



UNIVERSITAT
POLITÈCNICA
DE VALÈNCIA



Escuela Técnica Superior de Ingeniería del Diseño

UNIVERSITAT POLITÈCNICA DE VALÈNCIA

Escuela Técnica Superior de Ingeniería del Diseño

**MODELIZACIÓN 3D DE UN MOTOR
AERONÁUTICO.**

TRABAJO FINAL DEL

Grado en Ingeniería Aeroespacial

REALIZADO POR

Rech Belmonte, Beatriz

TUTORIZADO POR

Priego de los Santos, Jose Enrique

***FECHA:* Valencia, junio, 2019**

A mi tutor Enrique Priego, por su ayuda durante la realización de este trabajo.

*A mis padres, mis hermanos, tios y primos, por todo su apoyo durante todos estos años.
Especialmente a mi madre y mi tia, Iluminada y Santi, por ser las que más quejas y problemas han escuchado, dándome ánimos y consejos cuando más los necesitaba.*

A mi amiga, apoyo moral y defensora del correcto uso de las comas, María Cascales, por su visión filológica a la hora de redactar este TFG.

Por todo lo que me han enseñado y por aportarme tantas visiones distintas de la vida y de la ingeniería, a mis compañeros y amigos judokas.

A mis amigos, a los que conozco desde primero y los que llegaron después, por esos domingos en la biblioteca, esas sobremesas interminables, por aportarme y apoyarme tanto durante estos años.

Gracias por todo.

Índice

Tabla de figuras	4
1.Introducción	6
2.Levantamiento industrial	7
2.1.Sistema láser escáner.....	7
Principio láser escáner.....	8
Trimble TX6.....	10
2.2.Metodología de medición	13
S.N.E.C.M.A Atar 09C.....	13
Levantamiento industrial.....	14
2.3.Procesado de datos.....	18
Registro.....	19
Limpieza de la nube de puntos.....	30
3.Modelización 3D.....	38
4.Resultados	41
5.Presupuesto.....	46
6.Conclusiones.....	48
Bibliografía.....	49

Tabla de figuras

Figura 1: Funcionamiento de medición por TOF.....	8
Figura 2: Principio de medición por diferencia de fase.....	9
Figura 3: Leica ScanStation 2.....	10
Figura 4: Trimble TX6.....	10
Figura 5: Pantalla del Trimble TX6.....	12
Figura 6: Nivelación del Trimble TX6.....	12
Figura 7: Partes del Trimble TX6.....	13
Figura 8: Compresor del Atar 09C.....	14
Figura 9: APU del Atar 09C.....	14
Figura 10: Plano de estacionamientos.....	15
Figura 11: Dianas.....	15
Figura 12: Núcleo del motor Atar 09C.....	16
Figura 13: Estacionamiento E7.....	17
Figura 14: Estacionamiento E24.....	17
Figura 15: Post-combustor del Atar 09C.....	18
Figura 16: Apertura del Registro.....	20
Figura 17: Error de alineamiento.....	21
Figura 18: Toma de puntos.....	22
Figura 19: Resultados de la unión.....	22
Figura 20: Histograma de errores en escala lineal.....	23
Figura 21: Resultados internos de la unión de los estacionamientos E3 y E4.....	23
Figura 22: Resultados de la Fase 1.....	24
Figura 23: Uniones de la Fase 1.....	25
Figura 24: Resultado de la Fase 2.....	25
Figura 25: Uniones de la Fase 2.....	25
Figura 26: Uniones de la Fase 3.....	26
Figura 27: Resultado de la Fase 4.....	26
Figura 28: Uniones de la fase 4.....	26
Figura 29: Resultado de la Fase 5.....	27
Figura 30: Uniones de la fase 5.....	27
Figura 31: Resultado de la fase 6.....	27
Figura 32: Uniones de la fase 6.....	28
Figura 33: Uniones de la fase 7.....	28
Figura 34: Unión de los estacionamientos E27 y E28.....	28
Figura 35: Resultado de la fase 8.....	29
Figura 36: Uniones del proceso de registro.....	29
Figura 37: Resultado del proceso de registro.....	30
Figura 38: Nube de puntos bruta.....	31
Figura 39: Planta del edificio 8P.....	31
Figura 40: Limpieza del hall.....	32
Figura 41: Limpieza de las proximidades del turbojet.....	32
Figura 42: Nube de puntos con turbojet y soportes.....	33
Figura 43: Nube de puntos del núcleo.....	33
Figura 44: Nube de puntos del post-combustor.....	34

Figura 45: Post-combustor inicial en 3DReshaper.	34
Figura 46: Detalle de la entrada del post-combustor.	35
Figura 47: Resultados de la herramienta "ruido".	35
Figura 48: Resultado de la limpieza de la entrada al post-combustor.	36
Figura 49: Relejos a la entrada del compresor.	36
Figura 50: Detalle de la entrada al compresor.	37
Figura 51: Creación de malla en 3DReshaper.	38
Figura 52: Mallado del post-combustor.	39
Figura 53: Proceso de mallado del APU.	39
Figura 54: Mallado del núcleo.	40
Figura 55: Resultado final de la nube de puntos del núcleo.	41
Figura 56: Resultado final de la nube de puntos del post-combustor.	41
Figura 57: Álabes del compresor.	42
Figura 58: Etapa 5 del compresor antes y después de la limpieza.	42
Figura 59: Detalle del interior del post-combustor.	43
Figura 60: Álabes usados en el mallado del 4º escalonamiento del compresor.	43
Figura 61: Mallado de un álabe de compresor.	44
Figura 62: Detalle del mallado del post-combustor.	44
Figura 63: Mallado del núcleo.	45
Tabla 1: Propiedades del Trimble TX6.	11
Tabla 2: Presupuesto del suelo del Ingeniero encargado del proyecto.	46
Tabla 3: Presupuesto de costes de la toma de datos.	46
Tabla 4: Presupuesto de costes del post-procesado.	46
Tabla 5: Presupuesto total del proyecto.	47

1. Introducción

La finalidad de este trabajo fin de grado es la obtención del título académico de Grado en Ingeniería Aeroespacial de la Escuela Técnica Superior de Ingeniería del Diseño (ETSID), en la Universidad Politécnica de Valencia.

El principal objetivo de este Trabajo Fin de Grado es la descripción y aplicación de un sistema de medición láser para escaneados tridimensionales, técnica en pleno crecimiento cuyas aplicaciones principales en la ingeniería aeroespacial pueden ser importantes. Para demostrar esto, se ha realizado un levantamiento industrial de un motor, concretamente el modelo turbojet atar 09C, fabricado por la compañía francesa S.N.E.C.M.A, estando ubicado este modelo en el Laboratorio de Investigación en Plantas Propulsivas de los Sistemas de Transporte, edificio 8P de la UPV.

El objetivo final del trabajo es obtener un modelo en tres dimensiones de la compleja y detallada geometría de este motor. Este modelo fue fabricado durante los años 50 y propulsó, entre otros, el caza Dassault Mirage III. De esta forma, se obtiene toda la geometría del mismo en formato digital y de manera integral.

Los sistemas láser escáner son equipos capaces de determinar la forma geométrica de un entorno u objeto mediante la captura de una extensa nube de puntos, dotada de un gran realismo por la capacidad de aplicar colores y texturas. Esto hace que sea un proceso muy visual y más sencillo, además de preciso, que otros sistemas utilizados tradicionalmente.

La información del presente documento incluye la descripción de la instrumentación topográfica utilizada, que consiste en la tecnología láser escáner, y la metodología de observación llevada a cabo, desde la posición de los estacionamientos, el nivel del escaneado o densidad de puntos. A continuación se describe el procesado de los datos que consiste en la unión o registro de las nubes de puntos de los distintos estacionamientos, así como la manipulación y limpieza de la nube de puntos resultante del registro hasta obtener exclusivamente el modelo de la aeronave.

Tras la obtención de la nube de puntos que define la geometría del elemento que se quiere estudiar, se han utilizado distintos programas informáticos para tratar y modelizar dichos datos, siendo el objetivo obtener un modelo tridimensional a partir del cual poder trabajar.

La modelización 3D consiste en convertir la nube de puntos que conforma el motor en una malla o triangulación de las nubes de puntos. No obstante, como las superficies de dicho motor son muy complejas, hay ciertas zonas en las que el láser escáner no captura la información necesaria y es preciso editar ciertas regiones con elevada rugosidad. Finalizado el proceso, se redactan las conclusiones a las que se ha llegado tras la realización de este trabajo fin de grado.

2. Levantamiento industrial

2.1. Sistema láser escáner

El láser escáner es un instrumento que, mediante un haz láser, realiza un barrido de una superficie, captando miles de puntos por segundo. El resultado de esta medición es una densa nube de puntos de los que se tienen sus coordenadas tridimensionales (x,y,z). Esto compone en sí un modelo numérico del objeto registrado. (Priego de los Santos 2015)

Así pues, un láser escáner se trata de un instrumento de medida sin prisma que, mediante barridos esféricos (ϕ , λ) de un haz láser, permite la adquisición masiva de datos en un corto periodo de tiempo, dando como resultado una matriz de coordenadas e intensidades que corresponden a cada punto escaneado. Visualmente esta matriz resulta en una nube de puntos de alta densidad que se acerca a la realidad. Con el pertinente post-procesado, estos datos pueden proporcionar las características geométricas del objeto de estudio.

A diferencia de otros métodos que se utilizan en topografía y fotogrametría, el láser escáner no puede captar cambios bruscos de pendiente. Además, se trata de un instrumento de línea de vista. Esto quiere decir que medirá todo lo que esté en su campo visual, pero en las zonas que queden ocultas se formarán zonas de sombra sin datos. Estos dos problemas se pueden solucionar realizando distintos estacionamientos desde diferentes puntos de vista, por lo que el procesado posterior a la medición se hace necesario.

Como ventajas a otras técnicas de medida utilizadas en estos campos, la velocidad de toma de datos de un láser escáner es considerablemente más alta. Además, existe la posibilidad de cambiar el tamaño de la matriz de puntos, pudiendo optar por distintos niveles de detalle según el objeto de estudio. Es interesante también que ofrece la opción de comprobar el resultado de la medición al instante, pudiendo evaluar si esta ha sido satisfactoria in situ.

Muchos de estos aparatos cuentan con una cámara de fotos de alta resolución, lo que permite aplicar a la nube de puntos el color del objeto real. Así pues, cada punto digitalizado se corresponde con un píxel de la foto, y esto confiere a la nube de puntos cierto realismo. Así mismo, al ser un sistema de medición sin contacto no se altera la superficie a medir, por lo que se pueden repetir las mediciones cuantas veces sea necesario sin dañar el objeto de estudio.

Actualmente existe una amplia oferta de láseres escáner en el mercado. Los distintos modelos permiten obtener diversas densidades de las nubes de puntos, cuyos rangos pueden ir desde un metro a varios kilómetros de máximo. Así pues, es fácil poder elegir el aparato que mejor se adecue a la aplicación de estudio.

Además, la flexibilidad de los resultados obtenidos con cada escaneo hace que sea muy sencillo modificarlos y trabajar con ellos. El primer resultado obtenido es un gran volumen de información geométrica del objeto de estudio con la que es fácil realizar visualizaciones tridimensionales desde cualquier punto de vista, efectuar cálculos métricos o editar la nube de puntos añadiendo texturas y creando secciones o cortes. Sirven también como base para modelado 3D o ingeniería inversa.

Esto explica que esta tecnología aún en desarrollo esté siendo utilizada en campos tan diversos como la arquitectura, arqueología, construcción de túneles, reconstrucción de accidentes por la policía o la creación de personajes y fondos en videojuegos y películas.

Principio láser escáner

La tecnología láser escáner hace uso de un haz láser (*Light Amplification by Stimulated Emission of Radiation*) para captar datos. Este haz se caracteriza por ser un haz de luz monocromática, coherente y colimada.

La potencia lumínica del haz, así como su longitud de onda, que puede ir desde el infrarrojo cercano (800-2500 nm) hasta el ultravioleta (15-400nm), depende del fabricante, la función de la aplicación y el rango de aplicación (Riveiro Rodríguez, y otros 2011)

Gracias a este haz láser, los sistemas actuales pueden medir una distancia o rango y dos ángulos, vertical y horizontal. Con estos datos se pueden calcular las coordenadas cartesianas del objeto a medir, aunque el sistema base sea de coordenadas esféricas.

Estas mediciones se realizan mediante sistemas basados en el principio de triangulación, tiempo de vuelo o diferencia de fase. La medición de los ángulos se efectúa mediante codificadores rotatorios de alta precisión que se asocian a cada uno de los sistemas mecatrónicos que controlan el movimiento angular vertical y horizontal. (Riveiro Rodríguez, y otros 2011)

Los escáneres terrestres, como el utilizado en este proyecto, se pueden dividir en dos grupos dependiendo de si su sistema de medición se basa en el tiempo de vuelo (TOF) o en la diferencia de fase.

El principio de medida del tiempo de vuelo se basa en la emisión de un pulso de luz, calculando el tiempo que pasa desde que se emite el pulso hasta que este vuelve después de ser reflejado por el objeto. Al conocer la velocidad de propagación y el tiempo transcurrido entre la emisión y la recepción, se puede calcular con precisión la distancia a la que se encuentra el objeto, siendo esta la mitad del espacio recorrido por el láser. En la Figura 1 se puede observar un pequeño esquema de este principio de medida.

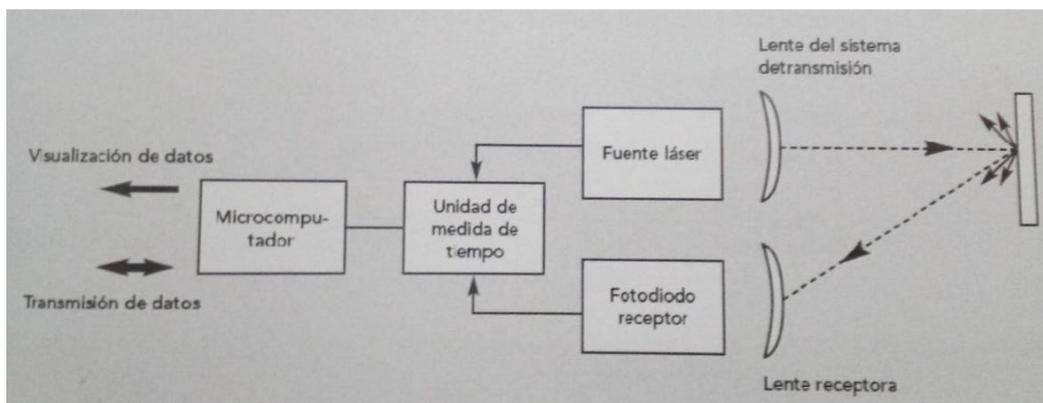


Figura 1: Funcionamiento de medición por TOF.

Estos equipos cuentan con sistemas de espejos rotatorios y servomotores que marcan la trayectoria del haz, tanto en el plano horizontal como en el vertical, lo que permite realizar los barridos esféricos para medir distancias y la intensidad de retorno del haz láser. La frecuencia de trabajo suele estar comprendida entre 2 y 100 MHz, y la velocidad de escaneo es moderada, de hasta 128 kHz. Lo más interesante de estos escáneres es su rango, ya que pueden llegar a tomar datos a 2 Km. (Priego de los Santos 2015)

Este es el sistema que utiliza el escáner Trimble TX6, con el que se ha realizado este trabajo.

La medición en base a la diferencia de fase consiste en modular el haz láser constante emitido y, tras impactar y reflejar con el objeto de estudio, se compara la diferencia de fase entre la onda reflejada y la emitida. Se puede ver un esquema en Figura 2 . La diferencia de fase es 2π veces la distancia a la que se encuentra el objeto por la frecuencia de modulación. Esto conlleva que, con mayores frecuencias de modulación, se tenga una mayor resolución espacial. Estos sistemas tienen una limitación en el alcance, que es el retraso de fase de un ciclo de la onda senoidal.

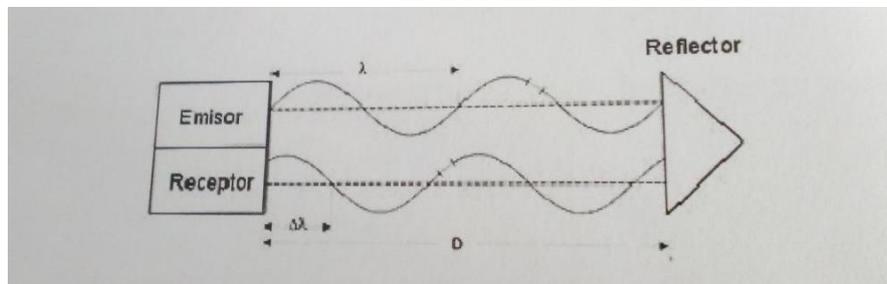


Figura 2: Principio de medición por diferencia de fase.

Para evitar ambigüedades, la medición se puede realizar con varias frecuencias. Así pues, las frecuencias bajas localizan el punto a medir, mientras que las frecuencias mayores miden la distancia con precisión. Generalmente, este tipo de equipos tienen una velocidad de escaneo mayor que los equipos de tiempo de vuelo, hasta de 1.2 MHz. Así mismo la frecuencia de trabajo es muy alta, alrededor de 1000 MHz, sin embargo, el rango no es tan amplio como el del sistema anterior.

El láser escáner Leica ScanStation2, que se puede ver en la Figura 3, utiliza este tipo de medición. Está disponible en el Departamento de Ingeniería Cartográfica, Geodesia y Fotogrametría de la Universidad Politécnica de Valencia.



Figura 3: Leica ScanStation 2.

Trimble TX6

Este proyecto ha sido realizado con el láser escáner Trimble TX6, equipo proporcionado por el Departamento de Ingeniería Cartográfica, Geodesia y Fotogrametría de la Universidad Politécnica de Valencia. Se puede ver en la Figura 4 .



Figura 4: Trimble TX6.

Este modelo cuenta con una velocidad de toma de puntos de 12 MHz, lo que permite obtener 1.2 millones de puntos por minuto. Además de la velocidad de toma de datos, es interesante el rango de este equipo: se pueden medir datos a una distancia máxima de 120 m con una buena resolución, su alcance mínimo es de 0.6m.

El Trimble TX6 realiza mediciones según el principio del tiempo de vuelo. Se realizan barridos en vertical gracias al espejo rotativo que equipa, mientras que el movimiento en horizontal lo realiza gracias a una base rotativa. Así pues, su campo de visión es de 360° en horizontal y 317° en vertical. Esta tecnología es más rápida que la de diferencia de fase, con el inconveniente de que la luz ambiental puede afectar a las mediciones.

La precisión angular de este láser es de 80 μ rad. El error de medida del láser son 6mm, aunque tras el modelado se puede alcanzar una precisión de 2mm. Actualmente, ningún láser escáner del mercado puede medir menos de 2mm en condiciones normales de trabajo. En condiciones de laboratorio, con un entorno controlado, algunos equipos pueden llegar a tener 1 mm de precisión, pero estas condiciones no se van a dar en una situación real.

Este equipo tiene 4 niveles de precisión distintos. En cada uno de ellos varía la duración del escaneado, el número de puntos que se obtiene, densidad de la matriz de puntos y, por lo tanto, el tamaño del archivo que se deberá procesar posteriormente. Se pueden observar estas propiedades en la

Tabla 1.

Parámetros de escaneo	Preview	Nivel 1	Nivel 2	Nivel 3
Alcance Max.	80/120 m	80/120 m	80/120 m	80/120 m
Duración del escaneado (minutos)	02:00	03:00	05:00	19:00
Pts/cm tomados a 10m	1	4	16	64
Espaciamiento entre Puntos a 10m (mm)	15,1	-----	-----	-----
Espaciamiento entre Puntos a 30m (mm)	-----	22,6	11,3	5,7
Número de puntos	8,7 Mpts	34 Mpts	138 Mpts	555 Mpts

Tabla 1: Propiedades del Trimble TX6.

El Trimble TX6 tiene una velocidad de escaneado de 5000 ptos/s, lo que permite que durante un escaneado de 3 minutos se consigan capturar 34 millones de puntos. Uno de los puntos fuertes de este modelo de láser escáner es que, por su tecnología láser, es capaz de capturar puntos de forma precisa a una gran velocidad. Los niveles de ruido en cualquiera de los niveles están por debajo de los 2mm mientras la reflectividad del material a escanear esté entre el 18 y 90%. No obstante, al ser un láser escáner de gran velocidad, es más propenso a que la luz ambiental le afecte que otros láseres basados en medición por diferencia de fase, por ejemplo, que son más lentos.

Este modelo de láser escáner incluye una cámara de alta resolución con la que se puede realizar una fotografía del espacio escaneado, con lo que se confiere a la nube de puntos cierto realismo al poder tener los colores y texturas propios del objeto real. Se trata de una cámara con 10Mpx de resolución. Si se decide usar esta opción, al tiempo de escaneado se le añade 1 minuto para una calidad estándar, mientras que para una imagen de alta calidad se añaden 2 minutos.



Figura 5: Pantalla del Trimble TX6.

El Trimble TX6 consta con un panel de control integrado de 4.3'', lo que facilita el proceso de toma de datos. En una sola ventana, que puede verse en la Figura 5, se puede gestionar toda la captura de datos, lo que la hace sencilla y muy intuitiva. La pantalla principal informa del nombre del proyecto, el estacionamiento actual, los parámetros con los que se va a realizar el escaneado y el tiempo que va a tardar.

Para la nivelación, este modelo cuenta con una burbuja exterior y otra electrónica que se puede visualizar en la pantalla. Cuando el equipo esté nivelado esta pasará de color amarillo a verde, como puede verse en la Figura 6.



Figura 6: Nivelación del Trimble TX6.

Además, desde la pantalla táctil se puede acceder a los proyectos y estacionamientos realizados anteriormente, con lo que se pueden visualizar los resultados in situ, teniendo una primera idea de la calidad del escaneado realizado, si se ha realizado correctamente o si se debiera repetir.

Los datos tomados se guardan en un USB de 64 GB disponible con el láser escáner. Para su funcionamiento se tienen 2 baterías extraíbles de 72W que proporcionan un tiempo de escaneado de más de 2 horas cada una. El equipo puede funcionar en condiciones óptimas en un rango de temperaturas de 0°C hasta 40°C y la humedad máxima con la que puede operar es del 80% sin condensación.

El equipo tiene una altura por de 386mm, 335 mm de ancho y una profundidad 242 mm. Su peso es de 10.7 kg sin baterías, y de 11.2 kg con batería. Cada batería tiene un peso de 0.66 kg y unas dimensiones de 76 mm de alto y 43 mm de ancho, y su profundidad es de 130 mm.

A continuación, se pueden observar en la Figura 7 las distintas partes que componen el equipo Trimble TX6.

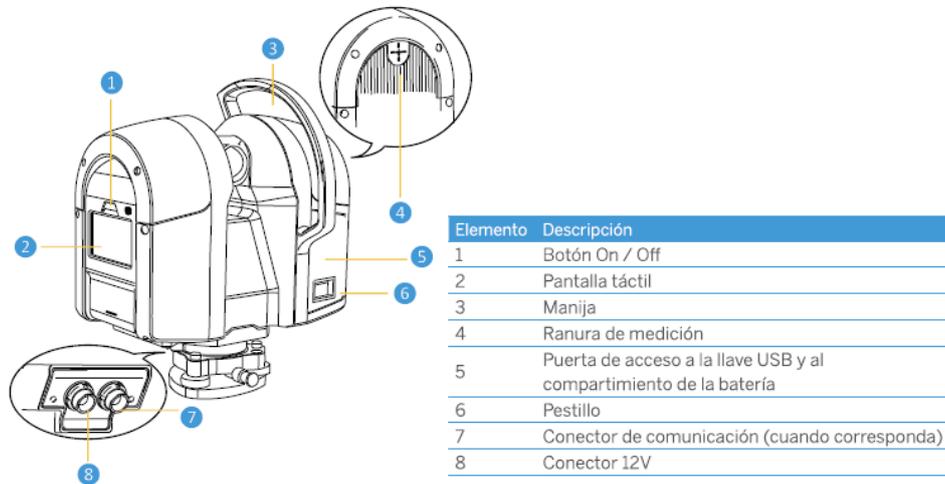


Figura 7: Partes del Trimble TX6

2.2. Metodología de medición

S.N.E.C.M.A Atar 09C

Para este proyecto se ha querido crear el modelo 3D del Atar 09C, fabricado por la empresa francesa S.N.E.C.M.A (*Société Nationale D'Étude et de Construction de Moteurs d'Aviation*). Se comenzó a producir en serie a partir de 1962 y se ha equipado en cazas como el Dassault Mirage III.

Se trata de un turbojet de 5,9 m de longitud (con post-combustor) y 1m de diámetro. Consta de un compresor axial bieje con 9 etapas como se muestra en la Figura 8. Sus álabes están hechos o bien en acero, como las dos primeras etapas o las tres últimas, o en aleaciones ligeras de aluminio. El material con el que está construido el motor es interesante ya que la reflectividad del material influirá en la capacidad del láser escáner para tomar los datos.

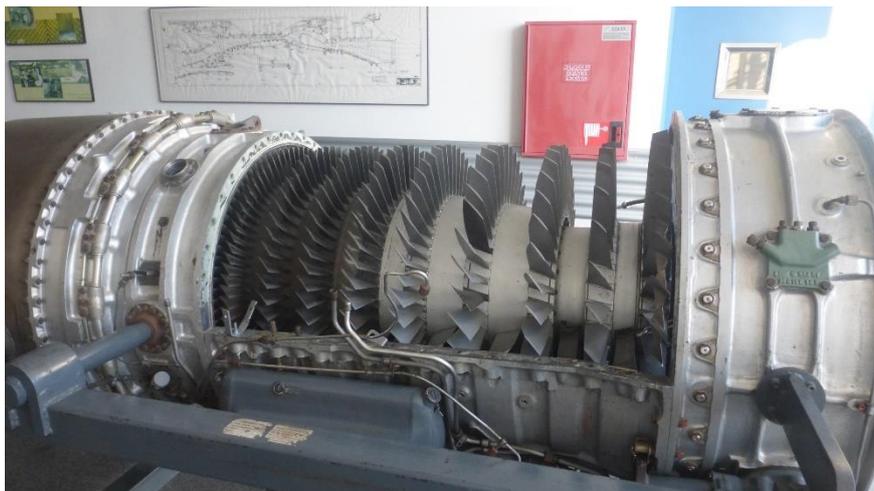


Figura 8: Compresor del Atar 09C.

La cámara de combustión se dispone de forma anular y tiene una turbina de dos etapas. A continuación, se acoplan el post-combustor y la tobera, de geometría variable. Es interesante que la APU está acoplada al motor, como se puede ver en la Figura 9.



Figura 9: APU del Atar 09C.

Levantamiento industrial

Para este proyecto se ha querido obtener un modelo del motor Atar 09C, situado en el edificio 8P de la UPV, propiedad del Instituto Universitario CMT-Motores Térmicos.

Al tratarse el láser escáner de un instrumento de línea de vista, un solo escaneo no dará toda la información necesaria en la gran mayoría de casos. Por esto, para obtener toda la información de la geometría del motor, se han realizado 28 escaneos. Así es posible obtener todos los datos necesarios para el modelado de la geometría, evitando la presencia de zonas oscuras o de sombra.

Como se cuenta con una gran cantidad de estacionamientos, es importante planificar de antemano una buena distribución de los mismos, así como los niveles a utilizar. En la Figura 10 se muestra un plano con las posiciones de los distintos estacionamientos.

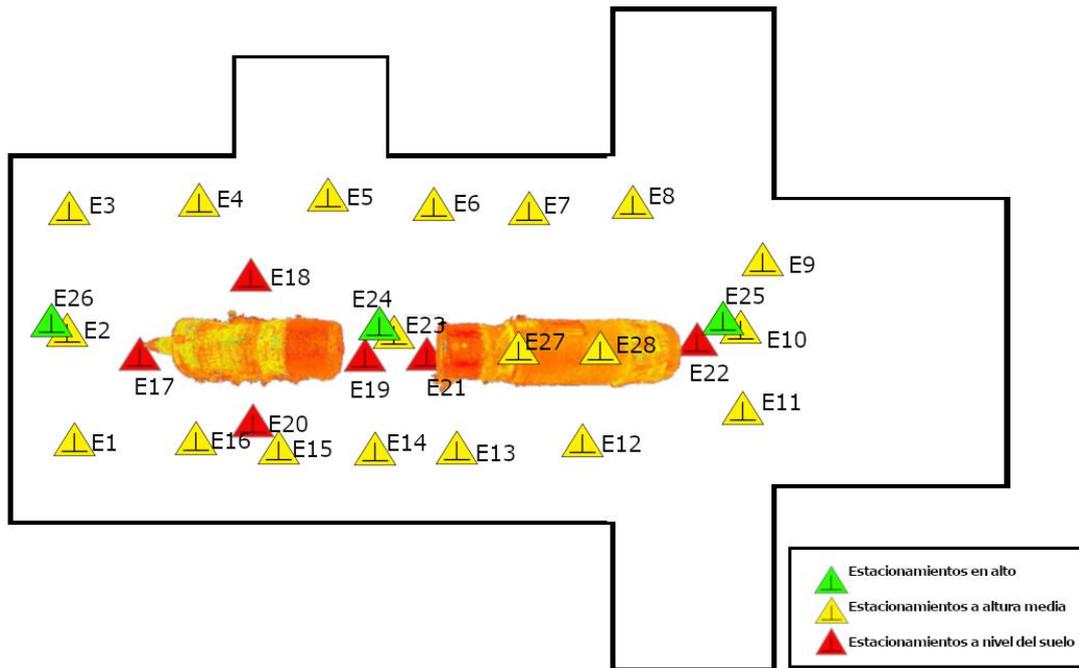


Figura 10: Plano de estacionamientos.

Para facilitar la unión de las distintas nubes de puntos que se obtendrán, se colocaron 4 dianas distribuidas por la zona, de forma que se vieran desde el mayor número de escaneos posibles, como puede verse en la Figura 11.



Figura 11: Dianas

De esta forma, se intenta cubrir todo el perímetro del motor con una serie de escaneos sucesivos, prestando especial atención a las zonas con mayor detalle, en este caso es la zona del compresor.

Así pues, de 28 escaneos, 23 se han realizado con la precisión que da el nivel 1. Alrededor del compresor, como se tiene una zona con mayor número de detalles, se han realizado tres escaneos a nivel 2.



Figura 12: Núcleo del motor Atar 09C.

Se ha tomado la decisión de realizar la mayoría de los estacionamientos con el nivel 1 del láser escáner porque, aunque el tiempo de toma de datos no es un factor crucial cuando se trabaja con este aparato (aumenta en 2 minutos), sí que lo es la densidad de la nube de puntos que se tendría al usar un nivel superior para todos los estacionamientos. Esto, además de incrementar el tiempo dedicado al procesado, supondría la necesidad de contar con un ordenador muy potente, puesto que el tamaño de los archivos es considerable.

Además, al colocar el equipo a una distancia tan corta del motor y distribuir los estacionamientos de forma uniforme, los resultados que se obtienen con el nivel 1 son más que aceptables, como se podrá ver más adelante.

Dentro del post-combustor se realizaron dos escaneos de nivel *preview*. Debido a que los puntos a medir están cerca del escáner, la densidad de puntos es alta, por lo que el nivel de detalle que se precisa es mucho menor además de ser axisimétrico en la mayor parte de la geometría.

Antes de tomar los datos con el láser, se tomó una imagen de alta resolución con la cámara incorporada en este modelo de láser escáner. Esto permite que en el post-procesado la nube de puntos pueda contar con el color y la textura del motor real.

Los estacionamientos del 1 al 9, así como el 23, se realizaron con el trípode como se puede observar en la Figura 13. Por comodidad, para los estacionamientos del 10 al 16, el láser escáner fue colocado sobre unas mesas ya que, por la presencia de las mismas, en el caso de usar el trípode, el equipo habría estado muy cerca del motor y cabía la posibilidad de que no superara el rango mínimo que este equipo puede medir.



Figura 13: Estacionamiento E7.

A continuación, se realizaron varios estacionamientos a ras de suelo, del 17 al 22. Al hacerlo de esta forma, se pueden captar los detalles de la parte inferior del motor, como pueden ser sistemas auxiliares, el cableado y demás. Más tarde, los estacionamientos 24, 25 y 26 se realizaron en alto, colocando el trípode sobre unas mesas, como se muestra en la Figura 14.



Figura 14: Estacionamiento E24.

Los últimos estacionamientos son los que se colocan en la cámara de combustión del post-combustor. Se colocaron de tal forma que se puedan tener puntos en común con el resto de los escaneos, ya sea por la “ventana” que hay en la cámara de combustión y que se puede ver en la Figura 15, o por la tobera.



Figura 15: Post-combustor del Atar 09C

2.3. Procesado de datos

La toma de datos ha sido realizada con un láser escáner de la marca Trimble. Los archivos que se obtienen de los distintos estacionamientos estarán, por lo tanto, en una extensión propia de Trimblr, que es la TZF. Esto supone que estos archivos solo se puedan manejar con un programa propio de la marca, como es el Trimble RealWorks.

No obstante, para este proyecto se ha decidido trabajar con el programa Leica Cyclone. Una de las principales razones por la que se ha tomado esta decisión es que, hasta hace relativamente poco, en el Departamento de Ingeniería Cartográfica, Geodesia y Fotogrametría de la UPV se trabajaba únicamente con el software de Leica. Siendo la adquisición del Trimble reciente, la experiencia en el manejo de este software no es muy extensa.

A la hora de tomar la decisión del software que se usaría, fue interesante la opción que aporta el Trimble RealWorks del registro automático. Su algoritmo intenta encontrar puntos comunes y dianas entre las distintas nubes de puntos para alinearlas y unir las automáticamente. Esto habría supuesto una reducción en el tiempo de trabajo que se debe dedicar a esta parte del post-procesado, lo cual suponía una ventaja.

No obstante, aunque con el Leica Cyclone se debe realizar el registro de forma manual, al tener el usuario el control del proceso, se pueden solucionar problemas que puedan surgir sin tener que realizar el registro desde cero. Además se puede decidir el nivel de error que es conveniente en cada caso y asegurar que los errores de alineación estén dentro del margen deseado.

Así pues, el programa utilizado para realizar las uniones es el Leica Cyclone, mientras que el Trimble RealWorks tan solo fue utilizado para exportar los archivos originales a un formato que hiciese posible el trabajar con el software de Leica. Este formato es el PTX.

Como resultado de los escaneos realizados se obtiene un archivo RWP, que corresponde al proyecto, y una carpeta RWI. Dentro de la carpeta hay dos tipos de archivos, TZF y TCF. Estos archivos son los que se van a importar a RealWorks. Después se podrán importar a formato PTX. Se debe tener

en cuenta que una vez exportado a PTX, si se eliminan los archivos originales no se podrá volver a trabajar con el software RealWorks, ya que en la conversión se perderán los archivos TCF.

Según el número de estacionamientos y el tamaño del archivo, que crece considerablemente cuando se utilizan niveles altos de detalle, y dependiendo también de las características del ordenador con el que se trabaje, este paso puede llevar un tiempo considerable. En este caso, para los 28 estacionamientos el tiempo que tomó el exportar todos los archivos fue de alrededor de 1 hora. Esto confirma la necesidad de planificar de antemano el nivel de precisión con el que se quiere trabajar.

Una vez se dispone de estos ficheros PTX se puede comenzar a trabajar con Leica Cyclone.

El primer paso que se debe realizar con el Leica Cyclone es crear una base de datos. Aquí se puede elegir dónde se quieren guardar los archivos del proyecto, así como su nombre, en este caso "Motor8P". Dentro de este proyecto será donde se importen los distintos archivos PTX, que se guardan como *ScanWorld*.

Una vez creado el proyecto, este se guarda con formato IMP y se puede abrir desde cualquier ordenador, sin necesidad de tener los archivos PTX.

Registro

En este caso, como en la gran mayoría de aplicaciones para láser escáner, un solo escaneo no es suficiente para tomar todos los datos que necesitamos. Por ello se realizan varios estacionamientos desde distintos puntos de vista. Para obtener el modelo final, se deben unir las distintas nubes de puntos obtenidas y esto se puede hacer con la opción Registro de Cyclone.

Una vez cargados los archivos PTX, dentro del proyecto se debe crear el Registro que aparecerá en el árbol de trabajo como *Registration 1* por defecto, con el icono de una diana, como se puede ver a continuación en la Figura 16.

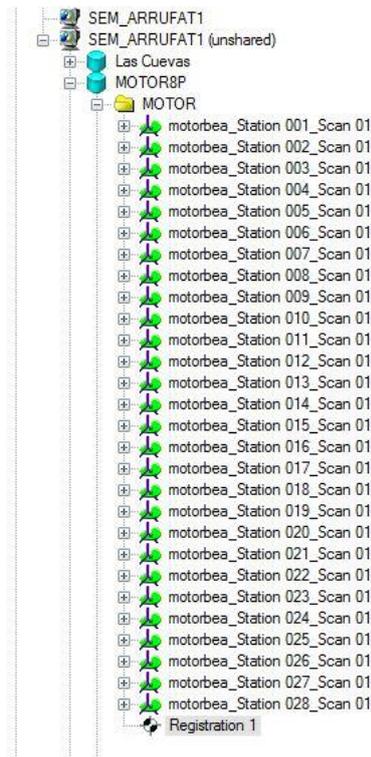


Figura 16: Apertura del Registro.

Dentro de esta herramienta hay tres pestañas: *ScanWorld*, *Constraint* y *ModelSpaces*. En la pestaña de *ScanWorld* es donde se importarán los escaneos para trabajar con ellos. En *Constraint* se podrían cargar las dianas que se han dispuesto durante el proceso del levantamiento y será donde aparezcan las distintas uniones que se realicen. Por último, en la pestaña de *ModelSpaces* hay dos opciones: *ControlSpace*, donde se pueden unir las distintas dianas, y *ModelSpace*, donde se podrá abrir el *ScanWorld* para realizar la unión.

Para comenzar con el registro, se deben cargar los *ScanWorld*. Este paso es recomendable realizarlo en pequeños grupos, según se vayan a realizar las uniones. Una vez importados los escaneos se abren de dos en dos desde el *ModelSpace*, siendo el que aparece en negrita el que se utilizará como origen de coordenadas.

El proceso del registro consiste en seleccionar puntos comunes en ambas nubes de puntos para alinearlas y conseguir una sola nube de puntos con un solo sistema de referencia, ya que cada estacionamiento tiene el suyo propio allá donde se haya colocado el láser escáner.

El mínimo de puntos comunes que se han de coger son 3, pero si están bien definidos, cuanto mayor sea el número de puntos seleccionados, menor será el error producido al unir las nubes de puntos. Es importante elegir los puntos comunes con cierta distancia entre ellos e intentar que no se encuentren en el mismo plano para que no se produzcan errores. Por ejemplo, si se eligen tres puntos de la misma pared, es posible que al realizar la unión se produzca un efecto espejo u otro tipo de errores, como se puede observar en la Figura 17 donde, aunque la unión de los puntos elegidos fue correcta, no lo fue la unión del resto de la nube.

Los puntos se deben elegir a mano, por lo que elegir exactamente el mismo punto de ambos *ScanWorlds* puede ser imposible. Por esto el programa permite que los puntos estén separados como

máximo 10cm. Aunque el registro se realice de forma manual, el usar dianas durante el proceso del levantamiento agiliza la elección de puntos comunes.

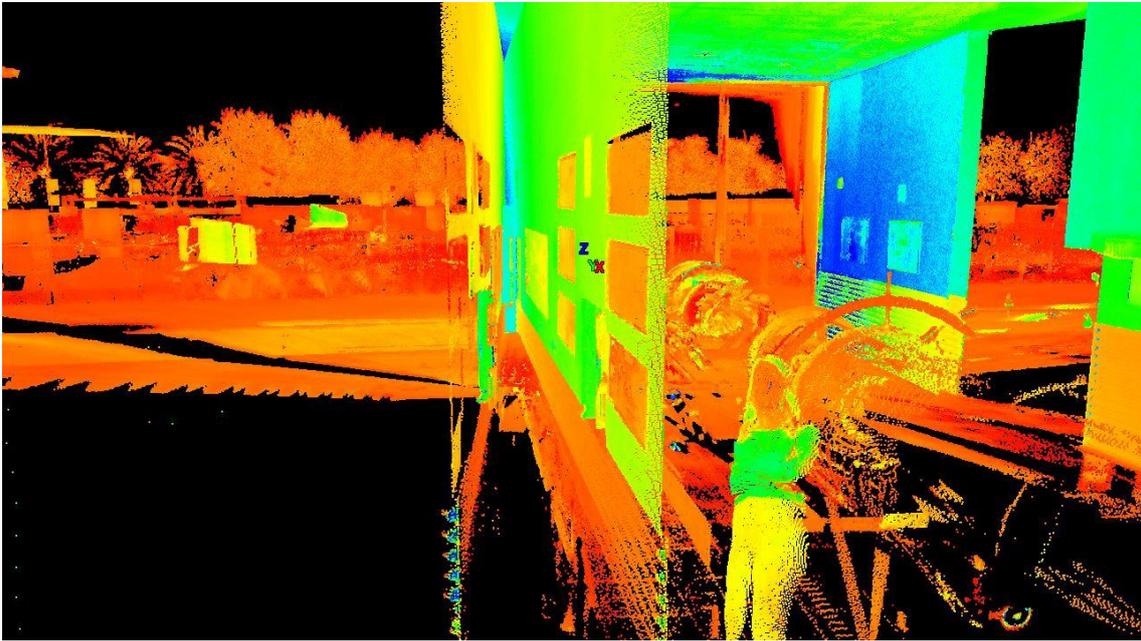


Figura 17: Error de alineamiento.

Una vez elegidos estos puntos comunes, se selecciona la opción *Add Cloud Constraint* para realizar la unión. El programa realizará las traslaciones y giros pertinentes para alinear ambas nubes de puntos. Si el proceso se ha realizado de forma correcta, los puntos seleccionados se verán de color blanco como se observa en la Figura 18, pero si hay algún punto con el que no se ha podido realizar la unión, esta pareja se verá de color azul. No obstante, si no se visualiza un mensaje de error, la unión habrá sido correcta y no se ha de realizar de nuevo.

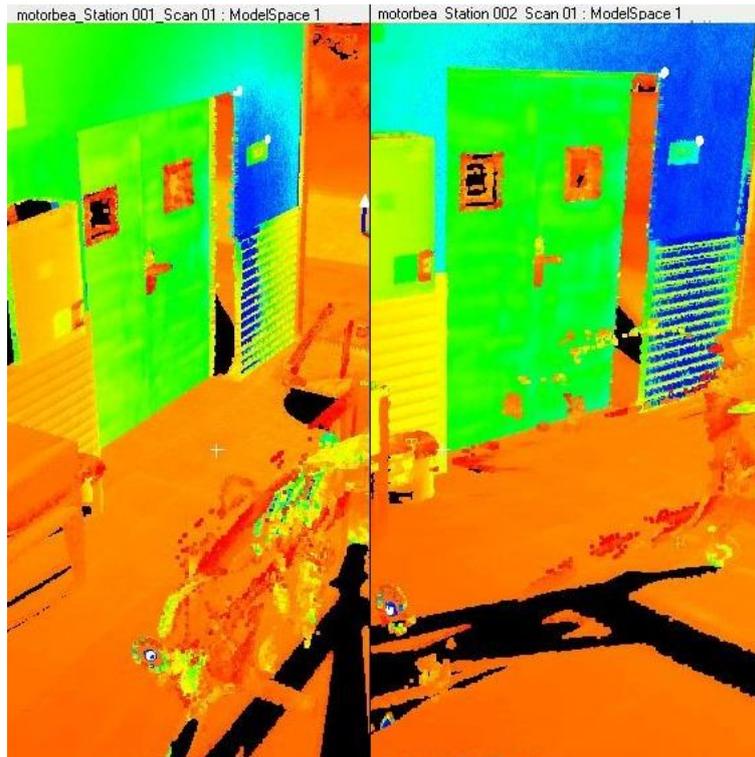


Figura 18: Toma de puntos.

A continuación, en la pestaña *ConstraintList* se selecciona la unión realizada y se optimiza la alineación de la nube. El programa Leica realiza una serie de cálculos y muestra un diagrama con las iteraciones del ajuste. El resultado de estos cálculos, que se puede observar en la Figura 19, se compone del error medio cuadrático (RMS), el número de puntos que se superponen y el número de iteraciones necesarias, entre otros. Una buena unión se puede considerar aquella en la que el RMS esté alrededor de 10mm, ya que el error de este equipo es de 6mm.

```

Cloud/Mesh 32 [motorbea_Station 013_Scan 01 : motorbea_Station 023_Scan 01]
  Translation: (-2.169, 0.603, 0.048) m
  Rotation: (0.0085, -0.0032, 1.0000):162.089 deg
Objective Function Value: 8.9222e-06 sq m
Iterations: 25
Overlap Point Count: 117233
Overlap Error Statistics
  RMS: 0.00724751 m
  AVG: 0.00327211 m
  MIN: 5.78826e-07 m
  MAX: 0.0773695 m
Overlap Center: (-2.593, 0.905, 1.923) m
  
```

Figura 19: Resultados de la unión.

Hay que tener en cuenta que en espacios abiertos los errores pueden crecer por muchos factores como, por ejemplo, la presencia de coches en movimiento, personas o incluso que la vegetación se mueva a causa del viento. Los valores aceptables del error cuadrático medio pueden ser distintos según el proyecto.

Se puede obtener también un histograma donde se muestra el nivel de ruido (color rojo) y el error de alineamiento (color verde), tanto en escala logarítmica como en una escala lineal. En la Figura 20 se puede ver el resultado en escala lineal, ya que visualmente es más representativa del error que se tiene en la alineación.



Figura 20: Histograma de errores en escala lineal.

Una opción interesante de la que se dispone es el poder visualizar la nube de puntos resultantes. Esto puede verse en la opción *View Interim Results*. Se marca una nube de puntos en azul y la otra en verde, como se ve en la Figura 21, que corresponde a la unión de los estacionamientos 3 y 4. Se puede observar como, en la mayoría del espacio, los colores azul y verde se solapan, pero hay zonas donde se tiene un solo color. Así se puede ver como con los sucesivos estacionamientos se van rellenando zonas de sombra que no entran en la línea de vista de un solo estacionamiento.

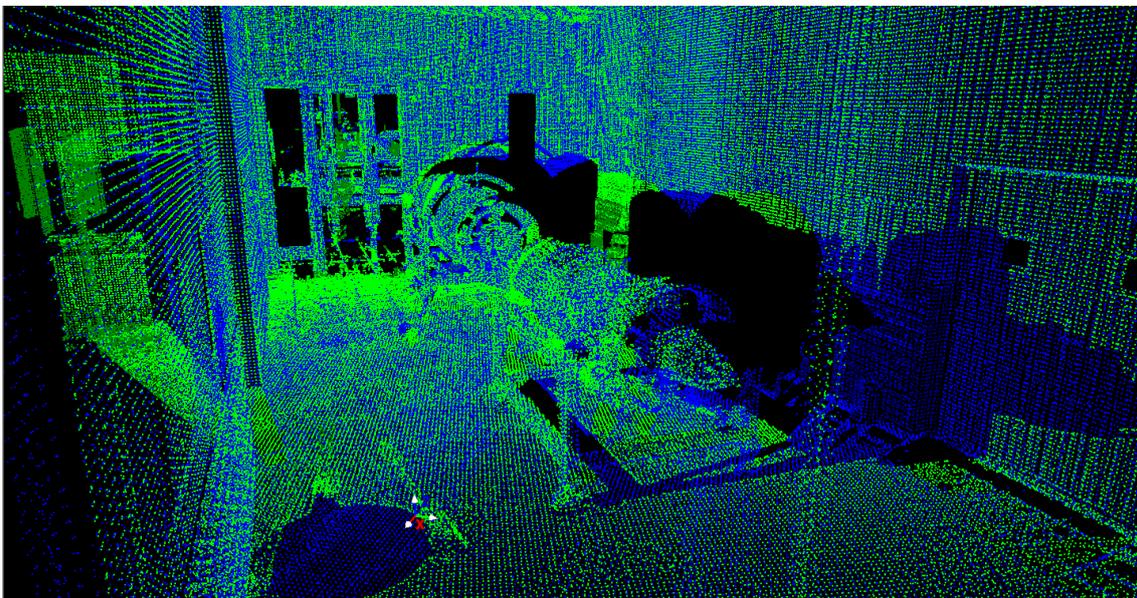


Figura 21: Resultados internos de la unión de los estacionamientos E3 y E4

Cuando se tiene una pareja unida, lo siguiente que se debe hacer es seleccionar la opción de *Register*, con lo que las nubes de puntos se terminan de unir.

Este proceso se debe realizar con todos los estacionamientos para unirlos. Es importante elegir por adelantado la secuencia de unión que se va a seguir durante el registro y seguir una buena metodología ya que, de lo contrario, el modelo que se consigue podría tener errores graves y perdería la coherencia con la realidad.

Es normal que al unir los escaneos de forma secuencial se dé un efecto “látigo” en el que la nube de puntos se va deformando sin que sea visible hasta que se tiene el modelo final. Esto supondría por ejemplo unir ScanWorld1 con ScanWorld2, unir la nube resultante con el ScanWorld3 y así sucesivamente.

Este error es fácilmente evitable si los distintos escaneos se unen por parejas que después se unirán en grupos de varios estacionamientos. Por ejemplo, se une ScanWorld1 y ScanWorld2, por separado se uniría ScanWorld2 y ScanWorld3, finalmente se unirían las dos nubes de puntos resultantes. Al tener un estacionamiento en común que sirve de referencia, se puede asegurar que el resultado final es coherente con la realidad y el error cometido es menor, sin deformaciones en el modelo final.

Por este motivo, se ha dividido el registro en varias fases, agrupando los distintos escaneos según el lugar donde se ha realizado el estacionamiento.

En la “Fase 1” se unen los ScanWorld 1, 2, 3, 17 y 26, que son los que se encuentran alrededor del *inlet* del motor. Así pues, primero se realizan las uniones 1-2, 2-3, 1-17 y 1-26. Como los resultados fueron positivos, se pasa a unir estos ScanWorlds en uno solo con la opción “*auto-add constrains*”.

La nube de puntos que se obtiene de esta primera fase sería la que se muestra en la Figura 22.

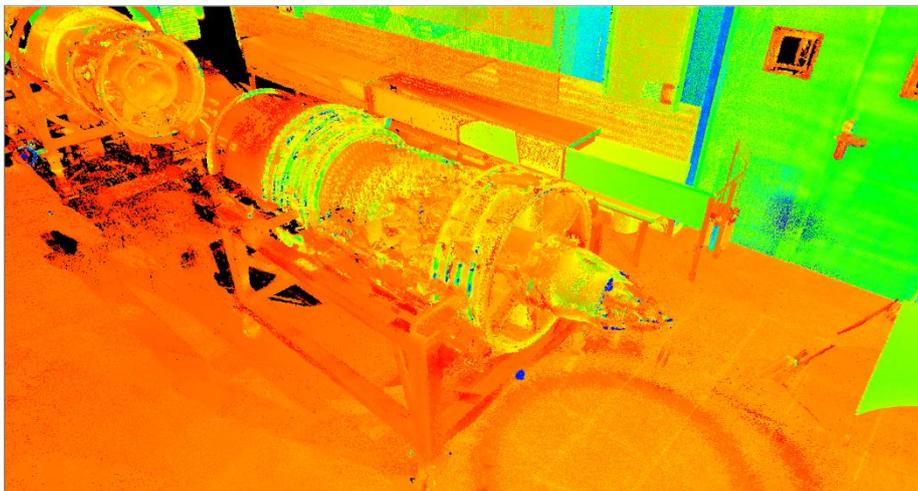


Figura 22: Resultados de la Fase 1.

Al unir este grupo de estacionamientos, además de las uniones que hemos realizado manualmente, el programa irá uniendo entre sí todos los ScanWorlds asociados a cada fase, como se observa en la Figura 23, por lo que los errores de alineamiento irán disminuyendo y se mejorará la coherencia del modelo respecto al objeto real.

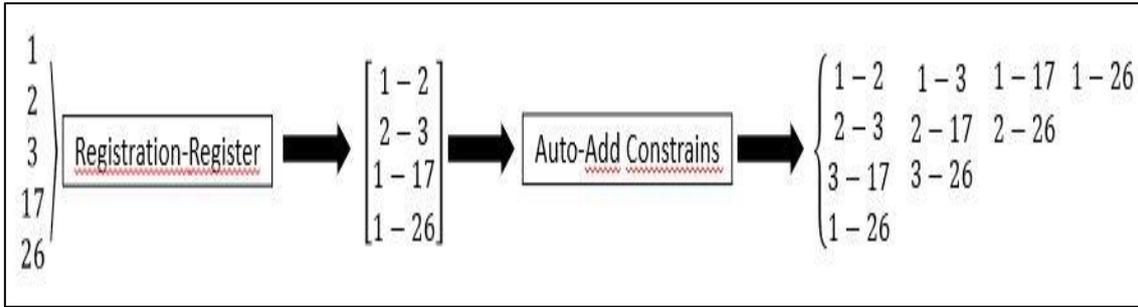


Figura 23: Uniones de la Fase 1.

La secuencia que se ha elegido reparte las zonas según el sentido horario, el mismo sentido en el que se han ido realizando los estacionamientos. La “Fase 2” cubre por tanto, la zona del turborreactor que queda a la derecha de la admisión de este. Los ScanWorlds que se unieron a continuación fueron del 3 al 6, el 18 que se realizó a nivel del suelo, y el 23 que se colocó entre la turbina y el post-combustor.

Como se puede observar, este nuevo grupo se une al anterior mediante el ScanWorld3 para mejorar así la coherencia del modelo. Se pueden observar el número de uniones realizadas en la Figura 25 y los resultados internos en la Figura 24.

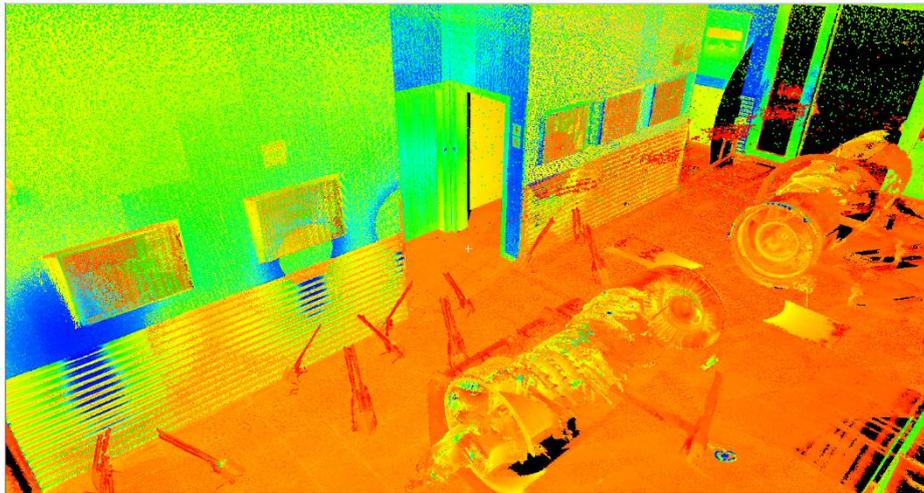


Figura 24: Resultado de la Fase 2.

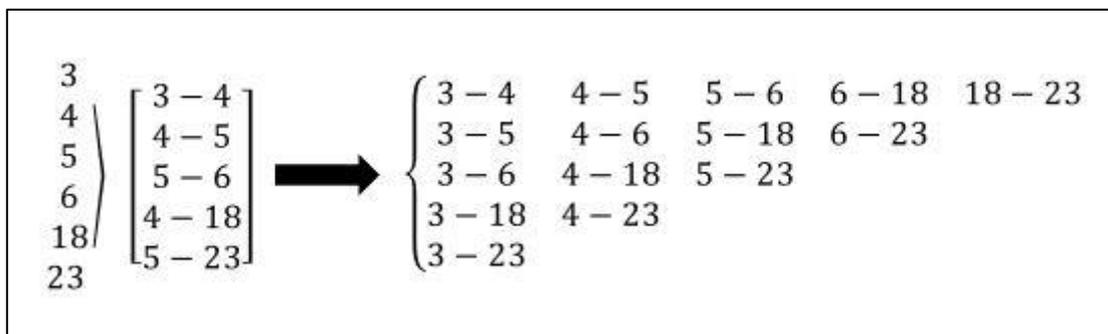


Figura 25: Uniones de la Fase 2.

La "Fase 3" sigue en este sentido hacia el post-combustor, de tal forma que se va a pasar a unir los estacionamientos del 6 al 9, además del 23, como se ve en la Figura 26.

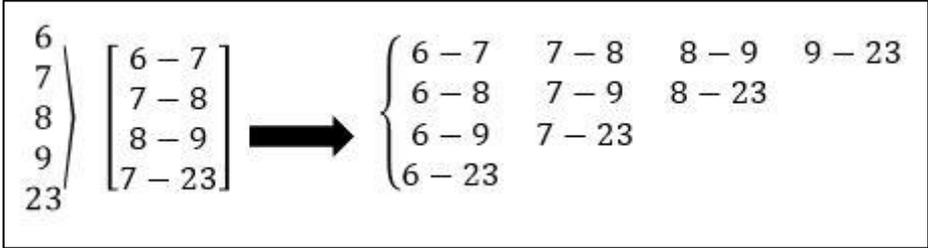


Figura 26: Uniones de la Fase 3.

La "Fase 4" es la que comprende la tobera de salida del post-combustor, que corresponde a los ScanWorlds 9, 10 y 11, además del 22 que se realizó al nivel del suelo y el estacionamiento 25 que se realizó en alto. Se puede observar un detalle de la tobera de los resultados internos en la Figura 27, donde es posible apreciar el nivel de detalle de los mecanismos que la controlan. En la Figura 28 se muestran las uniones de esta fase.

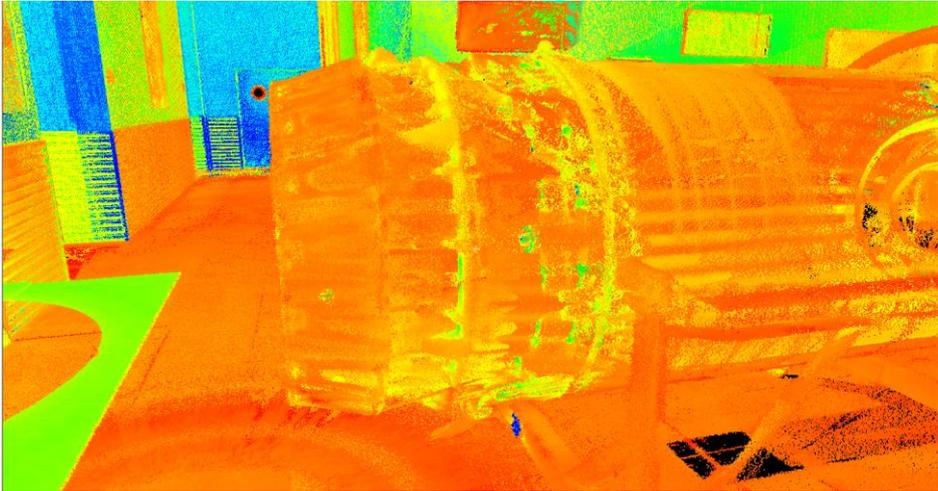


Figura 27: Resultado de la Fase 4.

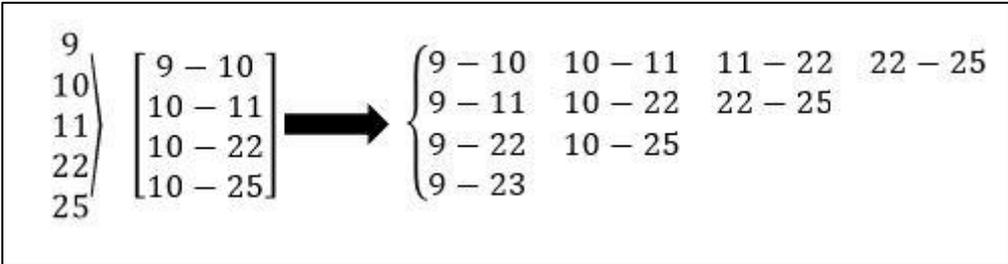


Figura 28: Uniones de la fase 4.

La "Fase 5", cuyos resultados se pueden observar en la Figura 29, corresponde al lado izquierdo del post-combustor. Se añaden los ScanWorlds del 11 al 14, además del 23. Ha sido preferible unir el estacionamiento 23 en tantos grupos ya que, al estar en el centro de los dos objetos de estudio, se

disminuye la probabilidad de error. Todas las uniones que el programa ha realizado se pueden ver en la Figura 30.

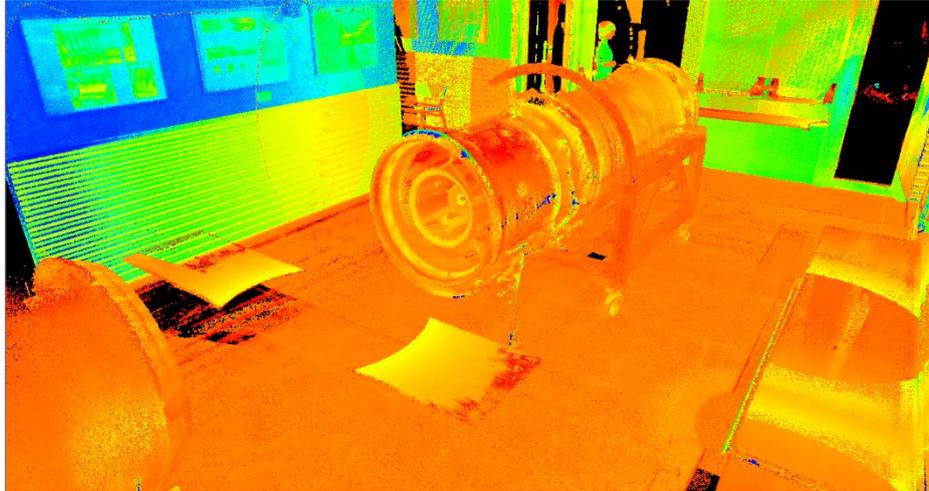


Figura 29: Resultado de la Fase 5.

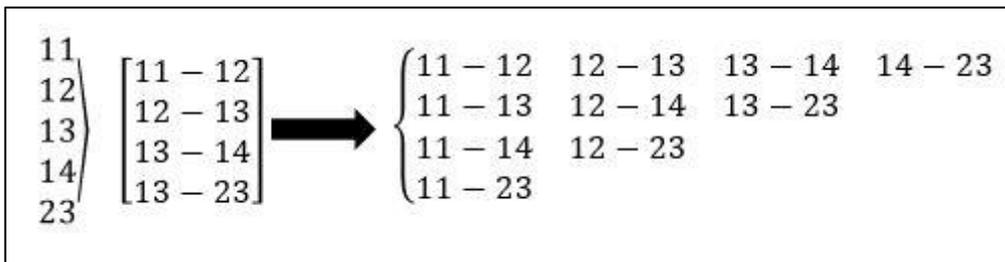


Figura 30: Uniones de la fase 5.

La “Fase 6”, como se ve en la Figura 31, corresponde de nuevo al núcleo, cerrando así el círculo de forma horizontal y volviendo al estacionamiento número 1. Se agrupan los ScanWorlds del 14 al 16, además del número 1 y 23. Se incluye también el número 20, realizado a nivel del suelo. En la Figura 32 se ven las uniones que han sido realizadas.

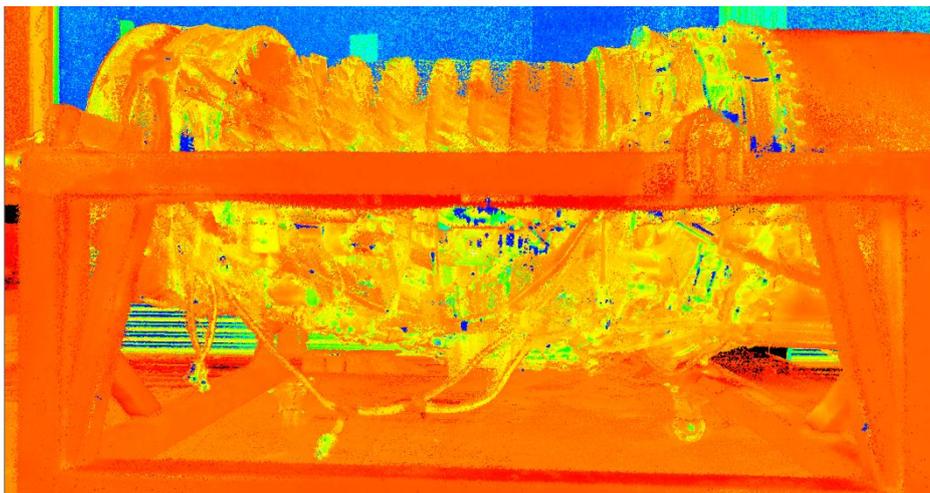


Figura 31: Resultado de la fase 6.

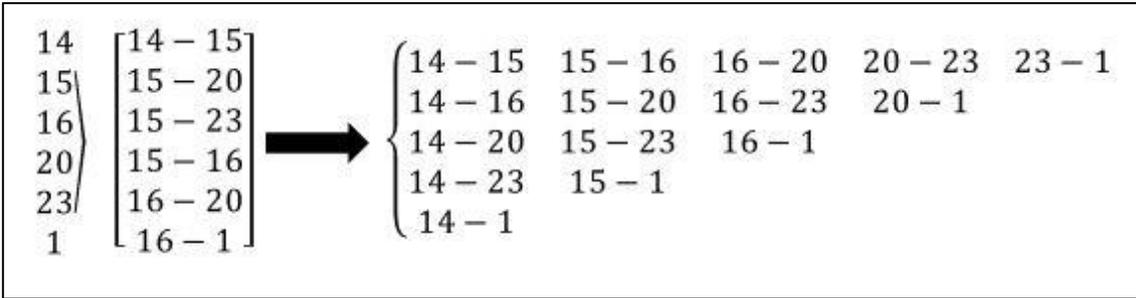


Figura 32: Uniones de la fase 6.

Para la “Fase 7” se pasa a la unión de la zona entre la turbina y el post-combustor. Se tienen 4 *ScanWorlds*: el 19, 21, 23 y 24. Manualmente se han unido primero los que se realizaron a nivel del suelo, el 19 y 21, después se unió el 19 con el que se realizó a media altura, el 23, y por último este con el 24, que se realizó en alto. En la Figura 33 se ven las uniones realizadas.

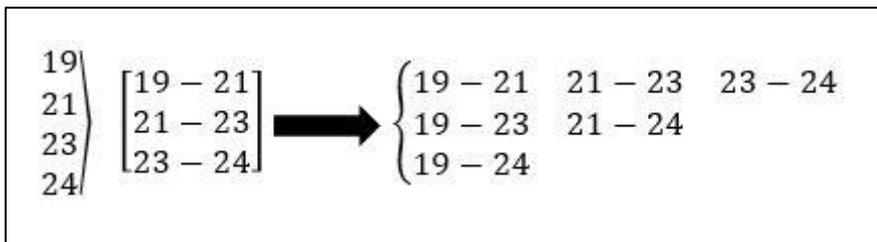


Figura 33: Uniones de la fase 7.

La “Fase 8” es la última que se realizó. Se han agrupado los estacionamientos realizados dentro del post-combustor y se han enlazado con los exteriores, uniendo los números 25, 27 y 28. Esta ha sido la unión que ha presentado más dificultades, ya que los puntos comunes entre los escaneos que fuesen más representativos y fáciles de diferenciar eran más escasos que en el resto de los casos. No obstante, los resultados obtenidos han sido satisfactorios. En la Figura 34 y la Figura 35 se pueden ver los resultados de esta fase y el nivel de detalle conseguido.

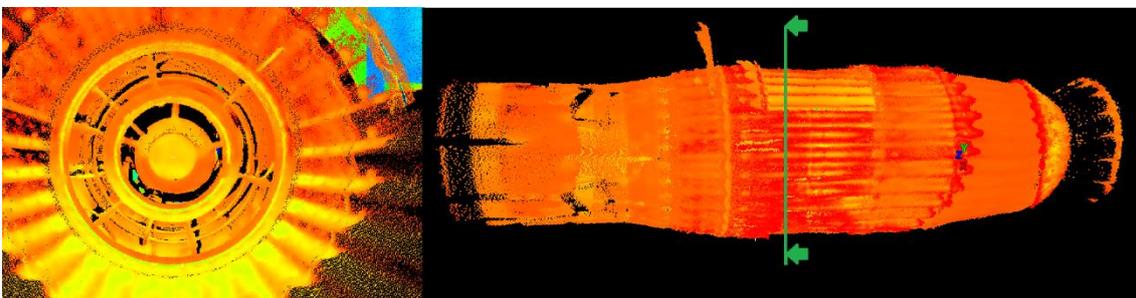


Figura 34: Unión de los estacionamientos E27 y E28.

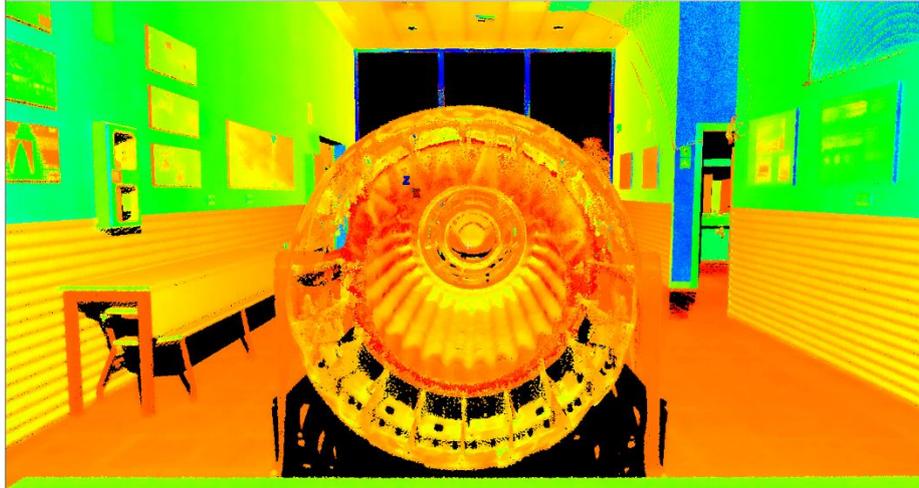


Figura 35: Resultado de la fase 8.

Una vez se tienen estos 8 grupos, se utiliza la opción “Auto-Add Constraints” para unir las todas en una sola nube de puntos. Como se ha podido ver, esta opción aumenta el número de uniones producidas entre las distintas nubes para así incrementar la coherencia del modelo. Con esta última opción, todas las nubes de puntos se han unido entre sí. Manualmente se han realizado 32 uniones, sin embargo, en el *ScanWorld* final, el número de uniones que se tiene corresponde a la ecuación:

$$Uniones = \sum_{i=1}^{Estacionamientos} i$$

En la Figura 36 se puede observar el total de las uniones realizadas. El modelo final tiene 378 uniones, demostrando así que la gran ventaja de este procedimiento es que, con un esfuerzo moderado, el número de uniones aumenta considerable, reduciendo los errores y dotando al modelo de la coherencia deseada.

Fase 1 + Fase 2 + Fase 3 + Fase 4 + Fase 5 + Fase 6 + Fase 7 + Fase 8																											
1-2	2-3	3-4	4-5	5-6	6-7	7-8	8-9	9-10	10-11	11-12	12-13	13-14	14-15	15-16	16-17	17-18	18-19	19-20	20-21	21-22	22-23	23-24	24-25	25-26	26-27	27-28	
1-3	2-4	3-5	4-6	5-7	6-8	7-9	8-10	9-11	10-12	11-13	12-14	13-15	14-16	15-17	16-18	17-19	18-20	19-21	20-22	21-23	22-24	23-25	24-26	25-27	26-28		
1-4	2-5	3-6	4-7	5-8	6-9	7-10	8-11	9-12	10-13	11-14	12-15	13-16	14-17	15-18	16-19	17-20	18-21	19-22	20-23	21-24	22-25	23-26	24-27	25-28			
1-5	2-6	3-7	4-8	5-9	6-10	7-11	8-12	9-13	10-14	11-15	12-16	13-17	14-18	15-19	16-20	17-21	18-22	19-23	20-24	21-25	22-26	23-27	24-28				
1-6	2-7	3-8	4-9	5-10	6-11	7-12	8-13	9-14	10-15	11-16	12-17	13-18	14-19	15-20	16-21	17-22	18-23	19-24	20-25	21-26	22-27	23-28					
1-7	2-8	3-9	4-10	5-11	6-12	7-13	8-14	9-15	10-16	11-17	12-18	13-19	14-20	15-21	16-22	17-23	18-24	19-25	20-26	21-27	22-28						
1-8	2-9	3-10	4-11	5-12	6-13	7-14	8-15	9-16	10-17	11-18	12-19	13-20	14-21	15-22	16-23	17-24	18-25	19-26	20-27	21-28							
1-9	2-10	3-11	4-12	5-13	6-14	7-15	8-16	9-17	10-18	11-19	12-20	13-21	14-22	15-23	16-24	17-25	18-26	19-27	20-28								
1-10	2-11	3-12	4-13	5-14	6-15	7-16	8-17	9-18	10-19	11-20	12-21	13-22	14-23	15-24	16-25	17-26	18-27	19-28									
1-11	2-12	3-13	4-14	5-15	6-16	7-17	8-18	9-19	10-20	11-21	12-22	13-23	14-24	15-25	16-26	17-27	18-28										
1-12	2-13	3-14	4-15	5-16	6-17	7-18	8-19	9-20	10-21	11-22	12-23	13-24	14-25	15-26	16-27	17-28											
1-13	2-14	3-15	4-16	5-17	6-18	7-19	8-20	9-21	10-22	11-23	12-24	13-25	14-26	15-27	16-28												
1-14	2-15	3-16	4-17	5-18	6-19	7-20	8-21	9-22	10-23	11-24	12-25	13-26	14-27	15-28													
1-15	2-16	3-17	4-18	5-19	6-20	7-21	8-22	9-23	10-24	11-25	12-26	13-27	14-28														
1-16	2-17	3-18	4-19	5-20	6-21	7-22	8-23	9-24	10-25	11-26	12-27	13-28															
1-17	2-18	3-19	4-20	5-21	6-22	7-23	8-24	9-25	10-26	11-27	12-28																
1-18	2-19	3-20	4-21	5-22	6-23	7-24	8-25	9-26	10-27	11-28																	
1-19	2-20	3-21	4-22	5-23	6-24	7-25	8-26	9-27	10-28																		
1-20	2-21	3-22	4-23	5-24	6-25	7-26	8-27	9-28																			
1-21	2-22	3-23	4-24	5-25	6-26	7-27	8-28																				
1-22	2-23	3-24	4-25	5-26	6-27	7-28																					
1-23	2-24	3-25	4-26	5-27	6-28																						
1-24	2-25	3-26	4-27	5-28																							
1-25	2-26	3-27	4-28																								
1-26	2-27	3-28																									
1-27	2-28																										
1-28																											

Figura 36: Uniones del proceso de registro.

Como resultado de esta unión se obtienen el error medio de la nueva nube de puntos y las traslaciones y rotaciones que se han realizado para cada *ScanWorld*. También es posible ver el error medio que tenía cada par de nubes de puntos que se han unido manualmente y el error que aparece una vez que se ha producido el registro global. Se genera un fichero de texto con los resultados de la unión y en él es posible comprobar como el menor error medio que se tiene en las uniones individuales es de 7mm, mientras que el error medio global de la nueva nube de puntos es de 1mm.

Por último, una vez que se tienen todas las uniones realizadas se pasa a bloquearlas creando así un *ScanWorld* que tenga todas las nubes de puntos unidas. Para poder ver los resultados de forma permanente se debe crear un “*ModelSpace View*”. Los resultados finales pueden verse en la Figura 37.

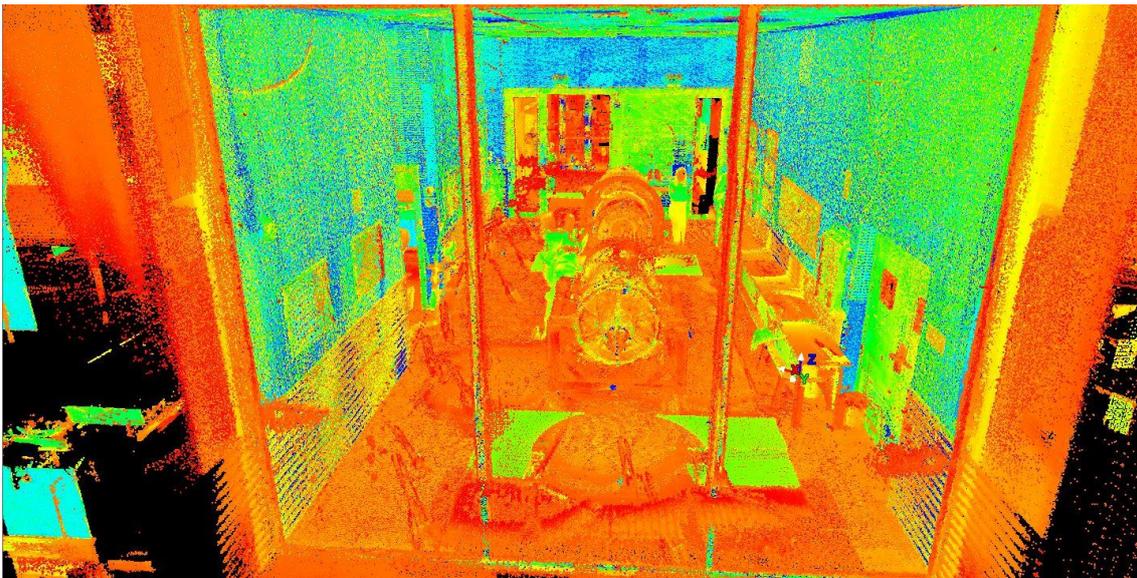


Figura 37: Resultado del proceso de registro.

Limpieza de la nube de puntos

Ya que este equipo tiene un alcance de hasta 120m, mucha de la información que ofrece no es relevante para este trabajo, como se puede observar en la Figura 38. Por esto, el siguiente paso sería limpiar la nube de puntos. Puesto que en este punto el archivo es muy pesado y el tiempo que llevaría exportarlo es elevado, el gran grueso de la limpieza se realiza con el programa Leica Cyclone, el mismo programa con el que se ha realizado el registro.

Para este paso se parte del *ScanWorld* que se ha creado con el registro. Ya que Cyclone no da la opción de deshacer ciertos pasos, se crea una copia para no modificar el original.

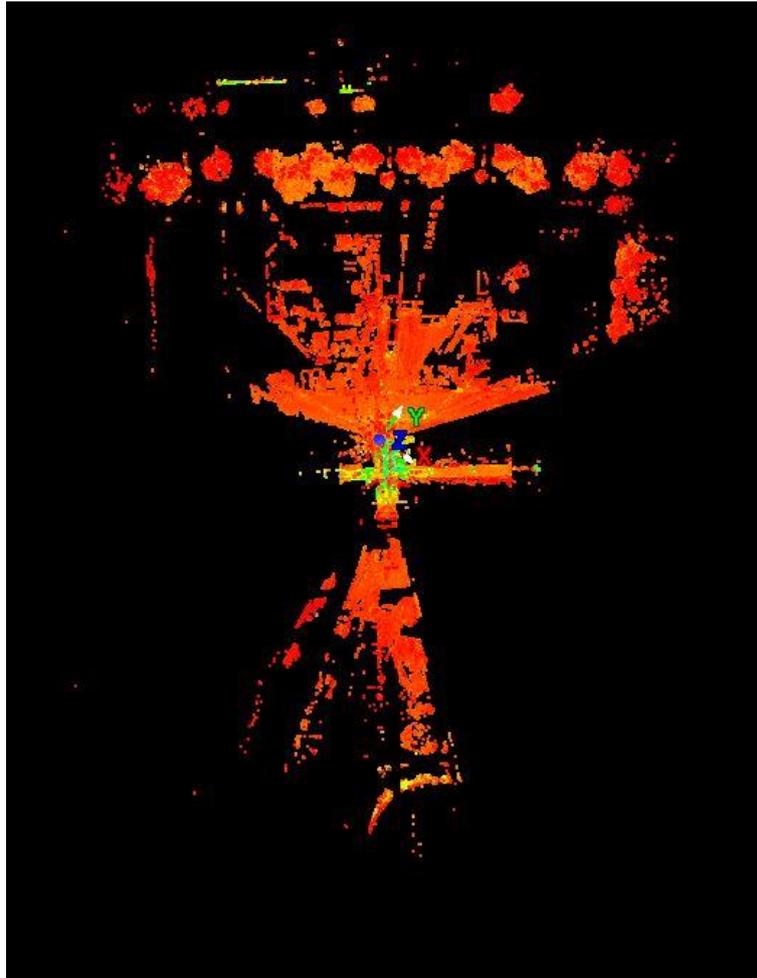


Figura 38: Nube de puntos bruta.

Dentro del *ModelSpace View* se puede seleccionar la herramienta “fence” para eliminar los puntos que no sean interesantes. En primer lugar, se realiza la limpieza del exterior del edificio, eliminando la información innecesaria y recortando la distancia con el motor. En la siguiente imagen se puede apreciar el resultado de la primera limpieza.

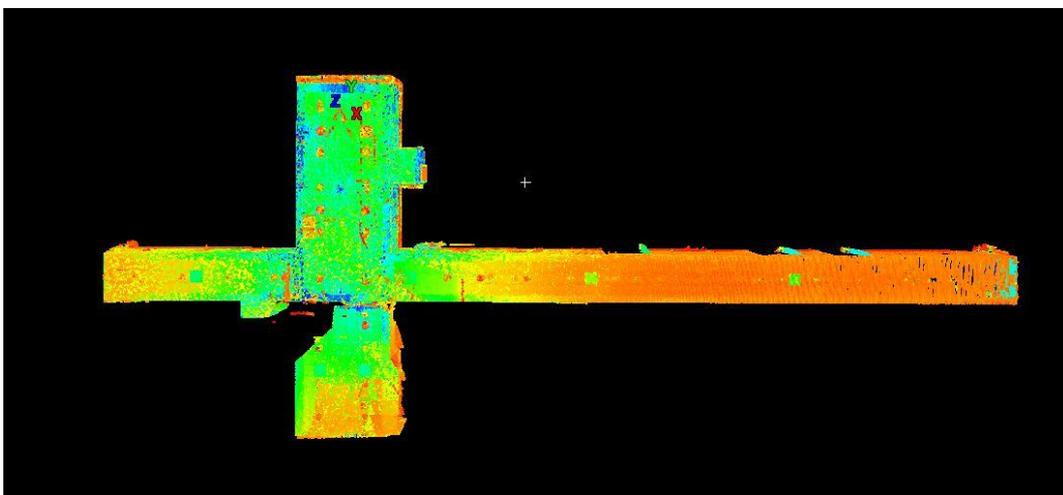


Figura 39: Planta del edificio 8P.

A continuación, se aísla la sala donde se encuentra el motor, como se ve a continuación.

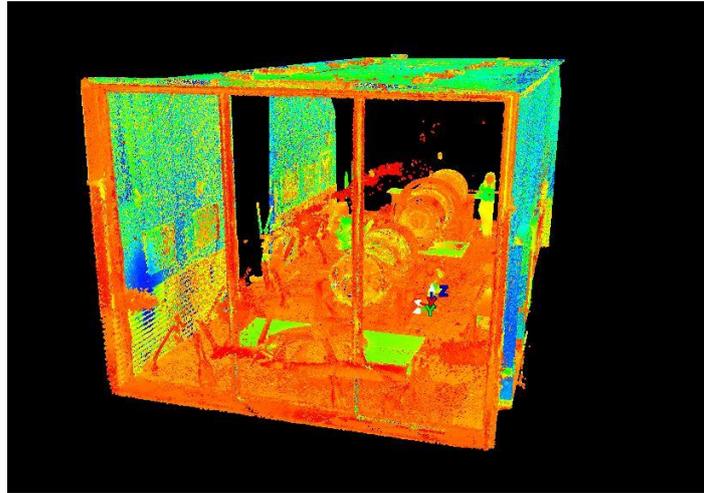


Figura 40: Limpieza del hall.

El siguiente paso, como se ve en la Figura 41, es eliminar las paredes. En este paso se deja el suelo por su proximidad con el motor.

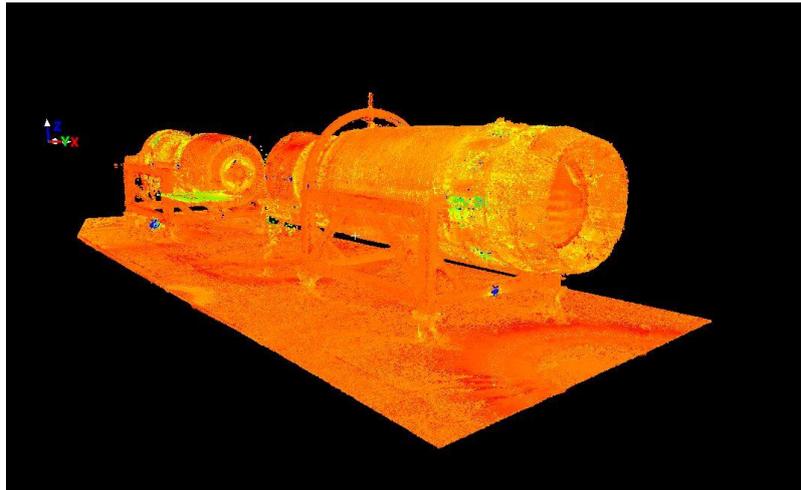


Figura 41: Limpieza de las proximidades del turbojet.

A continuación, se borra el suelo bajo el motor, pero dejando los soportes, como se ve en la siguiente figura.

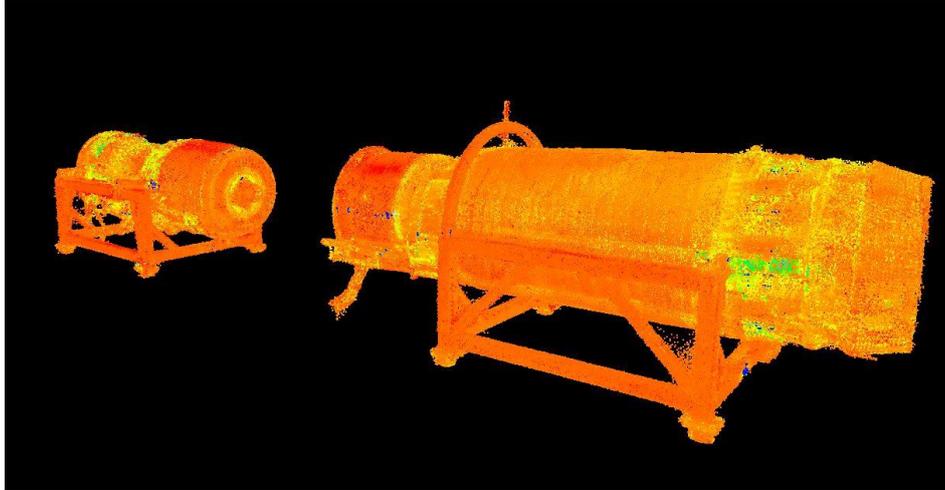


Figura 42: Nube de puntos con turbojet y soportes.

Para acabar la primera fase de la limpieza, se quitan los soportes y se han separado en archivos distintos, el núcleo por una parte y el post-combustor por otro. En la Figura 43 y en la Figura 44 se ven los resultados de esta limpieza.

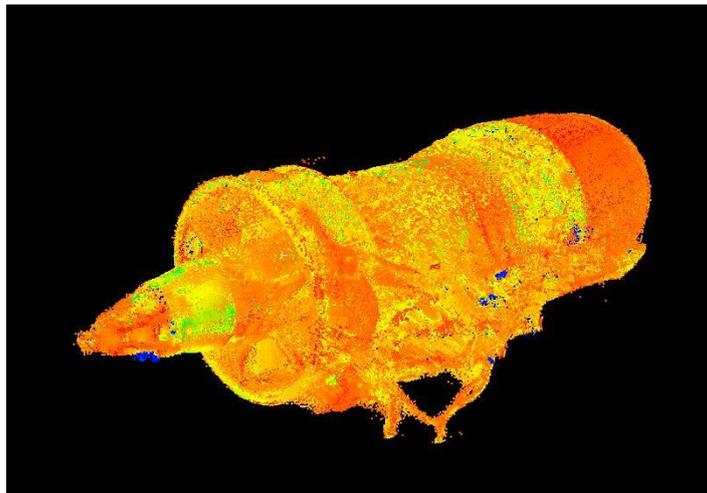


Figura 43: Nube de puntos del núcleo.

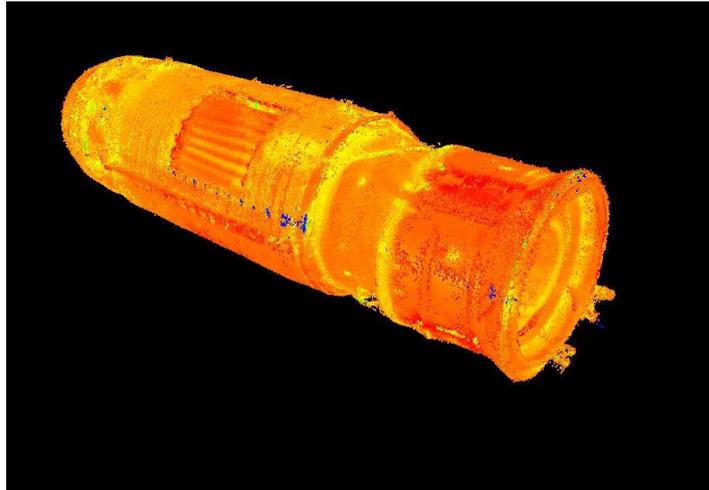


Figura 44: Nube de puntos del post-combustor.

Para finalizar este proceso, antes de poder exportar la nube de puntos para seguir trabajando con otros programas es necesario unificar la nube de puntos. Por último, tras colocarse en la vista que se quiera exportar, se elige la opción de exportar con el botón izquierdo del ratón. Para pasar a trabajar con el 3DReshaper, es imprescindible exportar las nubes de puntos en formato PTS, para luego importarlas en este nuevo software.

En el 3DReshaper existen varios módulos de trabajo, para esta parte se ha usado sobre todo la opción de “Nube”, desde donde es posible modificar y limpiar la nube de puntos.

Por sencillez, debido a falta de experiencia previa con el 3DReshaper, se empezó a trabajar con la parte del post-combustor, ya que geoméricamente es más sencillo. La parte exterior de la nube de la que se parte tiene un nivel de ruido bajo, como se puede observar en la Figura 45. No obstante, si se observa la Figura 46, se puede ver como en el interior el nivel de ruido es considerable. Por ello se ha considerado oportuno el realizar una segunda limpieza de la nube de puntos.

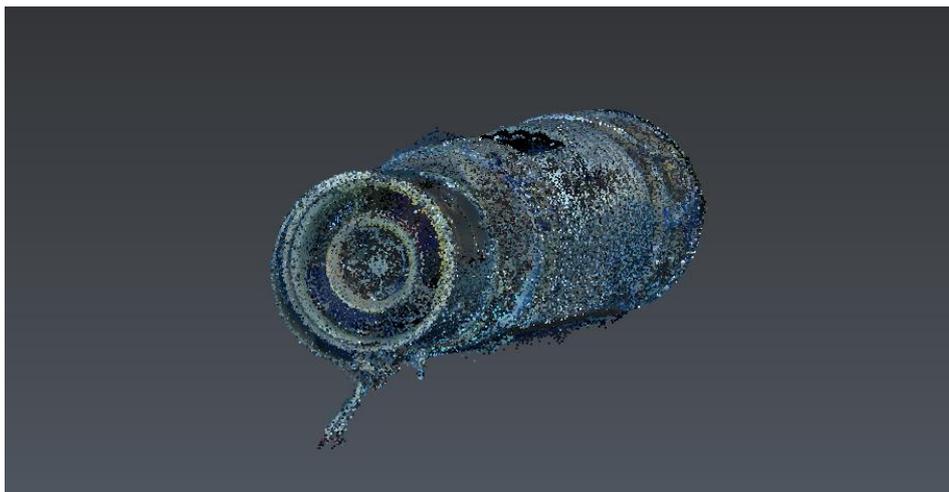


Figura 45: Post-combustor inicial en 3DReshaper.

Se comienza partiendo la geometría en varias partes para facilitar su limpieza y realizarla de forma escalonada, ya que hay distintas problemáticas a lo largo del elemento. En el caso del post-combustor la división se realizó en 5 partes: la entrada, la zona de los inyectores, la cámara de combustión, el

convergente de la tobera hasta la garganta, y la salida de la tobera. El proceso que se ha seguido con todos es parecido.

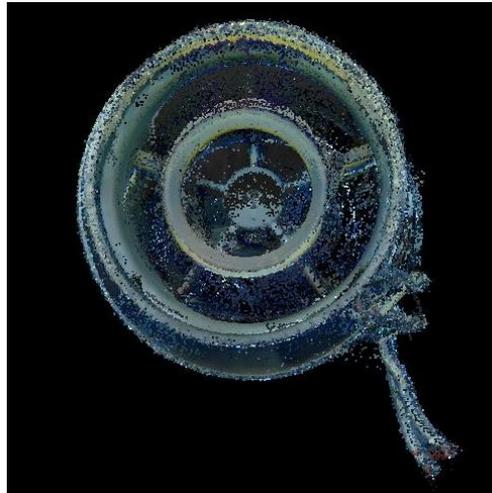


Figura 46: Detalle de la entrada del post-combustor.

Una de las herramientas más interesantes que ofrece 3DReshaper es la de "ruido". Desde aquí, para la parte seleccionada, se marcan en distintos colores el nivel de ruido y los puntos buenos. Se puede variar la "intensidad", o el porcentaje de puntos que el programa considera como ruido, teniendo un nivel de 0 a 99. Por lo tanto, se tiene la opción de borrar una gran cantidad de puntos sin interés.

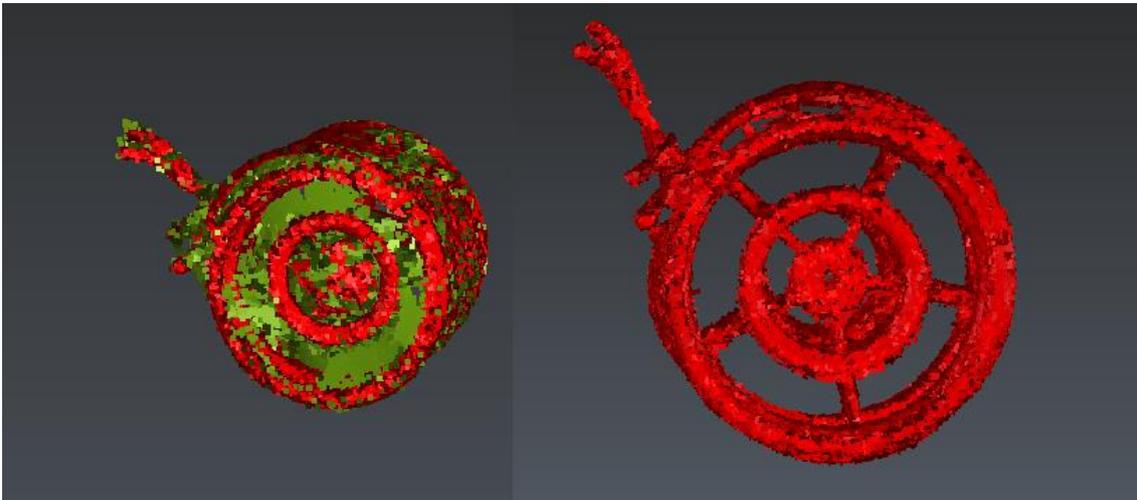


Figura 47: Resultados de la herramienta "ruido".

En la *Figura 47* se puede observar el nivel de ruido que se tiene a la entrada del post-combustor y el resultado después de esta operación.

El siguiente paso es eliminar los puntos que hayan podido quedar después de esta operación. La herramienta usada es parecida a la "fence" de Leica Cyclone, con la ventaja de que desde 3DReshaper se puede crear un *spline* siguiendo la forma a limpiar, siendo después modificable para ajustarla más a la geometría. El resultado final de la limpieza de la entrada al post-combustor se puede ver en la *Figura 48*.



Figura 48: Resultado de la limpieza de la entrada al post-combustor.

Estas operaciones se han repetido con el resto del componente hasta que se ha conseguido el nivel de detalle que se ha considerado aceptable.

Una vez se tiene el post-combustor limpio, se pasó a limpiar el núcleo del motor. En esta parte, la problemática es más evidente, ya que, por problemas de reflejos creados por la luz solar durante la toma de datos, se tiene un gran nivel de ruido en la entrada como se puede ver en la Figura 49. Este es más evidente en la parte de los álabes del rotor al tener estos un espesor pequeño.

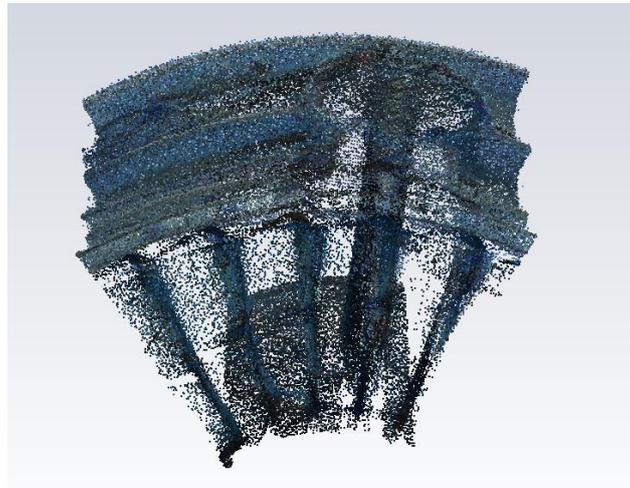


Figura 49: Relejos a la entrada del compresor.

Por este motivo se fraccionó más la geometría. Inicialmente se tienen 6 partes a ver, la zona de la APU, la entrada de aire, el compresor, la zona de los inyectores, la cámara de combustión y, por último, la de la turbina. Durante el proceso, a su vez, se dividió la zona del compresor en las distintas etapas del rotor, separando además la carcasa inferior de la parte abierta, ya que en la zona de la carcasa se tienen, además, varios sistemas auxiliares y cableado. También se fraccionó la entrada y el compresor de forma radial, ya que, según la incidencia de la luz, se tenía un nivel de ruido u otro.

Una vez utilizada la herramienta de “ruido” los resultados mejoran considerablemente, como se puede observar en la figura. No obstante, todavía es necesario eliminar algunos puntos que no interesan. Ejemplo de ello es la zona donde está colocada la cadena que restringe el movimiento del rotor, visible

en la Figura 50. Esta parte no es interesante para el estudio, sin embargo, el programa no puede reconocerla como ruido por la gran densidad de puntos que hay en la zona. Por esto se debe eliminar manualmente.

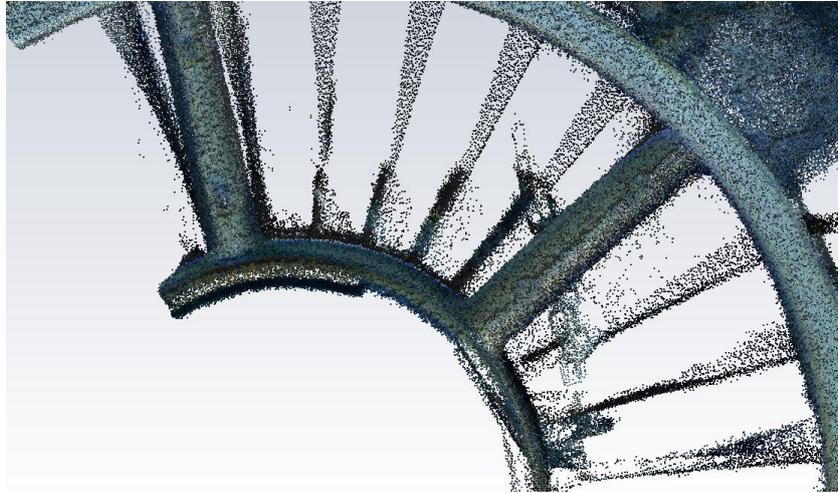


Figura 50: Detalle de la entrada al compresor.

Los resultados finales obtenidos con este método han sido satisfactorios, consiguiendo reducir enormemente el ruido y puntos que no eran de interés para el trabajo de forma considerable. Aunque esta parte del proceso pueda llegar a resultar tediosa según la complejidad y el nivel de detalle del objeto de estudio, el tiempo de trabajo es moderado y los resultados que se obtienen son precisos y la calidad de la nube de puntos final aumenta considerablemente.

3. Modelización 3D

El siguiente paso a realizar fue la modelización. Este proceso consiste en crear un modelo sólido a partir de las nubes de puntos con el que poder trabajar a continuación. Una vez se tiene el modelo, se puede pasar a imprimirlo en 3D, por ejemplo, o a modificarlo, crear cortes y secciones, etc.

El primer paso que se realiza para obtener el modelo 3D es crear una malla y, para esto, se sigue trabajando con 3DReshaper. Para crear la malla se debe trabajar desde la pestaña de “cuadrícula”, donde hay varias opciones para la creación de la malla, según sea esta en 2D, 3D o de un objeto esférico. Además, existen herramientas para modificar la malla una vez creada.

Para la creación de la malla existen 2 opciones principales: malla en dos pasos y muestreo normal. La opción de dos pasos incluye en el proceso la opción de refinar la malla. En la Figura 51 se muestran las distintas opciones de la herramienta de mallado 3D.

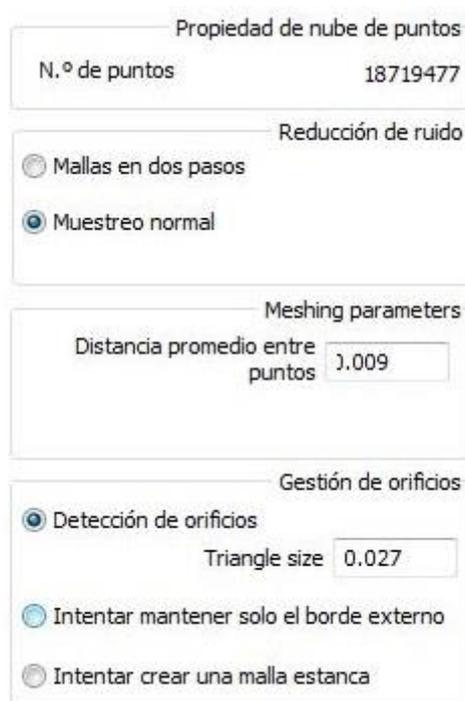


Figura 51: Creación de malla en 3DReshaper.

Al igual que durante la limpieza, cada parte del turbojet tiene una problemática distinta. Por esto mismo, tras tratar de crear una malla global tanto del post-combustor como del núcleo, sin resultados satisfactorios, se opta por dividir la nube de puntos con la opción de unir a posteriori las distintas mallas en un solo bloque. Se utilizan tanto la detección de orificios como la opción de malla estanca, ya que en algunas zonas más sencillas de mallar, como por ejemplo la cámara de combustión del post-combustor, la utilización de triángulos grandes es suficiente para realizar la tarea. Los resultados del mallado se muestran en la Figura 52.

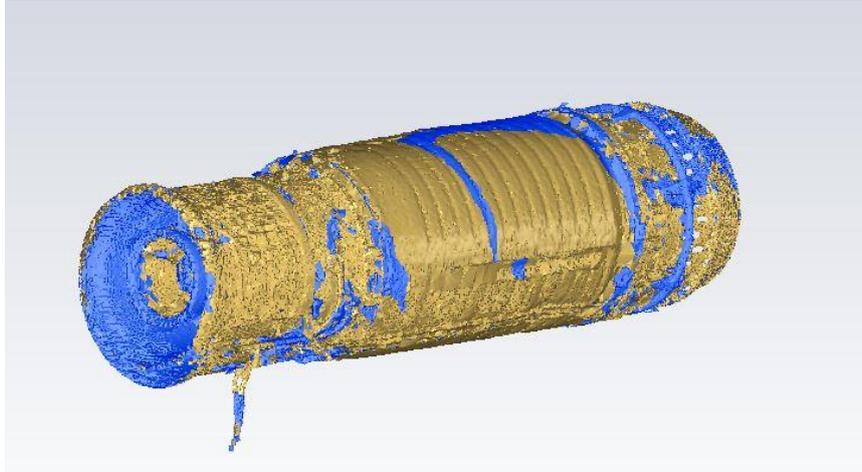


Figura 52: Mallado del post-combustor.

Para el núcleo del turbojet se realizaron las mismas particiones que durante el proceso de limpieza de la nube de puntos. Se comienza por la APU, separándola de la nube de puntos para simplificar el proceso. Para el mallado, se realiza un mallado en dos pasos, con la opción de mantener el borde externo, ya que de esta forma se obtenían mejores resultados. El segundo paso consiste en refinar la malla, creando puntos nuevos o utilizando los puntos disponibles en la nube original. Una vez refinada, se puede pasar a editar la malla, cerrando agujeros, suavizándola, etc. Se muestran en la Figura 53 los resultados obtenidos en este paso.

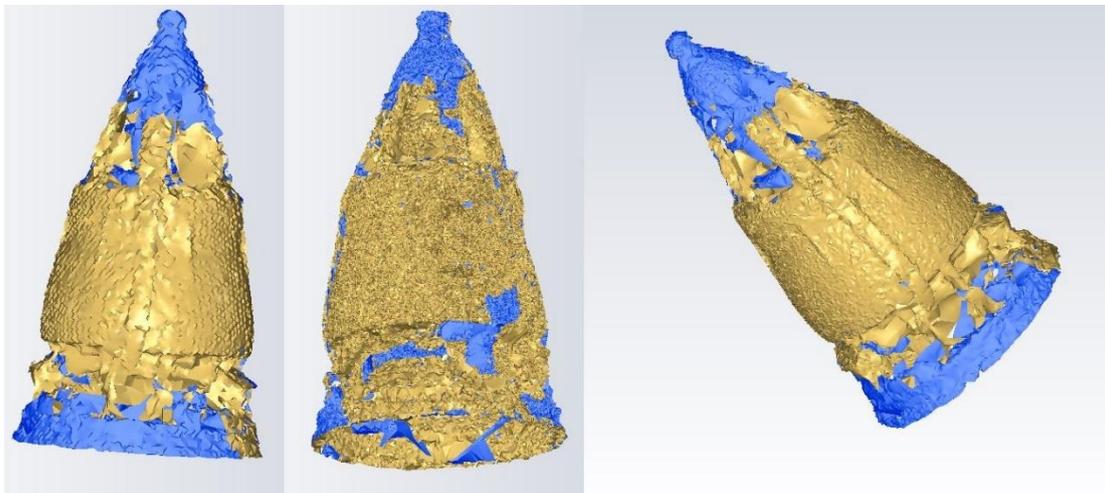


Figura 53: Proceso de mallado del APU.

En el caso del núcleo, el resto de partes se han realizado o bien con la opción de detección de orificios o con la de mantener el borde externo, ya que hay muchos detalles que la opción de malla estanca no podía seguir con exactitud. Si se crea una malla estanca, el programa no reconoce el paso entre los álabes y crea una sola corona radial, cosa que no sucede si se le indica que detecte orificios. Los resultados finales del mallado se pueden observar en la Figura 54.

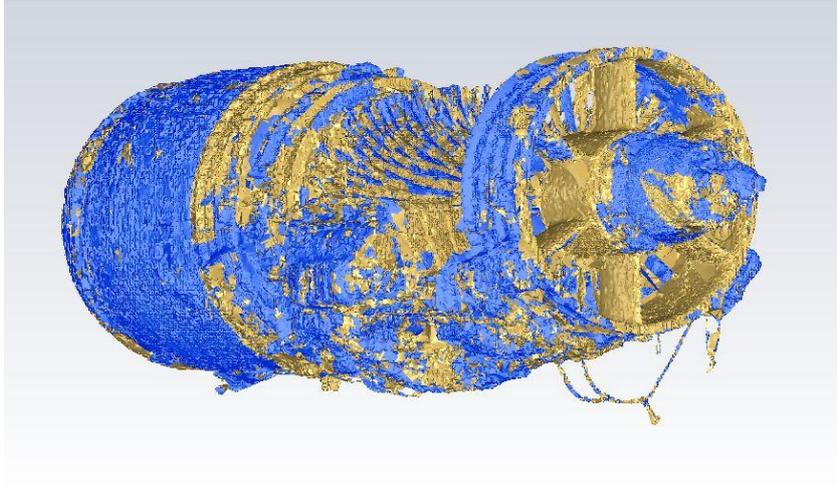


Figura 54: Mallado del núcleo.

4. Resultados

Una vez se ha dado por finalizado el proceso de modelización, se pasa a analizar los resultados obtenidos, comenzando por la nube de puntos.

El elemento que más complejidad presenta es el núcleo del motor, ya que tiene gran cantidad de álabes y sistemas auxiliares, aunque estos eran los elementos que más interesaban de obtener para comprobar la capacidad del láser escáner para tomar detalles de superficies complejas. Se puede ver el resultado final en la Figura 55.

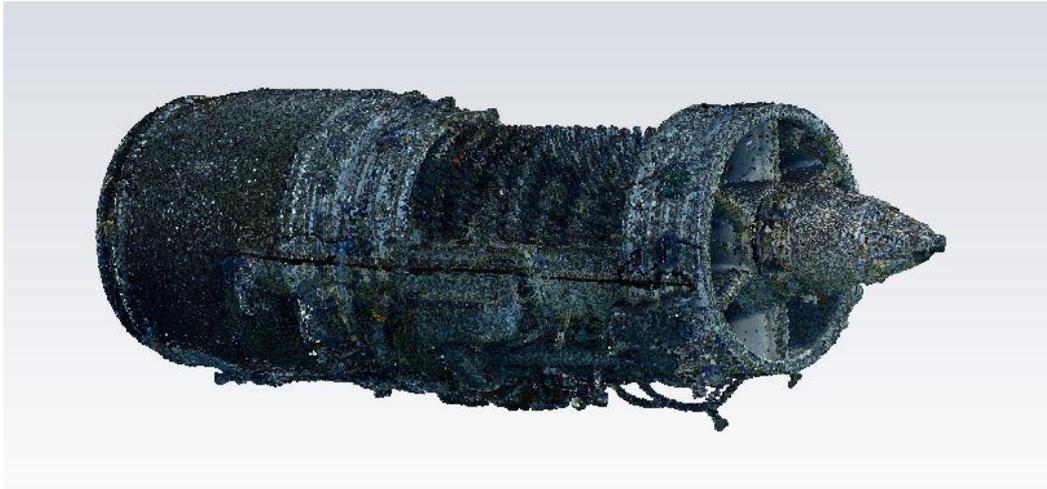


Figura 55: Resultado final de la nube de puntos del núcleo.



Figura 56: Resultado final de la nube de puntos del post-combustor.

Entrando más en detalle, en la Figura 57 se muestran las primeras etapas del compresor. Los álabes se han conseguido captar con remarcable fidelidad a pesar del nivel de ruido que se tenía en un principio, como consecuencia de la posición del Sol a la hora de realizar los estacionamientos.

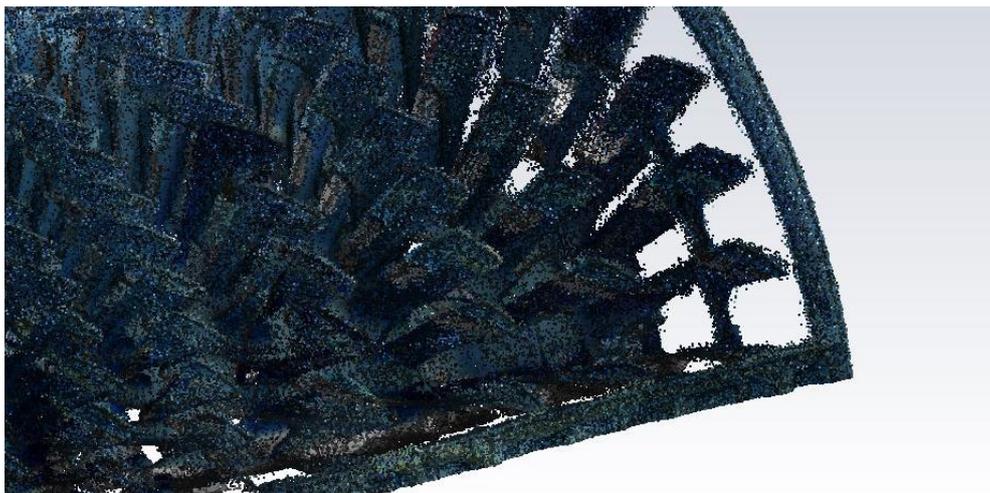


Figura 57: Álabes del compresor.

Como se puede observar en la Figura 58, los resultados de la limpieza provocan un aumento considerable en la calidad de la nube de puntos. Es más que remarcable el hecho de que, tras realizar una sencilla limpieza de puntos, se consigue visualizar perfectamente la geometría de los álabes que componen el rotor, aunque en un principio estos no podían distinguirse los unos de los otros.



Figura 58: Etapa 5 del compresor antes y después de la limpieza.

La parte del post-combustor se presenta como un elemento más accesible por su sencilla geometría. El mayor reto que este suponía era el poder unir los estacionamientos realizados dentro de este con el resto de los escaneos. No obstante, esto se pudo realizar sin ningún problema, como se puede comprobar en la Figura 59, donde se ve el espacio entre la cámara de combustión y la carcasa, por donde pasará el aire de refrigeración. Los resultados de la nube de puntos del post-combustor se pueden ver en la Figura 56.

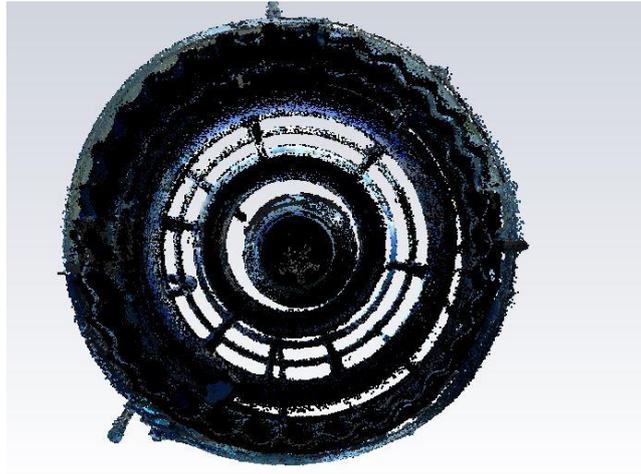


Figura 59: Detalle del interior del post-combustor.

Los resultados de la nube de puntos han sido los esperados. Se consigue tener un alto nivel de detalle y un buen alineamiento.

Con el segundo paso del modelado, es decir, con el mallado, los resultados no han sido tan satisfactorios. Se intentaron hacer varias mallas, pero en todas se tienen los mismos problemas que se pueden ver en la Figura 62. El color dorado de la malla corresponde a la cara exterior de la malla, mientras que el azul sería la cara exterior. El mayor problema que se ha tenido al realizar el mallado es que el programa invierte los polígonos sin razón aparente.

Para intentar buscar una explicación y una forma de solucionar este problema, se intentó trabajar con elementos más pequeños de nuestra nube de puntos, como pueden ser los álabes del rotor. Estos elementos son planos y su superficie lisa no debería ser difícil de mallar. En la Figura 60 se muestran los álabes elegidos para esta prueba, ya que estos fueron los que se creyó con mayor nivel de detalle y número de puntos.

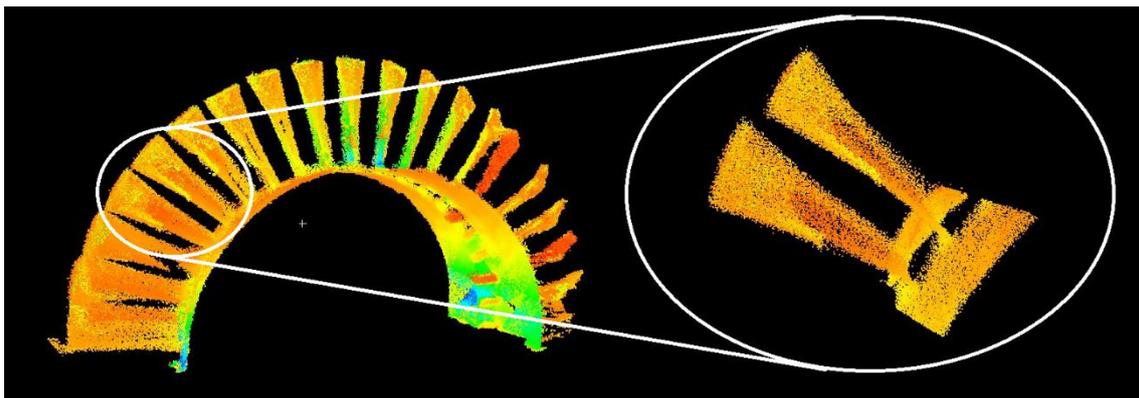


Figura 60: Álabes usados en el mallado del 4º escalonamiento del compresor.

Para el mallado de los álabes, el elemento que se pensó más crítico fue el espesor del perfil. Estos álabes tienen un espesor de 3mm, según medidas del Leica Cyclone, por lo que para el mallado se ha optado por usar una distancia media entre puntos de 1mm. Se ha optado por una malla en dos pasos por los problemas que se observaron con anterioridad y para evitar zonas sin mallas, se selecciona la opción de malla estanca. Tras varios intentos, los resultados obtenidos se pueden ver en la Figura 61.

Se observan dos problemas principales, la inversión de la malla sin razón aparente y que el álabe resultante no tiene espesor.

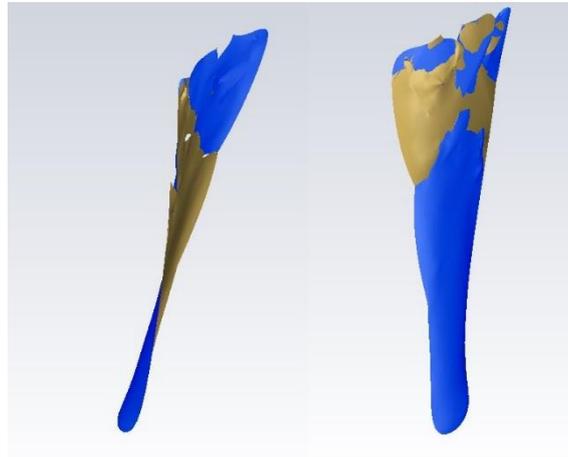


Figura 61: Mallado de un álabe de compresor.

Este problema se puede solucionar editando la malla a posteriori, pero, como se puede ver en la Figura 63, las zonas donde esto sucede son demasiado numerosas, por lo que el tiempo de trabajo que llevaría este proceso sería considerable.

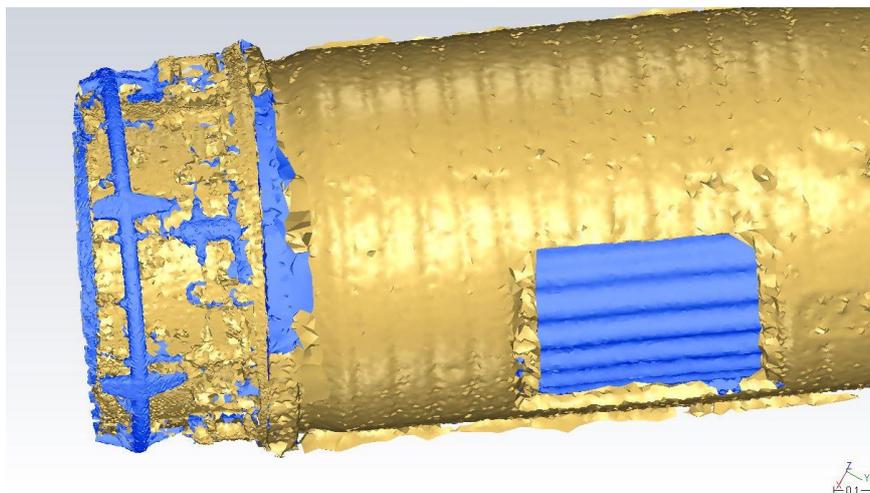


Figura 62: Detalle del mallado del post-combustor.

Después de varios intentos de mallado, este problema se repetía en todos con una frecuencia parecida. Después de sopesar las posibles opciones, se decidió que no valía la pena continuar con el modelado, ya que, como se ha dicho anteriormente, el nivel de trabajo que era necesario poner para solucionar este problema es demasiado grande como para que resultase interesante continuar con el proyecto.

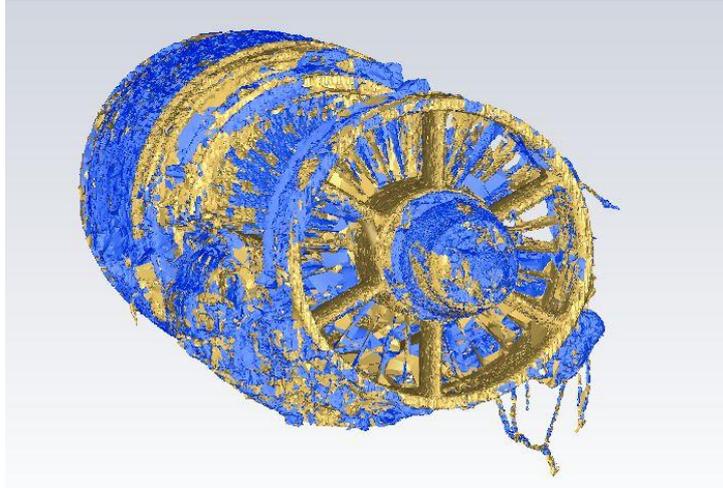


Figura 63: Mallado del núcleo.

5. Presupuesto

A continuación, se va a pasar a exponer los distintos gastos, de forma aproximada, que se han producido durante la realización de este proyecto. Se especifican los precios de cada concepto para obtener, finalmente, una estimación del coste total que ha supuesto. Esto permitirá realizar una valoración sobre los beneficios a la hora de aplicar este tipo de tecnología, de forma que se pueda estudiar su rentabilidad en el campo de la Ingeniería Aeroespacial.

Para realizar este estudio, se tienen en cuenta diversos aspectos como el sueldo del ingeniero a cargo del proyecto y las licencias de los distintos softwares utilizados. Algunos de estos cálculos se han realizado estimando el precio de determinados conceptos, como puede ser el precio de la luz.

El primer gasto que se ha tenido en cuenta es el sueldo en bruto de un Ingeniero Aeroespacial. Se asume que el proyecto se ha desarrollado aproximadamente en un mes, trabajando de 8 a 10 horas diarias. Tomándose una media de 9 horas de trabajo al día, se compara a una jornada laboral normal de 40 horas a la semana, por lo que se puede traducir en unas 6 semanas de trabajo.

Concepto	Sueldo bruto	Tiempo	Coste
Ingeniero	1.800 €/mes	30 días	2.700€

Tabla 2: Presupuesto del sueldo del Ingeniero encargado del proyecto.

Para el proceso de toma de datos, el único gasto a tener en cuenta es el alquiler del equipo láser escáner, puesto que el Atar 09C objeto de este estudio se ubica dentro de las instalaciones de la UPV y no se tienen gastos de desplazamiento. El proceso de escaneado llevó aproximadamente 5 horas. No obstante, el equipo se debe alquilar por días, sin importar las horas que se use.

Concepto	Precio	Tiempo	Coste
Trimble TX6	600 €/día	1 día	600 €

Tabla 3: Presupuesto de costes de la toma de datos.

Una parte importante del gasto es la adquisición del equipo informático, así como las licencias de los distintos softwares utilizados. Para el cálculo del presupuesto se ha contabilizado el gasto que ha supuesto el proyecto, asumiendo que tanto el ordenador como las licencias eran recursos que ya se poseían. Los costes de esta parte serían pues, por tanto, una parte de su precio completo.

Concepto	Precio	Tiempo	Coste
Equipo informático	1.000 €/2años	240 h	13,70 €
Energía consumida	44W		1.523,81 €
Trimble Realworks	1.800 €/1 año	2 h	0,41 €
Leica Cyclone	1.840 €/1 año	60 h	12,60 €
3DReshaper	1.820 €/1 año	170 h	35,32 €
Total			1.583,79 €

Tabla 4: Presupuesto de costes del post-procesado.

En la Tabla 4 se han considerado distintos aspectos. El coste energético se ha calculado teniendo en cuenta que el precio de la luz actualmente se halla alrededor de 0,1443 €/kWh y que se han trabajado alrededor de 8 horas diarias durante los 35 días de proyecto. Por otra parte, el equipo informático no tiene un tiempo de utilidad fijo. Se supone un precio estándar para un equipo con buenas prestaciones y se asume que su tiempo de utilidad será de 2 años, sin tener en cuenta la actualización o cambio de componentes. Para el resto de software, la duración normal de la licencia es de un año.

Finalmente, en la Tabla 5 se muestra un resumen de todos los gastos producidos separados en apartados, así como un valor cómputo total. También se han realizado los cálculos de costes teniendo en cuenta la aplicación del 21% de IVA en todos los gastos exceptuando el sueldo bruto del Ingeniero.

Concepto	Coste	IVA	Coste+IVA
Coste Ingeniero	2.700 €	0%	2.700 €
Coste Medición	600 €	21%	726 €
Coste Computacional	1.583,79 €	21%	1.916,39 €
		Total	5.342,39 €

Tabla 5: Presupuesto total del proyecto.

6. Conclusiones

Una vez se ha finalizado el desarrollo del trabajo, se pueden obtener una serie de conclusiones atendiendo a distintos aspectos del proyecto.

En primer lugar, la calidad y precisión del modelo obtenido a partir del láser escáner Trimble TX6 se puede considerar suficiente como para buscar aplicaciones a este tipo de tecnología dentro de la industria. Como se ha visto en Registro, aunque el umbral de error de cada estacionamiento por separado sea de 6mm, el error medio que se consigue para la nube de puntos bruta es de 1mm.

Además, hay que mencionar que, gracias al proceso de registro y a la planificación de los estacionamientos, el error de alineación de la nube de puntos final disminuye de forma considerable y sin un gran coste de trabajo. Para este proyecto se han realizado 32 uniones manualmente, pero el número final es de 378 uniones. Esto confiere al modelo una gran fiabilidad.

Aunque la luz solar no debería afectar a las medidas, en los resultados de los estacionamientos se han visto altos niveles de ruido, sobre todo en la zona de la entrada y el compresor. Esto puede deberse a la reflectividad de los materiales y a la posición del Sol cuando se tomaron las medidas. No obstante, se ha demostrado que con el post-procesado este problema se puede solucionar con facilidad y los resultados que se obtienen son fieles a la realidad.

Por todo esto, se cree conveniente afirmar que la nube de puntos obtenida ha cumplido con las expectativas que se tenían para este trabajo.

No obstante, dentro del proceso de modelado no se ha llegado a los objetivos propuestos. El principal problema fueron las mallas obtenidas con el 3DReshaper, ya que en algunos puntos el programa invertía la malla sin razón y el post-procesado necesario para arreglar esto en una geometría tan compleja no era viable. Sería conveniente encontrar otro programa para tratar nubes de puntos enfocado a maquinaria y piezas industriales, ya que los otros programas que se barajaron para continuar con el modelado habían nacido bajo las mismas premisas y aplicaciones que el 3DReshaper. Otra opción que se barajó para poder trabajar con este método es el de la ingeniería inversa. A partir de la nube de puntos, crear desde splines por interpolación, volúmenes y planos para construir de nuevo el objeto de estudio. Esta opción queda como un punto interesante para futuros estudios.

Así pues, con estos datos se concluye que, para geometrías complejas propias de piezas o máquinas industriales, aunque la tecnología de toma de datos permita conseguir una nube de puntos de buena calidad, los cauces tradicionales usados con esta tecnología no son del todo óptimos para conseguir un modelo en 3D y se deberían buscar otras opciones.

Bibliografía

Conservatoire air et space d'Aquitaine. n.d. www.caea.info.

Leica Geosystem AG. n.d. leica-geosystems.com.

Priego de los Santos, Enrique. *Topografía. Instrumentación y observaciones topográficas*. Valencia: Universidad Politécnica de Valencia, 2015.

Riveiro Rodríguez, Belén, Julia Armesto González, Higinio González Jorge, and Pedro Arias Sánchez. *Manual práctico de modelado 3D mediante escáner láser terrestre*. Vigo: Universidad de Vigo, 2011.

Technodigit. *3DReshaper*. n.d. www.3dreshaper.com.

Trimble Inc. *Hoja de datos Trimble TX6 escáner láser*. 2016.

—. *Inside Trimble TX6 and TX8- Deep Dive into Lightning Technology*. 2016.

—. *User's Guide TrimbleRealWorks*. 2017.