



Centro Universitario de la Defensa en la Escuela Naval Militar

TRABAJO FIN DE GRADO

Modelado 3D de piezas mecánicas por métodos fotogramétricos

Grado en Ingeniería Mecánica

ALUMNO: Rafael de Lora Borges

DIRECTOR: Iván Puente Luna

CURSO ACADÉMICO: 2023-2024

Universida_{de}Vigo



Centro Universitario de la Defensa en la Escuela Naval Militar

TRABAJO FIN DE GRADO

Modelado 3D de piezas mecánicas por métodos fotogramétricos

Grado en Ingeniería Mecánica
Intensificación en Tecnología Naval
Infantería de Marina

Universida_{de}Vigo

RESUMEN

En los campos de la Ingeniería Mecánica y la producción industrial, la retroingeniería representa el camino para generar la documentación gráfica de piezas y ensamblajes ya existentes. Su principal objetivo consiste en obtener la información tridimensional necesaria para reconstruir un modelo paramétrico preciso. Por tanto, resulta particularmente útil cuando no se dispone de un modelo digital o de sus planos y modelos CAD, o cuando la pieza se ha visto afectada por el desgaste, modificando así su geometría respecto a su diseño original.

En este contexto, la fotogrametría de objeto cercano se presenta como una herramienta útil en el proceso de documentación. Con este trabajo se busca digitalizar diversas piezas mecánicas mediante esta disciplina, a partir de la toma y procesamiento de una serie de fotografías convergentes, con el objetivo de obtener modelos fiables con medidas geométricas precisas. Además, se realizarán pruebas con distintas técnicas de digitalización 3D en las que se evaluará tanto el nivel de detalle alcanzado de los modelos generados como su compatibilidad con Autodesk Inventor, software empleado en el ámbito de la Ingeniería Mecánica, donde se podrían llevar a cabo simulaciones dinámicas y análisis por elementos finitos.

PALABRAS CLAVE

Fotogrametría, nube de puntos, LiDAR, escáner láser, luz estructurada

AGRADECIMIENTOS

Después de cinco años en la Escuela Naval Militar, éste se trata del culmen de mi formación donde tengo que agradecer a mi familia y a mi novia por hacerme más llevadero mi paso por Marín. Muchas gracias por estar siempre ahí orgullosos de todos los hitos que he ido cumpliendo estos años.

También quiero agradecer al profesor Iván Puente Luna por haberme guiado a lo largo de este trabajo, siempre estar dispuesto a ayudar y demostrar ser un gran profesional sin dejar de ser cercano con el alumno.

Por último, agradecer a mis compañeros de la promoción 424-154 por tantos momentos vividos a su lado. No me cabe ninguna duda de que el mayor tesoro que me llevo de esta experiencia son y serán mis compañeros de armas.

CONTENIDO

Contenido	1
Índice de Figuras	3
Índice de Tablas.....	5
1 Introducción y objetivos	7
1.1 Introducción	7
1.2 Planteamiento del problema.....	8
1.3 Objetivos	8
2 Estado del arte	9
2.1 Fotogrametría	9
2.1.1 Definición y origen	9
2.1.2 Clasificación	11
2.1.3 Fotogrametría de objeto cercano	11
2.2 Escaneado 3D.....	14
2.2.1 Luz estructurada.....	14
2.2.2 LiDAR	15
2.2.3 Aplicabilidad de estas técnicas	17
3 Desarrollo del TFG.....	21
3.1 Descripción general.....	21
3.2 Piezas modeladas	22
3.2.1 Bomba centrífuga.....	22
3.2.2 Centrifugadora Alfa Laval	22
3.2.3 Centrifugadora separadora de aceite.....	22
3.2.4 Motor de combustión interna de cuatro tiempos	23
3.3 Hardware utilizado	23
3.3.1 Iphone 13	23
3.3.2 Artec Eva	24
3.3.3 ScanStation P16	25
3.3.4 iPad Pro 11"	26
3.4 Software utilizado	27
3.4.1 Agisoft Metashape	27
3.4.2 Artec Studio 14.....	28
3.4.3 Scaniverse	28
3.4.4 Leica Cyclone REGISTER 360	29
3.4.5 CloudCompare v2.....	29

3.4.6 Autodesk Inventor Professional 2024.....	30
3.5 Metodología	30
3.5.1 Proceso fotogramétrico	30
3.5.1.1 Recolección de imágenes	30
3.5.1.2 Importación de imágenes.....	31
3.5.1.3 Alineamiento de las fotos	32
3.5.1.4 Generación de la nube de puntos.....	33
3.5.1.5 Generación del modelo y su textura	34
3.5.2 Proceso de escaneado láser	35
3.5.2.1 Escaneado	35
3.5.2.2 Generación de la nube de puntos.....	35
3.5.3 Proceso con luz estructurada	36
3.5.3.1 Activación y preparación.....	36
3.5.3.2 Escaneado	37
3.5.3.3 Uso del autopiloto	38
3.5.3.4 Proceso manual.....	39
3.5.3.5 Medir, exportar y compartir	40
3.5.4 Proceso con iPad LiDAR.....	42
4 Resultados	45
4.1 Bomba centrífuga con fotogrametría	45
4.1.1 Orientación de las fotografías y generación de la nube de puntos dispersa	45
4.1.2 Nube de puntos densa	47
4.1.3 Generación de la malla y la textura	48
4.2 Motor de cuatro tiempos con Scan Station P16	49
4.3 Centrifugadora separadora de aceite con luz estructurada.....	50
4.4 Centrifugadora Alfa Laval con iPad LiDAR	50
4.5 Comparación entre las distintas técnicas de modelado 3D	51
4.6 Importación de los modelos en Autodesk Inventor	54
5 Conclusiones y líneas futuras	55
5.1 Conclusiones	55
5.2 Líneas futuras	56
6 Bibliografía.....	57
Anexo I: Implicaciones Sociales, Económicas y Ambientales	63
Anexo II: Reflexiones Éticas y Sociales	64
Anexo III: Modelos 3d y nubes de puntos.....	65

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 2-1 Fotogrametría Aérea [11]	10
Figura 2-2 Modelo Digital del Terreno [14].....	11
Figura 2-3 Fotogrametría de objeto cercano [16].....	12
Figura 2-4 Luz estructurada [21]	14
Figura 2-5 Longitud de onda para distintos dispositivos: cámara, LiDAR y RADAR [25]	15
Figura 2-6 Principio de funcionamiento de un escáner láser [28].....	16
Figura 2-7 Índice de vegetación [30].....	17
Figura 2-8 Modelo 3D dentadura [32].....	18
Figura 2-9 Modelo 3D de la escena de un crimen [33]	18
Figura 2-10 Escaneo 3D de artefactos en el Partenón [34]	19
Figura 2-11 Escaneo 3D de la tumba de Nefertiti [37]	19
Figura 3-1 Esquema de sistemas usados	21
Figura 3-2 Bomba centrífuga (izquierda) y centrifugadora Alfa Laval (derecha)	22
Figura 3-3 Centrifugadora separadora de aceite (izquierda) y motor de combustión interna de cuatro tiempos (derecha).....	23
Figura 3-4 Iphone 13 [45].....	24
Figura 3-5 Escáner 3D Artec Eva.....	24
Figura 3-6 Escáner láser Leica ScanStation P16 [48]	25
Figura 3-7 Campo de visión (FOV) del escáner láser Leica ScanStation P16 [49]	26
Figura 3-8 iPad Pro 11 pulgadas [50].....	27
Figura 3-9 Logo de Agisoft Metashape [51]	27
Figura 3-10 Logo Artec Studio 14 [52].....	28
Figura 3-11 Logo Scaniverse [54].....	29
Figura 3-12 Logo de Cyclone Register 360 [56].....	29
Figura 3-13 Logo de CloudCompare v2 [57]	30
Figura 3-14 Logo de Autodesk Inventor Professional 2024 [58].....	30
Figura 3-15 Dianas usadas para la fotogrametría [59]	31
Figura 3-16 Importación de las imágenes en Agisoft Metashape	32
Figura 3-17 Alineamiento de las imágenes en Agisoft Metashape	33
Figura 3-18 Creación de la nube de puntos en Agisoft Metashape.....	34
Figura 3-19 Uso del ScanStation P16.....	35
Figura 3-20 Uso del escáner Artec Eva.....	36
Figura 3-21 Interfaz del proceso de escaneado con luz estructurada	37
Figura 3-22 Frames por segundo de los distintos escaneos.....	38
Figura 3-23 Interfaz del modo autopiloto de Artec studio	39

Figura 3-24 Proceso de edición para eliminar defectos del modelo.....	40
Figura 3-25 Herramienta de medición lineal sobre el modelo	40
Figura 3-26 Herramienta de medición geodésica sobre el modelo	41
Figura 3-27 Interfaz de elección del tamaño de escaneo.....	42
Figura 3-28 Nube de puntos obtenida con Scaniverse	43
Figura 4-1 Orientación de las fotografías.....	46
Figura 4-2 Orientación de las fotografías con contenido	46
Figura 4-3 Ejemplo de nube de puntos dispersa.....	47
Figura 4-4 Nube de puntos densa	47
Figura 4-5 De izquierda a derecha: modelo 3D texturizado, modelo de malla y modelo 3D con contorno eliminado.	48
Figura 4-6 Nube de puntos en <i>CloudCompare</i> bomba centrífuga.....	49
Figura 4-7 Nube de puntos en <i>CloudCompare</i> motor cuatro tiempos	49
Figura 4-8 Nube de puntos en <i>CloudCompare</i> centrifugadora separadora de aceite	50
Figura 4-9 Nube de puntos en <i>CloudCompare</i> centrifugadora Alfa Laval	50
Figura 4-10 De izquierda a derecha: Fotografía y modelo 3D obtenido por fotogrametría.....	51
Figura 4-12 Modelo mallado de centrifugadora Alfa Laval en Autodesk Inventor	54

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 3-1 Resumen con las dimensiones y características técnicas del Leica Scan Station P16 [49]	26
Tabla 3-2 Soluciones a características de las superficies	36
Tabla 3-3 Formatos que permite exportar Artec studio.....	41
Tabla 3-4 Dispositivos de Apple compatibles con Scaniverse.....	43
Tabla 4-1 Comparación de las cuatro disciplinas.....	52
Tabla 4-2 Comparación de los resultados obtenidos.....	53

1 INTRODUCCIÓN Y OBJETIVOS

1.1 Introducción

En muchas áreas de la industria, resulta conveniente crear modelos geométricos de objetos físicos existentes. Mientras que los procesos de ingeniería convencionales transforman un modelo o un diseño en un objeto real, con la retroingeniería o ingeniería inversa (RE, por sus siglas en inglés), las piezas reales se convierten en modelos digitales, con el propósito de que estos modelos 3D definan fielmente su diseño original. No cabe duda de que la existencia de un modelo digitalizado proporciona enormes ventajas al mejorar la calidad y la eficiencia del diseño, su análisis y fabricación. De ahí que un proceso de ingeniería inversa comience con la medida de un objeto existente a partir del cual se genera un modelo sólido sobre el que se pueden explotar las ventajas de las tecnologías CAD/CAE/CAM.

Un proceso crucial en la ingeniería inversa es la adquisición de los datos. Existen para ello distintos métodos, divididos en dos grandes grupos: los métodos táctiles y los no contactivos. Los primeros implican el contacto físico directo con el objeto para medir su forma y características. En este grupo se encuentran los métodos tradicionales de medición, como los micrómetros y reglas, sondas o palpadores que hacen contacto directo para registrar puntos y superficies. En un segundo grupo, están aquellas técnicas ópticas o acústicas, que emplean la luz o el sonido, para mapear la superficie. Es en concreto en los métodos ópticos, donde se va a centrar el presente Trabajo de Fin de Grado, al ser probablemente los más populares y proporcionar ratios de adquisición de datos relativamente rápidos.

Tanto es así, que las técnicas de digitalización ópticas aplicadas al campo del Diseño Asistido por Ordenador (CAD) han sido ampliamente estudiadas en los últimos años, debido al desarrollo de nuevas tecnologías y al aumento de sus aplicaciones. Existen, de hecho, un gran número de publicaciones que abordan estas técnicas, de carácter interdisciplinario, aplicadas en campos tan diversos como la conservación, la documentación y restauración del patrimonio cultural [1], las industrias aeroespacial [2], automotriz [3] y protésica [4], la medicina [5][6] y la ingeniería mecánica [7].

Es por por ello que se estudiarán tres técnicas: la fotogrametría, que se remonta a finales del siglo XIX, y el LiDAR y la luz estructurada, que son tecnologías más recientes que surgen en la segunda mitad del siglo XX. Estas últimas se denominan también métodos activos, y difieren de métodos pasivos como la fotogrametría, en que necesitan luz artificial para su funcionamiento. Así, por ejemplo, un sistema de luz estructurada necesita proyectar patrones de luz sobre una superficie de interés para capturar una imagen del patrón resultante reflejado por la superficie. En el caso de los sistemas LiDAR, es necesaria la medición de los tiempos de vuelo de los haces de luz para poder modelar los objetos. En el segundo capítulo del presente trabajo se proporcionará más detalle sobre estas técnicas, y a lo largo del documento se describirán los logros y desafíos encontrados en la creación de los modelos geométricos utilizando estas técnicas.

1.2 Planteamiento del problema

En los campos de la Ingeniería mecánica y la producción industrial es frecuente encontrarse con la necesidad de reconstruir modelos tridimensionales de piezas mecánicas, bien para replicar objetos ya existentes o para la fabricación de piezas de recambio de máquinas que han sido diseñadas por otros y de las que no se poseen sus diseños originales. En otros casos, se necesitan en la reingeniería de procesos, cuando se ensayan, analizan y modifican estos modelos para crear un nuevo producto mejorado [8]. O incluso, estas piezas, con el tiempo y su uso, pueden sufrir deformaciones, corrosión y otros daños que afectan su geometría original y por ende, su correcto funcionamiento. Su funcionamiento depende de sus propiedades y geometría, pero también de las relaciones geométricas y características funcionales entre las distintas superficies (por ejemplo, paralelismos entre planos, ortogonalidad entre ejes, etc.).

Con el desarrollo reciente de las tecnologías de reconstrucción 3D, la Ingeniería Inversa, también llamada Reconstrucción CAD, se presenta como una solución para este desafío, permitiendo extraer información de cualquier modelo físico para reconstruir un modelo CAD paramétrico adecuado.

En este contexto, este trabajo se enfoca en explorar el papel de la fotogrametría en la reconstrucción 3D de varias máquinas ubicadas en el edificio Isaac Peral de la ENM, usando un dispositivo móvil para la captura de imágenes. Se tratará de obtener digitalizaciones de las piezas mecánicas lo más fieles a la realidad, a través de la toma de fotografías convergentes de los objetos en cuestión. Además, se estudiarán sus limitaciones con relación al detalle obtenido en superficies complejas. Se evaluará al mismo tiempo el desempeño de otras técnicas de digitalización recientes, como la luz estructurada o el escaneado láser, al igual que la eficiencia de los procesos y el uso de herramientas y software necesarios para la digitalización de las piezas objeto de estudio. En este proceso, se utilizarán un escáner de luz estructurada, un escáner láser y el sistema LiDAR de un iPad. Se compararán las nubes de puntos y los modelos digitales obtenidos a través de las 4 disciplinas mencionadas y sobre las 4 piezas mecánicas objeto del trabajo.

Se tendrán en cuenta diversos factores para estudiar el nivel de detalle de cada modelo 3D obtenido como la densidad de la nube de puntos, la textura del modelo, la apariencia, la resolución, el color, el número de polígonos de la malla obtenida, el tiempo de procesado que se ha necesitado para llegar al resultado final, etc.

1.3 Objetivos

El objetivo general del presente Trabajo de Fin de Grado consiste en el desarrollo de modelos digitales 3D de distintas piezas y sistemas mecánicos, explorando el potencial de la fotogrametría, con la finalidad de documentar sus medidas y generar un archivo digital final que pueda emplearse para su divulgación o su estudio en procesos posteriores de análisis y simulación. Para alcanzar este objetivo, se han establecido los siguientes objetivos específicos:

- Familiarizarse con el programa de fotogrametría Agisoft Metashape [9] y sus distintos modos de procesamiento de imágenes, que permiten la representación digital de los modelos tridimensionales finales.
- Evaluar la eficiencia y el rendimiento del proceso de obtención de modelos 3D a través de la fotogrametría, realizando asimismo una comparativa con otras técnicas de digitalización como los sistemas LiDAR o los de luz estructurada, evaluando ventajas e inconvenientes de los distintos modelos obtenidos con cada técnica.
- Desarrollar la capacidad de aprendizaje en la utilización de los distintos programas y equipos empleados para la digitalización tridimensional.

2 ESTADO DEL ARTE

En esta sección, se recogen los aspectos más destacados de la disciplina de la fotogrametría, una técnica de tradicional relevancia en el ámbito de la cartografía, la topografía y la arqueología, que ha desempeñado un papel fundamental en la generación de mapas y planos topográficos y en la documentación y análisis de sitios arqueológicos. Asimismo, se identifican sus distintas tipologías, que se clasifican según el número de imágenes utilizadas en el proceso y la posición desde la cual se capturan estas imágenes. Esta clasificación permitirá al lector comprender mejor las características y aplicaciones específicas de cada tipo de fotogrametría.

Además, se desarrollan aquí otras técnicas complementarias, como el LiDAR (Light Detection and Ranging) y los sistemas de luz estructurada, que también se emplean para la captura de datos tridimensionales. A lo largo de este Trabajo de Fin de Grado, se compararán estas técnicas con la fotogrametría para entender sus ventajas y limitaciones en diferentes contextos, por lo que es conveniente proporcionar al lector una visión integral de la fotogrametría y otras técnicas afines.

2.1 Fotogrametría

2.1.1 Definición y origen

La fotogrametría se define según la Real Academia Española como:

Procedimiento para obtener planos de grandes extensiones de terreno por medio de fotografías aéreas.

Lo cierto es que actualmente la fotogrametría no se centra exclusivamente en la obtención de planos del terreno. Podría, por tanto, definirse como la técnica que tiene por objeto determinar la forma, dimensiones y posición de un objeto en el espacio, utilizando medidas realizadas sobre fotografías de este objetivo.

Nos remontamos a 1858 para hablar sobre el origen de esta disciplina. El francés Aimé Laussedat es llamado el padre de la fotogrametría. Laussedat fue un científico y militar del Cuerpo de Ingenieros del ejército francés. Logró obtener planos con gran exactitud de edificios y extensiones reducidas de terreno. En aquel entonces lo denominaron fotogrametría ordinaria pero actualmente se habla de fotogrametría analógica.

Con la creación del avión en 1903 se permitió desarrollar la fotogrametría aérea para la obtención de mapas topográficos. Sin embargo, no fue hasta 1913 cuando se usó por primera vez el avión para fines topográficos [10].

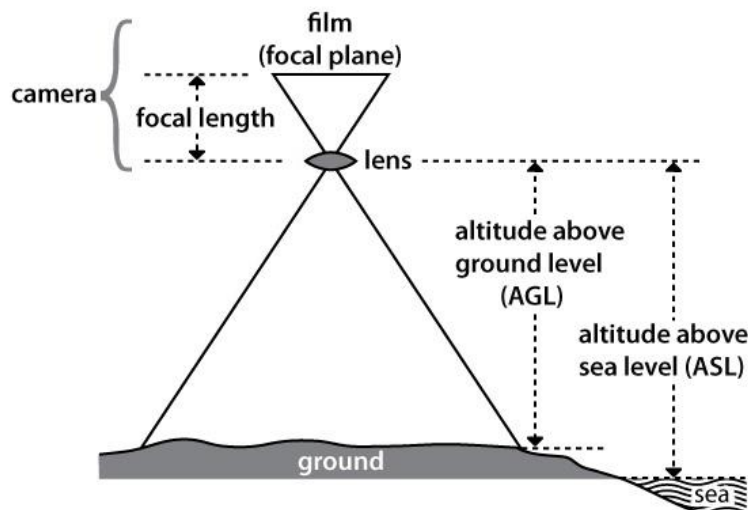


Figura 2-1 Fotogrametría Aérea [11]

La llegada de los ordenadores electrónicos fue un factor esencial para el avance en el campo de la fotogrametría. Muchas operaciones que se realizaban de forma manual o mecánica pudieron ser automatizadas gracias a los ordenadores. Es en este período donde podemos mencionar que la adquisición de los datos se realizaba de manera analógica, mientras que el modelado geométrico era matemático. Mediante el uso de dispositivos como el monocomparador (observación binocular de una foto) o el estereocomparador (observación binocular de dos fotos), se conseguían medir las coordenadas x e y de los puntos en las fotografías. Estas coordenadas serían posteriormente procesadas mediante programas informáticos.

En el mundo de la guerra se habla de la importancia del estudio del terreno como factor clave para acabar con el enemigo. Con la Primera Guerra Mundial, el avión pasó a ser usado en servicios militares. Gracias a las aeronaves se consiguieron obtener imágenes del terreno donde se encontraba el enemigo a través de fotografías aéreas.

Con la llegada de la base digital la fotogrametría ha sufrido cambios significativos:

- Acceso a las imágenes: con las nuevas tecnologías existe una gran facilidad para el manejo de imágenes y la posibilidad de retocarlas a nuestra conveniencia.
- Reformulación de disciplinas: todos los procedimientos relacionados con la imagen digital se fusionan con las técnicas de la fotogrametría, creando una sinergia entre ambas disciplinas.

La fotogrametría es una de las actividades más representativas del Instituto Geográfico Nacional [12]. A través de esta se consigue la información de referencia básica utilizada para la confección de la cartografía y la obtención de información geográfica general como, por ejemplo:

- Ocupación del suelo
- Urbanismo
- Ordenación del territorio
- Catastro
- Gestión forestal
- Hidrología

En las últimas dos décadas la fotogrametría se ha utilizado para el desarrollo del proyecto PNOA (Plan Nacional de Ortofotografía Aérea), cuyo objetivo es conseguir ortofotografías digitales de alta resolución y MDEs (Modelos Digitales del Terreno) del territorio español [13].



Figura 2-2 Modelo Digital del Terreno [14]

2.1.2 Clasificación

Existen distintas formas de clasificar la fotogrametría según el criterio que utilicemos. En función del número de imágenes empleadas podemos diferenciar entre [15]:

- Fotogrametría con una sola imagen (procesado de una imagen)
- Fotogrametría estereoscópica (procesado de un par de imágenes estereoscópicas)
- Fotogrametría multi-imagen (se procesan más de dos imágenes)

Según la distancia al objeto y la posición de la cámara diferenciamos entre:

- Fotogrametría de objeto cercano (las imágenes se obtienen a una distancia inferior a 300 metros)
- Fotogrametría terrestre (las imágenes se obtienen desde la superficie terrestre)
- Fotogrametría aérea (las imágenes se obtienen desde plataformas aerotransportadas)
- Fotogrametría espacial (las imágenes se obtienen desde satélites)
- Macro Fotogrametría (las imágenes se obtienen desde un microscopio)

2.1.3 Fotogrametría de objeto cercano

La fotogrametría de corto alcance en la industria alcanzó el éxito técnico y económico a mediados de los años 80, con un primer avance en las mediciones 3D automatizadas y de alta precisión. La fotogrametría a corta distancia ofrecía la posibilidad de una precisión de medición de hasta 1:500.000 con respecto a la dimensión mayor del objeto. Especialmente para objetos de gran volumen (por ejemplo, >10 m de diámetro) con un elevado número de puntos del objeto, la fotogrametría podía superar el rendimiento de los sistemas de teodolito y, por tanto, se convirtió en un método estándar para tareas de medición 3D complejas.

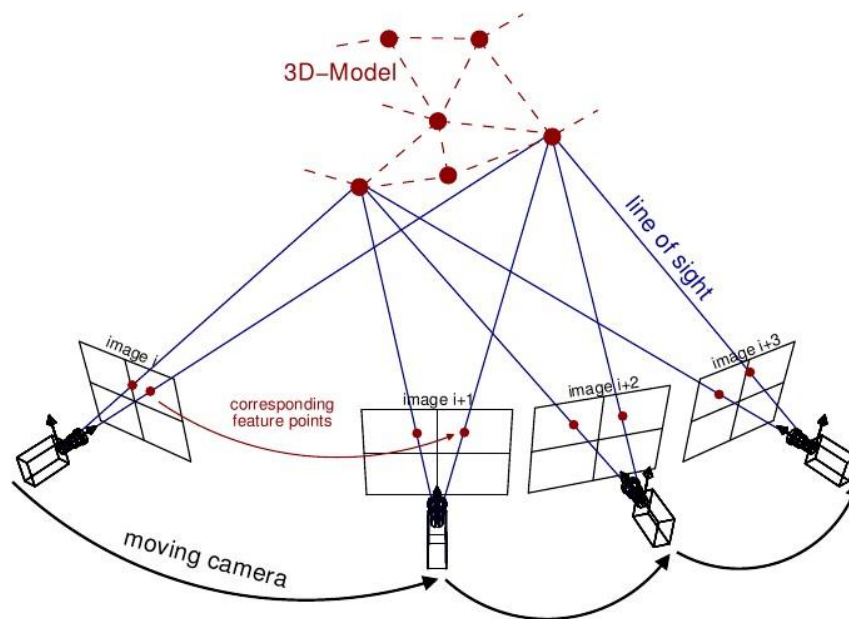


Figura 2-3 Fotogrametría de objeto cercano [16]

La disponibilidad de cámaras de vídeo y digitales en combinación con acceso directo a los datos de imagen digital generó nuevos conceptos para aplicaciones de corto alcance. Los denominados sistemas de fotogrametría fuera de línea utilizan cámaras réflex digitales de alta resolución con objetivos (normalmente) gran angular, objetivos retrorreflectantes y operadores de medición de puntos de imagen de subpíxeles. Los sistemas recientes están prácticamente automatizados, por lo que pueden ser utilizados por personal no especializado. La adquisición y el tratamiento de datos pueden realizarse en distintos lugares, en distintos momentos y por distintas personas.

Los sistemas digitales fuera de línea pueden considerarse herramientas de medición 3D plenamente aceptadas que se aplican en una gran variedad de aplicaciones industriales, como:

- Fabricación de automóviles, para la medición de la deformación de carrocerías, control de piezas de proveedores, ajuste de utillajes y aparejos, establecimiento de redes de puntos de control y pruebas de choque.
- La industria aeroespacial, para la medición y ajuste de equipos de montaje, la medición de antenas y la alineación de piezas.
- Sistemas de energía eólica, para la medición de deformaciones y control de la producción.
- Ingeniería y construcción, para la medición de presas de agua, depósitos e instalaciones.

Estos sistemas de fotogrametría ofrecen los mayores niveles de precisión y exactitud. La precisión de la medición de puntos de imagen puede ser 1/50 de píxel, lo que supone una precisión de medición típica sobre el objeto en el rango de 1:100.000 a 1:200.000, donde la primera corresponde a 0,1 mm para un objeto de 10 m de tamaño. La precisión absoluta en las mediciones de longitud suele ser entre 2 y 3 veces menor (por ejemplo, alrededor de 0,05 mm para un objeto de 2 m) que la precisión de las coordenadas puntuales del objeto, que expresa la precisión relativa de la reconstrucción 3D). Los sistemas de fotogrametría en línea proporcionan mediciones en una cadena de datos cerrada, por lo tanto, en tiempo real y con un enlace directo a procesos externos. Normalmente, un sistema en línea consta de dos o más cámaras calibradas y orientadas que observan un volumen específico. La orientación adecuada del objeto permite la extracción totalmente automatizada en el espacio de la imagen. La información 3D sobre puntos, contornos o superficies se genera directamente para controlar un proceso conectado, como

en una línea de producción o para el posicionamiento de un objeto con respecto a un marco de referencia externo.

Como ejemplos de aplicaciones de los sistemas en línea encontramos:

- Palpación táctil, en la que un dispositivo de palpación manual con puntos de referencia locales calibrados en el espacio tridimensional proporciona las coordenadas de la punta de palpación.
- La calibración de robots, en la que un cuerpo de referencia local que representa el punto central es observado por una o varias cámaras para determinar la trayectoria del robot en el espacio.
- Medición de tubos, en la que se utiliza una configuración de múltiples cámaras para medir puntos y líneas de tubos de forma arbitraria para controlar una máquina curvadora de tubos.
- Navegación por sensores, en la que un dispositivo de medición 2D o 3D (por ejemplo, un sensor de perfil láser) es seguido por un sistema de cámaras estéreo.

La precisión de los sistemas en línea suele ser inferior a la de los sistemas fuera de línea debido al número limitado de imágenes y a las restricciones ya que la calibración y la orientación de la cámara no son óptimas, y al funcionamiento manual de las sondas. Las cifras típicas de precisión se sitúan entre 0,2-0,5 mm en un rango de 2 m.

El uso satisfactorio de la fotogrametría en la industria requiere de una serie de componentes técnicos que formen un sistema eficaz y económico. La siguiente lista resume estos componentes y las cuestiones técnicas relacionadas:

- Sensor de imágenes: resolución (número de píxeles), lentes disponibles, velocidad de adquisición y transferencia de datos, estabilidad de la cámara, sincronización y compresión de datos.
- Focalización e iluminación: representación de las características del objeto, forma y tamaño del objetivo, longitud de onda de las fuentes de luz, restricciones de acceso al objeto, potencia de iluminación y volumen de medición.
- Configuración de las imágenes: número de estaciones de cámara, precisión de medición deseada, diseño de la red, redundancia, precisión de medición deseada, robustez, capacidad de autocalibración, definición del punto de referencia y control del objeto, autocontrol de la orientación y calibración.
- Procesamiento de imágenes: automatización del reconocimiento y la identificación de objetivos, medición de subpíxeles del centro del objetivo, seguimiento de características y tratamiento de valores atípicos y artefactos de la escena.
- Reconstrucción 3D: métodos para la determinación de coordenadas 3D (por ejemplo, intersección espacial, ajuste de paquetes) y estadísticas de errores.
- Interfaces de datos: integración en entornos CAD/CAM, interfaces de máquinas y datos, interacción con el usuario y visualizaciones.
- Verificación de la precisión: organismos de referencia, datos de referencia, normas y directrices, y pruebas de aceptación.

Los temas mencionados ilustran que el diseño, la configuración y el funcionamiento adecuados de los sistemas de fotogrametría industrial de corto alcance constituyen una tarea compleja. La viabilidad de una solución no es sólo técnica, sino también en función de la relación coste-rendimiento, el soporte del sistema, la documentación, la garantía de documentación, garantía de calidad y competencias interdisciplinarias. El mercado de mediciones ópticas en 3D está creciendo considerablemente y ofrece perspectivas prometedoras para el futuro [17].

2.2 Escaneado 3D

2.2.1 Luz estructurada

La tecnología de escaneado 3D con luz estructurada se utiliza con mayor frecuencia en ingeniería inversa, control de calidad, control de la presencia de piezas en el equipo y, en general, cuando es necesario lograr la captura de objetos complejos o difíciles de medir (calientes, blandos, grandes, etc.) [18].

Los escáneres 3D de luz estructurada utilizan la llamada triangulación para capturar la tercera dimensión de un objeto. El principio de la triangulación se basa en la situación en la que el haz se refleja en el objeto escaneado con un ángulo constante, por lo que la distancia de impacto del haz reflejado en la cara del sensor es proporcional a la distancia del objeto escaneado respecto a la cara del sensor [19]. Esto significa que no se evalúa ni la intensidad del haz incidente ni el tiempo de su vuelo, sino que se mide el lugar donde impacta el haz reflejado. Por esta razón, el barrido es mucho más fiable y resistente a las interferencias, ya que la condición de barrido es sólo la capacidad del receptor óptico del sensor para detectar el impacto del haz reflejado con una intensidad que será superior al valor mínimo detectable [20].

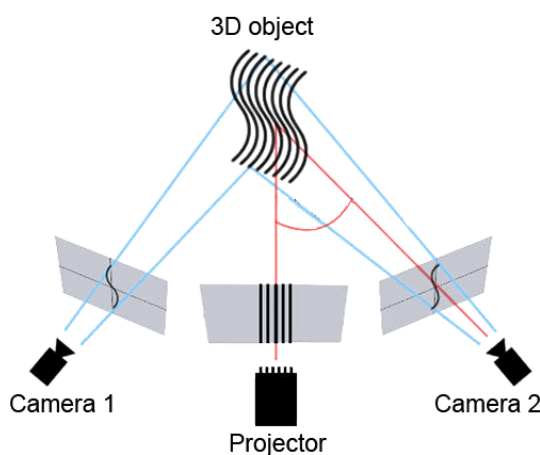


Figura 2-4 Luz estructurada [21]

El escáner 3D de luz estructurada utiliza luz para escanear, por lo que la dispersión de la luz afectará a la imagen resultante. La luz de los rayos paralelos que inciden en la interfaz plana volverá a ser paralela. Sin embargo, si la interfaz no es plana, los rayos rebotarán en todas direcciones y, por tanto, dispersarán la luz. Por ello, si la luz no se refleja ni en la interfaz plana ni en la no plana, el sensor no tendría nada que captar y evaluar. Por tal motivo, los materiales transparentes o translúcidos no pueden escanearse sin un tratamiento superficial. De hecho, el color del objeto escaneado está estrechamente relacionado con la dispersión de la luz y con el propio escaneado. Cada color tiene sus propiedades específicas y, dependiendo de la longitud de onda, será más fácil o difícil de escanear.

La luz se define como un haz visible de una onda electromagnética con una longitud de onda en el rango de 380-780 nm. La luz visible puede dividirse en siete colores espectrales a partir del color con la longitud de onda más corta: púrpura, azul índigo, azul, verde, amarillo, naranja y rojo. Cuando se combinan todos estos colores, se produce la luz solar incolora. El ojo humano percibe los colores de un objeto a medida que la luz reflejada o la luz que atraviesa el objeto cambia la longitud de onda y la intensidad de la luz [22].

El coeficiente de reflexión indica la cantidad de energía incidente que se refleja en el espacio, de la siguiente manera (Ecuación 1):

$$\rho(\lambda) = \frac{(Er(\lambda))}{(Ei(\lambda))} \quad (1)$$

donde $Ei(\lambda)$ es la intensidad de la radiación incidente sobre la superficie del objeto y $Er(\lambda)$ es la intensidad irradiada tras la reflexión, correspondiente a la longitud de onda de la radiación electromagnética [23].

El coeficiente de reflexión depende de la longitud de onda de la radiación incidente, de las propiedades de la superficie incidente (capacidad de absorber radiación) y de los tres ángulos que describen la relación entre la fuente de luz L , el observador V y la orientación local dada por la normal n . El producto escalar de vectores y , por tanto, la función de reflectancia R , se describe mediante tres productos escalares de vectores, como sigue (Ecuación 2):

$$R = R(n - L, n - V, V - L) \quad (2)$$

2.2.2 LiDAR

Los escáneres láser (LS) se basan en el uso de sensores activos que transmiten y reciben rayos de luz para medir el alcance. Además de la información sobre el alcance, los datos también pueden incluir información sobre la intensidad de la luz devuelta.

En comparación con la tecnología RADAR (Radio Detection and Ranging), la tecnología LiDAR (Light Detection and Ranging) utiliza ondas ópticas, que tienen una longitud de onda más corta que las ondas de radio, y trabajan habitualmente en la región del espectro visible y en el espectro infrarrojo cercano [24].

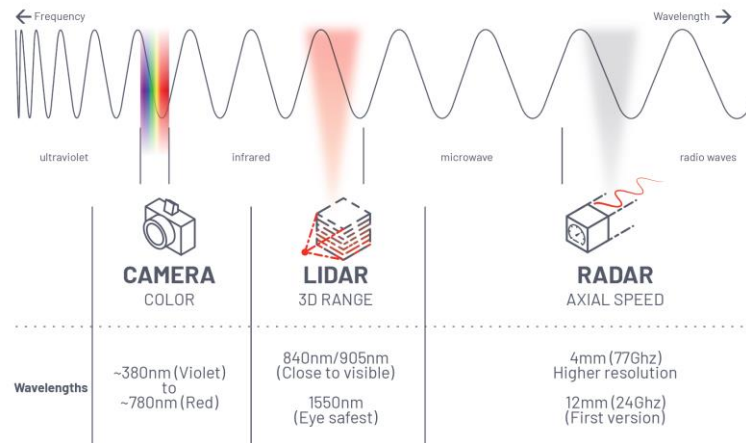


Figura 2-5 Longitud de onda para distintos dispositivos: cámara, LiDAR y RADAR [25]

Con esta técnica de medición se pueden producir datos de nubes de puntos 3D aéreos o terrestres. Los sistemas LiDAR crean una nube de puntos en el espacio 3D con los valores de intensidad (valor de densidad de la energía de reflexión del láser reflejada en la superficie) de la nube de puntos y los valores RGB, siempre y cuando el LS lleve incorporado una cámara fotográfica. Sin embargo, los modelos 3D

producidos con sensores LiDAR de bajo coste se han convertido recientemente en los preferidos para la producción rápida de modelos 3D en muchas áreas.

El modelado 3D con datos de nubes de puntos es esencial para arqueólogos, arquitectos o ingenieros geomáticos que utilizan teléfonos inteligentes [26]. La prevalencia actual de los teléfonos inteligentes, junto con los avances en las tecnologías de sensores, la generación de nubes de puntos y el modelado 3D, ofrecen nuevas oportunidades para aplicaciones científicas y de bajo coste. Se ha demostrado que se pueden realizar estudios con equipos low-cost que ofrecen diferencias de precisión de aproximadamente 10 cm, en comparación con el escaneado tradicional con un escáner láser [27].

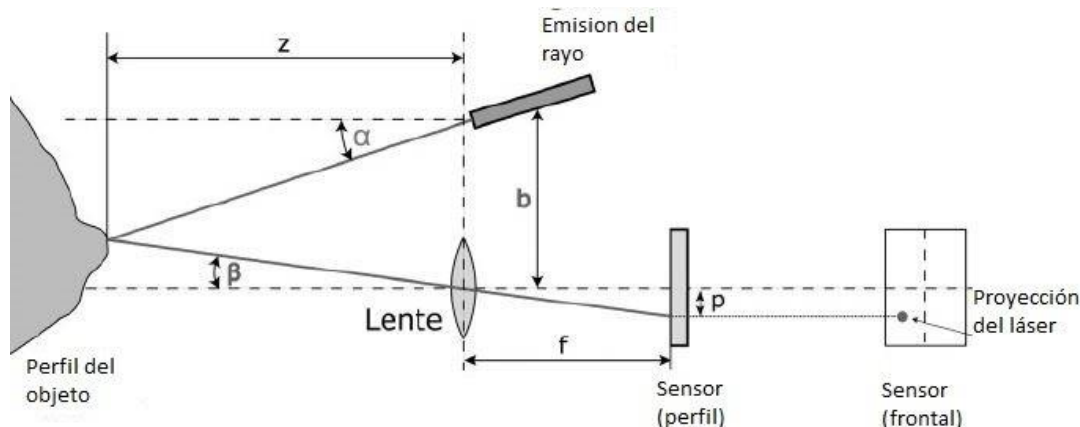


Figura 2-6 Principio de funcionamiento de un escáner láser [28]

Si se dispone de la forma de onda completa, la precisión de la información sobre el alcance puede mejorarse en la fase de postprocesamiento y también se puede obtener otra información, como la longitud del eco devuelto. Algunas de las ventajas de los sistemas LS son la generación inmediata de un modelo de puntos 3D, la capacidad de penetrar través de la vegetación y el agua (en aquellos sistemas que utilizan una longitud de onda del espectro correspondiente al color verde), la precisión de las mediciones de alcance o la capacidad de medir zonas incluso en la oscuridad. Poco después de que los dispositivos LS alcanzaran un nivel comercial, mucha gente especuló con que la fotogrametría sería totalmente sustituida por ellos.

Las principales ventajas de las imágenes son la similitud con la visión humana, una geometría interna bien conocida, buena interpretabilidad, capacidad de captar la textura y la información de la capacidad de modelar objetos en movimiento, la posibilidad de volver a medirlos y el uso de un método de adquisición basado en fotogramas. Debido a la estabilidad geométrica de las imágenes, son las referencias más adecuadas para inspeccionar la calidad de las nubes de puntos láser.

El término "integración" puede definirse como la fusión de dos entidades separadas, dando lugar a la creación de una nueva entidad. La integración adecuada del escaneado láser con la fotogrametría permite compensar las debilidades individuales de cada método por separado, proporcionando así aplicaciones más precisas para la modelización, interpretación y clasificación de los objetos circundantes. Los dispositivos LS pueden clasificarse en dos grandes clases en función del método físico de medición: triangulación y tiempo de vuelo (TOF). Los métodos TOF tienen dos variantes principales: los sistemas basados en impulsos y los basados en las diferencias de fase de rayos luminosos modulados. En el método de triangulación, la cámara constituye una parte constante del dispositivo.

En el caso de los sistemas TOF, una cámara externa suele estar acoplada a un escáner o, en su defecto, las imágenes se pueden tomar por separado. Además de lentes normales, las cámaras pueden incorporar lentes panorámicas u ojo de pez.

En estos casos, el registro desempeña un papel fundamental a la hora de combinar distintos tipos de datos. Si el registro falla o es incompleto, la integración puede dar información engañosa. Dado que los distintos escáneres láser producen datos que pueden variar en términos de densidad de puntos, campo de visión, cantidad de ruido, ángulo de incidencia, y los requisitos de precisión o el nivel de automatización pueden variar significativamente, no existe un único método de registro general que supere a los demás. El método más adecuado suele ser específico para cada caso [29].

2.2.3 Aplicabilidad de estas técnicas

Las técnicas mencionadas anteriormente no se usan exclusivamente para en el ámbito de la ingeniería mecánica y la producción industrial.

Uno de los usos que tiene es en la agricultura. Está evolucionando constantemente para desarrollar nuevas técnicas que optimizan los rendimientos de los cultivos y reducen el uso de pesticidas y químicos. Con un mapa aéreo de un cultivo, los agricultores pueden ver más de sus campos que en el suelo. Esto significa que los agricultores pueden analizar cómo sus plantas reflejan la luz y ver la salud de las plantas a nivel celular. Estos mapas se llaman índices de vegetación [30].

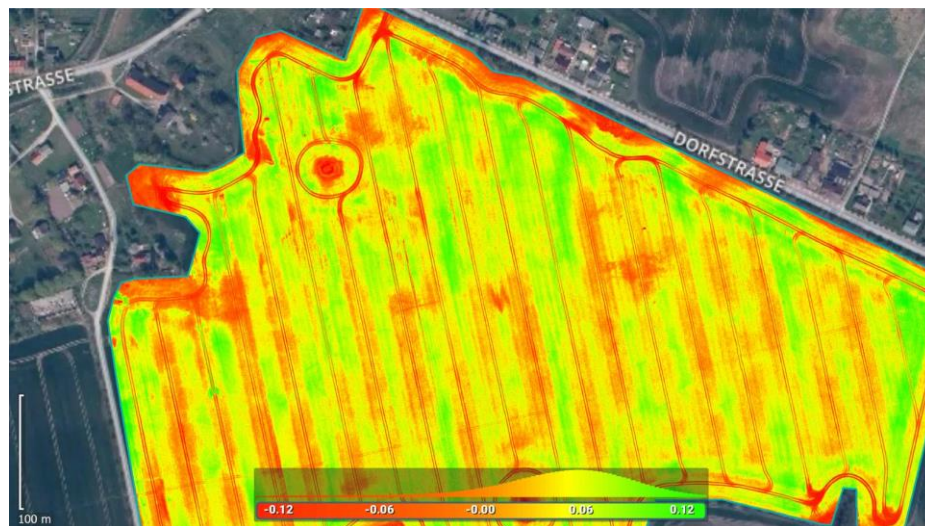


Figura 2-7 Índice de vegetación [30]

Los escáneres 3D se utilizan para capturar la forma 3D de un paciente en ortopedia y odontología. Gradualmente suplantando el yeso. Luego se utilizan software CAD para diseñar y fabricar la ortesis, prótesis o implantes dentales. Muchos sistemas CAD dentales utilizan tecnologías de escáner 3D para capturar la superficie 3D de una preparación dental, con el fin de producir una restauración digitalmente usando software CAD, y finalmente producir la restauración final utilizando una tecnología CAM (como una fresadora CNC o una impresora 3D) [31].



Figura 2-8 Modelo 3D dentadura [32]

El escaneo láser 3D es utilizado por las agencias de aplicación de la ley en todo el mundo. Los modelos 3D se utilizan para la documentación in situ de [31]:

- Escenas del crimen
- Trayectorias de balas
- Análisis de patrones de manchas de sangre
- Reconstrucción de accidentes
- Atentados con bomba
- Accidentes aéreos.

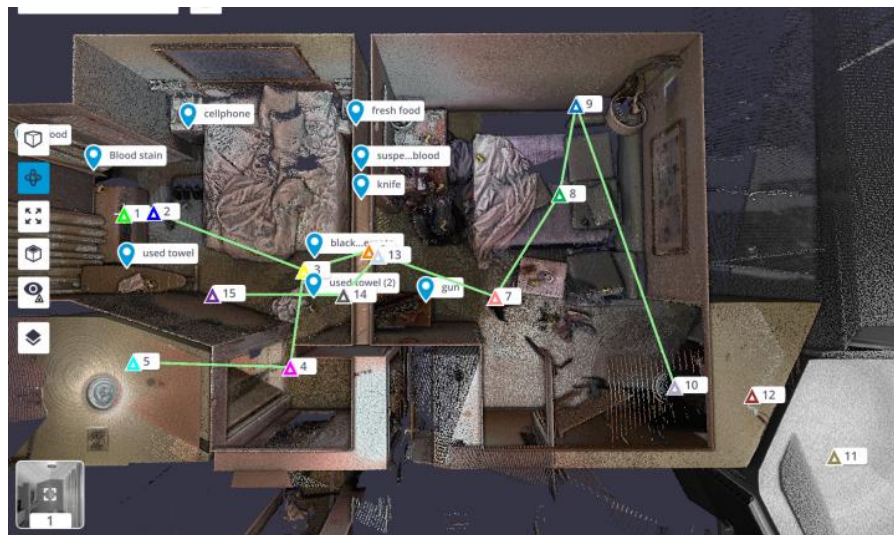


Figura 2-9 Modelo 3D de la escena de un crimen [33]

El escaneado tridimensional es también una tecnología poderosa en el campo de la preservación del patrimonio cultural. Su capacidad para crear modelos digitales detallados de bienes y estructuras del patrimonio cultural ha abierto nuevas oportunidades para su preservación, estudio y difusión. Además, se trata de un campo en crecimiento donde el uso de esta tecnología tiene el potencial de revolucionar el *modus operandi* en la conservación y compartición de nuestro patrimonio cultural.



Figura 2-10 Escaneo 3D de artefactos en el Partenón [34]

Una de las principales aplicaciones del escaneo 3D en el campo del patrimonio cultural es la conservación de artefactos frágiles o en peligro. Los métodos tradicionales a menudo implican manipulación física y almacenamiento de artefactos, lo que puede llevar a daños y deterioro con el tiempo. El escaneo tridimensional permite la creación de réplicas digitales que estarán disponibles para su estudio e investigación sin la necesidad de una manipulación física. Esto puede reducir significativamente el riesgo de daño del artefacto original al tiempo que asegura su conservación para futuras generaciones [35]. Además, el escaneo 3D puede ser utilizado para crear modelos digitales de sitios arqueológicos completos, permitiendo su conservación en tiempos donde podrían estar en riesgo debido a causas naturales o resultado de la actividad humana [36].

Asimismo, el escaneo tridimensional juega un papel significativo en la difusión del patrimonio cultural. Los modelos digitales creados se podrán utilizar para crear exposiciones virtuales, permitiendo a las personas ver e interactuar con artefactos y sitios del patrimonio cultural desde cualquier parte del mundo. Este fenómeno puede ampliar considerablemente la audiencia para el patrimonio cultural y hacerlo más accesible para una audiencia global. Además, el escaneo 3D se puede emplear para crear herramientas educativas interactivas y juegos, proporcionando una manera atractiva e inmersiva de aprender sobre el patrimonio cultural.



Figura 2-11 Escaneo 3D de la tumba de Nefertiti [37]

El escaneo 3D también se puede utilizar para crear gemelos digitales de sitios patrimoniales [38][39]. Estos gemelos digitales son réplicas exactas del sitio patrimonial, y se pueden usar para simular

el impacto potencial del trabajo de conservación, planes de desarrollo o desastres naturales in situ. Esto puede ayudar en el desarrollo de estrategias de conservación y preservación. También permite visitas virtuales para aquellos que no pueden visitar el sitio en persona, o para aquellos que desean conocer el sitio como solía ser en el pasado.

Además, la tecnología de escaneo 3D tiene el potencial de democratizar el acceso al patrimonio cultural. Con su ayuda y el Internet, personas de todo el mundo pueden acceder y aprender sobre el patrimonio cultural que de otra manera sería inaccesible para ellos. Esto es particularmente importante en países en desarrollo y en regiones afectadas por conflictos, donde el patrimonio cultural a menudo está en peligro [40].

3 DESARROLLO DEL TFG

3.1 Descripción general

En el presente Trabajo de Fin de Grado se obtendrán modelos 3D de cuatro piezas mecánicas distintas. Se presentarán tanto el hardware como el software utilizado para el procesamiento de los modelos digitales en cada una de las disciplinas estudiadas, así como del software empleado para el procesamiento. Finalmente se explicará la metodología general de cada técnica utilizada para el modelado 3D. A continuación, podemos ver un esquema que clasifica los sistemas que van a ser utilizados a lo largo del trabajo.

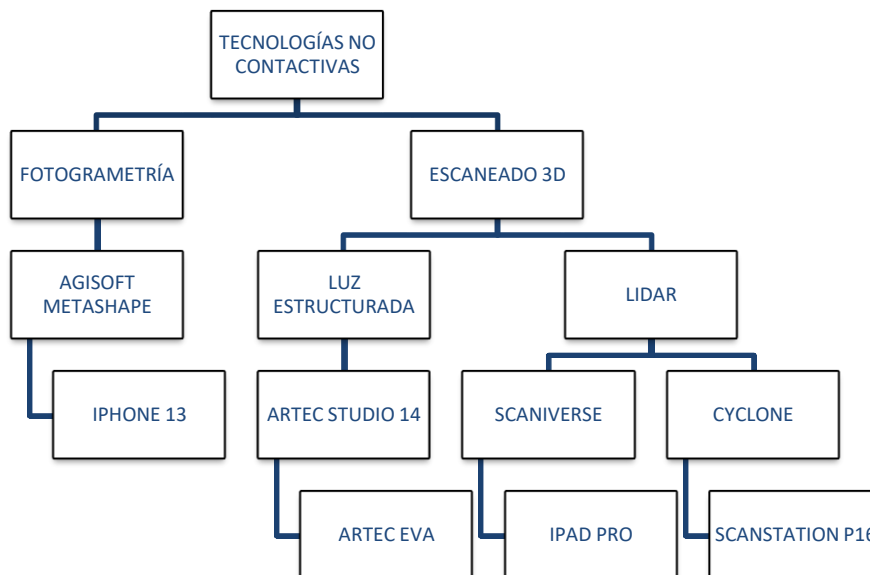


Figura 3-1 Esquema de sistemas usados

3.2 Piezas modeladas

3.2.1 Bomba centrífuga

Una bomba centrífuga es aquella máquina, también denominada bomba rotodinámica, cuyo objetivo es convertir la energía en velocidad y posteriormente en energía a presión. Es decir, transforman la energía mecánica en energía hidráulica. De esta manera, puede mover el mayor volumen de líquido posible.

Es uno de los sistemas más utilizados actualmente para bombear múltiples tipos de líquidos [41].

3.2.2 Centrifugadora Alfa Laval

Una centrífuga Alfa Laval es una máquina de separación que emplea la fuerza centrífuga para dividir diferentes componentes de una mezcla, que pueden incluir combinaciones de sólidos y líquidos o líquidos de diferentes densidades. Estos equipos son fundamentales en una amplia gama de industrias, incluidas la alimentaria, la farmacéutica, la marina, la energética, y el tratamiento de aguas y residuos [42].



Figura 3-2 Bomba centrífuga (izquierda) y centrifugadora Alfa Laval (derecha)

3.2.3 Centrifugadora separadora de aceite

Una centrífuga separadora de aceite es una pieza mecánica con la función de separar aceite, agua y los sólidos a través de la fuerza de centrifugación. Generalmente contiene un recipiente cilíndrico que gira en alta velocidad, dentro de un recipiente estático más grande. Los sólidos y el líquido más espeso, el cual normalmente es agua, se almacenan en la periferia del rotor, mientras el líquido menos espeso (se suele tratar del aceite) es recogido desde el centro y lanzado hacia afuera del rotor [43]. Se utiliza ampliamente para purificar aceites combustibles.

3.2.4 Motor de combustión interna de cuatro tiempos

Un motor de cuatro tiempos es un tipo de motor de combustión interna que lleva a cabo cuatro etapas distintas para completar un ciclo completo. Estas etapas son admisión, compresión, combustión y escape. Cada una de estas etapas cumple una función específica y es esencial para el funcionamiento eficiente del motor.

Los motores de cuatro tiempos se diferencian de los motores de dos tiempos por completar estas etapas en movimientos separados del pistón, lo que generalmente resulta en una mayor eficiencia de combustible, menos emisiones y una mayor durabilidad [44].

Es el tipo de motor más empleado en el ámbito del transporte por carretera.



Figura 3-3 Centrifugadora separadora de aceite (izquierda) y motor de combustión interna de cuatro tiempos (derecha)

3.3 Hardware utilizado

3.3.1 Iphone 13

El primer paso para conseguir un modelo 3D a partir de la fotogrametría es la recolección de imágenes. En este trabajo las fotografías han sido tomadas con un dispositivo móvil. Las imágenes digitales de las diferentes piezas fueron tomadas con un Iphone 13. Este dispositivo cuenta con un sistema de cámara dual de 12 megapíxeles: principal y ultra gran angular. La principal tiene una apertura de $f/1,6$ mientras que la ultra gran angular posee una apertura de $f/2,4$ y un campo de visión de 120° . También cuenta con dos tipos de zoom: un zoom óptico de alejamiento $\times 2$ y un zoom digital de hasta $\times 5$. Es importante mencionar que también cuenta con estabilización óptica de imagen por desplazamiento del sensor. Además, tiene geoetiquetado de fotos y estabilización automática de la imagen [45].



Figura 3-4 Iphone 13 [45]

3.3.2 Artec Eva

Para escanear todas las piezas se utilizó el escáner 3D de luz estructurada portátil Eva (Figura 3-5 Escáner 3D Artec Eva) de Artec 3D, que lleva en el mercado desde 2007. Se eligió este tipo de escáner 3D debido al principio de adquisición de datos. "Eva" funciona según el principio de la fotogrametría. Este método está significativamente más extendido que el escaneo láser debido al precio de compra de ambos dispositivos [46]. Al comparar Artec Eva con la mayoría de los otros escáneres 3D en el mercado, que utilizan la tecnología de tiempo de vuelo (TOF), es claro que la relación precio/rendimiento es la mejor para este tipo de escáner 3D. El precio de un escáner 3D Artec Eva con una precisión de 0,2 mm es de 13700 €. Tiene una velocidad de captura de 16 frames por segundo. Captura y procesa simultáneamente 1.8 millones de puntos por segundo y cuenta con una resolución de textura de 1.3 megapíxeles.



Figura 3-5 Escáner 3D Artec Eva

El escáner Eva de Artec utiliza tecnología de luz estructurada para la recolección de datos. El aparato tiene un total de 12 fuentes de luz LED, las cuales son usadas para proyectar un patrón de luz especial sobre el objeto.

La forma del objeto escaneado distorsiona este patrón de luz; el escáner puede capturar esta forma distorsionada utilizando tres cámaras para crear una nube de puntos correspondiente a la forma real del objeto. Es importante mantener la distancia de trabajo, que es de unos 0,4-1 m.

A partir del principio de la tecnología de luz estructurada, se supone que algunos materiales pueden resultar más o menos problemáticos de escanear con esta tecnología si, por ejemplo, la luz estructurada los atraviesa o se refleja en un ángulo diferente al de la forma del objeto [47].

3.3.3 ScanStation P16

El escáner láser TOF utilizado para realizar las mediciones ha sido el ScanStation P16 de la casa Leica Geosystems [48]. Se ha optado por elegir esta opción debido a las características y viabilidad en el centro de enseñanza. El Leica ScanStation P16 cuenta con una interfaz de pantalla táctil intuitiva y fácil de usar. El botón de escaneo de un solo toque y el software de estilo asistente garantizan un flujo de trabajo sencillo y permiten una rápida comprobación de los datos sobre el terreno.



Figura 3-6 Escáner láser Leica ScanStation P16 [48]

En combinación con el control remoto WLAN, el Leica ScanStation P16 puede manejarse con cualquier dispositivo portátil. El escáner láser, extremadamente duradero, rinde incluso en las condiciones ambientales más duras, como temperaturas extremas que oscilan entre -20 °C y +50 °C, y cumple la clasificación IP54 de resistencia al polvo y al agua.

El instrumento tiene un cabezal de exploración giratorio y un espejo giratorio que cubren un campo de visión (FoV) de 360° x 290°.

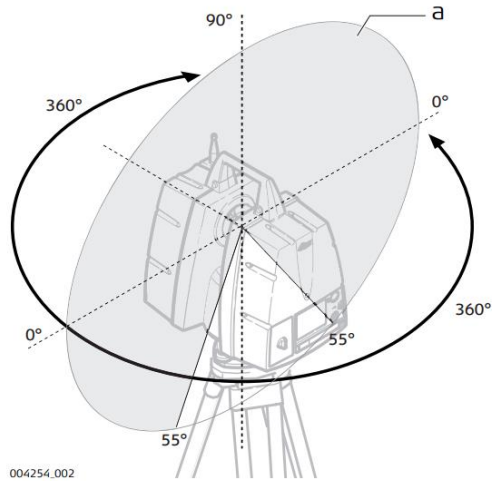


Figura 3-7 Campo de visión (FOV) del escáner láser Leica ScanStation P16 [49]

En la siguiente tabla resumen podemos ver las especificaciones técnicas más importantes del escáner láser P16.

Parámetros	ScanStation P16
Peso	12.25 kg
Capacidad de almacenaje	256 GB SSD
Exactitud en la posición 3D	3 mm @ 40 m
Longitud de onda	1550 nm
Velocidad de escaneo	50 Hz / 100 Hz (fuente alimentación externa)
FOV	360° (Hor.) / 290° (Ver.)
Resolución angular	40 μ rad
Protección	IP54 (Protección contra los residuos de polvo y Protección contra las salpicaduras de agua)
Dimensiones	238 x 358 x 395 mm

Tabla 3-1 Resumen con las dimensiones y características técnicas del Leica Scan Station P16 [49]

3.3.4 iPad Pro 11"

El iPad utilizado para el escaneo LiDAR ha sido el iPad Pro de 11 pulgadas. Cuenta con una pantalla Liquid Retina multitouch retroiluminada con LED con tecnología IPS. Centrándonos en lo que concierne al presente trabajo, tiene una cámara trasera con un gran angular de 12 Mpx y apertura de $f/1,8$ y un ultra gran angular de 10 Mpx, apertura de $f/2,4$ y campo de visión de 125°. Ambas cámaras permiten dotar de información RGB al archivo de nube de puntos generado.

La tecnología LiDAR es una característica particularmente destacada en el iPad Pro, ofreciendo la capacidad de mapear y capturar representaciones tridimensionales de objetos, habitaciones e incluso personas [50].

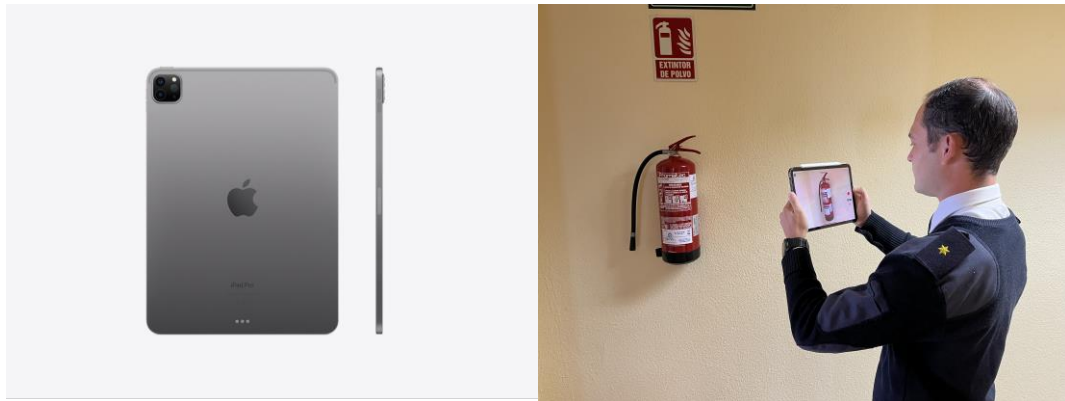


Figura 3-8 iPad Pro 11 pulgadas [50]

3.4 Software utilizado

3.4.1 Agisoft Metashape

El software utilizado para el procesamiento fotogramétrico es Agisoft Metashape Professional. Se trata de un producto de software autónomo que realiza el procesamiento fotogramétrico de imágenes digitales y genera datos espaciales en 3D para su uso en aplicaciones SIG, documentación del patrimonio cultural y producción de efectos visuales, así como para mediciones indirectas de objetos de diversas escalas.

Una técnica de fotogrametría digital bien implementada y aplicada con métodos de visión por computador da como resultado un sistema de procesamiento automatizado inteligente que, por un lado, puede ser gestionado por un recién llegado en el campo de la fotogrametría y, por otro, tiene mucho que ofrecer a un especialista que puede ajustar el flujo de trabajo a numerosas tareas específicas y a diferentes tipos de datos [9].



Figura 3-9 Logo de Agisoft Metashape [51]

El software permite procesar imágenes procedentes de cámaras RGB o multiespectrales, incluidos los sistemas multicámara, y convertirlas en información espacial de alto valor en forma de nubes de puntos fotogramétricas, modelos poligonales texturizados, ortomosaicos reales georreferenciados y MDS/MDT. Las imágenes pueden coprocesarse con puntos LiDAR para aprovechar las ventajas de ambas fuentes de datos.

El posprocesamiento posterior permite eliminar sombras y artefactos de textura de los modelos, calcular índices de vegetación y extraer información para mapas de acción de equipos agrícolas, clasificar automáticamente nubes de puntos densas, etc.

Basado en la tecnología punta desarrollada por Agisoft, Metashape permite un procesado muy rápido, proporcionando al mismo tiempo resultados consistentes y altamente precisos tanto para fotografía aérea como de corto alcance (hasta 3cm para fotografía aérea, y hasta 1mm para fotografía de corto alcance), así como para reconstrucción de superficies basada en datos LiDAR.

Agisoft Metashape es capaz de procesar más de 50.000 fotos en un clúster local, gracias a la funcionalidad de procesamiento distribuido. Alternativamente, el proyecto puede ser fácilmente enviado a la nube para minimizar la inversión en hardware, con todas las opciones de procesamiento aún disponibles.

El paquete de software tiene un flujo de trabajo lineal basado en proyectos, que es intuitivo y puede ser dominado fácilmente incluso por un no especialista, mientras que los fotogrametristas profesionales pueden beneficiarse de funciones avanzadas como el modo estéreo y tener un control completo sobre la precisión de los resultados, con un informe detallado que se genera al final del procesamiento.

3.4.2 Artec Studio 14

Artec Studio 14 es el software de pago utilizado en la disciplina de luz estructurada. Pertenece a la misma empresa que el Artec Eva por lo que no ofrece problemas de compatibilidad. Tiene una interfaz sencilla y bastante intuitiva que permite al usuario desenvolverse en él, incluso sin mucha experiencia en el ámbito. Tiene una metodología muy marcada que nos va dictando los pasos a seguir para el proceso de escaneado 3D y el posterior tratamiento de los datos. También cuenta con autopiloto que ahorra tiempo al usuario en ciertas partes del proceso.



Figura 3-10 Logo Artec Studio 14 [52]

3.4.3 Scaniverse

Aunque en los iPhone 13 y 14 Pro se prefirieron sensores con las mismas características LiDAR, Apple se puso de acuerdo con SONY para el iPhone 15 Pro y cambió radicalmente el sensor LiDAR. Mientras que un sensor LiDAR ToF (Time of Flight) más eficiente, introducido por primera vez con el iPhone 15 Pro, apareció como Sony IMX591, fue introducido como IMX590 en el iPhone 14 y series anteriores.

Los programas Scaniverse y SiteScape son aplicaciones móviles diseñadas para realizar escaneos 3D utilizando el sensor LiDAR que se encuentra en modelos específicos de iPhone y iPad. Las aplicaciones se prefieren para producir modelos 3D escaneando objetos y entornos con el sensor LiDAR. Estas aplicaciones permiten a los usuarios crear escaneados 3D precisos y de alta resolución directamente desde dispositivos iOS compatibles. Gracias a este tipo de aplicaciones, el LiDAR del iPhone de Apple está ganando popularidad rápidamente para la representación 3D de objetos sólidos y superficies debido a su capacidad de procesamiento, precio, tamaño y versatilidad [53].

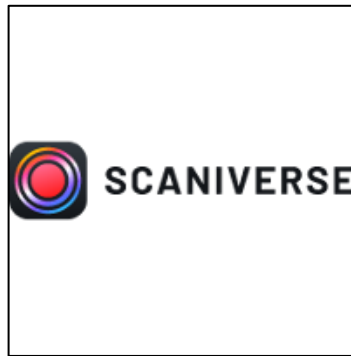


Figura 3-11 Logo Scaniverse [54]

Muchas disciplinas profesionales, como la silvicultura, las ciencias de la tierra, la geología, la investigación de lugares de accidentes, la documentación de yacimientos culturales y la producción de mapas rápidos en 3D a gran escala, utilizan nubes de puntos y modelos tridimensionales creados a partir de mediciones realizadas con este tipo de teléfonos inteligentes, que son relativamente menos caros que los escáneres láser terrestres profesionales. Se prevé que este tipo de hardware crezca y se utilice con mayor frecuencia en nuevas áreas de aplicación debido a sus numerosas ventajas, como la facilidad de uso, la velocidad y la precisión. Este estudio investigó la precisión de las nubes de puntos obtenidas utilizando el sensor LiDAR de nueva generación iPad Pro. Como software se prefirió la versión gratuita de la aplicación Scaniverse [55].

3.4.4 Leica Cyclone REGISTER 360

Leica Cyclone REGISTER 360 es un software de código abierto de registro de nubes de puntos de escaneo láser capaz de incorporar diferentes técnicas, desde flujos de trabajo sencillos y guiados hasta resultados de registro automatizados. Es capaz de gestionar desde la creación del proyecto hasta la realización de los informes finales, aunque en este trabajo únicamente se utiliza para la exportación de las nubes de puntos adquiridas en el formato propio de Leica. Es accesible para usuarios con poca experiencia en este ámbito.



Figura 3-12 Logo de Cyclone Register 360 [56]

3.4.5 CloudCompare v2

Se trata de un software de código abierto que permite editar y procesar nubes de puntos. También permite trabajar con mallas 3D. No obstante, sigue siendo una entidad "secundaria", especialmente porque CloudCompare es capaz de comparar dos nubes de puntos directamente, sin necesidad de generar una malla intermedia. Tiene un entorno de trabajo intuitivo y se presentan los resultados de una forma atractiva.

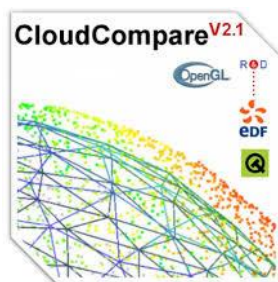


Figura 3-13 Logo de CloudCompare v2 [57]

3.4.6 Autodesk Inventor Professional 2024

Autodesk Inventor Professional es un software que ofrece herramientas profesionales para el diseño mecánico, la elaboración de documentación y la simulación de productos. Se selecciona para comprobar la compatibilidad de los modelos 3D obtenidos con el software que habitualmente utilizan los futuros Oficiales de la Armada durante sus estudios del Grado en Ingeniería Mecánica en el CUD-ENM, y con el que se llevan a cabo simulaciones dinámicas y análisis por elementos finitos.



Figura 3-14 Logo de Autodesk Inventor Professional 2024 [58]

3.5 Metodología

Para la realización de este proyecto se ha seguido el siguiente plan de trabajo, en el cual, antes de poder digitalizar las piezas, ha sido necesario el aprendizaje de los diferentes tipos de escáner, cada uno con su metodología propia, y la realización de diferentes pruebas para su posterior estudio comparativo, posibilitándose de este modo la obtención de óptimos resultados en los modelos escaneados:

- Mediante fotogrametría con cámara fotográfica, Iphone 13 de Apple.
- Mediante el escáner 3D de tiempo de vuelo, Scanstation P16 de Leica.
- Mediante el escáner 3D de luz estructurada, Eva de Artec 3D.
- Mediante el sistema de escaneado LiDAR y el ipad Pro de Apple.

Se obtendrán distintas réplicas de cada pieza, que servirán para realizar el estudio comparativo de los diferentes tipos de digitalizado.

3.5.1 Proceso fotogramétrico

3.5.1.1 Recolección de imágenes

A la hora de la recolección de las imágenes hay varios factores a tener en cuenta. La cantidad de imágenes que se tomen es de gran importancia. Cuantas más imágenes se tomen de la pieza más fiel a la realidad será la reconstrucción en tres dimensiones y la textura del modelo obtenido. Aunque por muchas imágenes que capturemos, si éstas no tienen un buen solapamiento no serán de ayuda. El hecho

de que cada imagen se solape con la siguiente hará que el software tenga mayor facilidad a la hora de realizar el alineamiento de las fotos y así reconstruirá con mayor precisión el objeto.

Es necesario ir cambiando el ángulo con el que son capturadas las imágenes para así obtener información tanto de la parte superior como de la inferior de la pieza. No se deben hacer cambios en la distancia focal de la cámara porque de lo contrario el software tendrá problemas para procesar las imágenes. De esta manera se evitará obtener discrepancias en la escala y en la nitidez.

La iluminación también es un factor clave a la hora de tomar las imágenes. Con una buena iluminación se evitarán zonas con sombra que pueden dar lugar a error en el software. La resolución de la cámara debe ser lo más alta posible para captar la mayor información del objeto. Se debe evitar imágenes borrosas fruto de una mala estabilización de la cámara. Mencionar también que si hay posibilidad, se deben incluir referencias de escala en las imágenes tomadas. En la captura de las imágenes se utilizaron las siguientes dianas.

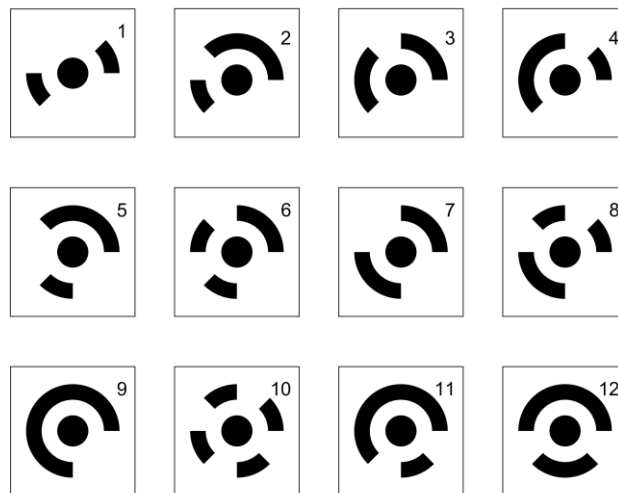


Figura 3-15 Dianas usadas para la fotogrametría [59]

3.5.1.2 Importación de imágenes

Abriremos el software Agisoft Metashape Professional. El primer paso para empezar con el software es importar las imágenes que hemos tomado del objeto. Debemos seleccionar la opción “Workflow” seguido de “Add Photos”. También existe la opción de “Add Folder”, en el caso de que tengamos todas las imágenes de la pieza en una misma carpeta.

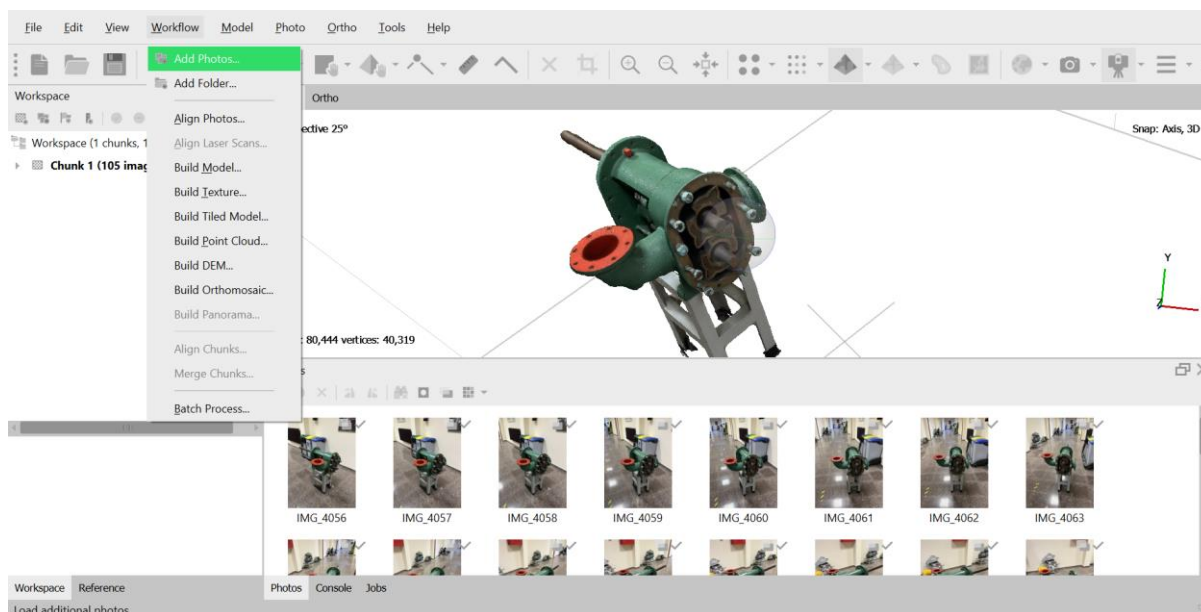


Figura 3-16 Importación de las imágenes en Agisoft Metashape

Se debe hacer una selección previa de las imágenes que se van a importar, evitando fotografías repetidas o con una mala estabilización de la cámara. Las imágenes fueron importadas en formato JPEG, aunque Agisoft Metashape es compatible con otros formatos de imagen. Una vez añadidas las imágenes, éstas aparecerán en el cuadro inferior de la interfaz. Ahora podremos borrar imágenes no deseadas si no lo hemos hecho anteriormente. En un mismo “*Chunk*” podemos organizar las imágenes en distintos grupos con el objetivo de una mejor manipulación de los datos.

3.5.1.3 Alineamiento de las fotos

Una vez las imágenes han sido importadas correctamente seleccionaremos la opción “*Align Photos*” dentro de “*Workflow*”. En este proceso el software hará un análisis de las imágenes y buscará puntos comunes en las mismas. También realizará un cálculo de la posición relativa de dónde se ha capturado la imagen en el espacio tridimensional. Este proceso es más lento en función del número y la calidad de las imágenes.

La posición de la cámara en el momento de la captura de la imagen viene definida por los parámetros de orientación interior y exterior.

Los parámetros de orientación interior incluyen la distancia focal de la cámara, las coordenadas del punto principal de la imagen y los coeficientes de distorsión del objetivo. Los parámetros de orientación exterior definen la posición y orientación de la cámara. Se estiman durante la alineación de la imagen y constan de 3 componentes de traslación y 3 ángulos de rotación de Euler.

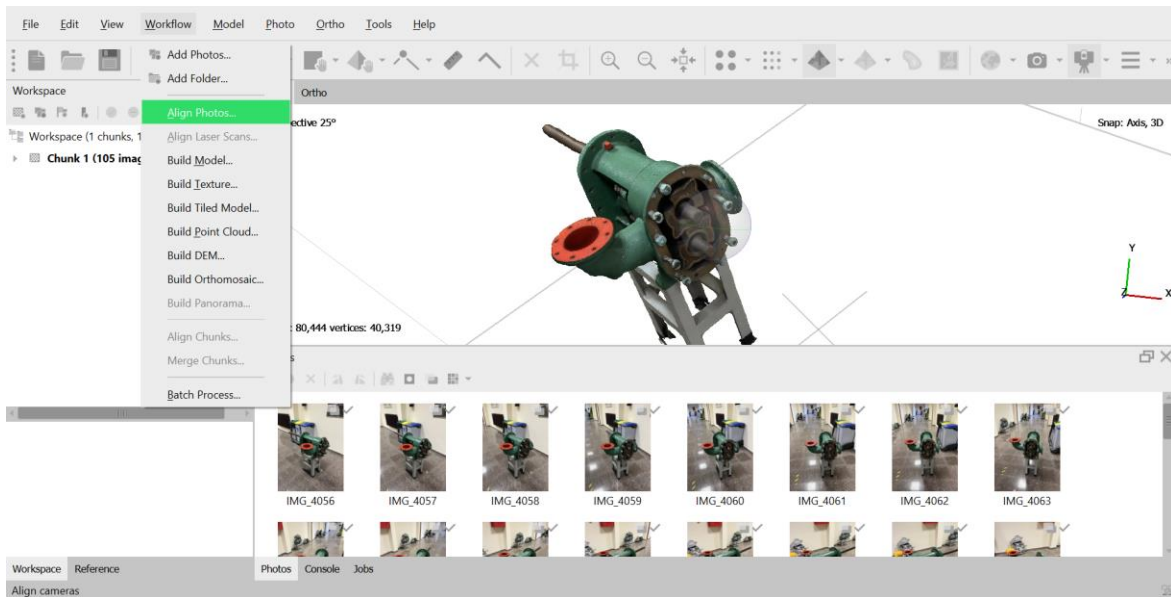


Figura 3-17 Alineamiento de las imágenes en Agisoft Metashape

3.5.1.4 Generación de la nube de puntos

Una vez alineadas las fotos, el siguiente paso es construir la nube de puntos. Para ello dentro de la opción “*Workflow*” seleccionaremos “*Build Point Cloud*”. Metashape permite crear una nube de puntos basada en los parámetros calculados de orientación exterior e interior de la imagen. La generación de nubes de puntos se basa en mapas de profundidad calculados mediante la concordancia estereoscópica densa. Los mapas de profundidad se calculan para los pares de imágenes superpuestas teniendo en cuenta sus parámetros relativos de orientación exterior e interior estimados con el ajuste de paquetes.

Los múltiples mapas de profundidad por pares generados para cada cámara se fusionan en un mapa de profundidad combinado, utilizando la información excesiva de las regiones superpuestas para filtrar las mediciones de profundidad erróneas. Los mapas de profundidad combinados generados para cada cámara se transforman en nubes de puntos parciales, que se fusionan en una nube de puntos final con un paso adicional de filtrado de ruido aplicado en las regiones solapadas. Las normales de las nubes de puntos parciales se calculan mediante el ajuste de planos a la vecindad de píxeles de los mapas de profundidad combinados.

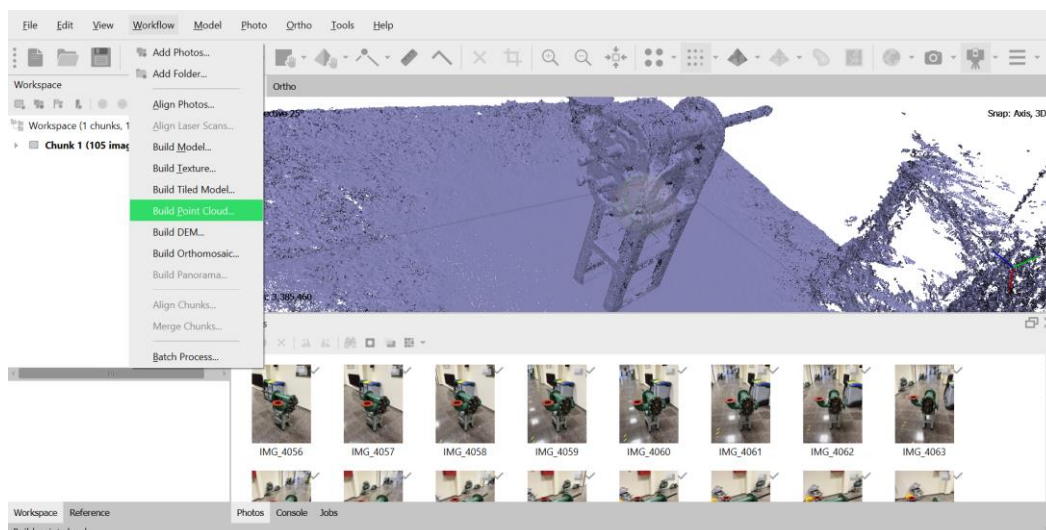


Figura 3-18 Creación de la nube de puntos en Agisoft Metashape

3.5.1.5 Generación del modelo y su textura

Metashape puede reconstruir modelos poligonales basados en la nube de puntos obtenida. Para construir el modelo dentro de la opción “Workflow” seleccionaremos “Build Model”.

Hay que especificar la fuente para el procedimiento de generación del modelo:

- Los puntos de enlace se pueden utilizar para la generación rápida de modelos 3D basados únicamente en la nube de puntos de enlace.
- La configuración de nube de puntos dará lugar a un mayor tiempo de procesamiento, pero generará una salida de alta calidad basada en la nube de puntos previamente reconstruida o importada.
- La configuración de escaneos láser permite utilizar escaneos láser para la reconstrucción del modelo.
- La configuración de mapas de profundidad permite utilizar toda la información de las imágenes de entrada de forma más eficaz y consume menos recursos que la reconstrucción basada en nubes de puntos. Se recomienda utilizar esta opción para la reconstrucción de tipo superficie arbitraria, a menos que el flujo de trabajo utilizado suponga la edición de nubes de puntos antes de la reconstrucción del modelo.
- La opción Mapas de profundidad + escaneos láser permite utilizar mapas de profundidad y datos de escaneos láser en conjunto para la reconstrucción del modelo.

Si las condiciones de iluminación han cambiado significativamente durante la captura del escenario, se recomienda utilizar la opción *Calibrar colores* del menú *Herramientas* antes del procedimiento *Construir textura*. Esta opción puede ayudar a igualar el brillo y el balance de blancos de las imágenes a lo largo del conjunto de datos. Hay que tener en cuenta que para grandes conjuntos de datos *Calibrar colores* puede llevar mucho tiempo.

La función de textura permite crear diferentes tipos de texturas para un modelo de malla poligonal y un modelo de bloques. Para finalizar, una vez obtenida la malla se genera la textura y de esta manera se terminaría el modelado 3D. La proyección de texturas sobre el modelo se ejecuta mediante un proceso por coordenadas, donde las fotos alineadas se proyectan sobre las respectivas caras del modelo. Este proceso se realiza sobre el modelo sólido generado en el punto anterior. Esto dota al modelo de gran realismo y calidad al modelo final.

3.5.2 Proceso de escaneado láser

3.5.2.1 Escaneado

Para la adquisición de las cuatro piezas mecánicas se necesita una planificación previa que busca minimizar el número de posiciones y encontrar la resolución óptima de dichos escaneos, al tiempo que se reduzcan al máximo las posibles oclusiones. Para ello, se determina un total de 7 estacionamientos con el escáner láser Leica ScanStation P16, que permiten modelar al completo todas las piezas y asegurar un correcto solape entre nubes consecutivas o próximas.

Son necesarias aproximadamente dos horas de trabajo. Esto se debe principalmente a su distinta ubicación, lo que supone desplazar el equipo láser y el trípode que lo soporte por varias estancias del edificio Isaac Peral de la ENM. Además, como la geometría de cada una de las piezas es muy singular, se decide seleccionar una resolución de 3.1 mm @10m, que asegura una solución de compromiso entre el detalle del escaneo obtenido y una duración adecuada, alrededor de 3 min. Sin embargo, como se toman imágenes, para dotar de textura cromática a las geometrías obtenidas, el tiempo total de adquisición por escaneo ronda los 15 min.



Figura 3-19 Uso del ScanStation P16

3.5.2.2 Generación de la nube de puntos

Una vez finalizada la fase de trabajo de campo, y tras la descarga de los archivos en el ordenador, se procede al tratamiento de la nube de puntos en el software Cyclone Register 360, para completar el denominado proceso de registro. Este proceso consiste en la integración de todas las nubes individuales en un sistema de coordenadas local único. Dicho procedimiento se alcanza a través de un sistema de restricciones, que utiliza pares de puntos singulares (los llamados tie-points) equivalentes entre nubes o la superposición de nubes de puntos de dos sistemas de coordenadas independientes. El proceso de registro se puede realizar tanto de manera manual como automática, como así ha sido en este trabajo. En ambos casos, se pueden utilizar dianas reflectantes o esferas que ayudan al proceso de registro, dada la dificultad de encontrar tie-points en las propias nubes.

3.5.3 Proceso con luz estructurada

3.5.3.1 Activación y preparación

Para comenzar a escanear es necesario un ordenador además del escáner. Cuanto mejores prestaciones tenga el PC mejor, pero estos son los requisitos mínimos que debe cumplir. Sistema operativo Windows 8.1, 10 (x64), Windows 11. Tarjeta gráfica con 4 GB de VRAM. Una CPU con mínimo Intel Core i5 (76xx y posteriores). Mínimo una memoria RAM de 32 GB, aunque se recomienda el uso de una de 64 GB.

En primer lugar debemos registrarnos para obtener una cuenta en my.artec3d. Seguidamente iniciaremos sesión y descargaremos Artec Installation Center para posteriormente instalarlo. En este momento ya podemos conectar el escáner mediante USB al PC. Finalmente instalamos el software Artec studio 14.

Para escanear las piezas se trató de conseguir la mejor luz ambiente posible. El escáner debe estar enchufado a la corriente, o bien hacer uso de las baterías portátiles que vienen de la casa Artec. Para facilitar el escaneo se añadieron objetos auxiliares como dianas.



Figura 3-20 Uso del escáner Artec Eva

Debido a que las imágenes 3D son capturadas mediante tecnología óptica, algunos tipos de objetos son difíciles de escanear. Ciertas técnicas, sin embargo, permiten escanear con éxito tales objetos. Por ejemplo, podemos cubrir un objeto transparente u oscuro con una pintura clara o cubriendo su superficie con polvos de talco. También podemos utilizar otras sustancias fáciles de eliminar o un spray especial antideslumbrante.

Características de la superficie	Posible solución
Negra o muy oscura	Cubrir con spray antideslumbrante
Brillante o con reflejos	Cubrir con spray antideslumbrante, inclinar el escáner mientras se capturan imágenes
Transparente	Cubrir con spray antideslumbrante
Bordes finos	Añadir geometría en el fondo

Tabla 3-2 Soluciones a características de las superficies

3.5.3.2 Escaneado

Iniciaremos Artec Studio y apuntaremos el escáner a la pieza. Presionamos el botón de ► en el escáner para activar el modo de vista previa. Debemos asegurarnos de que el objeto es visible en la pantalla y entonces volveremos a pulsar el botón ► para iniciar la grabación. Si es posible debemos intentar escanear todo el objeto de una sola vez, moviendo lentamente el escáner alrededor de la pieza.

Si escuchamos un sonido de alerta y comprobamos en la pantalla que ha aparecido un fondo rojo en la pantalla, deberemos apuntar suavemente el escáner al área que acabamos de capturar. Posibles errores pueden ser debidos a que la zona que estemos escaneando sea demasiado pequeña o a que el movimiento del escáner sea muy rápido.

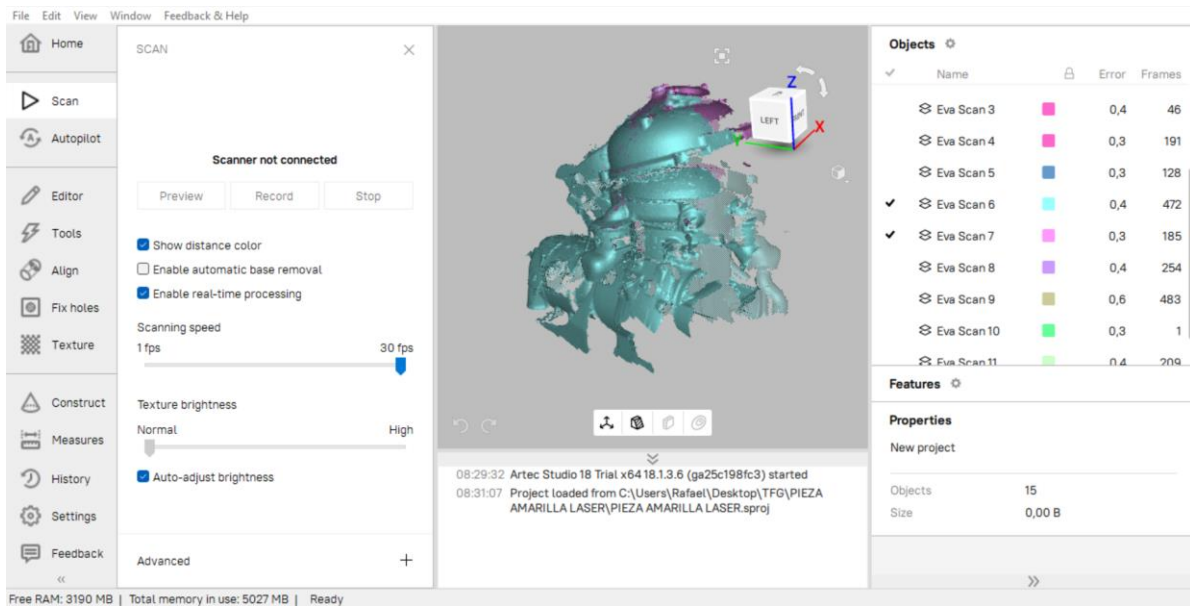


Figura 3-21 Interfaz del proceso de escaneado con luz estructurada

Podemos previamente elegir la velocidad de escaneo que puede variar de 1 a 30 frames por segundo. También podemos ajustar el nivel de brillo de la pieza a escanear. En cada escaneo podemos ver el número de frames que han sido captados por el escáner, el error máximo, el tamaño del escaneo y el número de polígonos captados.

Objects				
✓	Name		Error	Frames
	Eva Scan 5		0,3	128
✓	Eva Scan 6		0,4	472
✓	Eva Scan 7		0,3	185
	Eva Scan 8		0,4	254
	Eva Scan 9		0,6	483
	Eva Scan 10		0,3	1
Features				
Properties				
	Eva Scan 8			
		Basic Advanced		
	Global registration	Done		
	Frames	254		
	Texture frames	26		
	Max. error	0,4		
	Scanner	Eva		

Figura 3-22 Frames por segundo de los distintos escaneos

3.5.3.3 Uso del autopiloto

El autopiloto es un modo inteligente avanzado que guía al usuario a través del postprocesado en unos pocos pasos, seleccionando automáticamente los ajustes más eficaces y produciendo un modelo 3D. Antes de hacer uso del autopiloto podemos ajustar diferentes parámetros.

El método de rellenado de agujeros (las opciones disponibles son No rellenar, Estanco y Por radio) indica al algoritmo que debe rellenar o no agujeros en el modelo.

Hablando de la resolución del modelo, cuanto menor sea el valor de resolución, más nítida será la forma y más detalles se verán. La resolución debe ser no menos de 0.5 para escaneos capturados usando EVA.

En el recuento de polígonos determinamos cuántos polígonos tendrá el modelo resultante. Cuanto mayor sea el valor, mejor será la calidad y mayor el tamaño del archivo. Podemos desactivar la casilla de textura si no queremos aplicársela al modelo.

La resolución de la textura toma valores específicos en el rango de 512 x 512 a 8192 x 8192 o 16384 x 16384 píxeles, dependiendo de la memoria disponible en la GPU.

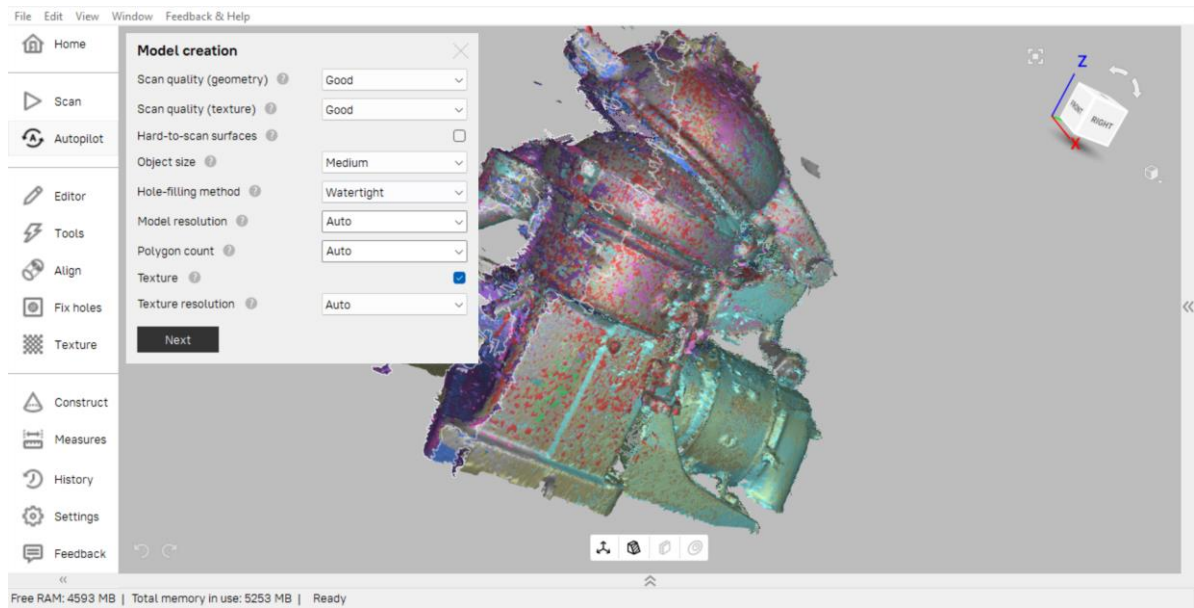


Figura 3-23 Interfaz del modo autopiloto de Artec studio

3.5.3.4 Proceso manual

En algunos casos el modo *Piloto automático* no nos ofrece buenos resultados y tenemos que realizar los pasos de forma manual. Estos son los pasos a seguir:

- *Recortar los alrededores*
Finalidad: Borrar superficies auxiliares (por ejemplo, una mesa o una puerta).
- *Alinear*
Finalidad: Alinear varios escaneos. Omitiremos este paso en el caso de que únicamente se haya realizado un escaneo.
- *Registro global*
Finalidad: Optimizar simultáneamente la posición del cuadro en todos los escaneos, preparándolos para su posterior procesamiento.
- *Eliminar ruido*
Finalidad: Borrar grandes valores atípicos y algo de ruido.
- *Fusión*
Finalidad: Crear un modelo (una única superficie, en contraposición a las múltiples superficies que constituyen los escaneos de origen).
- *Borrar defectos*
Finalidad: Borrar los valores atípicos y las regiones mal escaneadas.
- *Simplificar malla*
Finalidad: Reducir el tamaño del archivo disminuyendo el número de polígonos sin distorsionar significativamente la geometría 3D real.

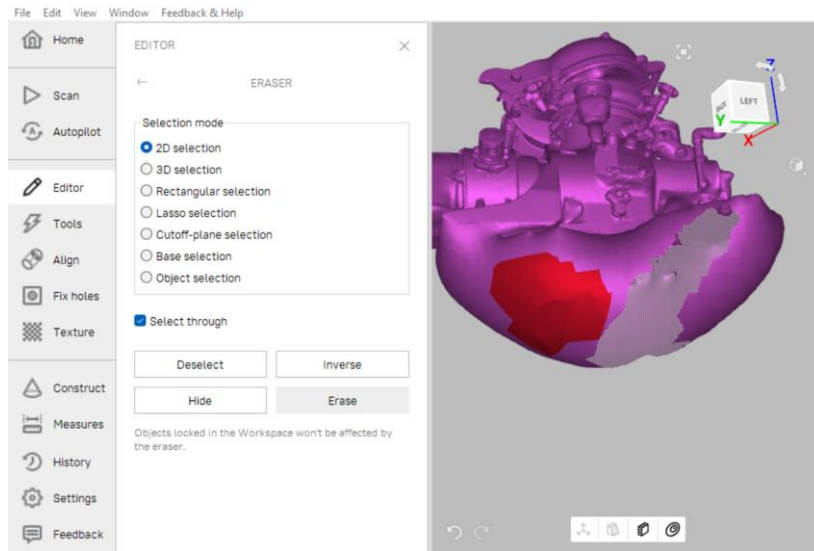


Figura 3-24 Proceso de edición para eliminar defectos del modelo

3.5.3.5 Medir, exportar y compartir

Artec Studio ofrece una serie de herramientas de medición, entre las que se incluyen:

- Medida lineal
- Medida geodésica
- Secciones (secciones transversales)
- Mapas de superficie-distancia
- Anotaciones

La herramienta de medición lineal permite medir distancias entre puntos seleccionados y medir la longitud total de una cadena de varios puntos.

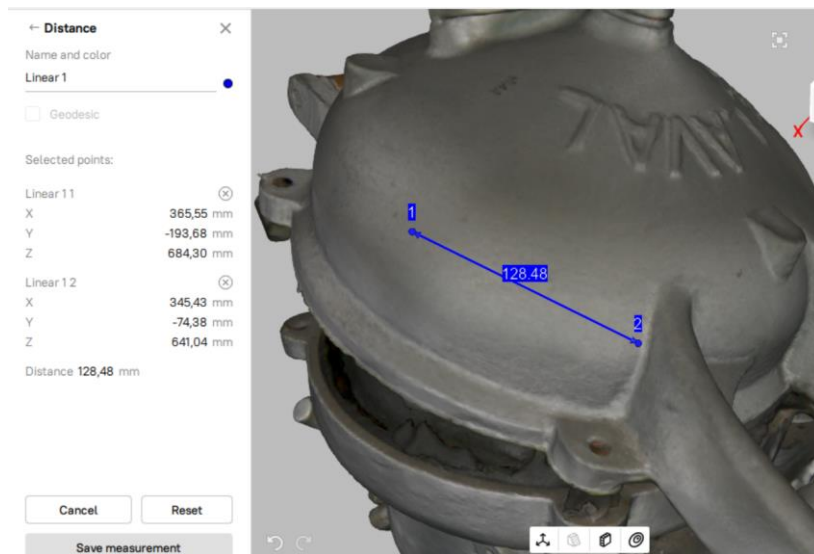


Figura 3-25 Herramienta de medición lineal sobre el modelo

La distancia geodésica se define como la longitud del camino más corto sobre una superficie entre varios puntos dados.

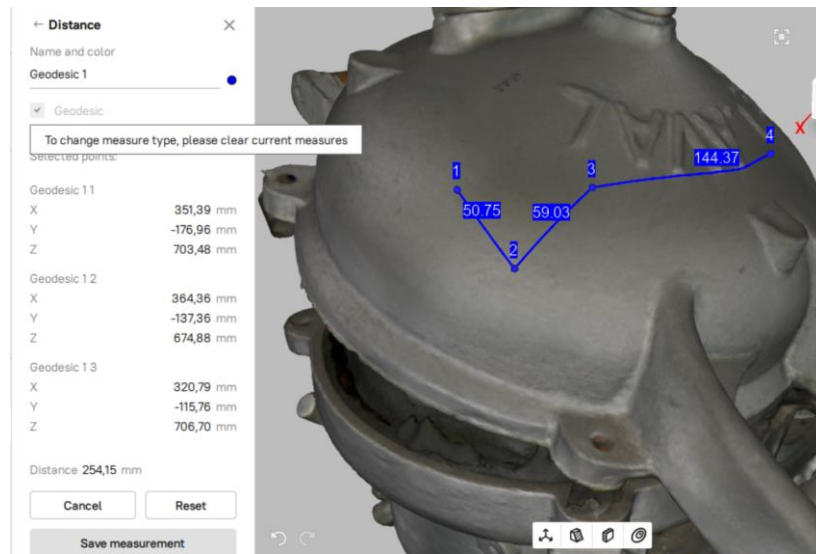


Figura 3-26 Herramienta de medición geodésica sobre el modelo

Cuando queremos almacenar datos para procesarlos en el futuro, lo óptimo es guardar el proyecto como un archivo SPROJ o exportar los datos al formato SCAN. Cualquier versión de Artec Studio puede abrir este último formato. Sin embargo, si planea utilizar los datos en otras aplicaciones como Cloud Compare, guardaremos los escaneos y fotogramas individuales en otro formato. Estos son los formatos en los que podemos exportar los escaneos.

Archivo	Explicación
ply	Formato de archivo poligonal de Stanford
stl	Formato de archivo estereolitográfico
obj	Formato de archivo Wavefront OBJ
wrl	Archivo VRML
x	Formato de archivo Direct X
scan	Formato de escaneado Artec 3D
plyvc	Formato de archivo de polígonos de Stanford con colores de vértices
obc	Archivo de nube de puntos OBC

Tabla 3-3 Formatos que permite exportar Artec studio

3.5.4 Proceso con iPad LiDAR

Debemos planificar con antelación cómo nos moveremos por el objeto o la zona que deseamos escanear. Nos aseguraremos de disponer de un camino despejado con el menor número posible de obstáculos.

Seleccionamos un tamaño de escaneado (pequeño, mediano, grande) que se ajuste a la escala de lo que vamos a escanear. En nuestro caso se hicieron pruebas con los tamaños pequeño y mediano, obteniendo mejores resultados en el modo mediano para las piezas seleccionadas. Esto establecerá el alcance del escáner para que pueda evitar capturar contenido adicional en segundo plano. También podemos establecer el rango de escaneado manualmente pulsando el botón *Rango* en la pantalla de escaneado.

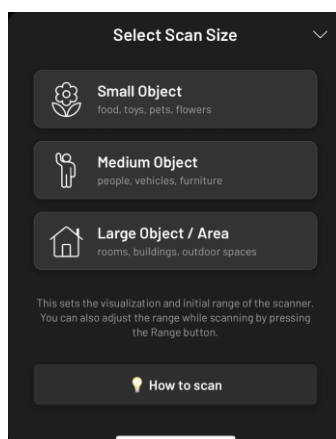


Figura 3-27 Interfaz de elección del tamaño de escaneo

Debemos movernos con suavidad y evita girar bruscamente o golpear el iPad. Esto mejorará la precisión del seguimiento y reducirá el desenfoque del movimiento. Nos aseguramos de que la escena estuviese bien iluminada. Si tienes que escanear en un entorno oscuro, es aún más importante que te muevas despacio y con suavidad.

Las rayas pueden ayudarnos a encontrar las zonas que aún deben escanearse. Sin embargo, no es necesario hacer desaparecer hasta la última raya ya que Scaniverse es capaz de rellenar pequeños agujeros y otros defectos.

Podemos pausar temporalmente un escaneado pulsando el botón de *Pausa* que aparece a la derecha del botón de *Grabación*. Si lo pulsamos una segunda vez se reanudará el escaneado. Después de procesar el escaneado, se utilizó la herramienta de *Recorte* (*Edición > Recortar*) para recortar las áreas no deseadas.

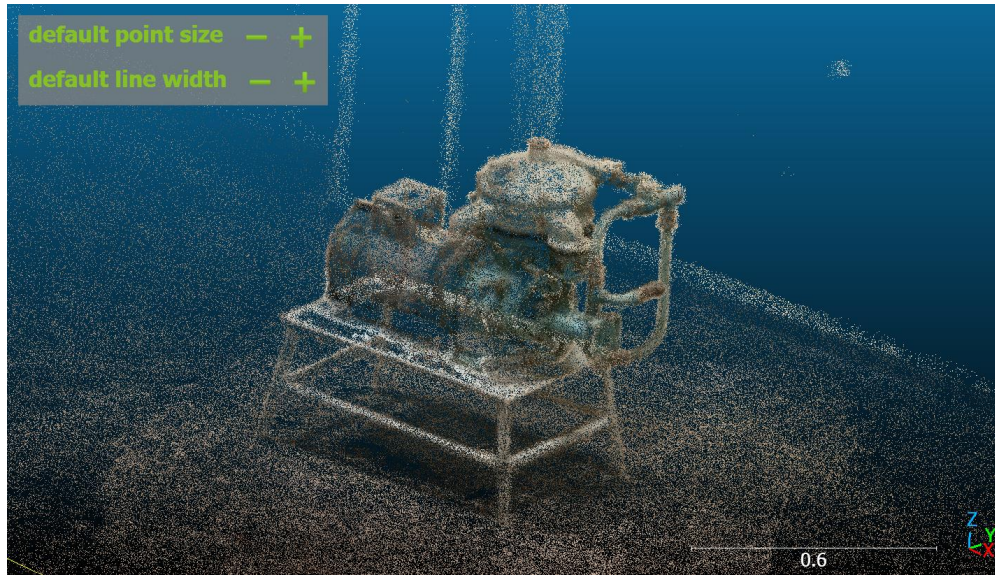


Figura 3-28 Nube de puntos obtenida con Scaniverse

Scaniverse funciona en todos los dispositivos iOS recientes, con o sin LiDAR. En concreto, es compatible con todos los iPhone de 2018 y posteriores.

Iphone	Ipad
iPhone 14 / 14 Plus / 14 Pro / 14 Pro Max	iPad (8th generation and later)
iPhone 13 / 13 Mini / 13 Pro / 13 Pro Max	iPad Air (4th generation and later)
iPhone 12 / 12 Mini / 12 Pro / 12 Pro Max	iPad Mini (5th generation and later)
iPhone 11 / 11 Pro / 11 Pro Max	iPad Pro 12.9" (3rd generation and later)
iPhone XR / XS / XS Max	iPad Pro 11" (all generations)
iPhone SE (2nd and 3rd generation)	

Tabla 3-4 Dispositivos de Apple compatibles con Scaniverse

Scaniverse puede exportar mallas en los siguientes formatos: FBX, OBJ, GLB, USDZ y STL. También puede exportar nubes de puntos a: PLY y LAS.

4 RESULTADOS

Una vez que se ha explicado de forma detallada el proceso fotogramétrico para la obtención de los modelos 3D mediante el uso del software *Agisoft Metashape Professional*, se van a presentar los resultados obtenidos de las diferentes piezas. En este apartado de resultados se van a recoger los productos resultantes de cada una de las piezas.

Bomba centrífuga SKETCHFAB: <https://skfb.ly/oQRGG>

Centrifugadora separadora de aceite SKETCHFAB: <https://skfb.ly/oTntv>

Centrifugadora Alfa Laval SKETCHFAB: <https://skfb.ly/oTnsz>

Motor de cuatro tiempos SKETCHFAB: <https://skfb.ly/oTntJ>

Es preciso mencionar que los modelos 3D visualizados desde *Sketchfab* no corresponden con la calidad ni el nivel de detalle real de los modelos visualizados con los programas específicos de cada técnica, mencionados a lo largo del presente Trabajo de Fin de Grado. Sólo se proporcionan los links como una herramienta interactiva que ayude al lector a la visualización de las piezas.

Se emplea el software CloudCompare como herramienta común para la visualización de los modelos tridimensionales generados por las distintas técnicas.

4.1 Bomba centrífuga con fotogrametría

4.1.1 Orientación de las fotografías y generación de la nube de puntos dispersa

En el caso de la bomba centrífuga se buscó un objeto con colores distintos y una superficie mate que no produjera brillos que pudieran dificultar la generación del modelo en tres dimensiones. Nos encontramos en un entorno favorable para la adquisición de imágenes al estar protegidos de las condiciones meteorológicas. La iluminación jugó un factor importante ya que la existencia de un único punto de luz en el techo provocó que se crearan sombras en la parte inferior de la pieza. Esto hace más difícil que se resalten los contrastes naturales y la textura superficial del objeto en cuestión. Se logró mantener una iluminación constante a la hora de la toma de las distintas fotografías.

Para la orientación de las imágenes se ha elegido la técnica de manera secuencial como podemos observar en la Figura 4-1 Orientación de las fotografías. Las capturas de las fotografías se realizaron siguiendo un orden para así facilitar el solapamiento de las imágenes y evitar dejar puntos ciegos que dificultaran el alineamiento de las fotografías.

En total se han obtenido 220.441 caras y 110.936 vértices. Se añadieron a posteriori más imágenes debido a que se habían quedado algunos espacios sin cubrir. Se tuvo que seleccionar la opción de alineación incremental de imágenes. Para que esto sea posible, se deben seguir dos reglas:

- 1) El entorno de la escena no debe haber cambiado significativamente (condiciones de iluminación).
- 2) Escogemos activar la opción *Mantener puntos clave* en el cuadro de diálogo *Preferencias*.

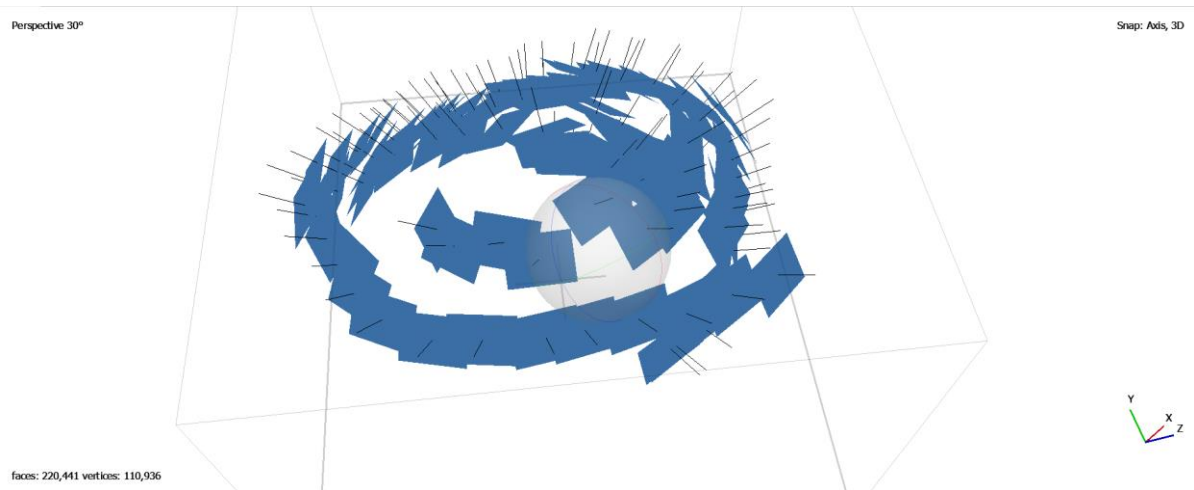


Figura 4-1 Orientación de las fotografías

En la siguiente figura podemos observar con detalle la orientación exacta con la que fue tomada cada fotografía además del contenido de la misma. También podemos apreciar la secuencia de las imágenes tomadas siguiendo una espiral y el eje local de cada fotografía tomada. En total se emplearon 105 imágenes para realizar el modelo de la pieza.

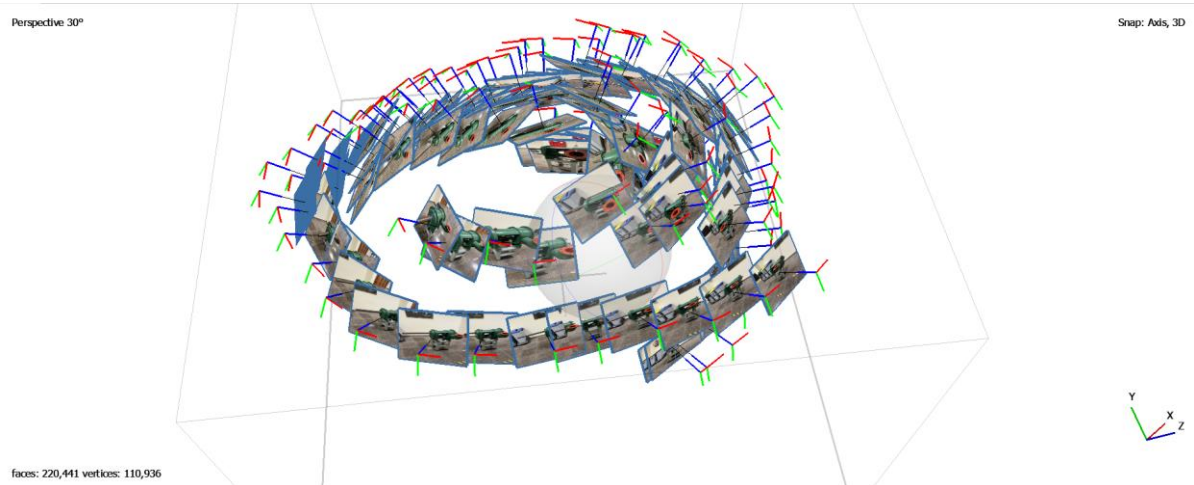


Figura 4-2 Orientación de las fotografías con contenido

En este primer paso del proceso podemos observar la nube de puntos dispersa que cuenta con 57.265 puntos. Cada punto tiene unas coordenadas (x,y,z) que describen su posición en el espacio tridimensional. A pesar de ser un resultado temprano e incompleto ya se puede diferenciar la forma del objeto a grandes rasgos y cuáles son las partes de la pieza con más información obtenida. Podemos concluir que se ha realizado una buena primera fase del modelado.

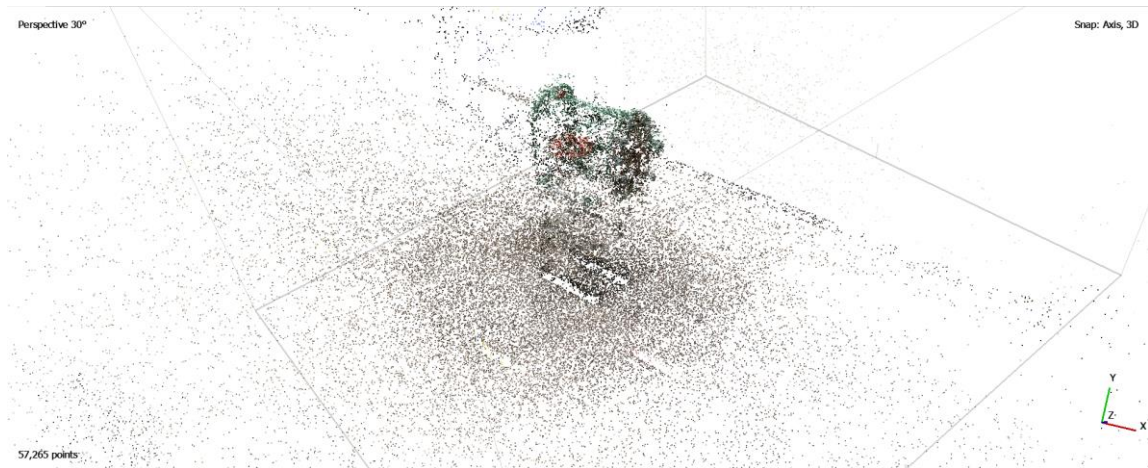


Figura 4-3 Ejemplo de nube de puntos dispersa

4.1.2 Nube de puntos densa

En la siguiente fase del proceso fotogramétrico se aumentará la densidad de la nube de puntos. Podemos comprobar como ahora la nube cuenta con 3.385.460 puntos. Con el software podemos representar la nube de puntos sólidos, por colores, clases, intensidad y elevación. Gracias a que el modelado 3D es realizado mediante fotogrametría, cada punto tiene asociado una gama cromática distinta. Esta nube de puntos nos proporciona una representación detallada. Se pueden apreciar con detalle las formas, curvas e irregularidades de la pieza. Podemos empezar a diferenciar aspectos característicos de la pieza.

Cabe destacar que en esta nube de puntos densa también contamos con distintos puntos ajenos a la pieza que forman parte del suelo y las paredes que posteriormente serán recortados de la nube de puntos para centrarnos exclusivamente en la pieza.

También es importante mencionar que el grosor de los distintos puntos que conforman la nube puede ser cambiado. Si los aumentamos lo suficiente hará que la nube de puntos parezca completamente sólida pero no sería fiel a la realidad, tan sólo un efecto óptico.



Figura 4-4 Nube de puntos densa

4.1.3 Generación de la malla y la textura

El siguiente paso del proceso fotogramétrico sería la reconstrucción de la malla. Este es un proceso fundamental en la digitalización del modelo 3D. A partir de la nube de puntos densa se genera una malla poligonal tridimensional. Esta malla será la representación de la superficie del objeto.

La unión de puntos de la nube se realiza exclusivamente con triángulos. En la pieza se han generado 220.441 caras y 110.936 vértices. Con este proceso se define un modelo sólido cerrado de la pieza, con el que podemos apreciar más en detalle su estructura. A continuación, se muestran las distintas capas que el programa *Agisoft Metashape* nos habilita tras realizar el proceso de mallado. Estas capas son la de sólido con textura y sólido mallado..

En la figura de la derecha podemos observar el proceso de recorte llevado a cabo en *Agisoft Metashape* para eliminar las zonas sobrantes y dejar exclusivamente la pieza. Así posteriormente se podrá realizar una justa comparación en el apartado 4.5.

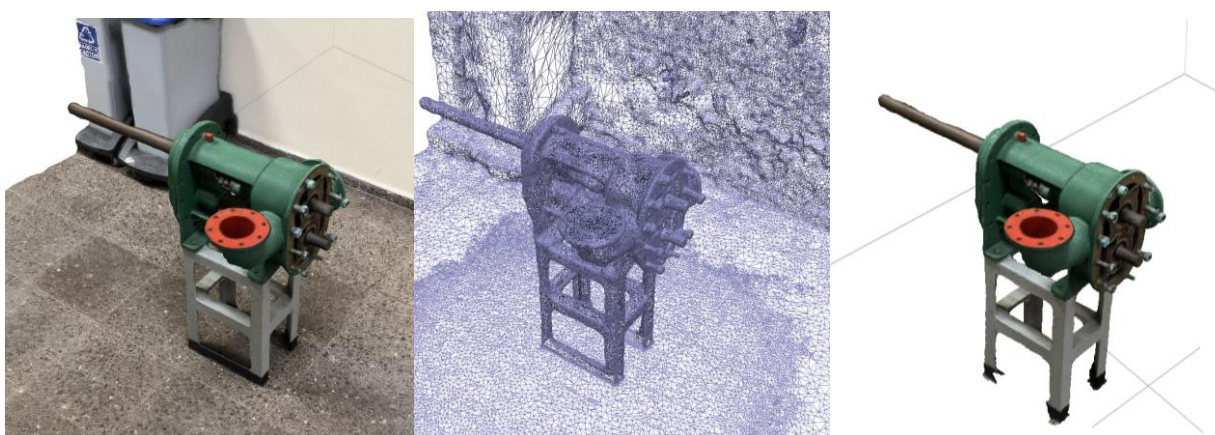


Figura 4-5 De izquierda a derecha: modelo 3D texturizado, modelo de malla y modelo 3D con contorno eliminado.

A continuación, podemos observar la nube de puntos obtenida a través de *Agisoft Metashape* después de recortar las partes sobrantes que se encuentran alrededor de la pieza que a pesar de ser captadas por las fotografías no aportan valor a la nube de puntos. Ha sido visualizada en el software abierto *CloudCompare* obteniendo un total de 428.954 puntos.

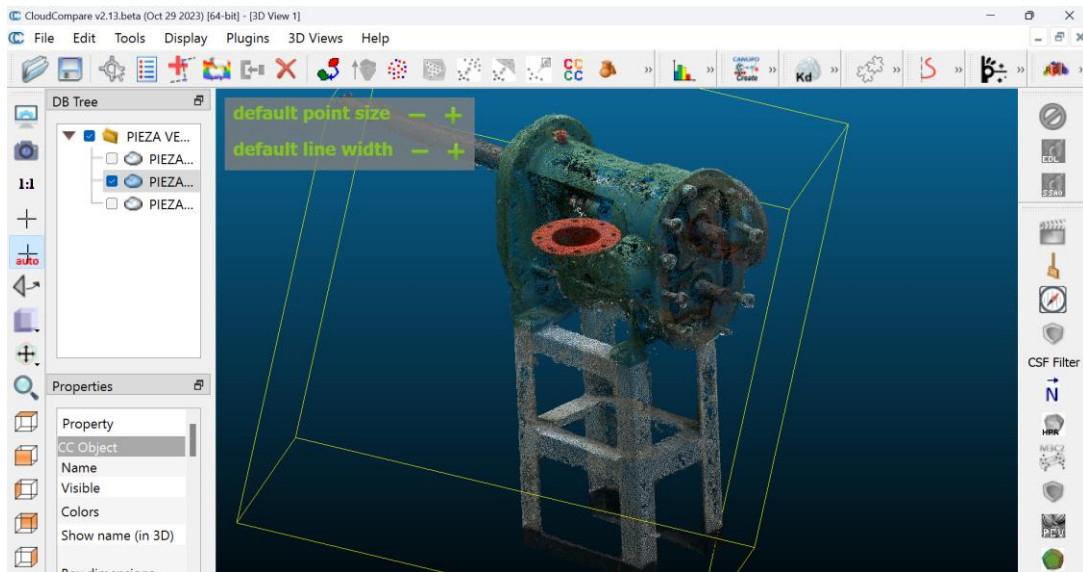


Figura 4-6 Nube de puntos en *CloudCompare* bomba centrífuga

4.2 Motor de cuatro tiempos con Scan Station P16

En la nube de puntos obtenida a través del ScanStation P16 podemos comprobar un gran nivel de detalle fruto del número de puntos de los que se compone la misma. En el caso del motor está compuesta por 12.884.732 de puntos. Este número es muy alto comparado con los obtenidos con otras técnicas

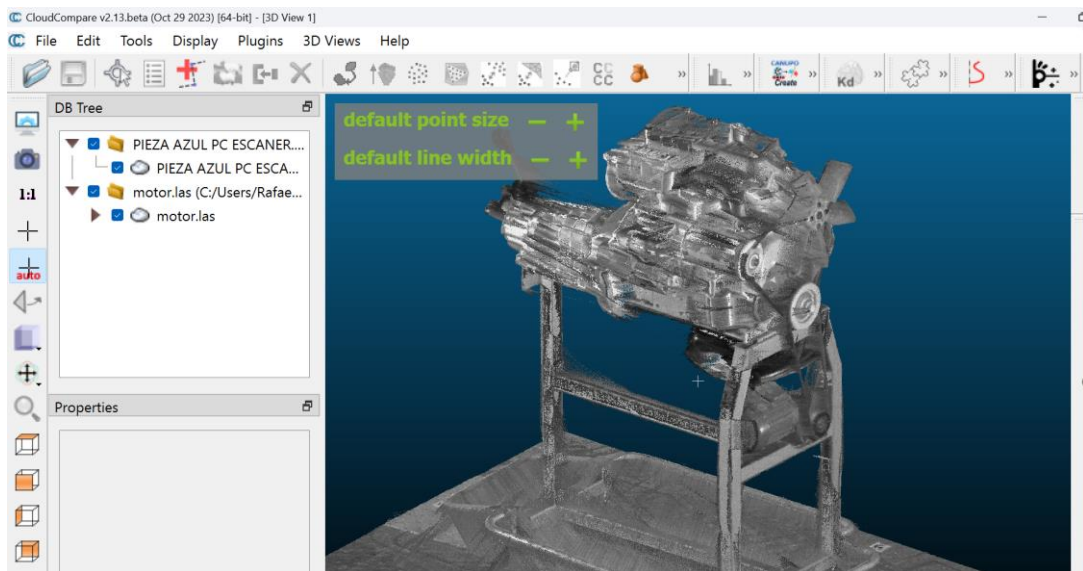


Figura 4-7 Nube de puntos en *CloudCompare* motor cuatro tiempos

Es importante mencionar que a través de esta disciplina sólo se ha obtenido una nube de puntos y no un modelo sólido 3D. Sin embargo, este problema se puede solventar fácilmente con la importación de la nube de puntos en cualquier software de modelado 3D, que permita la generación de superficies. Un buen ejemplo sería el software *CloudCompare*.

4.3 Centrifugadora separadora de aceite con luz estructurada

En el caso de la luz estructurada obtenemos una nube de puntos con un número de puntos no muy elevado, pero a pesar de ello muestra gran fidelidad al objeto real. Los colores de los puntos de la nube no pueden ser visualizados en *CloudCompare* pero sí en Artec Studio 14. Esto es, no permite la exportación de información RGB, solo la geometría de las formas. Para la centrifugadora separadora de aceite se han obtenido un total de 239.708 puntos.

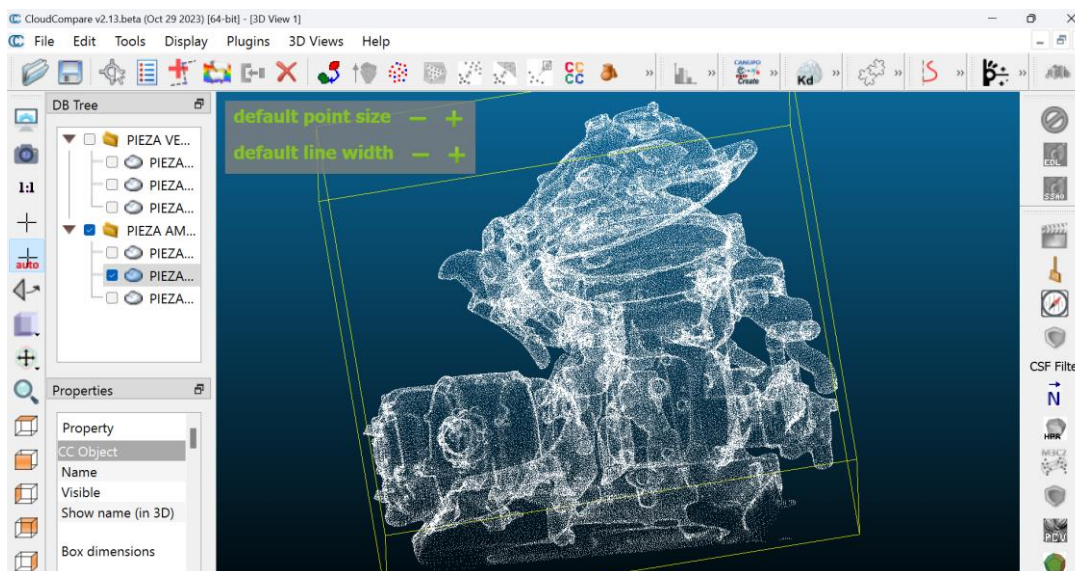


Figura 4-8 Nube de puntos en CloudCompare centrifugadora separadora de aceite

4.4 Centrifugadora Alfa Laval con iPad LiDAR

En el caso de la nube de puntos obtenida por iPad LiDAR nos encontramos con una nube con poca densidad y con notable ruido en la superficie de la pieza. Además, hallamos zonas con poco detalle que no han sido detectadas por el LiDAR del iPad con calidad. Sin embargo, el modelo generado de la centrifugadora Alfa Laval contiene un total de 267.070 puntos

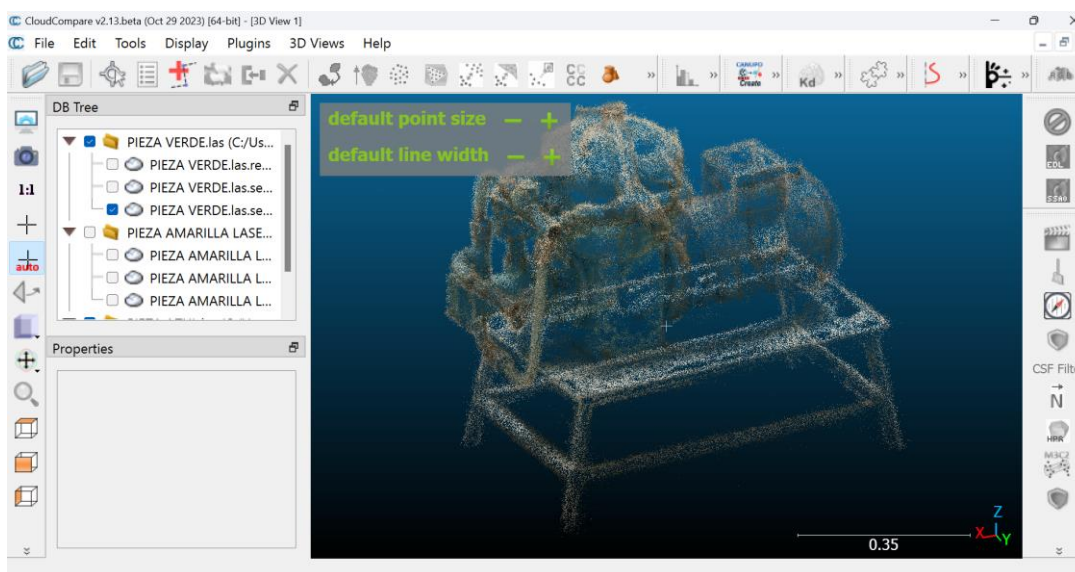


Figura 4-9 Nube de puntos en CloudCompare centrifugadora Alfa Laval

4.5 Comparación entre las distintas técnicas de modelado 3D

Las técnicas de digitalización 3D utilizadas han sido la fotogrametría, la luz estructurada, el escáner láser y el Ipad LiDAR. A continuación, se presenta una comparación a través de la cual se pretende identificar las fortalezas y debilidades de cada tecnología de acuerdo con las características de las cuatro piezas mecánicas que se han digitalizado. Se han preservado las mismas condiciones del entorno para los distintos métodos.

Los resultados obtenidos en los modelos digitales por fotogrametría fueron satisfactorios, aunque hay que mencionar que se detecta una falta de detalle en zonas puntuales de las piezas que tienen un menor tamaño. El modelo es muy visual al estar formado por fotografías, lo que hace que tengo un aspecto bastante fiel a la realidad. No hay que olvidar que donde verdaderamente se ve la calidad del modelo para hacer medidas es en la nube de puntos, ya que el proceso de triangulación para la generación de los modelos sólidos los emplea como base



Figura 4-10 De izquierda a derecha: Fotografía y modelo 3D obtenido por fotogrametría

Los resultados del registro de textura también fueron aceptables, obteniendo algunos errores en las superficies fruto de un solapamiento fallido. Estos errores tuvieron que ser arreglados con el software *Agisoft Metashape*. En el modelo son observables a simple vista las rugosidades de determinadas superficies de los distintos objetos lo cual aporta realismo. Comparando los objetos reales con los modelos podemos comprobar cómo en estos últimos se heredan fielmente los colores de las superficies, lo que les da un aspecto natural y vívido.

El inconveniente de estas texturas con alta definición es que generan archivos muy pesados. Comparando el modelo de la centrifugadora Alfa Laval obtenido mediante Scaniverse con el obtenido mediante fotogrametría, podemos observar que para el primero el archivo pesa únicamente 19,1 MB comparados con los 53,2 MB obtenidos del producto de Agisoft Metashape.

METODOLOGÍA	FOTOGRAMETRÍA	ESCANER LUZ ESTRUCTURADA	ESCANER LASER	IPAD LIDAR
MODELO	iPhone 13	Eva Artec	Scan Station P16	Ipad Pro 11 pulgadas 2ª generación
PRECIO	739 €	13.700 €	25.800 €	963 €
APLICACIÓN SOFTWARE	Agisoft Metashape	Artec studio 14	Cyclone Register 360	Scaniverse
Necesidad de preparación	No	Sí	Sí	No
PRECIO	3240 €	-	-	-
ADAPTACIÓN AL ENTORNO				
Rango de trabajo	Variable	0,4-1 m	40 m	1 m
Dianas	Sí	No	No	No
ADQUISICIÓN DE DATOS				
Colección de datos	Manual	Manual	Automática	Manual
Método de captura	Fotografía	Geometría y textura	Geometría y textura	Geometría y textura
Velocidad de escaneo	-	11 FPS	20 minutos/escaneo	60 FPS
Número de resultados	80-100 fotografías	30-40 escaneos	12-15 escaneos	-
Tiempo de captura	30 minutos	1 hora	2 horas	5 minutos
PROCESAMIENTO DE DATOS				
Hardware	CPU: AMD Ryzen 7 5825U with Radeon Graphics 2.00 GHz RAM: 16 GB	CPU: Intel Core i7-7700HQ 2.80 GHz RAM: 32 GB	CPU: Intel Core i7-7700HQ 2.80 GHz RAM: 32 GB	Procesador: Apple M1 CPU y GPU de 8 núcleos Neural Engine RAM: 8 GB
Tiempo de procesado	2-3 días	2 horas	1 hora	5-10 minutos

Tabla 4-1 Comparación de las cuatro disciplinas

En la tabla anterior encontramos una comparación de las 4 disciplinas en varios aspectos como son el modelo, la aplicación software, la adaptación al entorno, la adquisición de datos y el procesamiento de datos. Destacar la diferencia de precios para el hardware empleado en cada técnica. En el proceso de fotogrametría, el proceso de digitalización es demasiado largo comparado con el resto de las técnicas.

Los resultados con la fotogrametría han sido aceptables, a pesar de una ausencia de detalle detectada en pequeños objetos y detalles específicos.

Hablando sobre el proceso de adquisición de datos es importante mencionar que el Artec Eva de luz estructurada necesita estar conectado a corriente y al ordenador mientras el objeto está siendo escaneado.

El escáner láser ha sido la técnica que ha requerido mayor tiempo de captura, seguido del escáner de luz estructurada, la fotogrametría y el iPad LiDAR.

El nivel de ruido en las nubes de puntos también es un aspecto para mencionar. Si esta nube de puntos no ha sido limpiada correctamente puede distorsionar áreas o características geométricas en algunas zonas del modelo 3D. El ruido presente en los modelos obtenidos con Scaniverse es elevado.

Las mallas generadas a partir de las nubes de puntos de las diferentes técnicas muestran grandes diferencias. La malla que nos da un mayor número de polígonos es la obtenida con el escáner láser seguida de la obtenida a través de la fotogrametría.

También podemos encontrar diferencias en las texturas generadas por las diferentes técnicas de escaneado. La fotogrametría presenta la superficie de la estructura fragmentada y rellena los espacios vacíos con un sombreado general de un color similar a la superficie más grande. La estructura de la superficie de los modelos obtenidos con Artec Eva está menos fragmentada. También rellena los huecos con un sombreado general.

RESULTADOS (media de las 4)	FOTOGRAMETRÍA	ESCANER LUZ ESTRUCTURADA	ESCANER LASER	IPAD LIDAR
Tiempo de procesado	49-73 horas	3 horas	3 horas	10-15 minutos
Número de puntos	400.000	240.000	1.200.000	160.000
Número de polígonos	44000	27000	130.000	18.000
Resolución	-	0,3 mm	0,4 mm a 10 m	-
Ruido	Medio	Medio	Bajo	Alto

Tabla 4-2 Comparación de los resultados obtenidos

4.6 Importación de los modelos en Autodesk Inventor

Para evaluar la compatibilidad de los modelos 3D obtenidos con el software Autodesk Inventor Professional 2024 se exportaron las digitalizaciones obtenidas a un formato OBJ. Además, Autodesk Inventor puede importar directamente formatos como STEP, IGES, y STL. Esta clase de archivos pueden ser importados al software mencionado anteriormente, donde podremos llevar a cabo las simulaciones dinámicas y análisis por elementos finitos pertinentes.

Es importante mencionar que Autodesk Inventor solo admite modelos sólidos y no nubes de puntos. Los modelos mallados obtenidos por fotogrametría contienen un número elevado de polígonos lo cual puede afectar al rendimiento del software en cuestión. Para ajustar los modelos obtenidos se puede utilizar el software Meshmixer. Este es un software de edición de mallas 3D donde podremos realizar una reducción de polígonos o una reparación de la malla.

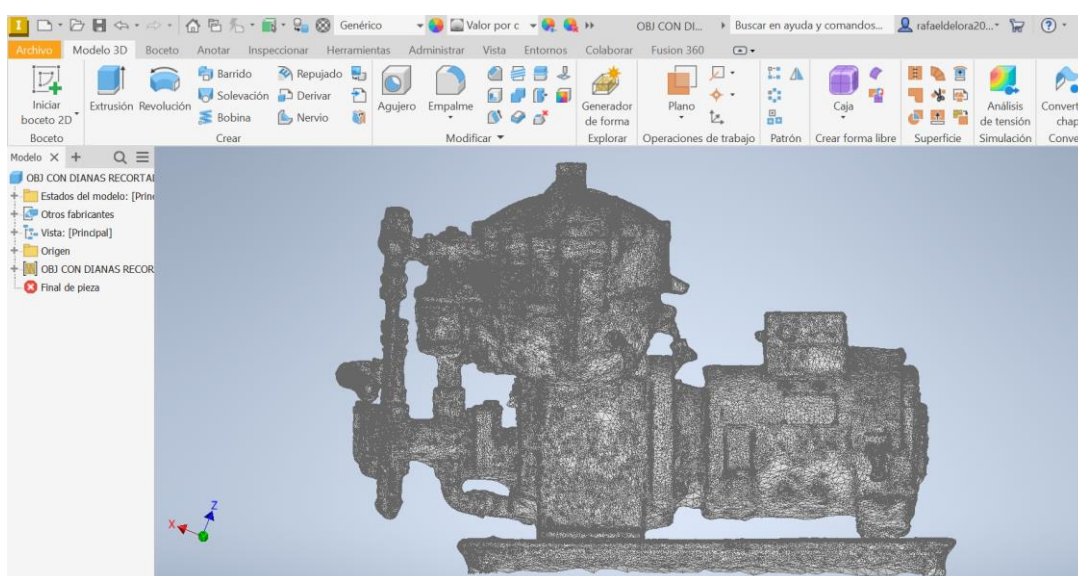


Figura 4-12 Modelo mallado de centrifugadora Alfa Laval en Autodesk Inventor

5 CONCLUSIONES Y LÍNEAS FUTURAS

5.1 Conclusiones

Una vez se ha realizado el estudio de la aplicación de la fotogrametría y otras disciplinas de digitalización al modelado tridimensional de piezas mecánicas, se pueden determinar las siguientes conclusiones:

- Se ha logrado con éxito el establecimiento de un flujo de trabajo adaptado para cada una de las técnicas de digitalización empleadas. Se ha demostrado que no todas las técnicas de digitalización 3D tienen la misma precisión y exactitud y que la elección de la técnica de escaneado 3D utilizada dependerá de la experiencia del usuario.
- También se ha podido demostrar numérica y gráficamente que el escáner láser es la técnica más precisa para modelar las piezas. La técnica de luz estructurada proporciona mejor detalle geométrico y resolución en pequeños detalles que la fotogrametría digital. Podemos asegurar que la técnica de luz estructurada obtiene mejores geometrías por la obtención de una mayor nube de puntos y la adaptabilidad de sus triángulos a la hora de crear la malla 3D es mucho más fiable al objeto original que las otras técnicas.
- En cuanto al procesamiento de las imágenes de fotogrametría hay que destacar la importancia del uso de dianas para obtener un solapamiento más fácil de las imágenes, así como la correcta elección de una zona bien iluminada donde realizar las fotografías. Además, la calidad del modelo fotogramétrico resultante dependerá en gran medida de la calidad de las imágenes tomadas y de la cámara utilizada.
- El escáner es el que presenta un mayor rango para escanear las piezas por lo que puede escanear piezas de gran tamaño. Las otras técnicas tienen limitaciones al tratarse de escáneres de corto alcance, lo que limita el tamaño de los objetos a escanear.
- Es importante tener en cuenta la diferencia de precio de unas disciplinas a otras, ya que si valoramos la precisión y nivel de detalle que queremos obtener, emplearemos una técnica u otra en función del presupuesto del que se disponga.
- Destacar los largos tiempos de procesamiento en Agisoft Metshape y la necesidad de emplear un ordenador con mejor tarjeta gráfica para realizar el escaneado con luz estructurada, así como para tratar las nubes de puntos obtenidas con la ScanStation P16. Mencionar la fluidez y el rápido procesamiento de Scaniverse para la obtención de modelos 3D lo que lo hace una opción totalmente viable si queremos prescindir de algo de precisión en el modelo.

- Se ha comprobado la compatibilidad de los modelos 3D obtenidos con el software Autodesk Inventor Professional 2024.

Concluimos finalmente, después de haber llevado a cabo una comparación de todas las técnicas de digitalización, que la más adecuada para obtener modelos 3D de piezas mecánicas es el escáner de luz estructurada teniendo en cuenta los factores que han sido estudiados, como el tiempo de procesado, el nivel de detalle, el precio del hardware y software empleado, el nivel de ruido y la textura del modelo obtenido. Sin embargo, es conveniente destacar que se trata de una solución particularizada a este trabajo. Hay que tener en cuenta que si se vuelve a realizar el mismo estudio con otros dispositivos de escaneado láser o una cámara fotográfica diferente, incluso sobre unas piezas distintas, podríamos obtener un resultado dispar al del presente Trabajo de Fin de Grado, ya que todas las técnicas presentan en realidad, ventajas e inconvenientes respecto al resto.

5.2 Líneas futuras

En este apartado se recogen las mejoras y posibles nuevos test al presente proyecto, con la intención de mejorar el campo de investigación relacionado con esta materia:

- Utilizar una cámara profesional para la toma de fotografías de las piezas mecánicas y así obtener un resultado más detallado del modelo 3D.
- Digitalizar objetos de distintos tamaños para poder tener en cuenta este factor en la comparación de las distintas disciplinas. Una opción para valorar sería haber elegido piezas de menor tamaño y usar entonces el Artec Spider en lugar del Artec Eva que cuenta con un mayor alcance.
- Ensayar las técnicas de digitalización en diferentes condiciones de iluminación del entorno para comprobar qué disciplina se desenvuelve mejor en este ámbito. En principio, cabría esperar que fotogrametría tuviese un peor resultado al ser altamente susceptible a este aspecto.
- Realizar un museo virtual de todas las piezas mecánicas que se encuentran expuestas en el edificio Isaac Peral de la Escuela Naval Militar.

6 BIBLIOGRAFÍA

- [1] I. Puente, J. Sanjurjo-Pinto, M. Solla y R. Asorey-Cacheda, 3D Reconstruction of the Roman Site Aquis Querquennis by Means of TLS and GPR Methods. In *Nondestructive Techniques for the Assessment and Preservation of Historic Structures* (pp. 227-237). CRC Press, 2017.
- [2] M. Burston, R. Sabatini, A. Gardi y R. Clothier, Reverse engineering of a fixed wing Unmanned Aircraft 6-DoF model based on laser scanner measurements. In *2014 IEEE Metrology for Aerospace (MetroAeroSpace)*, IEEE (pp. 144–149), 2014. <https://doi.org/10.1109/MetroAeroSpace.2014.6865910>
- [3] A.C. Voicu, I.G. Gheorghe, L.L. Badita, A. Cirstoiu. 3D Measuring of complex automotive parts by multiple laser scanning. *Applied Mechanics and Materials*, 371 (2013), pp. 519-523, 10.4028/www.scientific.net/AMM.371.519
- [4] E. Solaberrieta, R. Minguez, L. Barrenetxea, E. Sierra, O. Etxaniz. Computer-aided dental prostheses construction using reverse engineering. *Computer Methods in Biomechanics and Biomedical Engineering*, 17 (2014), pp. 1335-1346, 10.1080/10255842.2012.745859
- [5] Chromy, A. and L. Zalud, Robotic 3D scanner as an alternative to standard modalities of medical imaging. *SpringerPlus* 3, 1-10 (2014).
- [6] Adugna, Y.W., Kurukkal, N.S., Lemu, H.G. (2024). Anatomical Model Reconstruction (Solid Modeling) Using a Reverse Engineering Approach. In: Pavlou, D., et al. *Advances in Computational Mechanics and Applications*. OES 2023. Structural Integrity, vol 29. Springer, Cham. https://doi.org/10.1007/978-3-031-49791-9_18
- [7] B. Vijaya Ramnath, C. Elanchezhian, J. Jeykrishnan, R. Ragavendar, P.K. Rakesh, J. Sujay Dhamodar, A. Danasekar, Implementation of Reverse Engineering for Crankshaft Manufacturing Industry, *Materials Today: Proceedings*, Volume 5, Issue 1, Part 1, 2018, Pages 994-999, <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2017.11.175>
- [8] Parras, D., Romero, L., Cavas, F., Nieto, J., Cañavate, F., & Fernández-Pacheco, D. G. (2016). Use of 3d scanning and reverse engineering for the prototyping of mechanical parts. In *20th international congress on project management and engineering*. Cartagena (pp. 867-879).

- [9] Agisoft Metashape. (n.d.). Requerimientos del sistema [System Requirements]. Retrieved April 5, 2024, from <https://www.metashape-la.com/>
- [10] Laussedat (n.d.). La fotogrametría. [Centro Universitario Europeo CEUPE]. Retrieved April 5, 2024, from <https://www.ceupe.com/blog/la-fotogrametria.html>
- [11] Government of Canada. (2016). Concepts of Aerial Photography. [Natural Resources Canada]. Retrieved April 5, 2024, from <https://natural-resources.canada.ca/maps-tools-publications/satellite-imagery-air-photos/air-photos/national-air-photo-library/about-aerial-photography/concepts-aerial-photography/9687>
- [12] Instituto Geográfico Nacional (IGN). (s. f.). Portal del Instituto Geográfico Nacional. Recuperado el 7 de abril de 2024, de <https://www.ign.es/web/ign/portal>
- [13] Instituto Geográfico Nacional. (n.d.). OBS-Fotogrametría [Documento Técnico]. Retrieved April 5, 2024, from <https://www.ign.es/web/resources/docs/IGNCnig/OBS-Fotogrametria.pdf>
- [14] Instituto Geográfico Nacional. (n.d.). Modelo Digital del Terreno (MDT). [Plan Nacional de Ortofotografía Aérea]. Retrieved April 5, 2024, from <https://pnoa.ign.es/pnoa-lidar/modelo-digital-del-terreno>
- [15] Balaguer, M. (n.d.). Fotogrametría de Objeto Cercano: Conceptos básicos. [Documento PDF]. Retrieved April 5, 2024, from https://ics.uci.edu/~djp3/classes/2008_09_26_CS221/Lectures/Lecture19.key/droppedImage-21.pdf
- [16] Sjoerd Van Riel. **Structure from Motion (SfM) photogrammetric principle.** [Image]. (2016). Retrieved from Theia-sfm.org. (Accessed: April 5, 2024)
- [17] Thomas Luhmann(2010). Close-range photogrammetry for industrial applications. [ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing]. Retrieved April 5, 2024, from <https://developer.mozilla.org/en-US/docs/Web/API/Document/URL>
- [18] Várady, T.; Martin, R.R.; Cox, J. Reverse engineering of geometric models—An introduction. *Comput. Aided Des.* 1997, 29, 255–268.
- [19] Hwang, C.Y.; Tsai, C.Y.; Chang, C.A. Efficient inspection planning for coordinate measuring machines. *Int. J. Adv. Manuf. Technol.* 2004, 23, 732–742.
- [20] Vojáček, A.; Princip laserových snímačů vzdálenosti s triangulačním principem měření. *Automatizace.Hw.Cz Rady A Posled. Novinky Z Oboru* 2015 <https://automatizace.hw.cz/>
- [21] **hesamh. (2016, March 20). DIY 3D Scanner Based on Structured Light and Stereo Vision in Python Language. In *Circuits [Instructables]*. Retrieved April 5, 2024, from <https://www.instructables.com/DIY-3D-scanner-based-on-structured-light-and-stere/>
- [22] Rozptyl Světla. Techmania Science Center. <http://edu.techmania.cz/>
- [23] Hotář, V. Úvod do Problematiky Strojového Vidění: Část 1: Základní Principy a Hardware; Skripta, Ed.; Technická Univerzita v Liberci: Liberec, Česká Republika, 2015; ISBN 978-80-7494-156-6.
- [24] Trocha, M. Karpov, D. Ganin, M. H. P. Pfeiffer, A. Kordts, S. Wolf, J.Krockenberger, P. Marin-Palomo, C. Weimann, S. Randel, W. Freude,T. J. Kippenberg, C. Koos,*Science*2018,359, 887.

- [25] In the Scan. (2023, December 18). Lidar, Cameras and Radar Compared. [Lidar News]. Retrieved April 5, 2024, from <https://blog.lidarnews.com/lidar-cameras-and-radar-compared/>
- [26] Bobrowski,R., Winczek,M., Zięba-Kulawik,K.,& Wężyk,P.(2022). Best Practices to Use the iPad Pro LiDAR for Some Procedures of Data Acquisition in the Urban Forest.
- [27] GPS World. (2023, February 14). Researchers Develop 10-cm Accuracy Navigation System. Retrieved from <https://www.gpsworld.com/researchers-develop-10-cm-accuracy-navigation-system/>
- [28] Cabrera-Revuelta, E. (2017). Optimización en el Posicionamiento para la realización de un Levantamiento Arquitectónico (Tesis doctoral). Universidad de Cádiz, Cádiz, España.
- [29] Rönnholm, P., Honkavaara, E., Litkey, P., Hyypä, H., & Hyypä, J. (2007). Integration of laser scanning and photogrammetry (Key-note). In P. Rönnholm, H. Hyypä, & J. Hyypä (Eds.), *Proceedings of the ISPRS Workshop on Laser Scanning 2007 and SilviLaser 2007* (pp. 355-362). International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences (Vol. 36, Part 3/W52). [Espoo, Finland]: Finnish Society of Photogrammetry and Remote Sensing
- [30] Pix4D. (November 23, 2022). Five industries that use photogrammetry. <https://support.pix4d.com/hc/en-us/articles/360000235126-Example-projects-real-photogrammetry-data>
- [31] Edl, M., Mizerák, M., & Trojan, J. (2018). 3D laser scanners: History and applications. *Acta Simulatio - International Scientific Journal about Simulation*, 4(4), 1-5. https://www.actasimulatio.eu/issues/2018/IV_2018_01_Edl_Mizerak_Trojan.pdf
- [32] Blyton Dental. (2018, March 13). What is a 3D iTero Scanner? [Blog post]. Blyton Dental Blog. Retrieved April 8, 2024, from <https://blytondental.co.uk/blyton-blog/2018/3/13/what-is-a-3d-itero-scanner>
- [33] Kowbuz, D. (2020, May 13). How 3D scanning rebuilds crime scenes for courtrooms: Capturing crucial evidence to aid justice. GIM International. <https://www.gim-international.com/content/article/how-3d-scanning-rebuilds-crime-scenes-for-courtrooms>
- [34] Three-Dimensional Scanning. Theacropolismuseum.gr. Available online: <https://www.theacropolismuseum.gr/en/new-technologies/three-dimensional-scanning> (accessed on 8 April 2024).
- [35] Little, C.; Patterson, D.; Moyle, B.; Bec, A. Every Footprint Tells a Story: 3D Scanning of Heritage Artifacts as an Interactive Experience. In *Proceedings of the Australasian Computer Science Week Multiconference*, Brisbane, QLD, Australia, 29 January–2 February 2018
- [36] Bruno, F.; Bruno, S.; De Sensi, G.; Luchi, M.-L.; Mancuso, S.; Muzzupappa, M. From 3D Reconstruction to Virtual Reality: A Complete Methodology for Digital Archaeological Exhibition. *J. Cult. Herit.* 2010, 11, 42–49.
- [37] Capturing Egypt’s Sistine Chapel with the BLK360. Leica-geosystems.com. Available online: <https://leica-geosystems.com/about-us/news-room/customer-magazine/reporter-85/10-capturing-egypts-sistine-chapel-with-the-blk360> (accessed on 8 April 2024).
- [38] Marra, A.; Gerbino, S.; Greco, A.; Fabbrocino, G. Combining Integrated Informative System and Historical Digital Twin for Maintenance and Preservation of Artistic Assets. *Sensors* 2021, 21, 5956.

- [39] Shabani, A.; Skamantzari, M.; Tapinaki, S.; Georgopoulos, A.; Plevris, V.; Kioumarsis, M. 3D Simulation Models for Developing Digital Twins of Heritage Structures: Challenges and Strategies. *Procedia Struct. Integr.* 2022, 37, 314–320
- [40] Three-Dimensional Scanning. Theacropolismuseum.gr. Available online: <https://www.theacropolismuseum.gr/en/new-technologies/three-dimensional-scanning> (accessed on 8 April 2024).
- [41] Fluideco. (2019, agosto 20). ¿Qué es una bomba centrífuga?. [Online]. Retrieved April 5, 2024, from <https://fluideco.com/que-es-una-bomba-centrifuga/>
- [42] Alfa Laval. (n.d.). Cómo funciona la separación centrífuga. [Alfa Laval España]. Retrieved April 5, 2024, from [<https://www.alfalaval.es/productos-y-soluciones/separacion/separadoras-centrifugas/separadoras/innovations/separator-innovator/como-funciona-la-separacion-centrifuga/>]
- [43] JDF, 'CENTRÍFUGA SEPARADORA DE ACEITE,' JDF, [En línea]. Disponible: www.jdf.com.br. [Accedido: 6-Abril-2024].
- [44] "Motor de cuatro tiempos: explicación completa y detallada para principiantes," Polaridad. [En línea]. Disponible en: <https://polaridad.es/motor-de-cuatro-tiempos-explicacion-completa-y-detallada-para-principiantes>. [Accedido: 6-Abril-2024].
- [45] Apple. (n.d.). iPhone 13. Retrieved April 9, 2024, from <https://www.apple.com/shop/buy-iphone/iphone-13>
- [46] Valach, J.; Cacciotti, R.; Černansky, M.; Kuneš, P. MONDIS: Knowledge-based system of failure of historical constructions. In *Proceedings of the 18th International Conference on Engineering Mechanics*, Prague, Czech Republic, 14–17 May 2012; pp. 360–361.
- [47] Zhang, S. *Handbook of 3D Machine Vision: Optical Metrology and Imaging*; CRC Press: Boca Raton, FL, USA, 2013.
- [48] Instop, «Leica ScanStation P16,» [En línea]. Available: <https://www.instop.es/producto.php?REF=P16>. [Último acceso: 6 Abril 2024].
- [49] Leica Geosystems. (2016). *Leica ScanStation P16 User Manual*. Heerbrugg, Switzerland.
- [50] Apple España. (n.d.). iPad Pro de 11 pulgadas con Wi-Fi - 256 GB - Gris espacial. Retrieved April 9, 2024, from <https://www.apple.com/shop/buy-ipad/ipad-pro/11-inch-display-256gb-space-gray-wifi>
- [51] Agisoft Metashape. (n.d.). Metashape. [Aufiero Informática]. Retrieved April 6, 2024, from <https://www.aufieroinformatica.com/metashape-es/>
- [52] Artec Studio 14. (2020, 26 de abril). ONROL. <https://www.artec3d.com/news/artec-studio-14-release>
- [53] Scaniverse. (n.d.). Retrieved from <https://scaniverse.com/>
- [54] Scaniverse. (n.d.). Scaniverse - 3D Scanner - LiDAR - Gaussian Splatting - for iPhone and iPad. Retrieved April 6, 2024, from <https://scaniverse.com/>
- [55] CNET. (2023, October 12). LiDAR is one of the iPhone and iPad's coolest tricks. It's only getting better. Retrieved from <https://www.cnet.com/tech/mobile/lidar-is-one-of-the-iphone-ipad-coolest-tricks-its-only-getting-better/>

- [56] Leica Geosystems. (s. f.). Leica Cyclone REGISTER 360 [Software Láser Escáner]. Topotienda. Recuperado el 6 de abril de 2024, de <https://topotienda.com/es/leica-cyclone/1530-leica-cyclone-register360>
- [57] CloudCompare (2007). CloudCompare Documentation: Version 2.1 (English). Retrieved April 8, 2024, from <https://www.cloudcompare.org/doc/qCC/CloudCompare%20v2.6.1%20-%20User%20manual.pdf>
- [58] Autodesk Inventor Professional 2024 [Software description]. Cadac Group. Retrieved April 8, 2024, from <https://www.cadac.com/us/thema/inventor/>
- [59] Lösler, M (2023). Coded Photogrammetric Targets (https://github.com/loesler/coded_photogrammetric_targets), GitHub. Retrieved April 4, 2024.
- [60] Adugna, Y.W., Kurukkal, N.S., Lemu, H.G. (2024). Anatomical Model Reconstruction (Solid Modeling) Using a Reverse Engineering Approach. In: Pavlou, D., et al. Advances in Computational Mechanics and Applications. OES 2023. Structural Integrity, vol 29. Springer, Cham. https://doi.org/10.1007/978-3-031-49791-9_18
- [61] B. Vijaya Ramnath, C. Elanchezhian, J. Jeykrishnan, R. Ragavendar, P.K. Rakesh, J. Sujay Dhamodar, A. Danasekar, Implementation of Reverse Engineering for Crankshaft Manufacturing Industry, Materials Today: Proceedings, Volume 5, Issue 1, Part 1, 2018, Pages 994-999, <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2017.11.175>
- [62] Parras, D., Romero, L., Cavas, F., Nieto, J., Cañavate, F., & Fernández-Pacheco, D. G. (2016). Use of 3d scanning and reverse engineering for the prototyping of mechanical parts. In 20th international congress on project management and engineering. Cartagena (pp. 867-879).

ANEXO I: IMPLICACIONES SOCIALES, ECONÓMICAS Y AMBIENTALES

Las técnicas de obtención de modelos 3D fomentan soluciones innovadoras y creatividad en el ámbito de la Ingeniería. Gracias a ellas se facilita el perfeccionamiento de piezas ya existentes, mejorando así el panorama tecnológico.

La fotogrametría acompañada de las diferentes disciplinas con las que ha sido comparada puede significar una reducción de coste en la producción industrial. Gracias a ella también se puede ahorrar en tiempos de producción debido a que esta técnica realiza una rápida replicación y mejora de componentes sin tener que emplear los métodos tradicionales de diseño.

Estas innovadoras técnicas implican una reducción en la necesidad de mano de obra para la reparación de piezas, sin embargo, crea una demanda de trabajo en los sectores relacionados con la ingeniería informática y la programación.

El hecho de que la fotogrametría permita la reparación y mantenimiento de piezas mecánicas supone una importante reducción de la necesidad de nuevos recursos, así como una disminución de la generación de deshechos ya que la vida útil de los productos se ve alargada.

ANEXO II: REFLEXIONES ÉTICAS Y SOCIALES

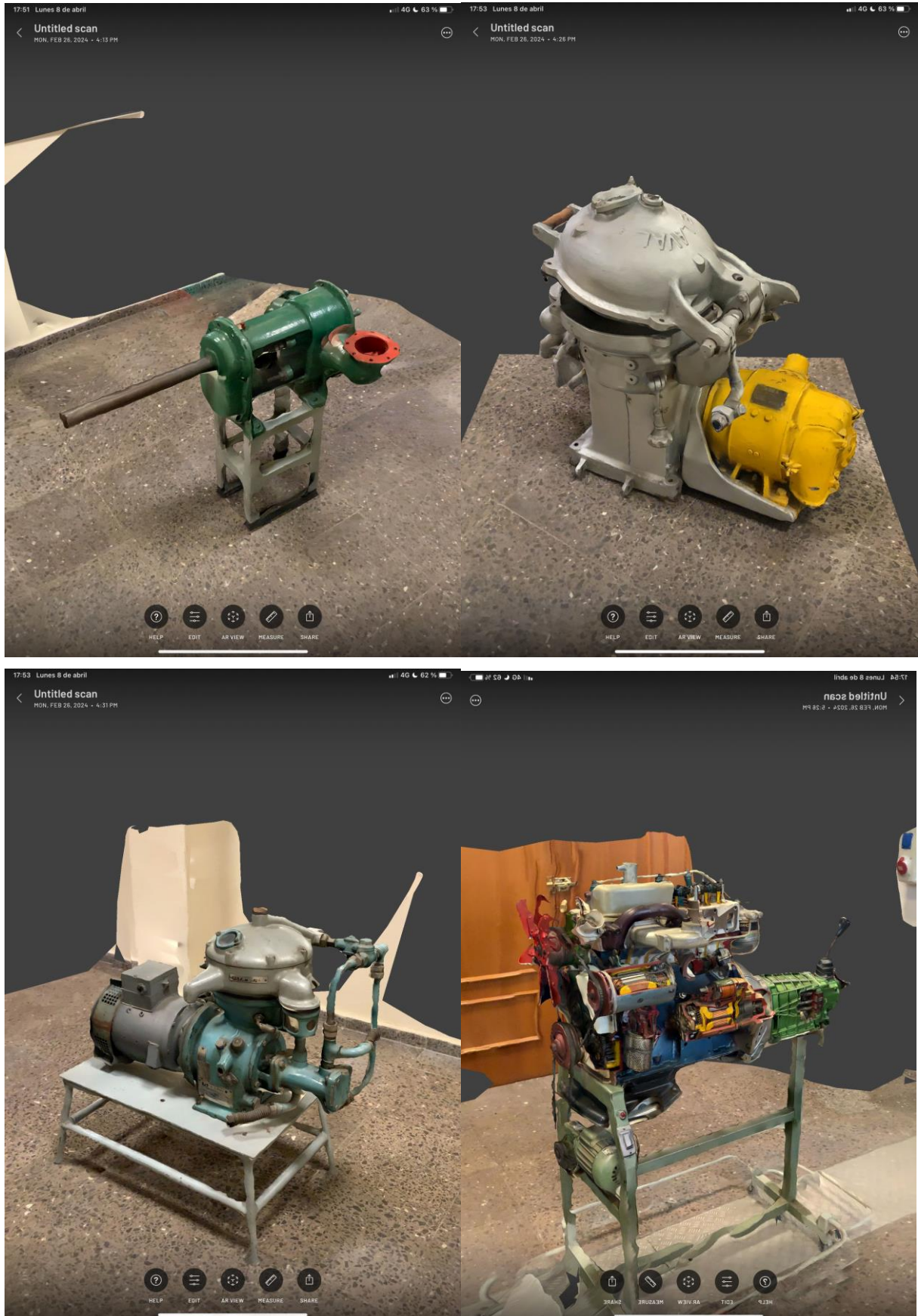
La capacidad de obtener réplicas exactas de piezas originales plantea el establecimiento de unos límites que no infrinjan los derechos de autor. Este aspecto toma especial relevancia en el ámbito de digitalización de obras de arte o restos arqueológicos. Es necesario obtener el consentimiento de los propietarios de las piezas que se pretenden modelar.

Es importante que estos modelos 3D cumplan ciertos requisitos de calidad, especialmente si van a ser utilizados en los campos de la Ingeniería mecánica y la producción industrial. En estos ámbitos un error puede desencadenar un fallo mecánico que tenga consecuencias graves en la vida de las personas.

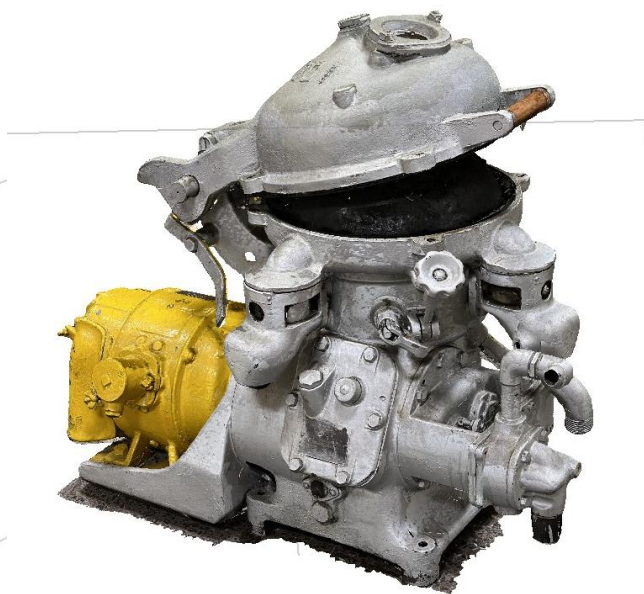
Estas técnicas de modelado 3D estudiadas en el proyecto fomentan una mayor accesibilidad al mundo de la ingeniería a la sociedad, teniendo a su alcance digitalizaciones de una gran variedad de piezas mecánicas.

ANEXO III: MODELOS 3D Y NUBES DE PUNTOS

- iPad LiDAR



- Fotogrametría



- Artec Eva luz estructurada



- ScanStation P16

