando se lleva a la práctica, la divergencia afecta a la localización del punto medio. Mientras que, aparentemente, el punto sujeto a estudio se encuentra en la línea central del haz proyectado, su situación real está en algún lugar indeterminado de la huella del mismo. Esta ambigüedad es, según Lichti y Gordon, de un cuarto del diámetro del haz láser.

Problema del borde partido

El problema de borde partido aparece como una de las consecuencias más relevantes de la divergencia del haz. Se da cuando el láser encuentra el borde de un objeto, de forma que se divide en dos. Una de las partes del haz se refleja en la primera parte del salto del borde, mientras que la otra viaja una mayor distancia hasta que da con una nueva superficie. Si se da

esta situación, la información llega desde dos puntos distintos del espacio al receptor del pulso láser, afectando así a las coordenadas del punto observado. Éstas se calculan como la media de todas las señales recibidas y, como consecuencia del fenómeno descrito, la posición se ubicará de forma incorrecta, induciendo el error que ya se ha descrito como instrumental y que reduce, pudiendo llegar a resultar crítico, la precisión de la medida.

Además, la probabilidad de que el láser se encuentre con bordes en el objeto estudiado aumenta conforme lo hace la resolución del mismo. Como consecuencia de ello, aparecerá ruido en los datos que resulten de la operación de medida. Para solucionar, o reducir, el problema de borde partido, se emplean láseres de haz más estrecho, aunque el alcance se mantenga mientras la anchura del haz va aumentando con la distancia. Es decir, a mayor distancia, mayor es la anchura del haz y menor la precisión en la medida.

Ambigüedad en la distancia

Aparece un nuevo concepto conocido como ambigüedad en la distancia, que puede expresarse según el tipo de escáner láser empleado y el principio de funcionamiento que éste emplee, en función de un determinado número de parámetros. El concepto de ambigüedad de distancia se entiende como la medida que da lugar a confusión a la hora de localizar el punto observado.

En el caso de un escáner por triangulación, esta ambigüedad es proporcional a la del propio láser y a la distancia a la superficie, mientras que se reduce cuando aumenta la base de la triangulación, esto es, la distancia entre la cámara y el foco de láser.

Por otra parte, la ambigüedad de un escáner basado en tiempo de vuelo depende del mecanismo del reloj que mide el tiempo transcurrido entre la emisión y la recepción del haz, y también de la relación señal a ruido.

Por último, los escáneres por diferencia de fase no emplean reloj, de modo que su ambigüedad pasa a depender de la longitud de onda y, una vez más, de la relación señal a ruido.

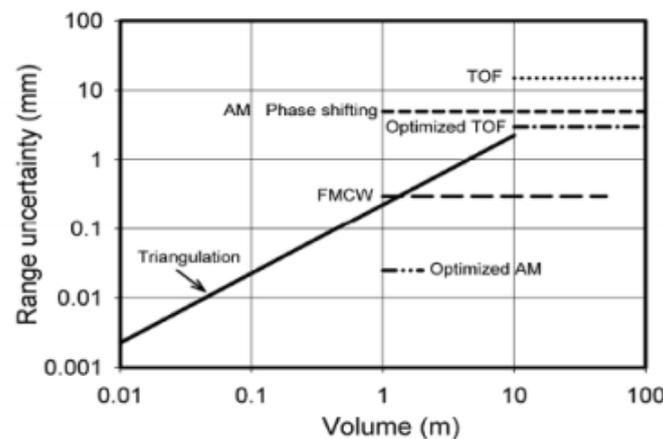


Figura 5: Ambigüedad en la distancia para diferentes tipos de escáner láser
Fuente: "Teoría y práctica del escaneado láser terrestre", 3D RiskMapping

Ambigüedad angular

Se trata del caso análogo a la ambigüedad en distancia, esta vez para ángulos. Para conseguir el guiado de la señal láser hacia la dirección deseada, gran parte de los escáneres láser hacen uso de espejos rotatorios. Conforme la distancia del escáner aumenta, el error inducido por pequeñas diferencias en el ángulo crece muy notablemente. Tanto los errores en la posición de los espejos, como la precisión en la medida de los ángulos, presentan una fuerte dependencia con la ambigüedad angular. Cuando se trata de verificar la posición de puntos aislados, aparecen dificultades notables por lo que se realizan estudios al respecto. Para la detección de errores, según Boehler, se realizan medidas de distancias cortas, tanto en vertical como en horizontal entre objetos que se encuentran a la misma distancia del escáner. Un buen ejemplo de ello podrían ser esferas. Una vez realizadas las medidas, se comparando los resultados con los obtenidos al realizar esas mismas medidas con equipos topográficos de mayor precisión.

Errores en los ejes de un TLS (Escáner láser terrestre)

Con el objetivo de obtener un modelo geométrico del escáner laser que permita llevar a cabo los procesos de calibración, se definen tres ejes distintos. Estos ejes no se encuentran perfectamente alineados a causa de las tolerancias presentes en la fabricación. Esto induce un error en dos de sus ejes, conocidos como colimación y eje horizontal.

Por un lado, se encuentra el eje vertical que permite el movimiento del haz horizontalmente. En ocasiones se trata del eje de rotación de la cabeza del escáner o bien del eje ortogonal a los ejes de oscilación de los espejos. El primer caso se da en los láseres panorámicos, mientras que el segundo se da en los escáneres de cámara.

Por otro lado, se encuentra el eje de colimación, ya mencionado anteriormente. Es aquel que pasa por el centro del espejo de escaneado y, asimismo, por el centro de la huella láser que queda sobre el objeto que se esté escaneando.

Finalmente, se puede definir el eje horizontal como el de rotación del espejo de escaneado.

2.3.2. Errores relacionados con los objetos

Este tipo de errores se relacionan con las leyes físicas que abarcan la reflexión y las propiedades ópticas de los materiales, ya que un escáner láser tiene como función la medida de la reflexión del haz sobre la superficie evaluada. Como ya se sabe, los láseres están compuestos por luz monocromática, lo que implica que ésta aparece reflejada en numerosas direcciones. Este fenómeno se conoce como reflexión isotrópica difusa y se describe mediante la ley del coseno de Lambert. La Figura 6 ilustra lo que sucede en el citado fenómeno.

El haz láser se ve afectado por la absorción de la señal que viaja por el aire hasta el material, así como por la reflexión que tiene lugar sobre el material sujeto a estudio y por el ángulo que aparece en la incidencia entre dicho haz y la propia superficie de medida. Es decir, para superficies muy oscuras o negras, que presenta una gran absorción de la mayor parte del espectro electromagnético, la reflexión será muy débil y la precisión a la hora de localizar el

punto se verá enormemente afectada por ruido, disminuyendo considerablemente la precisión. Por otro lado, superficies con una reflectividad elevada, véase superficies brillantes, presentan resultados más precisos y de mayor fiabilidad. No obstante, este hecho no siempre es positivo, ya que materiales con reflectividades extremadamente elevadas (especulares o casi), desvían el haz láser en su totalidad, provocando el impacto del mismo en otras superficies o propagándose completamente por el medio (aire).

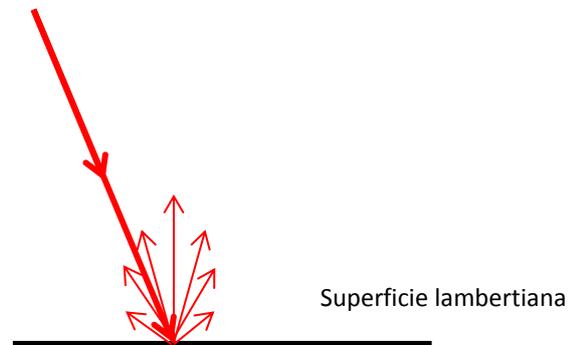


Figura 6: Reflexión sobre una superficie lambertiana

Otro problema puede venir dado por la naturaleza de las superficies que componen el objeto de estudio, ya que si presentan diferentes grados de reflexión el haz puede dar errores en la distancia de hasta varias veces la desviación estándar de una medición simple. Las propiedades del color también afectan notablemente a la precisión, habiéndose observado discrepancias significativas en la distancia de medida que, generalmente, se relacionan con el color de las distintas superficies que integran el objeto y la longitud de onda del láser empleado. Estas observaciones corren a cargo de Clark.

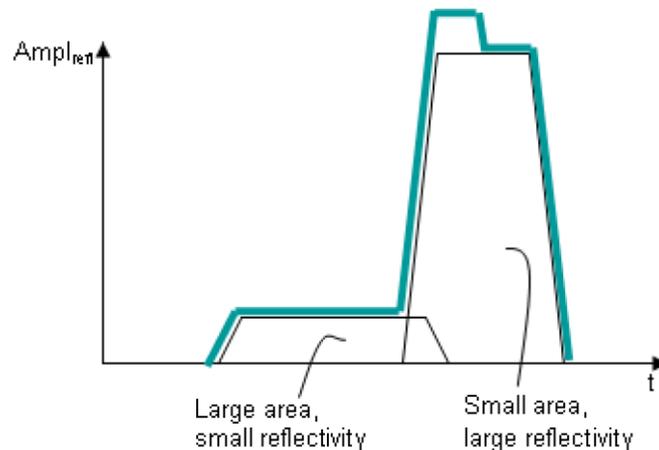


Figura 7: Respuesta al escanear superficies con distinta reflectividad
Fuente: "Teoría y práctica del escaneado láser terrestre", 3D RiskMapping

Finalmente, se debe tener en cuenta que muchos materiales presentan una capa semitransparente que permite el paso del haz con refracciones y reflexiones en el propio material. Ejemplos de ello son la madera o el mármol, así como el poliestireno expandible. Como consecuencia de estos efectos, se debe considerar una constante al tomar medidas que se incluirá en el cálculo.

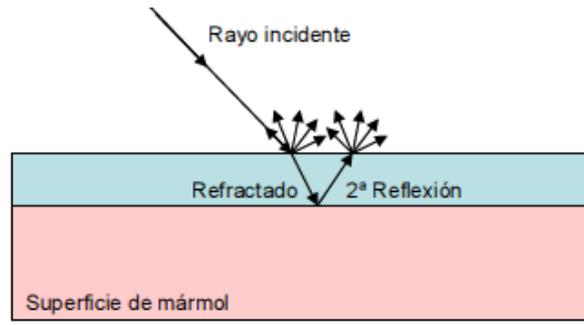


Figura 8: Efectos de la refracción en materiales semitransparentes no homogéneos.

Fuente: "Teoría y práctica del escaneado láser terrestre", 3D RiskMapping

2.3.3. Condiciones ambientales

Temperatura

La diferencia de temperaturas entre el interior del escáner y la atmósfera circundante puede llegar a ser muy elevada, estando la del interior muy por encima de la del exterior. Esto viene dado por el calor interno o resultante de la radiación externa, véase del sol, que aumenta la temperatura del aparato. La fuente de radiación externa puede calentar, tan sólo, uno de los lados del trípode o del escáner. Este hecho podría causar la dilatación de esa cara del aparato e induciendo errores provocados por la distorsión en la medida.

Además, se debe tener en cuenta la temperatura de la superficie que se va a escanear, ya que, si ésta presenta una temperatura muy elevada, la radiación de la propia superficie puede interferir con la señal, aumentando, así, la relación señal a ruido y contaminando la precisión de las medidas. Esta situación podría darse, por ejemplo, en un entorno industrial.

Atmósfera

Además de la temperatura como causa de error, también se encuentra la atmósfera. Como ya se ha mencionado, pueden aparecer temperaturas muy elevadas en el escáner, pero este sólo funcionará correctamente si se encuentra de un rango determinado de temperatura e incluso dentro del mismo pueden aparecer errores.

Cuando se trata de operaciones de medida de distancias, los errores naturales y que se dan con mayor frecuencia se atribuyen, principalmente, a las variaciones atmosféricas correspondientes a temperatura, humedad y presión. Estas variaciones afectan directamente al índice de refracción del aire, modificando la longitud de onda electromagnética. Como consecuencia de ello, la velocidad a la que la luz del láser viaja por el entorno se ve afectada por ellas de forma considerable, ya que están relacionadas con la densidad del aire.

En previsión de la refracción que aparece al variar dichas condiciones, los escáneres láser incluyen un parámetro de corrección del índice de refracción y suelen estar preparados para trabajar en el estándar ISO (15° C, 1 atm). De esta manera, si cambian las condiciones de trabajo, los parámetros deben de adaptarse, ya que, por ejemplo, una diferencia de 10°C de temperatura provoca una desviación en la medida de 1 mm cada 100m, ocurriendo lo mismo si la variación en la presión es de 35 hPa.

Trabajando con largas distancias o en el caso de medidas de alta precisión, la aplicación de los parámetros de corrección atmosférica es obligatoria, ya que se trata de aplicaciones más críticas en las que la precisión es más susceptible de verse afectada. No obstante, en aplicaciones terrestres de corta o media distancia, el efecto no debería afectar seriamente a los resultados obtenidos.

Teniendo en cuenta el descenso de temperatura, de alrededor de 0.65°C cada 100 m, así como el de presión, de 10 hPa cada 100 m, que tiene lugar en una zona montañosa, la corrección debe ser acorde a dichos parámetros de variación. Por ejemplo, si se sitúa el escáner a 2000 m de altitud, el error sería de alrededor de 8 mm cada 100 m.

Interferencia de radiación

Las radiaciones externas afectan fuertemente a la precisión de los escáneres láser, ya que estos trabajan en una banda de frecuencia muy estrecha. Una de las principales radiaciones externas que afectan a las medidas puede ser la fuente de iluminación empleada o circundante. Para evitar dicha interferencia, existen filtros de radiación óptica, permitiendo el paso de las frecuencias correctas hasta el receptor y reduciendo o eliminando la mencionada interferencia.

Distorsión por movimiento

La velocidad de escaneo de los láseres es muy elevada, del alrededor de 2000 a 500000 puntos por segundo. Pese a su elevada velocidad, el tiempo empleado en realizar un escaneo a alta resolución en un escáner basado en tiempo de vuelo puede llevar entre 20 y 30 y del orden de 10 minutos en uno basado en la fase. Se conoce como distorsión por movimiento al error inducido en la medida por cualquier vibración que tenga lugar en el entorno de escaneo durante el tiempo empleado en realizar la operación.

Para minimizar el número de errores que aparezcan en las medidas, el escáner se montará en una plataforma estable, reduciendo así las vibraciones. Esto se hace así porque cada punto se toma en un instante de tiempo distinto y cualquier movimiento que tenga lugar en el escáner distorsionará la medida de dicho punto. Las vibraciones no sólo deben reducirse o eliminarse en el escáner, sino también en el objeto de medida.

Los cambios en la temperatura también pueden ocasionar movimientos en el escáner. Este movimiento podría darse por dilataciones o compresiones del material del trípode al incidir sobre el la radiación del sol, contribuyendo así a la distorsión en la toma de datos. Actualmente, los escáneres láser más avanzados, conocidos como estaciones láser, incorporan un compensador de eje dual para, como su nombre indica, compensar cualquier movimiento que pueda producirse en el proceso de escaneado.

2.3.4. Errores metodológicos

Este último apartado incluye los errores que se deben al método topográfico empleado o a la experiencia que tengan los usuarios con la tecnología elegida para la medida. Una incorrecta elección del escáner puede inducir a error, ya que si el alcance máximo del aparato se encuentra cerca de la distancia máxima a la que se encuentra el objeto de la medida, la

precisión de los resultados disminuirá y aparecerá ruido. Por otro lado, si se establece una malla cuya densidad presente una resolución más elevada de lo necesario, el problema se habrá sobremuestreado. Este exceso de resolución da lugar a una gran cantidad de ruido adicional y a un incremento en los tiempos de procesamiento.

Esta categoría no solo abraza los ya citados errores, sino que incluye también aquellos errores que aparecen durante la fase de registro o de consolidación. Los errores introducidos dependen de la técnica empleada para registrar las diferentes nubes de puntos y son independientes del método de registro o georreferenciación, ya bien sea directo o indirecto.

3. Metodología del levantamiento

Debido a la complejidad que puede alcanzar un levantamiento con láser escáner, es necesario llevar a cabo una planificación previa, determinando qué y cómo se va a estudiar. Cuando existe esta planificación, se procede al trabajo de campo para realizar el escaneo.

3.1. Planificación

Previo al levantamiento, ya se trate de uno topográfico o de un objeto, es necesario planificar cómo se va a realizar: determinar los objetivos a escanear, analizar el área en que este se encuentra, determinar el equipamiento a utilizar y conocer el funcionamiento del mismo, establecer la localización de las dianas y fijar las posiciones desde las que se va a escanear para minimizarlas.

3.1.1. Objetivo: Mirage F1

Pese a que este proyecto se centra en realizar el levantamiento y análisis del Dassault Mirage F1, los escaneos se realizaron conjuntamente con otros proyectos, para los cuales se requería también del escaneado del helicóptero BO-105. Por ello, la planificación tiene en cuenta ambos objetivos.



Figura 9: Mirage F1 en el Laboratorio Pedro Duque

El Mirage F1 es un caza de superioridad aérea diseñado y fabricado por Dassault Aviation. Su diseño se inició en 1964 a petición del Ejército del Aire francés, para sustituir a otra aeronave de la misma compañía, el Mirage III. Se trata de un avión con una cabina monoplaza, impulsado por un solo motor Atar 9K-31 que le proporciona cerca de 70 kN de empuje. Cuenta con estabilizadores horizontales bajos y dos más pequeños bajo el fuselaje, que le permiten mantener la estabilidad en maniobras de despegue, aterrizajes y lanzamientos, y un tren de aterrizaje reforzado como suele ser común en aviones de combate, preparados para aterrizar en cualquier tipo de superficie.

Una diferencia fundamental lo distinguía de su antecesor: el Mirage F1 no tendría alas en delta, puesto que habían generado numerosos problemas, el principal de los cuales era la escasa maniobrabilidad del aparato a bajas velocidades, dando lugar a aterrizajes complicados y peligrosos. Pese a que el primer prototipo que se construyó contaba con alas de geometría

variable, esta opción se desestimó debido a su elevada complejidad mecánica y su peso, quedando finalmente un diseño más similar a los tradicionales, con ala en flecha positiva.

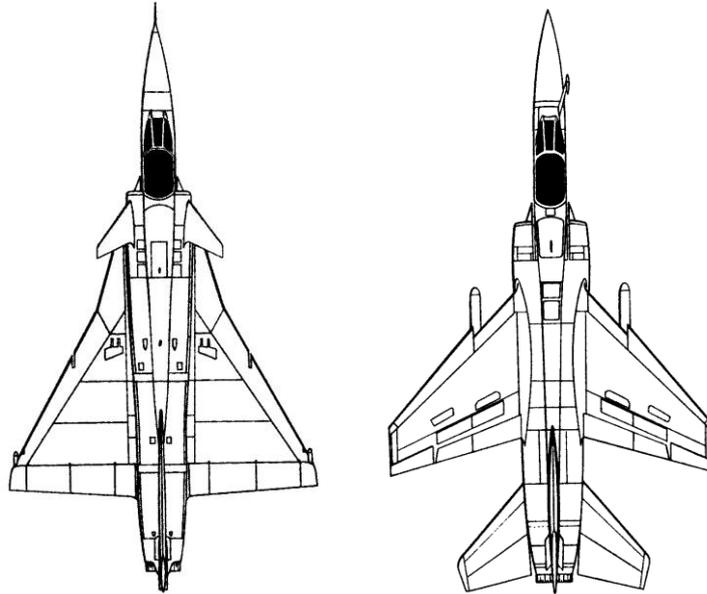


Figura 10: Vistas en planta de Mirage III (izquierda) y Mirage F1 (derecha)
Fuente: Wikimedia Commons

El primer vuelo del Mirage F1 se realizó el 27 de diciembre de 1966, y en su cuarto vuelo, el 7 de enero de 1967, alcanzó un régimen de vuelo transónico. Desde entonces se han fabricado más de 700 unidades, que han sido distribuidas a 13 países diferentes. También se ha fabricado diversas variantes de la aeronave. La mayoría se diferencian las unas de las otras en el armamento que son capaces de transportar o en la aviónica con la que están equipadas; también se fabrican modelos biplaza para entrenamiento de pilotos militares.

Especificaciones

Características generales	
Tripulación	1 pasajero
Longitud (m)	15.3
Envergadura (m)	8.4
Altura (m)	4.49
Superficie alar (m ²)	25
Peso en vacío (kg)	7400
Peso cargado (kg)	10900
Máximo peso al despegue (kg)	16200
Características de operación	
Velocidad máxima operativa (km/h)	2338
Alcance en crucero (km)	3300
Techo de vuelo (m)	18500
Régimen de ascenso (m/s)	243
Carga alar (kg/m ²)	450

Armamento	
Cañones	2 x DEFA 553
Anclajes	7
Capacidad anclajes (kg)	6300

Tabla 1: Especificaciones del Mirage F1

3.1.2. Zona de trabajo

Tanto el avión como el helicóptero que se han de escanear se encuentran situados en la parte delantera del Laboratorio Pedro Duque de la Escuela Técnica Superior de Ingeniería de Diseño de la Universidad Politécnica de Valencia. El Mirage puede verse en la Figura 10, y el BO-105 en la 11.

Se trata de una localización espaciosa pero muy ocupada, lo que deja un margen de maniobra relativamente pequeño para el establecimiento del equipo láser escáner, siendo complicado alejarlo mucho de la pieza, especialmente de la parte frontal del helicóptero. Además, uno de los dos equipos empleados necesita conectarse a la toma de luz, por lo que habrá que situarlo cerca de una de ellas, que se encuentran generalmente en las columnas de los laterales del hangar.



Figura 11: BO-105 en el Laboratorio Pedro Duque

La gran cantidad de elementos que se encuentran alrededor, como palas de helicóptero, fragmentos de ala, vehículos desarrollados por estudiantes de la universidad o paneles informativos, condicionan asimismo la elección de las posiciones de estacionamiento, ya que muchos de ellos no pueden moverse, o hay escaso margen para hacerlo, por lo que en estas zonas es necesario adaptar la localización del equipo a las circunstancias.

Por otra parte, el hangar cuenta con una pasarela elevada en uno de los laterales, que es útil para escanear desde ella las partes superiores del avión y del helicóptero. Cuando se realizan estos escaneos, es necesario tener un extremo cuidado, ya que el suelo de la misma no está fijo y se mueve si la persona a cargo del láser lo hace, estropeando así la medida.

Por último, respecto a la localización, hay que tener en cuenta que el suelo del hangar no está totalmente nivelado en ninguna dirección, por lo que cada vez que se establezca una nueva posición es necesario repetir el proceso de nivelado del equipo. Generalmente, este proceso ha de realizarse cada vez que el equipo se enciende, pero en un terreno no nivelado cobra especial importancia el correcto equilibrado del sistema.

3.1.3. Instrumentación

Equipo de medida láser

Como se ha indicado, el levantamiento del Mirage F1 se ha llevado a cabo con dos equipos diferentes, ambos de la marca Leica, cuyas prestaciones se comparan en la Tabla 2:

	ScanStation 2	ScanStation P40
Año de comercialización	2007	2015
Velocidad de escaneo	50.000 ptos/seg	1.000.000 ptos/seg
Precisión	4 – 6 mm	1.2 – 3 mm
Alcance	300 m	270 m
Control	Externo, ordenador	Integrado, pantalla táctil
Alimentación	Red eléctrica	Batería
Dimensiones	265 x 370 x 510 mm	238 x 358 x 395 mm
Peso	18.5 kg	12.25 kg
Tecnología	Tiempo de vuelo	Tiempo de vuelo + WFD ¹
Integración de escaneados	Manual, software externo	Automática, interno

Tabla 2: Principales características de los equipos usados

Como se puede ver y como es de suponer, el equipo más moderno ofrece mejores prestaciones en cuanto a velocidad de escaneo y precisión que el más antiguo, con un alcance ligeramente inferior que en este caso no afecta, ya que las distancias a medir serán siempre inferiores a 20 metros. Además, es más manejable, dado que su tamaño y peso son más reducidos y no es necesario tenerlo continuamente conectado a la red eléctrica ni a un ordenador. El ScanStation P40 ofrece también una gran ventaja sobre el ScanStation 2, y es que la fusión de escaneados realizados desde distintos lugares se hace de manera automática por el sistema, si se le indican apropiadamente las dianas cuando se escanea. Sin embargo, en el ScanStation 2 es necesario descargar los datos en el *software* específico, localizar manualmente las dianas y realizar así la unión de los escaneados. Si se han empleado muchos estacionamientos diferentes y numerosas dianas, lo cual es aconsejable, esta labor lleva mucho tiempo, mientras que el ScanStation40 es capaz de proporcionar todos los escaneados ya unidos.

Ambos sistemas incluyen el trípode para su montaje y diversos complementos, tales como dianas, instrumentos específicos de limpieza o conectores.

Dianas

Las dianas son unas marcas con patrones geométricos característicos y muy reconocibles que se emplean como referencia para poder unir los escaneados realizados desde diferentes

¹ WFD: *Waveform Digitalising technology*.

estacionamientos. Generalmente contienen dos colores que contrastan mucho entre ellos, y una zona de intersección bien definida. Las dianas suelen venir como complemento cuando se adquiere un sistema de escáner láser, y en muchas ocasiones son magnéticas para poderlas colocar sobre una superficie y evitar que se muevan accidentalmente. Algunas de ellas cuentan también con un soporte en cuya base se encuentra un imán potente y que permite rotar las dianas en dos ejes sin que en ningún caso se desplace su centro. Esto es útil para poder orientarlas de la mejor manera posible hacia el escáner en todos los emplazamientos, evidentemente sin mover la base de su posición. Algunos ejemplos de dianas se muestran en la Figura 12.



Figura 12: Ejemplos de dianas típicas.

Fuente: Leica Geosystems

Estación de trabajo

El ScanStation 2 necesita ser controlado desde un ordenador externo, desde el cual se le dan órdenes y al que envía los datos al finalizar un escaneo. En este caso, el equipo empleado es una estación de trabajo de la marca Hewlett-Packard.

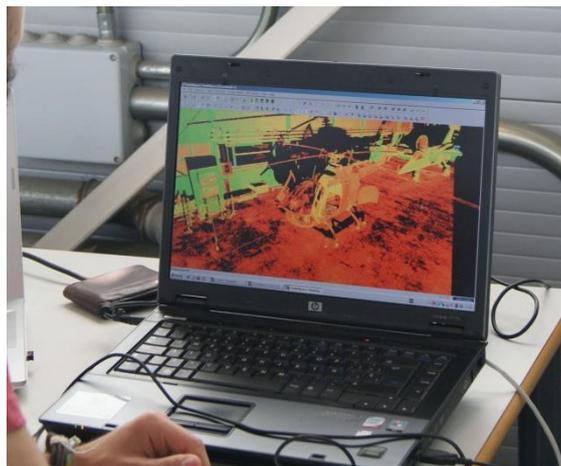


Figura 13: Ordenador portátil ejecutando el software Cyclone

El uso de este equipo no es necesario para escanear con el ScanStation P40, dado que se configura a través de la pantalla táctil integrada en el sistema.

3.1.4. Determinación de las posiciones de las dianas

Las posiciones de los puntos de referencia son cruciales para la correcta reconstrucción del escaneado. Se deben situar en puntos visibles desde todos los estacionamientos del escáner, o al menos, de la mayor cantidad posible. Además, las dianas se deben colocar tan repartidas espacialmente como sea posible en todos los ejes. Por sencillez y por accesibilidad, se tiende a colocar todas las dianas en el suelo. Esto es un error, puesto que disponer todos los puntos de referencia en el mismo plano, o en una línea, da lugar a un grado de libertad en la unión de los escaneos, que tendrá múltiples soluciones, por lo que la reconstrucción podría ser errónea.

Como mínimo, para poder ensamblar correctamente diferentes escaneados sin dejar libre ningún grado de libertad son necesarios tres puntos de referencia, aunque siempre es aconsejable contar con más. En el caso del levantamiento con el ScanStation 2, se utilizaron todas las dianas disponibles, en total 21. Además, algunas de ellas se emplearon en varias posiciones diferentes, quitándolas de la zona que quedaba fuera de la ventana de escaneo y colocándolas dentro de ella; en todos los casos se marcó previamente su posición para posteriormente poder recolocarla si fuera necesario para un nuevo escaneo.

Las dianas disponibles se distribuyeron por el suelo en diferentes posiciones, por las paredes a diferentes alturas y en las superficies de los propios objetivos: el avión y el helicóptero. La Figura 14 muestra la distribución de algunas de las dianas alrededor del Mirage F1, junto con el resultado del levantamiento.

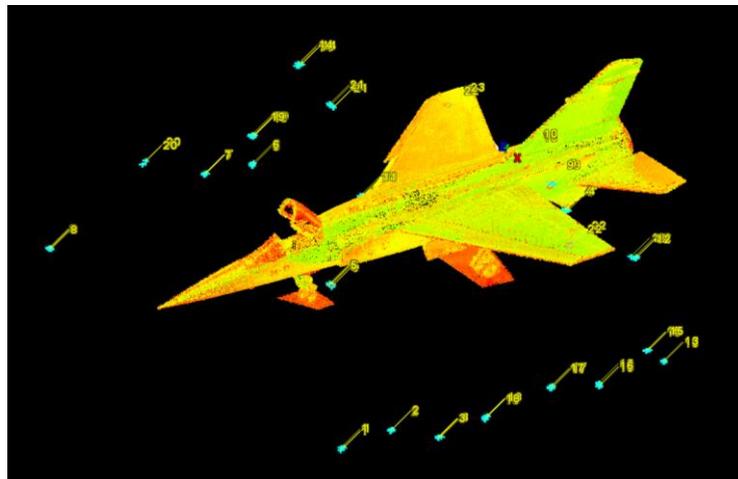


Figura 14: Esquema de posicionamiento de las dianas

Por otra parte, para realizar el levantamiento con el ScanStation P40 se emplearon únicamente tres dianas. Cuando se trabaja con este equipo, se escanea en primer lugar la ventana determinada, y posteriormente se registran en alta resolución las dianas, para que exista una mayor precisión en la unión de los escaneos. Por ello, no es necesario que la diana se encuentre dentro de la ventana a escanear, tan solo que el escáner sea capaz de encontrarla desde su posición. Esto facilita encontrar posiciones accesibles desde todos los estacionamientos, y por ello son necesarias menos dianas. Se situó una en la barandilla de la

pasarela lateral, otra en una columna en la pared opuesta y una última a una altura considerable en la puerta del hangar.

3.1.5. Determinación de las posiciones de los estacionamientos

Una correcta elección de los emplazamientos para el escáner es aquella que garantice una máxima cobertura del área a escanear y una mayor precisión, minimizando al mismo tiempo el número de escaneos necesarios.

La precisión de la medida depende del diámetro de la huella láser, que es mayor cuanto más agudo es el ángulo de incidencia. En consecuencia, se debe buscar localizaciones desde las cuales el ángulo de incidencia del láser sea lo mayor posible.

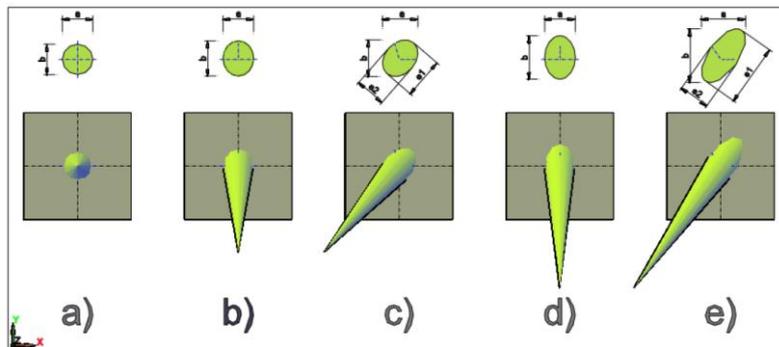


Figura 15: Huella digital y sombra del láser para diferentes ángulos de incidencia
Fuente: "Teoría y práctica del escaneado láser terrestre", 3D RiskMapping

Por otra parte, cuanto mayor sea la distancia entre el escáner y el objeto, tanto la precisión de la medida como la resolución serán menores. Por lo tanto, para aumentar la precisión es conveniente acercarse al escáner a la superficie, pero al mismo tiempo esto dará lugar a ángulos de incidencia muy agudos, siendo contraproducente con lo descrito anteriormente. Por ende, hay que buscar un equilibrio entre distancia y ángulo que proporcione la precisión deseada.

Además, el emplazamiento seleccionado debe permitir cubrir la mayor área del objeto posible, produciendo pocas zonas de sombra a poder ser. Adicionalmente, es conveniente intentar que no haya ningún obstáculo en la línea de visión del láser, ya que producirían sombras sobre lo que se desea realmente medir.

Finalmente, para el levantamiento de ambas aeronaves con el ScanStation 2 se escaneó desde 11 emplazamientos diferentes. Probablemente este número de escaneos esté sobredimensionado, puesto que fueron realizados por estudiantes en proceso de aprendizaje, sin ser los emplazamientos óptimos y es posible que alguno fuera prescindible. No obstante, se utilizaron todos para la posterior reconstrucción del modelo.

Sin embargo, para el levantamiento con el ScanStation P40 se emplearon 8 emplazamientos diferentes, con los cuales se escanearon simultáneamente el caza y el helicóptero. En este caso, opuesto al anterior, habría sido conveniente realizar alguna medida más, mas el tiempo del que se disponía con el equipo era muy reducido, de apenas unas horas, por lo que se realizaron los escaneos que se consideraron fundamentales.

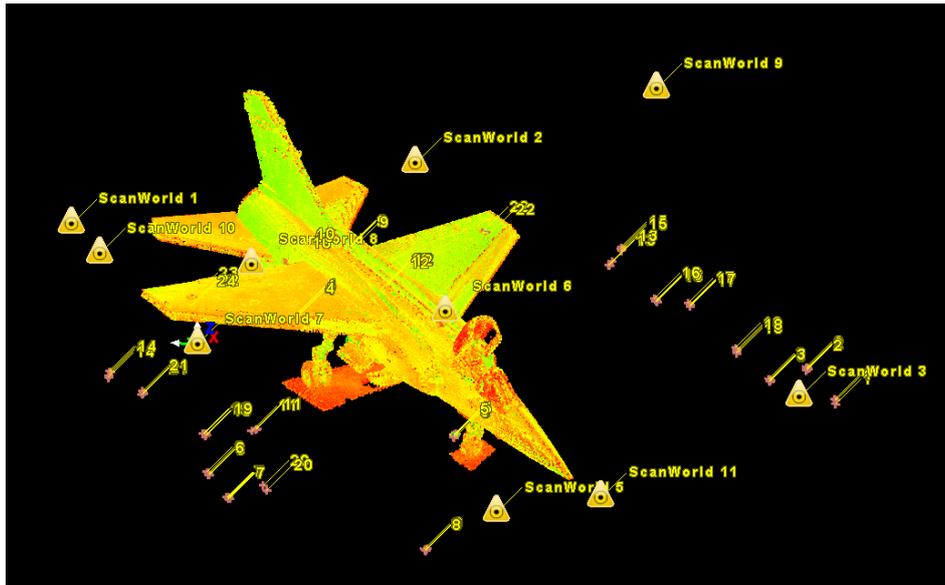


Figura 18: Emplazamientos de ScanStation 2 – Vista tridimensional

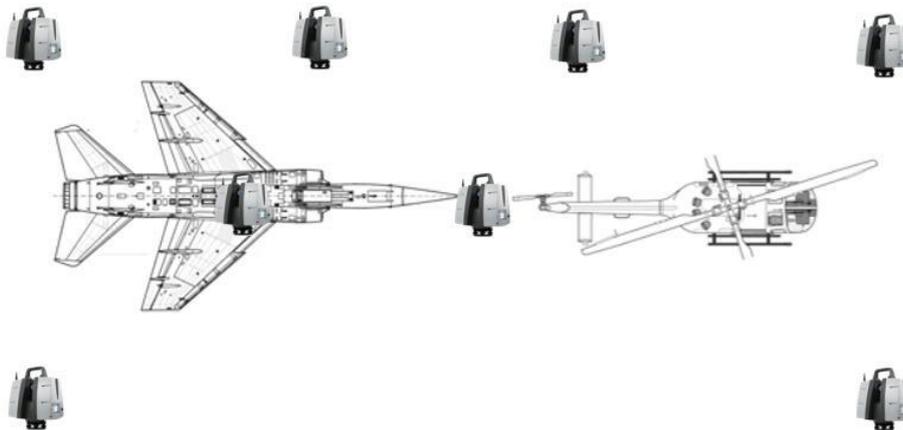


Figura 19: Emplazamientos de ScanStation P40

3.2. Trabajo de campo

Una vez planificado el levantamiento, y conocida la zona, los objetivos, y el sistema que se va a emplear, se inicia el trabajo de campo. Para ello, se siguen los pasos que se describen a continuación.

3.2.1. Estacionamiento y conexión del escáner

En primer lugar, se ha de comprobar que el emplazamiento escogido sea el adecuado, es decir, que el suelo sea estable y lo más nivelado posible. Una vez hecho esto, se procede al montaje del trípode, extendiendo las patas y asegurándolas. Esto último es importante hacerlo de manera correcta, ya que si no están bien aseguradas, podrían ir recogiendo poco a poco debido al peso de la estación y falsearían la medida. Respecto a la altura, lo más común es situarlo a la altura de los ojos, aunque si se quiere escanear el suelo, es mejor colocarlo en una posición más elevada. Para esta aplicación, basta con posicionarlo a la altura de una persona.

Tras asegurar que las patas están fijas, se procederá a montar el escáner sobre el trípode. Previo a ello, es conveniente retirar las tapas de la lente y comprobar que ésta está limpia, ya que la presencia de polvo puede difractar el haz de láser y empeorar la precisión de la medida. En caso negativo, se debe limpiar con los productos específicos suministrados generalmente por el fabricante. Cuando la lente está limpia, se coloca el escáner sobre el trípode y se procede a su anclaje mediante el sistema de seguridad correspondiente. En los dos sistemas utilizados, se fija mediante un bloqueo por tuerca.



Figura 20: ScanStation 2 (izquierda) y ScanStation P40 (derecha) sobre sus trípodes

Finalmente, hay que nivelar el escáner ajustando primeramente la longitud de las patas, y después con las roscas que tiene a tal efecto. El escáner cuenta con dos niveles tóricos integrados, uno para cada eje, que hay que tratar de dejar lo más centrados que sea posible. Cuando se encienda el equipo, éste tratará de nivelarse completamente y con mayor precisión de la que se puede alcanzar con un nivel y el ojo humano mediante su compensador de doble eje. Sin embargo, tiene una ajustabilidad limitada, por lo que cuanto mejor nivelado se encuentre antes de encenderse será un proceso más sencillo y le tomará menos tiempo.

Cuando se considere que el escáner está lo suficientemente nivelado, se puede proceder a conectarlo. En el caso del ScanStation 2, esto se traduce en alimentarlo desde la red eléctrica y conectarlo a un ordenador desde el que se controlará mediante un cable ethernet. En el caso del ScanStation P40, no son necesarias estas conexiones, dado que cuenta con baterías y el control se hace en el propio escáner a través de la pantalla táctil.

Una vez conectado, se procede a desbloquear el escáner, que suele guardarse bloqueado para evitar movimientos no deseados en el transporte y almacenamiento, y posteriormente se enciende. Al hacerlo, automáticamente comenzará a calentarse y a autonivelarse, avisando cuando haya finalizado ambos procesos.

Mientras esto ocurre, y solo cuando se vaya a usar el ScanStation 2, puede iniciarse en el ordenador el *software* que sea necesario, en este caso, el Cyclone. Cuando tanto el programa como el escáner estén preparados, se procede a establecer la conexión entre ellos, y finalmente se inicia el programa de control del escáner (módulo Register del Cyclone)

Ahora el escáner está listo para configurarse y escanear.

3.2.2. Colocación de las dianas

En el capítulo 3.1.4 ya se ha descrito el proceso de localización de las dianas. Antes de iniciar el escaneo es necesario distribuirlas según lo planificado. La Figura 21 muestra algunas de ellas. Cabe resaltar la importancia de buscar lugares en los que las dianas puedan permanecer inmóviles, ya que en caso de moverse se pierden los puntos de referencia y la superposición de escaneos sería incorrecta.



Figura 21: Distribución de dianas verticalmente en las mesas del laboratorio (superior) y en el suelo bajo el Mirage F1 (inferior)

3.2.3. Ajustes del escáner

El escáner tiene capacidad para escanear horizontalmente 360° , girando por completo sobre su eje vertical. Verticalmente, su campo de visión es más reducido, ya que por la parte inferior existe un ángulo sólido que no es capaz de capturar. Esto se debe en primer lugar a limitaciones físicas, y en segundo lugar a que escaneando esta zona obtendría únicamente las patas del trípode que lo soportan y el suelo. Pese a que ofrecen la posibilidad de registrar este gran campo de visión, lo normal es que no sea necesario, y así ocurre en la mayoría de

escaneos realizados para este estudio. Por tanto, un paso fundamental es la definición del área a escanear. Cuanto mayor sea, más memoria ocupará, por lo que es conveniente hacerla lo más reducida posible, abarcando tan solo el objeto.

En el ScanStation 2, estos ajustes se realizan en el propio programa, que posteriormente los enviará al escáner, definiendo los ángulos de inicio del recorrido horizontales y verticales. Para ello es necesario conocer dónde se encuentra el origen del escáner, que generalmente es en la posición en la que se encendió. Por otra parte, en el ScanStation P40 esta selección es más visual. El equipo toma una fotografía que se muestra al usuario en la pantalla que lleva integrada, y sobre ella se selecciona el área que se desea.

A continuación debe ajustarse la resolución, que se define básicamente como la distancia entre dos puntos medidos consecutivamente, es decir, es el parámetro que determinará la densidad de información de la nube de puntos. Una resolución mayor dará lugar a una mejor precisión en la reconstrucción, al contar con más puntos, pero al mismo tiempo multiplicará el tiempo de escaneado, de modo que es necesario valorar cuál es la adecuada para el caso a tratar. Si se tratan superficies suaves, lo lógico es emplear menor resolución, ya que habrá poca variación de uno a otro. En cambio, si se va a escanear una superficie cambiante o muy curva es conveniente escanear con mayor resolución si se desea lograr un nivel de detalle apropiado.

Cuando se ajusta la resolución, aunque de cara al usuario se selecciona la distancia entre dos puntos, el escáner lo procesa como un recorrido angular determinado. Para relacionar este ángulo con la distancia lineal establecida, es necesario conocer el radio, es decir, la distancia a la que se encuentra la superficie. Por ello también es necesario indicarle al escáner cuál es la distancia a la que debe tener la resolución seleccionada. Si la distancia es menor, el mismo recorrido angular dará lugar a un menor desplazamiento lineal, lo que equivale a una mayor resolución. Para puntos situados a una distancia mayor a la establecida, la resolución será menor. Es común establecer la distancia de referencia como la mayor entre el escáner y cualquier punto del objeto a escanear, asegurando así que no se dé una resolución menor en ningún punto. Durante los escaneados, la distancia se estableció diferente en función de la posición del equipo y del objetivo, encontrándose normalmente entre los 5 y los 15 metros.

3.2.4. Toma de datos

Llegados a este punto, el escáner está preparado para escanear, los ajustes están definidos y los puntos de referencia están colocados en sus respectivos lugares. Así pues, solo queda iniciar el proceso de escaneado, que será gestionado automáticamente por el escáner láser. Éste recorre la ventana que se le ha definido y envía las coordenadas de los puntos al ordenador, que va haciendo una reconstrucción en tiempo real de lo que recibe. Así, es posible hacer un seguimiento, saber qué parte del objetivo se ha escaneado ya y comprobar que no surja ningún problema durante el proceso. Durante el barrido es fundamental vigilar que no haya movimiento en la zona que se está escaneando, ya sea por presencia de personas o por factores externos. Se muestran a continuación algunas imágenes de los resultados brutos obtenidos de los escaneos desde diferentes puntos de vista. En ellos es posible localizar fácilmente las dianas, así como apreciar las mencionadas zonas de sombras.

La duración de este proceso fue de unos 30 minutos para los escaneos realizados con el ScanStation 2, y de entre 1 y 2 minutos con el ScanStation P40. Finalizado el barrido, se debe volver a comprobar que todo se ha obtenido correctamente, sin zonas de sombra no esperadas ni puntos no reales. Una vez comprobado, se procede a escanear específicamente los puntos de referencia, que en este proyecto son básicamente las dianas.

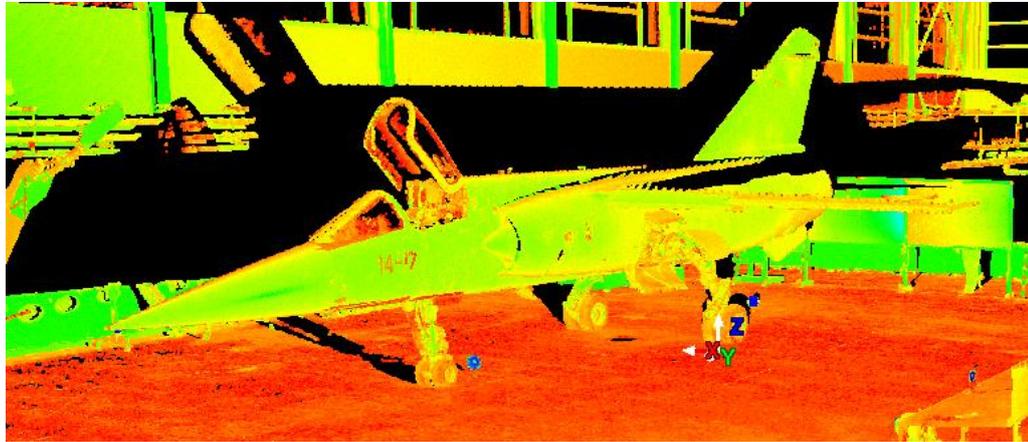


Figura 22: Vista global del Mirage F1

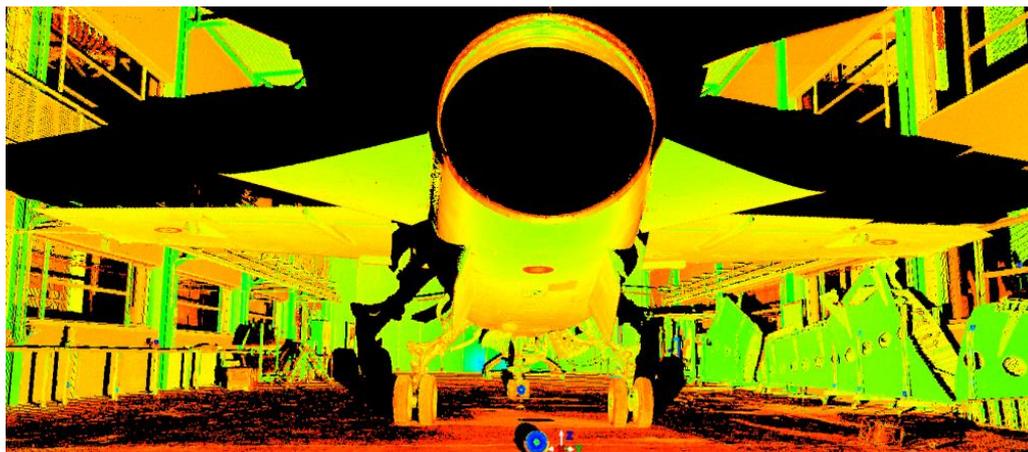


Figura 23: Vista trasera inferior del Mirage F1

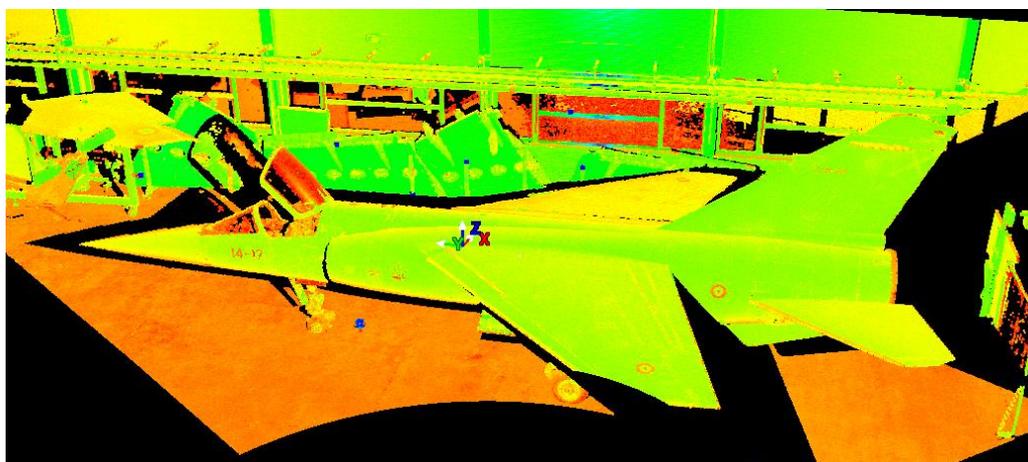


Figura 24: Vista superior del Mirage F1



Figura 25: Vista frontal del Mirage F1

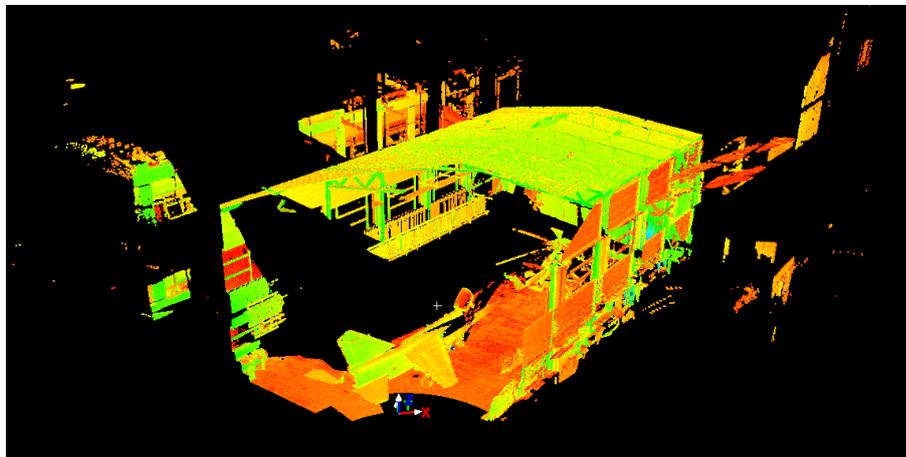


Figura 26: Perspectiva del hangar escaneado

Las dianas han de escanearse por separado porque, para poder cumplir correctamente su cometido, es necesario tenerlas en muy alta resolución. Realizar el barrido completo con semejante precisión consumiría muchos recursos computacionales, y por ello se escanean a posteriori. Cuando al sistema se le indica que lo que está escaneando es una diana, se encarga de buscar su centro geométrico, y éste es el punto que guarda como referencia.

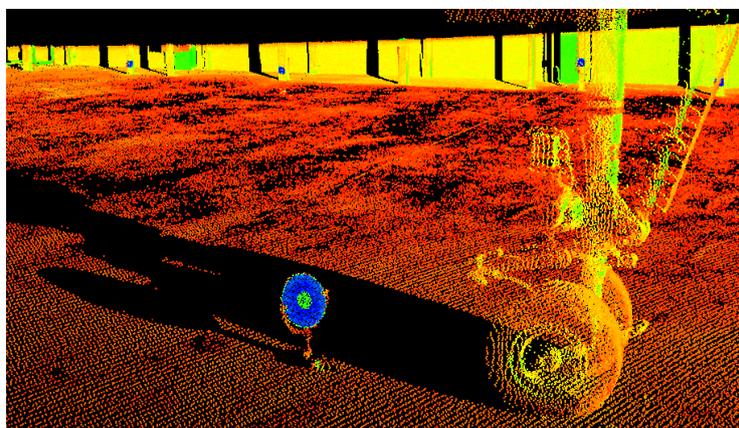


Figura 27: Diana escaneada en alta resolución

Además, el sistema almacena también el nombre o número identificativo de cada diana. Es fundamental asegurarse de que siempre se le asigna el mismo identificador a cada una de las dianas, puesto que son el punto de partida para que el sistema reconozca puntos homólogos cuando trate de reconstruir el escenario a partir de múltiples escaneos. Si bien es cierto que algunos sistemas modernos son capaces de reconocer automáticamente una diana en el escaneo general, es bueno repetir el proceso manualmente, especialmente si hay muchas dianas, para asegurarse de que están todas registradas. En estos sistemas el barrido en alta resolución es muy rápido, por lo que no supone una pérdida sustancial de tiempo y puede ahorrar problemas en un futuro.

4. Modelización 3D

Una vez obtenidas las nubes de puntos desde los diferentes estacionamientos del láser escáner, se procede al tratamiento informático de los datos obtenidos. Para ello, el primer paso a llevar a cabo es la unión en un solo escenario de las diferentes nubes de puntos, es decir, el solape de todos los escaneos realizados. A este proceso se le conoce como registro y georreferenciación, y es posible gracias a un adecuado uso de las dianas como puntos de referencia. Este proceso se realiza utilizando el mismo *software* empleado para escanear, el Cyclone de Leica.

Cuando se unen todos los escaneos, lo que se obtiene es la reconstrucción de todo lo que alcanzaba la línea de visión de cada uno de ellos. Es decir, no solo el avión, que es el objeto de este estudio, sino también todo lo que se encuentra a su alrededor: el helicóptero, mesas, equipos del laboratorio, las propias paredes del hangar e incluso partes de las aulas del edificio más cercano, la ETSID. Para evitar trabajar con todos estos puntos, que consumen memoria y no aportan ninguna información relevante para nuestros propósitos, es conveniente realizar un proceso de limpieza o filtrado, eliminando aquellos que no pertenezcan al Mirage F1. En este caso, este filtrado se llevó a cabo con el Cyclone, aunque es posible hacerlo también con el 3DReshaper.

Tras estos dos procesos, se cuenta con un modelo unificado y filtrado del avión, pero que es al fin y al cabo una nube de puntos. A partir de ella, es posible, mediante el uso del 3DReshaper, reconstruir la superficie para así tener un modelo más parecido a la realidad, y poder trabajar con él en otros proyectos.

4.1. Software

- **Cyclone**, desarrollado por Leica Geosystems, el fabricante de los dos sistemas de láser escáner con los que se trabaja en el presente proyecto. Específicamente, se utilizan dos de los módulos disponibles. En primer lugar, el módulo Register permite el control del ScanStation 2 desde la estación de trabajo portátil, y la recepción de los datos escaneados por el equipo en tiempo real. En segundo lugar, la unión de los escaneos parciales realizados desde diferentes emplazamientos se realiza con el módulo Importer.
- **3DReshaper**, desarrollado por Hexagon Manufacturing Intelligence, es un software de tratamiento de nubes de puntos con el que se realizará una limpieza de los resultados, el mallado y la reconstrucción del modelo 3D.

4.2. Registro y georreferenciación

Como ya se ha introducido, el registro es el primero de los pasos a realizar para obtener el modelo de un objeto que se ha escaneado desde múltiples ángulos. Existen diversas técnicas para llevarlo a cabo, en función de las referencias que se busquen para definir los solapes. A continuación se hará una breve introducción a las mismas, concretando cuál es la empleada en este proyecto. Posteriormente, se describirá el proceso seguido para la unificación del levantamiento del Mirage F1.

4.2.1. Clasificación de los métodos de registro y georreferenciación

4.2.1.1. Registro indirecto

Cuando se emplea un registro indirecto, no se cuenta inicialmente con un sistema de referencia global, sino que el escáner almacena un sistema diferente cada vez que se traslada a un nuevo estacionamiento. Debido a la carencia de un sistema global, no es posible conocer las posiciones relativas de los estacionamientos, por lo que a priori el *software* no sabe dónde “encaja” cada uno de los escaneos. Para poder ensamblarlos, debe contar con elementos que estén presentes en todos ellos y que pueda reconocer, para así situar el foco de cada escaneo en su lugar correspondiente. Las tres técnicas para lograrlo se describen a continuación.

Registro diana a diana

Este es, como se ha adelantado en numerosas ocasiones, el método que se ha empleado en el presente levantamiento. Consiste en colocar distribuidas por toda el área a escanear diversas dianas, fabricadas con un material altamente reflectante, y que contienen formas geométricas muy reconocibles que facilitan el cálculo de la posición de su centro. En caso de no disponer de dianas, puede realizar su función algún objeto de geometría simple y reconocible, aunque siempre es mejor emplear las primeras, que se han diseñado a tal fin. No obstante, no siempre es posible colocar dianas en toda el área del escaneo, puesto que puede haber lugares inaccesibles o donde sencillamente no se pueda fijar nada. En estos casos, se puede utilizar como referencia algún punto del propio medio, intentando siempre que sea reconocible y visible desde todos los estacionamientos. Por ejemplo, en interiores pueden utilizarse como referencias esquinas de ventanas o muebles, y en exteriores, cornisas o aristas de edificios. En cualquier caso, esto debe evitarse en la medida de lo posible, intentando siempre referenciar con las dianas.

Cuando se realiza el levantamiento con el ScanStation P40, se escanean por separado las dianas al finalizar el barrido, por lo que su posición queda almacenada automáticamente y el sistema conoce su localización dentro del escaneo general. No obstante, con el ScanStation 2, es necesario buscar manualmente las dianas y señalarle al sistema dónde se encuentran, siendo este un proceso más lento y desde luego menos preciso.

En cualquiera de los dos casos, al proporcionarle al sistema las posiciones de las dianas, lo que se le está dando a conocer son puntos comunes de los diferentes escaneos, que tiene la capacidad de unir para formar el levantamiento global. Por eso son necesarios como mínimo tres puntos (aunque es aconsejable que sean más), dispersos en los tres ejes.

Registro nube a nube

El registro nube a nube es un método alternativo al de las dianas, aunque el anterior puede usarse como complemento para este. Para poder aplicarlo, es necesario que las nubes de puntos tengan un solape relativamente grande, de entre el 30 y el 40% normalmente, aunque esto no siempre garantiza buenos resultados. Cuanto mayor sea el solape, mayor será la probabilidad de que el sistema encuentre una solución correcta.

Este tipo de registro requiere que el usuario le indique al sistema al menos tres pares de puntos homónimos, y aquí es cuando las mismas dianas pueden ser útiles, pues son fáciles de

identificar visualmente y el centro está bastante determinado como para que el usuario pueda seleccionarlo con buena precisión. Una vez el sistema conoce estos pares de puntos, procede a intentar alinear los escaneos mediante el algoritmo ICP (*Iterative Closest Point*, Punto más Cercano Iterativo) Parte de los puntos que se le han indicado como coincidentes, aunque lo normal es que no lo sean totalmente, y que haya un cierto error. Desde esta base, el algoritmo busca la alineación de las superficies que minimice el error, es decir, la distancia entre los puntos de las dos nubes que deberían coincidir.

Esta técnica es compleja, aunque puede funcionar bien, pero es conveniente tener en cuenta que no proporciona buenos resultados para alinear estructuras repetitivas y largas. Durante la primera fase del proyecto, a modo de aprendizaje, se trató de utilizar este método para reconstruir varios escaneos del Mirage F1; no obstante, todos los intentos fueron infructuosos.

Registro superficie a superficie

Este método, bastante novedoso, es análogo al anterior, con la salvedad de que el algoritmo iterativo trata aquí de minimizar el error obtenido por la distancia entre superficies, no entre puntos. Para aplicarlo, es preferible limpiar y triangular primero las distintas nubes, obteniendo superficies, y realizar el registro posteriormente.

4.2.1.2. Registro directo

Cuando se escanea mediante métodos indirectos, o bien existe desde el principio un sistema de referencia global, o bien se determinan las distancias entre los estacionamientos en los que se monta el escáner. En cualquiera de los dos casos, la clave es que, a diferencia de los métodos indirectos, aquí sí se conoce la posición relativa de los diferentes láseres. Con esta relación es posible realizar el solape directo de las diferentes nubes de puntos.

Para conocer esta distribución de estacionamientos, hay varias opciones. Una de ellas es emplear un escáner con funciones de estación total, estableciéndolo sobre un punto conocido mediante el uso de una plomada láser. Así, su orientación puede determinarse escaneando un único punto de referencia cuando se realiza el siguiente escaneo. Otra opción es colocar un reflector en el escáner que actúe de diana, y registrar su posición desde la estación total. Por último, una forma diferente de conocer las posiciones de todos los escáneres es el empleo de receptores GPS.

Los registros directos ofrecen grandes ventajas sobre los indirectos: son más rápidos, eliminan o reducen en gran medida la necesidad de dianas para referenciar y no necesitan solapes entre las nubes de puntos para poder unirlos. La gran desventaja es que requieren de sistemas adicionales, como una estación total o el uso del GPS.

4.2.2. Registro y georreferenciación del Mirage F1

El proceso que a continuación se describe solo fue llevado a cabo para el levantamiento con el ScanStation 2, puesto que, como se muestra en el apartado 3.1.3. *Instrumentación*, el equipo ScanStation P40 es capaz de hacerlo automáticamente si el usuario se preocupa tan solo de numerar bien las dianas al escanearlas en alta resolución.

Como se ha mencionado, el registro y georreferenciación del escaneo del ScanStation 2 se ha de realizar desde el mismo programa que la adquisición, el Cyclone, con su módulo Importer. Cuando se realizan los escaneos desde diferentes estacionamientos, Cyclone almacena cada uno de ellos por separado, en lo que denomina un *ScanWorld*. Algunos de ellos pueden verse en las Figuras 18 a la 21. Para fusionar todos los *ScanWorld* diferentes se debe seguir los siguientes pasos:

1. Se crea un nuevo archivo, *registration*, en la carpeta del proyecto con el nombre deseado.
2. Importar en él todos los *ScanWorld* que se desean unificar en uno solo.
3. Seleccionar la opción *Auto-Add Constraints*, para identificar las restricciones de cada uno de los barridos, es decir, señalar las dianas, que representan los puntos comunes conocidos entre todos los barridos.
4. Marcar la opción *Register* y seleccionar *Auto-Add Cloud Constraints*, que añade las restricciones impuestas.

El programa realiza las uniones de *ScanWorlds* dos a dos, es decir, no fusiona más de dos nubes de puntos a la vez. Para comprobar que todo esté correcto, se pueden ir visualizando las superposiciones que realiza el programa, observando la contribución de cada *ScanWorld* al global.

5. Por último, se regresa al menú principal y en él se crea un nuevo *registration*, marcando la opción *Create and Open a New ModelSpace View*. Así se obtiene un *ModelSpace* que contiene la unión de todos *ScanWorld* parciales.

Realizadas estas acciones, el resultado es un *ScanWorld* que aúna todos los anteriores, como se muestra a continuación en las Figuras 28 y 29.

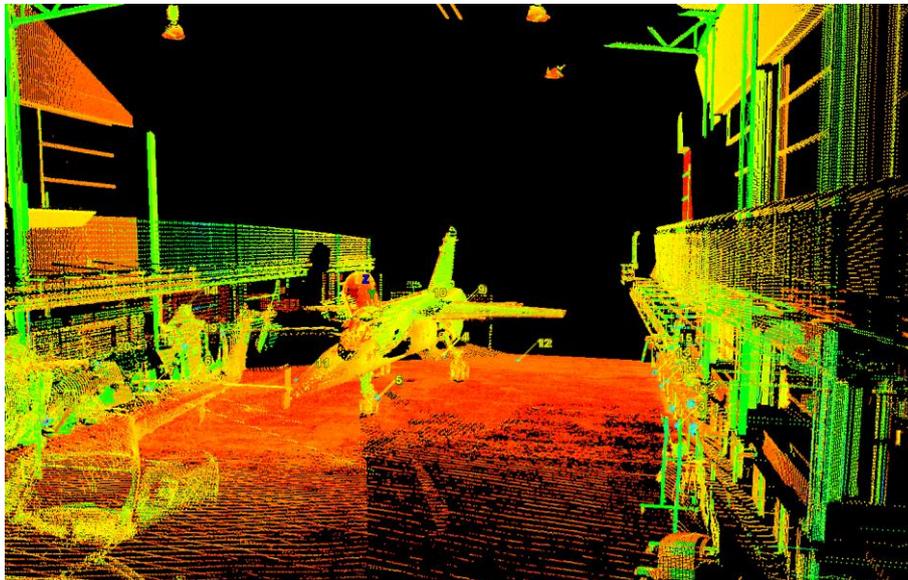


Figura 28: *ScanWorld* fusionados en uno único

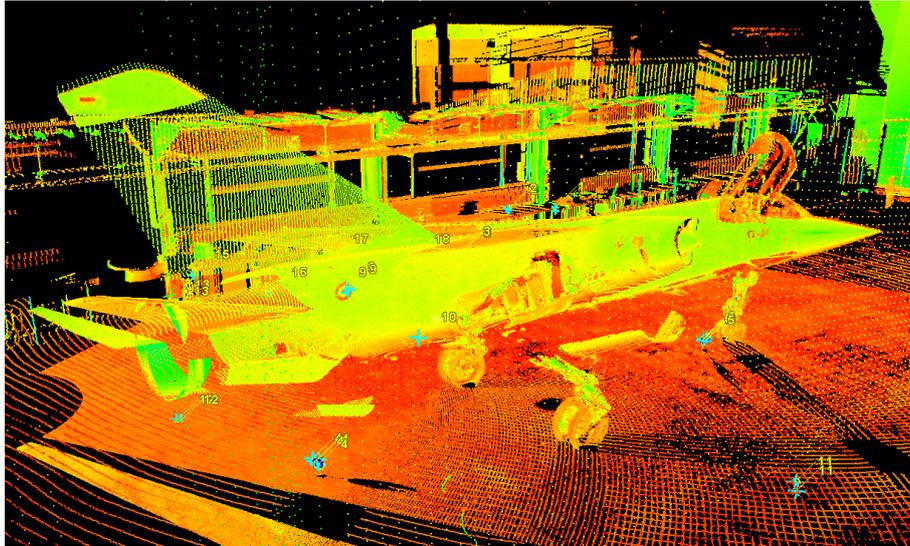


Figura 29: *ScanWorld* fusionados en uno único

En cuanto al conjunto levantado por el ScanStation P40, el sistema lo proporciona ya unido internamente. La siguiente imagen ofrece al lector una idea de la potencia de escaneo de este sistema.

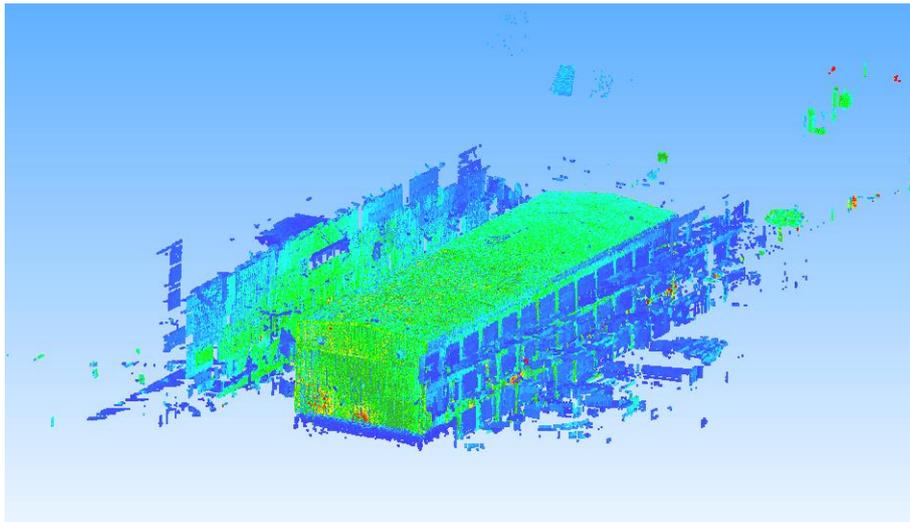


Figura 30: Hangar escaneado por el ScanStation P40

En ella se observa el hangar que alberga el laboratorio y ambas aeronaves escaneado por completo, junto a parte de los edificios de los alrededores, que se alcanzaron a través de los ventanales. En su interior se encuentran los levantamientos de las aeronaves, que son el objetivo final que se alcanzará tras eliminar todos los datos sobrantes: el propio hangar y todo el material que alberga. La Figura 31 muestra un corte mediante el cual se aprecia que, en efecto, se han escaneado el Mirage F1 y el helicóptero.

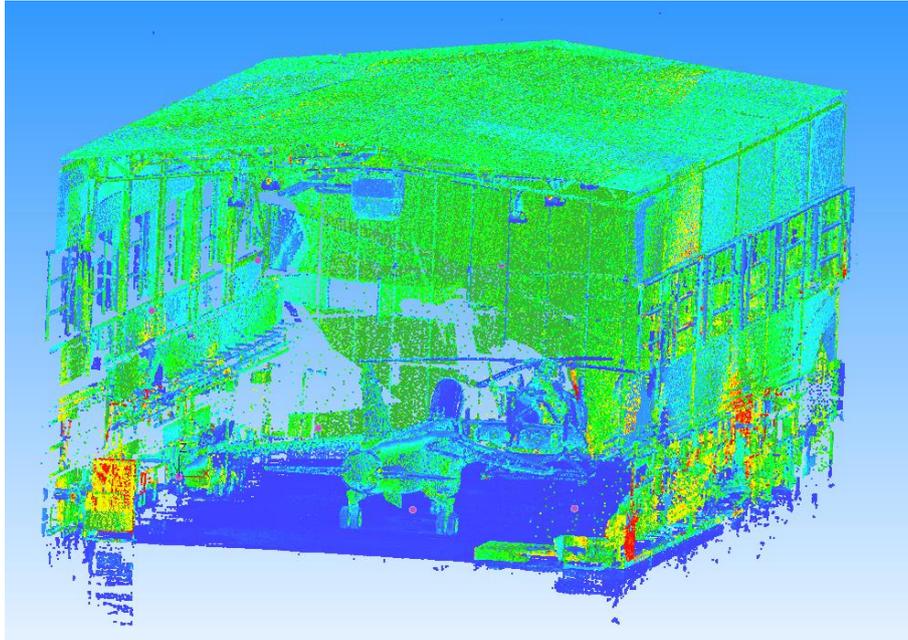


Figura 31: Corte del hangar con ambas aeronaves

4.3. Filtrado de datos

Una vez se ha obtenido un conjunto global que incluye todos los escaneos desde diferentes estacionamientos, éste no contiene solamente el avión, que es el objetivo que se busca, sino que contiene también el entorno en el que se encuentra. Para retener solo la información interesante para el estudio, se debe realizar un filtrado, eliminando los puntos correspondientes a las paredes, el techo, el suelo, los objetos expuestos en el laboratorio, etc. Este se ha de realizar para los puntos de ambos escáneres, y será un proceso de limpieza manual. En segundo lugar, para eliminar algunos puntos más, se empleará una herramienta que busca reducir el ruido presente en la nube.

4.3.1. Eliminación de información sobrante

Esta limpieza se puede realizar tanto desde el *software* Cyclone, con el que se ha trabajado hasta ahora, como desde otros programas de procesamiento de nubes de puntos, como es el caso del 3DReshaper. En este caso, se ha escogido realizar la limpieza desde el 3DReshaper.

Para ello, se hace uso principalmente la herramienta *Clean/Separate Clouds*. A fin de poder utilizarla, debe seleccionarse previamente toda la nube de puntos (solo si se visualizan todos los puntos de color rosa estará bien seleccionado). A continuación se abre la herramienta, que permitirá dibujar puntos con los que conformará un polígono. Finalmente, se escoge si se desea conservar los puntos de dentro o de fuera del mismo. La herramienta análoga a esta en el programa Cyclone es *Fence*, y funciona con el mismo principio.

Tras la limpieza, las nubes de puntos se han reducido considerablemente, facilitando así su manipulación. Los resultados del proceso de filtrado se muestran en las Figuras 32 y 33.



Figura 32: Nube de ScanStation 2 tras filtrado

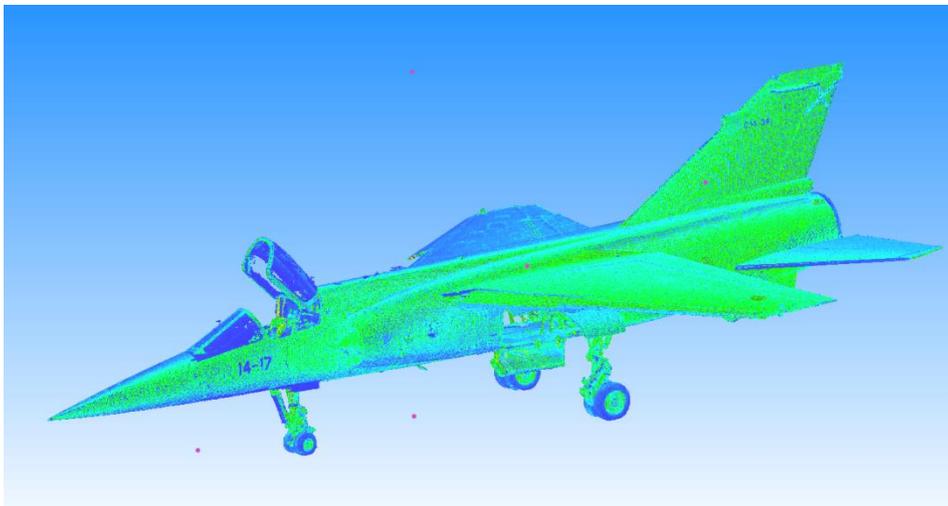


Figura 33: Nube de ScanStation P40 tras filtrado

4.3.2. Reducción de ruido

El software 3DReshaper cuenta con una herramienta destinada a la reducción del ruido en las nubes de puntos. Su aplicación es muy interesante en el caso que se está tratando, ya que pueden existir diferencias entre las medidas tomadas desde diferentes emplazamientos por el escáner, y esto, unido a pequeños fallos en el proceso de georreferenciación, dan lugar al ruido en ciertas zonas de la nube de puntos. Esta herramienta se denomina *Filter/Explode Clouds*, y ofrece diversas opciones (Figura 34) De entre ellas, se selecciona *Noise reduction*, que es la que se desea aplicar y se escoge una intensidad.

En ambos casos se aplica la reducción con una intensidad del 50%, para mantener controlado el número de puntos que se eliminan. En la Figura 34 se puede ver que, con la misma intensidad de filtrado, el porcentaje de puntos eliminado en la nube procedente del ScanStation P40 es mayor, por lo que se deduce que ésta contiene más ruido.

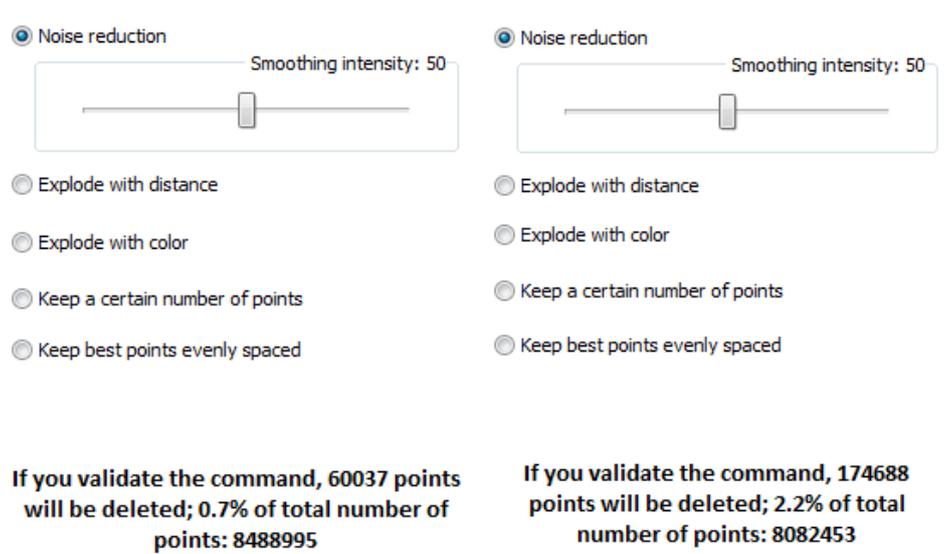


Figura 34: Parámetros de *Noise Reduction* para ScanStation 2 (izquierda) y ScanStation P40 (derecha)

Con este proceso se han eliminado puntos sobrantes, lo que facilita, en principio, la tarea del mallado y las que le siguen.

4.4. Reconstrucción de la superficie

Para este proceso, se continúa trabajando con el 3DReshaper. Primeramente se procede al mallado de la superficie, preparada en etapas anteriores para ello. Cuando éste se finalice, en algunas zonas con baja densidad de puntos pueden encontrarse huecos sin llenar. 3DReshaper cuenta con una herramienta para rellenarlos, proporcionando así un resultado más continuo y semejante a la realidad. Finalmente, se realiza un suavizado de la superficie obtenida, para terminar de pulirla. Este trabajo se tiene que repetir con los datos de los dos escáneres utilizados.

4.4.1. Mallado

3DReshaper está dotado de herramientas para generar una malla a partir de una nube de puntos, y con múltiples herramientas complementarias. Se presentan a continuación los resultados obtenidos con la herramienta *3DMesh* para las nubes de puntos obtenidas de los diferentes escáneres.

ScanStation 2

El *software* ofrece dos opciones diferentes para realizar el mallado de una nube de puntos: en uno o en dos pasos. Pese a que los manuales de uso recomiendan utilizar la segunda cuando se trabaja con una nube compleja y/o ruidosa, se han probado ambas para comparar los resultados de los dos métodos.

En la Figura 35 se muestra el mallado realizado en un solo paso. En este caso, no puede configurarse ningún parámetro, ya que 3DReshaper completa la información necesaria en base a un estudio que realiza de la nube.

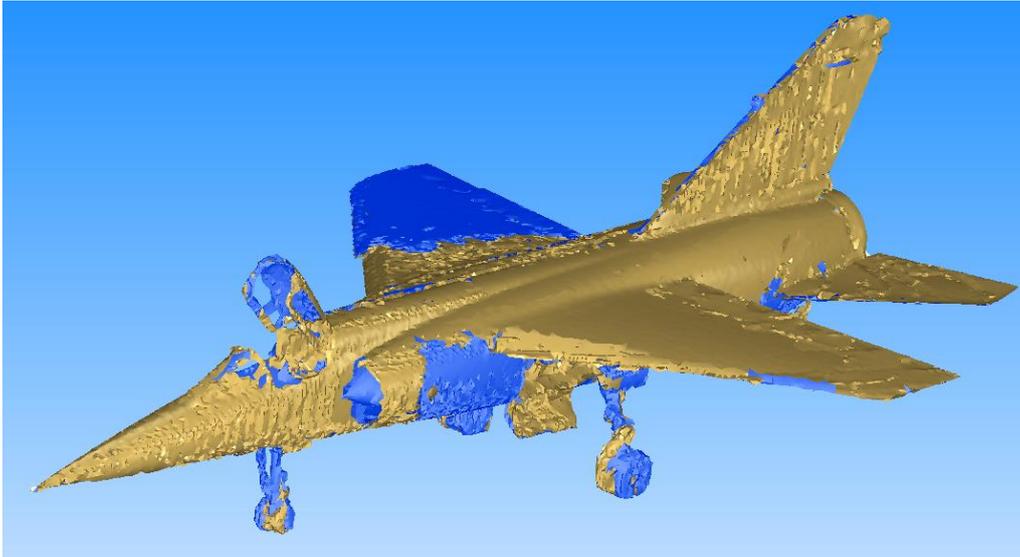


Figura 35: Mollado en un paso (ScanStation 2)

Se tiene una malla con mucho ruido, que ha generado muchas superficies donde no debería haberlas, especialmente mala en la zona del morro y del estabilizador vertical. Por ello, se pasa a comprobar si es posible obtener mejores resultados utilizando el mado en dos pasos, que es el recomendado por 3DReshaper. El primero de los dos pasos es la determinación del tamaño de triángulo que conformará la malla. Nuevamente, no se debe configurar nada aquí, el programa rellena automáticamente la información que necesita.

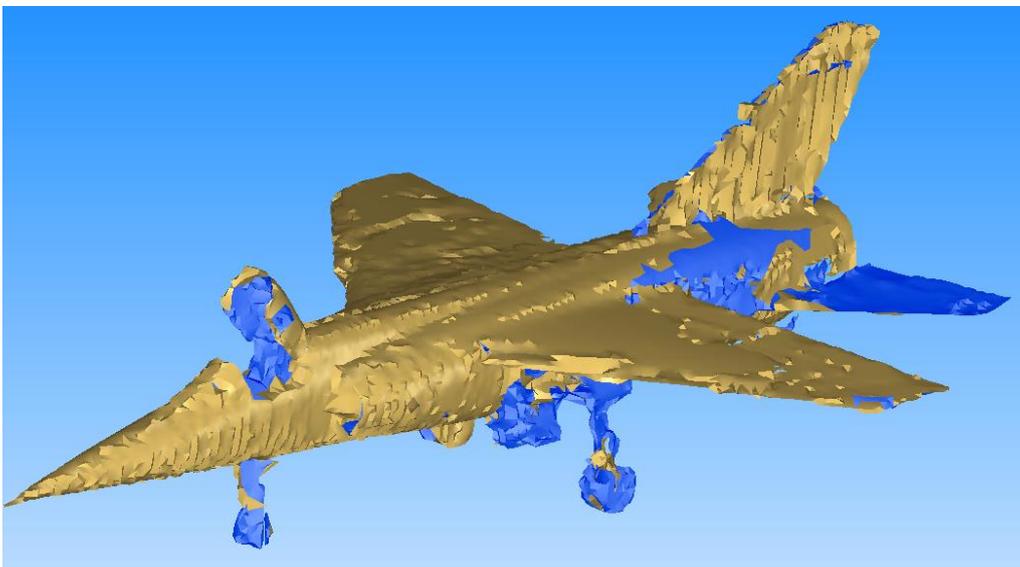


Figura 36: Mollado en dos pasos. Paso 1/2 (ScanStation 2)

Tras este primer paso, se genera una malla irregular, un poco mejor que la obtenida con el mado en un paso, pero que dista mucho de aproximarse a la realidad.

En el segundo paso se establece el error de discriminación y el número máximo de triángulos que conformarán la malla. También es posible configurar un tamaño específico de triángulo para las zonas de mayor detalle. A diferencia de los pasos anteriores, estos tres parámetros sí han de ser escogidos por el usuario. Se han variado estos tres parámetros para

observar la influencia de cada uno de ellos en el resultado final, y se ha observado que apenas hay discrepancias entre ellos. El más influyente –aunque poco- es el número de triángulos de la malla, y este parámetro está limitado por la capacidad del ordenador. Finalmente, imponiendo un error de 0.01, 5 millones de triángulos como máximo, y un tamaño mínimo de 0.1, se obtiene el mallado mostrado en la Figura 37. La superficie es ahora más suave y uniforme, aunque sigue presentando imperfecciones, especialmente en la zona del estabilizador vertical y algunas en las alas.

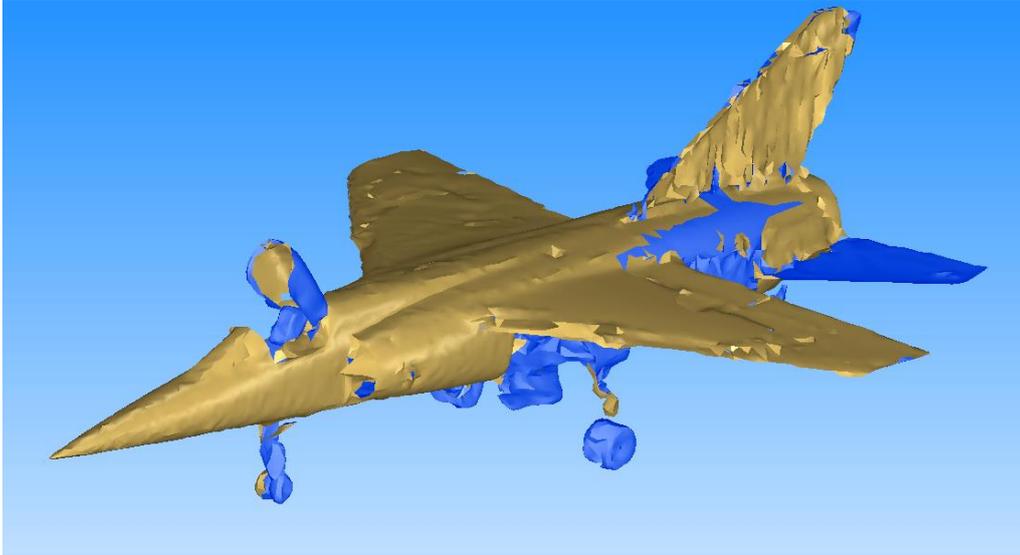


Figura 37: Mallado en dos pasos. Paso 2/2 (ScanStation 2)

ScanStation P40

En cuanto al mallado, puesto que ya se ha comprobado que el de dos pasos proporciona mejores resultados que en uno, se aplica directamente este.

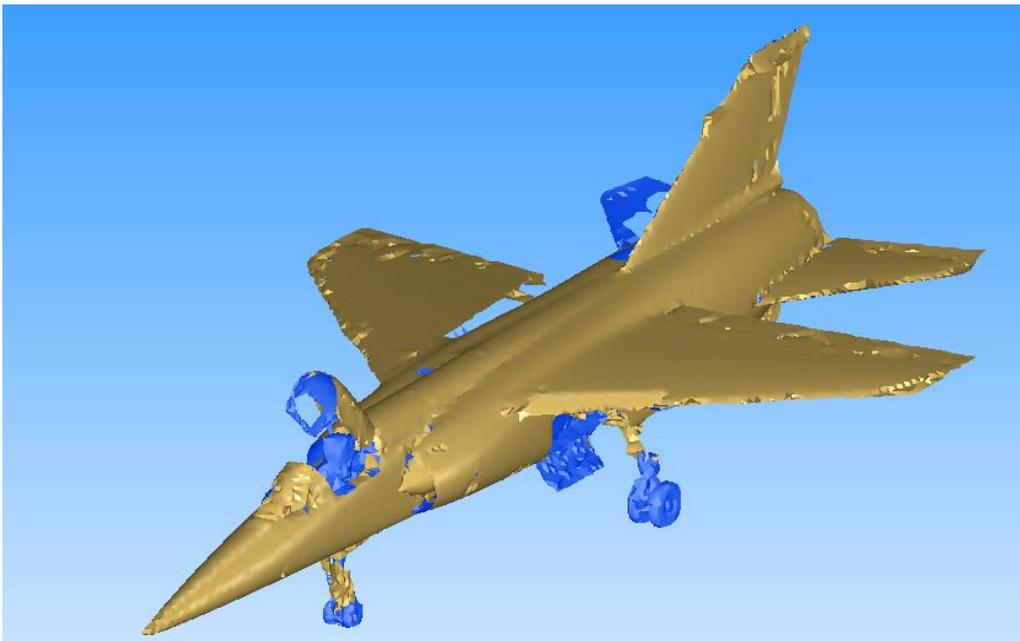


Figura 38: Mallado en dos pasos. Paso 1/2 (ScanStation P40)

La Figura 38 muestra el resultado al finalizar el primer paso de los dos que componen el mallado. Se puede ver que, con un solo paso, tiene más calidad que el realizado para el ScanStation 2 ya con los dos pasos. Esto se debe a que la nube de puntos originaria es mejor, hay menos dispersión y una mayor consistencia, lo que facilita el mallado. Sin embargo, hay zonas grandes que no se han podido mallar, debido a la falta de información. El lateral derecho no se escaneó apropiadamente y en consecuencia faltan puntos en el estabilizador horizontal y también en el encastre del ala.

A continuación, se realiza el segundo paso del mallado, obteniendo lo mostrado en la Figura 39. Para poder compararlos se han utilizado los mismos valores de error, número de triángulos y tamaño mínimo que en el caso del ScanStation 2.

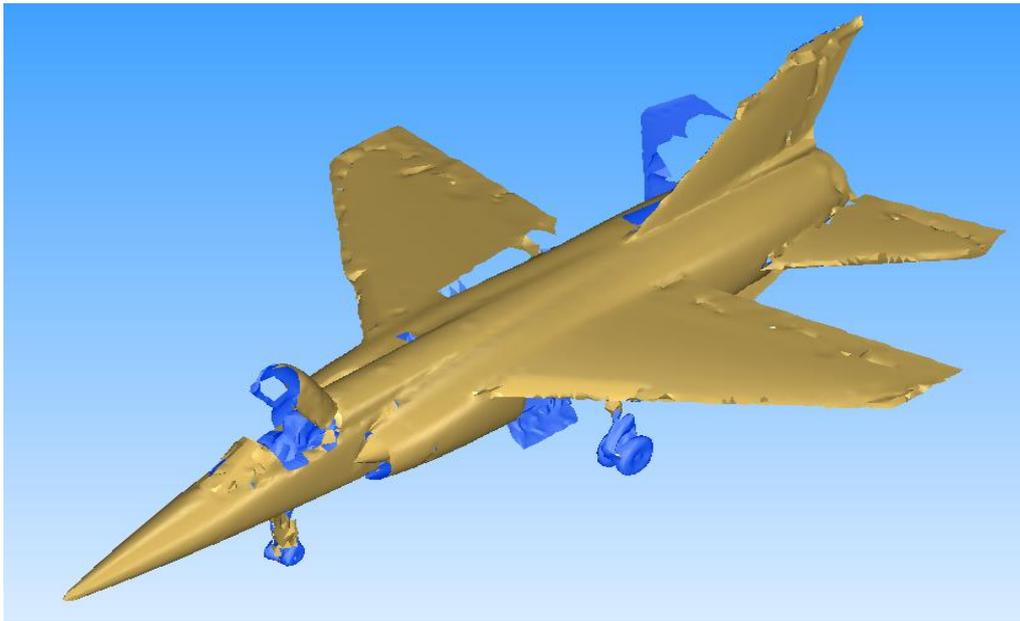


Figura 39: Mallado en dos pasos. Paso 2/2 (ScanStation P40)

El mallado obtenido es considerablemente mejor en general, aunque existe un mayor número de zonas que no se han podido mallar a causa de la falta de puntos. A modo de ejemplo, se puede comparar el mallado de una zona del avión con detalles pequeños: el tren de aterrizaje.

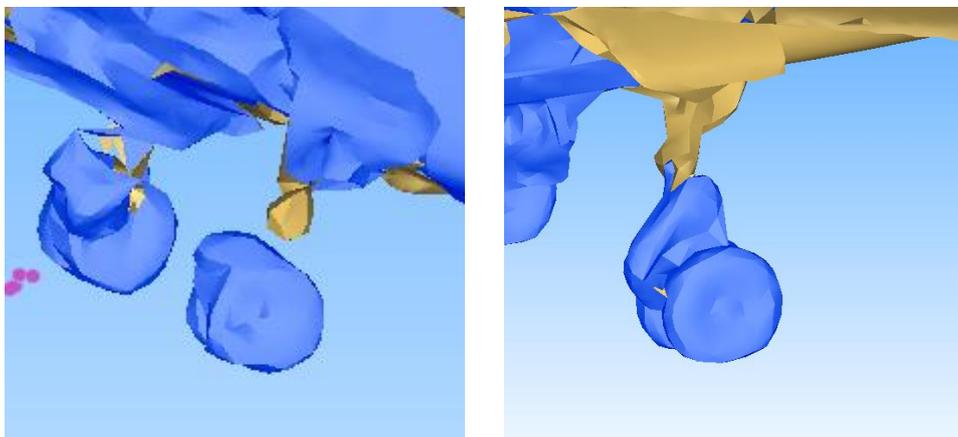


Figura 40: Tren de aterrizaje con ScanStation 2 (izquierda) y con ScanStation P40 (derecha)

Las diferencias son evidentes: el mallado del ScanStation 2 es más tosco, y la pata ni tan siquiera está completa. Sin embargo, la pata del avión escaneado con el ScanStation P40 está completa, se diferencia la estructura mucho mejor y la rueda tiene mucho más detalle, incluso se percibe una depresión en el centro de la misma.

La misma tendencia se da en el resto de la aeronave, el ScanStation P40 es capaz de captar más detalles y hacerlo con más precisión que el ScanStation 2, lo cual entra dentro de lo esperable dado que este escáner es mucho más moderno. Sin embargo, como se ha expuesto previamente, los emplazamientos del ScanStation P40 no fueron los adecuados para escanear la totalidad de la aeronave, y hay varias zonas grandes donde, dada la escasa densidad de puntos, no se ha podido realizar el mallado.

4.4.2. Rellenado de huecos

En el modelo 3D que se ha mallado se pueden encontrar algunas zonas donde debido a la baja o nula densidad de puntos han quedado orificios sin cubrir. 3DReshaper cuenta con algunas herramientas que permiten corregir estas imperfecciones, intentando alcanzar finalmente una superficie continua, sin huecos, compacta. Dos de las herramientas con las que se puede trabajar sobre estos defectos son *Rellenar orificios* y *Puentes*.

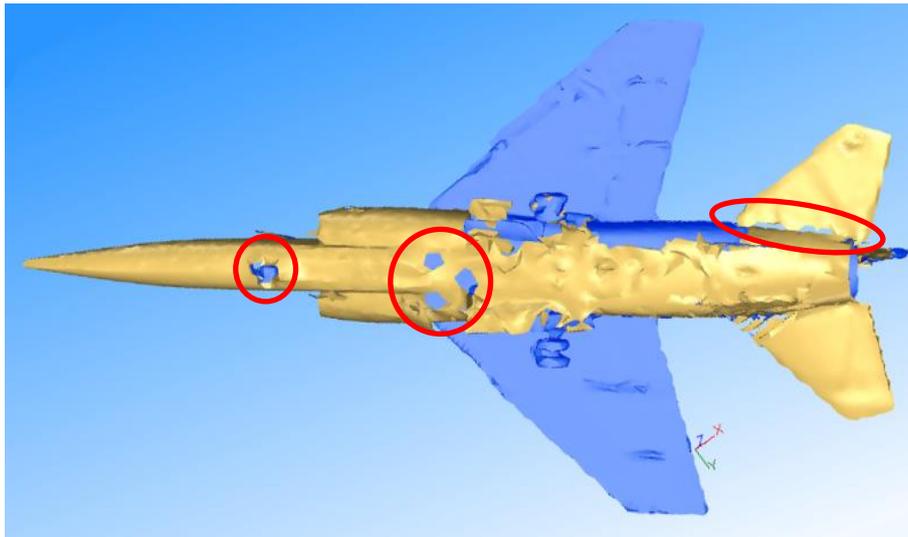


Figura 41: Ejemplos de huecos en escaneado con ScanStation 2

La herramienta *Rellenar orificios* es de utilidad para eliminar huecos pequeños que hayan quedado dispersos en la malla, buscando la continuidad de la misma. Sin embargo, en ciertas zonas el uso de esta herramienta puede ser problemático, pues no es capaz de diferenciar orificios entre distintas capas de la malla, sino que solo diferencia huecos pequeños en superficies bien delimitadas. Además, esta herramienta rellena el hueco con planos, de modo que no es recomendable utilizarla para cubrir huecos en superficies curvas o alabeadas.

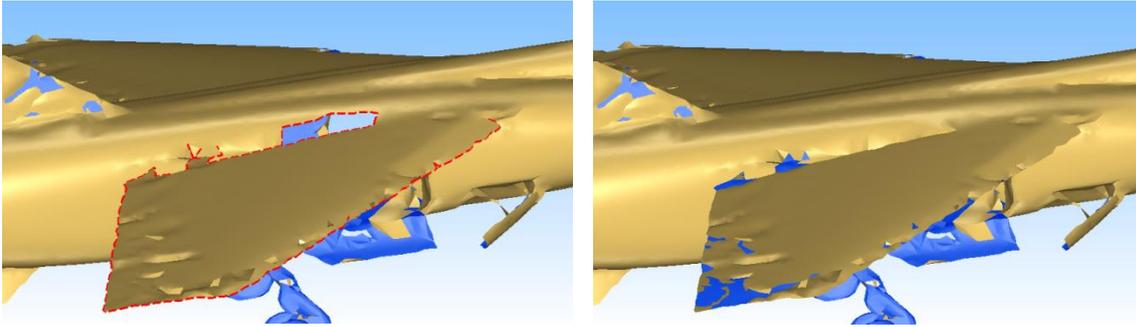


Figura 42: Ejemplo de aplicación de la herramienta *Rellenar orificios* en ScanStation P40

Otra opción es utilizar una herramienta complementaria a la anterior: *Puentes*. La utilidad de esta herramienta se encuentra cuando los huecos a rellenar son demasiado grandes. El proceso a seguir para la elaboración de un puente consiste en crear superficies entre distintos contornos de la malla, que se rellenan individualmente más tarde. Con esta herramienta sí es posible reconstruir superficies curvas.

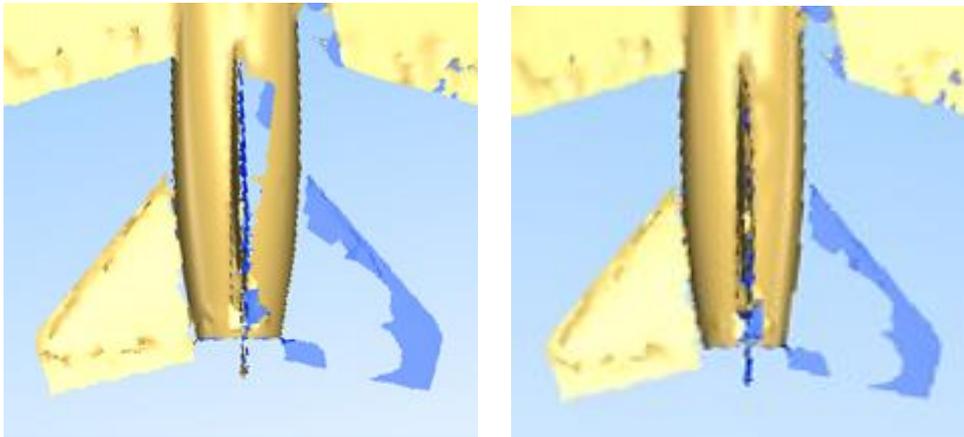


Figura 43: Ejemplo de aplicación de la herramienta *Puentes* en ScanStation P40

Combinando el uso de estas dos herramientas, se trabaja para eliminar todos los huecos posibles. Pese a ello, no es posible arreglar todas las imperfecciones, hay limitaciones. En las zonas donde faltan demasiados puntos, como el estabilizador y el encastre del ala (ambos del ScanStation P40) el programa no es capaz de reconstruir la superficie, hay muy poco contorno y mucho hueco, y no tendría sentido generar una malla aquí, pues sería completamente “inventada” por el programa.

De este modo, se rellenan tantos huecos como sea posible, pero aun así siguen quedando zonas sin rellenar. En estas circunstancias, la única manera de rellenar unos huecos de ese tamaño sería regresar al laboratorio y realizar más escaneos, centrándose en esa zona, para posteriormente añadirlos a la nube de puntos y volver a mallar. No obstante, en el caso del ScanStation P40 esto no fue posible, dado que este equipo se alquiló y estuvo disponible solo durante una mañana.

4.4.3. Suavizado de la superficie

El último paso para la obtención del modelo tridimensional es el suavizado de la malla que se ha obtenido hasta ahora. Para ello, 3DReshaper cuenta con la herramienta *Suavizar*, con la cual se trabaja para pulir defectos e irregularidades en la malla. Tras abrir la herramienta, hay que seleccionar la intensidad del suavizado, y de ella dependerá el resultado final. Si el suavizado es muy ligero, apenas se notarán los resultados, pero si es demasiado fuerte, eliminará muchos detalles del objeto, lo que tampoco es conveniente.

Seguidamente se muestra el efecto que tienen los diferentes grados de suavizado, ordenados crecientemente de izquierda a derecha y de arriba abajo. En la esquina superior izquierda de cada figura aparece indicado el grado.

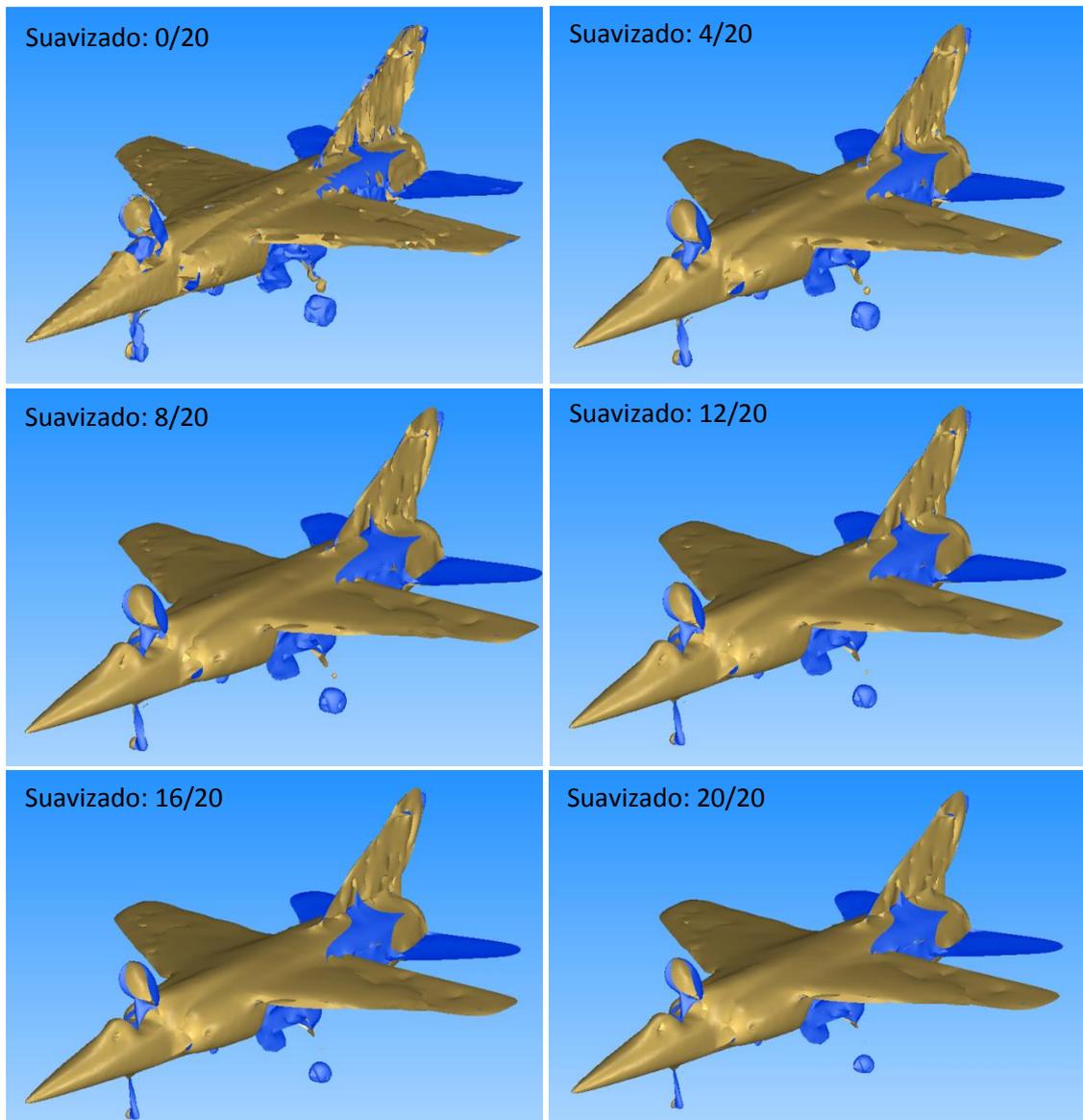


Figura 44 : Efecto del suavizado en modelo de ScanStation 2

Por comparación con la primera figura, se observa que en zonas como las alas o el estabilizador vertical el efecto del suavizado es positivo, y también deja una superficie

uniforme en el cono del morro. Sin embargo, a medida que se aumenta, comienzan a desaparecer los detalles de la geometría. Las puntas de las alas y los estabilizadores, que son rectas, comienzan a aparecer como curvas, y la forma de la parte superior cada vez es más diferente de la realidad. Nótese además el efecto en el tren de aterrizaje: el trasero se reduce hasta casi desaparecer por completo, y el delantero queda reducido a un tamaño ilógico. Así pues, se deduce que no es bueno aplicar un alto grado de suavizado si no se desea perder la geometría original. Finalmente, a ambos modelos se les aplica una intensidad de suavizado de 3, logrando una superficie más uniforme pero sin sacrificar demasiados detalles.

Tras el proceso de suavizado, el modelo está finalizado, listo para exportar a otros formatos y trabajar en lo que se desee con él, o para realizar las medidas oportunas. La reconstrucción final se muestra en el próximo apartado.

5. Resultados y análisis

En los apartados 3 y 4 ya se han llevado a cabo el levantamiento y los procesos de limpieza y tratamiento de los datos. Con esto, ya se tiene el modelo 3D del avión obtenido con ambos sistemas escáner. A continuación se procederá a mostrar los resultados finales y posteriormente a analizarlos, estudiando la precisión de ambos equipos por comparación de los escaneos con las medidas del Mirage F1. Ambos equipos también difieren mucho en cuanto al tiempo de trabajo que requieren para obtener el mismo escaneo, por lo que se va a realizar otro estudio comparativo desde este segundo punto de vista.

5.1. Resultado del levantamiento 3D

Escáner ScanStation 2

Se muestra a continuación una serie de imágenes que ilustran el resultado final del levantamiento con ScanStation 2 tras el postprocesado.

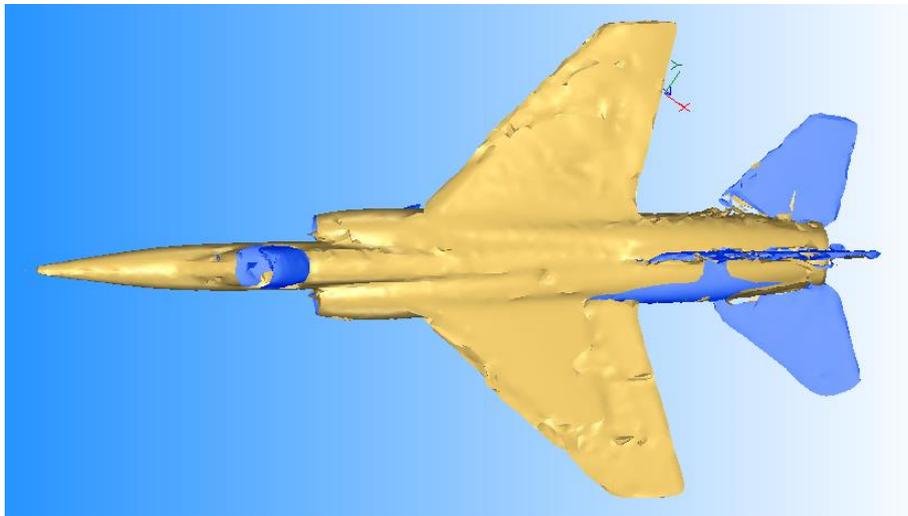


Figura 45: Planta del modelo obtenido con ScanStation 2

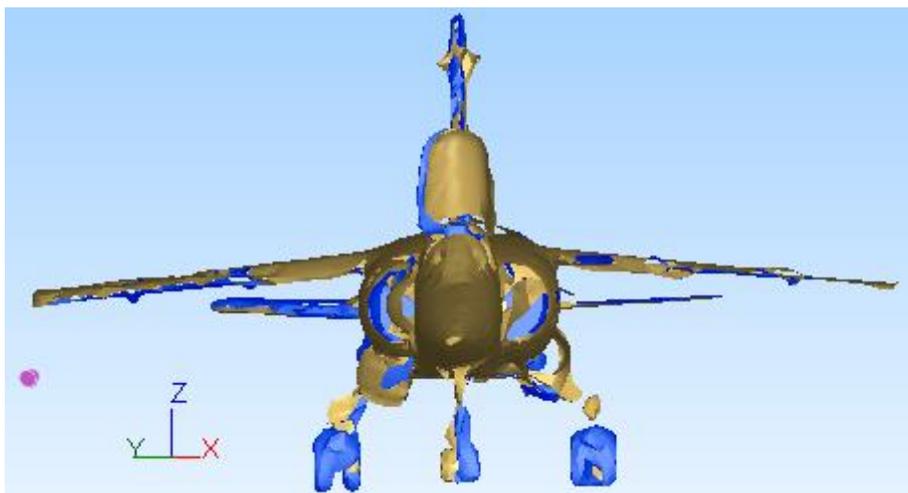


Figura 46: Alzado del modelo obtenido con ScanStation 2. Vista delantera

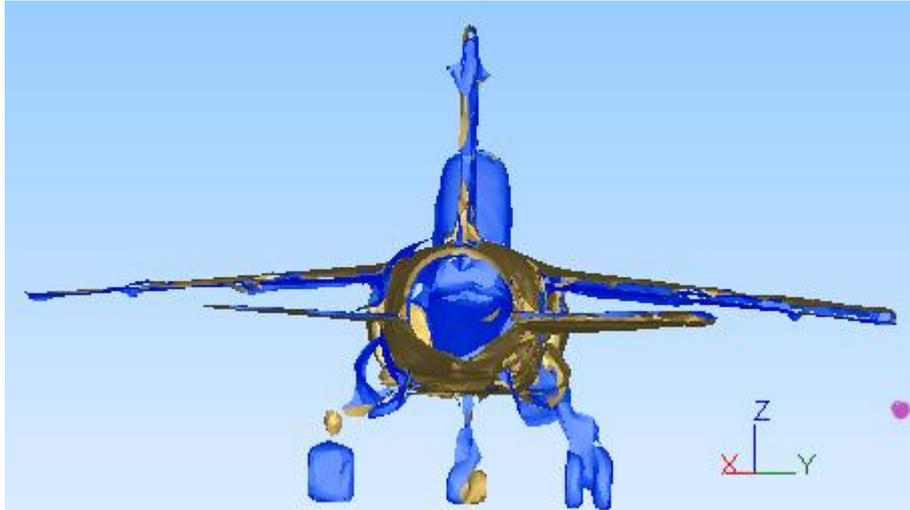


Figura 47: Alzado del modelo obtenido con ScanStation 2. Vista trasera

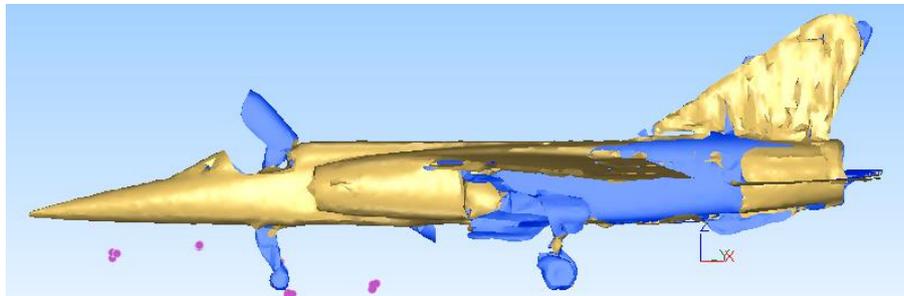


Figura 48: Perfil del modelo obtenido con ScanStation 2

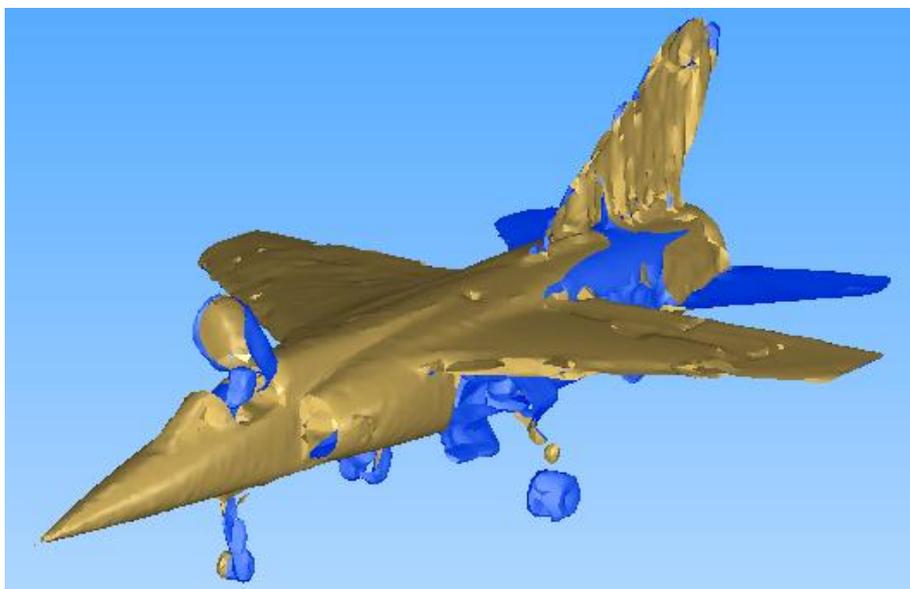


Figura 49: Vista tridimensional del modelo obtenido con ScanStation 2

Escáner ScanStation P40

Se muestra a continuación una serie de imágenes que ilustran el resultado final del levantamiento con ScanStation P40 tras el postprocesado.

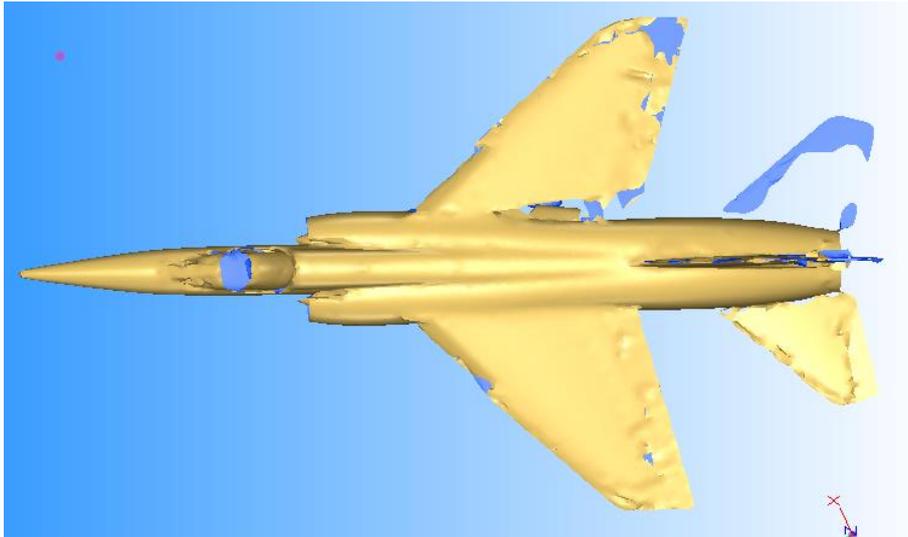


Figura 50: Planta del modelo obtenido con ScanStation P40

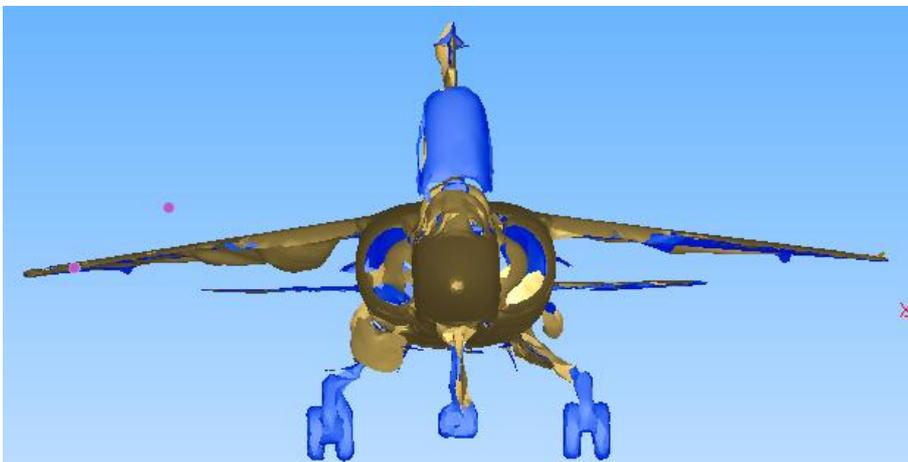


Figura 51: Alzado del modelo obtenido con ScanStation P40. Vista delantera.

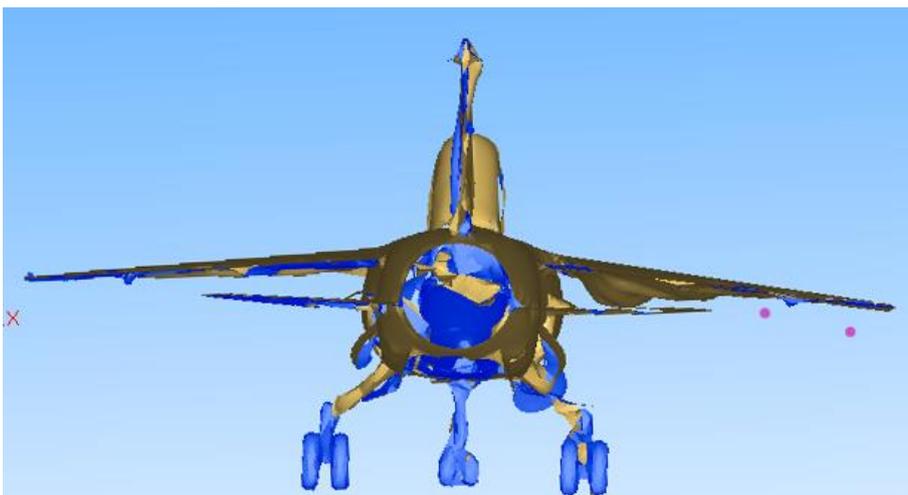


Figura 52: Alzado del modelo obtenido con ScanStation P40. Vista trasera.

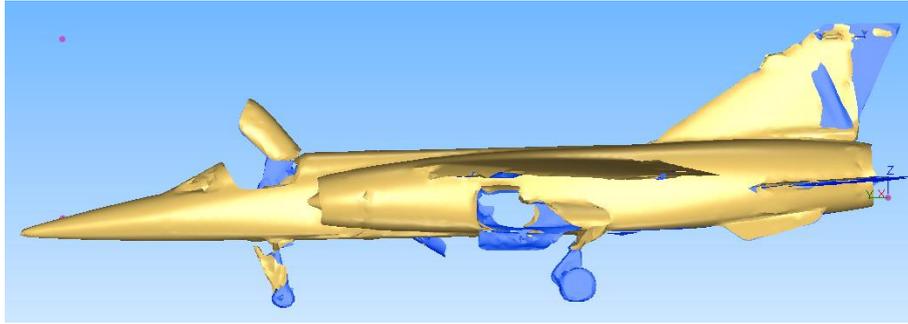


Figura 53: Perfil del modelo obtenido con ScanStation P40

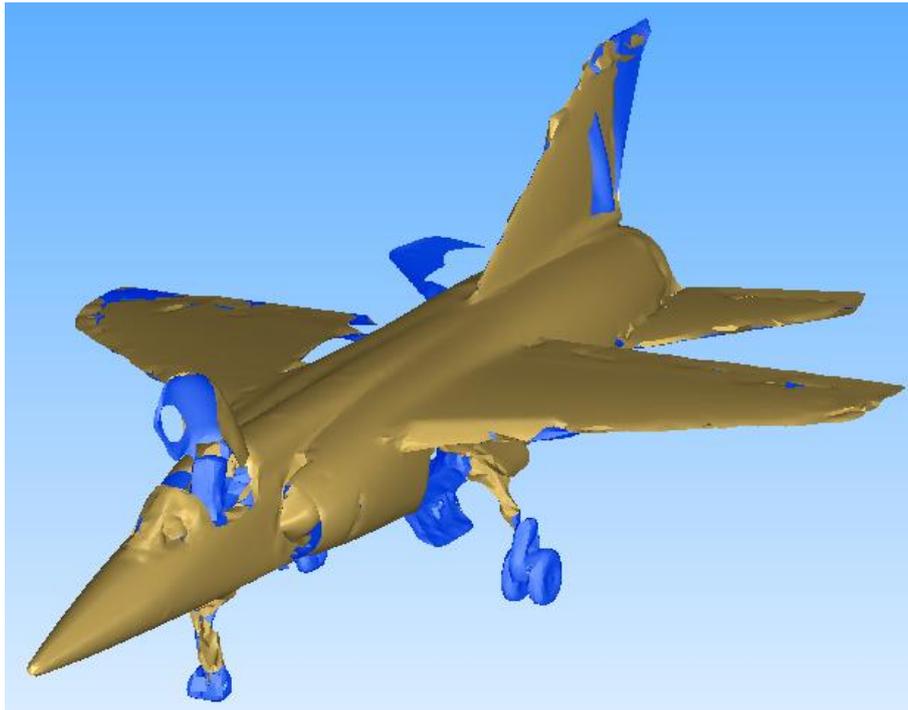


Figura 54: Vista tridimensional del modelo obtenido con ScanStation P40

5.2. Comparación de prestaciones

Se procede a continuación a realizar un estudio comparativo de ambos sistemas de escáner en cuanto a prestaciones. Para evaluar la precisión de cada sistema, se toman una serie de medidas en parámetros geométricos característicos de la aeronave y se comparan con las medidas reales de la misma. Para ello, se puede emplear cualquiera de los dos programas ya mencionados anteriormente; tanto Cyclone como 3DReshaper ofrecen funcionalidades para medir distancias entre puntos.

Se han tomado un total de 45 medidas diferentes en la geometría del avión, de las cuales se ha extraído el siguiente histograma mostrando a continuación, donde se puede observar el error relativo cometido en cada medida.

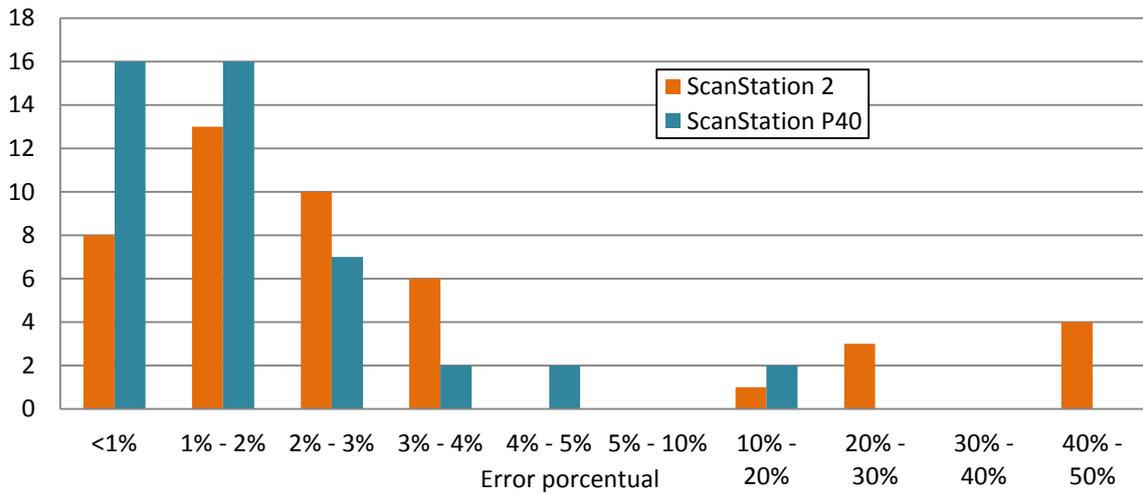


Figura 55: Histograma del error relativo

En este histograma se observa como tendencia global que el ScanStation P40 ofrece, en general, errores menores que el ScanStation 2. Aun así, en ambos casos la mayoría de errores están situados entre el 0 y el 3%, lo que indica que realmente ambos son instrumentos de medida bastante precisos. Cuando se encuentran errores más grandes, lo que ocurre es que el error absoluto es del mismo orden de magnitud que los demás, pero está adimensionalizado con la distancia real que se está midiendo. Por tanto, un error del mismo orden de magnitud entre una distancia más pequeña, termina por dar un error relativo mayor. En ambos casos los errores relativos grandes están relacionados con las medidas de las ruedas del tren de aterrizaje.

6. Conclusiones

De este proyecto se han extraído diversas conclusiones, enumeradas a continuación, tanto del estudio de los resultados como a lo largo del propio proceso de tratamiento de los datos.

- Del análisis realizado acerca de la precisión, se deduce que el láser escáner es una herramienta muy válida para el dimensionado de piezas, ya que el margen de error es muy pequeño en relación a las medidas reales. Dentro de esta precisión, se ha constatado que el ScanStation P40 realiza unas medidas de mayor calidad que el ScanStation 2, algo esperado por otra parte, si se tiene en cuenta que es más moderno. No obstante, las diferencias no son tan grandes como establecen a priori los documentos técnicos del fabricante. Sí se perciben diferencias significativas en cuanto al ruido, mucho mayor en el equipo más antiguo.
- Si bien en la precisión existe una diferencia entre ambos equipos, pero es relativamente pequeña, donde sí se observa el gran progreso de esta tecnología es en el tiempo de escaneado. Aun con el doble de resolución, un escaneo con el ScanStation P40 lleva aproximadamente 10 veces menos tiempo que con el ScanStation 2 (de 30 a 3 minutos por escaneo), lo que se corresponde con las especificaciones en cuanto a velocidad dadas por el fabricante, que establece que el escáner más moderno es capaz de escanear 20 veces más rápido. Además, se reduce también el tiempo de procesado de la información, ya que el ScanStation P40 lleva a cabo autónomamente el proceso de registro y georreferenciación, mientras que con el ScanStation 2 es necesario dedicarle una cantidad de horas.
- En el caso del ScanStation 2, los escaneos no se realizaron desde las posiciones óptimas, dado que no se hizo una planificación adecuada para la ocasión y las características del equipo. Por otra parte, respecto al ScanStation P40, solo se dispuso de él durante una mañana (el equipo era alquilado) y por ello tampoco se tomaron todos los escaneos necesarios. En consecuencia, en ambos han aparecido zonas con sombras, o donde la densidad de puntos no es suficientemente elevada, y por ello no se ha podido mallar correctamente. De esto se desprende la necesidad real de realizar una buena planificación de estacionamientos cuando se va a llevar a cabo un levantamiento con láser escáner.
- En síntesis, se puede concluir que se han logrado los objetivos propuestos: se han obtenido dos modelos del Mirage F1, exportables a programas de tratamiento de CAD si se desea, y se han podido comparar las prestaciones de los dos equipos utilizados.

7. Bibliografía

- Priego, Enrique. *Topografía, instrumentación y observaciones topográficas* (2015). Editorial Universitat Politècnica de València.
- 3D RiskMapping. *Teoría y práctica del escaneado láser terrestre* (2008)
- García Roldán, Rodrigo; Lerma García, José Luis. *Curso de formación de Láser Escáner Terrestre*. Leica Geosystems.
- Dassault Aviation, página web: <http://www.dassault-aviation.com>
- Leica Geosystems, página web: <http://leica-geosystems.com/products>
- Manuales de uso de ScanStation 2 y ScanStation P40, de Leica Geosystems.
- Military Aircraft forum

8. Presupuesto

Instrumentación			
Concepto	Coste unitario	Unidades	Coste total
Escáner ScanStation 2	300 €/día	10 días	3000€
Escáner ScanStation P40	750 €/día	1 día	750€
Estación de trabajo HP	Incluido en ScanStation 2	1	-
TOTAL INSTRUMENTACIÓN (sin IVA)			3750 €
Licencias de Software			
Concepto	Coste unitario	Unidades	Coste total
Cyclone	9000 €	1 licencia	9000 €
3DReshaper	3000 €	1 licencia	3000 €
TOTAL LICENCIAS SOFTWARE (sin IVA)			12000 €
Equipo humano			
Concepto	Coste unitario	Unidades	Coste total
BSc Engineer	20 €/hora	120 horas	2400 €
Profesor	35 €/hora	40 horas	1400 €
Técnico Leica	30 €/hora	6 horas	180 €
TOTAL EQUIPO HUMANO (sin IVA)			3980 €
Totales			
Concepto	Coste unitario	Unidades	Coste total
Total Instrumentación	3750 €	1	3750 €
Total Licencias Software	12000 €	1	12000 €
Total Equipo humano	3980 €	1	3980 €
TOTAL SIN IVA			19730 €
TOTAL CON IVA			23873.3 €

Tabla 3: Presupuesto

