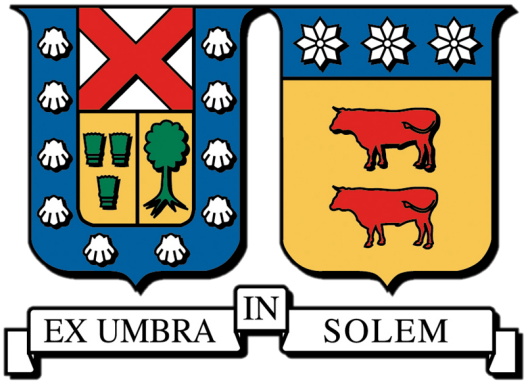
UNIVERSIDAD TÉCNICA FEDERICO SANTA MARÍA

DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA MECÁNICA

VALPARAÍSO, CHILE



DESARROLLO DE UN SISTEMA DE ESCANEO TRIDIMENSIONAL COMBINADO CON MANUFACTURA ADITIVA ROBOTIZADA

JEAN-PIERRE JESÚS VILLACURA ROJAS

MEMORIA PARA OPTAR AL TÍTULO DE INGENIERO CIVIL MECÁNICO

PROFESOR GUÍA: Dip. Ing. UDO RHEINSCHMIDT
PROFESOR CO-REFERENTE: Ph. D., Ing. ALEJANDRO PACHECO

OCTUBRE-2024

Resumen

Este trabajo de tesis estudia el funcionamiento del escáner tridimensional Revopoint POP 3D con el objetivo de analizar precisión, condiciones óptimas de uso y desafíos en el escaneo de figura con distintas formas y característicsa. Se escanean e imprimen piezas de distintos tamaños y geometrías y se utiliza una máquina de medición por coordenadas para realizar las mediciones comparativas entre las figuras originales e impresas.

Los resultados revelan que el scanner presenta un rendimiento óptimo al escanear figuras que tienen una alta cantidad de detalles y formas irregulares. En contraste se observa que figuras con superficies metálicas, simétricas y con bajo nivel de detalle requieren ajustes adicionales, como la aplicación de un Spray 3D especial para mejorar la detección, además de funciones de post-procesado para mejorar la calidad de la figura.

Se observa que el modo de escaneo marker, utilizando la plataforma giratoria es adecuado para piezas de dimensiones reducidas con poco nivel de detalle, mientras que el modo Feature es adecuado cuando las piezas cuentan con un nivel de detalle significativo permitiendo captar en gran parte de los casos la totalidad de la figura, reduciendo la necesidad de aplicaciones post-procesado.

Finalmente, se concluye que la precisión de las figuras impresas es adecuada, alcanzando una desviación menor al 1.5 % en la mayoría de mediciones. Sin embargo, algunas piezas que requirieron post-procesamiento presentaron un margen de error relativamente mayor, alcanzando hasta un 4 % de desviación, debido a errores manuales introducidos en la etapa de post-procesado. Estos resultados se consideran aceptables dentro del contexto experimental del estudio y se alinean con las expectativa para aplicaciones no críticas. Este trabajo brinda una visión clara de las capacidades y limitaciones del escáner bajo distintos escenarios de uso.

Abstract

This thesis work studies the performance of the Revopoint POP 3D three-dimensional scanner with the objective of analyzing accuracy, optimal conditions of use and challenges in the scanning of figures with different shapes and characteristics. Parts of different sizes and geometries are scanned and printed and a coordinate measuring machine is used to make comparative measurements between the original and printed figures. The results reveal that the scanner performs best when scanning figures that have a high amount of detail and irregular shapes. In contrast, figures with metallic, symmetrical surfaces and low level of detail require additional adjustments, such as the application of a special 3D spray to improve detection, as well as post-processing functions to improve the quality of the figure.

It is observed that the marker scanning mode, using the turntable is suitable for small parts with low level of detail, while the Feature mode is suitable when the parts have a significant level of detail allowing to capture in most cases the entire figure, reducing the need for post-processing applications.

Finally, it is concluded that the accuracy of the printed figures is adequate, reaching a deviation of less than 1.5 % in most measurements. However, some pieces that required post-processing presented a relatively higher margin of error, reaching up to 4 % deviation, due to manual errors introduced in the post-processing stage. These results are considered acceptable within the experimental context of the study and are in line with expectations for non-critical applications. This work provides a clear view of the capabilities and limitations of the scanner under different usage scenarios.

Agradecimientos

Quiero comenzar agradeciendo a mis abuelos, esto es por ustedes.
Siguiendo con mi Madre, la persona que más amo en este mundo.
Mi hermano, si él planta cara a la vida entonces yo tambien.
Y mi otro hermano, un crítico de esta sociedad.
Mi padre, quien hace las cosas a su manera.
Ouchy, un gato muy vivo a sus 21 años.
Tonino, la alegría de esta familia.
Paolo, un gato muy cariñoso.
A mis amigos, y a la música: Dream Theater, Beethoven y Megadeth lo más grande lml.

Tabla de Contenidos

1 Introducción **1**

2 Objetivos y Alcances **3**

2.1 Objetivos Generales: . . . 3

2.2 Objetivos Específicos: . . . 3

3 Marco Teórico **4**

3.1 Estado del Arte . . . 4

3.1.1 Structured Light Scanning - Técnica de Proyección de Franjas: . . . 4

3.1.2 Laser . . . 6

3.1.3 Fotogrametria . . . 7

3.1.4 Coordinate Measuring Machine CMM . . . 8

3.2 Características del Scanner: . . . 9

3.3 Funcionalidades del Software Integrado del Scanner . . . 11

3.3.1 Flujo de Trabajo . . . 12

3.3.2 Interfaz . . . 13

3.3.3 Escaneo de Figura . . . 14

3.3.4 Limpieza de puntos en el modelo . . . 17

3.3.5 Remover frames incorrectos . . . 20

3.4 Entorno físico durante el escaneado . . . 23

3.4.1 Uso Fijo . . . 23

3.4.2 Uso In-Hand . . . 24

3.4.3 Parámetros de profundidad y luminosidad en el escaneado . . . 25

3.4.4 Aplicación de Spray 3D . . . 27

3.4.5 Manejo de Errores del programa . . . 30

3.4.6 Solapamiento de Figuras 3D . . . 31

4 Métodología y Técnicas **33**
4.1 Método de aplicación . . . 33
4.2 Revisión de Software disponibles . . . 34
4.3 Técnicas . . . 35
4.3.1 Manejo de Figuras en Meshlab . . . 35
4.3.2 Rotación, traslación y establecimiento de Origen de las coordenadas de la Figura en Meshlab . . . 36
4.3.3 Cambiar forma de Mesh y ajustar cantidad de vértices con Instant Meshes . 38
4.3.4 Herramienta de Union y Sustracción Booleana en Blender . . . 40
4.3.5 Copia de formas en Fusion 360 . . . 46
4.3.6 Cerrar agujeros en Meshlab . . . 49
4.3.7 Modificación en Inventor . . . 51

5 Resultados **53**
5.1 Figura 1: Pieza de Motor . . . 53
5.2 Figura 2: Figura de Impresión del Scanner . . . 58
5.3 Figura 3: Figura geométrica simple . . . 62
5.4 Figura 4: Figura geométrica simple . . . 65
5.5 Figura 5: Llave industrial . . . 67

6 Conclusiones y recomendaciones **71**

7 Anexo **73**
7.1 Mediciones en máquina de medición 3D Brown and Sharpe . . . 73

Lista de Tablas

3.1 Especificaciones del Scanner Revopoint POP 3D. Obtenido de (Revopoint 3D Technologies, 2022) 10

5.1 Tabla de medidas Figura 1 58
5.2 Tabla de medidas Figura 2 61
5.3 Tabla de medidas Figura 3 64
5.4 Tabla de medidas Figura 4 67
5.5 Tabla de medidas Figura 5 70

Lista de Figuras

3.1 Diagrama ilustrativo de la Técnica de Proyección de Franjas. Obtenido de (Granero et al., 2009) . . . 5
3.2 Diagrama ilustrativo de la Técnica de Proyección de Franjas. Obtenido de (Shining3D, 2022) . . . 6
3.3 Diagrama ilustrativo de fotogrametría. Obtenido de (The Haskins Society, 2024) . . 8
3.4 Diagrama ilustrativo de componentes de una Coordinate Measuring Machine. Obtenido de (AutoProtoWay, 2024) . . . 9
3.5 Vista Frontal del Scanner y distinción de sus principales componentes. . . . 11
3.6 Flujograma Scaneo Software Revo Scan 5 . . . 12
3.7 Pantallazo Menú de Inicio Revo Scan 5 . . . 13
3.8 Pantallazo menú de modelos Revo Scan 5 . . . 14
3.9 Captura del Menú donde se realiza el escaneo de la figura utilizando Revo Scan 5 . 15
3.10 Menú de Limpieza de puntos para un modelo en el programa Revo Scan 5 . . . 18
3.11 Selección de sección de nube de puntos para un modelo en Revo Scan 5 . . . 19
3.12 Resultado de limpieza utilizando la herramienta de visualización y selección en el programa Revo Point . . . 20
3.13 Fotograma emplazado incorrectamente en el programa Revo Scan 5 . . . 21
3.14 Menú de editado de fotogramas en Revo Scan 5 . . . 22
3.15 Modelo resuelto al quitar fotograma mal emplazado por el software . . . 23
3.16 Entorno físico fijo para el proceso de escaneado . . . 24
3.17 Entorno físico uso In-Hand Scanner . . . 25
3.18 Interfaz de profundidad de cámaras en el escaneado . . . 26
3.19 Uso de solución de Spray 3D . . . 27
3.20 Aplicación de Solución matificadora de Spray 3D sobre Figura para posterior escaneado 29
3.21 Error arrojado por programa al tener gran cantidad de fotogramas . . . 30
3.22 Fenómeno de solapamiento . . . 31

4.1 Método Para realizar escaneado de figuras . . . 33

4.2 Menú de navegación para realizar selección del modelo en MeshLab 36
4.3 Menú de navegación para establecer coordenadas Meshlab 37
4.4 Resultado de figura trasladada en Meshlab 38
4.5 Interfaz Instant Meshes para remeshing y ajustar cantidad de polígonos 39
4.6 Figura convertida a mesh triangular con menor cantidad de vértices en Instant Meshes 40
4.7 Interfaz Blender importar pieza 41
4.8 Añadir figura en Blender 42
4.9 Subdividir figura en Blender 43
4.10 Adddon 3PointsAlign En Blender 44
4.11 Alineación superficies en Blender 45
4.12 Demostración mesh sustraído de la figura con operación Booleana 46
4.13 Panel de opciones Fusion 360 47
4.14 Panel de opciones menú de modificar en Fusion 360 48
4.15 Resultado copia de forma en Fusion 360 49
4.16 Interfaz Menú para cerrar agujeros de una figura en Meshlab 50
4.17 Vista Previa Instant Meshes 51
4.18 Vista Previa Inventor 51
4.19 Figura modificada con Inventor 52

5.1 Método Para realizar escaneado de figuras 53
5.2 Vista frontal 001 54
5.3 Vista lateral 001 54
5.4 Vista trasera 001 54
5.5 Pieza 001 con Spray 3D 55
5.6 Vista frontal I. 001 56
5.7 Vista lateral I. 001 56
5.8 Vista trasera I. 001 56
5.9 Comparación pieza 001 56
5.10 Escaneo Figura 001 56
5.11 Mediciones pieza 001 57
5.12 Vista frontal 002 58
5.13 Vista lateral 002 58
5.14 Vista trasera 002 58
5.15 Vista frontal I. 002 59
5.16 Vista lateral I. 002 59
5.17 Vista trasera 002 59
5.18 Comparación pieza 002 60

5.19 Escaneo Figura 002 60
5.20 Pieza 002 original e impresa 61
5.21 Vista frontal 003 62
5.22 Vista lateral 003 62
5.23 Vista trasera 003 62
5.24 Medidas Pieza 003 63
5.25 Mesh Pieza 003 63
5.26 Vista frontal I. 003 63
5.27 Vista lateral I. 003 63
5.28 Vista trasera 003 63
5.29 Vista frontal I. 003 64
5.30 Vista lateral I. 003 64
5.31 Vista frontal 004 65
5.32 Vista lateral 004 65
5.33 Vista trasera 004 65
5.34 Medidas Pieza 004 66
5.35 Escaneo pieza 004 66
5.36 Vista frontal I. 004 66
5.37 Vista lateral I. 004 66
5.38 Vista trasera 004 66
5.39 Pieza 004 I. y O. 67
5.40 Pieza 004 I. y O. 67
5.41 Vista frontal 005 68
5.42 Vista lateral 005 68
5.43 Vista trasera 005 68
5.44 Comparación pieza 005 69
5.45 Escaneo Figura 005 69
5.46 Vista frontal I. 005 69
5.47 Vista lateral I. 005 69
5.48 Vista frontal I. 005 69
5.49 Vista lateral I. 005 69

7.1 Medición con máquina Brown and Sharpe Microval 74
7.2 Interfaz principal de software de máquina Brown and Sharpe 75
7.3 Medición de diametro en el software de máquina Brown and Sharpe 75

Capítulo 1

Introducción

Actualmente el mundo está viviendo una transformación digital, la vida cotidiana de las personas junto con los procesos productivos de las empresas cada vez más dependen de los avances tecnológicos. En concreto la construcción y recreación de objetos 3D es un requerimiento esencial en el contexto de la industria 4.0 (Haleem et al., 2022) siendo interesante el estudio del funcionamiento de un Scanner 3D en un proyecto de impresión 3D.

Dentro del entorno de un laboratorio en la Universidad con la finalidad de imprimir objetos 3D, utilizando un brazo robótico y cabezales de impresión con materia prima consistente en gran porcentaje de material reciclable, resulta útil el uso de dispositivos de Scanneo 3D para la realización de modelos digitales de productos que posteriormente serán impresos con la tecnología señalada.

La tecnología de escaneado 3D tiene sus inicios en el año 1960 y desde entonces han sido desarrolladas diversas formas para capturar la forma física de los objetos en un entorno digital: Técnica de proyección de Franjas, Inflarroja, pulso laser y fotogrametría entre otras (Haleem et al., 2022). La aplicación de esta tecnología abarca actualmente campos tan diversos como la odontología, al facilitar la realización de prototipos de piezas dentales de pacientes y moldes manteniendo una adecuada precisión; el cinematográfico y videojuegos al permitir captar digitalmente personas y entornos con un elevado nivel de detalle y el campo de la ingeniería y diseño de productos donde la capacidad de capturar dimensiones precisas de diversas piezas físicas las cuales luego es posible posible analizar y manipular digitalmente utilizando aplicaciones CAD conlleva un beneficio enorme al usuario al ahorrar tiempos de diseño y permitir una iteración rápida en el desarrollo de productos. De esta forma, el escaneo 3D resulta ser una herramienta indispensable en los procesos de diseño y manufactura cuya aplicación resulta fascinante para esta investigación.

A pesar de los avances significativos en la tecnología de escaneo 3D, aún existen varios desafíos y limitaciones que restringen su aplicación las que han sido observadas en el dispositivo utilizado como Scanner 3D en esta investigación: Figuras con un color altamente oscuro, tamaños de figura que dificultan captar detalles según la distancia de funcionamiento del scanner, presencia de com-

ponentes relativamente muy pequeños a la figura como por ejemplo transistores en un circuito y presencia de orificios profundos en la figura las que el scanner no puede captar completamente. Todas estas particularidades son explicadas en el desarrollo de esta memoria y se detallan formas de mitigar su impacto en el proceso de escaneado en esta investigación.

Por lo tanto, este trabajo estudia la aplicación del dispositivo Scanner POP 3D fabricado por la empresa Revopoint para la realización de modelos digitales de piezas físicas junto con el uso adecuado de software disponible de procesamiento de figuras 3D para impresión 3D, investigando precisión obtenido, comparando resultados y concluir respecto a la forma óptima de utilización de todo este sistema de escaneado tridimensional.

Capítulo 2

Objetivos y Alcances

2.1 Objetivos Generales:

Estudiar el funcionamiento del scanner tridimensional 3D POP fabricado por la compañía Revopoint para realizar escaneos tridimensionales de distintos objetos. Se busca determinar para qué tipo de formas, figuras, tamaños y condiciones el Scanner mantiene un desempeño adecuado junto con analizar las variables que puedan afectar este desempeño.

2.2 Objetivos Específicos:

- Describir el procedimiento para realizar un escaneado tridimensional utilizando el dispositivo 3D POP y detallar las funcionalidades que ofrece el software integrado.
- Investigar precisión de los modelos tridimensionales escaneados y comparar resultado con modelos reales.
- Concluir respecto a formas, figuras, tamaños de los objetos y condiciones del scanner que resultan óptimas para el escaneado.

Capítulo 3

Marco Teórico

En esta sección se expone con mayor profundidad los fundamentos teóricos que sustentan o dan paso al trabajo realizado.

3.1 Estado del Arte

Desde la aparición de las técnicas de escaneo tridimensional en la década de 1960, hasta el momento existen distintas alternativas que son usadas actualmente, cada una con sus ventajas y desventajas, las que serán mencionadas a continuación (Cornejo and Hayes, 2021) (Haleem et al., 2022) (Salvi et al., 2010):

3.1.1 Structured Light Scanning - Técnica de Proyección de Franjas:

Realiza el escaneado tridimensional utilizando un proyector, el que ilumina un patrón de luz sobre el objeto, y unas cámaras captan la luz reflejada y la deformación de este patrón sobre el objeto. La forma del objeto se obtiene analizando la distorsión luego que el sistema es calibrado (Cornelius et al., 2021).

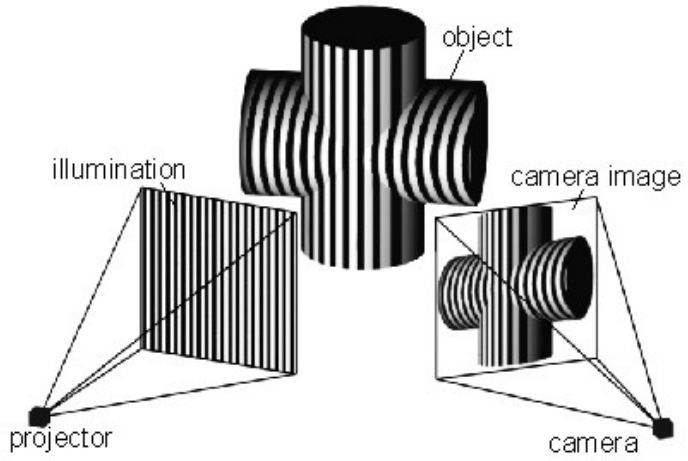


Figura 3.1: Diagrama ilustrativo de la Técnica de Proyección de Franjas. Obtenido de (Granero et al., 2009)

Algunas de las características del entorno que se tienen que tomar en cuenta son (Cornelius et al., 2021) Salvi et al. (2010):

- Temperatura del objeto y el Scanner.
- Características ópticas del objetos(Fenómenos de reflexión y refracción)
- Vibraciones durante el funcionamiento
- Orientación del objeto

Las ventajas de utilizar este sistema son:

- No deja huellas sobre el objeto a escanear.

Y sus desventajas:

- Objetos reflectantes, muy brillantes ó muy oscuros pueden influir negativamente en los resultaddos.
- Vibraciones pueden perjudicar la calidad del escaneado.

Existen variaciones de esta técnica como: Infrared Structured Light, donde se utiliza luz en el especto inflarrojo, no visible al ser humano, teniendo como implicancia el uso de un tipo de cámara distinta que pueda captar este tipo de luz. Este tipo de variación es utilizado en el escaneo del cuerpo humano y superficies brillantes, ya que no molesta a los ojos y no causa reflexiones (Shining3D, 2022).
Existen algunos dispositivos que combinan el uso de tecnología inflarroja y luz visible compensando algunas desventajas de utilizar sólo un tipo de luz aportando mayor versatilidad al proceso Shining3D (2022).

3.1.2 Laser

Mediante un rayo producido por un laser sobre la superficie del objeto a escanear, se pueden distinguir tres principales formas de medición en que se captura el retorno del rayo laser, cada método con sus propias ventajas y desventajas según objeto a escanear y entorno:

Triangulación Laser

Basado en la geometría de triangulos, un rayo laser es proyectado al objeto y con una cámara o sensor se capta el reflejo del rayo laser, aplicando un método de triangularización para determinar la distancia y forma de la superficie del objeto (Blais, 2004).
Este método tiene como ventajas una alta precisión y captura de detalles finos durante el proceso de escaneado, sin embargo es sensible a la luminosidad del entorno y posibles vibraciones durante el proceso. Por lo que su uso está determinado para objetos pequeños y detalles finos con alta precisión. La figura 3.2 muestra un esquema de cómo funciona este método.

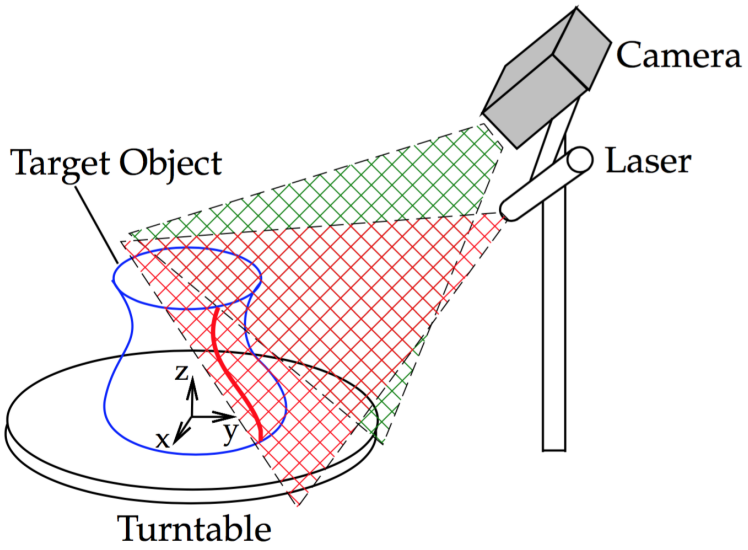


Figura 3.2: Diagrama ilustrativo de la Técnica de Proyección de Franjas. Obtenido de (Shining3D, 2022)

Tiempo de Vuelo

Conocido tambien como pulso laser, mide el tiempo que tarda un pulso de luz en volver al sensor luego de haberlo emitido sobre el objeto. Es útil para medir largas distancias y es utilizado principalmente en aplicaciones topográficas y edificios (Blais, 2004).
La principal ventaja es el largo rango de medición que alcanza y su poca sensibilidad a la luminosidad del entorno, lo que lo hace ideal para mediciones del tipo topográficas y en áreas de

ingeniería civil como puentes y obras de construcción. Una de las debilidades de este método es que no es preciso para captar detalles finos debido al alto tamaño del pulso y no es recomendado usarlo sobre objetos pequeños ya que requeriría de una resolución temporal muy alta, recordando que este método mide el tiempo de retorno del laser.

Interferometría Laser

Utiliza la interferencia de dos rayos laser los cuales uno se encuentra reflejado en el objeto y el otro se utiliza como referencia, de esta manera midiendo la diferencia de fase entre ambos rayos se consigue medir con precisión la distancia (Luhmann et al., 2013).
La ventaja es que consigue mayor precisión que cualquiera de los otros métodos mencionados para el escaneo con laser, sin embargo es demasiado sensible a vibraciones y es afectado por condiciones lumínicas del ambiente.

3.1.3 Fotogrametria

Esta técnica de escaneado consiste en la reconstrucción de la geometría de un objeto mediante el uso de diversas fotografías tomadas desde distintos ángulos. Logra realizar la conversión en información tridimensional a través de las fotografías bidimensionales tomadas, correlacionando puntos específicos (Luhmann et al., 2013).

Las ventajas corresponden a un costo bajo, debido a que no requiere de equipos especializados y la capacidad de capturar texturas y colores del superficie. La desventaja es que depende de las condiciones de iluminación y no alcanza grandes grados de precisión.
La figura 3.3 muestra un esquema del funcionamiento.

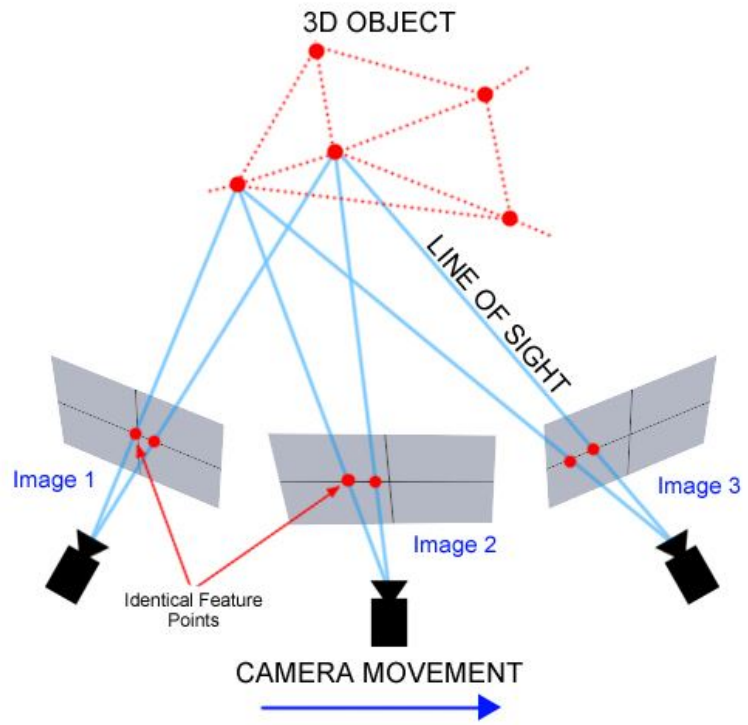


Figura 3.3: Diagrama ilustrativo de fotogrametría. Obtenido de (The Haskins Society, 2024)

Como es posible observar, a través de varias imágenes se establece una correlación de puntos idénticos con los que se logra determinar la superficie del objeto escaneado.

3.1.4 Coordinate Measuring Machine CMM

Corresponde a un dispositivo de precisión utilizado para medir dimensiones geométricas de un objeto utilizando un palpador el cual es movido en los distintos ejes para capturar coordenadas exactas de puntos específicos en la superficie de un objeto, formando una nube de puntos (Savio, 2018).

Las ventajas que alcanzan este tipo de máquinas corresponden a una alta precisión en las mediciones realizadas, con la desventaja que la nube de puntos generada requiere de etapas adicionales para conseguir un mallado en 3D del objeto además que ciertas superficies blandas podrían ser deformadas por el palpador (Savio, 2018).

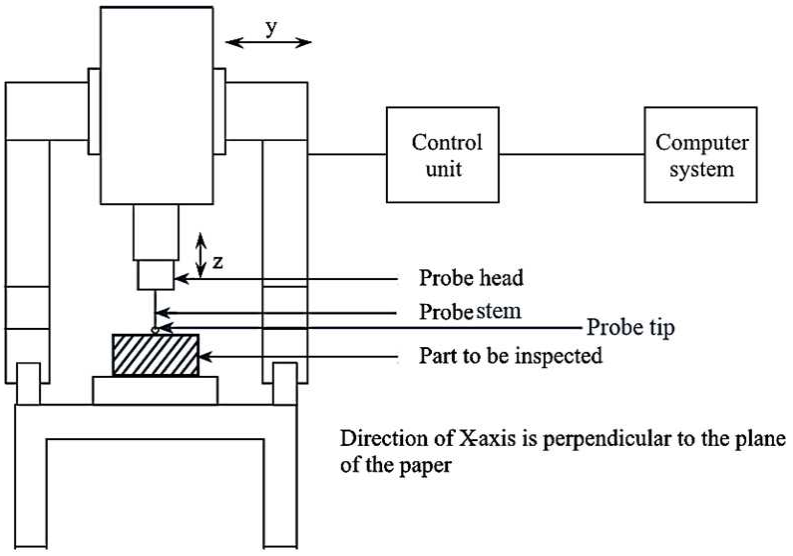


Figura 3.4: Diagrama ilustrativo de componentes de una Coordinate Measuring Machine. Obtenido de (AutoProtoWay, 2024)

Como muestra la figura 3.4, la punta del palpador (probe tip) es el elemento que entra en contacto con la superficie del objeto, y en general esta punta varía en forma y material. La unidad de control gestiona el movimiento del palpador y las mediciones realizadas se almacenan en un sistema de computadora.

3.2 Características del Scanner:

El scanner Revopoint POP 3D es un escáner del tipo portatil con tecnología de luz proyección de franjas de luz inflarroja diseñado para capturar modelos en tres dimensiones con alto nivel de detalle y precisión (Revopoint 3D Technologies, 2022). Las especificaciones son las siguientes:

Especificaciones Scanner	**Details**
Nombre Producto	3D Scanner
Modelo Producto	POP
Tecnología	Doble cámara inflarroja de luz estructurada
Single-frame Precision	Up to 0.15 mm
Single-frame Accuracy	Up to 0.3 mm
Single Capture Range	210 x 130 mm
Distancia de trabajo	275 ± 100 mm
Minimum Scan Volume	30 × 30 × 30 mm
Velocidad de escaneado	8 fps
Point Distance	0.15 mm
Fuente de luz	Class 1 Infrared Laser
Alineamiento	Feature alignment, marker point alignment
Formato de salida	PLY, OBJ, STL
Texture Scan	Yes
Special Object Scanning	Recomendado uso de Spray 3D Para objetos transparentes y altamente reflectivos.
Outdoor Scanning	Es requerido un cover para evitar luz intensa
Peso	225g
Dimensiones	154.6 x 38.2 x 25.6 mm
Formato de Salida	Capacidad de exportar modelo 3D modelo para imprimir en 3D.
Plataforma	Windows 8/10, 64-bit, Android, iOS, MAC
Wi-Fi	2.4 GHz
Bluetooth	2.4 GHz

Tabla 3.1: Especificaciones del Scanner Revopoint POP 3D. Obtenido de (Revopoint 3D Technologies, 2022)

El scanner integra software propio llamado Revo Scan 5 para realizar el proceso de escaneado, integrando algunas funcionalidades de post-procesado con la posibilida de exportar a formatos de objetos 3D: PLY, OBJ y STL Revopoint 3D Technologies (2022). En la figura 3.5 es posible ver un diagrama de los componentes principales del Scanner.



Figura 3.5: Vista Frontal del Scanner y distinción de sus principales componentes.

Es posible considerar al scanner Revopoint 3D POP como un scanner híbrido de luz estructurada utilizando luz visible e inflarroja. El uso de luz visible es especial para captar texturas y colores en los modelos ya que el scanner permite la funcionalidad de escanear los colores de los objetos. La sección 3.3 menciona las funcionalidades más destacadas que ofrece el Software de este scanner para el proceso de escaneado de objetos tridimensionales.

3.3 Funcionalidades del Software Integrado del Scanner

Actualmente, el Scanner integra su propio programa **Revo Scan 5** para llevar a cabo el proceso de escaneado incluyendo multiples herramientas útiles para el post-procesado: fusion, isolación, eliminación de ruido debido a traslape, redondeo, simplificación, armado de malla y Merge. Todas estas funcionalidades serán detalladas en esta sección.
En general, el programa funciona con el siguiente flujograma mostrado en la Figura 3.6. La experiencia óptima de uso se consigue complementando el programa para escaneado **Revo Scan 5** con las funcionalidades contenidas en otros programas tales como Blender, Meshla y Meshmixer los cuales son detallados con profundidad en la sección de Metodología y Técnicas.

3.3.1 Flujo de Trabajo

A continuación se detalla el flujo de trabajo que sigue una figura que es escaneada utilizando **Revo Scan 5**:



Figura 3.6: Flujograma Scaneo Software Revo Scan 5

Como es posible apreciar en la figura 3.6, el renderizado de una figura en el programa consta de las siguientes 4 etapas:

- **Raw**: Etapa donde es almacenada digitalmente la figura escaneada en una nube de puntos que representan las coordenadas espaciales de la superficie escaneada. En esta etapa los puntos aún no están 'conectados' lo que resulta en una apariencia discontinua.
- **Fuse**: La nube de puntos obtenida anteriormente es combinada mediante algoritmos lo que permite reducir el ruido en la figura y se obtiene una representación más completa del objeto y sigue sin obtenerse una superficie definida y continua.
- Mesh: La nube de puntos refinada anteriormente es convertida a una malla poligonal donde se consigue una superficie continua y definida.
- Texture: Esta etapa es opcional y aparece cuando se selecciona el **modo a color** en el escaneo. Como el nombre sugiere, aquí es aplicada automáticamente sobre la malla de puntos una imágen obtenida del objeto con el objetivo de simular la apariencia real de la superfice del objeto considerando sus colores.

Es importante mencionar que en el proceso de Rendering de la figura ofrecido por el programa, en el desarrollo de esta memoria sólo son desarrolladas las etapas de 'Raw', 'Fuse', 'Mesh' utilizando este programa, luego el resultado es exportado a otros programas como Blender, Meshmixer(cuyo funcionamiento es detalladamente mencionado en la sección relacionada con softwares para procesado) donde finalmente la figura es escaneada digitalmente y exportada en formato **.stl** ó **.obj**, lista para ser importada en programas como Inventor. Ultimaker ó Fusion360.

3.3.2 Interfaz

La interfaz del programa integrado con el scanner **Revo Scan 5** ofrece las siguientes funcionalidades:

- Realizar el proceso de Scan de una figura, mediante la selección de distintos parámetros: Textura y Modo de escaneado, entre otros.
- Realizar funciones relacionadas con el procesamiento y mejora de los modelos obtenidos: Isolación, overlaping, simplificación y más que serán descritos en esta sección.
- Abrir proyectos anteriores del programa para volver a re-editar y/o agregar nuevos modelos, como muestra la figura 3.7 .
- Exportar el modelo en formato **.STL** ó **.OBJ**.

Menú de Proyectos

Al iniciar el programa se muestra la siguiente interfaz, como muestra la figura 3.7.

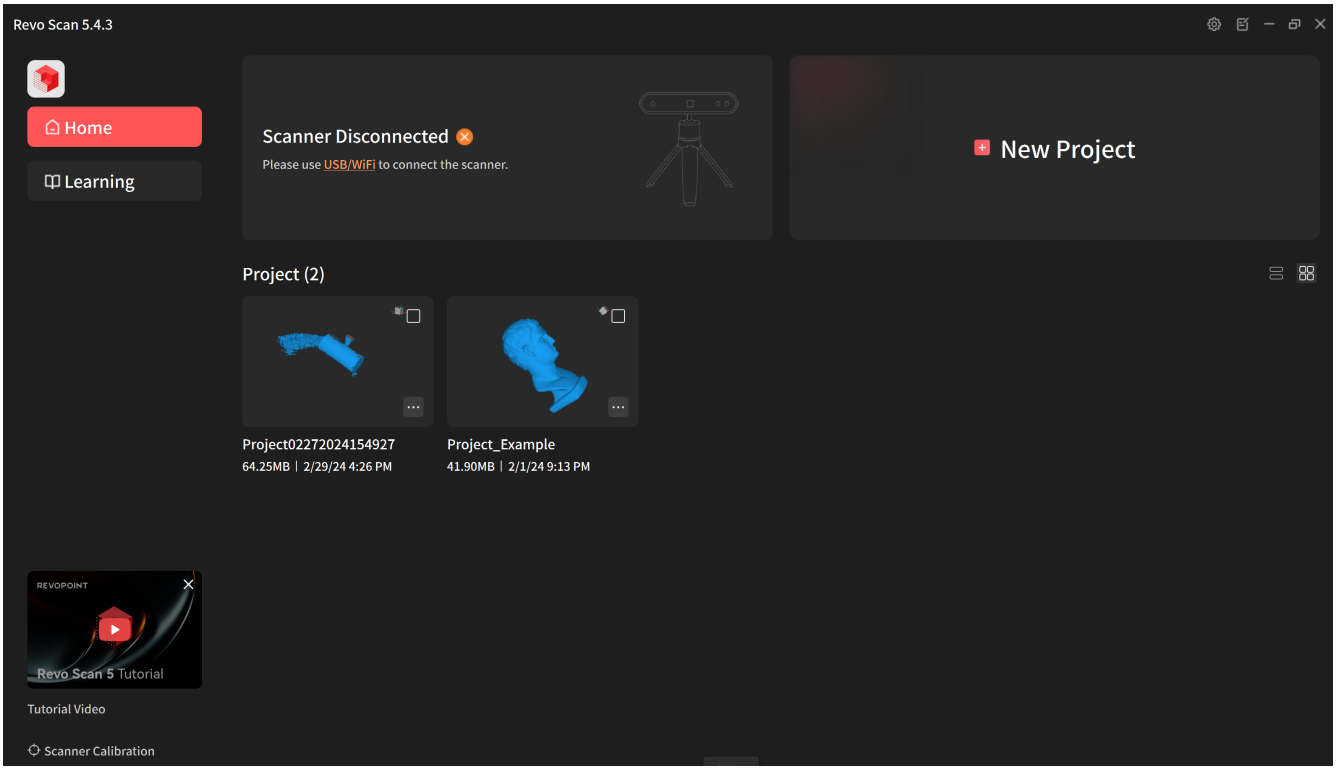


Figura 3.7: Pantallazo Menú de Inicio Revo Scan 5

Se puede apreciar que el programa permite revisar proyectos realizados anteriormente con este

Software en la sección de 'Project'. Al apretar doble click sobre alguno de estos proyectos se abre la siguiente ventana, como muestra la Figura 3.8:

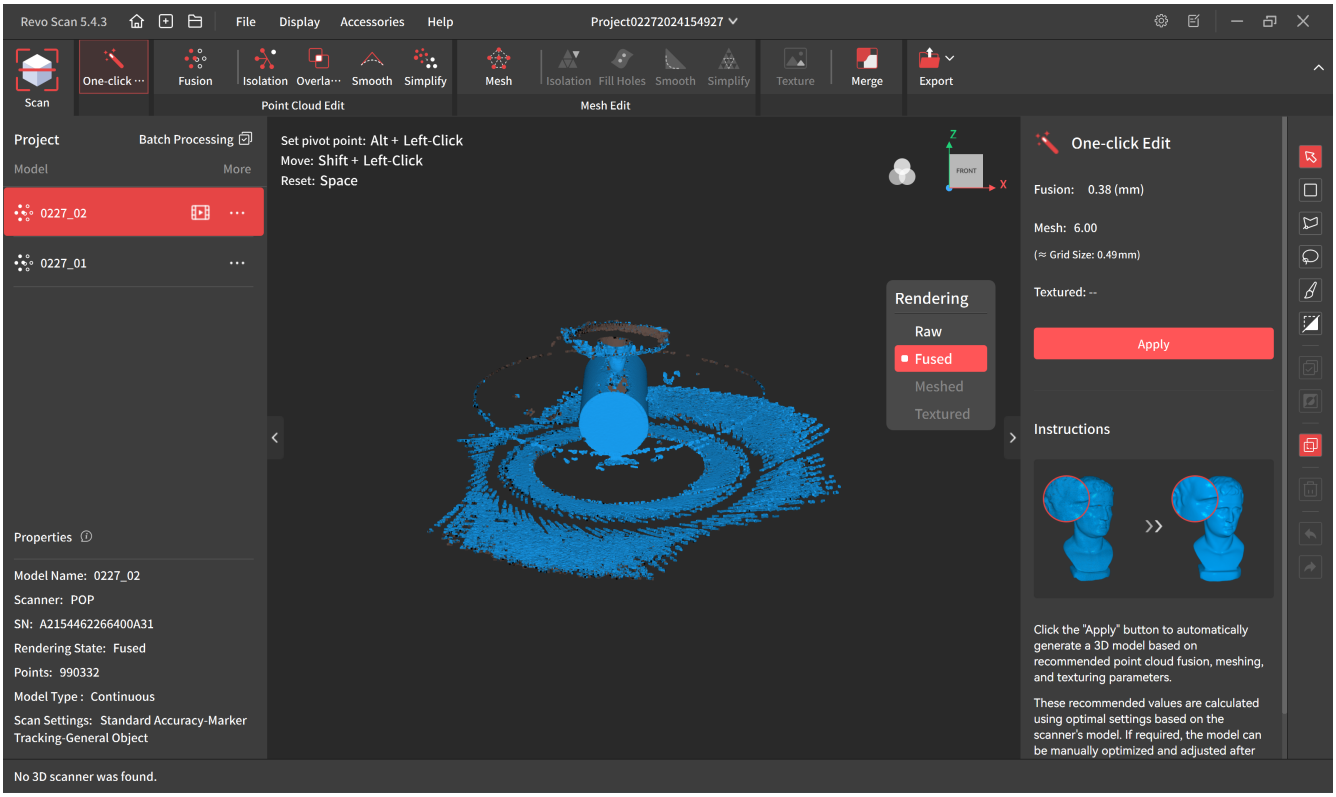


Figura 3.8: Pantallazo menú de modelos Revo Scan 5

Es posible escanear nuevos modelos dentro de la misma instancia de proyecto presionando el icono **Scan**. Tambien es posible aplicar herramientas relacionadas al procesado del modelo tales como **fusion**, **Isolation** y **simplificación**, entre otras, las que son detalladas en esta sección.
La funcionalidad más util en este apartado corresponde a poder tener agrupadas en un solo proyecto distintos modelos escaneados, los cuales pueden corresponder a distintas tomas de una misma figura.
Es razonable intentar cambiar el nombre de las piezas en el proyecto **para tener una mejor identificación**, sin embargo **no es recomendable** ya que impide en un futuro que puedan ser reconocidas en otra computadora al respaldar la información contenida en el directorio del programa. Esto se debe a una limitación propia del Software y actualmente no tiene solución.

3.3.3 Escaneo de Figura

A continuación se mencionan los parámetros y modos de escaneo que ofrece el programa integrado **Revo Scan 5** con el scanner. **Se sugiere revisar la sección 3.4: Entorno físico durante el**

escaneado como paso previo a la realización del escaneado.

Una vez se encuentra conectado el Scanner y reconocido correctamente por el programa, para comenzar con un nuevo escaneo de una pieza se debe cliquear el botón **Scan** en la sección superior izquierda del programa, como es posible apreciar en la Figura 3.9.

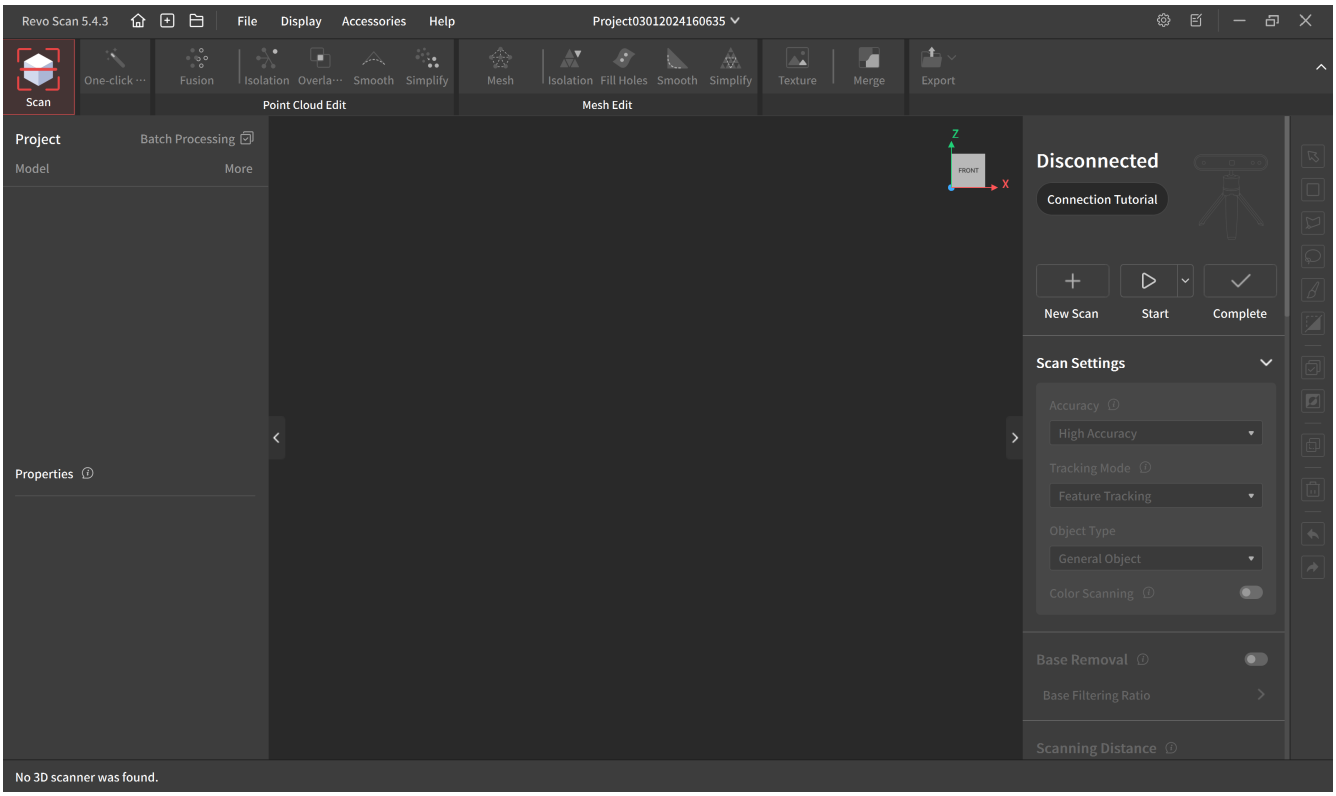


Figura 3.9: Captura del Menú donde se realiza el escaneo de la figura utilizando Revo Scan 5

A continuación se debe cliquear en el botón **New Scan** y seleccionar la opción adecuada entre los siguientes parámetros en la sección **Scan Settings**:

- Scan Mode: Modo que permite seleccionar la forma de captura del Scanner, permite las siguientes 2 opciones mutuamente excluyentes:
  - **Continuous**: Modo de captura continuo donde se realizan multiples 'Frames' de la figura. Es similar a grabar un 'video' de la figura el cual consiste en una multitude de imágenes (Frames). A menos que se explicite lo contrario, este es el modo predeterminado que utiliza esta investigación y es recomendado su uso cuando se utiliza la mesa giratoria.
  - **Single Shot**: Modo de captura de único 'Frame'. similar a obtener una única imágen del objeto. La ventaja de utilizar esta opción es que puede proporcionar una mejor

calidad de detalles y texturas más claras. Su uso requiere que al menos el 50 por cierto de los puntos de la nube se repitan entre distintos frames para evitar errores y tener una nube más clara.

- **Accuracy**: Relacionado con el nivel de detalle de la nube de puntos, permite alternar entre las opciones:
  - **Standard Accuracy**: Escaneo rápido adecuado para superficies simples, como cilindros y piezas planas.
  - **High accuracy**: Escaneo más lento que el anterior pero capta mayor detalles, útil para superficies complejas. Su uso es adecuado para figuras decorativas, circuitos y mecanismos mecánicos con mayor nivel de detalle.
- **Tracking mode**: Este es uno de los ajustes más importantes y determinantes en los resultados del escaneo, tiene relación con cómo realiza el escaneado el Scanner 3D, si es que pone atención en los marcadores(presentes en la mesa giratoria) o en el contorno de la figura. En general cuando se utiliza la mesa giratoria se recomienda utilizar **Market Tracking** ya que los marcadores que lleva ayudan a que sean reconocidos por esta modalidad de escaneo.
  - **Feature Tracking**: Modo adecuado cuando la superficie de la figura tiene rasgos distintivos los cuales buscan ser captados.
  - **Marker Tracking**: Modo que funciona principalmente con la detección de marcadores en las superficies. Adecuado cuando en las superficies son añadidas estos marcadores que sirvan de guía o bien cuando se utiliza la mesa giratoria.
- **Object Type**:
  - General Object: Opción predeterminada cuando las figuras no son oscuras.
  - Dark Object: Escoger cuando la figura es oscura ya que esta opción mejora los resultados de captura. Es importante considerar que en general las figuras oscuras suelen ser complejas de ser captadas por este Scanner por lo que el resultado podría no ser ideal. **El uso de Spray 3D podría mejorar resultados** como menciona la sección 3.4.4: Aplicación de Spray 3D en el entorno físico durante escaneado.
  - Body: Adecuado para el cuerpo humano u objetos que son largos y angostos.
  - Large Object: Preferible utilizarlo cuando se quiere escanear objetos largos a una velocidad rápida, no puede utilizarse el modo de High Accuracy en esta opción.
- **Color Scanning**: Cuando se habilita esta opción permite crear un modelo 3D a color.

- **Base Removal**: Detección y eliminación cuando es captada la base donde permanece la figura a escanear. En general la detección no es precisa y suele ser adecuado quitarla manualmente mediante otras técnicas en la etapa de procesado de la figura. Se sugiere no utilizar esta opción.

- **Scanning Distance**: Permite establecer el rango en que se quieren detectar la figura desde el Scanner. Es útil ya que ayuda a mantener mayor limpieza visual al realizar el escaneado al filtrar detalles no necesarios que se encuentran fuera del rango de distancia establecido.

- **Accesories**: No son considerados en esta investigación accesorios como el estabilizador de mano o la mesa giratoria controlable, por lo que no es necesaria configuración en este apartado.

Una vez escaneada la figura y guardada en la carpeta del proyecto, es posible seguir el escaneado seleccionado la pieza y cliqueando la opción "Continue scanning". El software sólo permite utilizar la misma forma de escaneado que se utilizó originalmente. De esta manera al escanear una figura utilizando Marker Tracking, luego al volverla a escanear sólo se puede utilizar este modo y la posición de los marcadores respecto a la figura debiese ser la misma.

3.3.4 Limpieza de puntos en el modelo

Es posible que el modelo obtenido de la figura escaneada (siguiendo los pasos descritos en la **Sección 3.3.3 Escaneo de Figura**) presente puntos no deseados o que no corresponden al modelo de la figura, para estos casos la solución es quitar estos puntos mediante las herramientas de visualización que ofrece el programa, presentadas en el menú lateral derecho del Software, como es posible observar en la figura 3.10: El programa cuenta con 8 herramientas de selección:

- Rectangular Selection: La opción más conveniente de utilizar, ya que permite de forma fácil e intuitiva seleccionar las secciones que luego serán borradas.

- Polygon Selection: Útil cuando se encuentra generado el Mesh en el programa. La mayoría de los casos durante esta memoria el Mesh se realiza con programas externos por lo que esta opción no es factible de usar.

- Lasso Selection: Selección que lleva la forma de un lazo, es igual de conveniente que utilizar la sección rectangular

- Clip: Selecciona un plano de corte la cual consigue seleccionar la región perpendicular al plano de corte.

- Select All: Una vez realizada alguna selección anterior, permite seleccionar toda la figura.

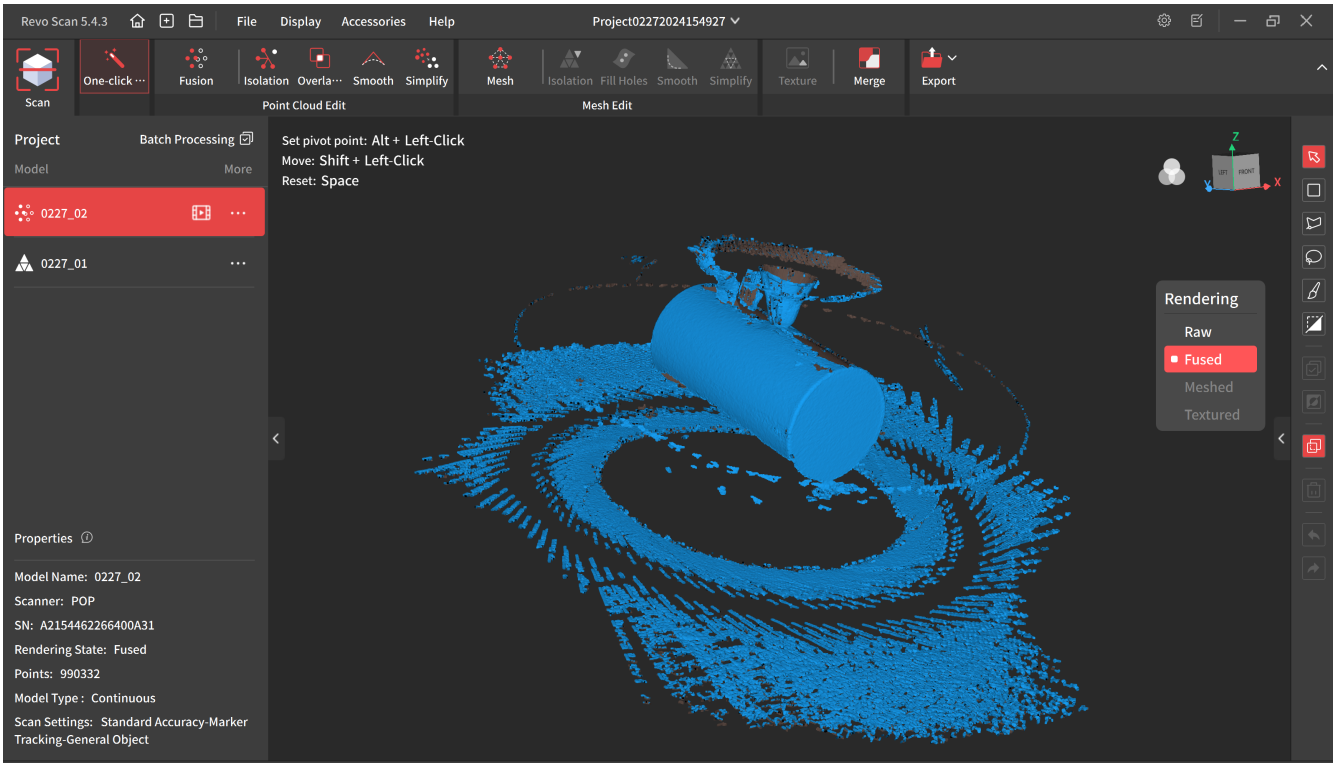


Figura 3.10: Menú de Limpieza de puntos para un modelo en el programa Revo Scan 5

- Invert Selection: Similar en funcionamiento a Select All al requerir de una selección anterior, la diferencia es que sólo selecciona la región no seleccionada anteriormente.
- Delete. Undo y Redo: Botones que permiten borrar la selección, deshacer y rehacer la última acción, respectivamente.

A continuación utilizando la selección rectangular es seleccionado todos los puntos que no corresponden a la figura escaneada.

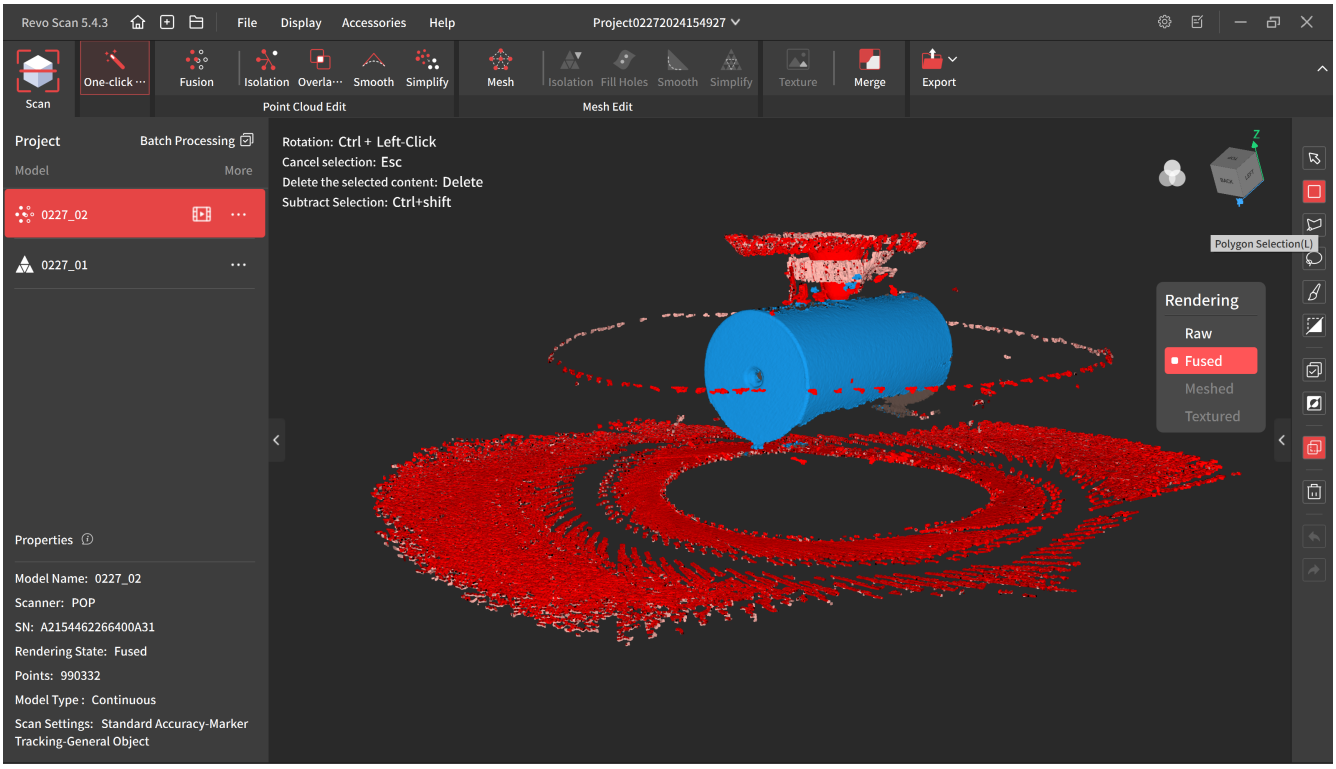


Figura 3.11: Selección de sección de nube de puntos para un modelo en Revo Scan 5

En la figura 3.11 es posible notar la selección de los vértices que no corresponden a la figura mediante la herramienta de Rectangular Selection. Como es posible observar, el proceso es bastante intuitivo y rápido de realizar, siendo los puntos de color rojo los que están siendo seleccionados con la herramienta rectangular para quitarlos de la figura. Una vez aplicada esta limpieza de modelos, podemos esperar un resultado como el mostrado en la figura 3.12:

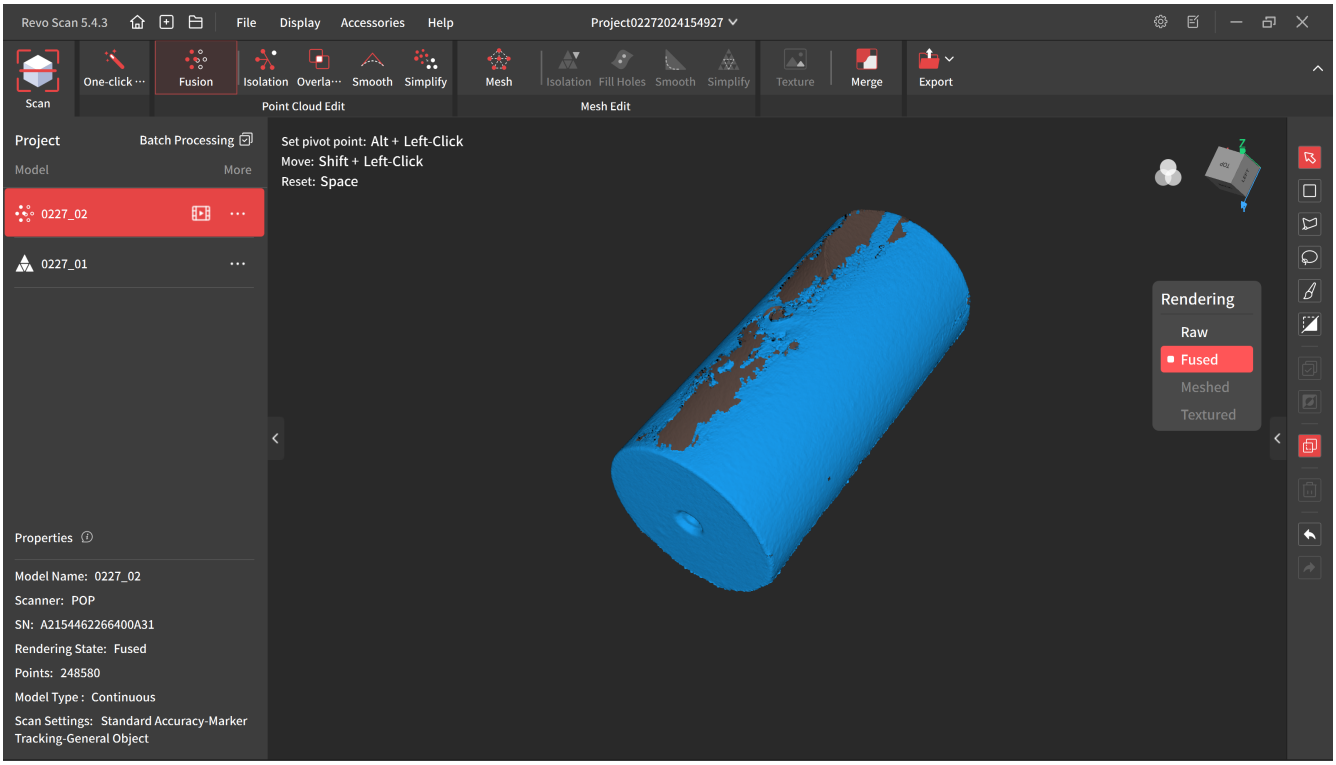


Figura 3.12: Resultado de limpieza utilizando la herramienta de visualización y selección en el programa Revo Point

Efectivamente el conjunto de vértices que no corresponden a la figura fueron removidos, dando resultado a una nube de vértices más limpia y ordenada. Las secciones 'en blanco' en la figura corresponden a contornos que el Scanner no detectó y que serán abordados en el procesamiento. Es importante mencionar que la figura aún conserva vértices no deseados los cuales corresponden a error de detección del Scanner, principalmente de solapamiento los que pueden removerse volviendo a ocupar esta técnica o bien seleccionando la opción de overlapping en el menu superior del programa

3.3.5 Remover frames incorrectos

En algunos casos al momento de escanear, es posible que frames detectados sean emplazados en una posición incorrecta, como es posible observar en la figura 3.13.

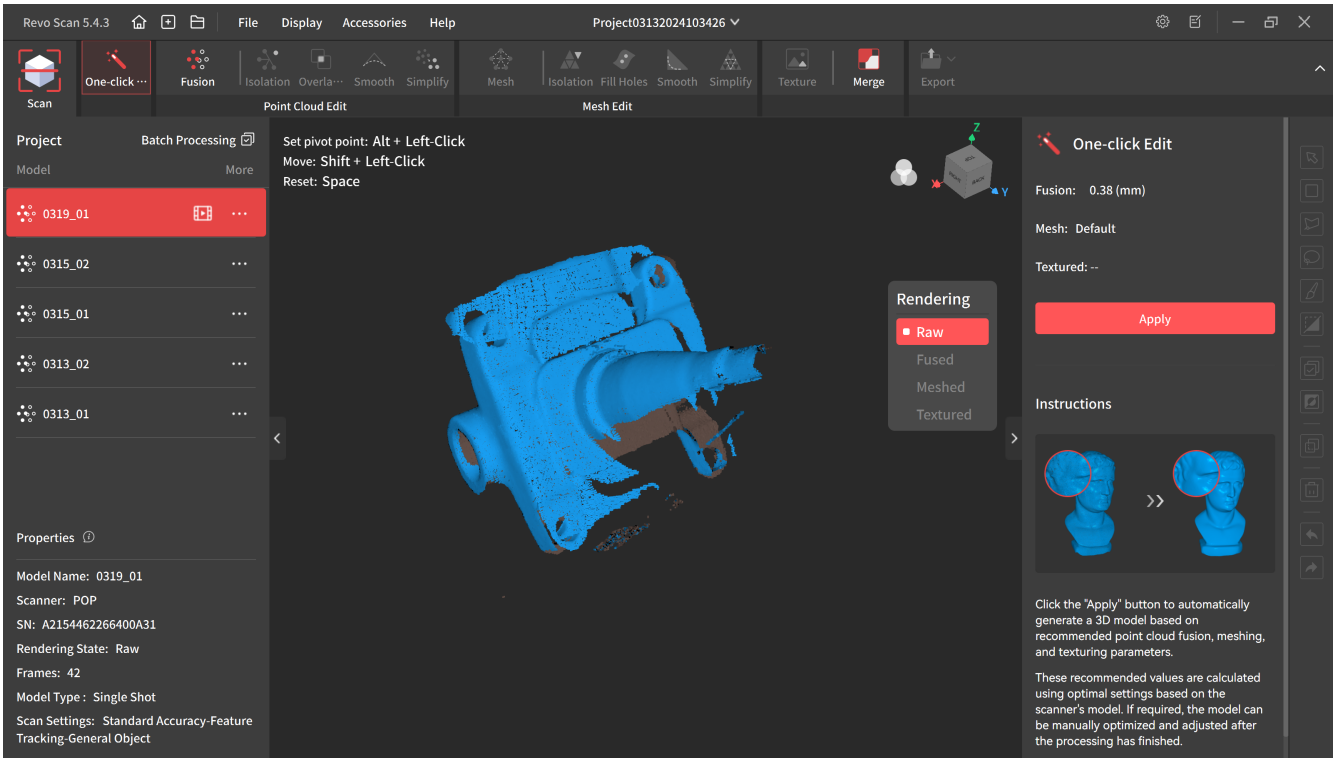


Figura 3.13: Fotograma emplazado incorrectamente en el programa Revo Scan 5

Dado que la pieza tiene un agujero en cada esquina, el scanner emplazó el frame en una posición incorrecta. En estos casos lo mejor es eliminar los frames mal colocados. Si estamos en el proceso de escaneado, apenas aparezca un defecto, podemos presionar ctrl+z para devolver al frame anterior. Otra forma cuando ya ha sido realizado el escaneado es cliqueando en la opción **Edit all key frames** sobre los 3 puntos de la figura en el menú lateral izquierdo. Esta opción abre un menú para visualizar todos los frames, como muestra la figura 3.14:

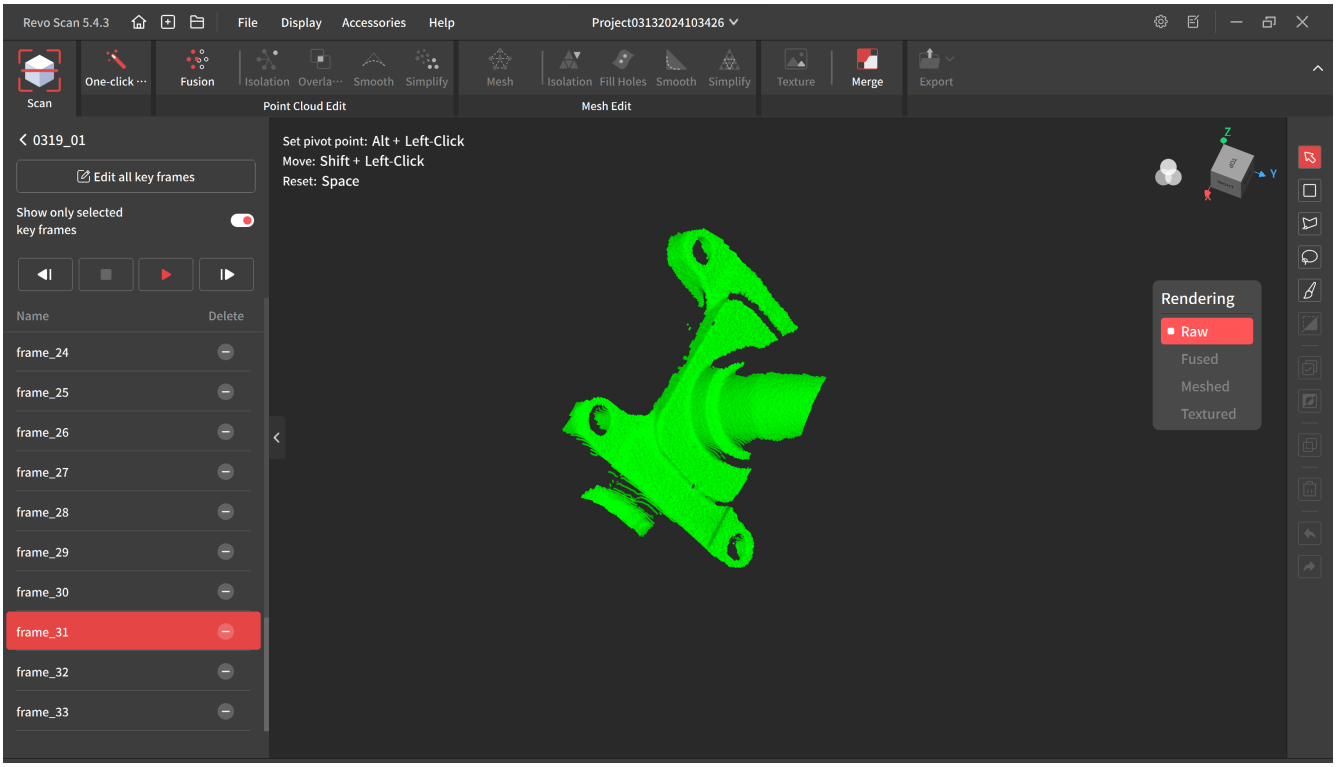


Figura 3.14: Menú de editado de fotogramas en Revo Scan 5

Visualizando todos los frames moviendonos con la tecla ↑ y ↓, podemos ir removiendo todos los frames incorrectos presionando el simbolo 'Delete' en el marco de cada frame. Una vez concluido volvemos al menu principal cliqueando en el símbolo ← en el menu lateral, donde los cambios serán guardados.

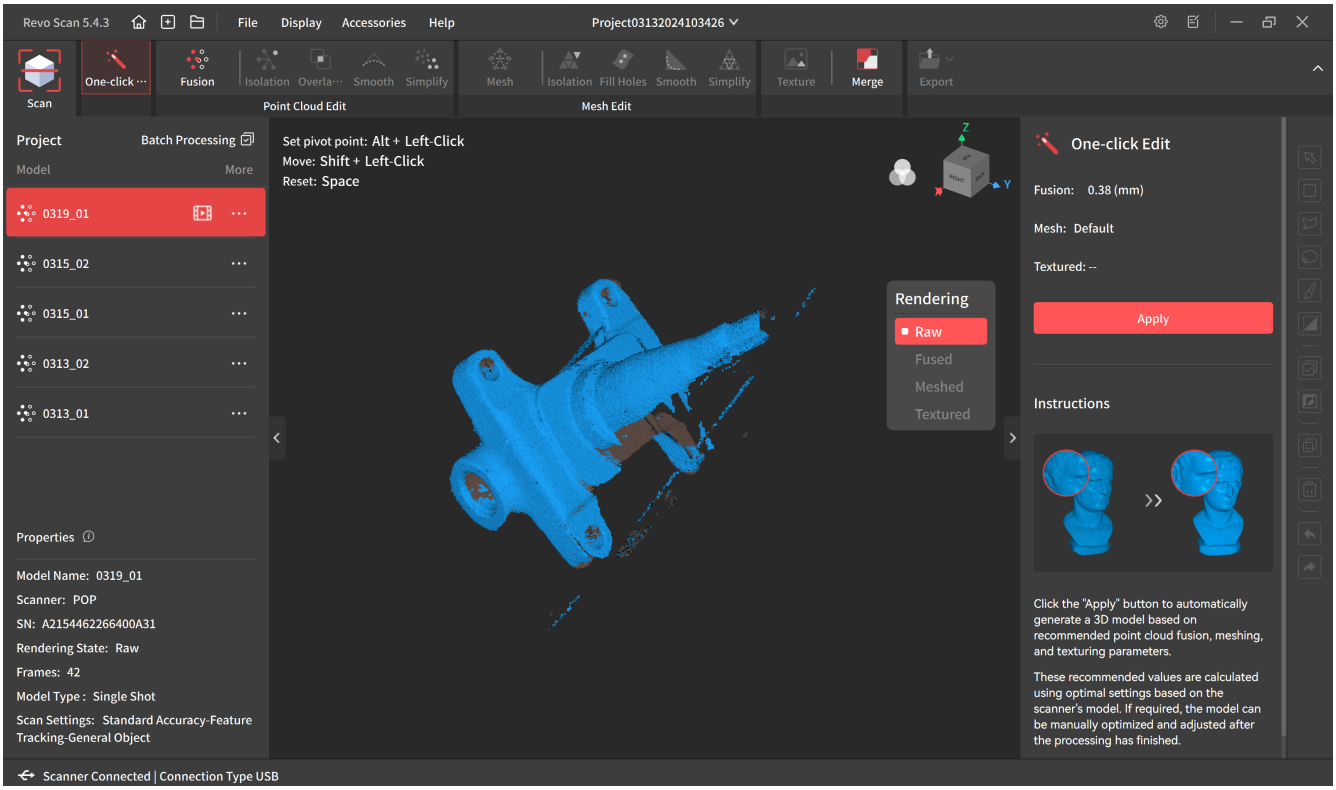


Figura 3.15: Modelo resuelto al quitar fotograma mal emplazado por el software

En la figura 3.15 es posible diferenciar que con éxito han sido removidos los fotogramas mal emplazados siguiendo los pasos anteriores. Es muy importante que en la etapa de escaneo la forma de la nube de vertices sea correctamente captada ya que las etapas posteriores realizan el mesh con la nube de vértices captada.

3.4 Entorno físico durante el escaneado

EL proceso de escaneado requiere la utilización del dispositivo scanner y la figura a escanear. Este dispositivo puede ser conectado a un celular ó computador, ocupando el último para el presente trabajo.

3.4.1 Uso Fijo

El scanner permite ser fijado en una superficie mediante el trípode que incorpora. Dado que su funcionamiento es captar continuamente distintas posiciones de la figura, es recomendable el uso de la plataforma giratoria, como muestra la figura 3.16.

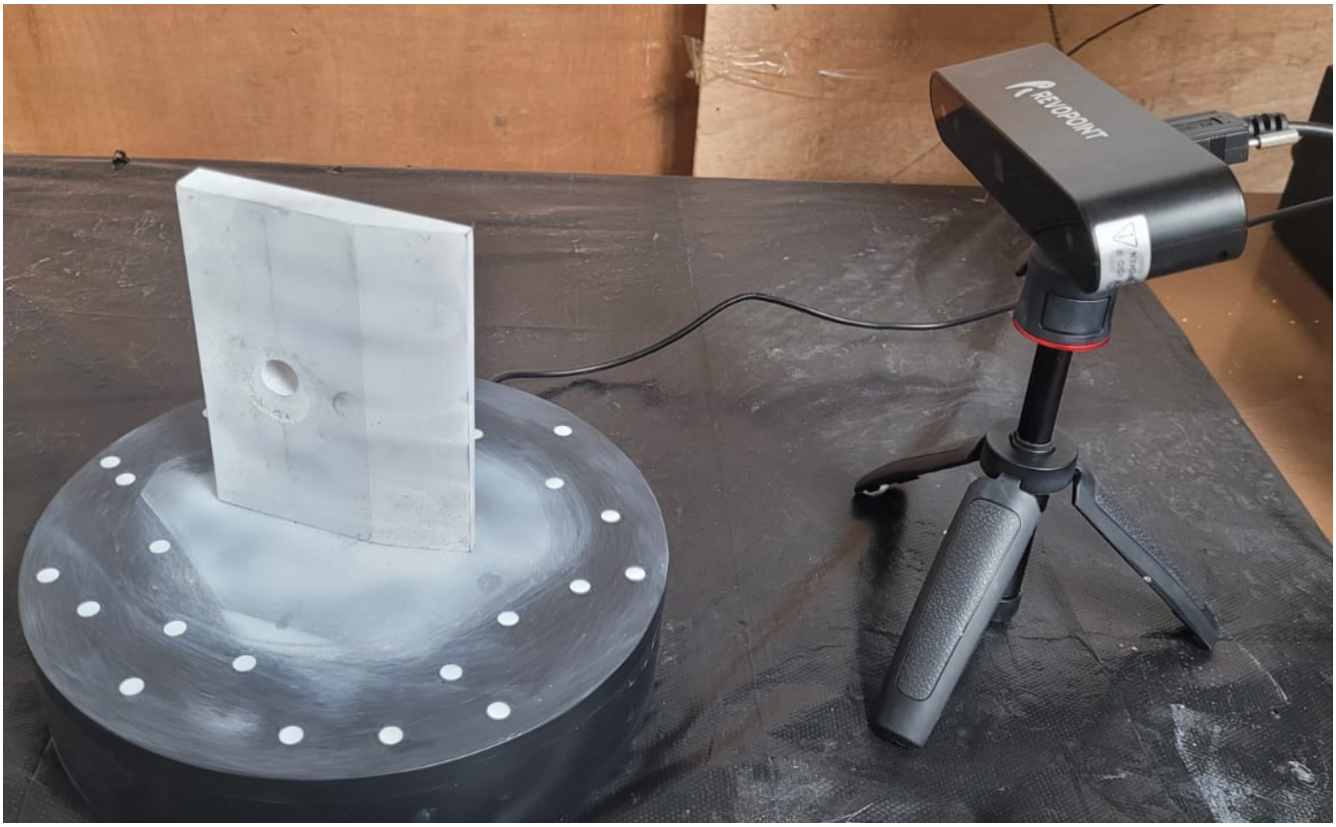


Figura 3.16: Entorno físico fijo para el proceso de escaneado

El scanner apunta a la figura, que se encuentra sobre la plataforma giratoria. Esta plataforma continuamente va girando y es el scanner que capta cada nube de puntos en forma de frames, las que son trabajadas con el software integrado Revo Scan 5.
Es recomendable el uso complementario de un Spray 3D cuando la figura es metálica o oscura, más detalles en la sección 3.4.4.

3.4.2 Uso In-Hand

Alternativamente, el scanner puede ser tomado con la mano, como muestra la figura **??**:



Figura 3.17: Entorno físico uso In-Hand Scanner

Esto trae varias ventajas como poder trabajar con objetos más grandes que la plataforma giratoria además de no tener que mover el objeto. Se debe tener cuidado de mantener una distancia moderada con el objeto en todo momento para asegurar una buena calidad de escaneado. El software emite un pitido cada vez que nos encontramos muy lejos de la figura.
Por experiencia utilizando el scanner, se consiguen mejores resultados cuando el scanner se encuentra fijo y se utiliza la plataforma giratoria, por lo que es recomendable el uso estando fijo cuando las condiciones lo permitan.

3.4.3 Parámetros de profundidad y luminosidad en el escaneado

Mientras ocurre el proceso de escaneado, existen dos paneles en el lateral izquierdo que muestran las vistas actuales del scanner respecto al objeto, 3.18.

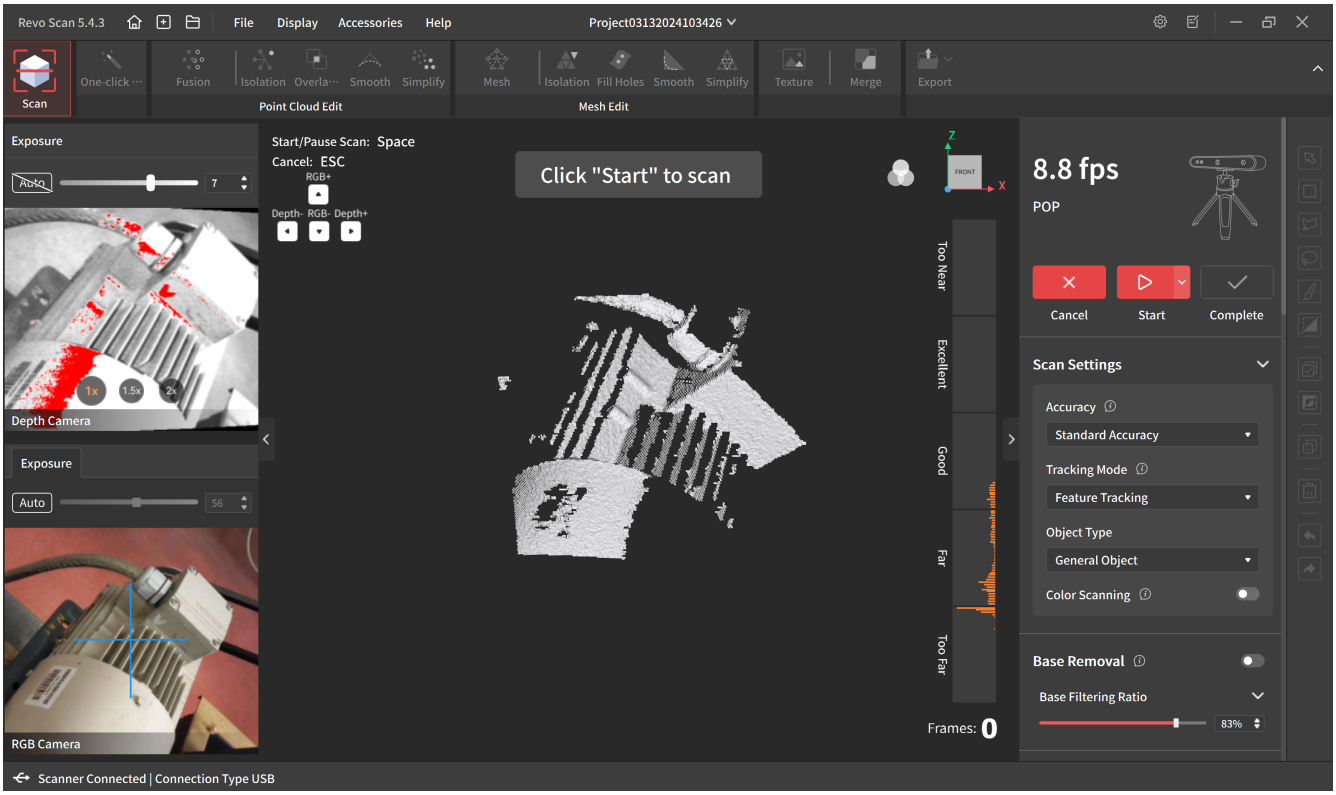


Figura 3.18: Interfaz de profundidad de cámaras en el escaneado

La vista superior 'Depth Camera' es responsable de capturar la información tridimensional del objeto, midiendo distancias entre el scanner y la superficie del objeto. Por esta razón incluye los botones 1x, 1.5x y 2x los que permiten hacer un zoom para alcanzar mayor detalle en zonas concretas durante el escaneado. Al utilizar este zoom, se debe considerar que es más propenso que el scanner pierda el seguimiento al objeto, por lo que la zona debe contar con detalles que ayuden al scanner a identificar donde se encuentra la zona con zoom respecto a la figura. Ajustes de exposición de esta cámara consideran la luz ambiental percibida lo que afecta la precisión del escaneo. Suele funcionar correctamente cuando esta en modo automático. En caso de ajustarlo manualmente se debe iterar hasta llegar a un valor en que la figura sea correctamente detectada.
La vista inferior 'RGB Camera' captura información de color. Esta vista es usada para aplicar texturas y colores reales al modelo escaneado. el ajuste de esta exposición regula si los colores son demasiado oscuros o brillantes al momento de captar la textura del objeto.
En general, el scanner encuentra una configuración adecuada automáticamente, por lo que no es necesario modificar manualmente estos valores.

3.4.4 Aplicación de Spray 3D

La aplicación de líquidos externos, especiales para este fín, puede ayudar a mejorar la detección del Scanner sobre la figura.
La aplicación de este Spray puede ser útil para superficies reflectantes(metales), translucidas y superficies oscuras al mitigar efectos debido a reflejos excesivos.
El mercado ofrece varias alternativas industriales para este fin. Se utiliza el Spray "Digiscan-Spray" marca "YETI DENTAL" mostrado en la figura 3.20, utilizado en el escaneado de moldes bucales. La detección de las figuras mejora considerablemente utilizando este Spray 3D, siendo los agujeros y esquinas las secciones más beneficiadas en la detección.



Figura 3.19: Uso de solución de Spray 3D

Las instrucciones de uso son simples, batir el Spray 2 segundos antes de usarlo y luego rociar la figura sobre secciones oscuras, metálicas, agujeros o zonas que requieren una mejor detección.

Esta solución puede ser encontrada facilmente en el mercado y el precio es cercano a los 20 dolares por una lata de 350ml. Funciona mejor, al no dejar residuos, que la alternativa mostrada a continuación. Suponiendo que superficies metálicas ó oscuras son más dificiles para el scanner, es trivial el pensamiento de pintar la figura para mejorar la detección.
En el desarrollo de este trabajo, antes de utilizar el spray 3D, fue utilizada una solución que consiste en un Spray matificante no permanente que se aplica antes del escaneo de los objetos con el Scanner con el objetivo de formar una capa 'temporal' que minimiza los reflejos de la figura sin cambiar su forma y color. La composición de esta solución consiste en una mezcla casera de agua y tiza finamente pulverizada(30 gramos de tiza pulverizada sobre 300 ml de agua de grifo) dispuestos en un envase de Spray matificante.
La ventajas de esta solución casera son las siguientes:

- Naturaleza no invasiva sobre la figura al ser una solución de agua y tiza, es fácilmente removible con un paño luego de realizar el escaneado.
- Es de fácil y rápida aplicación al tener que rocearlo con el Spray dosificador.

El modo de aplicación de este matificador casero sobre la figura se puede observar a continuación en la figura 3.20:



Figura 3.20: Aplicación de Solución matificadora de Spray 3D sobre Figura para posterior escaneado

Sin embargo, los resultados no son tan deseables, ya que aparecen esferas con un tamaño considerable que alteran la forma del objeto.
En resumen, resulta adecuado aplicar el Spray 3D para mejorar la detección en las siguientes situaciones:

- La figura es oscura ó altamente reflectiva(metales).
- Ciertas secciones no son captadas por el Scanner.

3.4.5 Manejo de Errores del programa

Cantidad muy alta de fotogramas al escanear

En el proceso de escanear una figura utilizando el Software **Revo Scan 5**, es importante tener cuidado de la cantidad de fotogramas acumulados durante el proceso de escaneado.
Debido a razones técnicas del programa, llevar acumuladas una cantidad de fotogramas mayor a 1400 puede causar errores en el programa teniendo consecuencia 'glitches' y 'freezeos', causando parte de la pérdida de los últimos fotogramas escaneados de la figura, como muestra la figura 3.21:

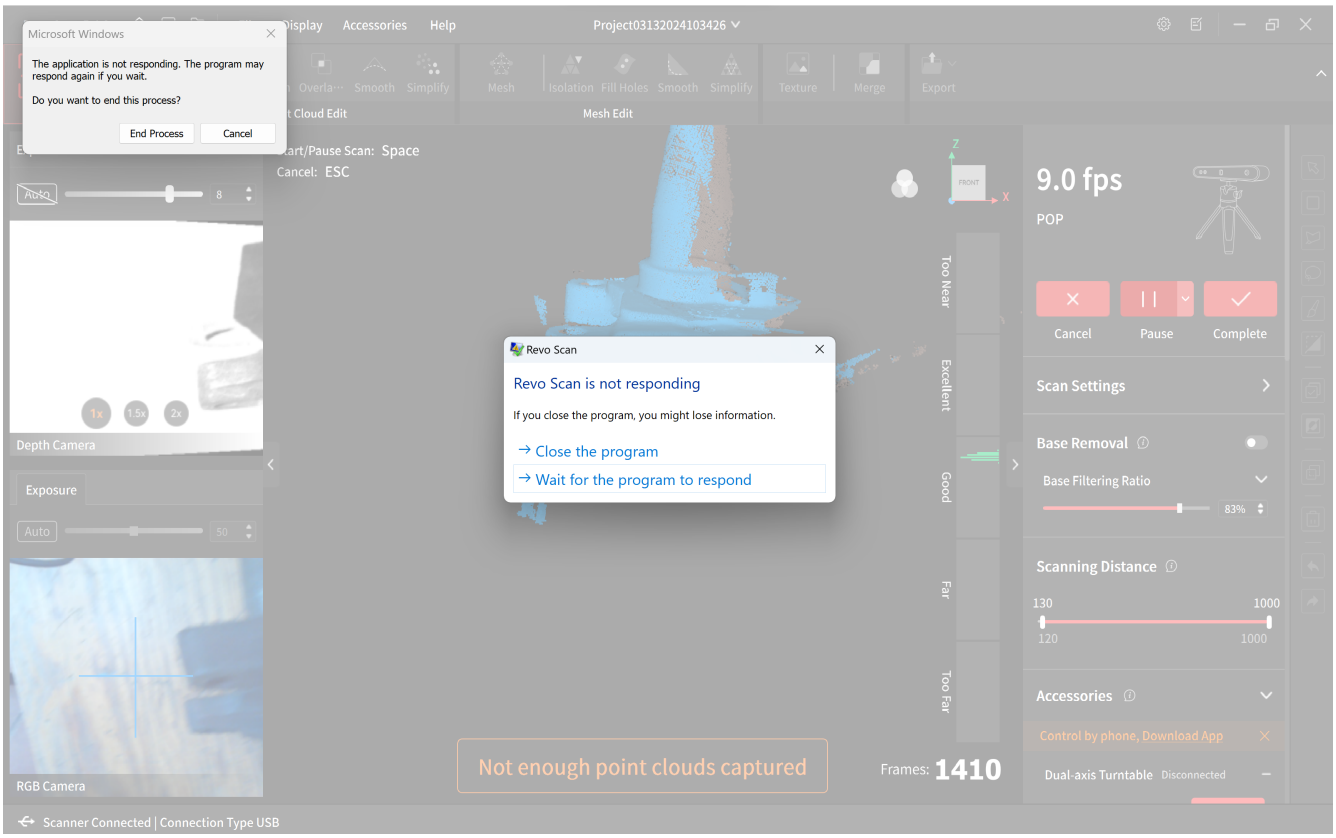


Figura 3.21: Error arrojado por programa al tener gran cantidad de fotogramas

Una de las alternativas para solucionar este congelamiento que aparece en el Software es evitar tomar una cantidad de fotogramas muy grande para un único modelo.
Según la experiencia con este programa, para los casos de figuras relativamente complejas o detalladas que requieren ser escaneadas lentamente para ser digitalizadas correctamente, **es sugerible evitar realizar la totalidad de escaneado en una única toma** y escanear distintas secciones de la figura para unirlas posteriormente con la herramienta de unión de secciones ofrecida por el programa Revo Studio. El método mencionado anteriormente evita llegar a una alta cantidad

de fotogramas en una única toma que podría traer efectos indeseados sobre el programa tales como congelamientos y errores que cierren la ejecución del programa y pueda perderse el progreso realizado.

3.4.6 Solapamiento de Figuras 3D

El solapamiento de figuras en el escaneado representa un desafío para la detección correcta del contorno de la figura y sus detalles, lo que resulta en representaciones imprecisas perceptibles de figura.
En la figura 3.22 es posible observar la aparición de este fenómeno.

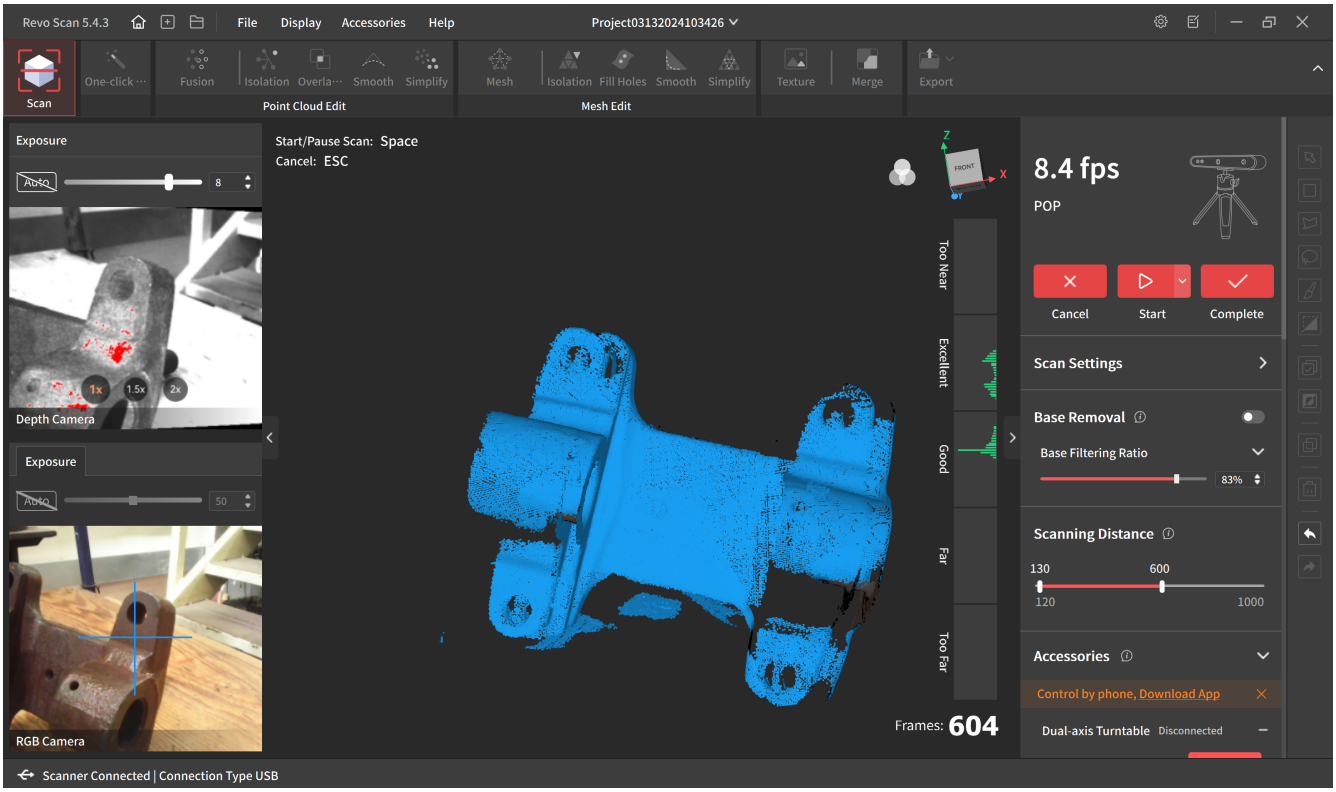


Figura 3.22: Fenómeno de solapamiento

En general solucionar estos problemas posteriormente en el procesado es complicado ya que al momento de armar el mallado va a considerar todas estas imperfecciones y por tanto **es recomendable resolver imperfecciones de forma en la etapa de escaneado**.
Un approach adecuado para evitar solapamientos son los siguientes:

- Contar con el brillo y contraste adecuado en el ambiente. En general el modo de brillo y contraste automático del programa funciona adecuadamente sin embargo si las condiciones

externas son muy oscuras o muy lumínicas podría afectar negativamente el resultado. Una fuente lumínica que apunte directamente a la figura puede mejorar los resultados.

- En el caso de ocupar la plataforma giratoria, realizar en el escaneado una vuelta completa(y no más si no es necesario). Si ciertos detalles no fueron notados por la figura realizar un nuevo escaneado y unirlos mediante la herramienta de unión de Revo Studio.
- Evitar gran cantidad de fotogramas.

Las consideraciones anteriores pueden ayudar a evitar distorsiones y solapamientos en la figura.

Capítulo 4

Métodología y Técnicas

A continuación se detalla la metodología utilizada para realizar el escaneado de figuras utilizando el scanner tridimensional, el cual contempla 4 etapas disponibles en la Figura 4.1.
El alcance de esta metodología considera desde el apartado físico del escaneo relacionado con la preparación de la escena de escaneado y figura hasta la importación de la figura escaneada digitalmente en software CAD.

En la siguiente sección se mencionan los diversos software disponibles para realizar la etapa de procesamiento en la malla obtenida mediante el escaneado según la metodología mencionada en la sección 4:

4.1 Método de aplicación

La metodología a seguir para el proceso de escaneado consta de las etapas observadas en la figura 4.1

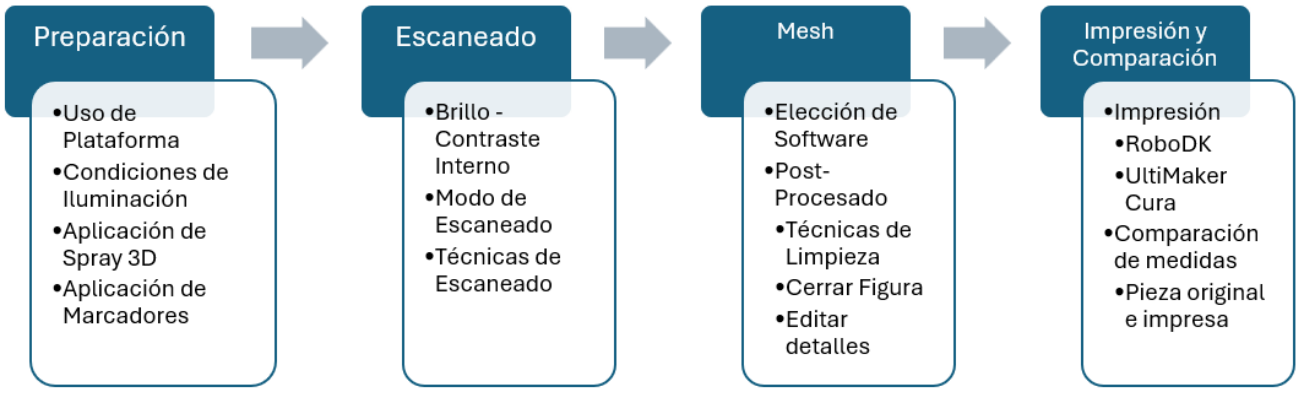


Figura 4.1: Método Para realizar escaneado de figuras

- Preparación: Esta primera etapa

La etapa de **Preparación**, es más bien física y tiene que ver con las preparaciones iniciales antes de iniciar el proceso de escaneado. Lo importante es determinar si se utilizara la plataforma giratoria(que implica utilizar el modo de Markers para la detección de la pieza). Condiciones de iluminación en la pieza, la aplicación de un Spray 3D que en el caso de figuras oscuras o metálicas siempre es recomendable y por último la inclusión de marcadores cuando es requerido que el Scanner pueda diferenciar diferentes zonas y no se confunda, ya que sirven como guía.
La segunda etapa de Escaneado, tiene que ver con seleccionar la configuración adecuada para la pieza (Modo Feature cuando existen muchos detalles y Markers si es conveniente el uso de marcadores), ajustar parámetros como la exposure de la cámara de Depth (que regula parámetros de Brillo y Contraste) mientras se está realizando el escaneado, además usar técnicas de escaneado tales como escanear por instantes, que puede llevar a mejores resultados en la figura resultante.
La tercera etapa, Mesh, la mayor parte de las veces en este trabajo considera el proceso de escaneado, fusión y Mesh realizado en Revo Scan 5 y el post-procesado con otros software disponibles. Esta etapa busca formar el mallado con la mejor calidad posible y entre funciones útiles que proporcionan otros software la de limpieza y cerrar agujeros por Meshlab y convertir la figura a una cierta cantidad de polígonos triangulares mediante Instant Meshes, que sirve para bajar el esfuerzo computacional que podríar requerir una pieza a cambio de un trade-off con detalles de la pieza.
En la última etapa, correspondiente a la impresión y comparación. Se imprime el modelo escaneado con el post-procesado correspondiente utilizando un software para impresoras 3D con Slicer. Es realizado comparaciones de medidas entre la pieza original e impresa para calcular exactitud en la impresión y concluir. La comparación de medidas en las piezas son realizados con los instrumentos: (1) Máquina de medición 3D Brown And Sharpe Microval 454(B&S), con un rango de medición 457 x 508 x 406 [mm] y resolución 1 micrometro y (2) Pie de metro electrónico(PdM) con resolución 0.01 milimetros.

4.2 Revisión de Software disponibles

Existe una cantidad considerable de Softwares que manipulan modelos 3D y que pueden ser utilizados para el manejo de la nube de puntos y mallado de las piezas digitalizadas con el Scanner 3D.

La siguiente lista de programas fue recopilada según información disponible en foros de impresión 3D:

- MeshLab: Es un programa de uso gratuito y de código abierto diseñado para el procesamiento de modelos 3D provenientes de escaneado. Ofrece varias herramientas que sirven para este

propósito y destaca por una multitud de algoritmos de aplicación al modelo, siendo los más destacados los algoritmos de formación de malla. Disponible en Linux, Windows y Mac OS.

- MeshMixer: Herramienta tambien de uso gratuito, diseñado para una variedad de aplicaciones. Ofrece herramientas similares a MeshLab y su principal particularidad es la herramienta de reparación de mallas, en general funciona mejor que los otros programas mencionados. Disponible para Windows, Linux, Mac OS, Android y iOS.

- Blender: Es el Software más conocido por su capacidad para la creación de contenido 3D además de ser uso gratuito. Contiene un ecosistema amplio lo que en la práctica permite incluir varios complementos que pueden mejorar el flujo de trabajo. La comunidad de este programa es bastante grande por lo que resulta fácil encontrar guías de uso y resolver dudas de funcionamiento en Internet. Plataformas de uso en Windows, MacOS y Linux.

- Instant Meshes: Es tambien Software de uso gratuito y está diseñado redefinir mallas de modelos 3D con facilidad. Destaca su funcionalidad que permite reducir el tamaño de las mallas importadas reorganizando los vértices y aristas de la malla para crear una nueva malla más simple. Se puede usar en WIndows, MacOS y Linux.

- Fusion 360: Pertenece al ecosistema de AutoDesk y ofrece una licencia académica para estudiantes y educadores bajo ciertas condiciones. A pesar que se pueden trabajar con mallas 3D, el programa se especializa en modelado sólido y de superficie por lo que la experiencia de manipulación de mallas 3D con este programa resulta más complejo que con MeshMixer. Permite correr únicamente sobre las plataformas de Windows y MacOS.

4.3 Técnicas

A continuación se muestran las técnicas utilizadas para realizar acciones específicas relacionadas con la manipulación y mejora de los modelos digitales en determinados programas.
Se proporciona una guía paso a paso para concretar las técnicas con el objetivo de mejorar el flujo de trabajo en la metodología mencionado en la sección 4 Metodología y Técnicas.

4.3.1 Manejo de Figuras en Meshlab

En el caso de Meshlab, el manejo de figuras es un poco más complejo que en otros programas, por lo que se explica detalladamente a continuación:
Para cualquier acción en Meshlab, se requiere seleccionar el modelo dentro del programa, esto se hace navegando mediante la barra de herramientas en la sección superior izquierda del programa,

siguiendo el panel **Filters** → **Selection** donde el programa permite escoger el tipo de selección a realizar, como muestra la figura 4.2

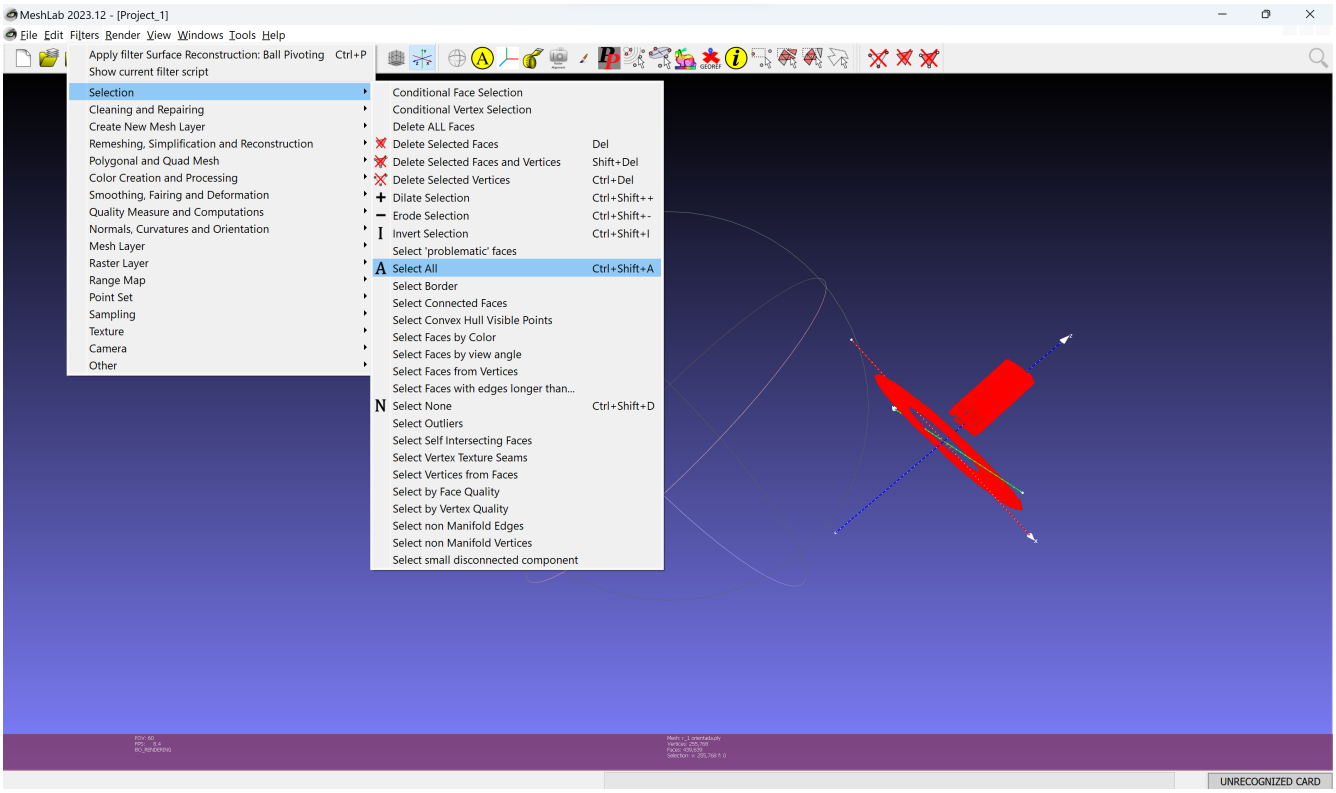


Figura 4.2: Menú de navegación para realizar selección del modelo en MeshLab

Para el desarrollo de esta memoria y los procedimientos a continuación resulta suficiente utilizar solamente la opción **Select All**, la que nos permitirá seleccionar toda la nube de puntos de la figura, a la que podemos aplicarle los procedimientos siguientes en la figura.
Cuando este paso de selección es realizado correctamente la superficie de la figura cambia a un color rojizo, como muestra la figura 4.2.
Los otros programas la función de seleccionar la figura para aplicar ciertas acciones es simple.

4.3.2 Rotación, traslación y establecimiento de Origen de las coordenadas de la Figura en Meshlab

La correcta orientación y posicionamiento del modelo en el eje cartesiano resulta importante para tener un mejor orden de los elementos en la pantalla mientras se lleva a cabo el flujo de trabajo.
Se sugiere realizar este procedimiento inmediatamente después de realizar el escaneo del objeto ya que permite que los objetos aparezcan en las coordenadas adecuadas al trabajar con cualquier de los programas.

Se recomienda la utilización del Software **Meshlab** para llevar a cabo este propósito ya que integra una herramienta intuitiva y eficaz que permite realizar la rotación, traslación y establecer el origen de coordenadas del modelo a procesar.
El primer paso de este procedimiento contempla importar el modelo en formato **.STL** dirigiendose al menú superior izquierdo navegando por la sección **File** → **Import Mesh** donde se abre una ventana que permite seleccionar el modelo a trabajar.
Una vez importado el modelo en MeshLab, dirigirse al menú superior izquierdo y navegar por la sección **Filters** → **Normals, Curvatures and Orientation** → **Transform: Translate, Center, Set Origin**, como puede observarse en la figura 4.3.

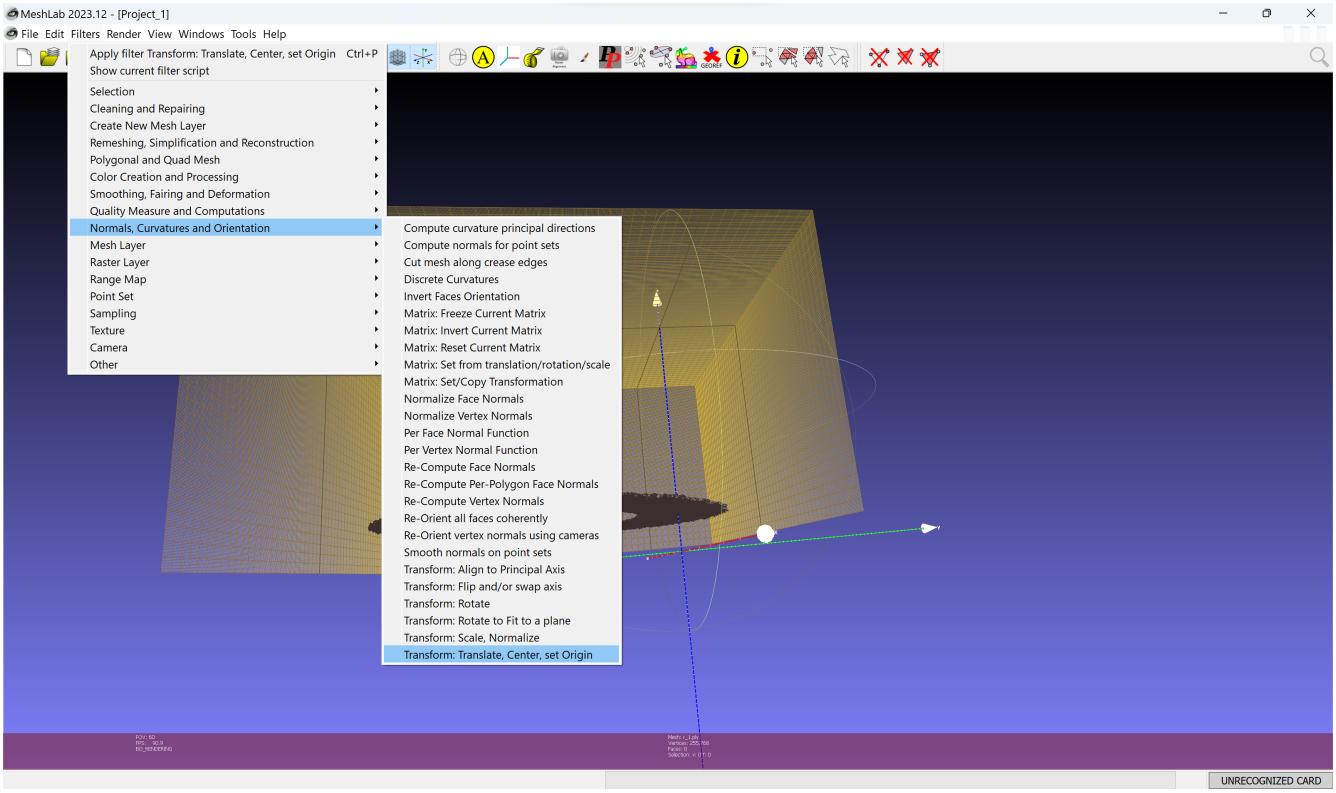


Figura 4.3: Menú de navegación para establecer coordenadas Meshlab

A continuación aparece la ventana de nombre 'Transform: Translate, Center, set Origin' que contiene las funcionalidades para establecer a conveniencia el nuevo sistema de coordenadas y origen del modelo.

Los siguientes botones son importantes para realizar la función de establecer el nuevo sistema de referencia:

- **Transformation**: Permite seleccionar las siguientes opciones:

– **XYZ Translation**: Permite trasladar el modelo a lo largo de los tres ejes cartesianos. Es útil para situar el modelo en la posición deseada.

– Parámetros **X**, **Y**, **Z** Axis:

– Casilla **Preview**: Mantener marcada ya que permite tener una retroalimentación instantánea de la posición actual del modelo mientras se itera los parámetros adecuados para el reajuste de la orientación de la figura.

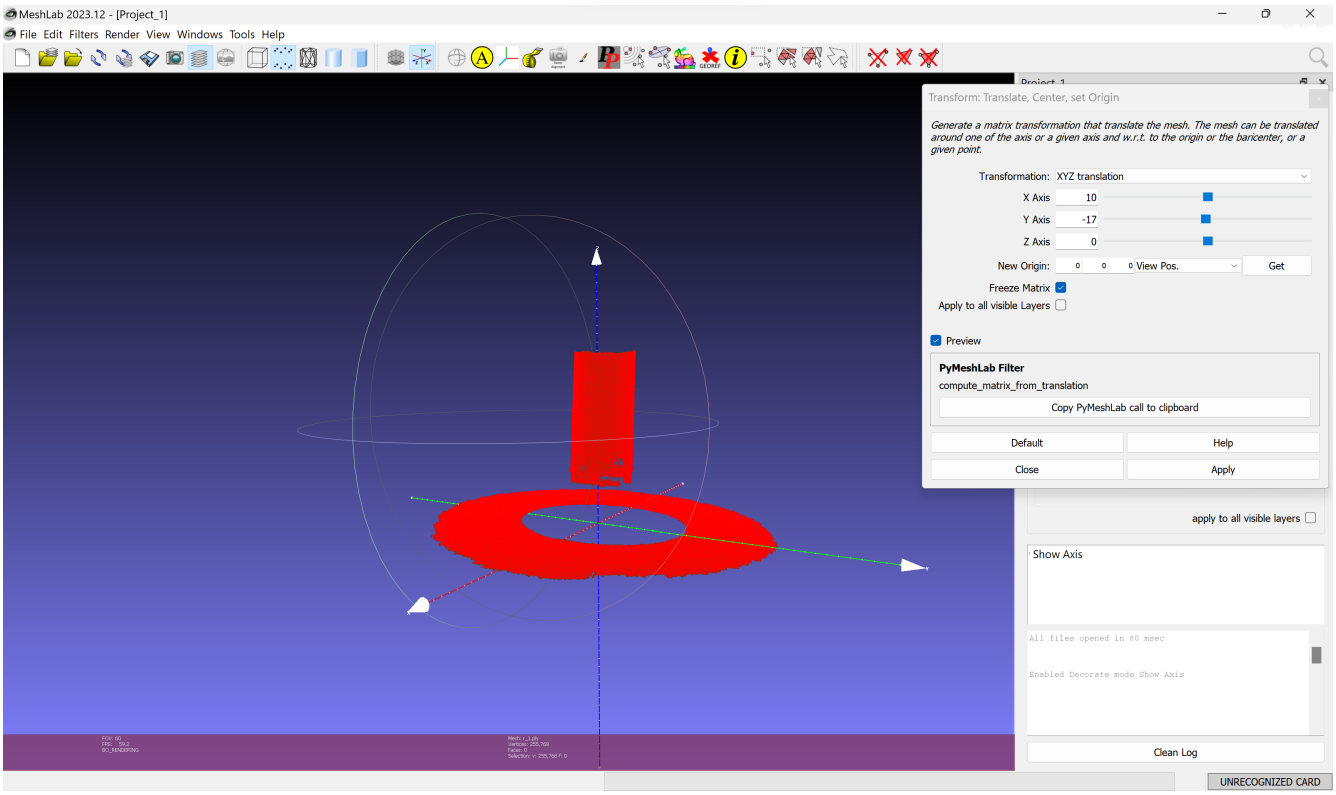


Figura 4.4: Resultado de figura trasladada en Meshlab

En la figura 4.4 es posible que notar que exitosamente ha sido trasladada la figura a un nuevo punto de origen. Luego debe ser exportada esta nueva figura en el formato original(.obj ó .stl) para que conserve estas nuevas coordenadas en otros programas.

4.3.3 Cambiar forma de Mesh y ajustar cantidad de vértices con Instant Meshes

El proceso de cambiar la forma de malla a cuadrada o triángular es conocido como remeshing. Instant Meshes permite realizar esta acción y durante el desarrollo del presente trabajo fue útil realizar este proceso en los siguientes casos:

- El uso de la herramienta Boolean en Blender funciona mejor cuando trabaja con figuras triangulares.
- Al abrir las figuras con el programa Inventor y su complemento para convertir a sólido Mallas 3D, es conveniente que estas mallas sean triangulares.

Para cualquiera de los dos casos, el procedimiento es el siguiente:

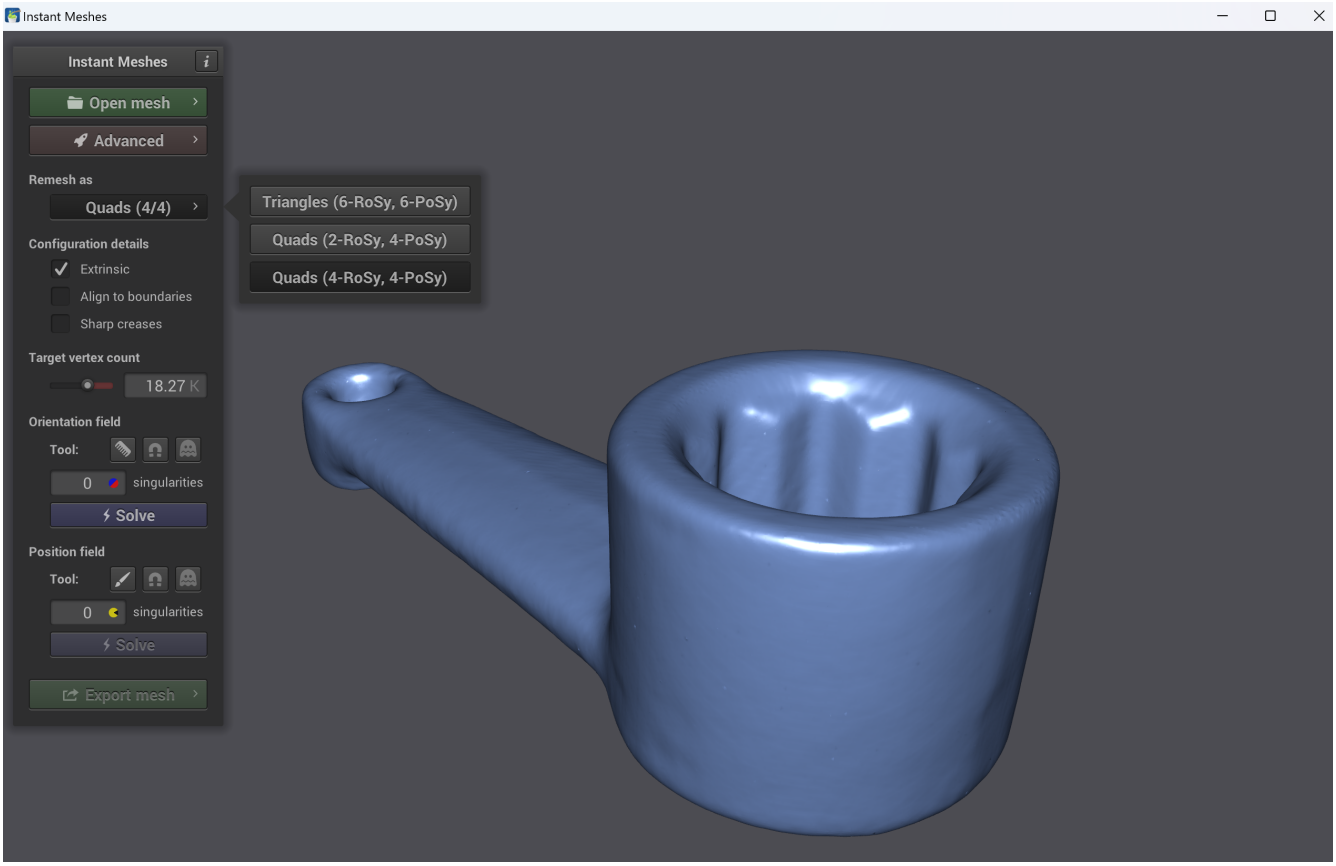


Figura 4.5: Interfaz Instant Meshes para remeshing y ajustar cantidad de polígonos

Observando la figura 4.5, la importación de un Mesh al programa es realizada cliqueando la opción "Open Mesh" y seleccionando en nuestro directorio del computador. Luego la opción **Remesh as** permite modificar la malla para que su estructura sea triangular o cuadrada. Para los casos mencionados anteriormente es conveniente que sea triangular.
Otra herramienta útil que ofrece este programa es la de cambiar el número de vértices de la malla. Disminuir este número implica que la calidad superficial de la pieza puede disminuir a cambio que requiera menor esfuerzo computacional para procesarse(como puede observarse en la figura 4.6). Algunos programas como Inventor con su complemento para transformar a Sólido las mallas sugieren que el Número de vértices sea menor a 5000 para que el programa no tarde demasiado en

ser procesado.

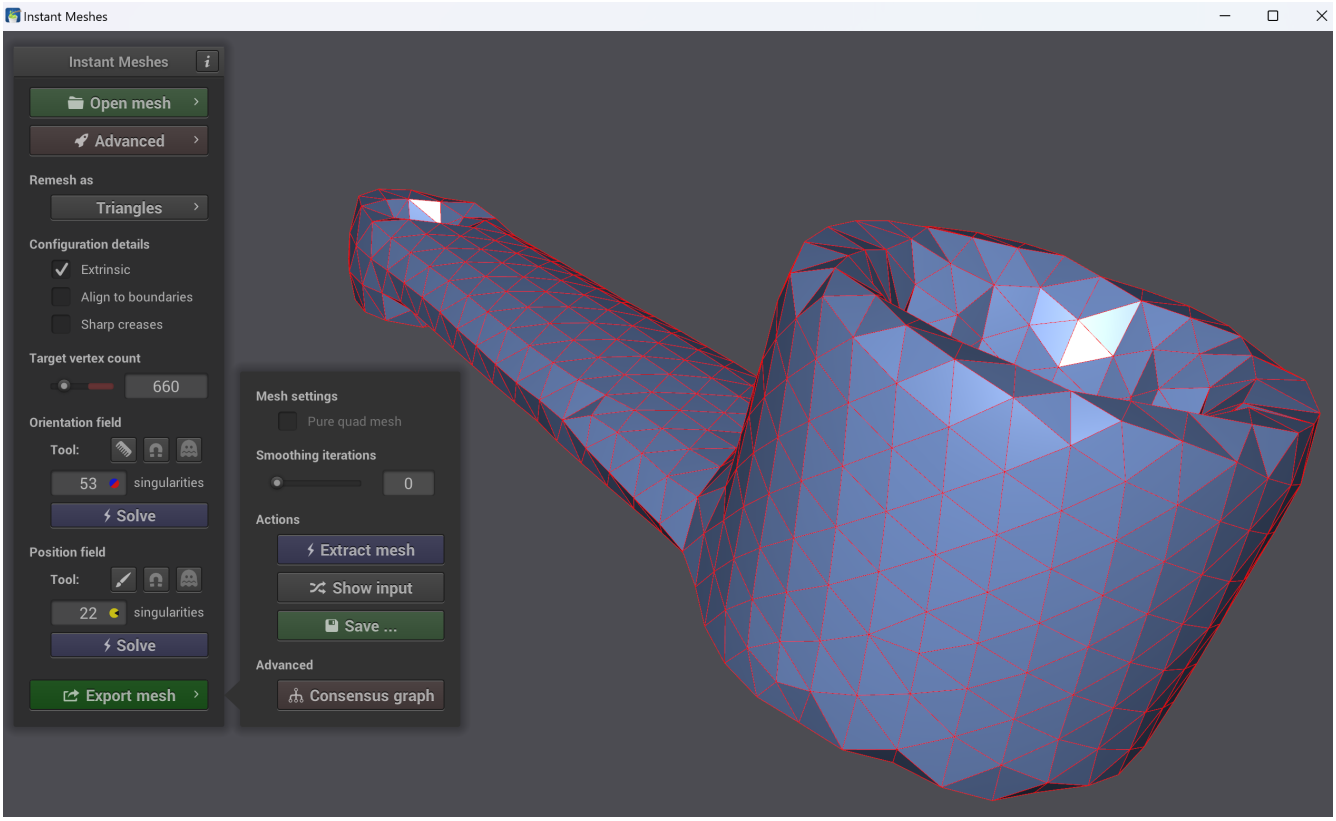


Figura 4.6: Figura convertida a mesh triangular con menor cantidad de vértices en Instant Meshes

Tambien resulta útil disminuir el número de vertices cuando estamos trabajando con figuras con un fin de prueba y aprendizaje, de esta manera los programas tardan menos tiempo en trabajar con la figura y disminuye el riesgo que aparezcan errores o congelamientos del programa debido a un uso intensivo de recursos.
Cuando las acciones han sido realizadas, Se debe cliquear primero en **Solve** del campo 'Position Field' y luego Export Mesh → Extract Mesh → Save. El programa tiene la opción de exportar las figuras modificadas en formato **.obj** y **.stl**

4.3.4 Herramienta de Union y Sustracción Booleana en Blender

La herramienta para realizar unión o sustracción de figuras y/o mallas de Blender resulta conveniente de usar.
Para el desarrollo de este trabajo, algunas secciones de figuras que se encontraban con vertices no deseados fueron removidos usando esta herramienta.

Consiste en dos pasos, el primer es alinear las superficies de las figuras asignando 3 puntos correspondientes una a otra utilizando el addon **3PointsAlign**. Luego utilizando la herramienta de Bool, puede unir o sustraer ambas figuras.
El primer paso para trabajar con Blender es importar la figura a trabajar cliqueando en File → Import → .stl ó .obj y buscamos el directorio donde se encuentra la figura. Lo anterior puede verse gráficamente en la figura 4.7:

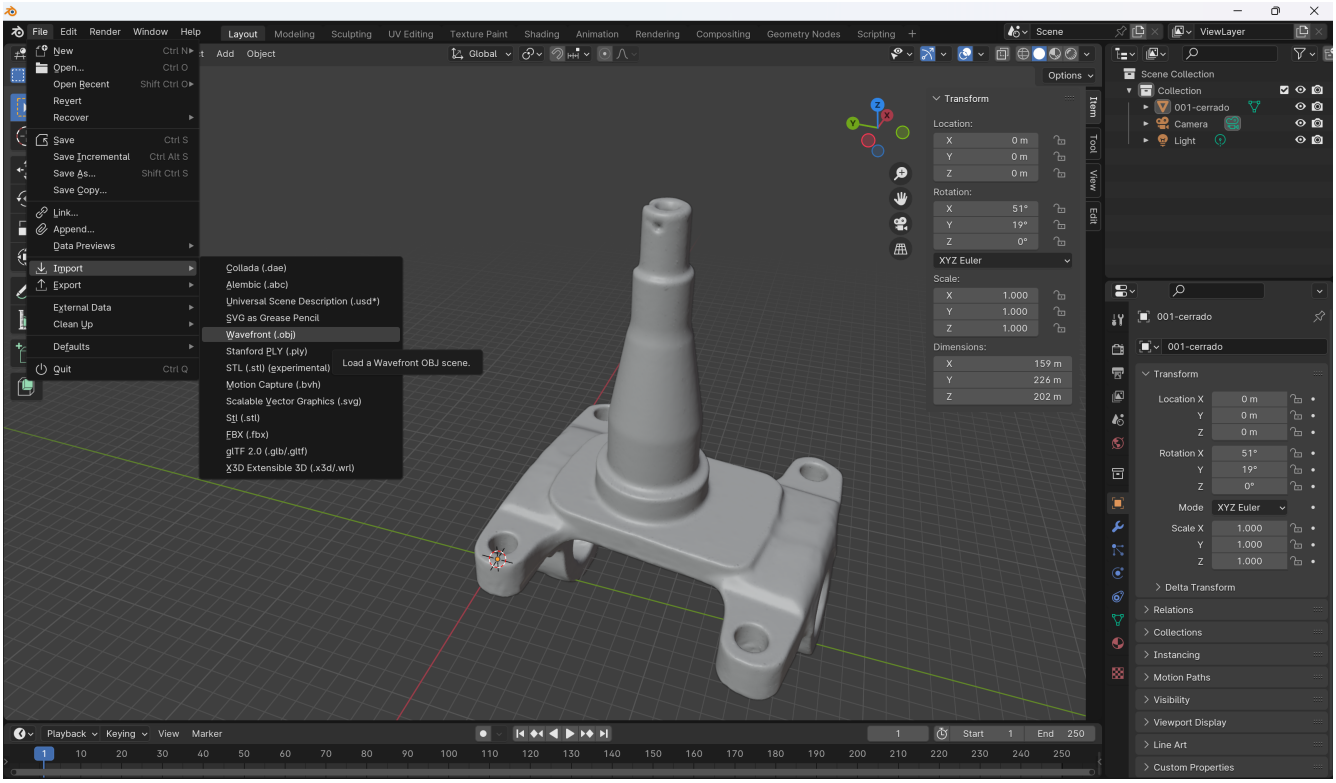


Figura 4.7: Interfaz Blender importar pieza

Luego corresponde añadir otra figura, puede ser otro Mesh ó un cubo/esfera/cilindro pulsando la tecla **shift+a**. A continuación se debe asignar las dimensiones(en el caso de trabajar con una figura añadida por el programa) estando en la sección Item(menú lateral). Es posible trasladar y rotar la figura modificando los parámetros X, Y, Z de Location y Rotation, como muestra la figura 4.7.

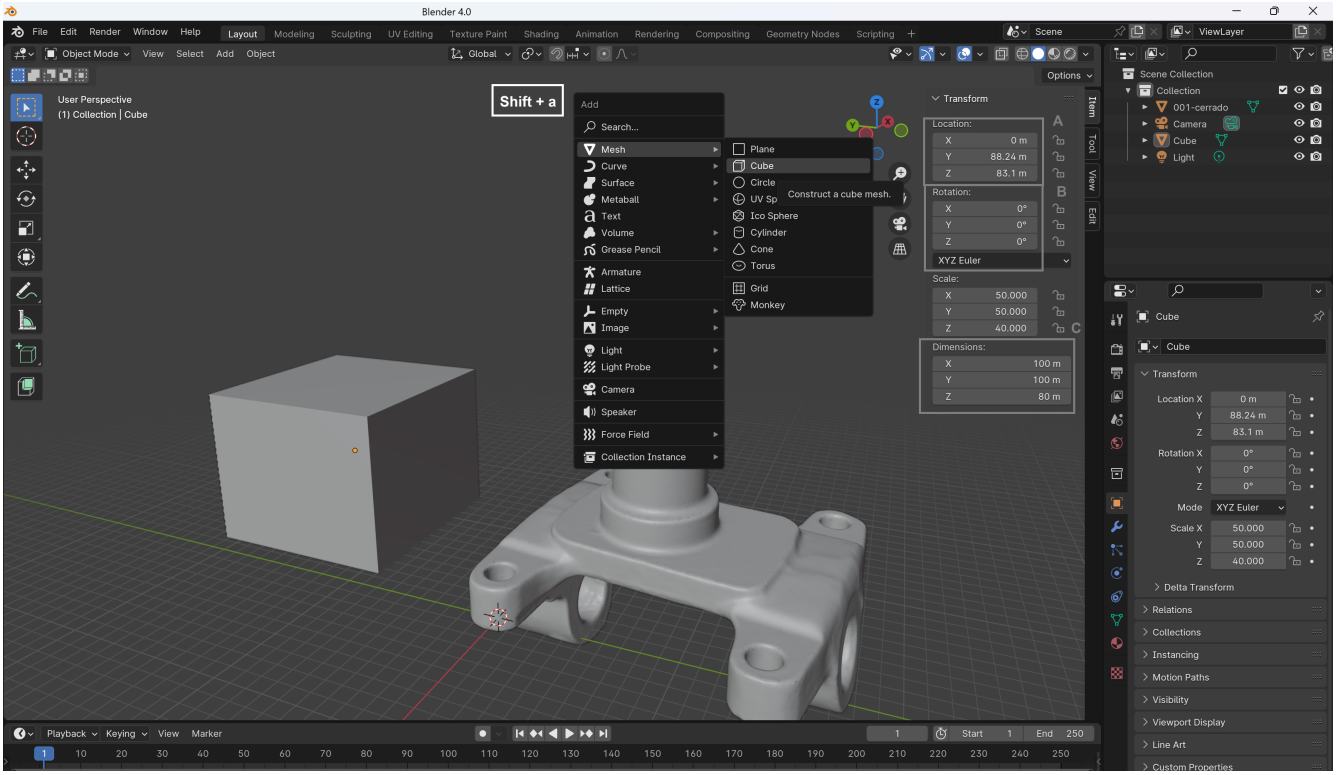


Figura 4.8: Añadir figura en Blender

Cuando el objetivo es realizar una operación booleana sobre un Mesh, es recomendable dividir considerablemente la figura(que puede ser el cilindro, cubo ó esfera) ya que traae mejores resultados en la operación booleana. Para esto se debe ingresar a Edit Mode (presionar tecla Tab) y sobre la figura presionar boton derecho y cliquear la opción **Subdivide**. Una vez terminado los cambios volver al modo normal apretando tab nuevamente. En la figura 4.9 se muestra el procedimiento anterior.

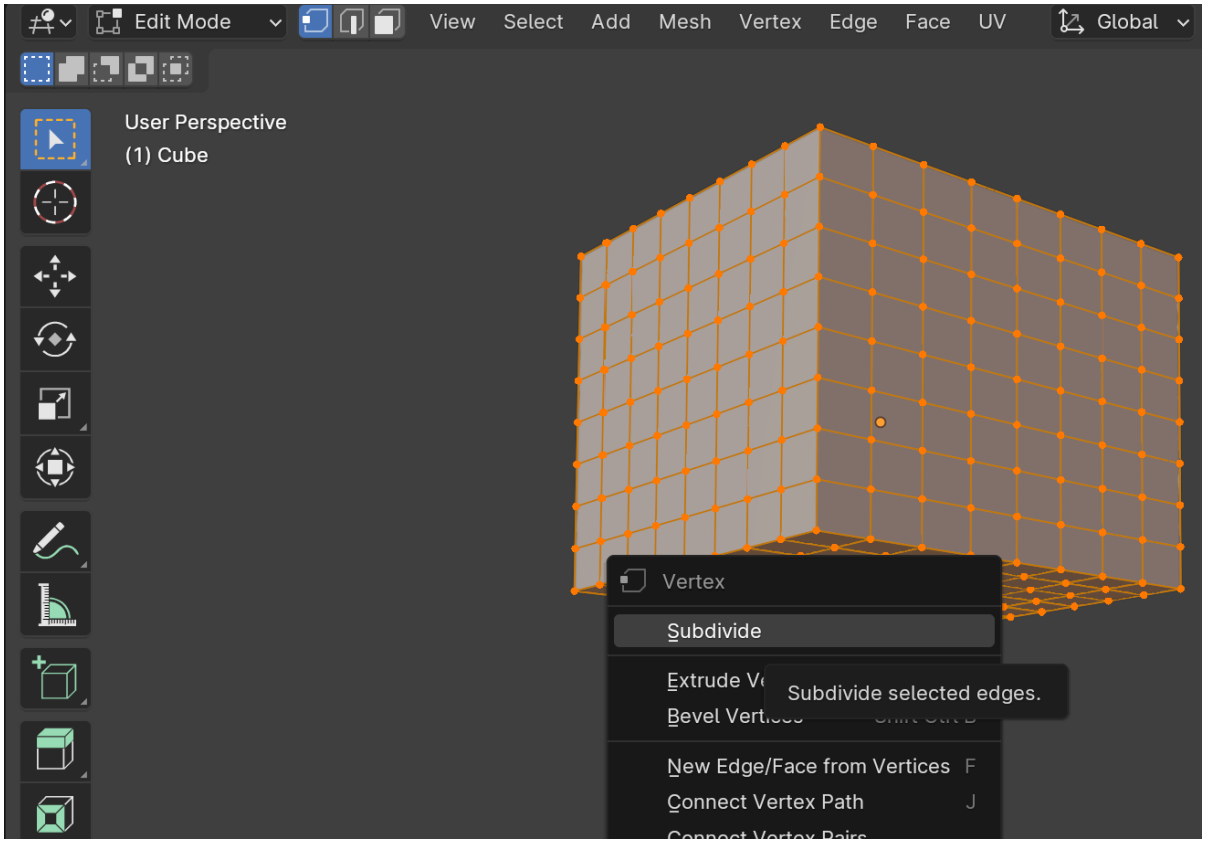


Figura 4.9: Subdividir figura en Blender

Una vez la figura se encuentra dividida considerablemente, corresponde alinear su superficie con la superficie del Mesh. Para esto se debe tener instalado el Addon 3PointsAlign (Precio de venta 5 dolares). La metodología es la siguiente: Cada vertice de la figura se alinea con un vértice del Mesh, como muestra la figura 4.10.

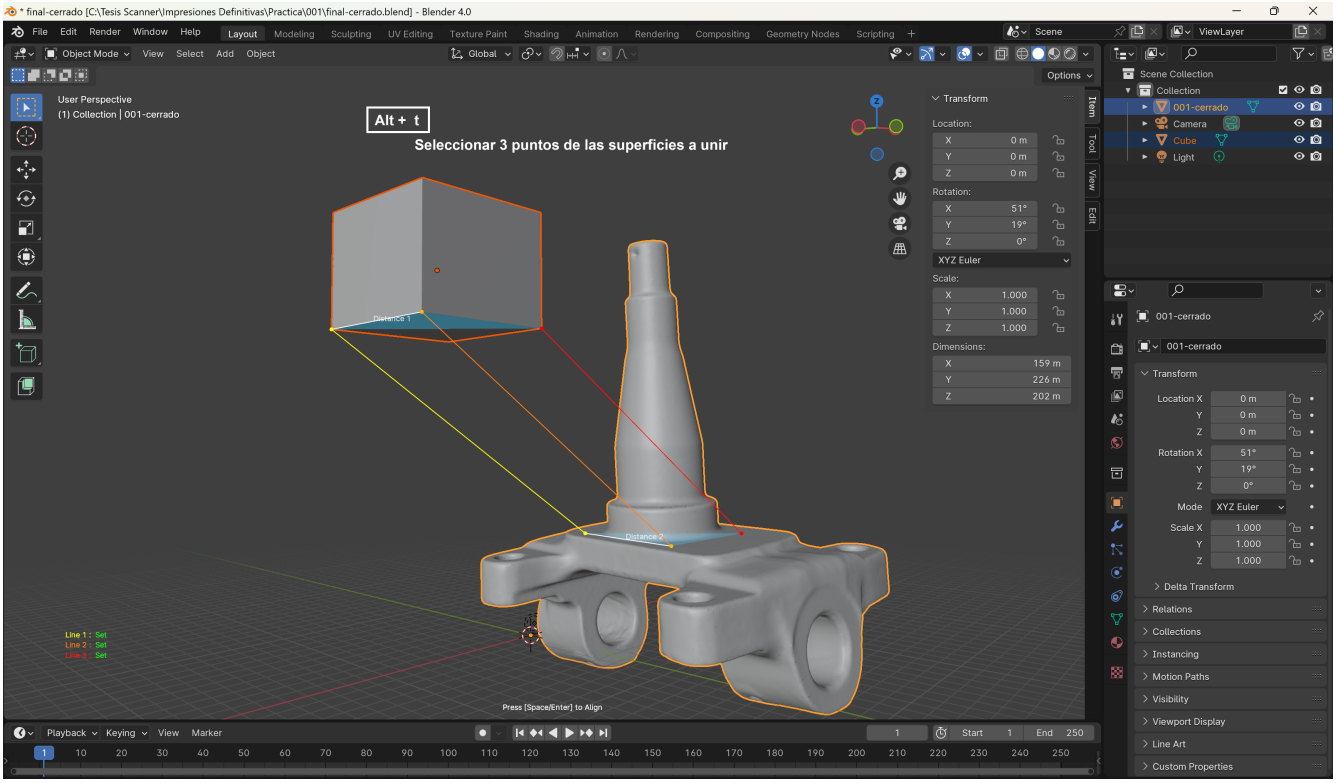


Figura 4.10: Adddon 3PointsAlign En Blender

En la figura 4.11 es posible notar que el alineamiento fue realizado correctamente. Es posible aumentar las dimensiones de la figura si es necesario volviendo a la pestaña lateral 'Item'.

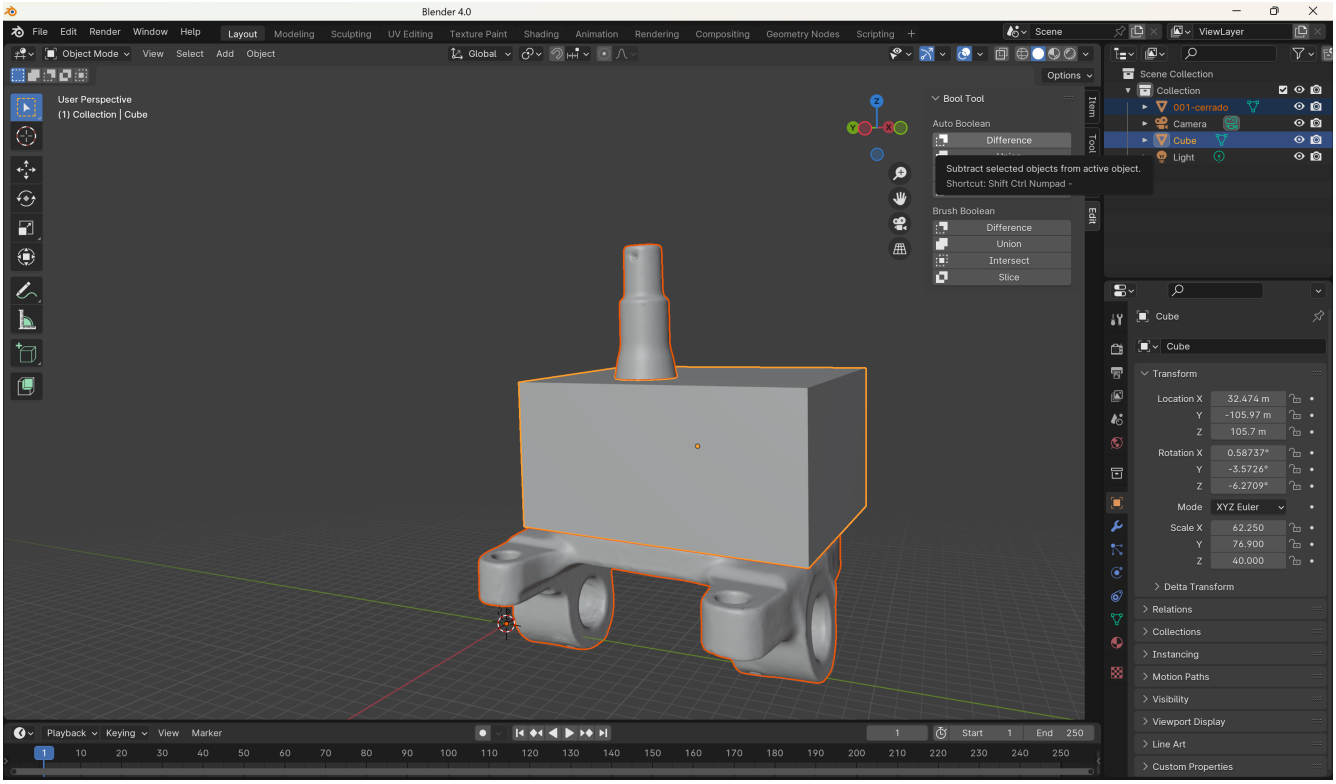


Figura 4.11: Alineación superficies en Blender

En la pestaña lateral 'Edit', se encuentra el menú 'Bool Tool' , el cual permite realizar distintas operaciones sobre ambas figuras seleccionadas: Difference, Union, Intersect y Slice escogiendo el primer menú 'Auto Boolean'. El ejemplo es realizado utilizando la opción de difference.

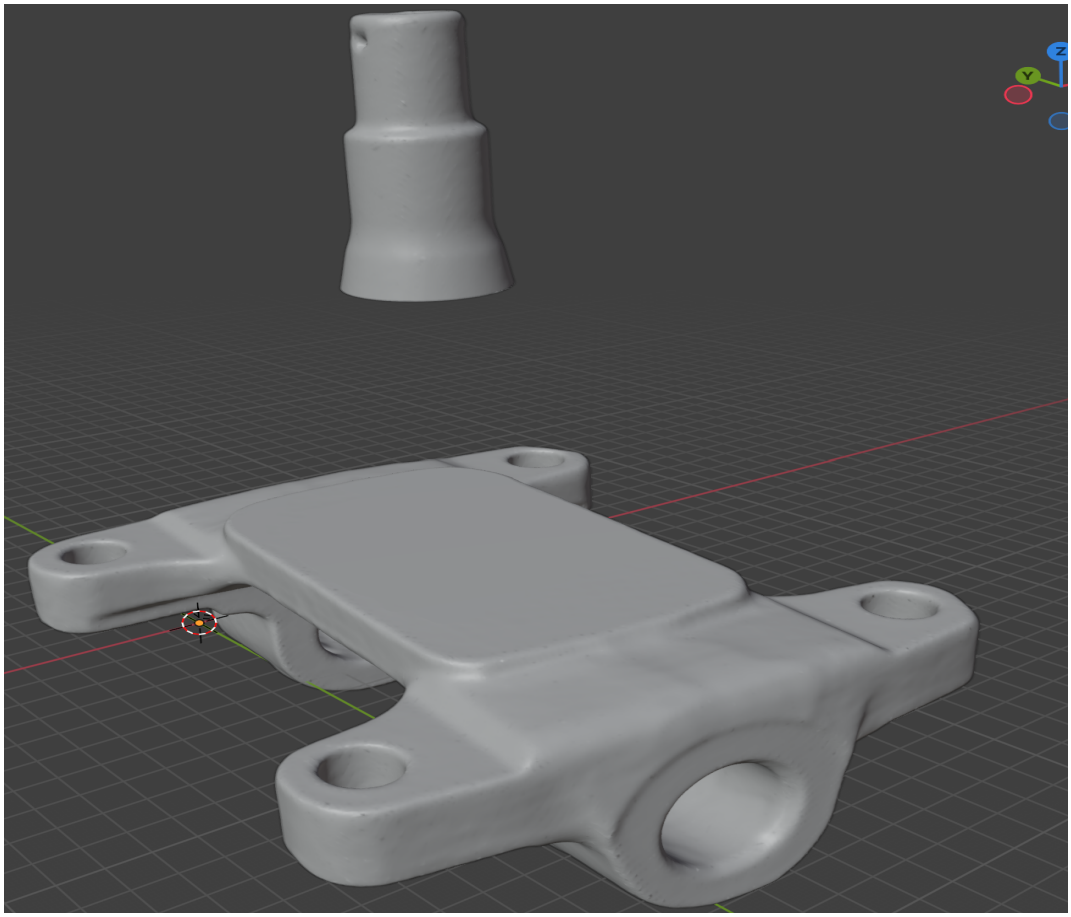


Figura 4.12: Demostración mesh sustraído de la figura con operación Booleana

Finalmente, la figura 4.12 muestra que la operación booleana Difference fue realizada correctamente. Para exportar la figura debe ser seleccionada y luego cliquear la opción File → Export. Respecto a este método se concluye lo siguiente:

- Las operaciones booleanas permiten realizar limpiezas de la malla y cortes de secciones en la pieza. Estos cortes permiten generar subpartes de la pieza original los que luego pueden ser impresos y unidos manualmente para formar la figura original.
- Es importante que la figura auxilizar utilizada(cilindro, esfera ó cubo) cuente con una suficiente cantidad de subdivisiones, ya que de no hacerlo la operación booleana no funciona correctamente.

4.3.5 Copia de formas en Fusion 360

Una de las características interesantes de Fusion 360 es que permite copiar formas de secciones, lo que es útil cuando existen figuras simétricas de las cuales se cuenta con sólo una región y queremos

replicarla varias veces, por ejemplo alas de autos.
En la figura 4.13 seleccionamos la pestaña de Forma y luego el icono de 'Cara'.

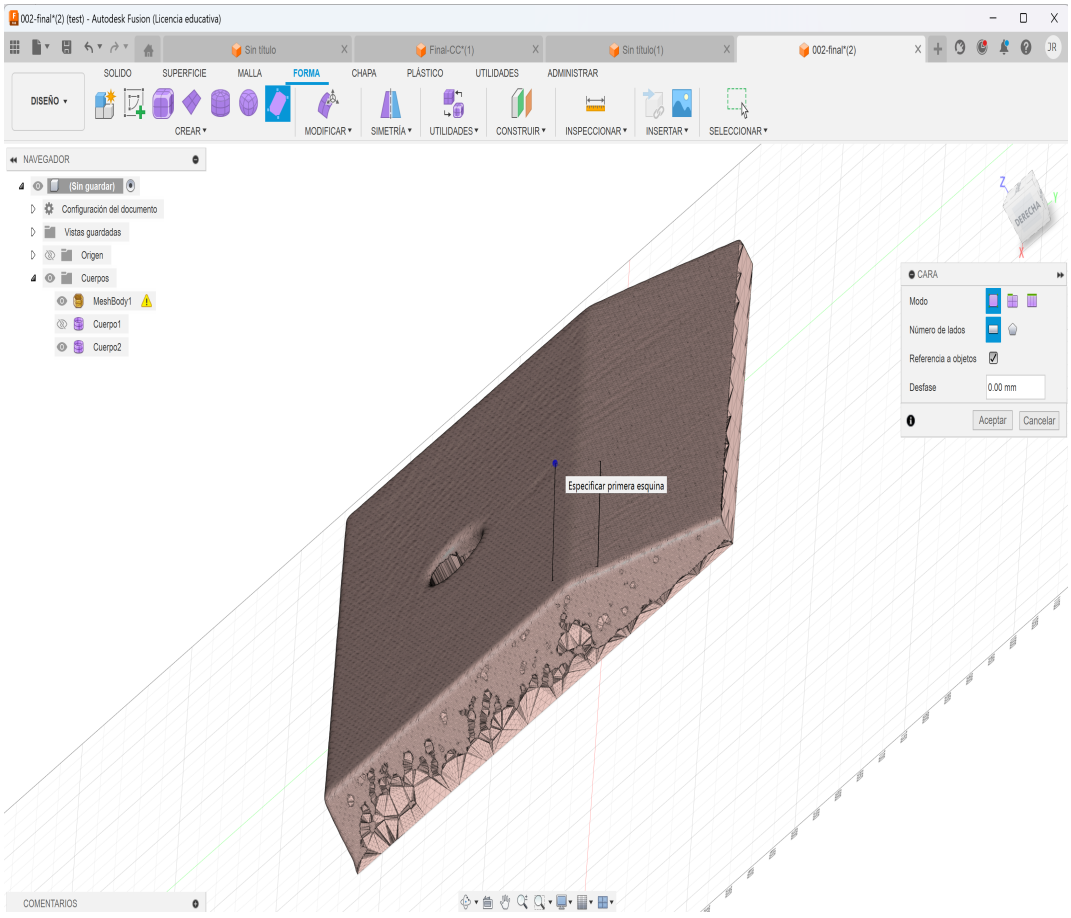


Figura 4.13: Panel de opciones Fusion 360

Nos pide seleccionar el modo, el cual por defecto es el primero, el número de lados(4 ó más) y una casilla con referencia a objeto, la cual debe seleccionarse.

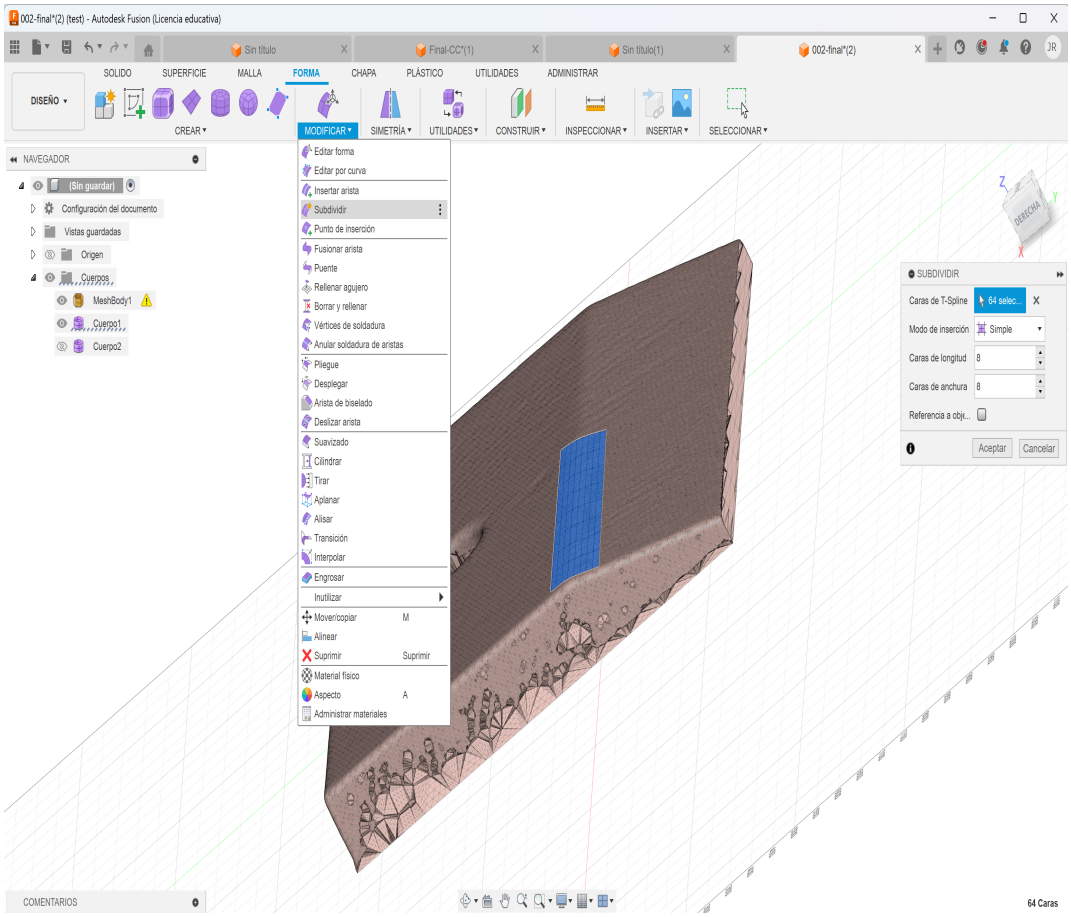


Figura 4.14: Panel de opciones menú de modificar en Fusion 360

Al realizar los pasos anteriores, ahora prosigue ir a la sub pestaña de 'Modificar' (estando dentro de la pestaña 'Forma') y seleccionar 'Subdividir'. El programa pide el número de caras de largo y ancho(8 para cada una) y se selecciona la opción de referencia a objetos. De esta manera lo que hará el programa es que con la cara creada anteriormente, intentará replicar su forma al objeto más próximo que encuentre.

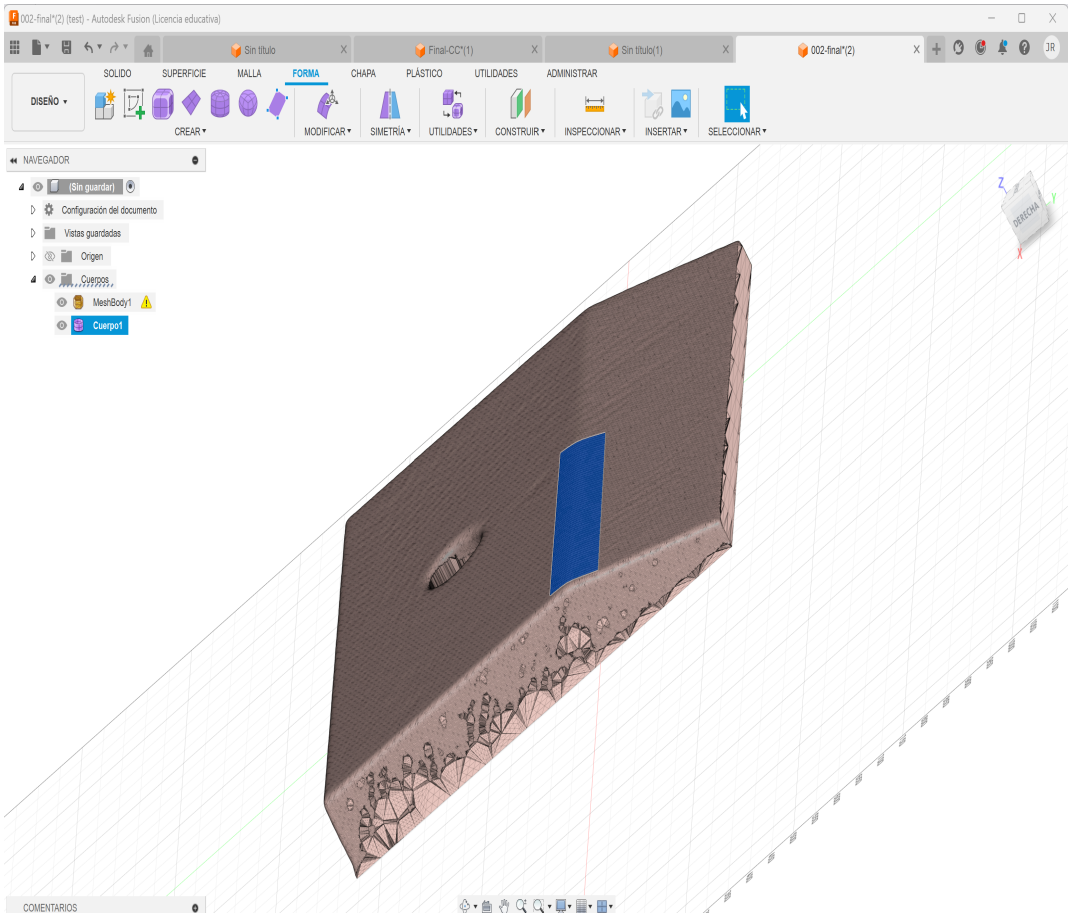


Figura 4.15: Resultado copia de forma en Fusion 360

En la figura 4.15 podemos ver el resultado final, donde efectivamente se consigue crear un segmento con la forma idéntica a la del objeto escaneado.

4.3.6 Cerrar agujeros en Meshlab

Es importante que la pieza no tenga agujeros cuando va a ser impresa para evitar ciertos errores que pueden aparecer por tener agujeros.
El software Revo Scan 5 realiza muy bien el trabajo de cerrar agujeros, sin embargo cuando estos agujeros son muy pequeños existe la posibilidad que no sean detectados por el programa. Para estos casos resulta conveniente utilizar el programa Meshlab con la funcionalidad 'Close Holes' para cerrar agujeros en la figura si es que existen.

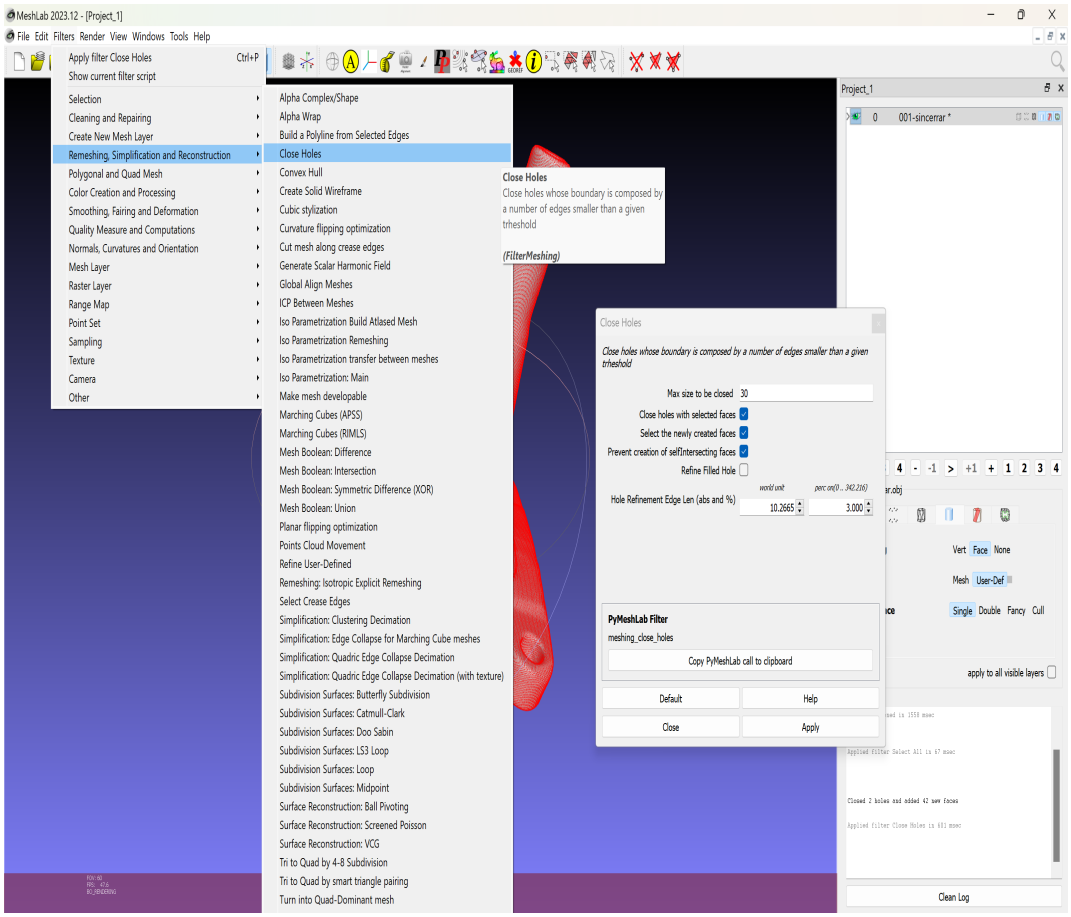


Figura 4.16: Interfaz Menú para cerrar agujeros de una figura en Meshlab

La figura 4.16 muestra la interfaz para llevar a cabo este proceso en Meshlab. Los pasos son los siguientes:

- Importar el Mesh en el programa (File → Import Mesh y seleccionar la malla)
- Seleccionar la malla (Para esto debe ser utilizada la funcionalidad 'Select All', detallada en esta sección).
- Ir a la pestaña 'Filters' → Remeshing, Simplification and Reconstruction → Close Holes.
- Seleccionar el tamaño máximo del agujero para ser cerrado (30 es un parámetro por defecto que funciona la mayoría de los casos), mantener seleccionadas todas las opciones excepto 'Refine Filled Hole' y presionar el boton 'Apply'.
- En la sección de registros del programa, ubicada en la esquina inferior derecha, aparece cuantos agujeros son cerrados debido a la aplicación de la función. Si aparece un número distinto a cero significa que efectivamente existian agujeros y fueron cerrados exitosamente.

Una vez son aplicados los pasos anteriores, en el caso de existir agujeros en la figura son cerrados por la funcionalidad. Por lo que con seguridad puede exportarse la figura para ser trabajada en otros programas o imprimirla.
Siempre es recomendable aplicar este proceso para asegurar que no existan agujeros en la figura, ya que es una causa importante de aparición de errores al momento de la impresión o el uso de la figura en otros programas.

4.3.7 Modificación en Inventor

Las piezas escanedas con el scanner tienen la opción de ser trabajadas en el programa Inventor. Esto requiere el uso de una extensión adicional llamada **MeshEnabler** que permite convertir un Mesh a un sólido modificable en Inventor.

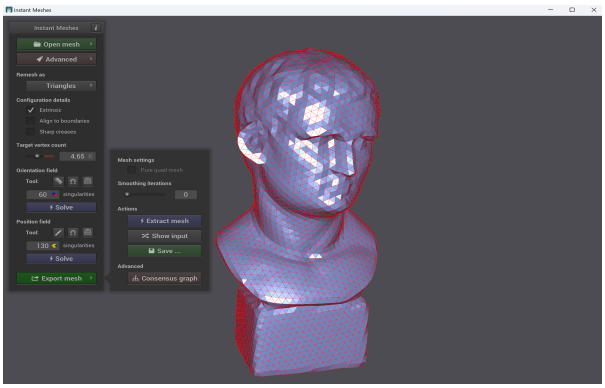


Figura 4.17: Vista Previa Instant Meshes

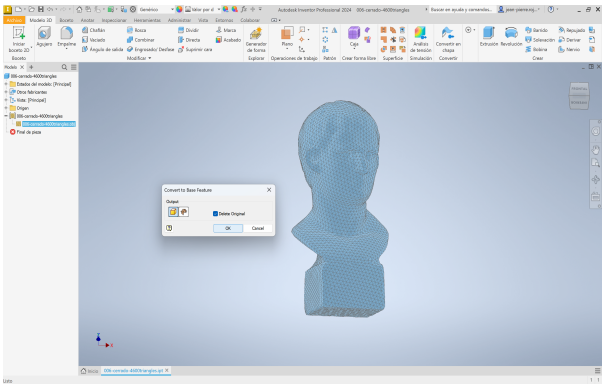


Figura 4.18: Vista Previa Inventor

Para realizar este proceso en un objeto, se debe utilizar el programa Instant Meshes para (1) Bajar la cantidad de vértices (El programa recomienda menor a 5000 para evitar colapsamiento del programa. En la práctica un número menor a 27.000 funciona dependiendo de la figura) y (2) Cambiar la forma del Mesh a triangulos. Esto procedimiento se observa en la figura 4.17.
Luego corresponde importar la figura modificada en Inventor. Se debe cliquear botón derecho sobre la figura en el menú lateral izquierdo del programa y presionar la opción "Convert to Base Feature". Se abre una ventana de dialogo y se debe seleccionar el icono amárillo(Sólido) manteniendo la opción de borrar la figura anterior, revisar figura 4.18. Al aplicar los pasos anteriores, ahora es posible modificar el Mesh(sólido) utilizando las funcionalidades de Inventor. La siguiente figura muestra una inclusión de un marco con texto en 3D sobre una de las figuras escaneadas.

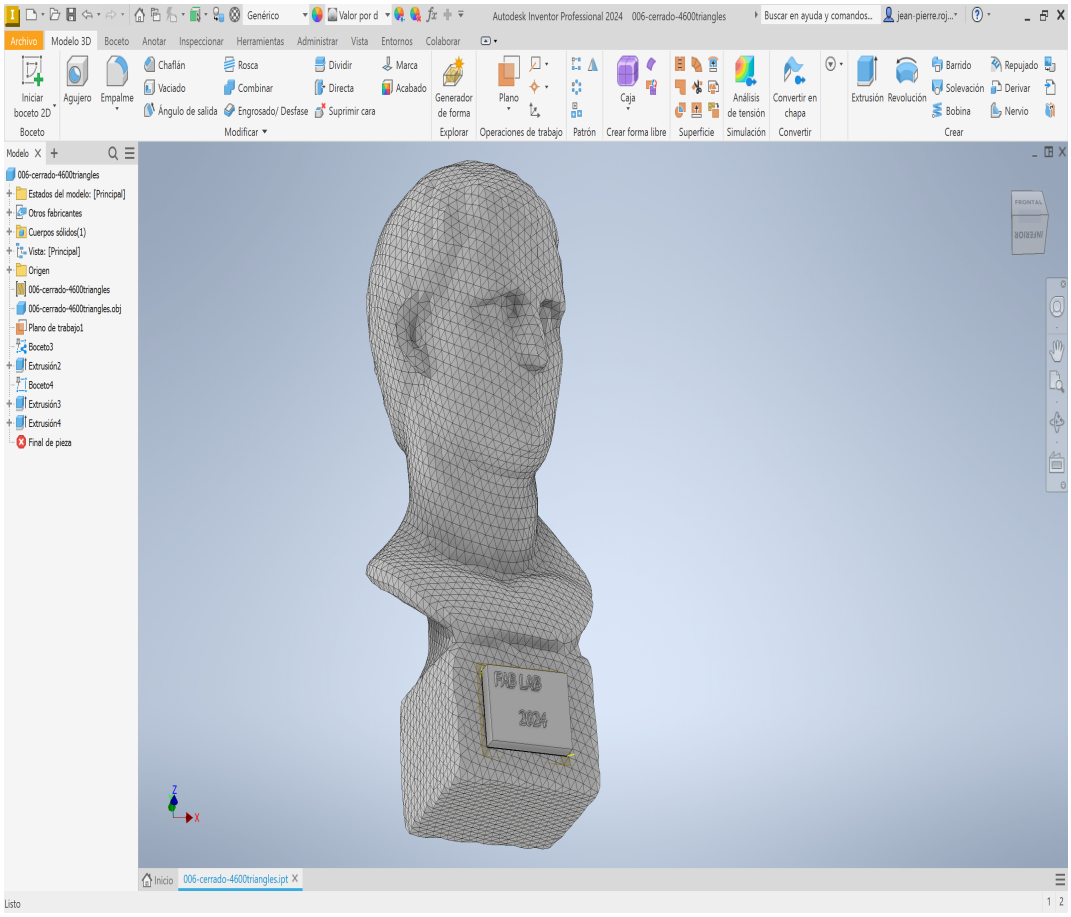


Figura 4.19: Figura modificada con Inventor

Capítulo 5

Resultados

A continuación se exponen los resultados obtenidos escaneando objetos e imprimiendolos, siguiendo la metodología propuesta y técnicas en la sección anterior:

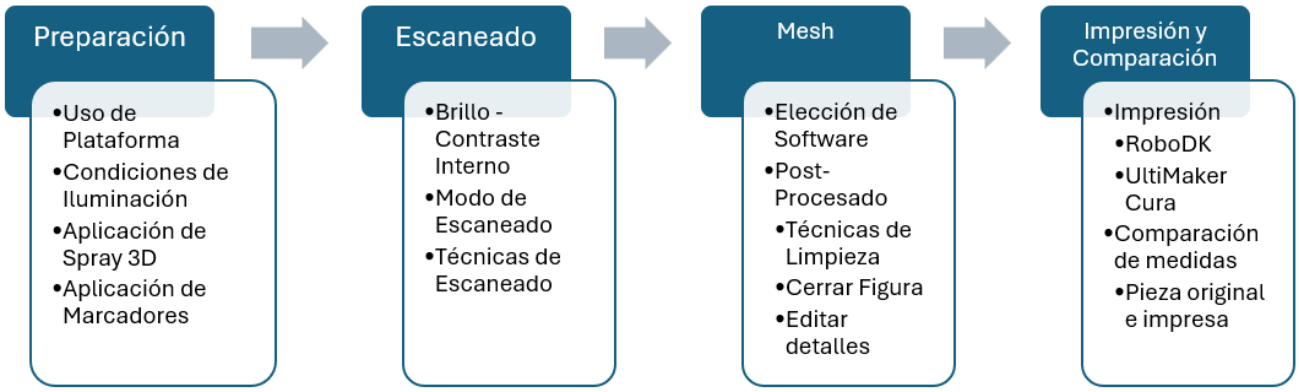


Figura 5.1: Método Para realizar escaneado de figuras

Es importante tener en cuenta que la comparación en las piezas son realizados con los instrumentos: (1) Máquina de medición 3D Brown And Sharpe Microval 454(B&S), con un rango de medición 457 x 508 x 406 [mm] y resolución 1 micrometro y (2) Pie de metro electrónico(PdM) con resolución 0.01 milimetros.

5.1 Figura 1: Pieza de Motor

Esta pieza corresponde a un muñón delantero de un camión encontrado en el laboratorio de mecánica de la UTFSM. Resulta interesante de investigar cómo es el comportamiento del scanner para esta figura, ya que posee varias regiones que no son simétricas(debido al desgaste), agujeros de tamaño considerable y diferentes diámetros a lo largo del eje.



Figura 5.2: Vista frontal 001



Figura 5.3: Vista lateral 001

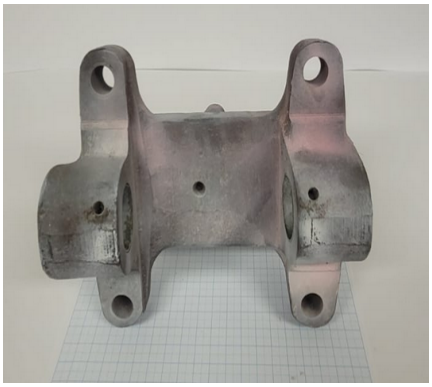


Figura 5.4: Vista trasera 001

En las figuras 5.2, 5.2 y 3, se pueden ver distintas vistas del objeto. Respecto a la etapa de preparación se tienen las siguientes consideraciones:

- Uso parcial de plataforma giratoria y uso In-Hand, debido al modo Feature.
- Condiciones de iluminación standard.
- Aplicación extensa de Spray 3D en esquinas e interiores de agujero mejoraron significativamente la detección.
- No se aplican marcadores debido a que el objeto cuenta con suficientes detalles y el Scanner distingue correctamente las distintas secciones, en pruebas anteriores al no usar el Spray era requerido el uso de marcadores sobre la figura con la desventaja que alteraban el relieve de la superficie escaneada.



Figura 5.5: Pieza 001 con Spray 3D

Las características mencionadas anteriormente pueden ser vistas en la figura 5.5. Donde se aprecia el muñón rociado con Spray 3D(polvo blanco) sobre la plataforma giratoria.
En la etapa de escaneado, se tienen las siguientes consideraciones:

- Modo de escaneo: Feature, ya que la figura es considerablemente más grande que la mesa giratoria y tiene los suficientes detalles para no requerir de marcadores.
- Cámara In-depth regulada manualmente para conseguir la mejor detección.
- Uso de zoom en la cámara in-depth para detectar al interior de agujeros.

Para el Mesh, se utiliza el software Revo Scan 5 quien entrega la malla y se realizan las siguientes acciones:

- Remoción de vértices que no corresponden a la figura mediante la selección rectangular incluido en revo Scan.
- Cierre de agujeros utilizando el software Meshlab (Revisar 4 para mayor información de la técnica).

Respecto a la etapa de impresión y comparación, los resultados de la impresión de la pieza están disponibles en la figuras 5.6, fig:resultado-001-6 y fig:resultado-001-7.

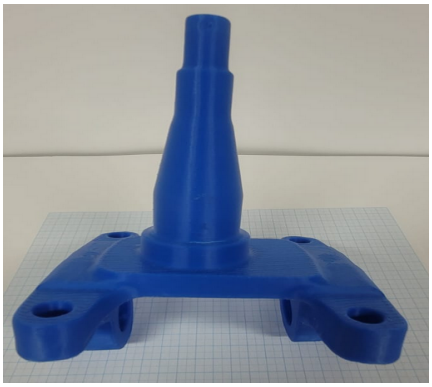


Figura 5.6: Vista frontal I. 001

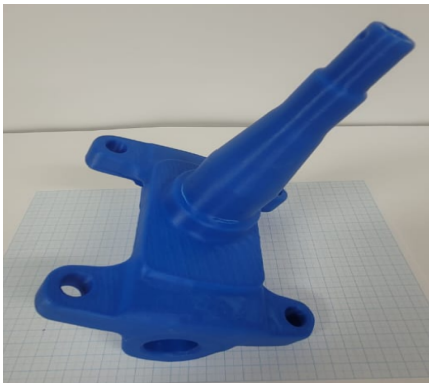


Figura 5.7: Vista lateral I. 001

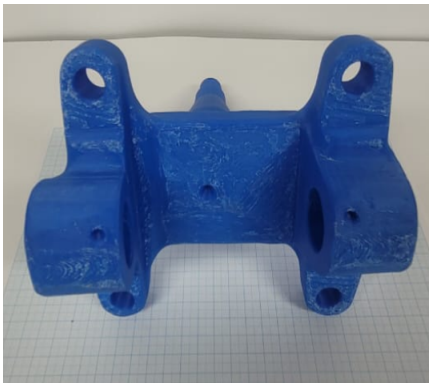


Figura 5.8: Vista trasera I. 001

Es posible notar que los resultados obtenidos en la impresión presentan una alta fidelidad respecto a la pieza original, logrando una correspondencia en detalles y proporciones. Esto sugiere que el proceso de escaneo e impresión es eficaz en capturar y replicar elementos claves de figuras con suficiente cantidad de detalles y agujeros ligeramente profundos ó con un gran diámetro.

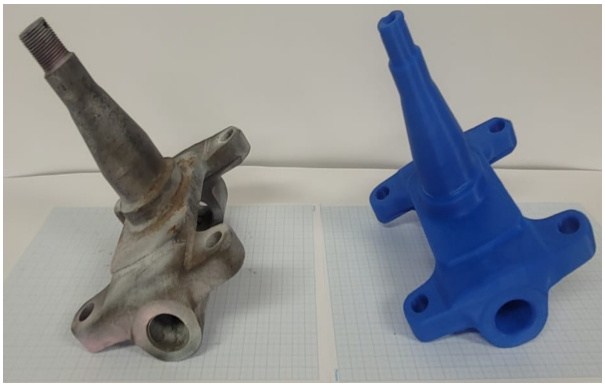


Figura 5.9: Comparación pieza 001

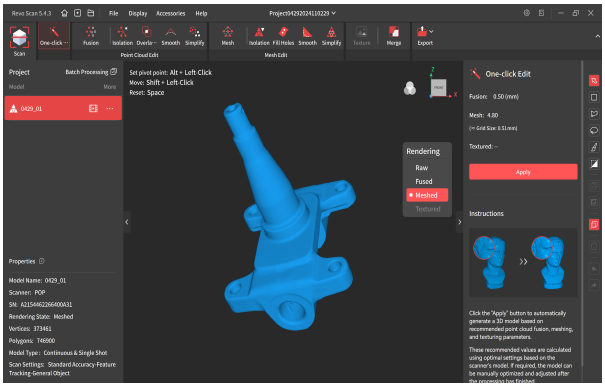


Figura 5.10: Escaneo Figura 001

Es posible ver una comparación de la pieza original e impresa en la figura 5.9, los únicos detalles que el escaneado no detectó fueron los hilos finos correspondientes al muñón en la sección superior

del eje de la pieza.
Son realizadas mediciones de la pieza original y escaneada. Las mediciones adoptadas se mencionan a continuación en la figura 5.11:

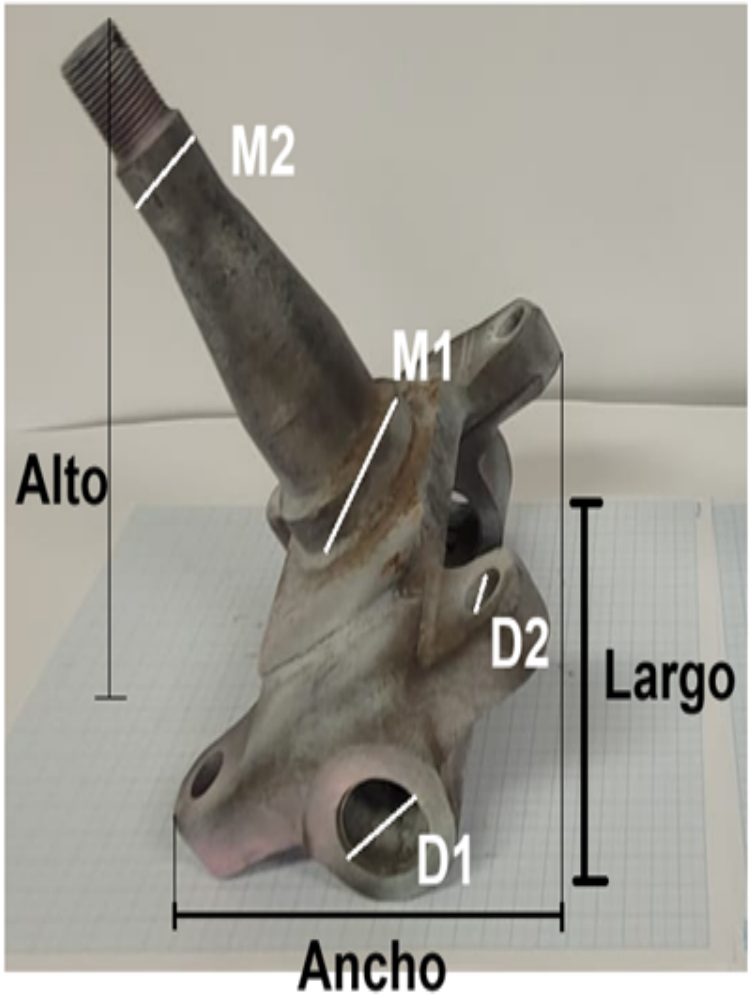


Figura 5.11: Mediciones pieza 001

Utilizando la máquina de mediciones 3D Brown and Sharpe(De ahora en adelante B&S) y un pie de metro para determinar longitudes de las piezas. La tabla 5.1 corresponde a las mediciones realizadas.

101	**Original**		**Impreso**		**Error** $(\frac{s1-s2}{s1})$	**Error** $(\frac{s3-s4}{s3})$	**Error** $(\frac{s1-s3}{s1})$
	B&S s1	**PdM s2**	**B&S s3**	**PdM s4**			
Largo	172.996		172.5501	173	100.00%	-0.26%	0.26%
Ancho	150.5598	151.08	150.3284	150.77	-0.35%	-0.29%	0.15%
Alto	226.2417		226.1373	228	100.00%	-0.82%	0.05%
D1	28.8812	28.75	28.8622	28.89	0.45%	-0.10%	0.07%
D2	14.2555	14.17	13.7826	13.7	0.60%	0.60%	3.32%
M1	56.624	57.17	57.1031	57.19	-0.96%	-0.15%	-0.85%
M2	26.349	26.93	26.4058	26.64	-2.21%	-0.89%	-0.22%

Tabla 5.1: Tabla de medidas Figura 1

Según los resultados en la medición de principales cotas de la figura: El largo, ancho y alto, entre la medida original e impresa usando la máquina de medición, presentan una desviación mínima con un error menor a un 0.5 %. Por otra parte el diámetro del agujero mayor presenta una desviación de 0.07 % y el menor un 3.3 %. Este error puede deberse a que los agujeros son pequeños con una profundidad considerable, lo que puede afectar la precisión del escaneado. Por último las medidas del diametro del eje presentan una desviación menor a 0.9 %.
Se concluye que el scanner escanea con alta fidelidad esta figura manteniendo su forma. Una de las razones de este buen resultado tiene que ver con la una suficiente cantidad de detalles de la figura, lo que permite al scanner detectar con precisión cada región de la superficie, además del uso de Spray 3D que mejoró enormemente la calidad de la detección.

5.2 Figura 2: Figura de Impresión del Scanner

Corresponde escanear la figura de muestra que incluye el Scanner Revopoint 3D. Contempla detalles finos como formas de pelo, ojos y nariz de la figura y son interesantes de verificar que sean captadas adecuadamente por el scanner. El color completamente blanco de la figura permite prescindir del Spray 3D.



Figura 5.12: Vista frontal 002



Figura 5.13: Vista lateral 002

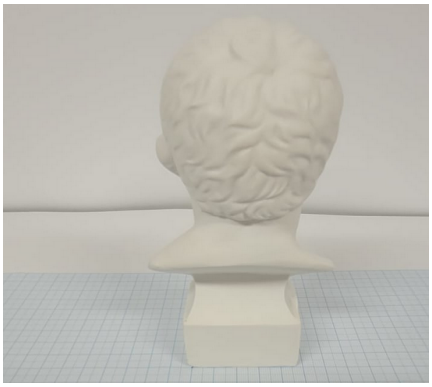


Figura 5.14: Vista trasera 002

En las figuras 5.12,5.13 y 5.12 es posible distinguir distintas vistas del objeto. La etapa de preparación contempla lo siguiente

- Uso de plataforma giratoria, debido a las dimensiones reducidas de la figura.
- Condiciones de iluminación estándar.
- No se aplican marcadores, ya que el objeto presenta la suficiente cantidad de detalles que son captados sin obstáculos por el Scanner

En la siguiente etapa de escaneado, se toman en cuenta las siguientes características:

- Modo de escaneo: Feature, ya que la figura cuenta con suficiente cantidad de detalles. Podría usarse tambien el modo marker y aprovechar los marcadores que tiene la plataforma giratoria, sin embargo esto presentaría que una de las vistas (base) no sea escaneada requiriendo esfuerzo adicional para integrarla.
- Ajustes de cámara automáticos y Zoom x1.
- La figura se escanea parada sobre la base, luego se realiza un giro en 90 grados posando sobre la superficie, de esta manera se consigue escanear la totalidad de la figura.

En la tercera etapa correspondiente al Mesh, el software Revo Scan 5 entrega una malla que no requiere uso de técnicas correspondiente al post-procesado más que la limpieza con selección rectangular(descrito en la sección de técnicas). Los resultados en la etapa de impresión pueden ser observados en las figuras 5.15, 5.16 y 5.17:



Figura 5.15: Vista frontal I. 002

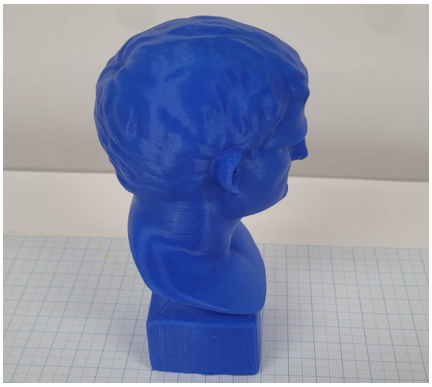


Figura 5.16: Vista lateral I. 002



Figura 5.17: Vista trasera 002

Los resultados obtenidos, con un tiempo de impresión de 8 horas en calidad estándar utilizando Ultimaker Cura, presentan extremada fidelidad respecto a la pieza original, ya que es posible notar

claramente detalles como el cabello, nariz, ojos y boca. No fue requerido el uso de soporte en la figura.



Figura 5.18: Comparación pieza 002

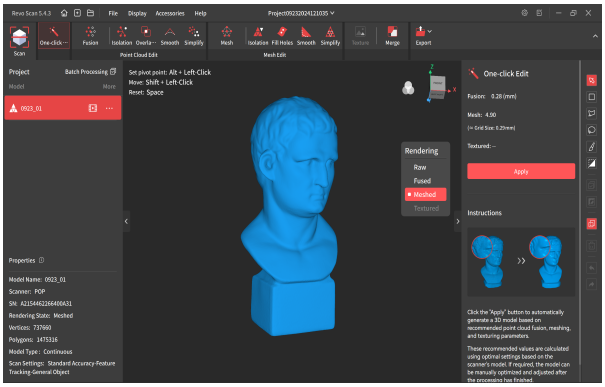


Figura 5.19: Escaneo Figura 002

En la figura 5.18 es posible notar la figura original e impresa lado a lado. Las proporciones sobre dimensiones a primera vista parecen coincidir y los detalles se encuentran bien definidos.



Figura 5.20: Pieza 002 original e impresa

Realizando mediciones con la máquina de mediciones B & S y pie de metro electrónico, se recopilan principales medidas de la figura 5.20 en la tabla 5.2:

104	**Original**		**Impreso**		**Error** $(\frac{s1-s2}{s1})$	**Error** $(\frac{s3-s4}{s3})$	**Error** $(\frac{s1-s3}{s1})$
	B&S s1	**PdM s2**	**B&S s3**	**PdM s4**			
Largo	71.1999	72.42	70.6704	72.24	-1.71%	-2.22%	0.74%
Ancho	39.0464	39.94	38.5447	39.36	-2.29%	-2.12%	1.28%
Alto	144.0758	143.35	144.2404	144.09	0.50%	0.10%	-0.11%

Tabla 5.2: Tabla de medidas Figura 2

Comparando la medición entre la pieza original e impresa utilizando la máquina de medición B & S, es posible notar que para el largo, ancho y alto el error es menor a 1.3 % . Este resultado confirma que el proceso de escaneo ha capturado con precisión detalles geométricos de la pieza

y garantiza que las diferencias entre la pieza original y la impresa son mínimas y aceptables. Es considerado aceptable el resultado y de alta fidelidad.

5.3 Figura 3: Figura geométrica simple

Para la Figura 3, se escanea un componente metálico de características geométricas simples con un agujero al centro. Debido a que es metálico, la detección del objeto será más complicada por lo que es necesario el uso de Spray 3D.

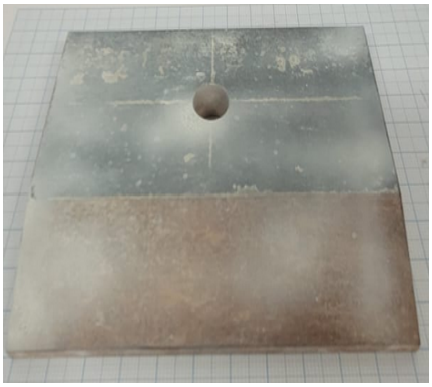


Figura 5.21: Vista frontal 003

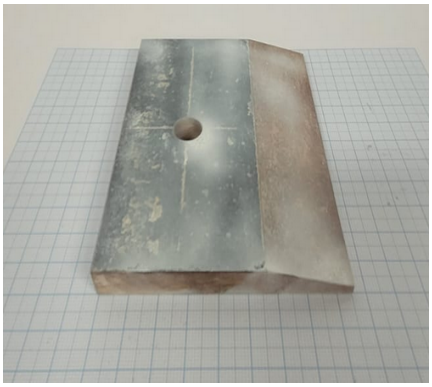


Figura 5.22: Vista lateral 003

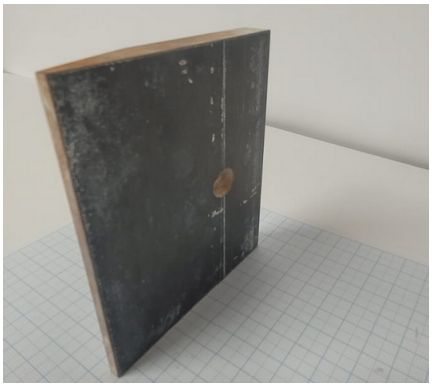


Figura 5.23: Vista trasera 003

En la figura 5.21, 5.22 y 5.23 se distinguen diferentes vistas del objeto. La etapa de preparación contempla:

- Uso de plataforma giratoria.
- Condiciones de iluminación estándar.
- Uso de Spray 3D sobre la superficie de la figura, lo que mejora notablemente la detección de la figura.
- No se utilizan marcadores.

Luego, en la etapa de escaneado, se utilizan las siguientes funciones:

- Modo de escaneo: Marker Mode. La figura es simétrica y tiene pocos detalles, lo que dificulta la detección de 'features'.
- Ajustes de cámara manuales para mejorar detección y zoom x1, x1.5 y x2 en la zona del agujero y esquinas.

- Dado que el objeto cuenta con poca cantidad de detalles, es necesaria el escaneo de 2 figuras y luego fusionarlas con la herramienta del programa Revo Scan 5.

En la etapa correspondiente al Mesh, se realizan las siguientes funciones:

- Limpieza de vértices que no corresponden a la malla mediante selección rectangular y remoción utilizando la tecla 'supr'.
- Modificación booleana de la figura en Blender debido a que: (1) No es captada toda la profundidad del agujero y (2) la superficie presenta una esquina no fue detectada correctamente. Es realizado un agujero ocupando un cilindro auxiliar(Substract Boolean) en la región del agujero para completar la profundidad. Análogamente se utiliza un cubo auxiliar(Union Boolean) para corregir parte de la esquina que no fue detectada correctamente. La realización de estos procedimientos son mencionadas en la sección de métodos y técnicas.
- Cierre de agujeros utilizando el software Meshlab.

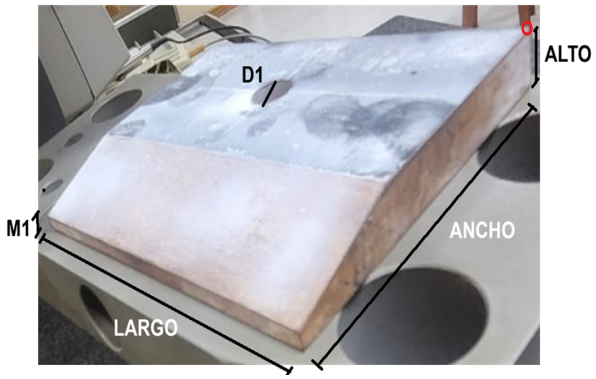


Figura 5.24: Medidas Pieza 003

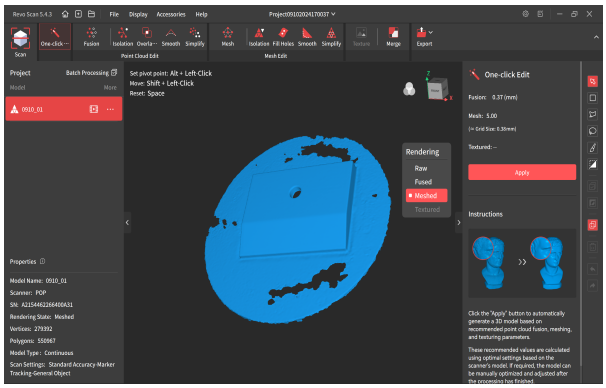


Figura 5.25: Mesh Pieza 003

Los resultados en la etapa de impresión pueden ser observados en las figuras 5.26, 5.27 y 5.28:

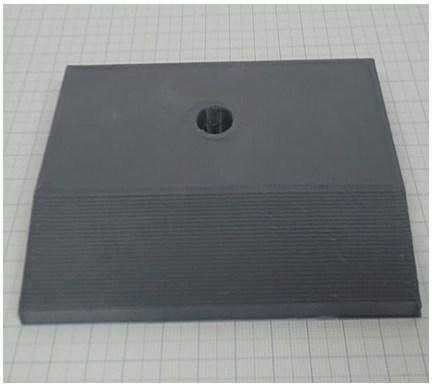


Figura 5.26: Vista frontal I. 003

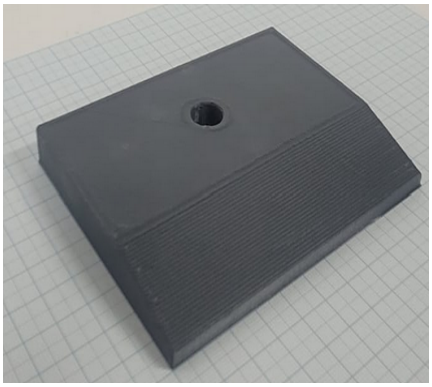


Figura 5.27: Vista lateral I. 003

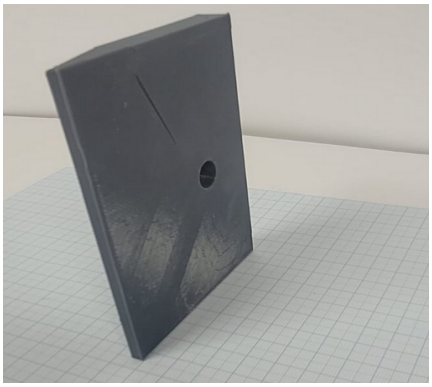


Figura 5.28: Vista trasera 003

Los resultados obtenidos, con un tiempo de impresión de 3 horas en calidad estándar utilizando Ultimaker Cura, presentan fidelidad respecto a la pieza original. La pieza impresa presenta relieve en forma de lineas horizontales en la zona con pendiente pronunciada. Estas lineas corresponden a la impresión 3D y no afectan a la estética de la pieza. Tambien es posible notar una especie de prisma rectangular en la esquina lateral derecha de la pieza, debido a la inclusión de un prisma rectangular en la etapa de procesamiento sobre la pieza para corregir dicha zona que no habia sido detectada correctamente. Las figuras 5.29 y 5.29 muestran ambas figuras lado a lado, donde se puede apreciar alta fidelidad en tamaño y detalles.

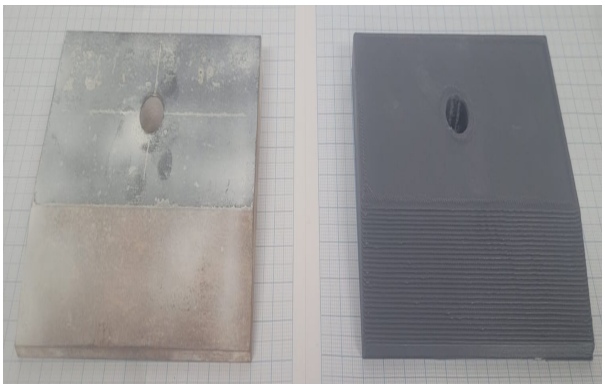


Figura 5.29: Vista frontal I. 003

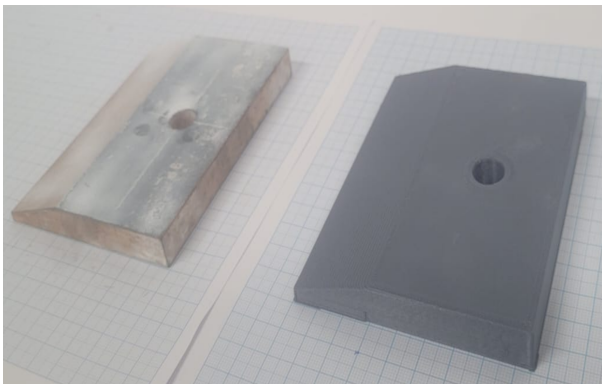


Figura 5.30: Vista lateral I. 003

Respecto a medidas de la pieza original e impresa(Figura 5.24), la tabla 5.3 muestra los resultados:

103	**Original**		**Impreso**		**Error** $(\frac{s1-s2}{s1})$	**Error** $(\frac{s3-s4}{s3})$	**Error** $(\frac{s1-s3}{s1})$
	B&S s1	**PdM s2**	**B&S s3**	**PdM s4**			
Largo	112	111.97	111.4406	111.62	-0.03%	-0.16%	0.44%
Ancho	86.0005	85.86	84.958	85.4	0.16%	-0.52%	1.21%
Alto	11.8763	11.55	12.3032	12.5	2.75%	-1.60%	-3.59%
D1	12.0021	11.9	11.5251	11.81	0.85%	-2.47%	3.97%
M1	4.188	4.19	4.3021	4.5	-0.05%	-4.60%	-2.72%

Tabla 5.3: Tabla de medidas Figura 3

Es posible notar que las medidas de largo y ancho presentan un error menor al 2 %, resultado aceptable. Por otra parte la medida de Alto presenta más desviación con un error cercano al 3.5 %. En la evaluación de medidas de la pieza original y escaneada, se observa una desviación cercana al 3.5 % en la altura y diámetro de la pieza, mientras que las mediciones de largo y ancho se mantienen en un margen menor al 2 %. Esta variación puede deberse a factores relacionados con la forma de la figura, simétrica y con poca cantidad de detalles, que dificulta al escáner capturar con precisión la superficie. En la práctica de la realización del escaneado, fue complejo obtener

un resultado aceptable ya que es posible que el Scanner cuente con dificultades para trabajar con piezas simétricas, metálicas y con poca cantidad de detalles. Fue mitigado parte de estos detalles al escoger un modo de escaneo adecuado(Marker mode) y Spray 3D. Otra de las razones que puede explicar por qué existe una desviación considerable en la medida de la altura y diámetro del agujero es que (1) fue realizada una fusión de dos escaneos, lo que en en general introduce errores en el escaneado ya que el algoritmo que realiza este proceso se ha observado que no es exacto y (2) El agujero fue completado realizando manualmente una extrusión negativa, pudiendo afectar el resultado al ser realizado manualmente. En general es considerado aceptable el resultado y de alta fidelidad.

5.4 Figura 4: Figura geométrica simple

En la figura 4 se escanea otro componente metálico con agujero al centro, con la particularidad de tener distintas secciones simétricas. Se utiliza Spray 3D para mejorar la detección al ser metálico.

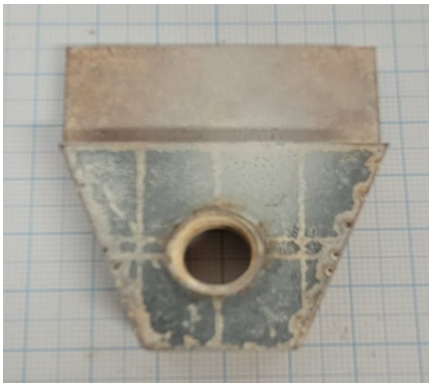


Figura 5.31: Vista frontal 004

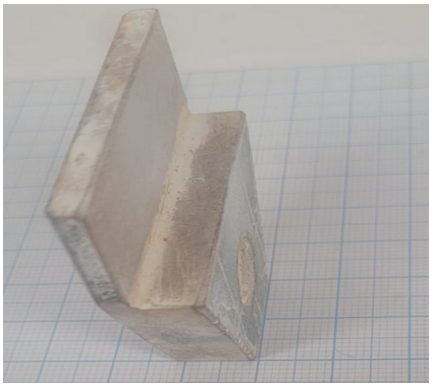


Figura 5.32: Vista lateral 004

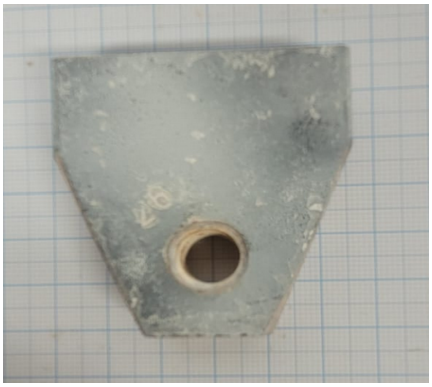


Figura 5.33: Vista trasera 004

En las figuras 5.31, 5.32 y 5.33 se pueden distinguir diversas vistas de la figura. La etapa de preparación contempla:

- Uso de plataforma giratoria
- Condición de iluminación estándar
- Uso de Spray 3D sobre la superficie de la figura. De otra manera la calidad de detección es deficiente al ser la superficie metálica.
- No son utilizados marcadores.

La etapa de escaneado contempla:

- Modo de escaneo: Marker mode.
- Ajustes de cámara manuales y zoom x1, x1.5 y x2 en la región del agujero y esquinas.
- Se realiza un único escaneado, la base del objeto es realizado despues en el post-procesado.

En la etapa correspondiente al mesh, son realizadas las siguientes modificaciones:

- Creación de base mediante el plano detectado de la plataforma giratoria. Utilización de herramientas booleanas en Blender para formar la base de la figura.
- Corrección de esquinas utilizando herramientas boooleanas, cierre de agujeros en la pieza.
- Aplicación de herramienta Fill Holes con parámetro circular en el programa Revo Scan 5(revisar figura 5.35).

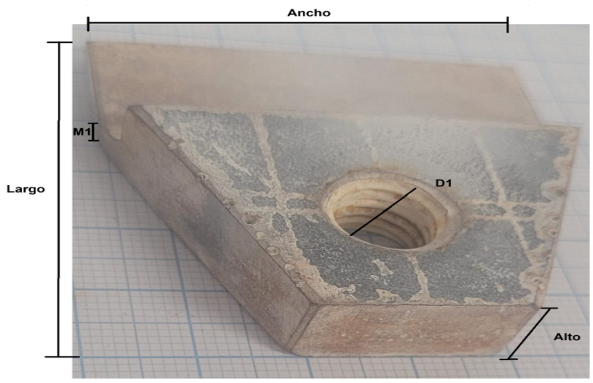


Figura 5.34: Medidas Pieza 004

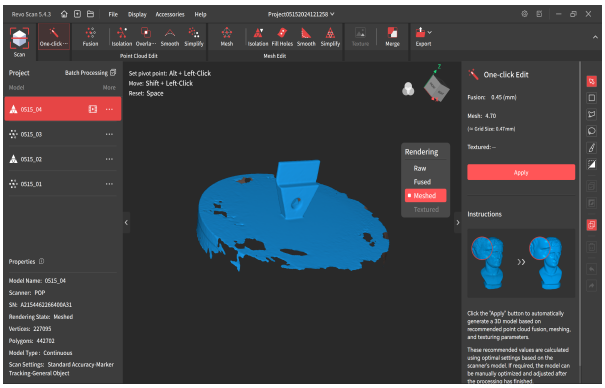


Figura 5.35: Escaneo pieza 004

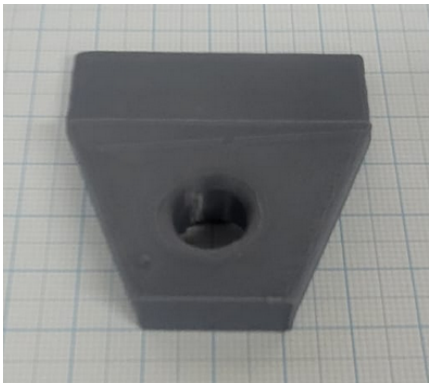


Figura 5.36: Vista frontal I. 004

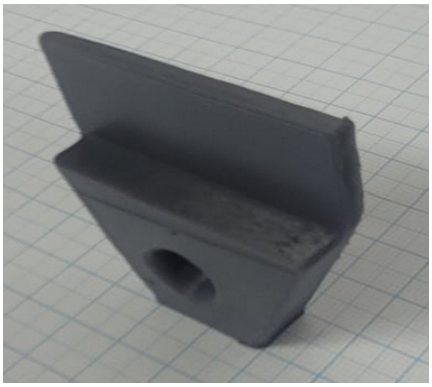


Figura 5.37: Vista lateral I. 004

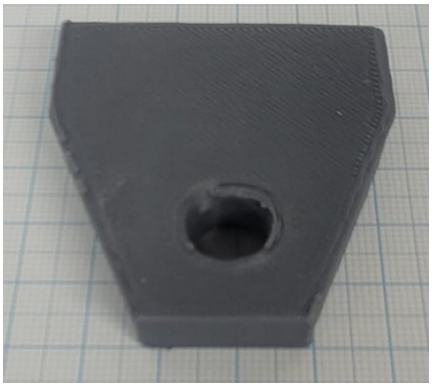


Figura 5.38: Vista trasera 004

Los resultados obtenidos, con un tiempo de impresión de 5 horas en calidad estándar usando Ultimaker cura, persentan fidelidad respecto a la pieza original. Considerando el estado deteriorado de la pieza original, se considera que el escanner replica con precisión la forma, viendolo

visualmente. Las figuras 5.39 y 5.39 muestran distintas vistas de ambas figuras una al lado de otra.

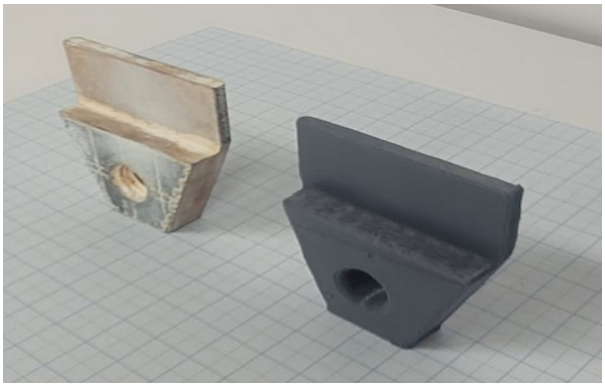


Figura 5.39: Pieza 004 I. y O.

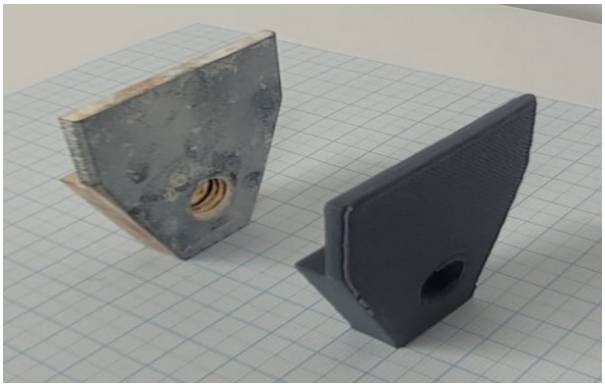


Figura 5.40: Pieza 004 I. y O.

Respecto a mediciones realizadas sobre ambas piezas, la tabla **??** muestra los resultados.

104	**Original**		**Impreso**		**Error** $(\frac{s1-s2}{s1})$	**Error** $(\frac{s3-s4}{s3})$	**Error** $(\frac{s1-s3}{s1})$
	B&S s1	**PdM s2**	**B&S s3**	**PdM s4**			
Largo	49.7744	49.83	49.3485	49.3	-0.11%	0.10%	0.86%
Ancho	53.0406	53.43	52.373	52.56	-0.73%	-0.36%	1.26%
Alto	11.7169	11.71	11.3403	11.37	0.06%	-0.26%	3.21%
D1	10.3131	10.04	9.8833	9.96	2.65%	-0.78%	4.17%
M1	4.2029	4.21	3.9203	3.91	-0.17%	0.26%	6.72%

Tabla 5.4: Tabla de medidas Figura 4

Es posible notar que en este caso ocurre una situación similar a la de la figura 3, donde el largo y el ancho tienen una medida similar, con una desviación menor al 1.3 % y el alto una desviación cercana a 3.5 %. Es posible que sea debido a que la forma de la figura es simétrica y tiene poca cantidad de detalles, lo que dificulta al scanner capturar con precisión la superficie. La razón anterior tambien puede explicar la desviación del diametro con un 7 % de la figura original, considerando tambien la aplicación de la herramienta de substracción booleana para realizar el agujero. la altura menor M1 presenta una variación de 6.7 %, esto es posible ya que al ser tan pequeña la medida (4mm) considerando que la posición del scanner se encuentra sobre este, pudo no captarlo de forma tan precisa. Se considera aceptable el resultado.

5.5 Figura 5: Llave industrial

En la figurar 5 se escanea un llave industrial mecánica, con una sección de orificio con forma de estrella y en el otro extremo un agujero.



Figura 5.41: Vista frontal 005



Figura 5.42: Vista lateral 005



Figura 5.43: Vista trasera 005

Se pueden distinguir distintas vistas del objeto en la figura 5.41, 5.42 y 5.43. La etapa de preparación contempla:

- Uso de plataforma giratoria, dada las dimensiones reducidas de la pieza.
- Condiciones de iluminación estándar.
- Uso de Spray 3D sobre la superficie de la figura.
- No se utilizan marcadores.

Para la etapa de escaneado, se contempla lo siguiente:

- Modo de escaneo: Feature.
- Ajustes de cámara manuales y zoom x1,x1.5 y x2 en secciones de agujeros.
- Sólo requiere de un escaneo.

En la etapa correspondiente al Mesh, se realizan las siguientes funciones:

- Limpieza de vértices no correspondientes mediante selección rectangular y herramienta de remoción en Revo Scan 5.

En general, la figura tiene la suficiente cantidad de detalles para ser captada correctamente, por lo que el único post-procesado que requiere es limpiar los vértices que quedaron del escaneado. Los resultados en la etapa de impresión pueden ser observados en las figuras 5.46 y 5.47

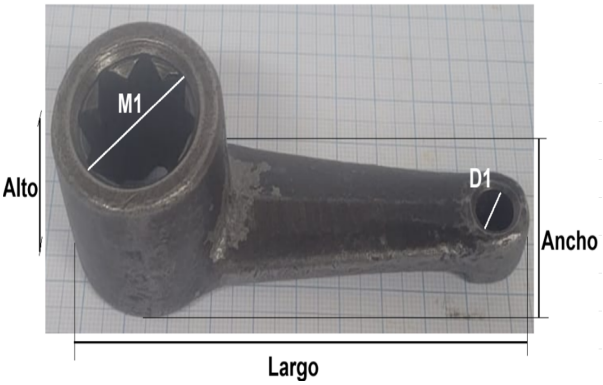


Figura 5.44: Comparación pieza 005

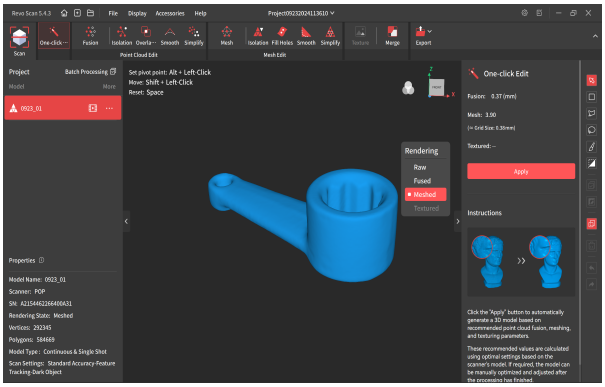


Figura 5.45: Escaneo Figura 005



Figura 5.46: Vista frontal I. 005

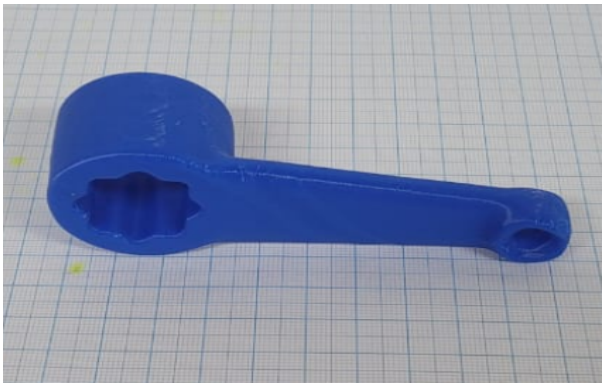


Figura 5.47: Vista lateral I. 005

En la figura 5.45 es posible notar la alta fidelidad con que detecta el Scanner la figura y en general los resultados obtenidos, con un tiempo de impresión de 7 horas en calidad estándar usando ultimaker Cura, presentan fidelidad respecto a la pieza original.

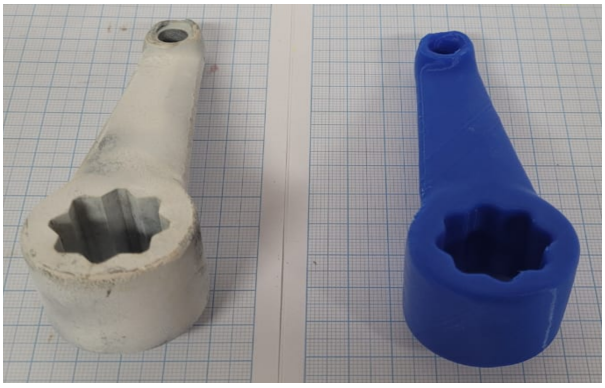


Figura 5.48: Vista frontal I. 005

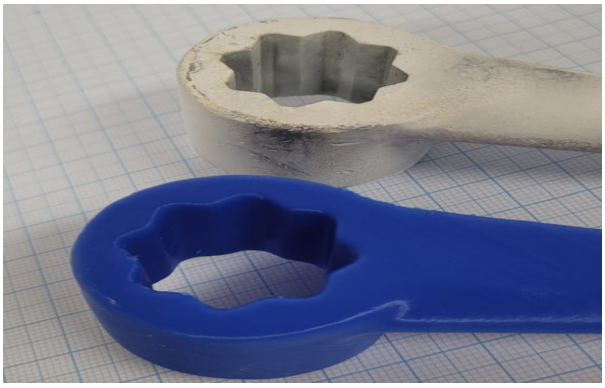


Figura 5.49: Vista lateral I. 005

Es posible notar la alta similitud entre la pieza original e impresa en las figuras 5.48 y 5.49. La tabla 5.5 muestra los resultados de mediciones realizadas entre ambas figuras.

105	**Original**		**Impreso**		**Error** $(\frac{s1-s2}{s1})$	**Error** $(\frac{s3-s4}{s3})$	**Error** $(\frac{s1-s3}{s1})$
	B&S s1	**PdM s2**	**B&S s3**	**PdM s4**			
Largo	106.0766	106.78	105.3014	106.56	-0.66%	-1.20%	0.73%
Ancho	37.2158	37.02	37.2951	37.26	0.53%	0.09%	-0.21%
Alto	37.5479	37.76	33.9645	34.12	-0.56%	-0.46%	9.54%
D1	8.502	8.27	8.0956	7.95	2.73%	1.80%	4.78%
M1	25.183	25.23	24.6924	24.26	-0.19%	1.75%	1.95%

Tabla 5.5: Tabla de medidas Figura 5

Las medidas de largo y ancho entre la figura original e impresa tienen un eror menor al 1 %, resultado aceptable. El diametro D1 presenta una desviación cercana a los 4.8 % y la distancia más larga en la sección cuadrante tiene un error cercano al 1.9 %. Estos resultados son aceptables, sin embargo la medida del alto presenta un error del 9.5 %, valor lejano al obtenido en todas las otras medidas del desarrollo de este trabajo. Se concluye que el Scanner escanea con alta fidelidad la figura manteniendo su forma. El uso de Spray 3D mejoró enormemente la calidad de detección y no fue necesario herramientas de post-procesado más que la limpieza de puntos.

Capítulo 6

Conclusiones y recomendaciones

El estudio realizado sobre el funcionamiento del Scanner tridimensional Revopoint POP 3D revela que para lograr la detección adecuada de las figuras a escanear estas deben presentar alta cantidad de detalles y/ó formas irregulares, como las Figuras escaneadas 1,2 y 5, cuyos resultados señakan que el escáner funciona bien con superficies complejas y no simétricas. En contraste, las figuras con superficies metálicas, simétricas y bajo nivel de detalle, como la 3 y 4, presentaron mayores desafíos debido a la naturaleza reflectante de los metales y la escasez de detalles distintos para el escáner, lo que implicó utilizar Spray 3D para corregir la detección de estas figuras y realizar cirrecciones adicionales en la etapa de post-procesado, especialmente en esquinas y orificios de figuras.

Respecto a los modos de escaneado que presenta el escáner, Feature y Marker. Se observa que el uso de plataforma giratoria y escaneo con el modo de marcadores es altamente recomendable para piezas con tamaño reducido y poco nivel de detalle(menor a 17x17x17 cm), ya que el escáner utiliza de referencia los marcadores que contempla la plataforma giratoria para formar la nube de vértices de la figura.

Para piezas que presentan un mayor nivel de detalle, el modo de escaneo Feature demuestra funcionar correctamente, permitiendo en la mayor parte de los casos, captar la figura completamente en un solo escaneo, lo que redujo la necesidad de pasos adicionales en la etapa de post-procesado.

La precisión alcanzada en las figuras impresas es aceptable, con una desviación menor al 1.5 % en la mayoría de mediciones usando la máquina Brown and Sharpe Microval 454. Sin embargo, en aquellas figuras que requirieron post-procesamiento, como perforación o corrección en la profundidad de los orificios, se observó un mayor margen de error, alcanzando hasta un 4 %. Dado que el objetivo principal en este trabajo es evaluar el funcionamiento del escáner y realizar pruebas, estos resultados son considerados satisfactorios dentro del marco de un análisis experimental. Los márgenes de error observados se alinean con las expectativas para aplicaciones no críticas, manteniendo un rendimiento aceptable en términos de precisión.

Estos resultados confirman que las condiciones ideales para el escáner incluyen figuras con superficies no reflectantes, formas complejas, y detalles abundantes, mientras que superficies metálicas o simétricas requieren tratamientos adicionales para obtener resultados satisfactorios. Por tanto, el escáner funciona mejor en aplicaciones donde las figuras cuentan con deetalles abundantes y formas complejas, su uso en objetos más simples o reflectantes demanda mayor habilidad ó intervención técnica.

Capítulo 7

Anexo

7.1 Mediciones en máquina de medición 3D Brown and Sharpe

A continuación se detalla el procedimiento realizado para realizar las mediciones de las piezas en la máquina Brown and Sharpe Microval 454.
La máquina Microval 454 es equipo de precisión utilizado en el control de calidad industrial que permite realizar mediciones exactas y detalladas de las dimensiones físicas de una pieza mediante coordenadas usando un palpador que se desplaza en tres ojos ortogonales, las especificaciones son las siguientes:

- Marca: Brown and Sharpe .
- Modelo: Microval 454.
- Rango de medición: 457 x 508 x 406 [mm].
- Resolución: 1 [μ m].
- Palpador: Electrónico con punta de rubí.
- Accionamiento: manual.

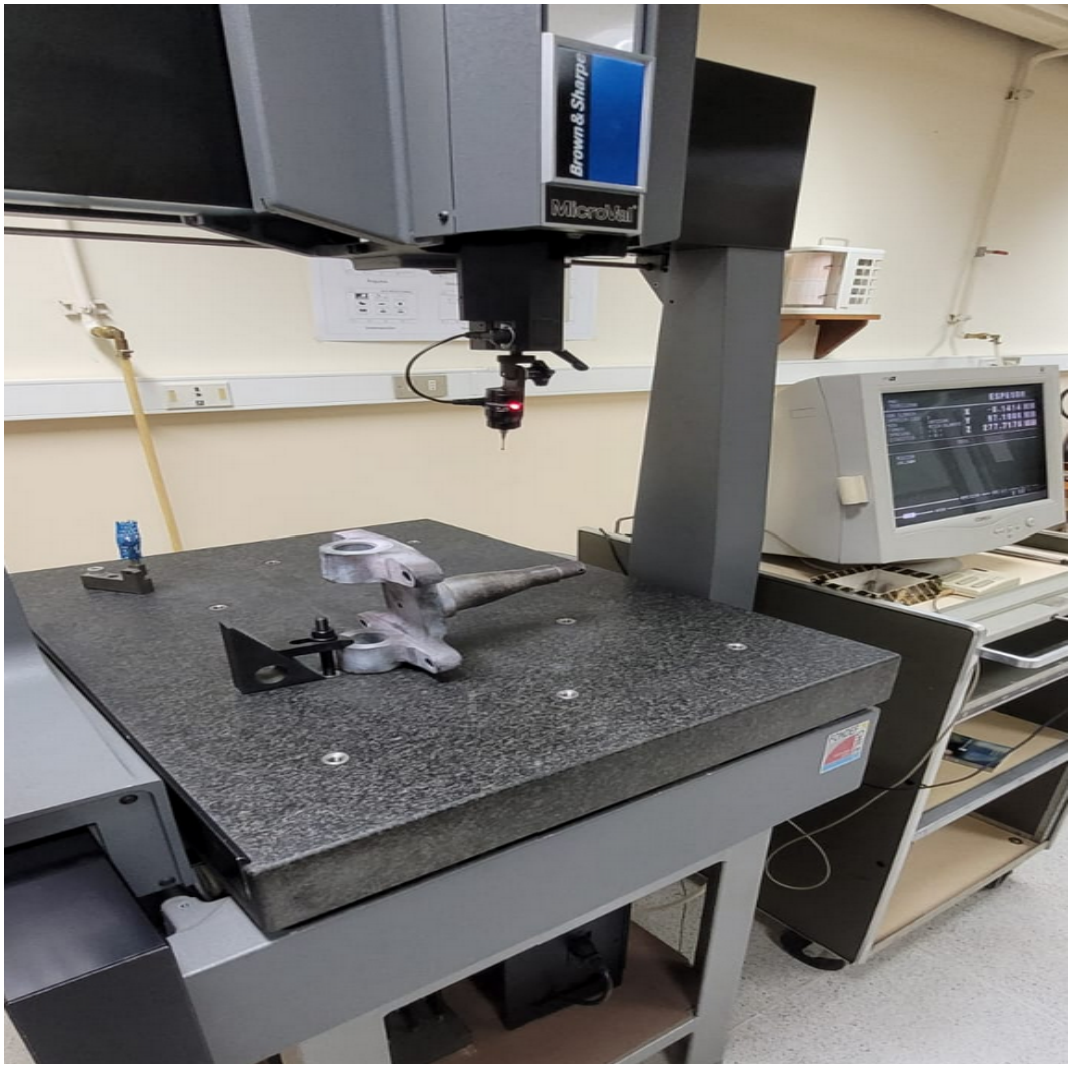


Figura 7.1: Medición con máquina Brown and Sharpe Microval

Para realizar el procedimiento de medición, la primera etapa es afirmar la pieza a la superficie de la máquina utilizando sistemas de fijación específicos que tiene la máquina, como se observa en la figura 7.1.
Posteriormente la máquina necesita realizar una detección de calibrado, realizando una medición sobre de una esfera de 3 centimetros. A continuación se debe fijar el plano de medición y luego se puede comenzar a realizar las mediciones.

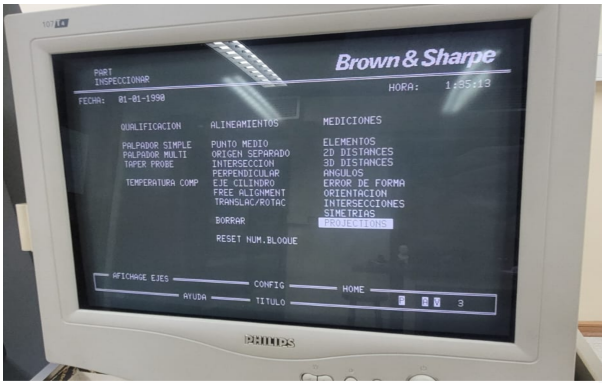


Figura 7.2: Interfaz principal de software de máquina Brown and Sharpe



Figura 7.3: Medición de diametro en el software de máquina Brown and Sharpe

La figura 7.3 muestra las opciones disponibles para realizar alineamientos(plano de medición) y mediciones. Para este trabajo fueron utilizadas las opciones "2d distances" "Ancho" y medición de diámetros de agujero.

Referencias

AutoProtoWay (2024). What is coordinate measuring machine (cmm)? Accessed: 2024-08-20.

Blais, F. (2004). Review of 20 years of range sensor development. *J. Electronic Imaging*, 13:231–243.

Cornejo, I. and Hayes, R. E. (2021). A review of the critical aspects in the multi-scale modelling of structured catalytic reactors. *Catalysts*, 11(1):89.

Cornelius, A., Dvorak, J., Jacobs, L., Penney, J., and Schmitz, T. (2021). Combination of structured light scanning and external fiducials for coordinate system transfer in hybrid manufacturing. *Journal of Manufacturing Processes*, 68:1824–1836.

Granero, L., Diaz, F., Dominguez, R., Hervas Juan, J., Simón, S., and Pérez, E. (2009). Application of optical techniques in documentation and identification of archaeological rests: The case study of the roman bronze rest found in lucentum. *Proceedings of SPIE - The International Society for Optical Engineering*, 7391.

Haleem, A., Javaid, M., Singh, R. P., Rab, S., Suman, R., Kumar, L., and Khan, I. H. (2022). Exploring the potential of 3d scanning in industry 4.0: An overview. *International Journal of Cognitive Computing in Engineering*, 3:161–171.

Luhmann, T., Robson, S., Kyle, S., and Boehm, J. (2013). *Close Range Photogrammetry and 3D Imaging*.

Revopoint 3D Technologies (2022). *Revopoint POP 3D Scanner User Manual*. Accessed: 2024-08-27.

Salvi, J., Fernandez, S., Pribanic, T., and Llado, X. (2010). A state of the art in structured light patterns for surface profilometry. *Pattern Recognition*, 43(8):2666–2680.

Savio, E. (2018). *Coordinate Measuring Machine*, pages 1–6. Springer Berlin Heidelberg, Berlin, Heidelberg.

Shining3D (2022). Handheld 3d scanner light sources: laser lines vs structured light vs infrared.

The Haskins Society (2024). 3d photogrammetry with photoscan. Accessed: 2024-08-20.