



**UNIVERSIDAD TÉCNICA DEL NORTE  
FACULTAD DE INGENIERÍA EN CIENCIAS APLICADAS  
INGENIERÍA AUTOMOTRIZ**

**TRABAJO DE INTEGRACIÓN CURRICULAR**

**TEMA:**

**“EXPLORAR EL USO DE DIGITALIZACIÓN 3D PARA LA  
RECONSTRUCCIÓN Y REPLICACIÓN DE PIEZAS DE VEHÍCULOS  
CLÁSICOS”**

**Trabajo de titulación previo a la obtención del título de:  
Ingeniería Automotriz**

**Línea de investigación:**

Producción Industrial y Tecnología Sostenible

**AUTOR:**

Jose Modesto Pillajo Cordova

**DIRECTOR:**

Ing. Luis Andrés Garzon Perez PhD.

**(2026)**



# UNIVERSIDAD TÉCNICA DEL NORTE

## BIBLIOTECA UNIVERSITARIA

### AUTORIZACIÓN DE USO Y PUBLICACIÓN

#### A FAVOR DE LA UNIVERSIDAD TÉCNICA DEL NORTE

#### 1. IDENTIFICACIÓN DE LA OBRA

En cumplimiento del Art. 144 de la Ley de Educación Superior, hago la entrega del presente trabajo a la Universidad Técnica del Norte para que sea publicado en el Repositorio Digital Institucional, para lo cual pongo a disposición la siguiente información:

DATOS DE CONTACTO	
<b>APELLIDOS Y NOMBRES:</b>	Pillajo Cordova Jose Modesto

DATOS DE LA OBRA	
<b>TÍTULO:</b>	Explorar el uso de digitalización 3D para la reconstrucción y replicación de piezas de vehículos clásicos.
<b>AUTOR (ES):</b>	Pillajo Cordova Jose Modesto
<b>FECHA: DD/MM/AAAA</b>	29/04/2026
SOLO PARA TRABAJOS DE GRADO	
<b>PROGRAMA:</b>	<input checked="" type="checkbox"/> <b>PREGRADO</b> <input type="checkbox"/> <b>POSGRADO</b>
<b>TITULO POR EL QUE OPTA:</b>	Ingeniería Automotriz
<b>ASESOR /DIRECTOR:</b>	Ing. Luis Andrés Garzon Perez PhD.

## **2. CONSTANCIAS**

El autor (es) manifiesta (n) que la obra objeto de la presente autorización es original y se la desarrolló, sin violar derechos de autor de terceros, por lo tanto, la obra es original y que es (son) el (los) titular (es) de los derechos patrimoniales, por lo que asume (n) la responsabilidad sobre el contenido de la misma y saldrá (n) en defensa de la Universidad en caso de reclamación por parte de terceros.

Ibarra, a los 29 días del mes de abril de 2026.

### **EL AUTOR:**

(f) .....

Pillajo Cordova Jose Modesto

# **CERTIFICACIÓN DEL DIRECTOR DEL TRABAJO DE INTEGRACIÓN CURRICULAR**

Ibarra, 28 de Abril de 2026

Luis Andrés Garzon Perez, PhD

DIRECTOR DEL TRABAJO DE INTEGRACIÓN CURRICULAR

CERTIFICA:

Haber revisado el presente informe final del trabajo de Integración Curricular, el mismo que se ajusta a las normas vigentes de la Universidad Técnica del Norte; en consecuencia, autorizo su presentación para los fines legales pertinentes.

(f) .....

PhD. Luis Andrés Garzon Perez.

C.C.: 1002640454

## **APROBACIÓN DEL COMITÉ CALIFICADOR**

El Comité Calificado del trabajo de Integración Curricular “EXPLORAR EL USO DE DIGITALIZACIÓN 3D PARA LA RECONSTRUCCIÓN Y REPLICACIÓN DE PIEZAS DE VEHÍCULOS CLÁSICOS” elaborado por Jose Modesto Pillajo Cordova, previo a la obtención del título del titulo de Ingeniero Automotriz, aprueba el presente informe de investigación en nombre de la Universidad Técnica del Norte:

(f):.....

PhD. Luis Andrés Garzon Perez.

C.C.: 1002640454

(f):.....

MSc. Erik Paul Hernandez Rueda.

C.C.: 1002978060

## **DEDICATORIA**

Dedico la culminación de mis estudios a mi madre, mujer la cual inculco en mi el amor hacia el aprendizaje. Asimismo, a mi padre, al hombre que nunca dejo que en nuestro hogar falte un plato de comida. De manera especial este proyecto está dedicado a mi novia, “mis logros son los logros de ella”. Finalmente, dedico todo este esfuerzo a mi familia, tengo la esperanza de ser el orgullo de nuestro apellido.

## **AGRADECIMIENTO**

En primera instancia, extiendo un profundo agradecimiento a la persona que más amo, a mi madre, que, aunque no se encuentre en este plano terrenal, cada logro y cada triunfo son en honor a ella, “te dije que lo lograría”. A mi padre y mis hermanos, gracias por ser el motor de mi vida, los quiero.

De la misma forma, agradezco a la Universidad Técnica del Norte, por abrirme las puertas y brindarme una educación de calidad, espero dejar en alto el nombre de la institución.

Finalmente, quiero agradecer al Ing. Luis Andrés Garzon Perez PhD., que además de ser el tutor de mi investigación, también fue el docente que me enseñó que “antes de ser profesional, primero se debe ser humano”. Y al Ing. Erik Paul Hernandez Rueda MSc., gracias por confiar en mi y por su valioso tiempo.

## RESUMEN EJECUTIVO

En el contexto actual, la disponibilidad de refacciones en el mercado para vehículos clásicos representa un problema, debido a la discontinuidad en la producción de este tipo de maquinas; por estas razones la adopción de métodos de digitalización 3D y la fabricación aditiva surgen como alternativas para contrarrestar dichas dificultades.

La presente investigación tiene como objetivo explorar el uso de la digitalización 3D para la reconstrucción y replicación de piezas de vehículos clásicos. En este sentido, mediante el desarrollo de un marco teórico se realizo la selección de tres piezas interiores de un vehículo clásico: una manija de puerta, un elevador de vidrios y una carcasa exterior del deposito de agua de los parabrisas. Cada componente fue digitalizado a partir del uso de un escáner 3D de luz estructurada, posteriormente los modelos 3D fueron sometidos a dos tipos de pruebas, a un análisis analítico y a un análisis numérico (FEA). Finalmente, los modelos digitales se fabricaron por medio de una impresora 3D de resina (ABS).

Con respecto al análisis analítico y al análisis numérico, se constato que el material empleado puede soportar cargas externas sin experimentar deformaciones permanentes, puesto que los esfuerzos máximos que se obtuvieron no superaron el limite elástico de 50 MPa de la resina ABS. Además, el tiempo de fabricación de cada componente no fue superior a cinco horas y el presupuesto de fabricación no superan los trece dólares. Por estas razones, los resultados que se obtuvieron en el proyecto permitieron concluir que la implementación de métodos de digitalización e impresión 3D, son alternativas fiables para la reconstrucción o replicación de piezas categorizadas como obsoletas.

**Palabras clave:** Fabricación 3D, digitalización 3D, resina tipo ABS, Análisis de Elementos Finitos, límite elástico, factor de seguridad.

## ABSTRACT

In the current context, the availability of spare parts for classic vehicles represents a significant challenge due to the discontinuation of production of these machines. For this reason, the adoption of 3D digitization methods and additive manufacturing emerges as an alternative to overcome these difficulties.

The objective of this research is to explore the use of 3D digitization for the reconstruction and replication of classic vehicle components. Through the development of a theoretical framework, three interior parts of a classic vehicle were selected: a door handle, a window regulator, and the outer housing of the windshield washer reservoir. Each component was digitized using a structured-light 3D scanner. Subsequently, the 3D models were subjected to two types of evaluation: analytical analysis and numerical analysis through Finite Element Analysis (FEA). Finally, the digital models were manufactured using an ABS-type resin 3D printer.

Regarding the analytical and numerical analyses, it was verified that the selected material can withstand external loads without experiencing permanent deformation, since the maximum stresses obtained did not exceed the resin's yield strength of 50 MPa. Furthermore, the manufacturing time for each component did not exceed five hours, and the production cost remained below thirteen dollars. Based on these results, it can be concluded that the implementation of 3D digitization and printing methods constitutes a reliable alternative for the reconstruction or replication of components classified as obsolete.

**Keywords:** 3D manufacturing, 3D digitization, ABS-type resin, Finite Element Analysis, yield strength, safety factor.

## **LISTA DE SIGLAS**

**CAD.** Diseño Asistido por Computadora

**RE.** Ingeniería Inversa

**AM.** Manufactura Aditiva

**STL.** Lenguaje Estándar de Teselación

**FIVA.** Federación Internacional de Vehículos Clásicos

**ANT.** Agencia Nacional de Transito

**UV.** Ultravioleta

**ToF.** Tiempo de Vuelo

**SLA.** Estereolitografía

**SLS.** Sinterizado Selectivo por Laser

**FDM.** Modelad por Deposición Fundida

**LOM.** Fabricación de Objetos Laminados

**PLA.** Ácido Poliláctico

**PET.** Polietileno Tereftalato

**ABS.** Acrilonitrilo Butadieno Estireno

## ÍNDICE DE CONTENIDO

<b>ÍNDICE DE CONTENIDO .....</b>	<b>11</b>
<b>ÍNDICE DE TABLAS.....</b>	<b>17</b>
<b>ÍNDICE DE FIGURAS.....</b>	<b>19</b>
<b>CAPITULO I.....</b>	<b>23</b>
<b>1. INTRODUCCIÓN .....</b>	<b>23</b>
1.1. <i>Problema de investigación.....</i>	23
1.2. <i>Objetivos .....</i>	24
1.2.1. <i>Objetivo general.....</i>	24
1.2.2. <i>Objetivos específicos .....</i>	24
1.3. <i>Alcance.....</i>	24
1.4. <i>Justificación .....</i>	25
<b>CAPITULO II.....</b>	<b>26</b>
<b>2. MARCO TEORICO .....</b>	<b>26</b>
2.1. <i>Antecedentes .....</i>	26
2.2. <i>Vehículos clásicos: Conceptos, regulaciones, requisitos y relevancia.....</i>	29
2.2.1. <i>Definiciones .....</i>	29
2.2.2. <i>Reglamento aplicable a vehículos clásicos .....</i>	30
2.2.3. <i>Requisitos para la certificación: FIVA .....</i>	31
2.2.4. <i>Requisitos: “Reglamento de vehículos automotores clásicos” .....</i>	32
2.2.5. <i>Tendencias actuales .....</i>	33
2.3. <i>Digitalización 3D.....</i>	33

2.4.	<i>Etapas de digitalización e impresión 3D</i> .....	34
2.4.1.	Preparación .....	35
2.4.2.	Recopilación de características .....	37
2.4.3.	Post-procesamiento .....	40
2.5.	<i>Métodos de digitalización 3D sin contacto</i> .....	42
2.5.1.	Fotogrametría.....	42
2.5.2.	Escáner láser .....	44
2.5.3.	Luz estructurada.....	46
2.5.4.	Cámaras de Tiempo de vuelo (ToF) .....	48
2.6.	<i>Fabricación aditiva</i> .....	49
2.7.	<i>Métodos de fabricación aditiva</i> .....	49
2.7.1.	Estereolitografía (SLA).....	50
2.7.2.	Sinterizado selectivo por láser (SLS).....	51
2.7.3.	Modelado por deposición fundida (FDM) .....	52
2.7.4.	Fabricación de objetos laminados (LOM) .....	54
2.8.	<i>Materiales de fabricación aditiva</i> .....	55
2.8.1.	Ácido poli láctico (PLA).....	56
2.8.2.	Polietileno tereftalato (PET) .....	56
2.8.3.	Acrilonitrilo butadieno estireno (ABS).....	56
2.8.4.	Resina.....	57
2.9.	<i>Casos de estudio sobre la aplicación de la digitalización e impresión 3D</i> .....	57
2.9.1.	Aston Martin DBR22.....	58
2.9.2.	Pistones de Porsche 911 GT2 RS.....	58

2.9.3. NERA motocicleta impresa en 3D.....	60
2.10. <i>Técnicas de validación de componentes</i> .....	60
2.10.1. Validación dimensional .....	61
2.10.2. Validación mecánica.....	62
2.10.3. Validación superficial o estética .....	63
2.11. <i>Importancia del control de calidad</i> .....	64
<b>CAPITULO III</b> .....	<b>65</b>
<b>3. METODOLOGÍA</b> .....	<b>65</b>
3.1. <i>Caracterización del vehículo y selección de piezas</i> .....	66
3.1.1. Ford LTD wagon (1975).....	66
3.1.2. Selección de las piezas de estudio .....	66
3.1.3. Evaluación cualitativa de las piezas seleccionadas.....	69
3.2. <i>Definición de variables de estudio</i> .....	73
3.2.1. Variables independientes .....	74
3.2.2. Variables dependientes .....	74
3.2.3. Variables de control .....	74
3.3. <i>Selección de herramientas y tecnología</i> .....	75
3.3.1. Escáner 3D.....	75
3.3.2. Impresora 3D .....	77
3.3.3. Programa de digitalización 3D.....	78
3.3.4. Programa de procesamiento de malla .....	79
3.3.5. Programa CAD de simulación .....	80
3.3.6. Programa de laminado. ....	80

3.3.7.	Material de impresión: resina ABS.....	81
3.4.	<i>Recopilación de datos de las piezas seleccionadas</i> .....	82
3.4.1.	Preparación de la pieza de estudio .....	83
3.4.2.	Proceso de escaneo de la pieza .....	85
3.4.3.	Procesamiento y optimización de la nube de puntos y malla .....	87
3.5.	<i>Post-procesamiento de la información 3D</i> .....	91
3.5.1.	Exportación del archivo STL a un programa CAD .....	92
3.5.2.	Selección de parámetros de simulación .....	92
3.5.3.	Obtención de resultados .....	93
3.6.	<i>Impresión de las partes escaneadas</i> .....	94
3.6.1.	Exportación del archivo STL a un software de laminado.....	95
3.6.2.	Procesamiento del modelo digital.....	95
3.6.3.	Impresión de la pieza .....	96
3.7.	<i>Validación dimensional, estética y funcional de las piezas impresas</i> .....	96
3.8.	<i>Desarrollo de un catálogo técnico y detallado de cada pieza.</i> .....	97
<b>CAPITULO IV</b> .....		<b>99</b>
<b>4.</b>	<b>ANALISIS Y RESULTADOS</b> .....	<b>99</b>
4.1.	<i>Preparación del entorno y del escáner</i> .....	99
4.2.	<i>Digitalización de la manija de la puerta, Ford LTD wagon 1975</i> .....	100
4.2.1.	Configuración y escaneo de la pieza - manija .....	100
4.2.2.	Edición de la nube de puntos - manija .....	101
4.2.3.	Construcción y edición de malla -manija.....	102
4.2.4.	Resultados: Nube de puntos y malla (manija). .....	103

4.2.5.	Análisis analítico y numérico – manija.....	103
4.2.6.	Análisis analítico VS análisis numérico - Manija.....	110
4.3.	<i>Digitalización del elevador de vidrios, Ford LTD wagon 1975.....</i>	<i>111</i>
4.3.1.	Configuración y escaneo de la pieza – elevador de vidrio.....	111
4.3.2.	Edición de la nube de puntos – Elevador de vidrios.....	112
4.3.3.	Construcción y edición de malla – elevador de vidrios.....	113
4.3.4.	Resultados: nube de puntos y malla (elevador de vidrio).....	114
4.3.5.	Análisis analítico y numérico, elevador de vidrios.....	115
4.3.6.	Análisis analítico VS análisis numérico – elevador de vidrios.....	123
4.4.	<i>Digitalización de la carcasa del tanque de agua, Ford LTD wagon 1975.....</i>	<i>124</i>
4.4.1.	Configuración y escaneo de la pieza – carcasa del tanque de agua.....	125
4.4.2.	Edición de la nube de puntos – carcasa del tanque de agua.....	125
4.4.3.	Construcción y edición de malla – carcasa del tanque de agua.....	126
4.4.4.	Resultados: nube de puntos y malla (carcasa del tanque de agua).....	127
4.4.5.	Análisis analítico y numérico, carcasa del tanque de agua.....	127
4.4.6.	Análisis analítico VS análisis numérico – carcasa del tanque de agua.....	133
4.5.	<i>Fabricación aditiva de las piezas de estudio.....</i>	<i>133</i>
4.6.	<i>Validación estética, dimensional y funcional de las piezas impresas.....</i>	<i>136</i>
4.7.	<i>Comparación: piezas originales VS piezas impresas.....</i>	<i>139</i>
4.8.	<i>Catálogo de cada pieza.....</i>	<i>141</i>
4.9.	<i>Presupuesto de fabricación.....</i>	<i>143</i>
<b>CAPITULO V.....</b>		<b>144</b>
<b>5.</b>	<b>CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES.....</b>	<b>144</b>

5.1. *Conclusiones*..... 144

5.2. *Recomendaciones*..... 145

**REFERENCIAS**..... **146**

## ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1. <i>Lista de materiales empleados para la fabricación 3D de autopartes.</i> .....	57
Tabla 2. <i>Matriz de evaluación cualitativa para la selección de piezas de estudio.</i> .....	67
Tabla 3. <i>Escala de aceptación para la selección de las piezas.</i> .....	68
Tabla 4. <i>Calificación cualitativa para la selección de la tapa del motor de arranque.</i> .....	70
Tabla 5. <i>Matriz de calificación, manija de la puerta Ford LTD wagon 1975.</i> .....	71
Tabla 6. <i>Evaluación cualitativa, elevador de vidrios.</i> .....	72
Tabla 7. <i>Evaluación cualitativa, carcasa del tanque de agua.</i> .....	73
Tabla 8. <i>Clasificación de variables</i> .....	75
Tabla 9. <i>Especificaciones técnicas del dispositivo Revopoint MIRACO Pro 3D Scanner.</i> .....	76
Tabla 10. <i>Especificaciones técnicas Elegoo Saturn 2.</i> .....	78
Tabla 11. <i>Requisitos computacionales.</i> .....	79
Tabla 12. <i>Propiedades técnicas de la Resina ABS</i> .....	82
Tabla 13. <i>Especificaciones de diseño Resina ABS.</i> .....	82
Tabla 14. <i>Parámetros previos a la digitalización de la pieza de estudio.</i> .....	86
Tabla 15. <i>Parámetros de edición de la nube de puntos generada por el escáner.</i> .....	89
Tabla 16. <i>Ajustes de edición y reconstrucción de malla.</i> .....	90
Tabla 17. <i>Ejemplo de matriz para el desarrollo del catalogo de las piezas.</i> .....	98
Tabla 18 <i>Parámetros de configuración del escáner.</i> .....	101
Tabla 19. <i>Configuración para la edición de nube de puntos.</i> .....	101
Tabla 20. <i>Parámetros de edición y reconstrucción de malla, manija.</i> .....	102
Tabla 21. <i>Resultados de edición y reconstrucción de malla, manija.</i> .....	103
Tabla 22. <i>Análisis analítico VS análisis numérico - Manija</i> .....	110

Tabla 23. <i>Parámetros de digitalización, elevador de vidrio.</i> .....	112
Tabla 24. <i>Parámetros de escaneo y tiempo invertido por toma.</i> .....	113
Tabla 25. <i>Parámetros de edición y reconstrucción de malla, Elevavidrio.</i> .....	113
Tabla 26. <i>Resultados, elevador de vidrio.</i> .....	114
Tabla 27. <i>Comparación análisis manual vs numérico, elevador de vidrio.</i> .....	124
Tabla 28. <i>Parámetros de digitalización, carcasa del tanque de agua.</i> .....	125
Tabla 29. <i>Criterios de edición de nube de puntos, carcasa tanque de agua.</i> .....	126
Tabla 30. <i>Parámetros de edición y reconstrucción de malla, carcasa tanque de agua.</i> .....	126
Tabla 31. <i>Resultados, carcasa del tanque de agua.</i> .....	127
Tabla 32. <i>Resultados del calculo manual y numérico, carcasa.</i> .....	133
Tabla 33. <i>Resultados de impresión por cada pieza.</i> .....	135
Tabla 34. <i>Comparación de la manija de puerta, Ford LTD 1975.</i> .....	140
Tabla 35. <i>Comparación elevador de vidrios, Ford LTD 1975.</i> .....	140
Tabla 36. <i>Comparación de la carcasa, Ford LTD 1975.</i> .....	141
Tabla 37. <i>Catalogo de las piezas escaneadas e impresas.</i> .....	142
Tabla 38. <i>Presupuesto para la fabricación de cada pieza.</i> .....	143

## ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. <i>ModelMaker 1996</i> .....	26
Figura 2. <i>Reconstrucción del Bentley - Car Zero</i> .....	27
Figura 3. <i>Manija del elevador de vidrios de un Aveo Family</i> .....	28
Figura 4. <i>Jaguar E-Type, Nissan Skyline, Ford T y Porsche 911</i> .....	30
Figura 5. <i>Sistema de digitalización 3D para la obtención de una culata.</i> .....	34
Figura 6. <i>Comparación de texturas y geometrías</i> .....	35
Figura 7. <i>Parámetros para identificar la dificultad de digitalización</i> .....	36
Figura 8. <i>Digitalización tridimensional de un tanque de guerra a partir de las imágenes.</i> .....	38
Figura 9. <i>Aplicadores de plesioterapia fabricados a partir de tecnología FDM</i> .....	39
Figura 10. <i>Modelo tridimensional generado por fotogrametría aérea</i> .....	40
Figura 11. <i>Ejemplo de cámara métricas (Zeiss RMK Top 15).</i> .....	43
Figura 12. <i>Cámaras no métricas o convencionales.</i> .....	43
Figura 13. <i>Leica DMC III.</i> .....	44
Figura 14. <i>Obtención de coordenadas mediante la aplicación de escaneo laser.</i> .....	45
Figura 15. <i>Principio de funcionamiento Luz Estructurada.</i> .....	47
Figura 16. <i>Principio de funcionamiento de un sistema ToF.</i> .....	48
Figura 17. <i>Partes principales de un sistema de fabricación aditiva SLA.</i> .....	51
Figura 18. <i>Principio de funcionamiento Impresión SLS.</i> .....	52
Figura 19. <i>Componentes de un sistema de impresión FDM.</i> .....	53
Figura 20. <i>Sistema de impresión LOM.</i> .....	55
Figura 21. <i>Aston Martin DBR22</i> .....	58
Figura 22. <i>Pistón fabricado a partir de tecnología SLS- Porsche 911 GT2 RS</i> .....	59

Figura 23. <i>NERA, la motocicleta impresa mediante tecnología FDM</i> .....	60
Figura 24. <i>Herramientas metrológicas para la obtención de tolerancias y desviaciones</i> .....	62
Figura 25. <i>EMIC- DL 10.000 kN</i> .....	63
Figura 26. <i>Flujograma del proceso metodológico</i> .....	65
Figura 27. <i>Ford LTD station Wagon</i> .....	66
Figura 28. <i>Tapa trasera de un motor de arranque, pieza de ejemplo</i> . ....	68
Figura 29. <i>Manija de puerta (interior)</i> . ....	68
Figura 30. <i>Levantavidrios</i> . ....	69
Figura 31. <i>Carcasa del deposito del tanque de agua</i> .....	69
Figura 32. <i>Revopoint MIRACO PRO 3D Scanner</i> . ....	77
Figura 33. <i>Anycubic Photon Mono X 6K</i> .....	78
Figura 34. <i>Representación de un objeto en mallas triangulares</i> . ....	80
Figura 35. <i>Interfaz del slicer Chitubox</i> .....	81
Figura 36. <i>Flujo de trabajo para la digitalización de las piezas de estudio</i> . ....	83
Figura 37. <i>Materiales empelados para la limpieza, abrasión, digitalización y preparación superficial de las piezas</i> . ....	84
Figura 38. <i>Piezas sometidas a procesos de acondicionamiento</i> . ....	85
Figura 39. <i>Interfaz para el ajuste de distancia de escaneo</i> .....	85
Figura 40. <i>Ajustes de digitalización</i> .....	86
Figura 41. <i>Opciones de edición de nube de puntos y malla</i> .....	87
Figura 42. <i>Parámetros de edición para la fusión de nube de puntos</i> . ....	88
Figura 43. <i>Eliminación de secciones</i> . ....	88
Figura 44. <i>Edición de la nube de puntos</i> .....	89

Figura 45. <i>Detección y cierre de agujeros y finalización del modelo digitalizado.</i> .....	90
Figura 46. <i>Pieza reconstruida</i> .....	91
Figura 47. <i>Proceso de simulación de la pieza de estudio.</i> .....	91
Figura 48. <i>Diseño y dimensionamiento de la tapa de la carcasa de un motor de arranque.</i> .....	92
Figura 49. <i>Selección de parámetros de simulación.</i> .....	93
Figura 50. <i>Tensión Von Mises.</i> .....	94
Figura 51. <i>Resultados con respecto a desplazamientos y deformaciones unitarias.</i> .....	94
Figura 52. <i>Flujograma de trabajo para la impresión de un modelo digital.</i> .....	95
Figura 53. <i>Procesamiento del modelo digital mediante Chitubox.</i> .....	96
Figura 54. <i>Proceso de validación estética, dimensional y estética de las piezas impresas.</i> .....	97
Figura 55. <i>Escáner Miraco Pro con sus accesorios (base giratoria y trípode).</i> .....	99
Figura 56. <i>Aplicación de una capa de pintura blanca matizada para evitar la reflexión laser.</i> 100	
Figura 57. <i>Nube de puntos creada, manija de la puerta.</i> .....	102
Figura 58. <i>Reconstrucción y edición de malla de la manija.</i> .....	102
Figura 59. <i>Representación de la manija como una viga en voladizo.</i> .....	103
Figura 60. <i>Tensiones Von Mises, manija.</i> .....	108
Figura 61. <i>Desplazamientos, manija.</i> .....	108
Figura 62. <i>Deformación unitaria, manija.</i> .....	109
Figura 63. <i>Factor de seguridad, manija.</i> .....	110
Figura 64. <i>Manija del elevador de vidrio</i> .....	111
Figura 65. <i>Tomas del elevador de vidrio.</i> .....	112
Figura 66. <i>Malla generada, elevador de vidrio.</i> .....	114
Figura 67. <i>Viga en voladizo, elevador de vidrios (idealización).</i> .....	115

Figura 68. <i>Diagrama del factor de concentración</i> .....	119
Figura 69. <i>Análisis de tensión Von Mises, elevador de vidrios</i> . ....	121
Figura 70. <i>Desplazamiento, elevador de vidrio</i> . ....	121
Figura 71. <i>Deformación unitaria, elevador de vidrio</i> . ....	122
Figura 72. <i>Esfuerzo por torsión, elevador de vidrio</i> . ....	122
Figura 73. <i>Factor de seguridad, elevador de vidrios</i> .....	123
Figura 74. <i>Carcasa del tanque de agua, Ford LTD wagon 1975</i> .....	124
Figura 75. <i>Numero de escaneos, carcasa tanque de agua</i> . ....	125
Figura 76. <i>Malla generada, carcasa del tanque de agua</i> . ....	127
Figura 77. <i>Diagrama de cuerpo libre, pestaña de la carcasa</i> . ....	128
Figura 78. <i>Tensiones Von Mises, carcasa</i> . ....	131
Figura 79. <i>Desplazamiento, carcasa del tanque de agua</i> . ....	131
Figura 80. <i>Deformación unitaria, carcasa</i> . ....	132
Figura 81. <i>Factor de seguridad, carcasa</i> .....	132
Figura 82. <i>Parámetros de impresión</i> . ....	134
Figura 83. <i>Orientación y aplicación de soportes</i> .....	135
Figura 84. <i>Limpieza y curado de las piezas impresas</i> . ....	136
Figura 85. <i>Carcasa del tanque de agua, pieza finalizada</i> .....	137
Figura 86. <i>Elevador de vidrios, pieza finalizada</i> . ....	137
Figura 87. <i>Manija de puerta, pieza finalizada</i> . ....	137
Figura 88. <i>Validación dimensional y funcional, manija puerta</i> . ....	138
Figura 89. <i>Validación dimensional y funcional, elevador de vidrios</i> .....	138
Figura 90. <i>Validación dimensional y funcional, carcasa</i> . ....	139

# CAPITULO I

## 1. INTRODUCCIÓN

### **Tema**

“Explorar el uso de digitalización 3D para la reconstrucción y replicación de piezas de vehículos clásicos”.

### **1.1. Problema de investigación**

Un vehículo clásico es considerado un tesoro automotriz, por la riqueza histórica y la exclusividad de estos automóviles. Para que un vehículo sea reconocido como clásico, debe cumplir con ciertos criterios, transcurrir cierto periodo de tiempo desde su fabricación (generalmente 35 años), tener una historia notable, producirse en unidades limitadas y poseer un diseño distintivo [1]. Uno de los aspectos más críticos para este tipo de unidades es la falta de preservación de su originalidad, incluyendo aspectos típicos como la pintura y acabados estéticos tanto internos como externos, priorizando la conservación sobre las modificaciones.

El proceso de restauración de un vehículo clásico también es un inconveniente puesto que no existe mucha accesibilidad de información confiable y transparente que pueda validar el precio y la calidad de un vehículo clásico, afectando el proceso de certificación de este tipo de vehículos [1].

El avance tecnológico ha provocado la discontinuación de la fabricación de repuestos para los vehículos clásicos debido a diversos factores, como los altos costos de fabricación, la baja demanda y sobre todo por el uso de polímeros como material de producción.

Para la restauración o reproducción de las piezas de vehículos clásicos, la adopción del uso de equipos de digitalización 3D, programas de diseño asistido por computadora (CAD) e impresoras 3D permite la reconstrucción o reproducción de repuestos de manera fiel a las piezas originales, garantizando la conservación de este tipo de vehículos, con una precisión visual, estética y

geométrica insuperables. Estas innovaciones tecnológicas no solo aseguran la continuidad de estos vehículos icónicos, sino que también abren nuevas oportunidades para que las generaciones futuras aprecien y disfruten del legado automotor del pasado.

## **1.2. Objetivos**

### ***1.2.1. Objetivo general***

Explorar el uso de digitalización 3D para la reconstrucción y replicación de piezas de vehículos clásicos mediante la documentación, procesamiento y validación de las partes a reemplazar impresas en 3D.

### ***1.2.2. Objetivos específicos***

- Caracterizar las piezas de un vehículo clásico para su restauración mediante la aplicación de métodos de digitalización 3D.
- Adaptar técnicas avanzadas de modelación 3D y post- procesamiento a los modelos digitalizados e impresos de las piezas de vehículos clásicos.
- Desarrollar un catálogo detallado de las piezas de vehículos clásicos, mediante la identificación y documentación de sus partes.

## **1.3. Alcance**

Esta investigación se enfoca en la reconstrucción y replicación de piezas de un vehículo clásico. Se desarrollo un catálogo detallado de las piezas de vehículos clásicos mediante la identificación y documentación de las partes automotrices, con el propósito de servir como base para la restauración o reproducción de estas partes. Se llevará a cabo una recopilación exhaustiva de datos sobre las piezas que requieran restauración o replicación. Las partes que serán objeto de impresión 3D son partes no metálicas como componentes interiores (manijas de puertas, volantes, tablero, etc.), accesorios y detalles (emblemas, faros, rejillas, etc.).

Con el fin de mejorar la conservación visual y geométrica de los modelos digitalizados e impresos, se implementarán técnicas de post-procesamiento a cada objeto de estudio, de esta manera se garantiza un alto estándar de calidad.

#### **1.4. Justificación**

La carencia de métodos y procesos adecuados para la fabricación de piezas de vehículos clásicos ha dificultado la preservación de este tipo de automóviles. Por esta razón, se desarrollarán procesos de documentación, métodos de digitalización 3D, técnicas de post-procesamiento y validación de las piezas fabricadas en 3D, con el fin de garantizar que las partes reproducidas conserven las características físicas, estéticas y geométricas.

.La producción exitosa de piezas funcionales de un vehículo clásico mediante la aplicación de tecnología 3D, permitirá a futuras generaciones apreciar obras de ingeniería que han sido referentes en la evolución de la automoción. El proyecto proporcionará parámetros para la correcta fabricación de partes, respetando la fidelidad geométrica, visual y estética.

La documentación de piezas que necesiten restauración o reconstrucción permitirá la creación de un catálogo detallado, clasificando las piezas según modelo, marca, año de fabricación, tipo de pintura, entre otros criterios. Este catálogo servirá como base para realizar la investigación de manera exitosa y categorizará la base de datos documentada.

El uso de digitalización 3D aportará al desarrollo de métodos para una captura precisa de los detalles del componente a escanear, logrando un dimensionamiento exacto. La aplicación de técnicas de post-procesamiento mejorará los acabados y aspectos visuales de las piezas fabricadas, facilitando la validación comparativa entre las piezas originales y las impresas en 3D. Esta validación asegurará la fidelidad de las piezas reproducidas, garantizando su contribución efectiva a la preservación automotriz

## CAPITULO II

### 2. MARCO TEORICO

#### 2.1. Antecedentes

Los equipos de digitalización 3D actuales son capaces de obtener especificaciones detalladas de los objetos, han evolucionado significativamente desde sus inicios en los años 60, cuando los procesos eran lentos y laboriosos. En los años 90, empresas como Scanners, Cyberware y Digibotics introdujeron innovaciones que mejoraron la velocidad y eficiencia del escaneo. Un avance clave ocurrió en 1996 con el ModelMaker (**ver Figura 1**), que combinó un brazo manual con un escáner 3D de rayas, permitiendo la creación de modelos complejos y con texturas. Estas mejoras han sido cruciales para desarrollar nuevos métodos de fabricación y expandir su aplicación en la industria automotriz [2].

**Figura 1.** *ModelMaker 1996*



Tomado de: Milan Edl, 3D escáner láser: historia y aplicaciones, 2018.

La reproducción o restauración de vehículos clásicos presentan dificultades debido a la discontinuidad de fabricación de componentes para este tipo de automóviles. Un ejemplo destacado de la aplicación exitosa de tecnologías avanzadas en este campo es el proyecto de Bentley para recrear su famoso auto de carreras Blower de 1929, conocido como Car Zero [3]

( ver **Figura 2**). Bentley dedicó 1200 horas a la recreación digital del Blower utilizando métodos de escaneo 3D para capturar cada detalle de las piezas originales. El escaneo 3D permitió obtener modelos precisos en CAD, resultando en la creación de 630 piezas individuales, que se categorizaron en 70 conjuntos. Cada pieza se fabricó siguiendo los aspectos estéticos y las dimensiones geométricas de las piezas originales del fabricante. Posterior a la fabricación del vehículo, fue sometido a pruebas dinamométricas con la intención de que cumplan con los estándares establecidos para su respectiva homologación [3]. El diseño y la simulación son etapas fundamentales ya que permite el análisis de materiales y predecir fallos estructurales antes de la fabricación de un componente [4].

**Figura 2.** *Reconstrucción del Bentley - Car Zero*



Tomado de: Steve Johnson, Bentley crea una nueva serie del Blower de 1929, 2021.

Otro ejemplo, es la investigación realizada por Zumba Novay [5] que desarrollo un método de diseño e impresión tridimensional para la fabricación de una manija del elevador de vidrios (ver **Figura 3**), basado en el uso de un programa CAD, Inventor y un programa de simulación Inspire. Definir parámetros de diseño e impresión facilita la calidad y resistencia de las partes desarrolladas.

**Figura 3.** *Manija del elevador de vidrios de un Aveo Family*



Tomado de: Zumba Novay, Optimización en el proceso de fabricación por impresión 3D, 2021. Los modelos para la recolección de datos y detalles de la pieza, es un factor de gran importancia para la replicación o reproducción de una parte que se requiera. Kyaw et al. [6] realizaron un estudio, basado en la combinación de ingeniería inversa con la toma de decisiones multicriterio, mediante un flujo de trabajo categorizado en tres fases. La primera fase se centra en los métodos de ingeniería inversa como la fotogrametría, remodelación 3D y la digitalización laser, la segunda etapa se centra en la manufactura mediante fabricación aditiva teniendo en cuenta parámetros como tiempo, costo y calidad, y la última fase refleja la evaluación del proceso de RE por el proceso de jerarquía Analítica (AHP). Se concluyo que el método de manufactura por fabricación aditiva más eficiente en términos de costo, tiempo y calidad es la digitalización laser 3D [6].

La impresión 3D es una solución viables en el sector automotriz, por su capacidad de producir piezas con geometrías complejas con una reducción de tiempo evidente [7]. Sin embargo, existen factores que dificultan su fabricación como la formación de agujeros o burbujas en las piezas impresas, este fenómeno afecta de manera directa en las propiedades mecánicas de cada componente. Mediante técnicas de modelamiento CAD y análisis de muestras impresas, se demostró que la formación de agujeros puede reducirse ajustando parámetros como la velocidad y

temperatura de impresión, aunque un grosor excesivo también puede aumentar la incidencia de este problema [8].

Las propiedades mecánicas de los modelos impresos mediante manufactura aditiva (AM) se considera como un aspecto esencial ya que determina si las características de las piezas reproducidas se ajustan a los estándares de las piezas originales. Una investigación realizada por Rouf et al. en [9] plantearon aspectos que relacionan parámetros de impresión 3D en función de las propiedades mecánicas del material implementado. Teniendo en cuenta distintos criterios como la temperatura, velocidad, diámetro de la boquilla, entre otros. Se realizó la impresión mediante Modelación por deposición fundida (FDM) que es tipo de tecnología AM que consiste en la impresión de un elemento capa por capa, mediante la fundición de un filamento o plástico [8]. Las probetas fueron fabricadas en distintos materiales, las cuales fueron sometidas a distintos ensayos, determinando las propiedades mecánicas de cada una y compararlas. Se llegó a la conclusión que los parámetros de impresión afectan las propiedades mecánicas de los elementos 3D generados [9]. Idear criterios estandarizados de impresión facilita la obtención de partes con mucha más calidad.

La restauración y reproducción de piezas para vehículos clásicos conllevan desafíos significativos. No obstante, la introducción de equipos de digitalización 3D y métodos avanzados para este fin, ofrece una alternativa más eficaz para obtener resultados que respalden la fabricación de partes precisas y auténticas.

## **2.2. Vehículos clásicos: Conceptos, regulaciones, requisitos y relevancia**

### ***2.2.1. Definiciones***

Un vehículo clásico es considerado un patrimonio automotriz debido a su valor histórico y a la representación cultural y tecnológica de una época determinada. En el Ecuador se puede acreditar

como clásico a los vehículos con una antigüedad igual o superior a 35 años, según el “Reglamento de Vehículos Automotores Clásicos” [10].

Los vehículos se clasifican según el tiempo de antigüedad puede dividirse en tres categorías principales: vintage, antiguos y clásicos. Se considera vehículo vintage a aquellos fabricados entre 1919 y 1930, vehículo antiguo a los que poseen más de 45 años de antigüedad (anteriores a 1975), y vehículo clásico a los automóviles producidos en las décadas de 1980 y 1990, dependiendo de la legislación de cada país [11], [12].

Los criterios principales que diferencian a un vehículo clásico del resto son: la antigüedad, la originalidad, el valor cultural y estético, el tipo de tecnología y la relevancia histórica acorde a la época de fabricación. Existen ejemplares representativos que marcaron un antes y un después en el sector automotriz (ver **Figura 4**) [13].

**Figura 4.** *Jaguar E-Type, Nissan Skyline, Ford T y Porsche 911*



Tomado de: Auto Bild, Los 50 coches clásicos más bellos de todos los tiempos, 2022.

### ***2.2.2. Reglamento aplicable a vehículos clásicos***

La Federación Internacional de Vehículos Clásicos (FIVA) es una organización de tipo no gubernamental encargada de preservar, proteger e incentivar la cultura de vehículos clásicos para

generaciones actuales y futuras. Desde el año 2017, la FIVA cuenta con el respaldo oficial de la **UNESCO** [14].

La FIVA establece parámetros técnicos y estéticos que deben cumplirse para que un automóvil sea certificado como clásico. El criterio más relevante que impone es la originalidad. Las modificaciones realizadas en este tipo de vehículos son aspectos que impiden la certificación del automóvil. Sin embargo, existen distintos tipos de modificaciones permitidas, siempre y cuando se encuentre en el tiempo de vida útil del vehículo (10 a 15 años) [14].

En el Ecuador la Agencia Nacional de Transporte (ANT) expidió la Resolución 027-DIR-2014-ANT “REGLAMENTO DE VEHÍCULOS AUTOMOTORES CLÁSICOS”, en la cual se establecen los requisitos y procedimientos para obtener la certificación oficial de un vehículo clásico [10].

Este reglamento resulta fundamental para la circulación legal de vehículos dentro del territorio ecuatoriano. Otros reglamentos nacionales son de aplicación general, como el RTE INEN 017 (Control de Emisiones Contaminantes de Fuentes Móviles Terrestres) y el RTE INEN 034 (Elementos Mínimos de Seguridad en Vehículos Automotores) [15], [16]. Sin embargo, no se aplican a los vehículos clásicos, ya que estos no poseen las características tecnológicas ni los sistemas de seguridad contemporáneos

### ***2.2.3. Requisitos para la certificación: FIVA***

La FIVA clasifica los automóviles en dos categorías principales: vehículo clásico y vehículo Youngtimer. El clásico debe cumplir con ciertas condiciones como, por ejemplo: tener al menos 30 años de antigüedad y conservar sus características originales o de fábrica. Por otro lado, el Youngtimer debe tener al menos 20 y 29 años y sus partes tanto físicas como estructurales deben conservarse en buen estado [17].

Los documentos emitidos por la FIVA varían según la categoría: los vehículos clásicos reciben la “Tarjeta de Identidad FIVA” (color verde), mientras que los Youngtimer obtienen el “Documento de Registro FIVA” (color amarillo). Ambos documentos tienen una vigencia de 10 años, y pierden validez si el vehículo cambia de propietario o es modificado significativamente durante ese periodo [17].

El proceso de certificación solicita una inspección física realizada por la Autoridad Nacional FIVA (ANF), acompañada de un informe técnico y una solicitud formal. La solicitud recopila información relevante sobre el vehículo, como fabricante, país de origen, marca, modelo, año de construcción, número de motor y de chasis. La veracidad de estos datos determina la aprobación o rechazo del certificado.

#### ***2.2.4. Requisitos: “Reglamento de vehículos automotores clásicos”***

El reglamento de vehículos automotores clásicos establece requisitos mínimos previo a su matriculación y posteriormente a la circulación dentro del territorio ecuatoriano. Entre las exigencias se encuentra que el vehículo debe poseer al menos 35 años de antigüedad y debe contar con un historial de modificaciones para su respectiva documentación [10]. Otro factor primordial es la conservación de al menos el 80% de su estética y originalidad como: la pintura, carrocería, tapicería, faros, parabrisas, entre otros componentes. El reglamento es aplicable para vehículos dentro de las categorías L, M1 y N1 [10].

El proceso de matriculación incluye la presentación de una solicitud, un informe técnico vehicular, fotografías del vehículo desde los cuatro lados y la copia de la última matrícula [10]. La solicitud debe contener información como el color, marca, número de chasis, marca, cilindraje, tipo de motor, número de placa y número de cilindros. El informe técnico, emitido por un taller automotriz

o laboratorio acreditado, debe describir detalladamente las modificaciones realizadas, las condiciones mecánicas, la pintura, la tapicería y el tipo de encendido.

Finalmente, la Agencia Nacional de Transito dictamina la certificación de un vehículo como clásico.

### ***2.2.5. Tendencias actuales***

En el contexto actual, las tecnologías de digitalización e impresión 3D surgen como soluciones innovadoras para la reconstrucción y reproducción de componentes de vehículos históricos, garantizando su funcionalidad y conservación estética. Estas herramientas tecnológicas representan una alternativa sostenible y efectiva para la conservación del patrimonio vehicular.

### **2.3. Digitalización 3D**

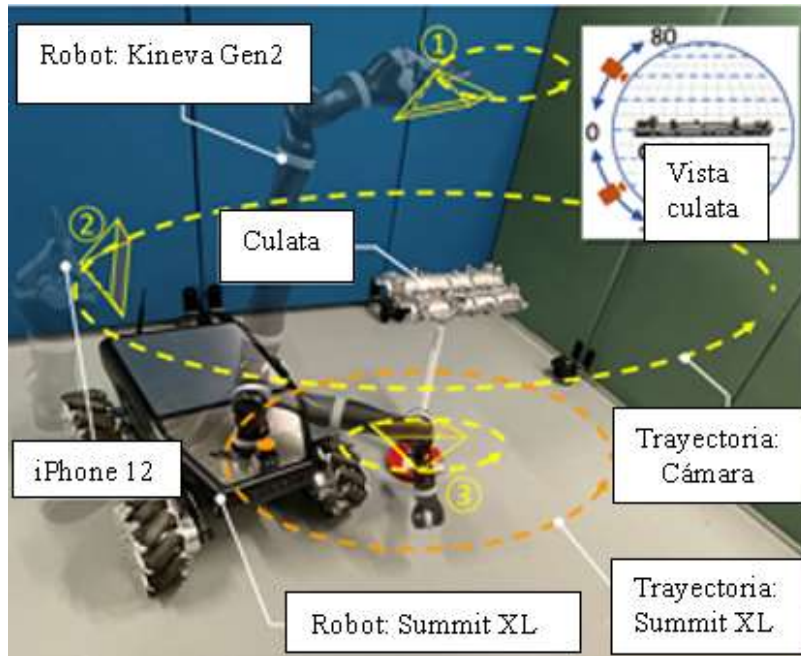
La digitalización 3D es un proceso que consiste en la recreación de un modelo real a un modelo digital en tres ejes (x, y, z) [18]. Este proceso consiste en convertir objetos de un estado físico a un estado digital, mediante el uso avanzado de tecnología que a su vez permite capturar características geométricas y estéticas de manera precisa y fieles a la pieza original. La digitalización tridimensional es también una herramienta para el registro y conservación de objetos en formato digital con el propósito de preservar elementos ante degradaciones de fenómenos físicos, químicos y mecánicos [19], [20].

Los campos de aplicación de la digitalización 3D son amplios y diversos, por ejemplo, se implementa en la industria automotriz, en la medicina, en arqueología y en cualquier disciplina que implique la recreación y fabricación de objetos reales.

Entre los campos con mayor aceptación destaca la industria automotriz, Zhang et al. [19] implementaron un método de escaneo a partir de una representación neuronal mediante el uso de imágenes RGB (Red, Green, Blue) para convertir la culata de un motor a un modelo digital

(ver Figura 5) preciso tanto en aspectos geométricos como en estéticos. Por lo tanto, la digitalización es una opción viable y eficiente para recopilar datos en tres dimensiones debido a la versatilidad, a la baja demanda de tiempo y precisión que ofrecen los métodos existentes.

**Figura 5.** Sistema de digitalización 3D para la obtención de una culata.



Tomado de: Jianjing Zhang, Modelado 3D por renderizado neuronal para la digitalización rápida de productos en servicio, 2023.

## 2.4. Etapas de digitalización e impresión 3D

El flujo de trabajo para la digitalización 3D consta de una serie de procesos, desde la preparación del objeto hasta la obtención del modelo digital. Yang et al. [21] realizaron una encuesta acerca de la digitalización de humanos a partir del uso de tres tipos de tecnologías: estéreo pasivo, luz estructurada y tiempo de vuelo. El proceso de digitalización se dividió en cuatro etapas: captura de datos, extracción de características, reconstrucción y evaluación de las mediciones. El ciclo de trabajo varía en función de parámetros técnicos como el método de digitalización que se va a implementar y la tecnología de captura tridimensional que se usara, sin embargo, el procedimiento

de operación general para la digitalización, se clasifica en: preparación, recopilación de características, generación del modelo digital y post procesamiento.

### 2.4.1. Preparación

La preparación es una etapa donde se consideran distintos parámetros como el objeto, el entorno y la selección de software-hardware [22]. Los aspectos mencionados son consideraciones previas a la digitalización, debido a su alto impacto en la calidad de los datos obtenidos mediante dispositivos de digitalización.

La preparación, selección y acondicionamiento del objeto son factores cruciales que influye en la calidad de los datos recopilados por los dispositivos. Los criterios considerados en el objeto abarcan la textura, la geometría, el color, la opacidad, la luminosidad y las superficies definidas [22]. Estas variables también determinan si el objeto es apropiado para la digitalización. Por ejemplo, una textura con patrones repetitivos como se observa en la **Figura 6**, no es apta para ser digitalizada debido a que puede causar ambigüedades, así mismo, objetos de color negro, brillantes y transparentes como se visualiza en la

**Figura 7**, dificultan la digitalización y por ende la calidad de nube de puntos obtenidas por los equipos y programas de medición [23].

**Figura 6.** Comparación de texturas y geometrías



Tomado de: Ricardo Vela, Formación en digitalización 3D, 2021.

**Figura 7.** *Parámetros para identificar la dificultad de digitalización*



Tomado de: Ricardo Vela, Formación en digitalización 3D, 2021.

Las condiciones del entorno comprenden factores físicos, químicos y mecánicos que se controlan y regulan para la optimización de captura de datos. Entre los factores se incluyen el control de iluminación, elección idónea del clima, la distancia entre el objeto y el dispositivo, y la regulación de la humedad, entre otros. Tang et al. [24] exploraron el uso de la tecnología 3D, teniendo como enfoque la digitalización de árboles con el propósito de generar un modelo digital preciso sin contacto, evitando daños críticos a la planta. En esta investigación se tomó en cuenta parámetros de entorno críticos antes de la selección del hardware y software. La selección desfavorable del clima como la existencia de lluvia y una humedad en el aire superior al 80%, son perjudiciales en vista de que el contacto de partículas de agua con los equipos de digitalización puede generar averías en los dispositivos [24].

El hardware son equipos electrónicos que permiten recopilar información y/o datos del objeto que se desea escanear, mientras que el software son programas mediante los cuales se procesan los datos obtenidos por el hardware. La selección tanto de los equipos como de los programas varían en función del trabajo que se desee realizar y de los métodos de digitalización que se van a aplicar. Por ejemplo, Neto et al. [25] implementaron un sistema de digitalización basado en el uso de

telémetros LIDAR (Light Detection and Ranging) para capturar datos y características de objetos pequeños. El programa utilizado en dicha investigación fue MeshLab para procesar los datos y obtener la nube de puntos del objeto digitalizado [25]. La correcta selección de los equipos y programas es crucial para la optimización, precisión y eficiencia en el proceso de digitalización.

#### ***2.4.2. Recopilación de características***

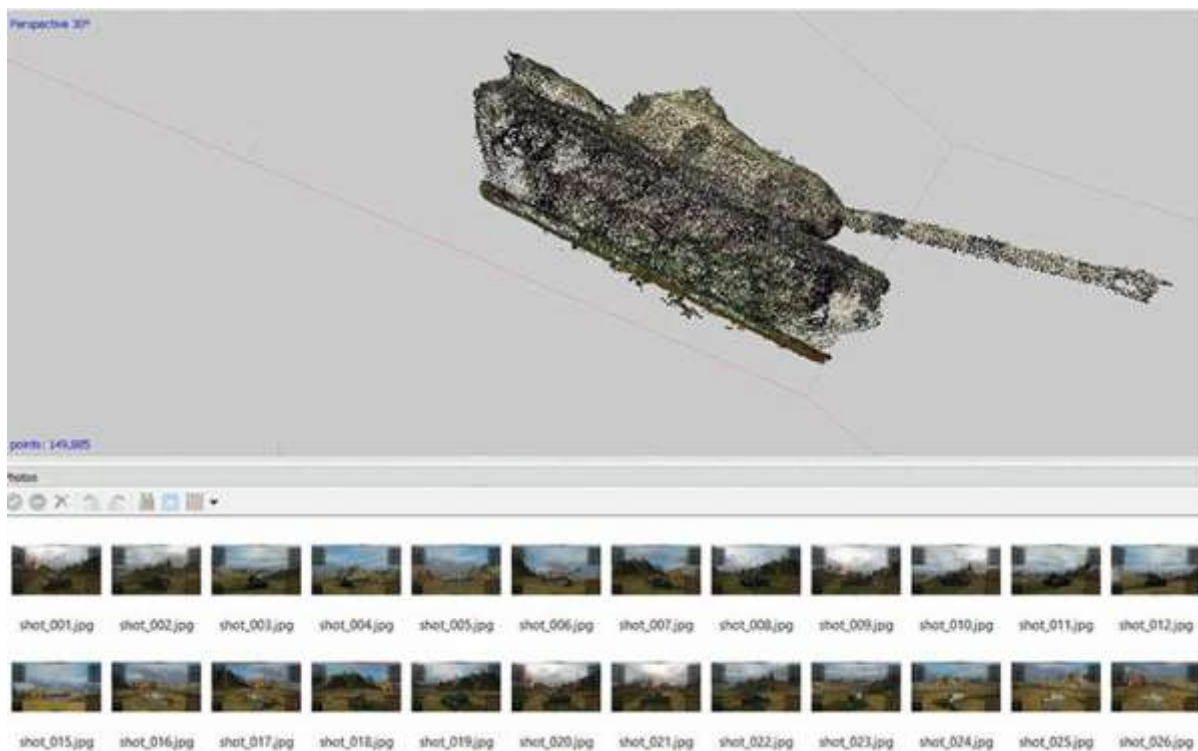
Durante la etapa de recopilación de datos, los equipos electrónicos o hardware son responsables de recopilar en 360° datos e información del objeto que se va a digitalizar. Los dispositivos de digitalización capturan características como el color, la textura y la profundidad, entre otros aspectos, que sirven como base para generar modelos o diseños digitales [26]. Existen principalmente dos métodos de digitalización: por contacto y sin contacto[23]. La tecnología 3D por contacto implica el uso de sondas, microprobes, escáneres de palpado, entre otros dispositivos que están en contacto directo con el objeto, lo que puede generar daños a la pieza. Por el contrario, el método de digitalización sin contacto es más eficiente, pues optimiza el proceso y evita dañar el objeto original.

La tecnología de digitalización sin contacto consta de una serie de procesos basada en la captura de características sin la necesidad de someter el objeto a la manipulación física, así evitando posibles daños. Entre las técnicas comunes de digitalización sin contacto se encuentra la fotogrametría, que consiste en recabar datos de una pieza mediante el uso de fotografías 2D, una de las investigaciones que abalan la precisión y fidelidad de la aplicación de la fotogrametría, es el estudio de Esmacili y Thwaites [27], donde se logró digitalizar un tanque a partir del uso de screenshots (**ver Figura 8**). El escáner laser, por otro lado, es un proceso de compilación de información y detalles mediante la aplicación de un emisor de luz y un sensor de luz o detector óptico [28]. Por último, el modelado mediante un software CAD, implica la creación de un modelo

digital a partir de programas de diseño 3D que requieren conocimientos técnicos para su respectiva elaboración [29].

El método o técnicas seleccionado debe relacionarse con: las características del entorno, las características del objeto de estudio y con los requisitos específicos del proyecto. Esta selección es indispensable para garantizar que los datos obtenidos se asemejen a la realidad. De esta manera, se puede asegurar y validar los datos, permitiendo alcanzar conclusiones precisas y aplicables en contextos reales.

**Figura 8.** *Digitalización tridimensional de un tanque de guerra a partir de las imágenes.*



Tomado de: Esmacili y Thwaites, Fotogrametría virtual, 2016.

Existen programas que permiten procesar la información obtenida por los equipos de medición, facilitando la creación de la nube de puntos del objeto escaneado. El tipo de programa que se aplicará depende de las características del proyecto y de la tecnología de digitalización seleccionada. Las técnicas comunes de procesamiento de datos incluyen la alineación, limpieza,

registro y fusión de nube de puntos, con el objetivo de producir modelos digitales de alta precisión que refleje con fidelidad características geométricas y estéticas del objeto original [22].

En el estudio de Quiñones et al. [30], se desarrolló un método para la fabricación de aplicadores de presoterapia (**ver Figura 9**), utilizando un escáner CT (Tomografía Computarizada), un software gratuito y una impresora 3D. El programa que usaron fue 3D Slicer, el cual facilitó la gestión de la información recopilada por el escáner CT y posteriormente convirtió la información en una malla con un formato STL (Estereolitografía) para su respectiva impresión 3D.

**Figura 9.** *Aplicadores de plesioterapia fabricados a partir de tecnología FDM*



Tomado de: Quiñones Rodríguez, Implementación clínica de moldes de plesioterapia impresos en 3D utilizando software gratuito de código abierto, 2023.

Por otro lado, Tanasi et al [31] digitalizaron zonas geográficas del archipiélago de maltés, aplicando distintos tipos de software y hardware para su elaboración. El método que más destacó fue la fotogrametría aérea, que consiste en usar drones para la obtención de imágenes 2D. Las fotografías se importaron a programas (Agisoft Metashape y 3DF Zephyr) para la creación de la nube de puntos y la generación de diseños topográficos de la zona escaneada (**ver Figura 10**).

**Figura 10.** *Modelo tridimensional generado por fotogrametría aérea*



Tomado de: D. Tanasi, *Preservación digital y perspectivas arqueoastronómicas: digitalización en 3D del patrimonio megalítico en el Archipiélago Maltés*, 2024.

El procesamiento correcto de los datos mediante programas especializados no solo permite gestionar de manera eficiente la información recopilada por los distintos tipos de tecnología, además, facilita la transformación precisa de los datos a modelos digitales 3D, como archivos de tipo STL. Estas herramientas son indispensables en la investigación debido a su versatilidad y capacidad para adaptarse a las necesidades de cada disciplina.

### ***2.4.3. Post-procesamiento***

El post-procesamiento son procesos que sirven para optimizar la calidad de la nube de puntos y el modelo digital generado [32]. Durante el proceso de extracción de información, varios factores como el ruido, iluminación y patrones repetitivos influyen directamente en la fiabilidad de los datos. Por esta razón, el post-procesamiento tiene un rol importante en la digitalización. Se

clasifican en dos tipos: el primero se lleva a cabo después de la obtención de la malla 3D o modelo digital, mientras que el segundo tiene lugar después de la impresión 3D.

El primer tipo de post-procesamiento es realizado después de la obtención de la malla 3D, es una serie de procesos antes de la impresión 3D, destinados a mejorar la calidad y precisión de las características geométricas y estéticas escaneadas. El post-procesamiento es importante debido a las imperfecciones inherentes en los modelos digitales, como agujeros sin rellenar, ruido y características innecesarias [33]. Los métodos de post-procesamiento difieren según las características del proyecto. Kamel et al. [34], diseñaron un sistema de digitalización basado en la entrada de videos para entornos de realidad aumentada (AR). El modelo digital se generó mediante videos, no obstante, presentaba falencias en la calidad de información. Por esta razón, se aplicaron métodos de filtrado y suavizado utilizando el programa Open 3D. Estas técnicas permitieron reducir el ruido, mejorar la precisión y visualización de los modelos 3D. Otra técnica importante de post-procesamiento es el refinamiento y la simplificación de los datos [35], estas técnicas no solo disminuyen el consumo de recursos computacionales, sino que también mejoran la visualización, reducen errores geométricos o topológicos, facilitan el diseño e impresión.

El segundo tipo de post-procesamiento es realizado después de fabricar el modelo digital, consta de fases que son esenciales para garantizar que la pieza impresa sea fiel al objeto original. Entre las tácticas de post-procesamiento para componentes fabricados se encuentran la limpieza del componente impreso mediante la eliminación del soporte con productos químicos y el pulido de la pieza [36]. Según la investigación de Qi en [37], para la aplicación de técnicas de post-procesamiento para impresiones 3D de fotocurado, es necesario contar con un equipo que incluye una máquina de limpieza ultrasónica, aire comprimido y una caja de curado UV. Primero se realiza la limpieza del componente impreso utilizando disolventes con ayuda del limpiador ultrasónico;

luego, se eliminan los residuos del disolvente con aire comprimido. Por último, se llevó a cabo el curado mediante la caja UV, aumentando la dureza, resistencia y estabilidad de la pieza.

## **2.5. Métodos de digitalización 3D sin contacto**

La digitalización 3D sin contacto comprende métodos en los cuales los dispositivos recopilan coordenadas en tres dimensiones de los objetos físicos mediante el uso de luz o ultrasonido, sin la necesidad de palpar el objeto [38]. Los métodos más comunes de digitalización sin contacto incluyen: fotogrametría, escáner láser, luz estructura y tiempo de vuelo (ToF) [39].

### **2.5.1. Fotogrametría**

La fotogrametría es un método de digitalización sin contacto que permite recabar información como: la textura, los colores, las deformaciones y otras variables, a partir de datos bidimensionales como fotografías o imágenes digitales [40]. Este método no solo permite recopilar información precisa, sino que también es una alternativa menos costosa en comparación con las otras técnicas de digitalización existentes. La fotogrametría se puede dividir en dos etapas: La primera etapa es el registro fotográfico que se basa en el registro de imágenes mediante dispositivos como cámaras DSLR, cámaras 3D, cámaras 360 y, actualmente, cámaras de smartphones [41]. La segunda etapa es el procesamiento y reconstrucción de las fotografías mediante software especializado para obtener el modelo digital. La Fotogrametría se puede dividir en dos categorías: fotogrametría terrestre y fotogrametría aérea.

La primera categoría es la fotogrametría terrestre o fotogrametría de corto alcance, utiliza dos tipos de cámaras terrestres: cámara métrica (Ver **Figura 11**) y cámara no métrica (cámaras convencionales) (Ver **Figura 12**). Estas cámaras permiten el registro visual del objeto y posteriormente la obtención de la nube de puntos del material de estudio mediante el procesamiento de la información [42].

**Figura 11.** *Ejemplo de cámara métricas (Zeiss RMK Top 15).*



Tomado de: New tech service, Zeiss RMK Top 15, 2025.

**Figura 12.** *Cámaras no métricas o convencionales.*



Tomado de: Dzoom, Las 9 mejores cámaras compactas avanzadas, 2025.

La segunda categoría es la fotogrametría aérea, este método ha experimentado variantes como la fotogrametría basada en la estructura de movimiento (SfM), emplea cámaras cartográficas como por ejemplos: la Leica DMC III (Ver

**Figura 13** ), comúnmente son adaptadas en una plataforma aérea como helicópteros, cometas, drones o vehículos aéreos no tripulados (UAV). Estas cámaras capturan las fotografías que, tras su procesamiento, permiten obtener el modelo digital [43].

**Figura 13.** *Leica DMC III.*

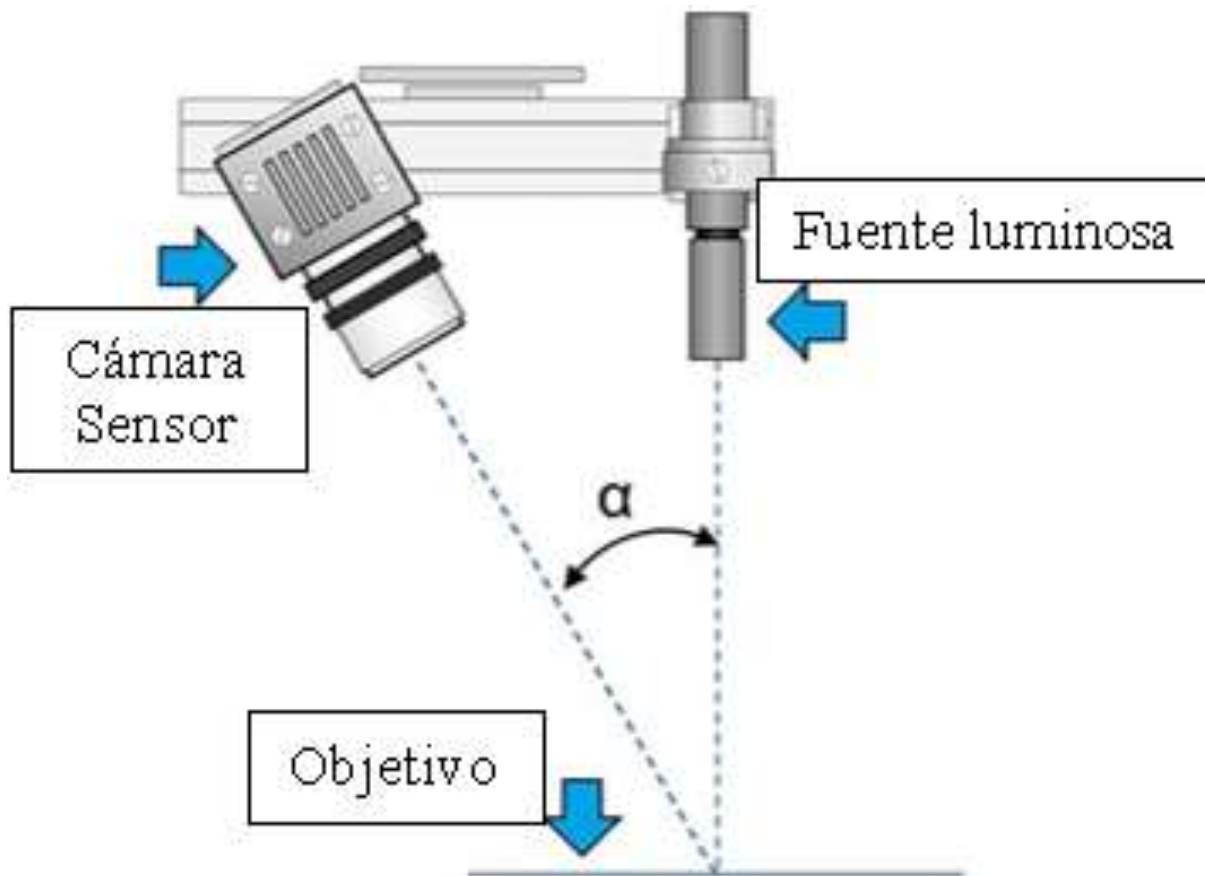


Tomado de: DCI, Leica DMC III, 2025.

### **2.5.2. Escáner láser**

El escáner láser es una técnica de digitalización de visión activa, es decir, que usa una fuente emisora de luz y un sensor que interpreta la reflexión de la fuente de iluminación sobre el objeto, para la recolección de coordenadas 3D [23]. Los parámetros considerados para la obtención de datos precisos y fiables abarcan: la resolución, la velocidad de escaneo, la precisión de medición angular, el campo de visión horizontal y vertical, la distancia y la reflectividad [44]. Estas variables optimizan el proceso de digitalización y generación de la nube de puntos. El escaneo laser se puede dividir en cuatro etapas: Emisión del láser, reflexión del láser, detección del rayo láser reflejado y el procesamiento de los datos, proceso mostrado en la **Figura 14** [45].

**Figura 14.** Obtención de coordenadas mediante la aplicación de escaneo laser.



Tomado de: 3D natives, Escáner láser 3D: tecnología, beneficios y limitaciones, 2019.

Primero, se emite el rayo láser hacia el objeto mediante la fuente luminosa del equipo de escaneo laser [45]. Antes de iniciar con esta fase, es necesario realizar calibraciones al equipo y preparar el objeto, para asegurar la continuidad de los pasos posteriores.

Después, el rayo láser emitido por la fuente luminosa del equipo se refleja en la superficie del objeto de estudio y regresa al escáner. Las superficies ideales para una buena reflexión son superficies lisas, no brillantes, de colores claros y que no sean transparentes [22]. Estos parámetros permiten minimizar la pérdida de coordenadas.

Los rayos reflejados son detectados por un sensor de luz incorporado en el escáner láser. El escáner laser calcula la distancia o el ángulo a partir del principio de funcionamiento de la triangulación [44].

Finalmente, los datos obtenidos por el escáner laser se procesan mediante programas. El objetivo de esta etapa es convertir las coordenadas obtenidas en representaciones digitales del objeto, conocida como nube de puntos o superficies tridimensionales.

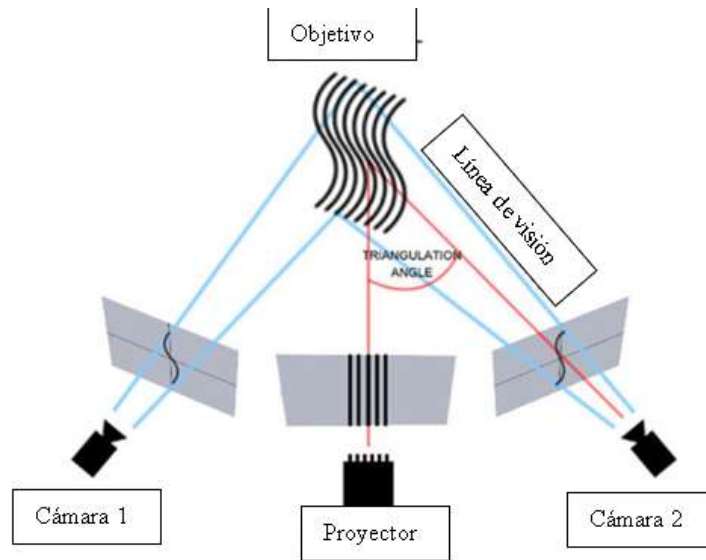
### ***2.5.3. Luz estructurada***

La luz estructurada es una técnica de digitalización activa que emplea una fuente luminosa y un receptor para la recopilación de coordenadas en tres dimensiones. A diferencia del escáner laser, la luz estructurada recopila datos en función de la deformación de la luz emitida, y no por la reflectividad del láser. Existen dos tipos de sistemas de iluminación de luz estructurada: la luz estructurada de superficie en el que usan patrones complejos como cuadrículas o franjas. Por otro lado, el segundo tipo es la luz estructurada en líneas, consiste en emplear una sola línea de luz hacia el objeto [46].

La luz estructurada permite disminuir la dependencia de las texturas de la superficie y las condiciones de iluminación, acelerando la reconstrucción y aumentando la adaptabilidad a variaciones de iluminación [47]. Esta técnica es ampliamente aceptada debido a su relación calidad- precio. Los campos de aplicación de este método abarcan distintas disciplinas como la medicina, la mecánica, el diseño de ropa, la ingeniería inversa y la realidad aumentada [48].

El flujo de trabajo de luz estructurada se puede dividir en cuatro fases: la proyección de iluminación, la captura de imágenes, el análisis geométrico y la generación del modelo digital. El principio de funcionamiento se evidencia en **la Figura 15**, [45].

*Figura 15. Principio de funcionamiento Luz Estructurada.*



Tomado de: 3D natives, Escáner de luz estructurada: tecnología, beneficios y limitaciones,2019.

El principio de funcionamiento de la luz estructurada consiste en la proyección de un patrón de luz hacia el objeto. Dependiendo del sistema de iluminación, el patrón proyectado puede ser de tipo franja o una sola línea. Es necesario acondicionar el objeto para evitar la reflectividad, que puede dificultar la recolección de datos. Para controlar este problema, se puede usar cinta adhesiva, pintura, entre otros elementos [46].

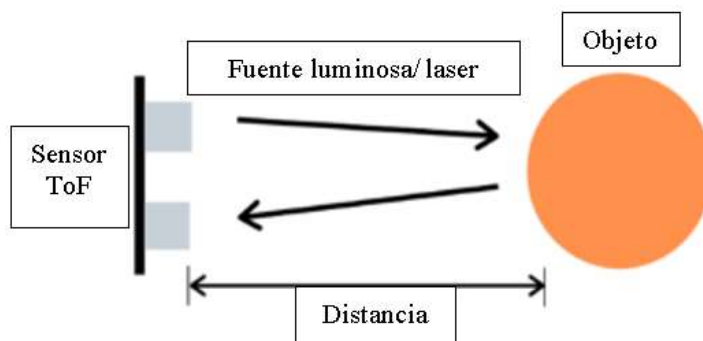
Después, el patrón de luz emitido por el proyector se deforma al interactuar con la superficie del objeto, adoptando la forma real del mismo. Las cámaras de profundidad interpretan la forma que toma la fuente de luz en la pieza con los patrones de luz deformados [46].

Los patrones de luz deformados son recopilados y procesados por el software del escáner, que calcula la geometría 3D del objeto en función de la deformación de la fuente luminosa, comúnmente aplicando técnicas de triangulación. Finalmente, a partir de los datos obtenidos, se genera el modelo digital de la pieza escaneada.

#### 2.5.4. Cámaras de Tiempo de vuelo (ToF)

Los sistemas ToF (Time of Flight), son cámaras de profundidad que capturan coordenadas 3D de un objeto midiendo la distancia y el tiempo de transmisión y recepción de luz. El proceso para la obtención de la distancia abarca varias etapas. La primera etapa consta de la proyección de la luz hacia el objeto, luego la luz emitida se refleja y regresa nuevamente al dispositivo. Por otro lado, la luz reflejada es capturada y procesada por el sensor óptico del dispositivo. Finalmente se obtiene la distancia en función al tiempo de emisión y recepción de la luz. Este proceso se puede evidenciar en la **Figura 16**, [49]. Los componentes principales de las cámaras ToF son el emisor de luz, el sensor de luz, un circuito de control y un circuito de gestión o procesamiento [49]

**Figura 16.** Principio de funcionamiento de un sistema ToF.



Tomado de: Xinghua Xia, Investigación sobre la medición de objetivos basada en la fusión de sistemas binocular y TOF, 2022.

El circuito de procesamiento calcula la distancia utilizando la velocidad de la luz emitida ( $c$ ), la duración del pulso luminoso emitido por la cámara ToF ( $t_p$ ), las señales recogidas por el obturador temprano ( $S_0$ ) y las señales recogidas por el obturador tardío ( $S_1$ ) [49]. Con estas variables se puede calcular la distancia mediante la implementación de la **Ecuación (1)**.

$$d = \frac{c}{2} + t_p \times \frac{S_1}{S_1 + S_0} \quad (1)$$

Las cámaras ToF tienen una gran aceptación en el contexto actual debido a su versatilidad y capacidad de integrarse a otros sistemas existentes. Sus ventajas incluyen la rápida digitalización de objetos, la obtención de nube de puntos con mayor densidad y la generación de mapas tridimensionales en tiempo real [50]. Aprovechar estos beneficios permite facilitar el proceso de escaneo y sobre todo optimizar de la información generada.

## **2.6. Fabricación aditiva**

La fabricación aditiva (AM, por sus siglas en inglés) es un proceso de manufactura en el cual un modelo digital se fabrica mediante la adición de material capa por capa, diferenciándose del proceso tradicional de fabricación que se basa en la remoción o eliminación de la materia prima [51]. Esta diferencia es crucial para la optimización de la fabricación, ya que la AM minimiza el desperdicio de material. La fabricación aditiva abarca una variedad de términos como impresión 3D, fabricación libre, fabricación rápida, proceso aditivo, bio impresión y bio fabricación 3D [52]. Sin embargo, "impresión 3D" es el termino oficial comúnmente utilizado para referirse a la AM. La impresión 3D es una técnica de manufactura digital a partir de la superposición de capas con la finalidad de fabricar modelos informáticos tridimensionales. Los materiales más comunes para la impresión 3D incluyen plásticos como el PLA, PETG, ABS y resina [51]. Esta tecnología ofrece varias ventajas en comparación a métodos de fabricación tradicional, tales como la disminución de costos de producción, menor tiempo de fabricación, mejor presentación visual, entre otros [53]. La impresión 3D se aplica en varios campos, incluyendo la industria automotriz, la industria textil, la industria aeroespacial y otros campos en los cuales se requiera este tipo de fabricación.

## **2.7. Métodos de fabricación aditiva**

La impresión 3D ha experimentado un gran avance tecnológico que ha permitido mejorar el proceso de fabricación de objetos en tres dimensiones. Actualmente, existen varios tipos de

impresión 3D, no obstante, los más comunes son el Modelado por deposición fundida (FDM), la Estereolitografía (SLA), el Sinterizado selectivo por láser (SLS) y la fabricación de objetos laminados (LOM) [54].

### ***2.7.1. Estereolitografía (SLA)***

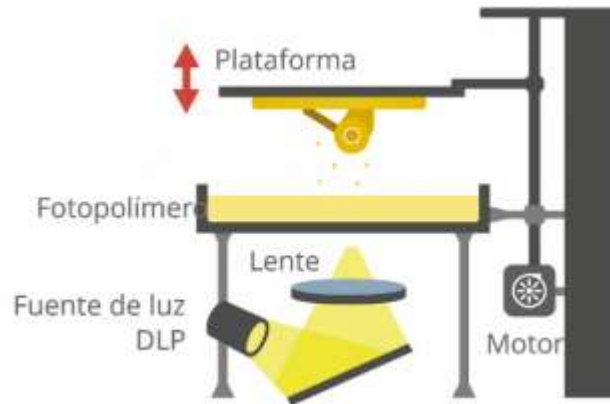
El primer tipo de tecnología es la Estereolitografía (SLA), también conocida como impresión por fotocurado. La estereolitografía requiere una impresora 3D DLP (Procesamiento de luz digital) y resina líquida fotosensible como material para la fabricación de la pieza (ver **Figura 17**) [55]. El principio de funcionamiento de este método abarca distintas etapas.

Primero, se genera un modelo digital mediante un software especializado CAD, y con ayuda de programas el modelo es importado a la impresora en formato STL. Luego, el tanque es relleno con resina. Posteriormente, la plataforma de construcción se sumerge en el depósito de resina líquida. La plataforma se mueve según las coordenadas del archivo STL, permitiendo la formación de las capas hasta que el modelo digital se complete. Cabe recalcar que cada capa generada es curada gracias a la fuente de luz de la impresora.

Finalmente, cuando la impresión concluye, el objeto recibe un post-procesamiento mediante una cámara UV (Ultravioleta) que asegura que toda la pieza sea curada [55].

Las ventajas de la estereolitografía incluyen una alta precisión de fabricación, menos defectos internos como espacios huecos en la superficie, mejor calidad visual y un mayor índice de flexibilidad [56]. Sin embargo, las propiedades que ofrece este tipo de tecnología no son siempre eficientes debido a que la resina está compuesta por materiales como epoxis, monómeros y acrilatos, materiales que permiten que las piezas impresas mediante SLA sean adecuadas para fines pseudoestructurales como sensores, cables, entre otros, pero no para aplicaciones estructurales debido a su baja capacidad de soportar cargas [57].

**Figura 17.** Partes principales de un sistema de fabricación aditiva SLA.



Tomado de: Chat GPT, imagen generada por inteligencia artificial, 2025.

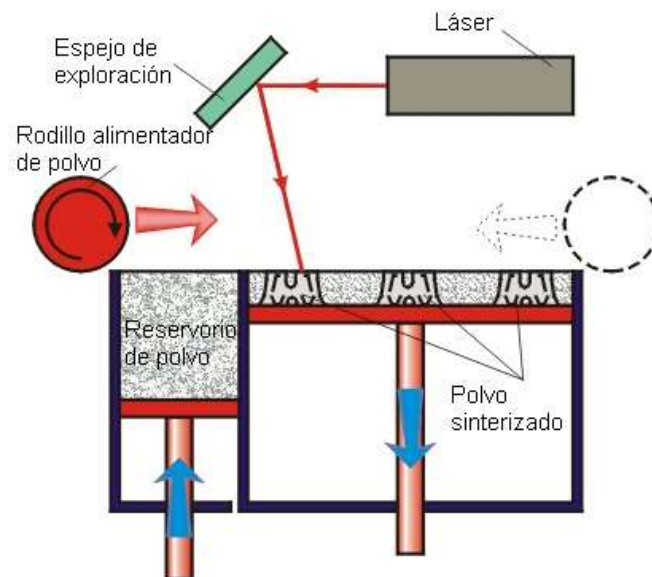
### **2.7.2. Sinterizado selectivo por láser (SLS)**

El segundo tipo de tecnología es el Sinterizado selectivo por láser (SLS), una técnica de fabricación capa por capa basada en el sinterizado o fundición de polvo mediante un rayo láser de alta intensidad [58]. El polvo es el material de fabricación, y por lo general, los polvos suelen ser plásticos y compuestos reforzados por aluminio. Los parámetros que determinan la calidad del objeto impreso mediante SLS son: la capacidad de absorción de energía láser del polvo y la concentración de energía del láser [59]. La capacidad de absorción de energía del polvo es importante para una óptima manufactura, puesto que una capacidad de absorción deficiente dificulta que las partículas de polvo alcancen la temperatura de fusión, generando enlaces débiles de partículas y, por ende, una impresión frágil. Por otro lado, el control de la concentración de energía del láser permite que el material no se degrade debido al calor excesivo generado por el láser.

El proceso de impresión SLS consta de distintas fases (**ver Figura 18**). Primero, el modelo digitalizado es dividido en capas y exportado a la impresora en formato STL. Luego, la impresora 3D es preparada, rellanando el depósito de polvo y precalentando la cámara de construcción.

Después, una capa de polvo es extendida en la cámara de construcción gracias a la acción de un rodillo, cada capa de polvo posee un espesor aproximado entre 20 a 150 micrómetros [59]. El polvo es sinterizado por acción del láser, que es el encargado de fusionar las partículas de polvo y solidificar las capas. Cuando una capa es sinterizada, la plataforma desciende ligeramente y una nueva capa de polvo es aplicada sobre la capa fabricada. El proceso se repite hasta que la pieza se termina. Finalmente, el objeto recibe métodos de limpieza y tratamientos con la intención de garantizar su integridad.

**Figura 18.** Principio de funcionamiento Impresión SLS.



Tomado de: Jose Odremán, Impresión 3D en la industria, 2014.

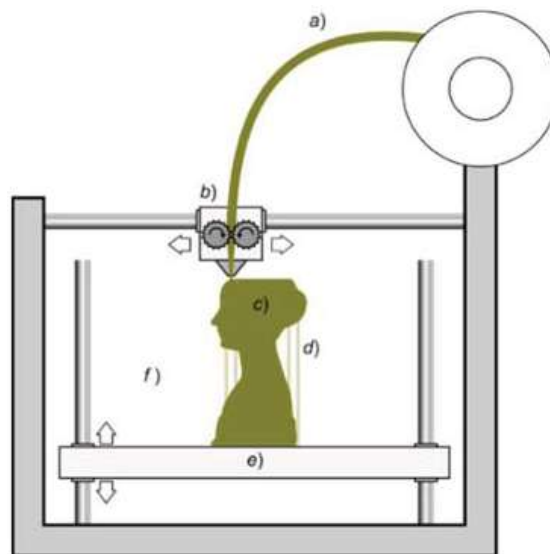
### **2.7.3. Modelado por deposición fundida (FDM)**

El Modelado por deposición fundida (FDM), también conocido como fabricación de filamentos fundidos, es una tecnología de impresión 3D patentada por S. Scott y C. Lisa en 1989 [60]. Los materiales de construcción de la impresión FDM son termoplásticos, también denominados filamentos. Los filamentos más comunes utilizados en las impresoras FDM son ABS, PLA, Policarbonato (PC), nylon, y otros materiales de fácil acceso. Estos materiales ofrecen propiedades

físicas notables como mayor flexibilidad, alto índice de resistencia al impacto, mayor resistencia a la compresión y tracción, resistencia al calor y conductividad eléctrica [61].

Una impresora FDM consta de ciertos componentes como el filamento (a), Extrusor (b), boquilla (c), modelo impreso (d), plataforma de construcción (e) y el sistema de guía (f) [60]. Estas partes se visualizan en la **Figura 19** . El ciclo de fabricación de esta tecnología se divide en varias fases, desde la preparación hasta la impresión. Primero, la impresora es cargada con filamento en el carrete. Durante el proceso de impresión, el extrusor calienta el material hasta alcanzar su punto de fusión. La boquilla y el extrusor se mueven en dirección X e Y, mientras que la plataforma de construcción se mueve en el eje Z, garantizando la impresión en tres dimensiones. El filamento fundido es inyectado por la boquilla en la plataforma de construcción, formando una capa, este proceso se repite hasta que el modelo digital se complete.

**Figura 19.** *Componentes de un sistema de impresión FDM.*



Tomado de: Muzammal Hoque, Diseño e implementación de una impresora 3D basada en FDM,2019.

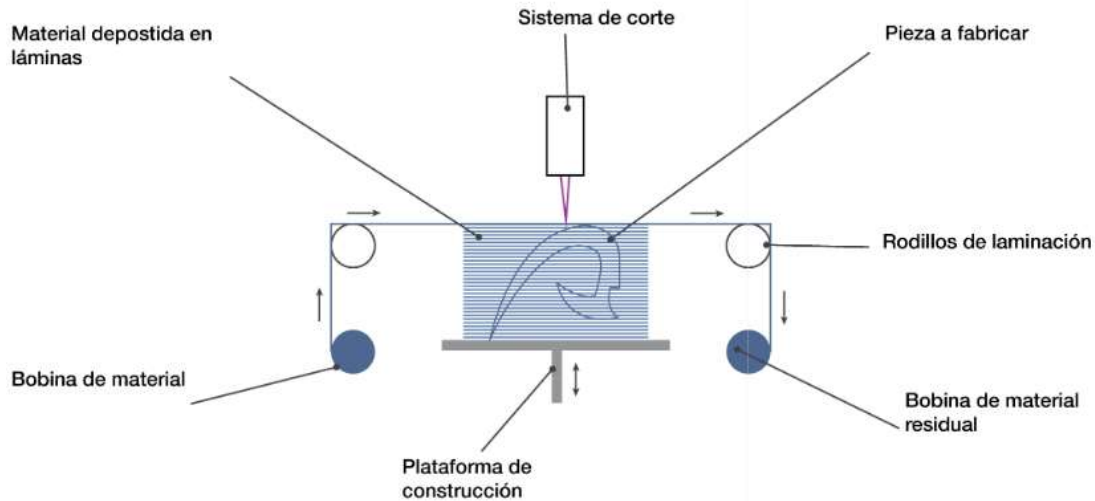
#### ***2.7.4. Fabricación de objetos laminados (LOM)***

La fabricación de objetos laminados (LOM), es una tecnología de impresión 3D que utiliza material en forma de láminas, las cuales se apilan y cohesionan a partir de la aplicación de un adhesivo. Durante la generación de cada capa, un láser corta el contorno de acuerdo con la geometría que se va a fabricar [62]. El ciclo de unión y corte de capas se repite hasta que el modelo digital sea impreso por completo.

Existen procesos basados en el apilamiento de las láminas según el tipo de material empleado. Por ejemplo, se usa la unión adhesiva para materiales como el papel de estraza, la unión térmica y la unión por soldadura ultrasónica (UAM) para materiales metálicos laminados como el aluminio, acero, latón y cobre [63].

El proceso de fabricación consta de distintas fases. Primero, la bobina de material desenrolla una hoja de material y la deposita sobre la plataforma de construcción. Luego, los rodillos de laminación presionan la hoja de material sobre la plataforma de construcción, activando el adhesivo y asegurando que la hoja se adhiera firmemente a la capa anterior. Después, el sistema de corte corta el contorno de la capa según la geometría del modelo. El material sobrante de la capa se recoge en la bobina de material residual, dejando solo la forma deseada. La plataforma de construcción se mueve hacia abajo (eje Z) para hacer espacio para la siguiente capa. El proceso se repite capa por capa hasta que la pieza a fabricar esté completamente formada. Este ciclo se evidencia en **Figura 20** [62].

**Figura 20.** Sistema de impresión LOM.



Tomado de: Alejandro Gutierrez, Tecnologías de impresión Readit, 2020.

Los beneficios que ofrece la impresión LOM incluyen, impresión a color, buena geometría y acabados, no requiere de soportes y puede implementar materiales reciclados. Sin embargo, los inconvenientes que presenta son: el material de impresión es limitado debido a que deben ser laminados y que los objetos fabricados necesitan postprocesamiento para la obtención de acabados de calidad [62]. A pesar de estas limitaciones, la fabricación de objetos laminados es una alternativa eficiente en términos de calidad y precio.

## **2.8. Materiales de fabricación aditiva.**

El material de fabricación es la materia prima mediante la cual se imprimirá el modelo digital. La impresión 3D permite elaborar objetos en tres dimensiones con geometrías complejas y con una amplia variedad de materiales. Los factores clave en la selección del material incluyen el punto de fusión, la capacidad de adhesión y unión de capas, así como las propiedades mecánicas y térmicas, la biocompatibilidad y las propiedades ópticas y transparencia [64]. Comprender estos parámetros facilitan y optimiza el proceso de fabricación, minimizando defectos como porosidad en la superficie y fragilidad ante fenómenos físicos y químicos. Entre los materiales más comunes de

impresión 3D se encuentra el PLA (ácido poli láctico), PET (polietileno tereftalato), ABS (acrilonitrilo butadieno estireno) y resina. No obstante, existen materiales cerámicos, orgánicos y metálicos. Esta clasificación se muestra en la **Tabla 1** [65].

### ***2.8.1. Ácido poli láctico (PLA)***

El ácido poli láctico (PLA) es un termoplástico derivado del almidón de maíz y es biodegradable, lo que ha incrementado su uso en aplicaciones de impresión 3D. Las impresoras FDM utilizan PLA como materia prima de construcción debido a su disponibilidad en una amplia gama de colores, sus propiedades medioambientales y su capacidad de admitir procesos de acabados. El punto de fusión del PLA está en un intervalo entre 160 y 220°C [65]. Este material ofrece un equilibrio entre la calidad de impresión y la sostenibilidad ambiental, presentándose como una alternativa eficiente en términos de producción.

### ***2.8.2. Polietileno tereftalato (PET)***

El polietileno tereftalato (PET) es un plástico de tipo poliéster saturado derivado del crudo o petróleo, utilizado en la tecnología FDM. Las características de este material abarcan una mayor solides en comparación de otros materiales como el ABS y el PLA. La presentación del material es en bobinas y la temperatura de fusión es de aproximadamente 220°C. No desprende olor y no necesita de una bandeja de precalentamiento para el proceso de impresión [65].

### ***2.8.3. Acrilonitrilo butadieno estireno (ABS)***

Acrilonitrilo butadieno estireno (ABS) es un termoplástico utilizado en impresoras de estereolitografía y deposición fundida. Este material posee un alto índice de resistencia a impactos y propiedades térmicas notables, soportando temperaturas bajas (-20°C) y elevadas (80°C). El ABS alcanza su punto de fusión a una temperatura aproximada de 225°C [65]. Es un material de

fácil acceso y se integra en una amplia variedad de aplicaciones, como elaboración de juguetes, materiales para el hogar, repuesto, entre otras disciplinas.

#### **2.8.4. Resina**

La resina es un material fotosensible, es decir, se solidifica rápidamente al exponerse a una fuente luminosa, como por ejemplo un rayo láser. El uso de la resina es común en impresoras de foto curado. La presentación de la resina es en forma líquida, aunque también puede encontrarse en forma de bobinas, dependiendo de la tecnología del sistema de impresión. Este material está disponible en colores como blanco, negro, y pueden tener acabados brillantes, matizados y transparentes [65].

**Tabla 1.** *Lista de materiales empleados para la fabricación 3D de autopartes.*

<b>Materiales orgánicos</b>	<b>Cerámicas</b>	<b>Plásticos</b>	<b>Metales</b>
Ceras	Mullita	Acrilonitrilo Butadieno Estireno (ABS)	Aluminio
Tejidos	Silicio	Ácido Poliláctico (PLA)	Acero
Papel	Resinas epoxi	Poliétileno Tereftalato (PET)	Inconel
	Sílice	Nylon	Cromo
	Yeso	Poliéter Éter Cetona (PEEK)	Resinas epoxi
	Grafito	Cobre	Acero inoxidable
		Polimetilmetacrilato (PMMA)	Oro
		Polifenilsulfona (PPSU - PPSF)	Hastelloy
		Poliamida reforzada	Titanio
		Ultem	
		Alumide	

Tomado de: Berchon Mathild, La impresión 3D: guía definitiva para makers, diseñadores, estudiantes, profesionales, artistas y manitas en general, 2016.

### **2.9. Casos de estudio sobre la aplicación de la digitalización e impresión 3D.**

Actualmente, la producción de componentes mediante impresión 3D se limita principalmente a partes no estructurales, como, manijas, rejillas, perillas y retrovisores [66]. No obstante, los casos

presentados a continuación demuestran que los procesos de digitalización e impresión 3D están marcando un punto de inflexión en la evolución de la industria automotriz.

### ***2.9.1. Aston Martin DBR22***

En el año 2022, Aston Martin presento su modelo DBR22 (**ver Figura 21**) en conmemoración del décimo aniversario de la serie Q de vehículos superdeportivos [67]. El DBR22 represento un hito para la marca, ya que fue el primer modelo en integrar tecnologías de impresión 3D para la fabricación de una de sus partes estructurales, específicamente, el subchasis trasero.

Para su producción se empleó fibra de carbono como material de impresión, lo que permitió una reducción significativa del peso total del vehículo y, en consecuencia, una mejora en su rendimiento y eficiencia. La implementación de esta tecnología también evidenció el potencial de la fabricación aditiva para optimizar estructuras complejas en vehículos de alto desempeño.

**Figura 21.** *Aston Martin DBR22*



Tomado de: 3D natives, Aston Martin utiliza la impresión 3D y la fibra de carbono para su nuevo DBR22, 2022.

### ***2.9.2. Pistones de Porsche 911 GT2 RS***

Porsche utiliza la fabricación aditiva para la producción de piezas de plástico y metal, piezas tales como soportes interiores, tableros, volantes, etc., Sin embargo, en colaboración con TRUMPF Y

MAHLE lograron producir pistones de alto rendimiento para su modelo insignia, el Porsche 911 GT2 RS.

Los pistones fueron fabricados mediante una impresora de tecnología SLS (Sinterizado Selectivo por Laser), utilizando como material un polvo de aleación de aluminio. Los pistones producidos mediante este proceso resultaron ser un 20% más livianos que los fabricados por métodos convencionales [60].

Además, programas de diseño 3D permitieron integrar conductos cerrados de refrigeración cerca de la cabeza del pistón (**ver Figura 22**) a fin de reducir el índice de carga térmica en el pistón y por ende mejorar la combustión, así aumentando hasta 30 CV del motor [68]. Tras someter cada pistón a 200 horas de pruebas, se concluyó que su durabilidad era equivalente a la de los pistones forjados, validando así la fiabilidad del proceso aditivo aplicado a componentes sometidos a altas exigencias mecánicas.

**Figura 22.** Pistón fabricado a partir de tecnología SLS- Porsche 911 GT2 RS



Tomado de: 3D print, Sarah Saunders, Piezas de coche impresas en 3D: Porsche presenta pistones impresos en 3D para el GT2 RS, 2020.

### ***2.9.3. NERA motocicleta impresa en 3D***

NERA es una motocicleta eléctrica desarrollada por Bigrep, fabricada íntegramente mediante la tecnología FFF (Fabricación de Filamento Fundido), también conocida como FDM (Modelado por Deposición Fundida). El prototipo consta de 15 piezas 3D totalmente funcionales, entre las que se incluyen la dirección, los asientos, los neumáticos, los parachoques, las manijas y el sistema de suspensión [69]. Las únicas partes no impresas fueron la batería, el motor, los cables y los controladores.

Para la fabricación, Bigrep empleó diferentes tipos de polímeros para la impresión de las piezas, tales como TPU, ProHT, PLA y PETG, seleccionados según la función mecánica de cada componente [69]. El parámetro de impresión utilizado fue un relleno del 12%, configuración óptima para la producción de piezas con geometrías complejas y secciones reducidas [61]. El resultado final se muestra en la **Figura 23**.

**Figura 23.** *NERA, la motocicleta impresa mediante tecnología FDM*



Tomado de: Bigrep, NERA: la primera motocicleta totalmente impresa en 3D del mundo, 2025.

## **2.10. Técnicas de validación de componentes**

En el sector automotriz, la validación de las refacciones es un paso relevante, ya que los componentes están sometidos a condiciones mecánicas de uso frecuente, que a su vez deben

mantener la seguridad, la calidad estética y durabilidad, durante el tiempo de vida útil. Existen métodos y criterios de validación de piezas 3D (polímeros y metales) que serán descritos a continuación.

### **2.10.1. Validación dimensional**

La validación dimensional consta en la comparación de la geometría de la pieza original con el modelo tridimensional. El objetivo principal es identificar diferencias dimensionales entre el modelo real y el informático.

Los programas CAD son herramientas ideales para la comparación dimensional entre modelos digitales con objetos reales [70]. De igual forma, la utilización de máquinas CMM facilita la obtención de medidas más precisas en regiones críticas [71].

El margen de error o las tolerancias aceptables entre el objeto impreso y la pieza real varían de acuerdo con el campo de aplicación y la tecnología de impresión aplicada. Por lo general en aplicaciones mecánicas e industriales, tolerancias de  $\pm 0,2$  mm son aceptables, sin embargo, para piezas menos críticas es válido hasta un margen de error de  $\pm 0,5$  % del tamaño nominal [72].

Para la obtención de las tolerancias comúnmente se usan herramientas como el micrómetro (mecánico o digital), el calibre pie de rey (longitudinal y profundidad), el medidor de rugosidad y alexómetros (**ver Figura 24**). Este tipo de validación es indispensable para garantizar que las piezas fabricadas tengan un correcto ajuste y compatibilidad con el vehículo

**Figura 24.** *Herramientas metrológicas para la obtención de tolerancias y desviaciones.*



Tomado de: Sin Par, Instrumentos de medición: ¿Qué son?, 2022

### **2.10.2. Validación mecánica**

La validación mecánica consiste en evaluar la resistencia y el comportamiento estructural ante distintas condiciones de carga. Este tipo de validación es indispensable, ya que determina si una pieza fabricada puede cumplir con funciones estructurales o semiestructurales en el vehículo. Existen dos tipos de ensayos, los ensayos destructivos y no destructivos [73].

Los ensayos destructivos buscan determinar cuanta carga puede soportar la pieza impresa, antes de la deformación y ruptura. Las pruebas más comunes que se realizan son: tracción, flexión, fatiga e impacto [74]. La validación mecánica de los elementos impresos se puede realizar cumpliendo las especificaciones establecidas por las normas ASTM D638 e ISO 527 [75], [76]. Las pruebas se realizan a través de máquinas universales como la EMIC-DL 10.000[77], la maquina se evidencia en **la Figura 25** [78]. Estos ensayos determinan el nivel de carga que un componente puede soportar antes de la ruptura, por lo general se mide en unidades de MPa.

**Figura 25.** *EMIC- DL 10.000 kN*



Tomado de: GdaQ, línea de sistemas de ensayos EMIC, 2025.

Por otra parte, los ensayos no destructivos tienen el mismo objetivo que los destructivos, la diferencia radica en que las pruebas se realizan a los modelos digitales, por medio de programas CAD, como SolidWorks y ANSYS. El proceso más común es el Análisis de Elementos Finitos (FEA), que consiste en dividir el modelo CAD en una malla interconectada por nodos [79]. El propósito es predecir el comportamiento del objeto al ser sometidos a condiciones de cargas como tensión, vibración, movimiento y calor.

En la investigación realizada por Alonso R. et al. [80], se determinó que ciertos parámetros, como la temperatura de la boquilla, la velocidad de impresión, el porcentaje de relleno y el espesor de cada capa, influyen directamente en las propiedades mecánicas de la pieza. Por esta razón, la validación mecánica es importante para que cada impresión cumpla con los estándares de calidad y seguridad.

### **2.10.3. Validación superficial o estética**

La validación superficial, consta de procesos en los cuales se determina la calidad de los acabados y la textura de las piezas 3D. El principal criterio de evaluación es la rugosidad de la superficie

(Ra, Rz), se mide mediante el uso de perfilómetros [81]. De igual manera, se toma en cuenta el acabado del elemento 3D, es decir que se comprueba si la pieza no presenta huecos o separación en sus capas, es de suma importancia ya que influye directamente en las propiedades mecánicas. Existen métodos de post-procesamiento encargados de mejorar la estética de la pieza. Estos procesos incluyen: lijado de superficies, métodos de granallado, alisado por vapor, uso de resina epoxi como recubrimiento y el mecanizado CNC [82].

### **2.11. Importancia del control de calidad.**

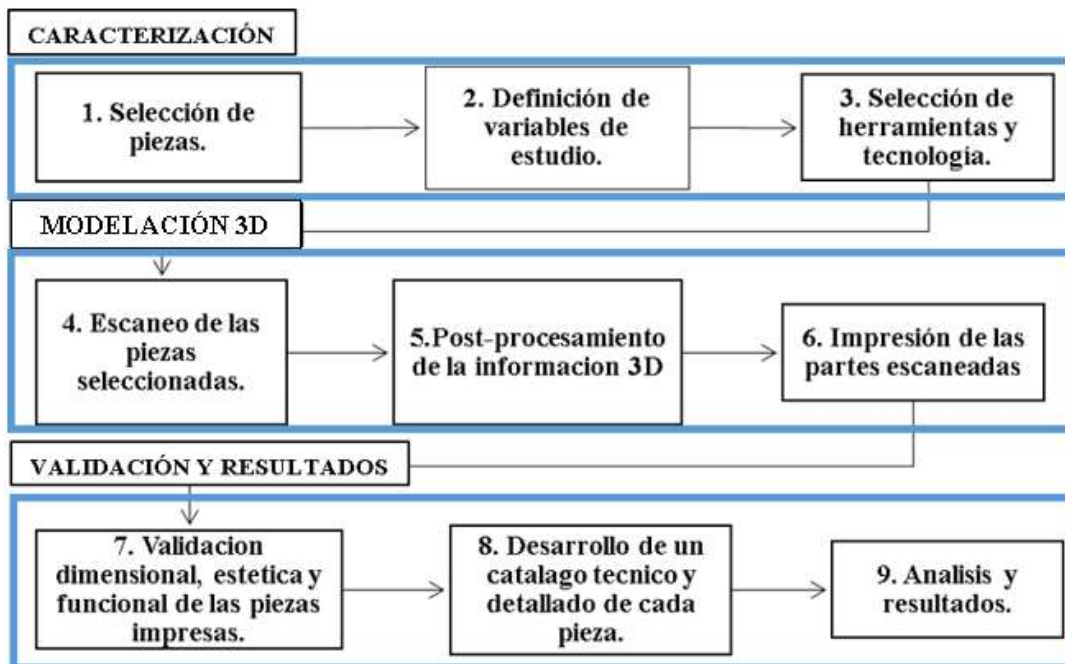
La validación de las piezas 3D son etapas clave en la transición hacia procesos de producción más sistémicos y precisos. Por medio de los ensayos dimensionales, mecánicos, funcionales y superficiales, se asegura que las piezas cumplan con las especificaciones ideales de diseño y desempeño en la industria automotriz.

## CAPITULO III

### 3. METODOLOGÍA

El presente estudio tiene un enfoque aplicado y experimental, orientado a la reconstrucción y replicación de piezas de un vehículo clásico mediante el uso de técnicas de digitalización e impresión 3D. Como se muestra en la **Figura 26** la metodología inicia con el proceso de la caracterización del vehículo, la cual comprende la selección de las piezas de estudio, seguida de la definición de las variables y la selección de las herramientas y tecnologías adecuadas. El segundo proceso consiste en la modelación 3D por luz estructurada y la fabricación aditiva de las piezas seleccionadas mediante el escaneo, el postprocesamiento de los modelos y la impresión 3D utilizando tecnología SLA. Para el tercer proceso se efectuó la validación de los procesos dimensionales, estéticos y funcionales. Finalmente, se desarrolló un catálogo técnico y detallado de las piezas digitalizadas e impresas, el cual integra la información generada durante toda la metodología. Finalmente se efectuó el análisis de los resultados.

**Figura 26.** *Flujograma del proceso metodológico*



### 3.1. Caracterización del vehículo y selección de piezas

#### 3.1.1. Ford LTD wagon (1975)

El Ford LTD station wagon es un vehículo clásico cuya producción se remonta a la década de 1960. Se caracteriza por su diseño tipo "familiar", con una parte trasera alargada que proporciona mayor espacio, tanto para ocupantes como para el equipaje (ver **Figura 27**). Es un vehículo que marcó un antes y un después, al incorporar un motor orientado a brindar confort y seguridad, junto con un diseño sofisticado, tanto en el interior como en el exterior, que lo distinguía de los demás vehículos de la época [83].

**Figura 27.** Ford LTD station Wagon.



#### 3.1.2. Selección de las piezas de estudio

Para la presente investigación, se seleccionaron piezas funcionales del vehículo Ford LT wagon, entre los componentes se encuentran: emblemas, manijas, retrovisores y cubiertas. Las partes que buscan ser digitalizadas son las siguientes:

- Tapa de un motor de arranque (Pieza de ejemplo para la metodología, **Figura 28**).
- Manija interior de la puerta (**Figura 29**).

- Elevavidrios (
- 
- Figura 30).
- Carcasa del tanque de agua (**Figura 31**).

Para la selección de las piezas de estudio se usará una matriz de calificación cualitativa, en el que se evaluarán criterios como: la relevancia funcional, dificultad para conseguir repuestos, complejidad geométrica, estado del componente original, viabilidad de impresión 3D y el requerimiento estético. Cada criterio divide la puntuación entre: baja (1 punto), media (2 puntos) y alta (3 puntos), tal y como se muestra en la **Tabla 2**. La calificación máxima es de 18 puntos.

**Tabla 2.** *Matriz de evaluación cualitativa para la selección de piezas de estudio.*

<b>Matriz de calificación cualitativa</b>					
<b>Criterio</b>	<b>Descripción</b>	<b>Baja (1)</b>	<b>Media (2)</b>	<b>Alta (3)</b>	<b>Puntaje</b>
Relevancia funcional	Importancia de la pieza en el funcionamiento del vehículo.				
Dificultad de adquisición de repuestos	Disponibilidad de repuestos en el mercado.				
Complejidad geométrica	Nivel de detalle que requiere digitalización 3D.				
Estado del componente original	Condición física de la pieza que se escaneó.				
Viabilidad de impresión 3D	Facilidad para fabricar la pieza con tecnologías aditivas.				
Requerimiento estético	Necesidad de lograr un acabado visual específico.				
Total					

La escala de aceptación se dividió en 3 categorías: altamente adecuado (15-18 puntos), medianamente adecuado (11-14 puntos) y no adecuado (10 puntos o menos). La ponderación se resume en la **Tabla 3**.

**Tabla 3.** *Escala de aceptación para la selección de las piezas.*

<b>Escala de aceptación</b>			
<b>Rango</b>	<b>Clasificación</b>	<b>Interpretación</b>	<b>Decisión</b>
15-18 puntos	Altamente adecuado	La pieza cumple ampliamente con los criterios funcionales, estéticos y técnicos	Aceptable
11-14 puntos	Medianamente adecuado	Cumple la mayoría de los criterios, pero podría mejorar	Aceptable con observación
10 puntos o menos	No adecuado	No cumple con los criterios propuestos	No aceptable

**Figura 28.** *Tapa trasera de un motor de arranque, pieza de ejemplo.*



**Figura 29.** *Manija de puerta (interior).*



**Figura 30.** *Levantavidrios.*



**Figura 31.** *Carcasa del deposito del tanque de agua.*



### ***3.1.3. Evaluación cualitativa de las piezas seleccionadas.***

Cada pieza fue sometida a una evaluación cualitativa para determinar si el componente es apto para ser digitalizado. Primero, se evaluó la pieza de ejemplo (tapa trasera de un motor de arranque) que sirve como referencia para la explicación de la metodología propuesta. En función de la matriz cualitativa se determinó que la pieza es aceptable, pero con observaciones (11-14 puntos), especialmente en los acabados superficiales, no obstante, esta en el rango de aceptación (13 puntos) (ver **Tabla 4**).

**Tabla 4.** Calificación cualitativa para la selección de la tapa del motor de arranque.

<b>Matriz de calificación cualitativa (Ejemplo: Pieza tapa motor de arranque)</b>					
<b>Criterio</b>	<b>Descripción</b>	<b>Baja (1)</b>	<b>Media (2)</b>	<b>Alta (3)</b>	<b>Puntaje</b>
Relevancia funcional	Es una pieza crítica del motor de arranque: sostiene el eje, mantiene la alineación interna y soporta carga mecánica. Su precisión es importante.			✓	3
Dificultad de adquisición de repuestos	Por ser de un vehículo antiguo, es difícil de encontrar como repuesto original, lo que justifica su reproducción.			✓	3
Complejidad geométrica	La geometría es principalmente circular y simétrica, pero incorpora embutidos, agujeros y un alojamiento central que exigen precisión.		✓		2
Estado del componente original	Presenta desgaste, corrosión superficial y deformaciones leves, pero aún conserva la forma necesaria para digitalizar.		✓		2
Viabilidad de impresión 3D	Puede imprimirse, pero los detalles del buje y las tolerancias internas podrían requerir ajustes o posprocesado adicional.		✓		2
Requerimiento o estético	No es visible externamente en el vehículo, por lo que no se requiere acabado estético elevado en comparación con otras piezas.	✓			1
<b>Total</b>					<b>13</b>

La manija de la puerta delantera (ver **Figura 29**) de una Ford LTD Wagon del año 1975, esta pieza fue seleccionada en función a la matriz de evaluación cualitativa propuesta. En función de los criterios se determinó que la pieza es altamente aceptable debido a que alcanzó un puntaje de 16 puntos sobre 18 en su evaluación (ver **Tabla 5**).

**Tabla 5.** *Matriz de calificación, manija de la puerta Ford LTD wagon 1975.*

<b>Matriz de calificación cualitativa, manija de la puerta</b>					
<b>Criterio</b>	<b>Descripción</b>	<b>Baja (1)</b>	<b>Media (2)</b>	<b>Alta (3)</b>	<b>Puntaje</b>
<b>Relevancia funcional</b>	La pieza permite la apertura y cierre de la puerta, siendo esencial para la operación del vehículo			✓	3
<b>Dificultad de adquisición de repuestos</b>	Al ser un modelo antiguo (1975), los repuestos originales son escasos o inexistentes.			✓	3
<b>Complejidad geométrica</b>	Su forma curva, superficies lisas y ranuras requieren digitalización cuidadosa.		✓		2
<b>Estado del componente original</b>	La imagen muestra desgaste superficial, pérdida de brillo y posibles daños por uso.		✓		2
<b>Viabilidad de impresión 3D</b>	Su tamaño y geometría son aptos para impresión FDM/SLA y posprocesado.			✓	3
<b>Requerimiento estético</b>	Requiere acabado cromado o pulido para imitar su apariencia original metálica.			✓	3
<b>Total</b>					16

La manija del elevador de vidrio (**ver Figura 30**), correspondiente a un vehículo Ford LTD Wagon del año 1975, fue seleccionada en función de la matriz de evaluación cualitativa propuesta. De acuerdo con los criterios establecidos, se determinó que esta pieza presenta un alto nivel de aceptabilidad, al alcanzar un puntaje de 16 puntos sobre 18 en su evaluación (**ver Tabla 6**).

**Tabla 6.** Evaluación cualitativa, elevador de vidrios.

<b>Matriz de calificación cualitativa, elevador de vidrios</b>					
<b>Criterio</b>	<b>Descripción</b>	<b>Baja (1)</b>	<b>Media (2)</b>	<b>Alta (3)</b>	<b>Puntaje</b>
<b>Relevancia funcional</b>	Grado de participación de la pieza en la operación manual del sistema de elevación del vidrio			✓	3
<b>Dificultad de adquisición de repuestos</b>	Piezas originales escasas en el mercado, en caso de encontrarlas se espera mínimo un mes para adquirirla. .		✓		3
<b>Complejidad geométrica</b>	Presenta geometría curva, superficies lisas y detalles de acople que requieren un proceso de digitalización 3D preciso.		✓		2
<b>Estado del componente original</b>	El componente presenta desgaste superficial, pérdida de acabado y marcas producto del uso prolongado.			✓	2
<b>Viabilidad de impresión 3D</b>	Su tamaño, geometría y espesores permiten su fabricación mediante tecnologías FDM o SLA, con requerimientos moderados de postprocesado.			✓	3
<b>Requerimiento estético</b>	Requiere un acabado superficial adecuado para mantener una apariencia similar a la pieza original y			✓	3
<b>Total</b>					16

La carcasa del tanque de agua (**ver Figura 31**) fue seleccionada mediante la aplicación de la matriz de evaluación cualitativa desarrollada en este trabajo. De acuerdo con los resultados obtenidos, la pieza alcanzó un puntaje de 17 puntos sobre 18 (**ver Tabla 7**), evidenciando un nivel de aceptabilidad muy alto. Este desempeño se explica por su función de protección del sistema de almacenamiento de agua, la limitada disponibilidad de repuestos originales y su elevada viabilidad para ser fabricada mediante tecnologías de impresión 3D, lo que justifica su inclusión en el proceso de digitalización y reproducción.

**Tabla 7.** Evaluación cualitativa, carcasa del tanque de agua.

<b>Matriz de calificación cualitativa, carcasa deposito del tanque de agua</b>					
<b>Criterio</b>	<b>Descripción</b>	<b>Baja (1)</b>	<b>Media (2)</b>	<b>Alta (3)</b>	<b>Puntaje</b>
<b>Relevancia funcional</b>	La carcasa cumple la función de protección del deposito del tanque de agua.			✓	3
<b>Dificultad de adquisición de repuestos</b>	La pieza original tiene una disponibilidad muy limitada en el mercado, siendo poco común encontrar repuestos compatibles para este modelo de vehículo.			✓	3
<b>Complejidad geométrica</b>	Su geometría incluye superficies planas, radios de unión y cavidades internas que requieren un escaneo y reconstrucción.		✓		2
<b>Estado del componente original</b>	El componente conserva su forma estructural, aunque presenta signos de envejecimiento y deterioro superficial			✓	2
<b>Viabilidad de impresión 3D</b>	La pieza es apta para impresión 3D debido a su geometría estable, espesores uniformes y ausencia de detalles extremadamente finos...			✓	3
<b>Requerimiento estético</b>	Presenta requerimientos estéticos moderados, ya que su función principal es protectora.			✓	3
<b>Total</b>					17

### 3.2. Definición de variables de estudio

En el desarrollo del proyecto, se identificaron y definieron variables que intervienen directamente con los procesos de recopilación de datos y fabricación 3D de las piezas. Definir y clasificar las variables de manera correcta, permite establecer parámetros técnicos que posteriormente serán evaluados y controlados, facilitando la interpretación de los resultados.

Las variables se clasificaron en tres categorías: independientes, dependientes y de control [84], en función a su rol dentro del proceso experimental, cada indicador se evidencia en la **Tabla 8**.

### ***3.2.1. Variables independientes***

Las variables independientes se refieren a los factores operativos y tecnológicos que son ajustados y controlados durante el proceso de investigación [84]. Los cambios influyen directamente en los resultados finales.

- Resolución del escaneo (mm) [72].
- Densidad de malla o número de polígonos [79].
- Reparación de malla [34].
- Compresión de nube de puntos [35].
- Suavizado de nube de puntos [34].

### ***3.2.2. Variables dependientes***

Las variables dependientes indican el grado de desempeño y precisión de las piezas obtenidas, es decir, son el resultado de las variables independientes y de control [84]. Incluye aspectos de tolerancia, resistencia mecánica y acabado superficial. Los indicadores principales son:

- Tolerancia (mm) [72].
- Rugosidad (Ra,  $\mu\text{m}$ ) [81].
- Resistencia mecánica (MPa) [75].

### ***3.2.3. Variables de control***

Las variables de control son indicadores que se mantienen constantes a lo largo de la investigación, con el propósito de evitar variaciones en los resultados [84]. Para la presente investigación, se toma en cuenta distintos criterios como el tipo de tecnología de digitalización, el tipo de impresión 3D, el material de fabricación aditiva, parámetros de impresión y las condiciones ambientales.

- **Tecnología de escaneo:** Luz estructurada.
- **Tecnología de fabricación:** SLA (estereolitografía).

- **Material de impresión:** ABS like (resina).
- **Parámetros impresión:** Porcentaje de relleno (%), Distancia entre capas (mm)[80].
- **Condiciones ambientales:** Temperatura (°C) [24].

**Tabla 8.** *Clasificación de variables*

<b>Variables</b>			
<b>Tipo de variable</b>	<b>Nombre de la variable</b>	<b>Unidades</b>	<b>Técnica e instrumentos</b>
<b>Independiente</b>	Resolución de escaneo	Mm	Revocan Scan 5 (software)
	Densidad de malla	—	SolidWorks®, Meshmixer®
	Reparación de malla	%	SolidWorks®, Meshmixer®
	Compresión de nube	%	Revocan Scan 5®
	Suavizado de nube	—	Revocan Scan 5®, Meshmixer®
<b>Dependiente</b>	Tolerancia	Mm	Calibrador pie de rey, micrómetro.
	Rugosidad superficial	µm	Rugosímetro
	Resistencia mecánica	MPa	SolidWorks®,
	Nivel de funcionalidad	—	evaluación cualitativa y ensamble
<b>Control</b>	Tecnología de digitalización	—	Luz estructurada (Revopoint Miracro Pro)
	Tecnología de impresión	—	SLA (Anycubic Photon Mono X 6K)
	Material de impresión	—	Resina ABS like
	Porcentaje de relleno	%	Chitubox®
	Distancia entre capas	Mm	Chitubox®
	Temperatura	°C	Termómetro / Sensor Ambiental

### **3.3. Selección de herramientas y tecnología.**

Las herramientas y tecnologías son recursos que optimizan la obtención y procesamiento de los resultados. Los materiales seleccionados buscan satisfacer los requisitos técnicos de la investigación. A continuación, se describen los elementos seleccionados y empleados para el proyecto.

#### **3.3.1. Escáner 3D**

El Revopoint Miraco Pro es un escáner 3D destinado para la digitalización precisa de objetos, desde elementos con detalles muy finos hasta objetos con áreas más extensas (ver Figura 32). El

dispositivo se basa en la tecnología de luz estructura, en el cual captura coordenadas tridimensionales del objeto a partir del uso de cuatro cámaras de profundidad. No obstante, integra una cámara RGB que permite percibir texturas y colores de los elementos. Entre las especificaciones más destacadas se encuentra su pantalla AMOLED y su sistema Android, lo que permite su facilidad de uso [85].

MIRACO PRO presenta un equilibrio entre calidad, costo y portabilidad, ofreciendo una alta gama de tecnología en un solo dispositivo compacto y versátil, ideal para varios campos de aplicación como: salud, arte, automoción, entre otros. Por estas razones, MIRACOPRO fue seleccionado para esta investigación, puesto que satisface los requerimientos técnicos del estudio. Las especificaciones del escáner se presentan en la tabla **Tabla 9** [86].

**Tabla 9.** *Especificaciones técnicas del dispositivo Revopoint MIRACO Pro 3D Scanner.*

<b>REVOPOINT MIRACO PRO 3D SCANNER</b>	
<b>Características</b>	<b>Descripción</b>
<b>Procesador</b>	CPU de 8 núcleos – 2,4 GHz (Android)
<b>Memoria</b>	16 GB o 32 GB de RAM
<b>Almacenamiento</b>	256 GB
<b>Pantalla</b>	6" - 2K AMOLED
<b>Conectividad</b>	Wi-Fi o USB tipo C
<b>Tecnología</b>	Luz estructurada
<b>Precisión</b>	De 0.05 mm hasta 0.02 mm
<b>Velocidad</b>	15 FPS
<b>Rango Min.</b>	28 x 53 mm
<b>Rango Max.</b>	975 x 775 mm
<b>Cámaras</b>	Cuatro cámaras de profundidad y una RGB (48 MEGAPIXELES)
<b>Modos</b>	Disparo continuo y único
<b>Batería</b>	5000 mAh
<b>Peso</b>	750 gramos

Tomado de: Maker Hacks, reseña Revopoint Miraco Pro 3D Scanner, 2025.

**Figura 32.** *Revopoint MIRACO PRO 3D Scanner.*



### **3.3.2. Impresora 3D**

Elegoo Saturn 2, es una impresora 3D diseñada por Elegoo para la fabricación aditiva de modelos digitales (ver **Figura 33**). Este dispositivo integra tecnología MSLA (Masked Stereolithography- Estereolitografía enmascarada), mediante el cual imprime modelos tridimensionales a partir del uso de resina líquida fotosensible, que se cura capa por capa por medio de luz Ultravioleta (UV) y una pantalla LCD que actúa como máscara de luz de la capa que se solidificará [87] .

Dado que el presente estudio exige un alto nivel de precisión y calidad en términos de geometría y estructura, la impresora 3D Saturn 2 resulta una opción adecuada, ya que sus especificaciones satisfacen con creces las necesidades que demanda la investigación. Las especificaciones técnicas del dispositivo se detallan en la **Tabla 10** [87] .

**Tabla 10.** Especificaciones técnicas Elegoo Saturn 2.

<b>ELEGOO SATURN 2</b>	
<b>Características</b>	<b>Descripción</b>
<b>Sistema</b>	Elegoo Saturn 2
<b>Operación</b>	Pantalla a color táctil de 3.5 pulgadas
<b>Software de corte</b>	Chitubox
<b>Conectividad</b>	USB memory stick
<b>Tecnología</b>	MLSA (Estereolitografía enmascarada)
<b>Fuente de luz</b>	COB (Chip On Board- Placa de circuito impreso), longitud de onda 405 nm
<b>Resolución eje XY</b>	0,0285 mm (7680x4320)
<b>Material impresión</b>	Resina fotosensible como la ABS like
<b>Velocidad impresión</b>	30-70 mm/h
<b>Volumen de impresión</b>	218,88 mm (largo) x 123,12 mm (ancho) x 250 mm (alto)
<b>Resolución eje Z</b>	0,00125 mm
<b>Espesor de la capa</b>	0,01 – 0,2 mm

Tomado de: Elegoo, Elegoo Saturn 2, 2025.

**Figura 33.** Anycubic Photon Mono X 6K



### **3.3.3. Programa de digitalización 3D**

Revocan Scan 5 es un software libre, compatible para todo escáner 3D desarrollado por la compañía Revopoint. Revocan presenta una interfaz versátil lo que a su vez permite su facilidad

de uso, entre las características más relevantes del programa se encuentran: calibración de las cámaras de profundidad y RGB, selección de modos de captura, compatibilidad para la exportación del modelo 3D, configuración de la precisión y velocidad de digitalización, entre otras funciones. Este Freeware a su vez permite escanear y editar la nube de puntos generada por el escáner y posteriormente producir el modelo tridimensional [88]. Los requisitos computacionales se evidencian en la **Tabla 11** [88].

**Tabla 11.** *Requisitos computacionales.*

<b>REVOCAN SCAN 5</b>		
<b>Especificaciones</b>	<b>Windows</b>	<b>Recomendado</b>
<b>Sistema mínimo</b>	Win 10/11 (64 bits)	macOS 11.0 o posterior
<b>Sistema recomendado</b>	Win 10/11 (64 bits)	macOS 11.0 o posterior
<b>RAM mínimo</b>	RAM: $\geq 16$ GB	RAM: $\geq 8$ GB
<b>RAM recomendado</b>	RAM: $\geq 32$ GB	RAM: $\geq 16$ GB
<b>CPU mínimo</b>	Intel i7 de 12. <sup>a</sup> generación o superior	M1 Pro o superior
<b>CPU recomendado</b>	Intel i9 de 11. <sup>a</sup> generación o superior	M3 o mejor

Tomado de: Revopoint, Revo Scan 5 manual de usuario, 2025.

### **3.3.4. Programa de procesamiento de malla**

Meshmixer es un software abierto desarrollado por Autodesk con el propósito de brindar soluciones de modelado e impresión 3D al usuario. El funcionamiento de Meshmixer se basa en la creación de un elemento a partir de otra pieza creada anteriormente, representada en mallas triangulares (ver **Figura 34**) [89]. Entre las funciones más relevantes del software se encuentran: fusión de mallas, suavizado de malla, vaciado, creación de estructuras de soporte, exportar a formatos STL, OBJ y AMF, simplificación de malla, relleno de agujeros, entre otras opciones [90]. El modelado de una pieza es una etapa indispensable en la fabricación aditiva de un objeto, ya que un correcto procesamiento de la nube de puntos permite detectar y corregir errores que pueden afectar la impresión 3D. Por esta razón el software Meshmixer es el adecuado.

**Figura 34.** Representación de un objeto en mallas triangulares.



### ***3.3.5. Programa CAD de simulación***

SolidWorks es un programa CAD (Diseño Asistido por Computadora) basado en la creación, modificación y modelado de sólidos en tres dimensiones [91]. El uso de programas CAD, posterior a la digitalización de un objeto, representa una etapa importante en el proceso de desarrollo, ya que permite realizar ajustes, modificación y correcciones de errores antes de proceder a la fabricación. SolidWorks se posiciona como una herramienta ideal puesto que ofrece una adaptabilidad a múltiples aplicaciones y brinda una interfaz intuitiva, permitiendo su facilidad de uso tanto para usuarios aficionados como avanzados.

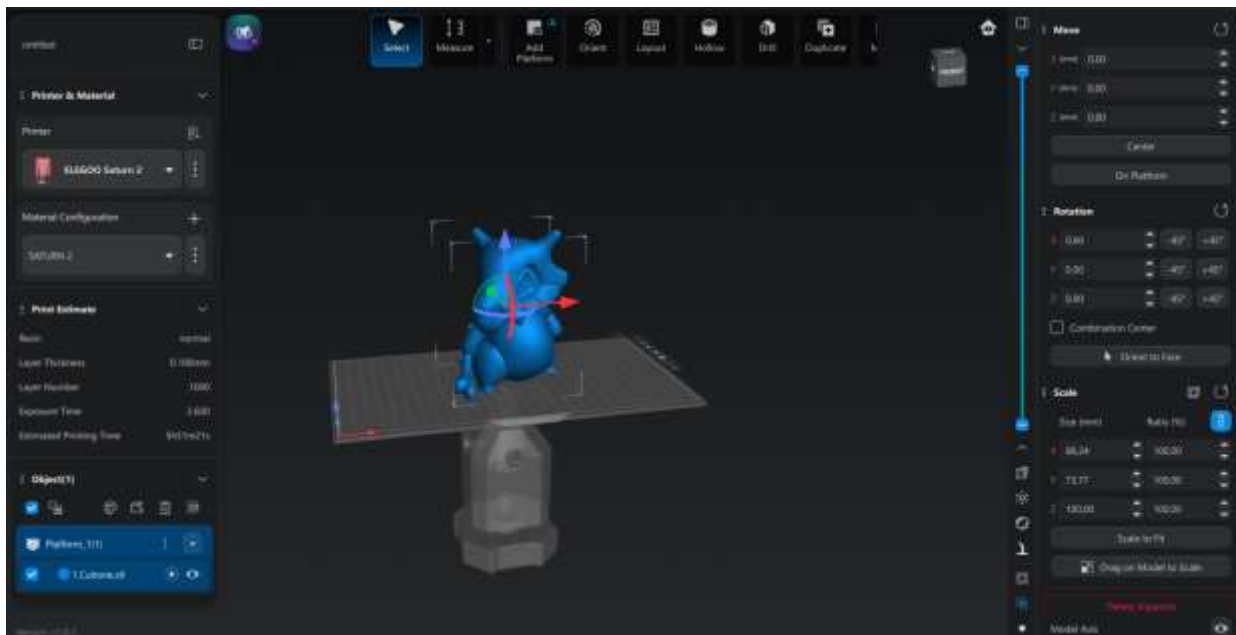
### ***3.3.6. Programa de laminado.***

Chitubox es un freeware de laminado para fabricación aditiva, desarrollado por la empresa ChiTu Systems (ver **Figura 35**). Es compatible con impresoras que utilizan tecnologías LCD (estereolitografía por enmascaramiento), DLP (procesamiento digital de luz) Y SLA

(estereolitografía), las cuales integran resina líquida fotosensible como material y luz ultravioleta (UV) para curar cada capa generada por la impresora [92].

El software permite importar modelos tridimensionales en formatos STL, OBJ o 3MF. Posteriormente, Chitubox corta/rebana (Slicing) y convierte el modelo 3D en imágenes bidimensionales y en un archivo que gestiona la exposición de la luz UV y el desplazamiento de la plataforma en el eje z, también conocido como código G. Entre sus principales funcionalidades se encuentran: la configuración de la velocidad de impresión, la selección del grosor y altura de capa, la determinación del número de capas, etc. Además, Chitubox es compatible con el firmware de las impresoras fabricadas por Revopoint, lo que lo convierte en el software de laminado más adecuado para la impresión de las piezas en este proyecto.

**Figura 35.** *Interfaz del slicer Chitubox*



### **3.3.7. Material de impresión: resina ABS**

Existen distintos tipos de resina líquida en el mercado, sin embargo, la resina ABS es uno de los más populares debido a su amplia disponibilidad y su alta comercialización. Este tipo de resina es

similar al plástico ABS, y se comporta como un material foto polimérico, es decir, cambia sus propiedades al ser expuesto a la luz ultravioleta [94].

La resina ABS es compatible con impresoras 3D que utilizan tecnologías DLP, SLA y LCD. Además, ofrece beneficios para las impresiones 3D, proporcionando un alto nivel de rigidez y estabilidad estructural. A continuación, se presentan sus propiedades más destacadas en la **Tabla 12** y **Tabla 13**[93].

**Tabla 12.** *Propiedades técnicas de la Resina ABS*

<b>Especificaciones técnicas Resina ABS</b>		
<b>Parámetros</b>	<b>Valor</b>	<b>Unidades</b>
Resistencia a la tracción	40-60	MPa
Módulo de tracción	1500-2000	MPa
Resistencia a la flexión	60-90	MPa
Módulo de flexión	1800-2300	MPa
Temperatura de deflexión térmica (0.45 MPa)	50-70	°C
Temperatura de deflexión térmica (1.8MPa)	45-50	°C

Tomado de: Manfacter, Impresión 3D con resina ABS-like, 2025.

**Tabla 13.** *Especificaciones de diseño Resina ABS*

<b>Especificaciones de diseño de la Resina ABS</b>		
<b>Parámetros</b>	<b>Valor</b>	<b>Unidades</b>
Tecnología de fabricación	SLA	—
Altura de capa	0.03, 0.05 y 0.1	mm
Relleno por defecto	100	%
Precisión	±0.1	%
Tamaño mínimo de detalle	0.2	mm
Grosor mínimo de pared	1.0	mm
Relieve	2.0	mm
Grabado	0.5	mm
Dimensiones máximas	245x228x128	mm

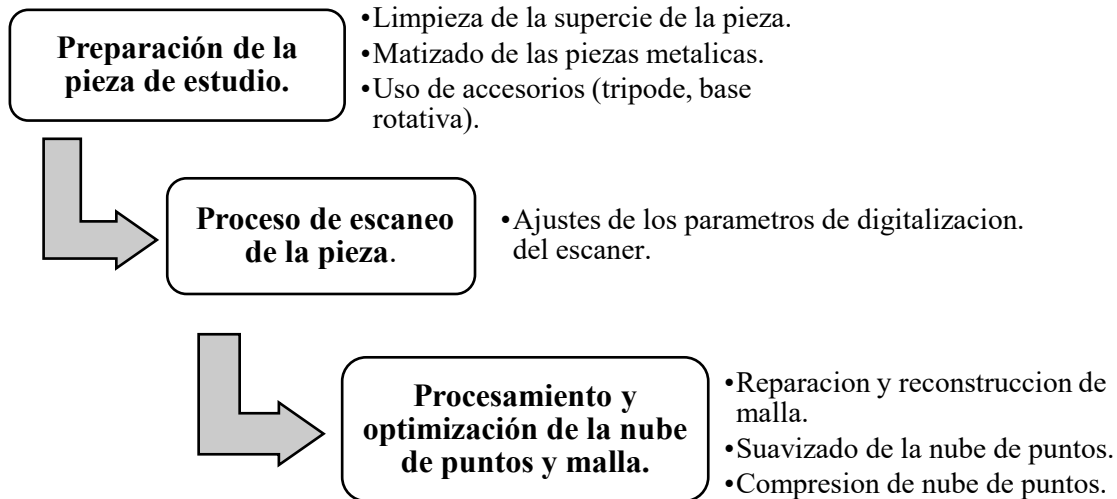
Tomado de: Manfacter, Impresión 3D con resina ABS-like, 2025.

### **3.4. Recopilación de datos de las piezas seleccionadas**

La digitalización de las piezas de estudio y el procesamiento de la nube de puntos es una etapa importante, que se basa en el uso de herramientas y tecnología, con el fin de obtener el modelo

digital de la pieza real. Esta fase se divide en: preparación de la pieza de estudio, escaneo de la pieza, procesamiento y optimización de la nube de puntos (ver **Figura 36**).

**Figura 36.** *Flujo de trabajo para la digitalización de las piezas de estudio.*



### **3.4.1. Preparación de la pieza de estudio**

Antes del proceso de digitalización, es necesario seleccionar la pieza basándonos en la matriz de calificación cualitativa propuesta en la Tabla 3. Para la explicación de este apartado se usa como pieza de referencia una tapa trasera de la carcasa del motor de arranque, la cual es sometida a fuerzas de empuje por el eje del rotor.

Acondicionar el objeto de estudio tiene el objetivo de evitar errores en la recopilación de datos. En esta etapa, se eliminan la suciedad, las grasas y las impurezas presentes en la pieza mediante el uso de Thinner Laca 104 SM-07, un disolvente adecuado para la preparación de superficies metálicas [94]. Para la limpieza de superficies plásticas es recomendable emplear agua y jabón, evitando el uso de solventes, ya que pueden deteriorar o disolver el material [95]. Es necesario señalar que las superficies brillantes, oscuras o con patrones repetitivos no son las ideales para la digitalización [22]. Las piezas utilizadas en la presente investigación presentan características brillantes y

cromadas. Por esta razón, se aplicó a cada elemento una capa de pintura en aerosol Evans SAE 1007 Blanco Mate, con la finalidad de minimizar desviaciones en la obtención de la geometría del componente, dado que el escáner empleado opera con luz estructurada. Cada capa de pintura del aerosol genera un espesor aproximado de 20  $\mu\text{m}$  sobre la superficie de la pieza [96], por ello, es conveniente reducir su espesor mediante lijas húmedas de carburo de silicio Fandelid – 1200 (micro fino), adecuadas para lacas y pintura [97]. Finalmente se prepara los accesorios del escáner, tales como el trípode y la basa giratoria con la intención de facilitar la correcta obtención de la nube de puntos. Los materiales empleados se muestran en la **Figura 37**.

**Figura 37.** *Materiales empleados para la limpieza, abrasión, digitalización y preparación superficial de las piezas.*



Las piezas sometidas a los procesos de adaptación o acondicionamiento se visualizan en la **Figura 38**. Aplicar estas técnicas en las piezas con superficies y geometrías complejas facilitan la obtención de su respectivo modelo digital.

**Figura 38.** Piezas sometidas a procesos de acondicionamiento.



### 3.4.2. Proceso de escaneo de la pieza

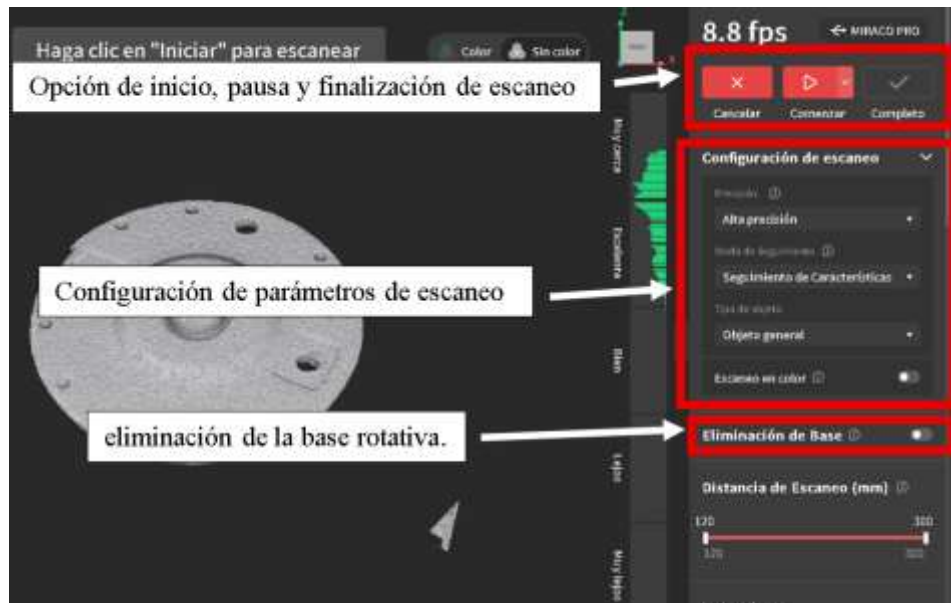
La digitalización de la pieza consta de procesos en los cuales el objeto será captado tridimensionalmente con ayuda de herramientas y tecnologías especializadas, como el escáner de luz estructurada y los softwares de procesamiento de nube de puntos. Después de la preparación de la pieza es necesario vincular el escáner (MiracoPro) con la computadora, por medio de un cable de conexión de tipo C. Otro aspecto importante es la regulación de la distancia entre el objeto seleccionado y la cámara de profundidad del dispositivo de escaneo. El escáner posee dos modos de digitalización que son: el modo continuo y disparo único. La distancia de trabajo va desde 100 mm hasta 1000 mm [85]. Por lo general la distancia se puede ajustar por medio de la interfaz del programa Revo Scan 5, se puede evidenciar en la **Figura 39**.

**Figura 39.** Interfaz para el ajuste de distancia de escaneo



Posteriormente, se elimina la basa rotativa, se selecciona parámetros de precisión, el tipo de seguimiento, el tipo de objetivo y se inicia la digitalización, mediante opciones de la interfaz del programa, tal y como se muestra en la **Figura 40**. Para este punto se emplea la base rotativa y el trípode con la finalidad de aportar estabilidad y precisión en los datos recopilados. Todas estas variables se resumen en la **Tabla 14**.

**Figura 40.** *Ajustes de digitalización*



**Tabla 14.** *Parámetros previos a la digitalización de la pieza de estudio.*

Parámetros de digitalización	
Tipo de ajuste	Opción y rangos
Modo de digitalización	Continuo/ Disparo único
Precisión	Precisión alta/ Precisión estándar/ Alta velocidad
Seguimiento	Seguimiento de características/ Seguimiento de marcadores
Tipo de objeto	Objeto general/ Objeto oscuro
Escaneo en color	On/Off
Eliminación de base	On/Off
Distancia de escaneo (mm)	120-300

### 3.4.3. Procesamiento y optimización de la nube de puntos y malla

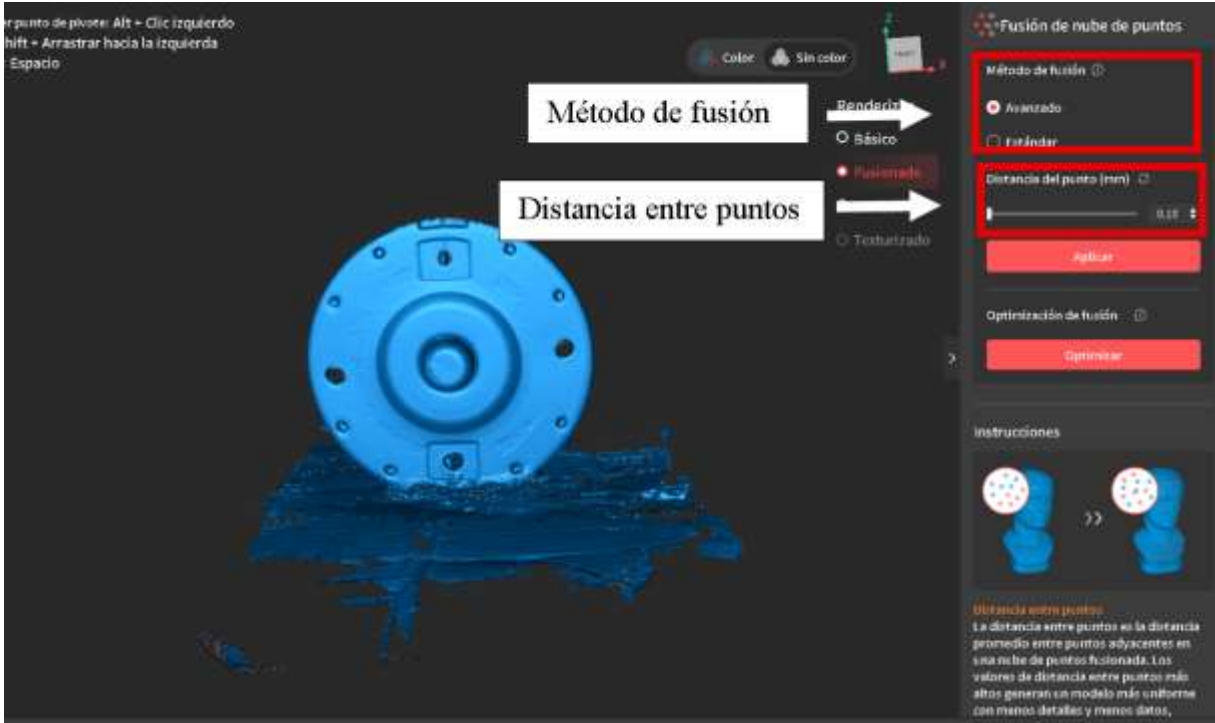
El procesamiento y optimización de la nube de puntos, es una etapa fundamental, puesto que consta de procesos en los cuales se identifican y corrigen errores durante el proceso de digitalización. En esta fase se aplica técnicas de edición tanto en la malla del objeto como en la nube de puntos. Los métodos aplicados son: fusión de nube puntos, aislamiento de nube de puntos, construcción de malla, detección de agujeros, entre otras opciones [88]. Cada técnica se evidencia en la interfaz de la **Figura 41**.

**Figura 41.** Opciones de edición de nube de puntos y malla.



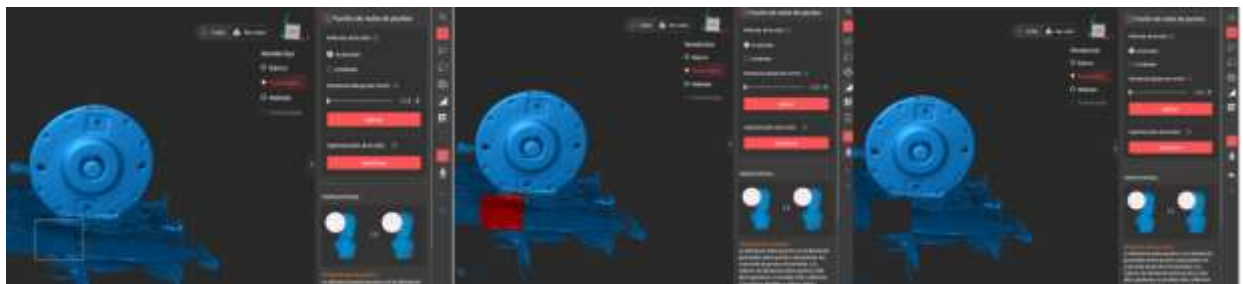
Los procesos de edición de nube de puntos permiten fusionar los datos escaneados con la finalidad de obtener un modelo coherente y preciso, para esto es necesario seleccionar el método de fusión (Avanzado y Estándar) y la distancia de separación de la nube de puntos (mm) (**ver Figura 42**). La distancia de separación define la calidad y detalles del modelo fusionado, para distancias mas cortas el modelo generado cuenta con muchos mas detalles, por el contrario, para valores de distancia mas altos se obtienen modelos menos definidos y mas uniformes [88].

**Figura 42.** *Parámetros de edición para la fusión de nube de puntos.*



El programa permite editar y recortar zonas en las cuales dificultan la fusión de la nube de puntos, por esta razón existen marcadores con la capacidad de seleccionar secciones específicas y eliminarlas del modelo principal (ver Figura 43).

**Figura 43.** *Eliminación de secciones.*



Otros procesos correspondientes a la edición de la nube de puntos es el aislamiento, la detección de superposición, el suavizado y la simplificación de nube de puntos (ver Figura 44) [88]. El propósito del aislamiento de la nube de puntos es eliminar coordenadas ajenas al modelo 3D principal. La detección de superposición permite detectar y corregir puntos repetitivos en el

proceso de escaneo. El suavizado tiene la capacidad de mejorar la superficie del objeto escaneado, optimizando rastros de imperfecciones, no obstante, la aplicación continua de esta técnica tiende a disminuir el nivel de detalles de la nube de puntos. Finalmente, la simplificación de nube puntos facilita disminuir el uso de recursos computacionales, permitiendo disminuir el tiempo de procesamiento. Las variables se resumen en la **Tabla 15**.

**Figura 44.** Edición de la nube de puntos.



**Tabla 15.** Parámetros de edición de la nube de puntos generada por el escáner.

Parámetros de edición de nube de puntos	
Tipo de ajuste	Opción y rango
Método de fusión de nube de puntos	Avanzado/Estándar
Distancia de separación de puntos (mm)	0.10-2.0
Tasa de aislamiento de nube de puntos (%)	0.5-100
Detección de superposición (mm)	0.01-0.50
Fuerza de suavizado	3-20
Veces de suavizado	1-50
Simplificación de nube de puntos (%)	1-100

La construcción de malla es una fase posterior a la fusión de la nube puntos, se basa en la unión de las coordenadas mediante cuadrículas o polígonos, el tamaño de los polígonos define la calidad superficial y estética del modelo tridimensional [88]. La edición de malla posee ajustes similares a la edición de la nube de puntos, tales como: la simplificación de malla, el suavizado, el aislamiento y la detección de agujeros. Todas estas alternativas tienen el mismo principio de funcionamiento de la edición de la nube de puntos, sin embargo, la función de la detección de agujeros se diferencia del resto, puesto que permite al usuario cerrar superficies que el escáner no

logro digitalizar. El objeto 3D finalizado se puede evidenciar en la **Figura 45**. De igual forma los ajustes de edición y reconstrucción de la malla se encuentran en la **Tabla 16**.

**Figura 45.** *Detección y cierre de agujeros y finalización del modelo digitalizado.*



**Tabla 16.** *Ajustes de edición y reconstrucción de malla.*

<b>Parámetros de edición y reconstrucción de la malla</b>	
<b>Tipo de ajuste</b>	<b>Opción y rango</b>
Tamaño de polígonos o cuadrículas (mm)	0.04-4.81
Mallas aisladas (%)	1-100
Cerrar agujeros	Plano/Curva
Fuerza de suavizado de malla	0.1-1.0
Veces de suavizado de malla	1-20
Simplificación de malla (%)	1-100

Después de finalizar la edición de la nube de puntos y de la malla del modelo digital se observa que existen superficies que no están totalmente definidas, la solución ante este problema es la exportación de la malla construida en formato STL a un programa de edición de mallas como Meshmixer, con el propósito de reconstruir las superficies restantes. Con ayuda de herramientas como la opción de esculpir se logro generar la sección faltante de la pieza 3D [90]. Los resultados se pueden evidenciar en la **Figura 46**.

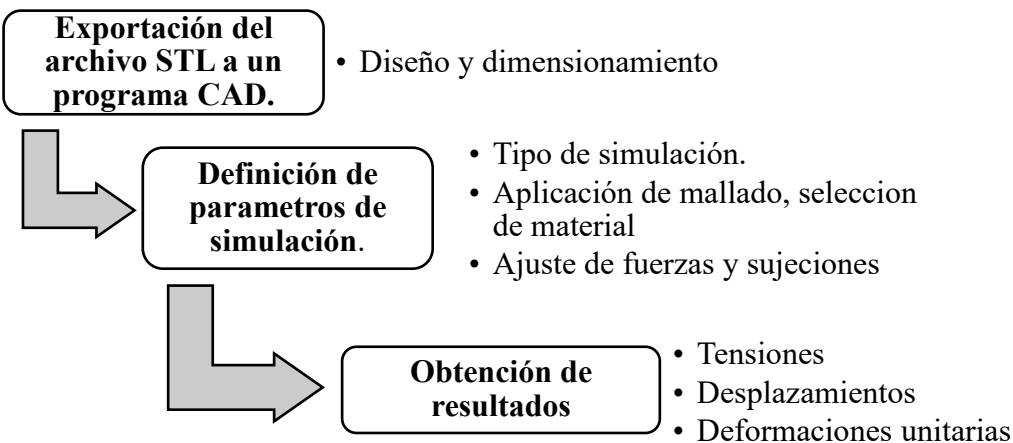
**Figura 46. Pieza reconstruida**



### 3.5. Post-procesamiento de la información 3D

Las piezas digitalizadas no pueden ser transformadas a un archivo CAD debido a que el escáner no distingue caras, es decir, capta todo el objeto como una sola superficie. Por esta razón es difícil realizar simulaciones o pruebas no destructivas a las piezas escaneadas. Sin embargo, el archivo STL generado por los programas y el dispositivo de digitalización sirven como referencias para la generación y replicación de un modelo CAD a partir de la información recopilada y procesada. Esta fase se divide en: exportación del archivo STL, definición de parámetros de simulación y obtención de tipos de resultados (ver Figura 47).

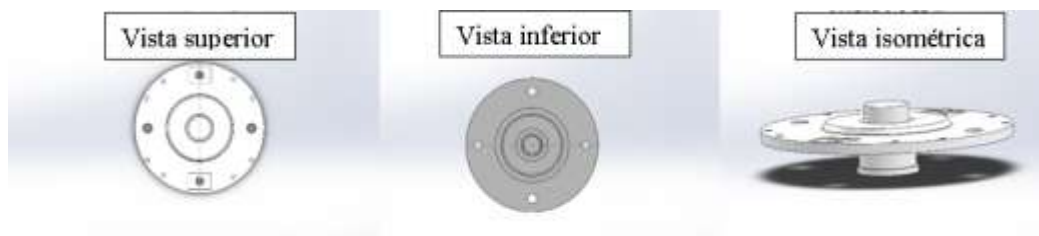
**Figura 47. Proceso de simulación de la pieza de estudio.**



### ***3.5.1. Exportación del archivo STL a un programa CAD***

La malla generada mediante el uso de herramientas de digitalización y edición se exporto a un programa CAD, en este caso es el software SolidWorks®. El archivo STL no se puede transformar en un solido debido a que no tiene la capacidad de identificar caras, aristas y superficies, puesto que identifica los datos como un único solido. Por esta razón, el archivo STL sirve como referencia para el diseño y dimensionamiento de la pieza, lo que permite comparar y corroborar errores con respecto a la precisión de medidas entre el objeto original y el modelo digital. La pieza diseñada se observa en la **Figura 48**.

**Figura 48.** *Diseño y dimensionamiento de la tapa de la carcasa de un motor de arranque.*



### ***3.5.2. Selección de parámetros de simulación***

El objeto dimensionado se sometió a simulaciones ante cargas que representan condiciones reales de funcionamiento, con el propósito de analizar el comportamiento de la pieza cuando se someten a fuerzas exteriores. La simulación tiene el propósito de predecir y corregir errores estructurales o geométricos que puedan afectar de manera directa en las propiedades mecánicas del modelo tridimensional [79]- La pieza previamente rediseñada es sometida a ensayos de simulación estática, estas pruebas se basan en la aplicación de fuerzas exteriores, mediante la aplicación de Análisis de Elementos Finitos (FEA), que en términos generales consta en dividir el modelo 3D en mallas poligonales [79]. Primero, es indispensable seleccionar el material de la pieza que se implementara para su respectiva fabricación.

Posteriormente, se definen parámetros como el tipo de sujeción, las cargas externas aplicadas al elemento y el tipo de mallado (muy gruesa/fino). La selección correcta de estas directrices permite obtener resultados mas precisos. Todo el proceso se observa en la **Figura 49**

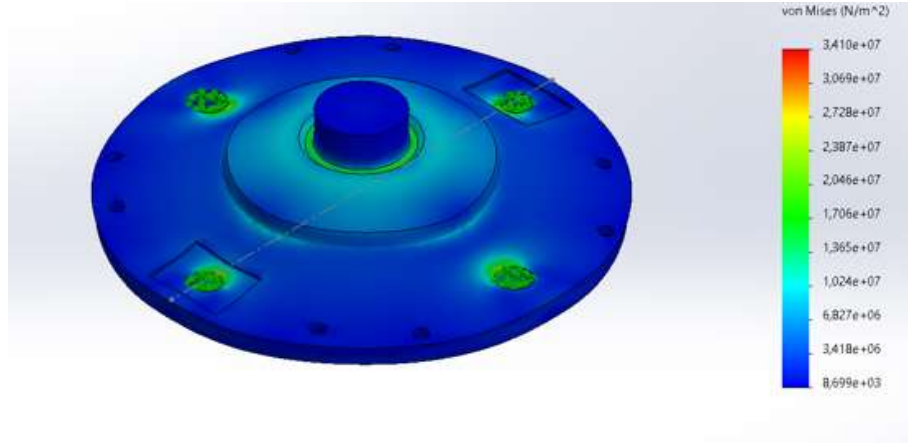
**Figura 49.** Selección de parámetros de simulación.



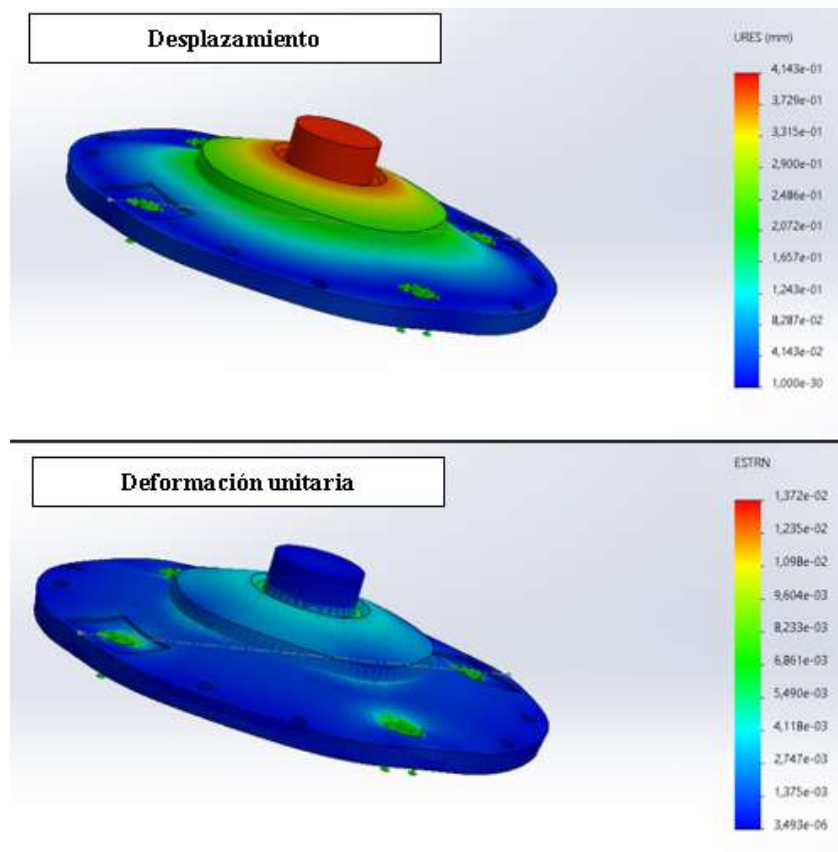
### **3.5.3. Obtención de resultados**

En el análisis por elementos finitos se utilizan tres indicadores clave: el esfuerzo de Von Mises, el desplazamiento y la deformación unitaria [91]. El esfuerzo de Von Mises resume en un solo valor la combinación de tensiones que actúan en un punto, permitiendo verificar si el material se acerca a su limite elástico (**ver Figura 50**). El desplazamiento muestra cuánto se mueve cada zona de la pieza cuando se aplica la carga, mientras que la deformación unitaria refleja el cambio proporcional de forma que experimenta el material (**ver Figura 51**) [98]. Estos parámetros permiten comprender tanto el comportamiento general de la estructura como la respuesta interna del material.

**Figura 50.** Tensión Von Mises.



**Figura 51.** Resultados con respecto a desplazamientos y deformaciones unitarias.

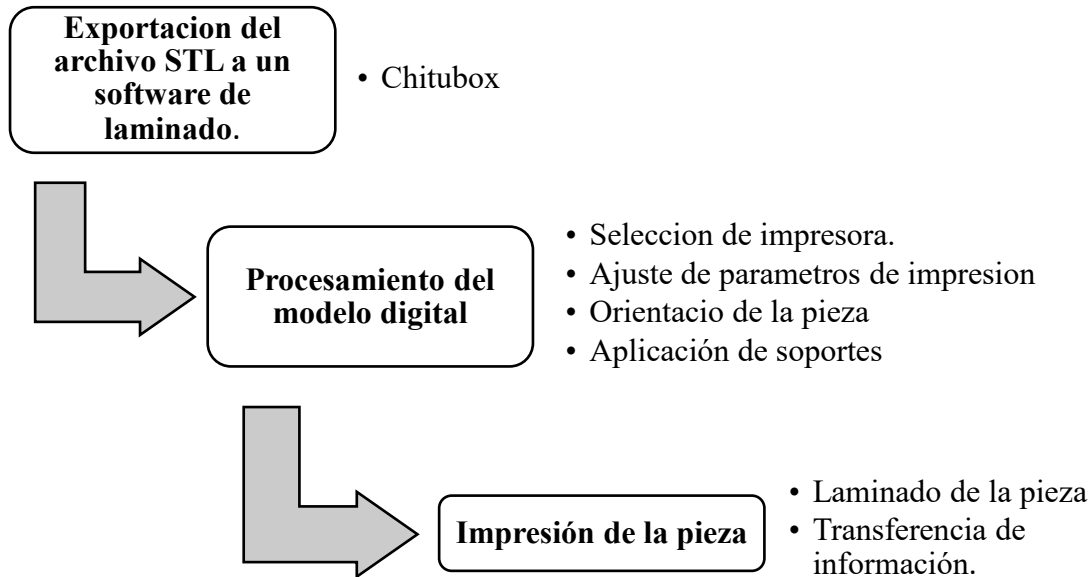


### 3.6. Impresión de las partes escaneadas

El proceso de impresión 3D es una fase en la cual un objeto digitalizado es fabricado mediante la utilización de una impresora con tecnología SLA, para esta ocasión la Anycubic Photon Mono X

6K. Esta etapa se divide en: exportación del archivo STL a un software de laminado, definición de parámetros de impresión e impresión de la pieza (ver Figura 52).

**Figura 52.** *Flujograma de trabajo para la impresión de un modelo digital.*



### ***3.6.1. Exportación del archivo STL a un software de laminado***

Para la impresión de un modelo digital es fundamental utilizar un software de laminación. Existe una gran variedad de programas de uso libre, entre ellos destaca Chitubox®. Es un programa usado en impresión 3D por resina, compatible con el modelo de impresora seleccionado para la investigación. Entre las funciones más importantes se encuentran: dividir el modelo en capas 2D, procesar modelos 3D, definir parámetros de impresión y generar soportes [92]. Estas características facilitan obtener un proceso de impresión eficiente y preciso, lo que a su vez permite exportar y procesar el archivo STL de la pieza digitalizada.

### ***3.6.2. Procesamiento del modelo digital***

Definir la orientación de la pieza y la aplicación de soportes garantizan una buena impresión, debido a que puede ahorrar tiempo y material de fabricación [99]. Los soportes permiten evitar el

contacto directo entre la pieza con la bandeja de impresión, lo que facilita su remoción y posterior limpieza. Por otro lado, la inclinación del objeto determina si es necesario la aplicación de soportes, inclinaciones inferiores a  $60^\circ$  reduce el uso de soportes, mientras que una inclinación superior a  $60^\circ$  crea la necesidad de implementar soportes en el modelo digital. Esta etapa se puede evidenciar en la **Figura 53**.

**Figura 53.** *Procesamiento del modelo digital mediante Chitubox.*



### **3.6.3. Impresión de la pieza**

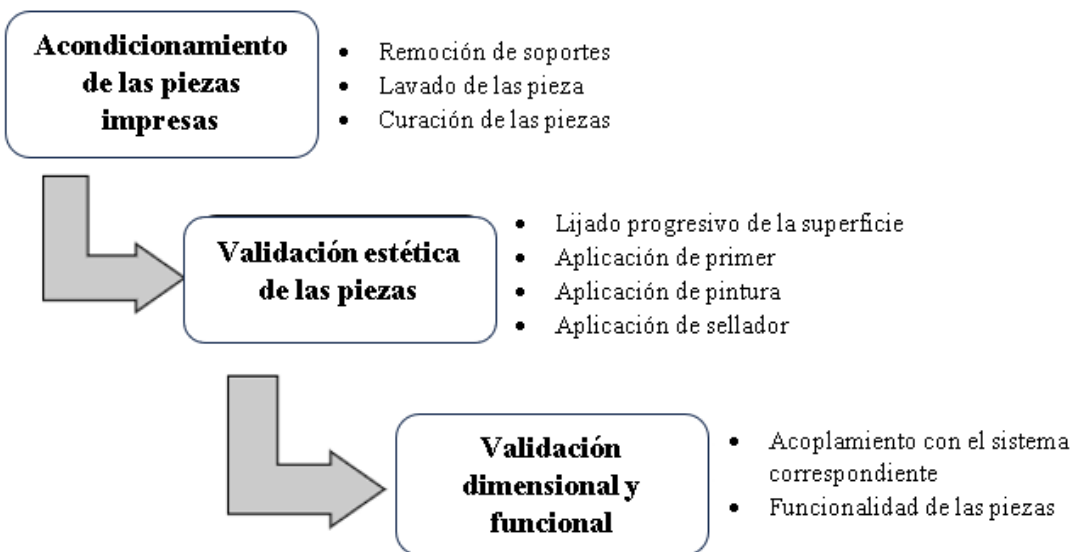
La impresión de la pieza es el proceso en el cual el modelo digital procesado, es guardado y exportado a un dispositivo de almacenamiento, por lo general suele ser una memoria USB. La calidad del modelo impreso depende directamente del correcto procesamiento de la información.

### **3.7. Validación dimensional, estética y funcional de las piezas impresas**

En la **Figura 54** se presenta el proceso integral de acondicionamiento y validación aplicado a las piezas impresas en 3D, el cual inicia con el acondicionamiento de las piezas, que comprende la remoción de soportes, el lavado y la curación, con el fin de eliminar residuos del proceso de fabricación y garantizar la estabilidad del material. Posteriormente, se realiza la validación estética mediante un lijado progresivo de las superficies y la aplicación de primer, pintura y sellador, evaluando la calidad superficial, el acabado visual y la uniformidad de las piezas en comparación

con los componentes originales del vehículo. A continuación, la validación dimensional se lleva a cabo verificando las dimensiones críticas de las piezas impresas y comparándolas con el modelo digital y la pieza original, asegurando el cumplimiento de las tolerancias necesarias para un correcto ensamblaje. Finalmente, la validación funcional consiste en el acoplamiento de las piezas al sistema correspondiente del vehículo, evaluando su ajuste, estabilidad y correcto funcionamiento, con el objetivo de confirmar que las piezas fabricadas cumplen con los requisitos técnicos y funcionales establecidos.

**Figura 54.** *Proceso de validación estética, dimensional y estética de las piezas impresas.*



### **3.8. Desarrollo de un catálogo técnico y detallado de cada pieza.**

En este apartado final se presenta el catálogo de las piezas fabricadas mediante impresión 3D, cuyo objetivo es organizar de manera sistemática la información técnica relevante de cada componente desarrollado a lo largo del proceso metodológico.

Para cada pieza se describen los aspectos relacionados con la obtención del modelo digital, los parámetros de fabricación, los procesos de post-procesamiento y los criterios de evaluación funcional y comparativa respecto a las piezas originales. La elaboración de este catálogo permite

asegurar la trazabilidad y reproducibilidad del procedimiento, además de establecer una base estructurada para el posterior análisis de resultados. Para el desarrollo del catálogo de cada pieza se emplea la matriz presentada en la **Tabla 17**.

**Tabla 17.** *Ejemplo de matriz para el desarrollo del catalogo de las piezas.*

<b>CATÁLOGO DE LAS PIEZAS FABRICADAS</b>			
<b>Información general</b>	<b>Pieza 1</b>	<b>Pieza 2</b>	<b>Pieza 3</b>
Código			
Sistema			
Material			
Peso			
Precio			
Recubrimiento			
<b>Información de fabricación</b>			
Consumo (ml)			
Tiempo de impresión (h, m, s)			
Tecnología impresión			
Tipo de soportes			
Tecnología de escaneo			
Tiempo digitalización (m)			
<b>Propiedades mecánicas</b>			
Esfuerzo por flexión (MPa)			
Esfuerzo cortante (MPa)			-
Deflexión (mm)			
Deformación unitaria (%)			
Factor de seguridad			
Esfuerzo por torsión (MPa)			
<b>Fotografía</b>			

## CAPITULO IV

### 4. ANALISIS Y RESULTADOS

La presente sección expone el análisis y los resultados obtenidos durante el proceso de caracterización, digitalización, modelado y fabricación de las piezas seleccionadas de un vehículo clásico. A partir de los datos recopilados, se evaluaron las características geométricas, funcionales y estéticas de cada componente, considerando la precisión de los métodos de digitalización 3D aplicados para su restauración. Asimismo, se analizan los resultados de la adaptación de técnicas de modelación 3D y posprocesamiento en los modelos impresos, junto con su desempeño dimensional y funcional. Finalmente, se documentan y validan las piezas desarrolladas, permitiendo evaluar la metodología propuesta y un catálogo técnico detallado.

#### 4.1. Preparación del entorno y del escáner

Antes de digitalizar las piezas es necesario preparar el área de trabajo, es indispensable que exista una buena iluminación, evitando la proyección directa de la luz con el escáner con el propósito de eludir el contraste, entre el objeto y las cámaras del dispositivo de digitalización. También es importante que el espacio donde se digitalizo las piezas este despejado para reducir interferencias en la recopilación de la geometría 3D. El dispositivo seleccionado para escanear las piezas fue el Revopoint Miraco Pro (**ver Figura 55**).

**Figura 55.** *Escáner Miraco Pro con sus accesorios (base giratoria y trípode).*



## 4.2. Digitalización de la manija de la puerta, Ford LTD wagon 1975

Esta fase consta de distintas etapas, las cuales permiten obtener datos precisos y fiables. Se puede dividir en escaneo de la pieza, edición de la nube de puntos y edición/ construcción de la malla del modelo 3D. La manija seleccionada posee una superficie cromada y brillante por lo que es necesario adecuarla, para esta ocasión se uso un aerosol de color blanco mate con la finalidad de que el escáner sea capaz de captar su geometría (**Figura 56**).

**Figura 56.** *Aplicación de una capa de pintura blanca matizada para evitar la reflexión laser.*



### 4.2.1. Configuración y escaneo de la pieza - manija

El escáner Miraco Pro cuenta con dos modos de escaneo, el modo continuo y el modo single shot (disparo único). El modo continuo permite capturar geometrías del objeto en tiempo real, por otro lado, el modo single shot se basa en la toma de fotografías del objeto, similar a métodos de fotogrametría. Para la presente investigación se opto por usar el modo continuo ya que otorga un alcance mucho mas preciso que el modo de disparo único. Los parámetros de configuración del escáner son seleccionados en función del objeto, estos criterios se pueden observar en la **Tabla 18**.

El tiempo empleado para la digitalización de la pieza fue aproximadamente de 5 minutos debido a variaciones en el entorno y condiciones del objeto.

**Tabla 18** *Parámetros de configuración del escáner.*

<b>Configuración de escaneo de la pieza</b>		
<b>Criterios</b>	<b>Opción</b>	<b>Unidades</b>
Eliminación de base	On	-
Modo de seguimiento	Seguimiento de características	-
Precisión	Alta precisión	-
Distancia de escaneo	200	mm
Tipo de objeto	Objeto general	-
Escaneo a color	Off	-
Tiempo de escaneo	300	s

#### **4.2.2. Edición de la nube de puntos - manija**

Después de la digitalización de la pieza (manija de la puerta) se procede a modificar y refinar errores presentes en el escaneo, puesto que en el proceso de captura tridimensional hay factores los cuales no se pueden controlar, como el ruido, la iluminación, vibraciones y errores de alineación. Por esto, el software Revo Scan 5 permite corregir estas desviaciones. Los criterios utilizados se resumen en la **Tabla 19**. La nube de puntos final se observa en la **Figura 57**.

**Tabla 19.** *Configuración para la edición de nube de puntos.*

<b>Configuración para la edición de nube de puntos</b>			
<b>Criterios</b>	<b>Opción</b>	<b>Unidades</b>	<b>Tiempo (s)</b>
Fusión de nube de puntos	Avanzado/0.10	mm	300
Aislamiento de nube de puntos	100	%	30
Detección de solapamiento	0.50	mm	45
Suavizado de nube de puntos	10 (Fuerza), 2 (veces)	-	60
Simplificación de nube de puntos	10	%	40
<b>Total</b>			<b>475</b>

**Figura 57.** Nube de puntos creada, manija de la puerta.



#### **4.2.3. Construcción y edición de malla -manija**

Posterior a la fusión de la nube puntos, es importante refinar y optimizar la malla con el fin de crear una representación solida del objeto. Consta de procesos donde se eliminan mallas que se encuentran fuera del objeto principal y el cierre de superficies abiertas. Los parámetros y el tiempo empleado en esta etapa se resumen en la **Tabla 20**. La construcción y edición de malla se muestra en la **Figura 58**.

**Tabla 20.** Parámetros de edición y reconstrucción de malla, manija.

<b>Parámetros de edición y reconstrucción de la malla</b>			
<b>Tipo de ajuste</b>	<b>Opción y rango</b>	<b>Unidades</b>	<b>Tiempo (s)</b>
Construcción de malla	0,08	mm	240
Mallas aisladas	100	%	35
Cerrar agujeros	Curva	-	30
Suavizado de malla	0,3 (Fuerza), 3 (veces)	-	20
Simplificación de malla (%)	10	%	40
<b>Total</b>			<b>365</b>

**Figura 58.** Reconstrucción y edición de malla de la manija.



#### 4.2.4. Resultados: Nube de puntos y malla (manija).

El procesamiento de la información recopilada por el escáner es un procedimiento de suma importancia ya que determina la precisión de la geometría escaneada. El tiempo total invertido, la nube de puntos generada y la malla construida se resume en la **Tabla 21**.

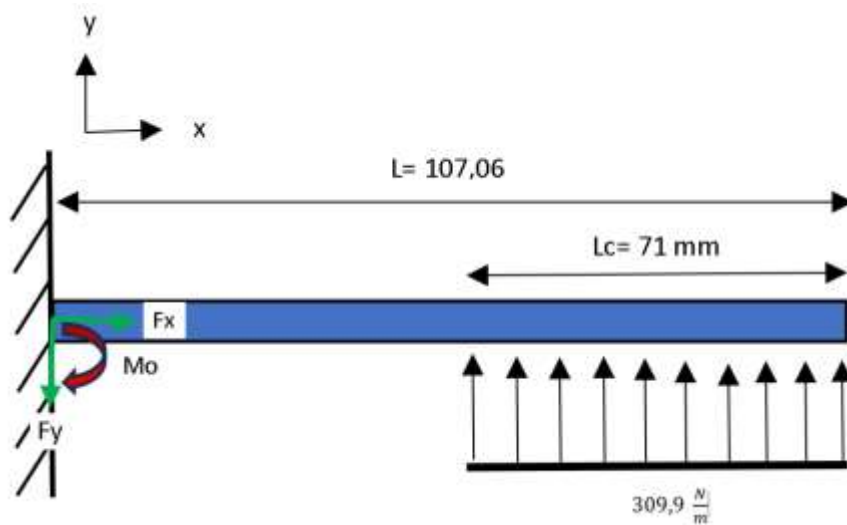
**Tabla 21.** Resultados de edición y reconstrucción de malla, manija

Resultados de edición y reconstrucción de malla, manija		
Variable	Valor	Unidades
Nube de puntos	778.752	-
Numero de polígonos	1.661.518	-
Numero de vértices	3.323.032	-
Espacio computacional	458	MB
Tiempo total invertido	1.140 (19 min)	s

#### 4.2.5. Análisis analítico y numérico – manija

La manija de la puerta delantera posee una geometría compleja, por esta razón dificulto el análisis analítico preciso de los esfuerzos que actúan en la pieza. No obstante, el funcionamiento del objeto es similar a una viga en voladizo, puesto que la base de la manija se mantiene fija y la carga aplicada es transversales al eje (ver **Figura 59**).

**Figura 59.** Representación de la manija como una viga en voladizo.



Los cálculos se basaron principalmente en: el momento flector, el esfuerzo por flexión, el esfuerzo cortante, la deflexión, deformación unitaria y el factor de seguridad. El calculo analítico posee un enfoque global, puesto que considera a la pieza como un objeto ideal, sin considerar el cambio de superficies, agujeros y redondeos del modelo digital.

La fuerza equivalente fue medida mediante la **Ecuación (2)**, es el resultado de la multiplicación entre la carga distribuida ( $q$ ) con la longitud donde se aplico la fuerza para la apertura de la puerta ( $L_c$ ). La fuerza equivalente se ubica exactamente en el centroide de la carga distribuida (35,5mm).

$$F_{eq.} = qL \quad (2)$$

$$F_{eq.} = 309,9 \frac{N}{m} (0,071m)$$

$$F_{eq.} = 22N$$

Para el análisis de la pieza fue necesario calcular la sumatoria de fuerzas, tanto en el eje x como en el eje y, también la estimación de la sumatoria de momentos fue un factor indispensable para entender el comportamiento real de la pieza.

$$\Sigma F_x = 0$$

$$\Sigma F_y = 0$$

$$-Fy + 22N = 0$$

$$Fy = 22N$$

$$\Sigma M_o = 0$$

$$-M_o + 22N \left( L - \frac{L_c}{2} \right) = 0$$

$$-M_o + 22N \left( 0,107m - \frac{0,071m}{2} \right) = 0$$

$$M_o = 1,58 Nm = M_{max}$$

El momento flector fue calculado a partir de la **Ecuación (3)** con datos previamente establecidos, la fuerza equivalente es de 22N [100], la longitud del picaporte o tirador para el calculo es de 71,56 mm, se determino con ayuda del programa CAD.

$$M = Feq(L - \frac{Lc}{2}) \quad (3)$$

$$M = 22N(0,072)m$$

$$M = 1,58 Nm$$

También se calculo la distancia desde el eje neutro (c) a partir del uso de la **Ecuación(4)**, el espesor (h) del picaporte es de 6mm, se obtuvo por medio del programa CAD. De igual forma, el momento de inercia geométrico se definió mediante el uso de la **Ecuación (5)**, donde la viga cuenta con un ancho (b) de 13mm. Estos datos fueron necesarios para el calculo del esfuerzo por flexión en el sistema, **Ecuación (6)**.

$$c = \frac{h}{2} \quad (4)$$

$$c = \frac{6mm}{2}$$

$$c = 3mm$$

$$c = 0,003m$$

$$I = \frac{bxh^3}{12} \quad (5)$$

$$I = \frac{0,013m \times (0,006m)^3}{12}$$

$$I = 2,34 \times 10^{-10} m^4$$

$$\sigma_{max} = \frac{Mc}{I} \quad (6)$$

$$\sigma_{max} = \frac{1,58Nm(0,003m)}{2,34 \times 10^{-10} m^4}$$

$$\sigma_{max} = 20,3 MPa$$

El esfuerzo cortante fue determinado por medio de la **Ecuación (7)**, donde V es la fuerza equivalente que se aplica en la manija, y el área del picaporte se basa en el uso del espesor y el ancho de la sección de estudio.

$$\tau_{max} = 1,5x \frac{V}{A} \quad (7)$$

$$\tau_{max} = 1,5x \frac{22N}{0,013m \times 0,006m}$$

$$\tau_{max} = 0,423MPa$$

La deflexión es otro aspecto importante que se debe calcular, por esta razón se optó por usar la **Ecuación (8)**. Se definieron las propiedades mecánicas en función del material con el que se imprimirá el modelo 3D, el cual es la resina tipo ABS. El módulo de Young (E) posee un valor aproximado de 2100 MPa [101].

$$\delta = \frac{qxL^4}{8EI} \quad (8)$$

$$\delta = \frac{309,9N/m(0,10706m)^4}{8(2,10 \times 10^9 Pa)(2,34 \times 10^{-10})m^4}$$

$$\delta = 0,009 m$$

$$\delta = 9mm$$

Por último se analizó el factor de seguridad de la pieza a través de la **Ecuación (9)**, en donde se tuvo en cuenta la resistencia admisible de la resina tipo ABS, que se encuentra en un rango de 40 MPa hasta 60 MPa [93].

$$FS = \frac{\sigma_{adm.}}{\sigma_{max.}} \quad (9)$$

$$FS = \frac{50 MPa}{20,3 MPa}$$

$$FS = 2,4$$

Por ultimo se midió la deformación unitaria del componente a partir de la Ecuación (10), se concluyo que el material se estira aproximadamente 1% con respecto a su posición original. Este valor se encuentra por debajo del alargamiento en el limite elástico, es aproximadamente de  $\cong 5,5\%$  [102].

$$\epsilon = \frac{\sigma_{max.}}{E} \quad (10)$$

$$\epsilon = \frac{20,3 \text{ MPa}}{2100 \text{ MPa}}$$

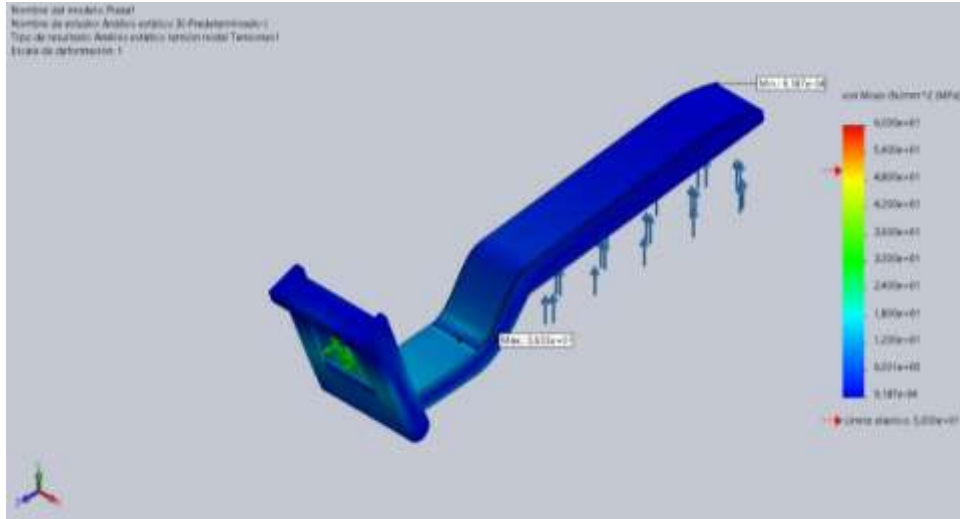
$$\epsilon = 9,66 \times 10^{-3}$$

$$\epsilon = 0,97\%$$

La simulación de la pieza es una etapa fundamental, a diferencia del análisis analítico, este proceso contempla la geometría real del objeto de esta manera simula condiciones reales de funcionamiento cuando la pieza es sometida a esfuerzos. La pieza fue sometida a cuatro tipos de simulación como: tensión Von Mises, desplazamiento, deformación unitaria y el factor de seguridad.

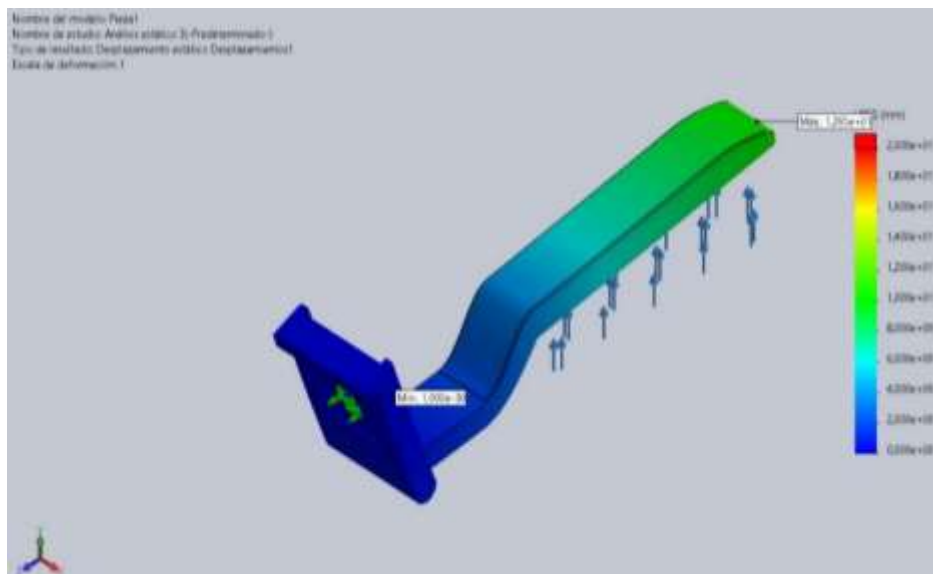
En base al Análisis de Elementos Finitos (FEA), se determino las tensiones que actúan en la pieza (**ver Figura 60**). Se obtuvo una tensión máxima de 36 MPa, exactamente en la sección donde existe un cambio de geometría. Sin embargo, el valor que se obtuvo es admisible puesto que se encuentra por debajo del limite elástico del material (50 MPa).

**Figura 60.** Tensiones Von Mises, manija.



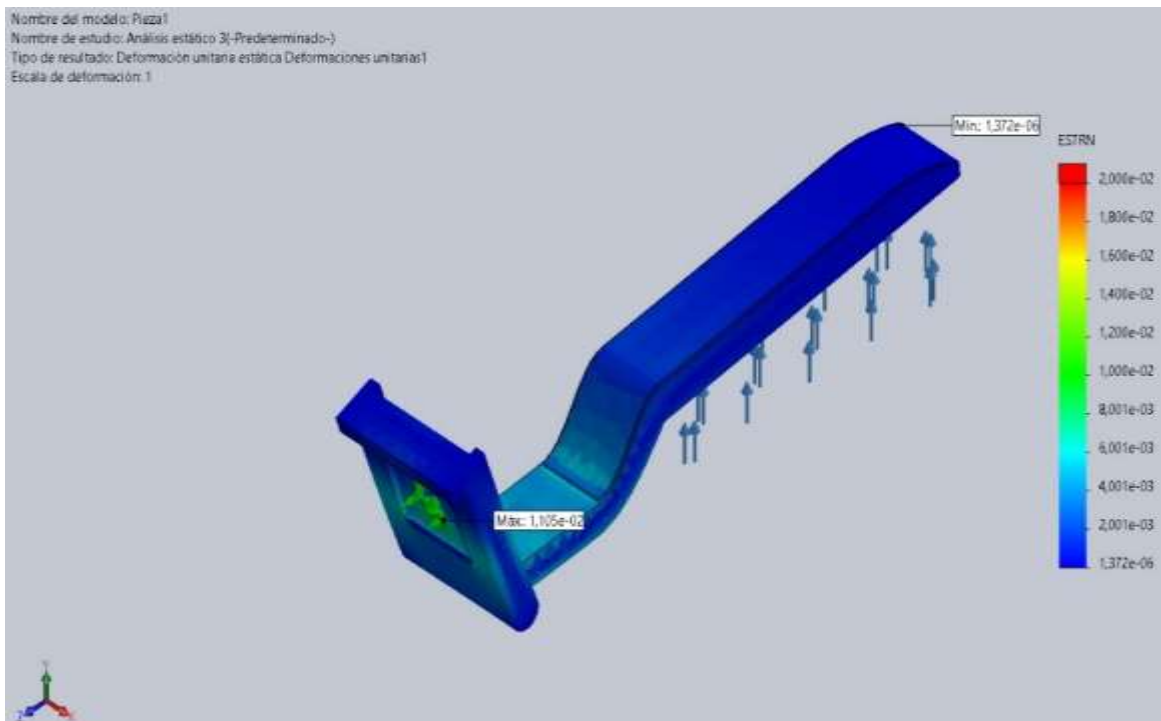
El desplazamiento define la distancia que se mueve con respecto a su posición inicial. Se determino que al aplicar una fuerza de 22N en la base del picaporte, la manija sufre un desplazamiento máximo aproximado de 12 mm (ver **Figura 61** ), mientras que en secciones cercanas a la base el desplazamiento tiende a disminuir, hasta ser prácticamente nula. Esta variación se debe a variaciones en la geometría y la distancia existente entre el punto fijo con las distintas secciones de la pieza.

**Figura 61.** Desplazamientos, manija.



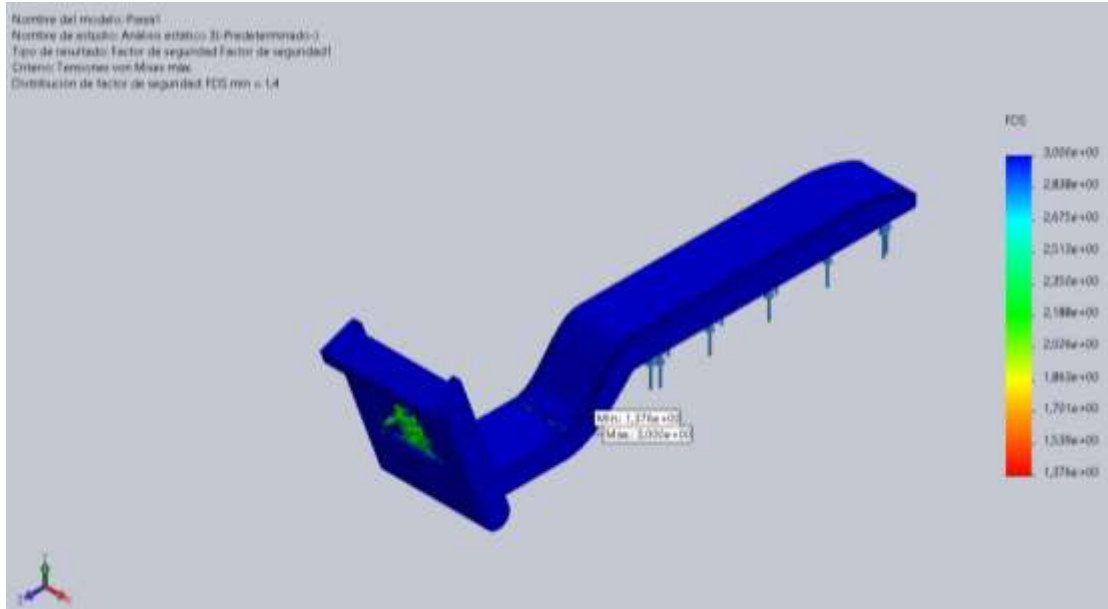
La deformación unitaria indica el cambio de longitud de un elemento al ser sometido a cargas externas, este valor es adimensional o porcentual. En base a la simulación realizada con el programa CAD, se determinó que existe una deformación unitaria máxima de  $1,105 \times 10^{-2}$ , aproximadamente de 1,1% (ver **Figura 62**). El valor que se obtuvo está por debajo del alargamiento en el límite elástico admisible.

**Figura 62.** Deformación unitaria, manija.



Por lo general el factor de seguridad es superior a 1, en el siguiente análisis se determinó que existe un factor de seguridad mínimo de 1,37 (ver **Figura 63**). A pesar de ser el valor más bajo dentro del estudio, supera el rango permitido. También es necesario mencionar que la mayor parte del modelo digital posee un elevado factor de seguridad, lo que proporciona un buen comportamiento estructural.

**Figura 63.** Factor de seguridad, manija.



#### 4.2.6. Análisis analítico VS análisis numérico - Manija

Los análisis desarrollados mediante el uso de ecuaciones y programas de simulación arrojaron datos totalmente distintos, puesto que el análisis analítico idealiza la pieza como una viga en voladizo, sin tomar en cuenta la geometría real del elemento, por otra parte, el análisis numérico emplea el análisis de elementos finitos (FEA), donde se toma en cuenta el diseño real del objeto. Sin embargo, los resultados que se obtuvieron están dentro del rango permisible. Por esta razón se concluyo que la pieza soporta la carga de funcionamiento aplicada, sin la necesidad de sufrir roturas. Los resultados se presentan en la **Tabla 22**.

**Tabla 22.** Análisis analítico VS análisis numérico - Manija

Calculo manual VS CAD		
Magnitud analizada	Calculo manual	CAD
Esfuerzo por flexión	20,3 MPa	36 MPa
Desplazamiento/ Deflexión	9mm	12mm
Deformación unitaria	0,97%	1,1%
Factor de seguridad	2,4	1,37

### 4.3. Digitalización del elevador de vidrios, Ford LTD wagon 1975

El elevador de vidrios del vehículo seleccionado cuenta con características similares a la manija de la puerta, ya que posee superficies cromadas y oscuras. Estos aspectos impiden digitalizar la pieza, por esta razón se siguió el mismo procedimiento que la pieza anterior, es decir se aplicó un recubrimiento blanco matizado mediante el uso de un spray (ver Figura 64).

**Figura 64.** *Manija del elevador de vidrio*



#### 4.3.1. Configuración y escaneo de la pieza – elevador de vidrio

El elevador de vidrios cuenta con geometrías complejas y con detalles muy finos, por esta razón se optó por digitalizar la pieza con un total de cuatro tomas que posteriormente se fusionaron, dando como resultado un único modelo digital. El ajuste del escáner para la digitalización de la pieza se encuentra en la **Tabla 23**.

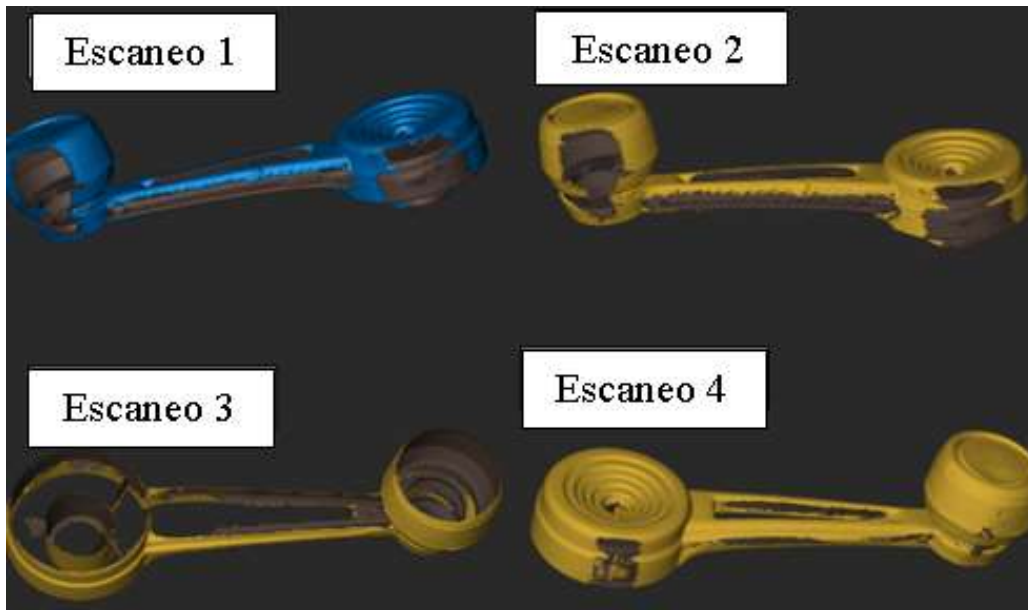
**Tabla 23.** *Parámetros de digitalización, elevador de vidrio.*

<b>Configuración de escaneo de la pieza</b>		
<b>Criterios</b>	<b>Opción</b>	<b>Unidades</b>
Eliminación de base	On	-
Modo de seguimiento	Seguimiento de características	-
Precisión	Alta precisión	-
Distancia de escaneo	250	mm
Tipo de objeto	Objeto general	-
Escaneo a color	Off	-
Tiempo de escaneo (escaneo 1)	240	s
Tiempo de escaneo (escaneo 2)	180	s
Tiempo de escaneo (escaneo 3)	120	s
Tiempo de escaneo (escaneo 4)	180	s
Total	720	s

#### **4.3.2. Edición de la nube de puntos – Elevador de vidrios.**

La edición de la nube de puntos se optimizó por separado, debido a que se digitalizó por medio de 4 escaneos distintos, con el propósito de que el dispositivo capte la pieza desde distintos ángulos (ver Figura 65).

**Figura 65.** *Tomas del elevador de vidrio.*



En esta ocasión los criterios de edición de la nube de puntos de los 4 escaneos se basaron únicamente en la fusión de nube puntos, la detección de solapamiento, el aislamiento de la nube de puntos y la distancia entre puntos (ver **Tabla 24**). Cada escaneo es representado con la letra E.

**Tabla 24.** *Parámetros de escaneo y tiempo invertido por toma.*

<b>Configuración para la edición de nube de puntos</b>								
<b>Criterios</b>	<b>Opción</b>	<b>Unidad</b>	<b>E.1</b>	<b>E.2</b>	<b>E.3</b>	<b>E.4</b>	<b>E. fusión</b>	<b>Tiempo (s)</b>
Fusión de nube de puntos	0.10	mm	60	45	60	30	90	285
Aislamiento de nube de puntos	100	%	10	10	19	14	30	83
Detección de solapamiento	0.50	mm	10	15	10	15	15	65
Simplificación de puntos	10	%	15	25	10	20	30	100
<b>Total</b>			95	95	99	79	165	533

### **4.3.3. Construcción y edición de malla – elevador de vidrios**

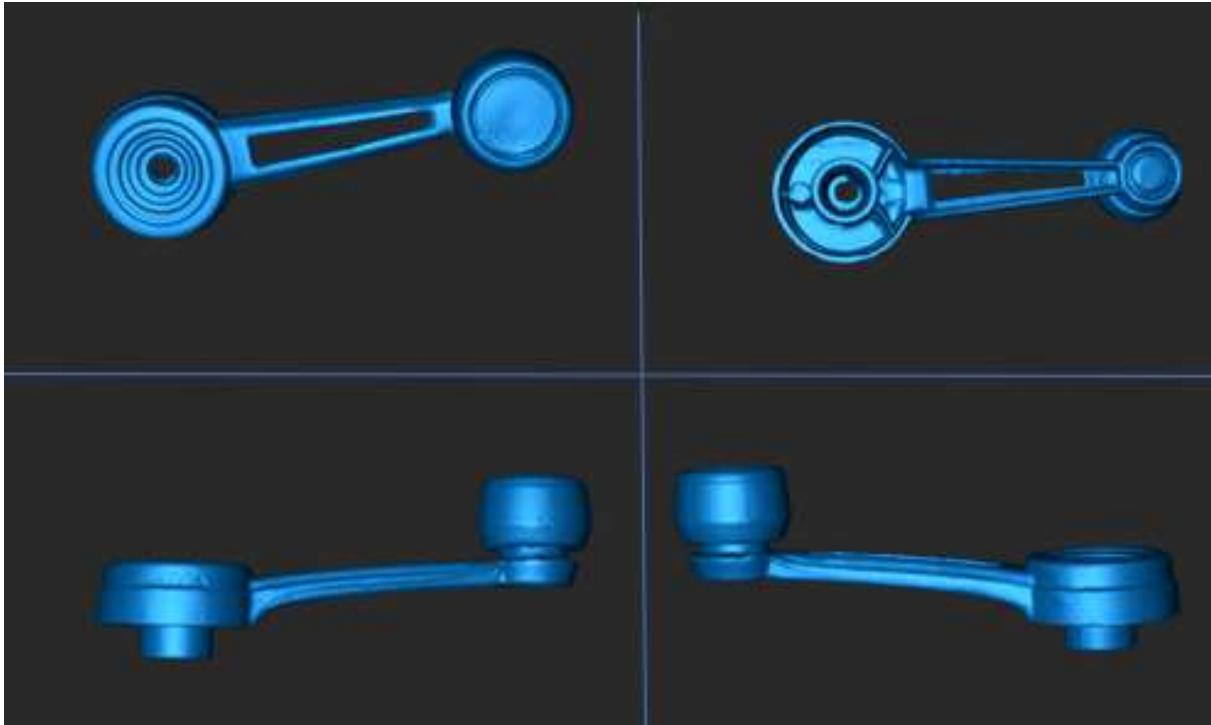
La construcción de la malla consta de procesos en los cuales la nube de puntos generada se transforma en un modelo 3D sólido, con la característica principal de ser manipulado y editado. La edición de malla cumple con el rol de corregir errores, entre las técnicas aplicadas en la pieza se encuentran: construcción de malla, cierre de agujeros, detección de mallas aisladas, suavizado de malla y simplificación de malla (ver **Tabla 25**).

**Tabla 25.** *Parámetros de edición y reconstrucción de malla, Elevavidrio.*

<b>Parámetros de edición y reconstrucción de la malla</b>			
<b>Tipo de ajuste</b>	<b>Opción y rango</b>	<b>Unidades</b>	<b>Tiempo (s)</b>
Construcción de malla	0,08	mm	300
Mallas aisladas	100	%	45
Cerrar agujeros	Curva	-	30
Suavizado de malla	0,2 (Fuerza), 2 (veces)	-	15
Simplificación de malla (%)	10	%	30
<b>Total</b>			420

Después de aplicar herramientas de mallado al modelo digital 3D se obtuvo un elemento sólido, capaz de ser editado e impreso. El objeto final se evidencia en la **Figura 66**.

**Figura 66.** Malla generada, elevador de vidrio.



**4.3.4. Resultados: nube de puntos y malla (elevador de vidrio)**

En la **Tabla 26** se presentan los resultados que se obtuvieron durante el proceso de digitalización y construcción 3D, tanto de la nube de puntos como de la malla, así mismo se puede apreciar el tiempo total empleado para la generación del modelo digital de la pieza.

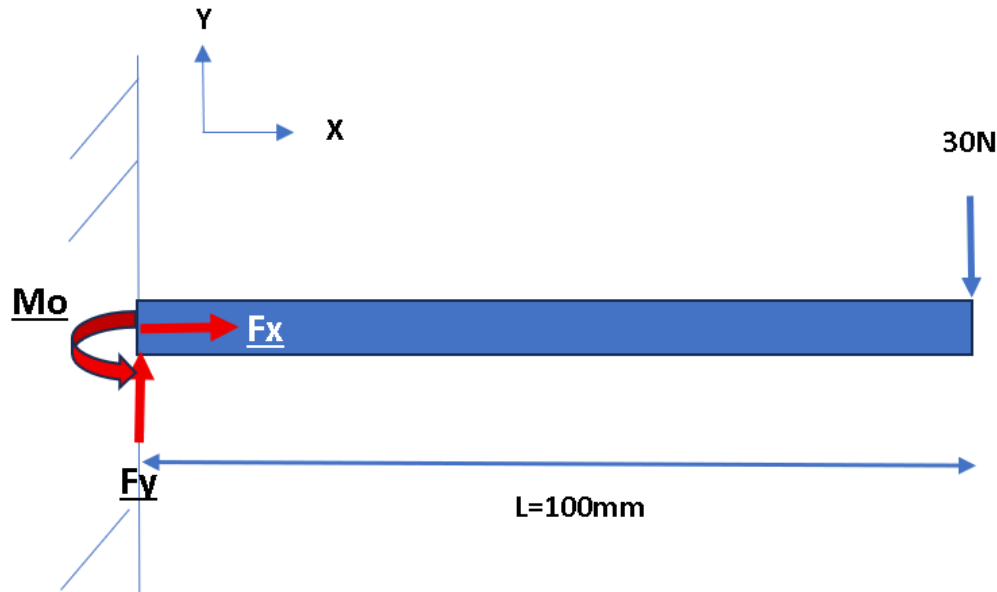
**Tabla 26.** Resultados, elevador de vidrio.

<b>Resultados de edición y reconstrucción de malla, elevador de vidrios</b>		
<b>Variable</b>	<b>Valor</b>	<b>Unidades</b>
Nube de puntos (escaneo 1)	280.417	-
Nube de puntos (escaneo 2)	214.879	-
Nube de puntos (escaneo 3)	276.672	-
Nube de puntos (escaneo 4)	124.151	-
Nube de puntos, modelo fusionado	301.998	-
Numero de polígonos	893.120	-
Numero de vértices	446.611	-
Espacio computacional	490,63	MB
Tiempo total invertido	1.673 (27 min)	S

#### 4.3.5. Análisis analítico y numérico, elevador de vidrios.

La manija del elevador de vidrios cuenta con una geometría compleja, puesto que posee distintas variaciones tanto en el espesor como en su estructura. Sin embargo, para el análisis de esta pieza, se idealizó la pieza como una viga en voladizo con una fuerza puntual estimada de 30N [103] (ver **Figura 67**). También se analizó el esfuerzo de torsión en la base de la pieza donde se acopla el mecanismo de apertura. También se consideró el objeto como una barra axial, con el propósito de estimar el esfuerzo máximo que sufre el objeto al ser sometido a una carga axial.

**Figura 67.** Viga en voladizo, elevador de vidrios (idealización).



La pieza se sometió a distintos cálculos, entre los cuales destacan: el momento flector, el esfuerzo por flexión, el esfuerzo cortante, el esfuerzo por torsión, la deflexión, la deformación unitaria, el coeficiente de concentrador de esfuerzo y el esfuerzo máximo axial.

Fue necesario analizar la sumatoria de fuerzas y la sumatoria de momentos, para comprender como se comporta el elemento al ser sometido a una fuerza puntual de 30N.

$$\Sigma F_x = 0$$

$$\Sigma F_y = 0$$

$$F_y - 30N = 0$$

$$F_y = 30N$$

$$\Sigma M_o = 0$$

$$M_o + 30N (L) = 0$$

$$M_o + 30 (0,1m) = 0$$

$$M_o = 3Nm = M_{max}$$

El momento flector coincide con el valor calculado en la sumatoria de fuerzas, ya que al ser una carga puntual la distancia no varia y la fuerza aplicada tampoco. Por esta razón, se obtuvo un momento flector de 3 Nm, que actúa en toda la viga.

La distancia desde el eje neutro ( $c$ ), indica posición donde una estructura no sufre ningún tipo de deformación y esfuerzo, se calculo a partir del uso de la **Ecuación(4)**, el espesor ( $h$ ) de la manija del elevador de vidrios es de 13 mm, se obtuvo por medio del programa CAD. De igual forma, el momento de inercia geométrico ( $I$ ), se aproximó mediante el uso de la **Ecuación (5)**, cabe recalcar que el ancho ( $b=6$  mm) se obtuvo a partir del archivo CAD del modelo digital. Esta información fue necesaria para el calculo del esfuerzo por flexión en el sistema ( $\sigma_{max}$ ), **Ecuación (6)**.

$$c = \frac{h}{2}$$

$$c = \frac{13mm}{2}$$

$$c = 6,5 \text{ mm}$$

$$c = 0,0065m$$

$$I = \frac{bxh^3}{12}$$

$$I = \frac{0,006m \times (0,013m)^3}{12}$$

$$I = 109 \times 10^{-11} m^4$$

$$\sigma_{max} = \frac{Mc}{I}$$

$$\sigma_{max} = \frac{3Nm(0,0065m)}{109 \times 10^{-11} m^4}$$

$$\sigma_{max} = 17,88 MPa$$

En función a la fuerza puntual aplicada en la manija y el área de la sección que se escogió, se determino la fuerza cortante que actúa en la pieza, por medio de la **Ecuación (7)**.

$$\tau_{max} = 1,5x \frac{V}{A}$$

$$\tau_{max} = 1,5x \frac{30N}{0,006m \times 0,013m}$$

$$\tau_{max} = 0,576 MPa$$

La deflexión fue calculada mediante la **Ecuación (11)**. Las propiedades mecánicas se definieron en función de la resina tipo ABS. El modulo de Young (E) posee un valor de 2100 MPa [101].

$$\delta = \frac{FxL^3}{3EI} \quad (11)$$

$$\delta = \frac{30N(0,1m)^3}{3(2,10 \times 10^9 Pa)(109 \times 10^{-11} m^4)}$$

$$\delta = 0,005m$$

$$\delta = 5mm$$

El factor de seguridad se aproximo a partir de la **Ecuación (9)**, para esta etapa se considero la resistencia admisible de la resina tipo ABS, que por lo general se encuentra en 50 MPa [93].

$$FS = \frac{\sigma_{adm.}}{\sigma_{max.}}$$

$$FS = \frac{50 \text{ MPa}}{17,88 \text{ MPa}}$$

$$FS = 2,7$$

La deformación unitaria fue medida en función de la **Ecuación (10)**. El material se estira aproximadamente 0,85% con respecto a su geometría original. El valor que se obtuvo se encuentra por debajo del alargamiento en el límite elástico. Por esta razón, el objeto no solo soporta la fuerza aplicada, también puede estirarse sin presentar deformaciones que puedan afectar su rendimiento.

$$\epsilon = \frac{\sigma_{max.}}{E}$$

$$\epsilon = \frac{17,88 \text{ MPa}}{2100 \text{ MPa}}$$

$$\epsilon = 8,51 \times 10^{-3}$$

$$\epsilon = 0,85\%$$

La pieza también sufre esfuerzos de torsión en su estructura, especialmente en la base donde se acopla la pieza con el mecanismo de apertura. Fue necesario calcular el momento polar de inercia por medio de la **Ecuación (12)**, se utilizó los diámetros tanto externo ( $d_o$ ) como interno ( $d_i$ ), proporcionados por el programa CAD. Finalmente se midió el esfuerzo por torsión con ayuda de la **Ecuación (13)**.

$$J = \frac{\pi}{32} (d_o^4 - d_i^4) \quad (12)$$

$$J = \frac{\pi}{32} (0,018m^4 - 0,011m^4)$$

$$J = 8,87 \times 10^{-9} m^4$$

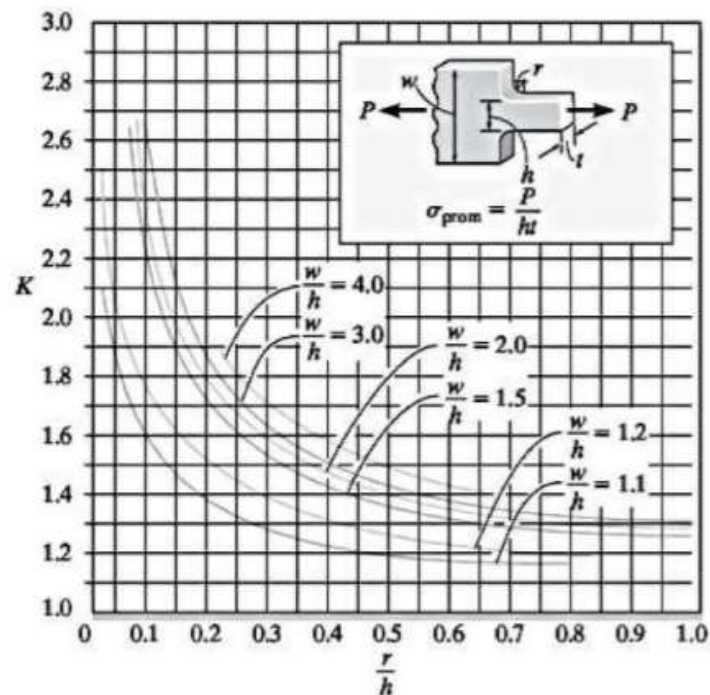
$$\tau = \frac{M(r)}{J} \quad (13)$$

$$\tau = \frac{3Nm(0,009m)}{8,87 \times 10^{-9}m^4}$$

$$\tau = 3,04 \text{ MPa}$$

Por ultimo, también se aproximó el esfuerzo máximo que la pieza puede soportar cuando es sometida a una fuerza axial (30N), los datos proporcionados por el modelo CAD fueron suficientes para cumplir con las variables que las ecuaciones solicitaban. El esfuerzo máximo se obtuvo a partir de la **Ecuación (17)**, no obstante, también fue necesario calcular el factor de concentración (k), definido por la **Ecuación (14)** y la **Ecuación (15)**, respectivamente. Para el calculo del factor de concentración, fue necesario ocupar el diagrama de factor de concentración propuesto por la **Figura 68** [104]. Otro parámetro indispensable es el esfuerzo promedio, determinado por la **Ecuación (16)**.

**Figura 68.** Diagrama del factor de concentración.



Tomado de: Hibbeler Russell, Mecánica de materiales, 8th edición, 2011.

$$\frac{w}{h} \quad (14)$$

$$\frac{18mm}{11mm} = 1,64$$

$$\frac{r}{h} \quad (15)$$

$$\frac{6,76mm}{11mm} = 0,63$$

$$\sigma_{prom} = \frac{P}{ht} \quad (16)$$

$$\sigma_{prom} = \frac{30N}{11mm(8mm)}$$

$$\sigma_{prom} = 0,31 MPa$$

$$\sigma_{max} = k(\sigma_{prom}) \quad (17)$$

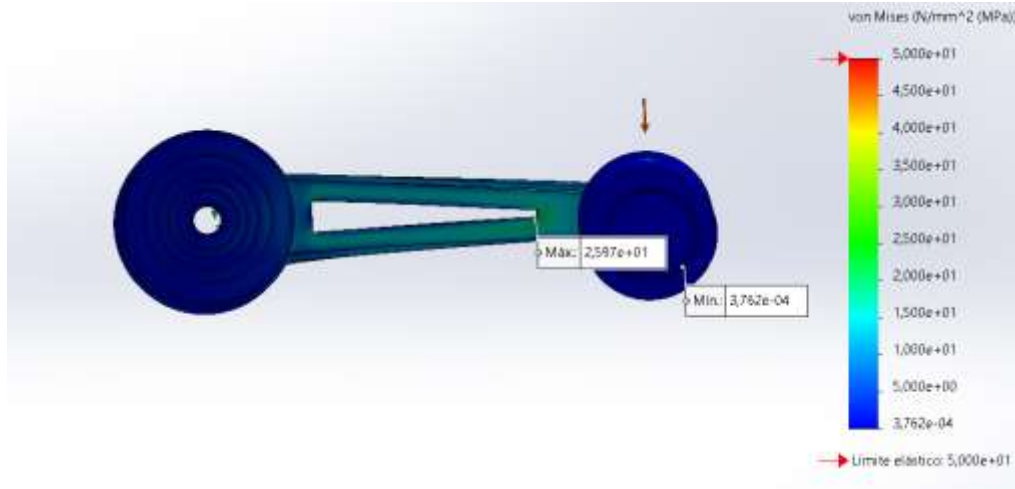
$$\sigma_{max} = 1,3(0,31 MPa)$$

$$\sigma_{max} = 0,403 MPa$$

La integración de tecnología para realizar simulaciones que puedan predecir el comportamiento real de un componente es una etapa que determina si el objeto cumple con los requisitos técnicos y de seguridad previos a su fabricación en masa. Por esta razón, el elevador de vidrios se sometió a simulaciones de tensión, deformación, desplazamiento, factor de seguridad y esfuerzo por torsión.

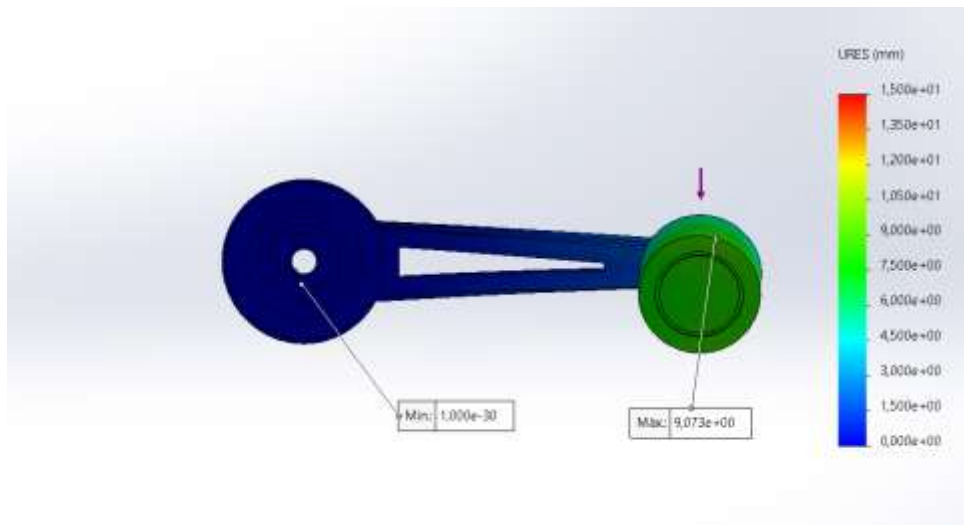
La tensión que se obtuvo por medio del Análisis de Elementos Finitos (FEA) indica un valor máximo de 26 MPa al ser sometido a una fuerza puntual de 30 N (**ver Figura 69**). El resultado es elevado, sin embargo, se encuentra por debajo del límite elástico permitido por el material.

**Figura 69.** *Análisis de tensión Von Mises, elevador de vidrios.*



El desplazamiento que la pieza experimenta cuando se somete a una carga de 30N en la punta del tirador fue aproximadamente de 9 mm con respecto a su posición inicial (ver Figura 70). Aunque, el valor es alto, es aceptable debido a que la pieza es constituida por un material polimérico, en este caso resina de tipo ABS.

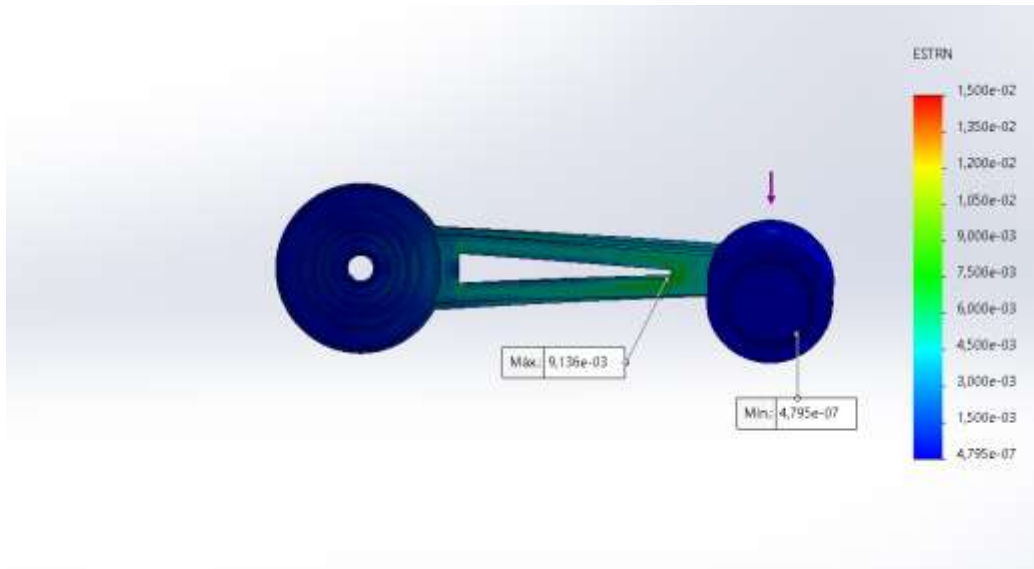
**Figura 70.** *Desplazamiento, elevador de vidrio.*



Mediante la implementación de un programa CAD para la simulación de la pieza, se concluyó que existe una deformación unitaria máxima de  $9,136 \times 10^{-3}$ , aproximadamente de 0,91% (Figura 71).

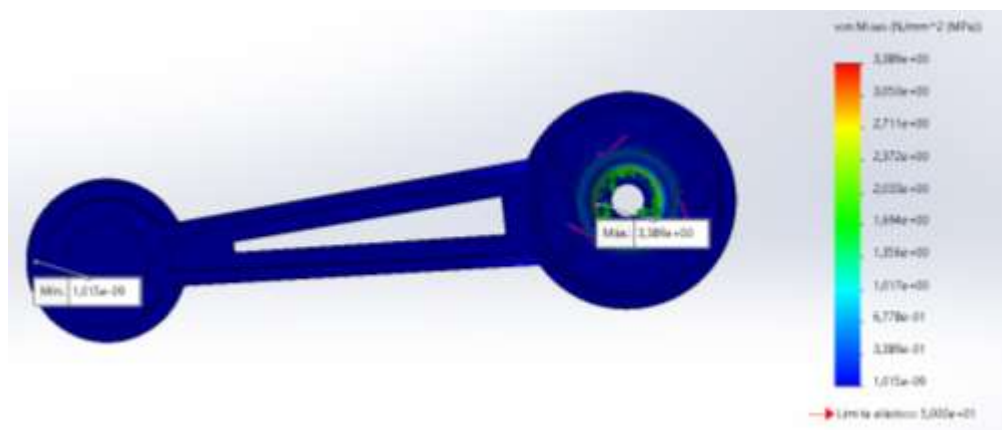
El valor que se obtuvo se encuentra dentro del rango de alargamiento en el límite elástico permisible [102].

**Figura 71.** Deformación unitaria, elevador de vidrio.



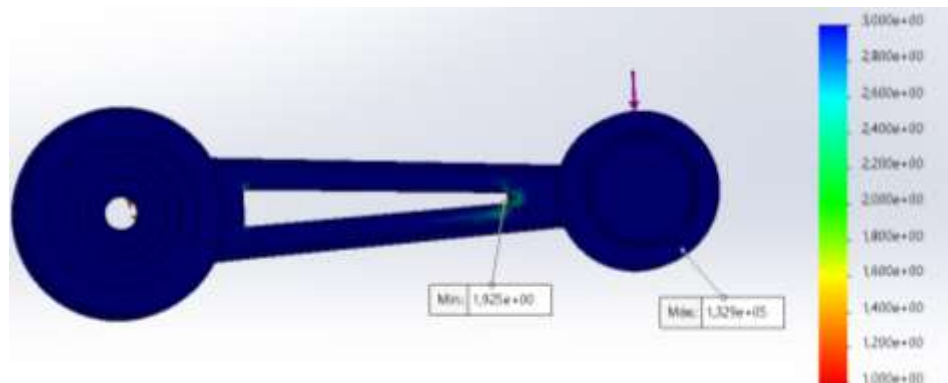
El esfuerzo de torsión fue simulado en la base dentada, donde se acopla la manija con el mecanismo de apertura del vidrio. Se obtuvo un esfuerzo máximo de 3,38 MPa en los eslabones de la pieza, debido a la geometría que posee (**Figura 72**). No obstante, los resultados que se obtuvieron no superan el límite elástico de 50 MPa, por esta razón se comprobó que la pieza no sufre deformaciones permanentes en su estructura.

**Figura 72.** Esfuerzo por torsión, elevador de vidrio.



El factor de seguridad mínimo que posee la pieza es aproximadamente de 2, a pesar de ser el valor mínimo, supera el criterio que plantea que el factor de seguridad debe ser superior a 1. En la **Figura 73**, se muestra que el valor mínimo se ubica en la parte hueca de la manija, específicamente donde existe un cambio evidente de geometría. Sin embargo, se demostró que la pieza es segura al ser sometida ante cargas externas.

**Figura 73.** Factor de seguridad, elevador de vidrios.



#### ***4.3.6. Análisis analítico VS análisis numérico – elevador de vidrios.***

Los análisis efectuados mediante el uso de expresiones analíticas y herramientas de simulación computacional permitieron evidenciar diferencias en los valores de esfuerzos obtenidos. Dichas diferencias se originan en la naturaleza de cada enfoque. El análisis analítico se basa en una idealización del comportamiento estructural de la manija del elevador de vidrios, interpretándola como una viga en voladizo y suponiendo una geometría simplificada, lo cual no permite representar con precisión los cambios de sección, radios de filete y demás características geométrica. Por el contrario, el análisis numérico, desarrollado mediante el método de los elementos finitos (FEA), considera la geometría completa del diseño, así como las condiciones reales de carga y restricción, proporcionando una descripción más detallada y realista del estado de esfuerzos en la pieza.

A pesar de las diferencias observadas entre ambos métodos de análisis, los resultados obtenidos se encuentran dentro de rangos aceptables desde el punto de vista estructural. Los esfuerzos máximos calculados no superan los límites admisibles del material empleado, lo que indica que la manija del elevador de vidrios es capaz de soportar adecuadamente las cargas de funcionamiento a las que se encuentra sometida. Los valores obtenidos a partir de ambos enfoques se resumen en **Tabla 27**, permitiendo una comparación directa entre los métodos analítico y numérico.

**Tabla 27.** *Comparación análisis manual vs numérico, elevador de vidrio.*

<b>Calculo manual VS CAD</b>		
<b>Magnitud analizada</b>	<b>Calculo manual</b>	<b>CAD</b>
Esfuerzo por flexión	17,88 MPa	25 MPa
Desplazamiento/ Deflexión	5 mm	9 mm
Deformación unitaria	0,85%	0,91 %
Factor de seguridad	2,7	2
Esfuerzo por torsión	3,04 MPa	3,39 MPa

#### **4.4. Digitalización de la carcasa del tanque de agua, Ford LTD wagon 1975**

La carcasa del tanque de agua del vehículo posee una geometría compleja y con un elevado nivel de detalles. Estas características dificultan digitalizar la pieza, por estos motivos se retomo el mismo procedimiento de las anteriores piezas, con el fin de que el objeto este en optimas condiciones para su respectiva digitalización 3D (ver **Figura 74**).

**Figura 74.** *Carcasa del tanque de agua, Ford LTD wagon 1975*



#### 4.4.1. Configuración y escaneo de la pieza – carcasa del tanque de agua

La pieza fue digitalizada por medio de dos escaneos diferentes, desde distintos ángulos, posteriormente se fusionaron y editaron, así generando un único modelo digital. Los ajustes de digitalización y el tiempo de escaneo se muestran en la **Tabla 28**.

**Tabla 28.** *Parámetros de digitalización, carcasa del tanque de agua.*

Configuración de escaneo de la pieza		
Criterios	Opción	Unidades
Eliminación de base	On	-
Modo de seguimiento	Seguimiento de características	-
Precisión	Alta precisión	-
Distancia de escaneo	250	mm
Tipo de objeto	Objeto general	-
Escaneo a color	Off	-
Tiempo de escaneo (escaneo 1)	240	s
Tiempo de escaneo (escaneo 2)	160	s
Total	400	s

#### 4.4.2. Edición de la nube de puntos – carcasa del tanque de agua

La edición de la nube de puntos es una etapa en la cual se corrigen errores de digitalización, inicialmente se optimizó cada escaneo por separado. Finalmente, los escaneos se fusionaron, de esta manera se generó solamente un modelo digital (**Figura 75**).

**Figura 75.** *Numero de escaneos, carcasa tanque de agua.*



La nube de puntos siguió el mismo proceso de edición y optimización de las anteriores piezas, es decir, se aplicó técnicas de fusión de nube de puntos, el aislamiento de nube de puntos, la detección de solapamiento y la simplificación de puntos. De la misma forma, el modelo fusionado representado por E. Fusionado siguió la misma fase que los escaneos realizados previos a su respectiva fusión (E). Los criterios de edición y limpieza se presentan en la **Tabla 29**.

**Tabla 29.** *Criterios de edición de nube de puntos, carcasa tanque de agua.*

<b>Configuración para la edición de nube de puntos</b>						
<b>Criterios</b>	<b>Opción</b>	<b>Unidad</b>	<b>E.1</b>	<b>E.2</b>	<b>E. fusionado</b>	<b>Tiempo (s)</b>
Fusión de nube de puntos	0.10	mm	40	45	120	205
Aislamiento de nube de puntos	100	%	20	20	20	60
Detección de solapamiento	0.50	mm	10	10	20	40
Simplificación de puntos	5	%	15	20	25	60
<b>Total</b>			85	95	185	365

#### **4.4.3. Construcción y edición de malla – carcasa del tanque de agua**

La edición de malla permite corregir errores generados en la etapa de digitalización y fusión de nube de puntos. Las herramientas o procesos aplicados para esta pieza fueron: la construcción de malla, el cierre de agujeros, la detección de mallas aisladas, el suavizado de malla y la simplificación de malla. Los parámetros y criterios se resumen en la **Tabla 30**.

**Tabla 30.** *Parámetros de edición y reconstrucción de malla, carcasa tanque de agua.*

<b>Parámetros de edición y reconstrucción de la malla</b>			
<b>Tipo de ajuste</b>	<b>Opción y rango</b>	<b>Unidades</b>	<b>Tiempo (s)</b>
Construcción de malla	0,08	mm	360
Mallas aisladas	100	%	60
Cerrar agujeros	Curva	-	20
Suavizado de malla	0,1 (Fuerza), 1 (veces)	-	10
Simplificación de malla (%)	4	%	20
<b>Total</b>			470

Tras la aplicación de las herramientas de mallado al modelo digital tridimensional, se generó un sólido geométrico cerrado y coherente, apto para su edición y para los procesos de fabricación aditiva (ver **Figura 76**).

**Figura 76.** Malla generada, carcasa del tanque de agua.



#### **4.4.4. Resultados: nube de puntos y malla (carcasa del tanque de agua)**

Los resultados que se obtuvieron durante las fases de digitalización y construcción 3D de la nube de puntos y de la malla, así como el tiempo total invertido para la generación de la pieza se aprecian en la **Tabla 31**.

**Tabla 31.** Resultados, carcasa del tanque de agua.

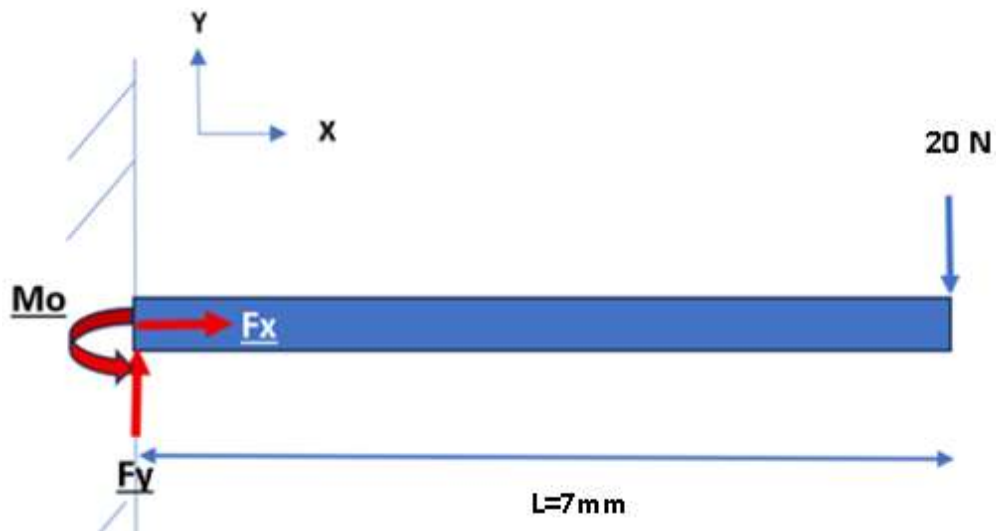
<b>Resultados de edición y reconstrucción de malla</b>		
<b>Variable</b>	<b>Valor</b>	<b>Unidades</b>
Nube de puntos (escaneo 1)	163.683	-
Nube de puntos (escaneo 2)	236.966	-
Nube de puntos, modelo fusionado	236.764	-
Numero de polígonos	815.720	-
Numero de vértices	407.860	-
Espacio computacional	507,42	MB
Tiempo total invertido	1.235 (20 min)	s

#### **4.4.5. Análisis analítico y numérico, carcasa del tanque de agua.**

Para el análisis de la carcasa se considero ciertas secciones del elemento con el propósito de analizar los esfuerzos y deformaciones que se pueden producir. Para esta ocasión, se tomo como

referencia la pestaña de la carcasa, debido a que experimenta esfuerzos por flexión cuando se aplica una fuerza la borde de la pieza. La pestaña se idealizo como una viga en voladizo con una fuerza puntal de 22 N, el diagrama de cuerpo libre se representa en la **Figura 77**.

**Figura 77.** Diagrama de cuerpo libre, pestaña de la carcasa.



Se analizo la sumatoria de fuerzas y de momentos, para interpretar el comportamiento del elemento cuando es sometido a una fuerza puntal de 20 N.

$$\Sigma F_x = 0$$

$$\Sigma F_y = 0$$

$$F_y - 20N = 0$$

$$F_y = 20N$$

$$\Sigma M_o = 0$$

$$M_o + 20N (L) = 0$$

$$M_o + 20 (0,007m) = 0$$

$$M_o = 0,14 Nm = M_{max}$$

La distancia y la fuerza aplicada no varía en el sistema, por esta razón el momento flector coincide con el momento máximo calculado anteriormente. Se obtuvo un momento flector de 0,12 Nm, que actúa sobre toda la viga.

El esfuerzo máximo por flexión se aproximó mediante la **Ecuación (18)**. Los datos del espesor y del ancho, fueron facilitados con ayuda de un calibrador pie de rey directamente de la pieza original.

$$\sigma_{max} = \frac{6FL}{bh^2} \quad (18)$$

$$\sigma_{max} = \frac{6(20N)(0,007m)}{0,015m \times (0,002m)^2}$$

$$\sigma_{max} = 14 \text{ MPa}$$

El momento polar de inercia (I) se determinó a partir de la **Ecuación (5)**. La deflexión se estimó por medio de la **Ecuación (11)**. Las propiedades mecánicas fueron definidas en función del material que se utilizó para la impresión de las piezas. El módulo de Young (E) tiene un valor de 2100 MPa [101]

$$I = \frac{bh^3}{12}$$

$$I = \frac{0,015m \times (0,002m)^3}{12}$$

$$I = 1 \times 10^{-11} m^4$$

$$\delta = \frac{FL^3}{3EI}$$

$$\delta = \frac{20N(0,006m)^3}{3(2,1 \times 10^9 \text{ Pa})(1 \times 10^{-11} m^4)}$$

$$\delta = 0,072 \text{ mm}$$

La resistencia admisible de la resina tipo ABS se encuentra dentro de un rango de 40 MPa hasta 60 MPa [93]. Con esta información se logro calcular el factor de seguridad, donde se aplico la **Ecuación (9)**.

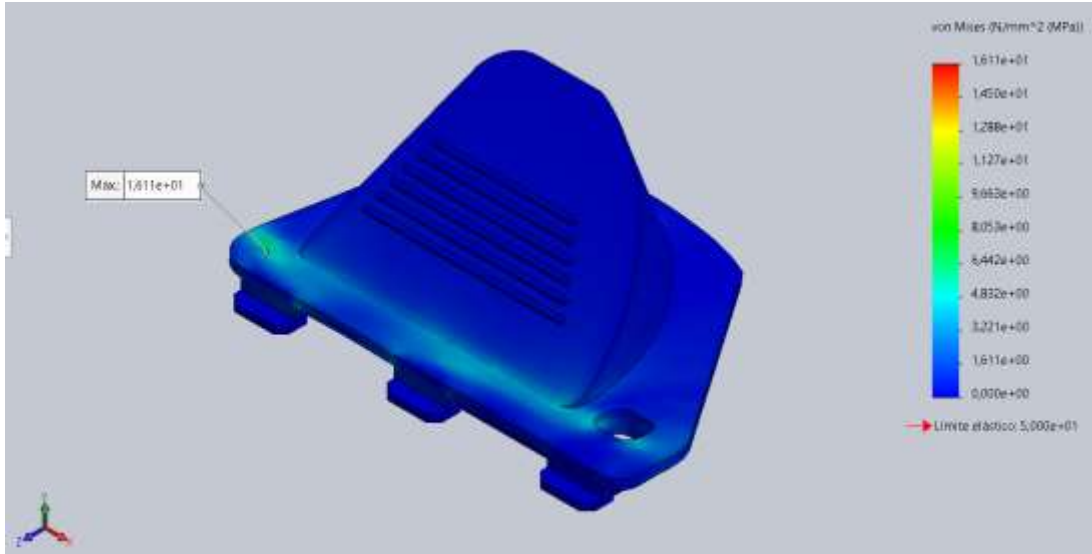
$$FS = \frac{\sigma_{adm.}}{\sigma_{max.}}$$
$$FS = \frac{50 MPa}{14 MPa}$$
$$FS = 3,5$$

La deformación unitaria se determinó mediante la **Ecuación (10)**, obteniendo un valor aproximado de 0,66 % respecto a la geometría original de la pieza. Este resultado se encuentra por debajo del límite elástico del material, lo que indica que la deformación producida es completamente reversible. En consecuencia, la pieza es capaz de soportar la fuerza aplicada sin sufrir deformaciones permanentes, garantizando así un comportamiento mecánico adecuado y sin comprometer su desempeño estructural.

$$\epsilon = \frac{\sigma_{max.}}{E}$$
$$\epsilon = \frac{14 MPa}{2100 MPa}$$
$$\epsilon = 6,66 \times 10^{-3}$$
$$\epsilon = 0,66\%$$

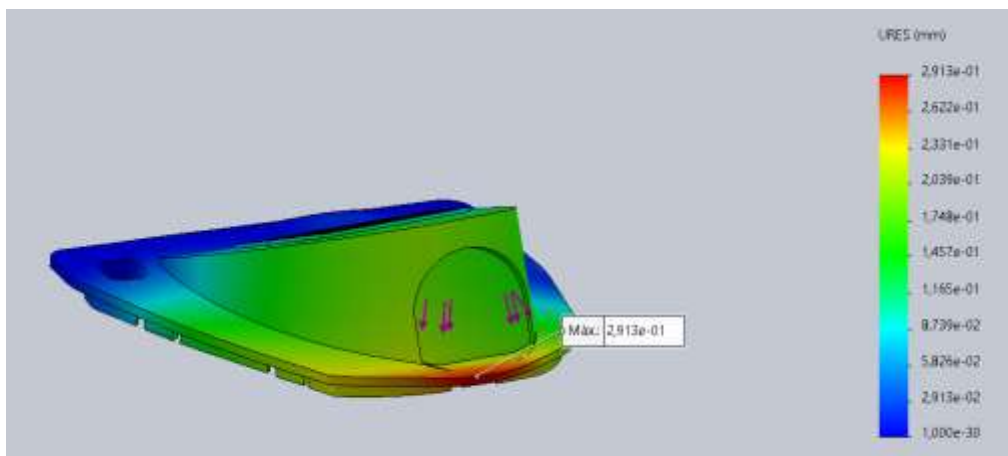
Con base en el Análisis de Elementos Finitos (FEA), se determinaron las tensiones que actúan sobre la pieza, como se muestra en la **Figura 78**. Los resultados indican una tensión máxima de 16 MPa, localizada en la sección donde se presenta un cambio de geometría, lo cual es coherente con la presencia de concentraciones de esfuerzo. No obstante, dicho valor es admisible, dado que se encuentra por debajo del límite elástico del material, establecido en 50 MPa, lo que confirma que la pieza opera dentro de un régimen seguro.

**Figura 78.** Tensiones Von Mises, carcasa.



Se concluyo que, al aplicar una fuerza de 20 N en la base de la carcasa, la pieza presenta un desplazamiento máximo aproximado de 0,29 mm (**Figura 79**). Sin embargo en las secciones cercanas a las pestañas del elemento, el desplazamiento disminuye progresivamente hasta volverse nulo.

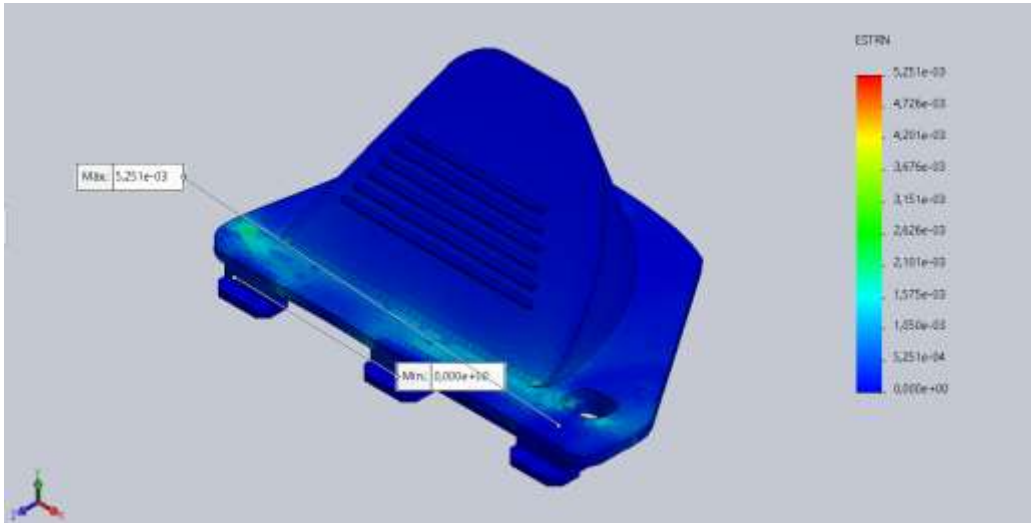
**Figura 79.** Desplazamiento, carcasa del tanque de agua.



La deformación unitaria representa el cambio relativo de longitud que experimenta un elemento al ser sometido a cargas externas, la cual se representa como una magnitud adimensional o en forma

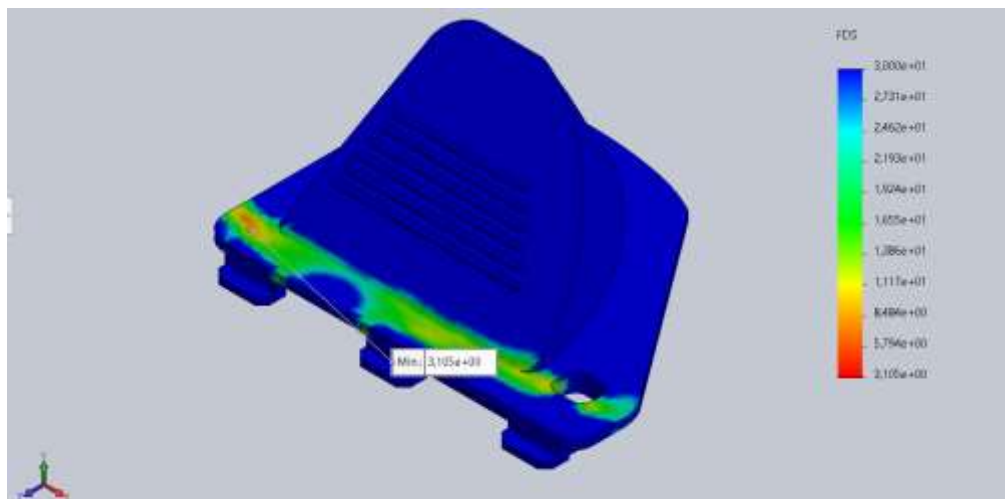
porcentual. Con base en la simulación realizada mediante el software CAD, se determinó una deformación unitaria máxima de  $5,25 \times 10^{-3}$ , equivalente aproximadamente a 0,5 % (**Figura 80**).

**Figura 80.** Deformación unitaria, carcasa.



El factor de seguridad es un parámetro fundamental en el análisis estructural y, por lo general, debe ser mayor que 1 para garantizar un funcionamiento seguro del componente. En el análisis realizado se determinó un factor de seguridad mínimo de 3 (**ver Figura 81**). Si bien este valor corresponde al punto más crítico identificado en el estudio, supera el umbral mínimo admisible, por lo que la pieza cumple con los criterios de seguridad establecidos.

**Figura 81.** Factor de seguridad, carcasa.



#### 4.4.6. Análisis analítico VS análisis numérico – carcasa del tanque de agua

Se realizó una comparación entre los resultados obtenidos mediante el análisis analítico y el análisis numérico por elementos finitos. El modelo analítico consideró la pestaña como una viga en voladizo con carga puntual en el extremo, lo que permitió estimar el esfuerzo máximo, la deflexión y la deformación unitaria bajo una fuerza de montaje de 20 N. Por su parte, el análisis numérico consideró la geometría completa de la pieza y una representación más realista de las condiciones de carga y restricción. Los resultados mostraron una similitud aceptable entre ambos enfoques, observándose diferencias debido a la idealización geométrica del modelo analítico. No obstante, ambos análisis coinciden en que la pieza trabaja dentro del régimen elástico admisible del material, con un factor de seguridad cercano a 3, validando así la funcionalidad mecánica. Los resultados se muestran en la **Tabla 32**.

**Tabla 32.** Resultados del cálculo manual y numérico, carcasa.

Cálculo manual VS CAD		
Magnitud analizada	Cálculo manual	CAD
Esfuerzo por flexión	14 MPa	16 MPa
Desplazamiento/ Deflexión	0,072 mm	0,29 mm
Deformación unitaria	0,66%	0,525 %
Factor de seguridad	3,5	3,1

#### 4.5. Fabricación aditiva de las piezas de estudio

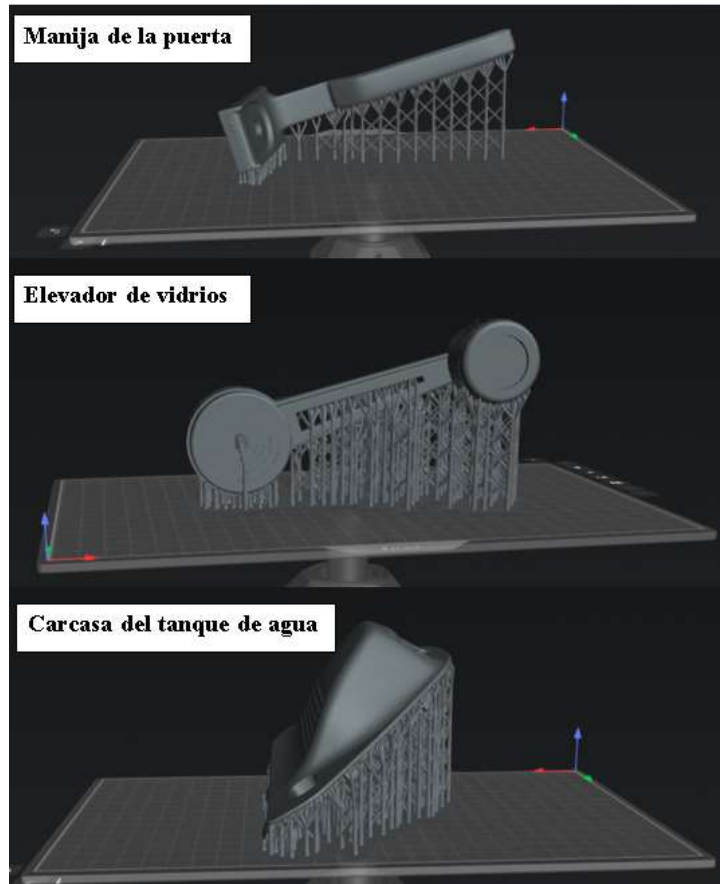
Los modelos digitales obtenidos mediante el proceso de escaneo tridimensional fueron exportados en formato STL (Lenguaje de teselación estándar) a un software de laminado (slicer) compatible con la impresora 3D seleccionada para la fabricación de los componentes. También se configuró los parámetros de impresión, proporcionados por el proveedor de la resina (**ver Figura 82**).

**Figura 82.** *Parámetros de impresión.*

Machine	Resin	Print	Gcode	Advanced
Altura de capas	0,100	mm	Distancia elevación de capas base	6,000 + 2,000 mm
Numero de capas base	9		Distancia de elevación	6,000 + 8,000 mm
Tiempo de exposición	2,600	s	Distancia de retracción capas	6,000 + 2,000 mm
Tiempo de exposición de capas base	30,000	s	Distancia de retracción	12,000 + 2,000 mm
Numero de capas de transición	12		Velocidad de elevación de capas	60,000 & 150,000 mm/min
Tipo de transición	Linear		Velocidad de elevación	80,000 & 150,000 mm/min
Disminución del tiempo de transición	2,110	s	Velocidad de retracción de capas	150,000 & 75,000 mm/min
Modo de espera durante la impresión	Restin...		Velocidad de retracción	150,000 & 75,000 mm/min
Tiempo de reposo antes de elevar	2,000	s		
Tiempo de reposo después de elevar	0,000	s		
Tiempo reposo después de retraer	2,000	s		

Posteriormente, los modelos fueron importados al slicer para llevar a cabo la etapa de preparación previa a la impresión, la cual incluyó la definición de la orientación óptima de la pieza en los ejes X, Y y Z, con el fin de minimizar defectos geométricos, reducir el consumo de material y mejorar la calidad superficial del componente fabricado. Asimismo, se incorporaron estructuras de soporte, necesarias para estabilizar las zonas con voladizos y asegurar una deposición uniforme del material durante el proceso de manufactura aditiva. La generación de los soportes se realizó de manera automática mediante el software, conforme a los parámetros establecidos. Las configuraciones finales de los modelos 3D listos para impresión se presentan en la **Figura 83**.

**Figura 83.** Orientación y aplicación de soportes



En la **Tabla 33** se presenta un resumen de los resultados obtenidos para las piezas analizadas, incluyendo el peso final, el consumo de resina expresado en mililitros, el tiempo total de impresión y el costo estimado de fabricación. Estos parámetros permiten evaluar de manera integral la eficiencia del proceso de impresión 3D y su viabilidad desde el punto de vista técnico y económico.

**Tabla 33.** Resultados de impresión por cada pieza.

<b>Resultados de impresión</b>			
<b>Criterios</b>	<b>Manija de la puerta</b>	<b>Elevador de vidrio</b>	<b>Carcasa</b>
Tiempo de impresión (h,m,s)	2h5m10s	4h17m31s	4h1m38s
Peso (g)	20	49,244	51,469
Consumo de resina (ml)	17,879	44,768	46,790
Precio (\$)	1,082	2,75	2,85

#### 4.6. Validación estética, dimensional y funcional de las piezas impresas.

Las piezas fabricadas mediante tecnología de impresión 3D fueron sometidas a una serie de tratamientos, con el objetivo de garantizar su funcionalidad y rigidez estructural. En una primera etapa, los modelos impresos fueron retirados de la plataforma de construcción utilizando una espátula de goma. También se removieron los soportes que se generaron en etapas anteriores.

Posteriormente, las piezas fueron limpiadas en alcohol industrial, con el propósito de eliminar los residuos de resina no polimerizada adheridos a la superficie. Finalmente, los modelos impresos fueron curados mediante exposición a radiación ultravioleta (UV) durante un período de 45 minutos, utilizando la radiación solar como fuente de curado, tal como se muestra en la **Figura 84**.

**Figura 84.** *Limpieza y curado de las piezas impresas.*



Posterior a la etapa de curado, cada elemento fue sometido a un proceso de preparación superficial previo a la aplicación de pintura automotriz. Inicialmente, las piezas fueron lijadas de manera progresiva utilizando lijas de grano 220, 360, 400, 600, 800, 1200 y 1500, con el objetivo de obtener una superficie lisa y uniforme, de esta manera se eliminaron imperfecciones superficiales originadas durante el proceso de impresión y por la remoción de los soportes. Este procedimiento permite mejorar la adherencia de los recubrimientos posteriores.

Una vez finalizado el lijado, se aplicó un promotor de adherencia para plásticos, seguido de una capa de primer, cuya función fue sellar poros y micro defectos que no pudieron ser corregidos

completamente mediante el tratamiento abrasivo. Finalmente, se aplicaron capas de pintura automotriz, empleando un acabado gris metálico para la manija y el elevador de vidrios, mientras que para la carcasa del tanque de agua se utilizó pintura negra. En conjunto, estos procesos permitieron reproducir de manera satisfactoria el aspecto visual de las piezas originales, manteniendo coherencia estética con los componentes de fábrica. Las piezas finalizadas se representan en la **Figura 85**, **Figura 86** y **Figura 87**.

**Figura 85.** *Carcasa del tanque de agua, pieza finalizada.*



**Figura 86.** *Elevador de vidrios, pieza finalizada.*



**Figura 87.** *Manija de puerta, pieza finalizada.*



Una vez concluidos los procesos de acabado superficial y pintado, se realizó la validación dimensional y funcional de las piezas fabricadas mediante un procedimiento de comprobación manual. Esta validación consistió en verificar el correcto calce y acoplamiento de cada componente con su respectivo sistema dentro del vehículo, evaluando de manera directa aspectos

como el ajuste geométrico, la alineación con los elementos adyacentes y la compatibilidad con los puntos de montaje originales. Adicionalmente, se comprobó su funcionalidad a través de pruebas manuales de operación, observando el comportamiento mecánico, la estabilidad y la respuesta durante su uso normal. Los resultados obtenidos permitieron confirmar que las piezas impresas presentan un desempeño adecuado y cumplen con los requisitos funcionales necesarios para su integración en el sistema correspondiente, tal como se puede observar en la **Figura 88**, **Figura 89** y **Figura 90**.

**Figura 88.** *Validación dimensional y funcional, manija puerta.*



**Figura 89.** *Validación dimensional y funcional, elevador de vidrios*



**Figura 90.** *Validación dimensional y funcional, carcasa.*



#### **4.7. Comparación: piezas originales VS piezas impresas**

En el presente apartado se efectuó una comparación técnica y económica entre la pieza original y la pieza fabricada mediante impresión 3D, con el objetivo de evaluar la viabilidad de la impresión 3D como alternativa de reemplazo. Para ello, se establecieron criterios de análisis que permiten evaluar ambos componentes, considerando el material, el peso, el precio, la disponibilidad en el mercado y el tiempo de obtención de la pieza.

La **Tabla 34** muestra la comparación entre la manija original de la puerta y la pieza fabricada mediante impresión 3D. Los resultados evidencian una reducción significativa del tiempo de obtención, del peso y del costo en la pieza impresa, además de una mayor disponibilidad, al no depender de repuestos escasos en el mercado

**Tabla 34.** Comparación de la manija de puerta, Ford LTD 1975.

<b>Manija de la puerta</b>		
<b>Criterios</b>	<b>Pieza original</b>	<b>Pieza impresa</b>
Tiempo de obtención de la pieza (h)	360 (15 días)	2h5m
Peso (g)	130	20,5
Disponibilidad	Escasas piezas disponibles	Impresión 3D
Precio (\$)	40-50	1,8
Material de la pieza	Acero cromado	Resina tipo ABS

La **Tabla 35** presenta la comparación del elevador de vidrios, donde la pieza original, fabricada en acero cromado, registra un tiempo de obtención aproximado de 72 horas (3 días), un peso de 120 g y un costo estimado entre 20 y 30 dólares, además de una disponibilidad limitada en el mercado. En contraste, la pieza fabricada mediante impresión 3D en resina tipo ABS puede obtenerse en 4 h 17 min, con un peso de 50 g y un costo aproximado de 2,75 dólares, lo que evidencia una reducción significativa en tiempo, masa y precio, así como una mejora sustancial en la accesibilidad del componente.

**Tabla 35.** Comparación elevador de vidrios, Ford LTD 1975.

<b>Elevador de vidrios</b>		
<b>Criterios</b>	<b>Pieza original</b>	<b>Pieza impresa</b>
Tiempo de obtención de la pieza (h)	72 horas (3 días)	4h17min
Peso (g)	120	50
Disponibilidad	Escasas piezas disponibles	Impresión 3D
Precio (\$)	20-30	2,75
Material de la pieza	Acero cromado	Resina tipo ABS

La **Tabla 36** presenta la comparación correspondiente a la carcasa del depósito del tanque de agua, donde se evidencia que la pieza original, fabricada en polipropileno (PP), no se encuentra disponible en el mercado, lo que imposibilita su adquisición en términos de tiempo y costo. En contraste, la pieza fabricada mediante impresión 3D en resina tipo ABS puede obtenerse en 4 h 1 min, con un peso de 51,469 g y un costo aproximado de 2,85 dólares, valores comparables al peso

de la pieza original (57,7 g). Estos resultados confirman que la manufactura aditiva permite reproducir componentes indisponibles, manteniendo características físicas similares y ofreciendo una solución rápida y económicamente viable.

**Tabla 36.** *Comparación de la carcasa, Ford LTD 1975.*


<b>Carcasa del deposito del tanque de agua</b>		
<b>Criterios</b>	<b>Pieza original</b>	<b>Pieza impresa</b>
Tiempo de obtención de la pieza (h)	No disponible	4h1min
Peso (g)	57,7	51,469
Disponibilidad	Unidades limitadas	Impresión 3D
Precio (\$)	50	2,85
Material de la pieza	Polipropileno (PP)	Resina tipo ABS

El análisis comparativo entre las piezas originales y las fabricadas mediante impresión 3D demuestra que la manufactura aditiva constituye una solución técnica y económicamente viable para la sustitución de componentes en vehículos clásicos. En los tres casos analizados se evidencian reducciones significativas en el tiempo de obtención, el peso y el costo, así como una alta disponibilidad, especialmente relevante cuando los repuestos originales son escasos o inexistentes en el mercado, como ocurre con la carcasa del depósito del tanque de agua. Si bien existen diferencias en los materiales de fabricación respecto a las piezas originales, los componentes impresos en resina tipo ABS presentan un desempeño funcional adecuado y características físicas comparables,

#### **4.8. Catálogo de cada pieza**

En la **Tabla 37** se presenta el catálogo final de las piezas digitalizadas e impresas, el cual fue elaborado a partir de la matriz definida en la metodología. Dicho catálogo resume de manera ordenada las piezas seleccionadas, integrando la información obtenida durante las etapas de digitalización, post-procesamiento y fabricación, y permitiendo una visión global de los resultados alcanzados.

**Tabla 37.** *Catálogo de las piezas escaneadas e impresas.*

<b>CATÁLOGO DE LAS PIEZAS FABRICADAS</b>			
<b>Información general</b>	<b>Manija de la puerta</b>	<b>Manija elevador de vidrios</b>	<b>Carcasa exterior del deposito de agua</b>
Código	P001	P002	P003
Sistema	Apertura puerta	Apertura vidrios	Protección, deposito de agua
Material	Resina ABS	Resina ABS	Resina ABS
Peso	20,5 g	50 g	51,469 g
Precio	1,8 \$	2,75 \$	2,85 \$
Recubrimiento	Primer y pintura	Primer y pintura	Primer y pintura
<b>Información de fabricación</b>			
Consumo (ml)	17,879	44,8 ml	4h1m
Tiempo de impresión (h,m,s)	2h,5min,10s	4h17m31s	MSLA
Tecnología impresión	MSLA	MSLA	Medianos
Tipo de soportes	Medianos	Medianos	Luz estructurada
Tecnología de escaneo	Luz estructurada	Luz estructurada	20 min.
Tiempo digitalización (m)	19	27 min.	
<b>Propiedades mecánicas</b>			
Esfuerzo por flexión (MPa)	36	25	16
Esfuerzo cortante (MPa)	0,42	0,57	-
Deflexión (mm)	9	5	0,29
Deformación unitaria (%)	1,1	0,91	0,525
Factor de seguridad	1,37	2	3,10
Esfuerzo por torsión (MPa)	-	3,39	-
<b>Anexos</b>			
			

#### 4.9. Presupuesto de fabricación

Como parte de los resultados obtenidos, se realizó un análisis del presupuesto asociado a la fabricación de las piezas digitalizadas e impresas mediante tecnología 3D. El material de impresión utilizado corresponde a resina tipo ABS, cuyo costo comercial es de 55\$ por litro. Dicho volumen fue suficiente para la fabricación de todas las piezas incluidas en el estudio, registrándose un remanente de material al finalizar el proceso. Por esta razón, el costo del material se calculó a partir del consumo real de resina por pieza, expresado en mililitros, considerando un costo unitario de 0.055 \$/ml, el cual fue distribuido de manera individual para cada elemento fabricado. Adicionalmente, se consideraron los costos asociados a la impresión 3D y a los procesos de posprocesamiento, dentro de los cuales se incluyen la adquisición de insumos como lijas, primer, pintura y sellador. En la **Tabla 38** se resume el presupuesto de fabricación de cada una de las piezas, permitiendo visualizar de forma comparativa el costo total por pieza.

**Tabla 38.** *Presupuesto para la fabricación de cada pieza.*

<b>Presupuesto para la fabricación de cada pieza</b>			
<b>Criterios</b>	<b>Manija de la puerta</b>	<b>Elevador de vidrio</b>	<b>Carcasa</b>
Material	Resina ABS	Resina ABS	Resina ABS
Consumo de resina (ml)	17,879	45	47
Costo de material (\$)	1,8	2,75	2,85
Costo de impresión (\$)	5	7,25	6
Costo de post-procesamiento (\$)	5	5	5
<b>Total</b>	<b>11,8</b>	<b>15</b>	<b>13,85</b>

De acuerdo con los resultados presentados en la **Tabla 38**, el costo total de fabricación de la manija de la puerta, el elevador de vidrio y la carcasa asciende a 40,65 \$. Este resultado evidencia que la reproducción de piezas de un vehículo clásico mediante tecnologías de digitalización e impresión 3D representa una alternativa económicamente viable, especialmente para aplicaciones de restauración donde la disponibilidad de repuestos originales es limitada

## CAPITULO V

### 5. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

#### 5.1. Conclusiones

- En relación con la caracterización y digitalización de los componentes, se logró identificar y seleccionar tres piezas representativas de un vehículo clásico: la manija de la puerta, el elevador de vidrios y la carcasa exterior del depósito del tanque de agua para la ventana frontal. El proceso de digitalización mediante escaneo 3D permitió capturar con precisión la geometría real de cada pieza, evidenciando su eficacia en la adquisición de formas complejas.
- Respecto a la aplicación de técnicas de posprocesamiento y validación, tanto el análisis mecánico analítico, mediante la idealización de las piezas como vigas en voladizo, como el análisis numérico, demostraron que los esfuerzos generados bajo condiciones reales de operación son inferiores al límite elástico de la resina ABS, establecido en 50 MPa. Asimismo, los factores de seguridad que se obtuvieron fueron superiores a uno, de esta manera se confirmó que las piezas impresas presentan un comportamiento estructural adecuado para su uso funcional. Adicionalmente, los componentes impresos presentaron un ajuste dimensional ideal, asegurando su compatibilidad con los mecanismos originales del vehículo.
- Para el desarrollo del catálogo técnico, se elaboró un registro detallado que contempla información relevante de cada pieza como, el material utilizado, los parámetros de impresión, las propiedades mecánicas (esfuerzos por flexión y torsión, deformación unitaria, deflexión y factor de seguridad), así como datos de peso, consumo de resina,

tiempos de digitalización e impresión y costos de fabricación. Este catálogo es una herramienta técnica útil que puede servir como base para futuros procesos de restauración.

- Desde el punto de vista económico, el análisis de costos permitió determinar que el costo total de fabricación de las tres piezas asciende a 40,65\$, considerando el consumo de material, los insumos empleados en el posprocesamiento y el costo de impresión 3D. El tiempo empleado para la fabricación de las piezas esta en un promedio de 3h57m aproximadamente. Este resultado demuestra que la fabricación aditiva representa una alternativa económicamente viable para la reproducción de piezas funcionales.

## **5.2. Recomendaciones**

- En futuros estudios se recomienda ampliar la caracterización del vehículo clásico mediante la digitalización de un mayor número de piezas y el uso de diferentes tecnologías de escaneo 3D, con el fin de evaluar su precisión y capacidad de digitalización. Esto permitiría fortalecer la documentación digital de piezas originales, preservando de manera más completa su geometría y características estéticas.
- Se recomienda analizar de manera mas detallada el comportamiento mecánico de las piezas fabricadas, especialmente en aquellas sometidas a cargas constantes, como manijas de puertas y elevadores de vidrios. Para estos casos, se recomienda evaluar el uso de materiales y tecnologías de fabricación aditiva alternativas, como procesos de impresión 3D con materiales metálicos mediante sinterización o fusión de polvo.
- Se recomienda ampliar el catálogo técnico desarrollado, incorporando resultados de validaciones, como ensayos de desgaste, fatiga o envejecimiento acelerado, así como la inclusión de nuevos objetos de estudio y configuraciones de fabricación tridimensional.

## REFERENCIAS

- [1] J. Murta, V. Amaral, and F. Brito e Abreu, “Trusted Evidences on the Digital Transformation of Classic Cars Restoration,” in *Procedia Computer Science*, Elsevier B.V., 2024, pp. 254–263. doi: 10.1016/j.procs.2024.01.025.
- [2] M. Edl, M. Mizerák, and J. Trojan, “3D laser scanners: history and applications,” *Acta Simulatio*, vol. 4, no. 4, pp. 1–5, Dec. 2018, doi: 10.22306/asim.v4i4.54.
- [3] T. magazine - Steve Johnson, “E&T Magazine, Volume 16, Issue 9, Oct 2021 - Page 42-47.” [Online]. Available: [www.EandTmagazine.com](http://www.EandTmagazine.com)
- [4] “Diseño 3D mediante CAD.” Accessed: Oct. 27, 2025. [Online]. Available: <https://www.infinitiaresearch.com/laboratorio-ingenieria-industrial/disenio-3d-cad/>
- [5] E. G. Zumba Novay, “Optimización en el proceso de fabricación por impresión 3d de la manija del elevador de vidrios del vehículo Chevrolet Aveo Family para la mejora de propiedades mecánicas y térmicas,” 2021, Accessed: Oct. 27, 2025. [Online]. Available: <https://repositorio.uisek.edu.ec/handle/123456789/4074>
- [6] A. C. Kyaw, N. Nagengast, C. Usma-Mansfield, and F. K. Fuss, “A Combined Reverse Engineering and Multi-Criteria Decision-Making Approach for Remanufacturing a Classic Car Part,” in *Procedia CIRP*, Elsevier B.V., 2023, pp. 222–228. doi: 10.1016/j.procir.2023.02.133.
- [7] J. P. Lago Job, “Revisión de las técnicas de fabricación aditiva y sus aplicaciones.,” 2020, Accessed: Oct. 27, 2025. [Online]. Available: <https://riull.ull.es/xmlui/handle/915/21410>
- [8] Y. Mohseni *et al.*, “Investigating impacts of FDM printing parameters and geometrical features on void formation in 3D printed automotive components,” *Mater. Today Proc.*, Jun. 2023, doi: 10.1016/j.matpr.2023.06.078.

- [9] S. Rouf, A. Raina, M. Irfan Ul Haq, N. Naveed, S. Jeganmohan, and A. Farzana Kichloo, “3D printed parts and mechanical properties: Influencing parameters, sustainability aspects, global market scenario, challenges and applications,” Jul. 01, 2022, *KeAi Communications Co.* doi: 10.1016/j.aiepr.2022.02.001.
- [10] Registro oficial, “Edición Especial Año I-N°241 - 027-DIR-2014-ANT Expídesse el ‘Reglamento de vehículos automotores clásicos.’” Accessed: Oct. 13, 2025. [Online]. Available: <https://www.registroficial.gob.ec/261974-2/>
- [11] “The Difference Between Classic, Antique, and Vintage Cars?” Accessed: Oct. 13, 2025. [Online]. Available: <https://www.lallisandhiggins.com/lallis-and-higgins-blog/the-difference-between-classic-antique-and-vintage-cars>
- [12] D. Kielminski, E. Atkinson, D. Peters, S. Willson, and T. Atkinson, “Crash characteristics for classic/historic vehicles and comparisons to newer vehicles,” *J. Safety Res.*, vol. 84, pp. 18–23, 2023, doi: <https://doi.org/10.1016/j.jsr.2022.10.004>.
- [13] “Los 50 coches clásicos más bellos de todos los tiempos.” Accessed: Oct. 13, 2025. [Online]. Available: <https://www.autobild.es/noticias/50-coches-clasicos-bellos-todos-tiempos-1022573>
- [14] FIVA, “BOOK\_Charter of Turin (versión web), PDF,.” Accessed: Oct. 13, 2025. [Online]. Available: <https://www.fiva.org/en/commissions/culture-youth-commission/culture-commission/charter-of-turin>
- [15] Instituto Ecuatoriano de Normalización (INEN), ““RTE INEN 017: Control de Emisiones Contaminantes de Fuentes Móviles Terrestres,”” 2008.
- [16] Instituto Ecuatoriano de Normalización (INEN), ““RTE INEN 034: Elementos Mínimos de Seguridad en Vehículos Automotores,”” 2016.

- [17] FIVA, “FIVA Technical Code 2025.” Accessed: Oct. 13, 2025. [Online]. Available: <https://www.fiva.org/en/services/documents>
- [18] J. C. Torres, P. Cano, J. Melero, M. España, and J. Moreno, “Aplicaciones de la digitalización 3D del patrimonio,” *Virtual Archaeology Review*, vol. 1, no. 1, pp. 51–54, Apr. 2010, doi: 10.4995/var.2010.4768.
- [19] J. Zhang, S. Liu, R. X. Gao, and L. Wang, “Neural rendering-enabled 3D modeling for rapid digitization of in-service products,” *CIRP Annals*, vol. 72, no. 1, pp. 93–96, 2023, doi: <https://doi.org/10.1016/j.cirp.2023.04.013>.
- [20] A. Mathys, J. Brecko, and P. Semal, “Comparing 3D digitizing technologies: What are the differences?,” in *2013 Digital Heritage International Congress (DigitalHeritage)*, 2013, pp. 201–204. doi: 10.1109/DigitalHeritage.2013.6743733.
- [21] Y. Yang, H. Zhang, A. B. Fernández, S. Alemany, S. Chen, and G. Zhang, “Digitalization of 3-D Human Bodies: A Survey,” *IEEE Transactions on Consumer Electronics*, vol. 70, no. 1, pp. 3152–3166, 2024, doi: 10.1109/TCE.2024.3363616.
- [22] R. Vela, “Formación en Digitalización 3D,” Oct. 2021.
- [23] R. Wang, “3D Reconstruction Using a Linear Laser Scanner and A Camera,” in *2021 2nd International Conference on Artificial Intelligence and Computer Engineering (ICAICE)*, 2021, pp. 666–673. doi: 10.1109/ICAICE54393.2021.00131.
- [24] X. Tang, C. Ying, Z. Feng, G. Xiaoxiao, W. Haiping, and T. Yi, “Research on tree scanning and data processing based on 3D laser scanning system,” in *International Conference on Information Science and Technology*, 2011, pp. 421–426. doi: 10.1109/ICIST.2011.5765282.

- [25] J. A. B. Neto, J. L. Lima, A. I. Pereira, and P. Costa, “Low-cost 3D LIDAR-based scanning system for small objects,” in *2021 22nd IEEE International Conference on Industrial Technology (ICIT)*, 2021, pp. 907–912. doi: 10.1109/ICIT46573.2021.9453657.
- [26] Y. Shan, “Research on the Development Trend of Cultural and Creative Products under 3D Digital Technology,” in *2021 International Conference on Culture-oriented Science & Technology (ICCST)*, 2021, pp. 177–180. doi: 10.1109/ICCST53801.2021.00046.
- [27] H. Esmaili and H. Thwaites, “Virtual photogrammetry,” in *2016 22nd International Conference on Virtual System & Multimedia (VSMM)*, 2016, pp. 1–6. doi: 10.1109/VSMM.2016.7863153.
- [28] M. C. Tsakoumaki, D. M. Lala, A. Tsaroucha, and A. Psalti, “Advanced Digitization Methods for the Protection and Dissemination of Cultural Heritage towards Digital transformation: The Archaeological Museum of Delphi,” *Procedia CIRP*, vol. 118, pp. 1056–1060, 2023, doi: <https://doi.org/10.1016/j.procir.2023.06.181>.
- [29] S. Usui, Y. Noborimoto, Y. Watanabe, and H. Furukawa, “An Examination of Learning 3D Modeling Software and Creating 3D Data Using Online Video in a 3D Printer Workshop for High School Students,” in *2021 10th International Congress on Advanced Applied Informatics (IIAI-AAI)*, 2021, pp. 924–925. doi: 10.1109/IIAI-AAI53430.2021.00165.
- [30] L. Á. Quiñones Rodríguez, J. P. Pavón, I. C. Ramírez, L. G. Bayard, and M. A. I. Oquendo, “Clinical implementation of 3D printed plesiotherapy moulds using free open source software,” *Annals of 3D Printed Medicine*, vol. 12, p. 100124, 2023, doi: <https://doi.org/10.1016/j.stlm.2023.100124>.
- [31] D. Tanasi, K. Stroud, D. Cardona, D. Calderone, P. Trapani, and F. Pirone, “Digital preservation and archaeoastronomical insights: 3D digitization of megalithic heritage in the

- Maltese Archipelago,” *J. Appl. Geophys.*, p. 105434, 2024, doi: <https://doi.org/10.1016/j.jappgeo.2024.105434>.
- [32] X. Fan, G. Li, D. Li, Y. Ren, W. Gao, and T. H. Li, “Deep Geometry Post-Processing for Decompressed Point Clouds,” in *2022 IEEE International Conference on Multimedia and Expo (ICME)*, 2022, pp. 1–6. doi: 10.1109/ICME52920.2022.9859723.
- [33] N. Kamarauzaman, N. M. Tarmizi, M. S. C. Mat, and A. M. Samad, “3D printing using digital photogrammetric data,” in *2015 IEEE 11th International Colloquium on Signal Processing & Its Applications (CSPA)*, 2015, pp. 66–71. doi: 10.1109/CSPA.2015.7225620.
- [34] M. S. M. Kamel, R. M. Elmasry, and M. A.-M. Salem, “3D Mesh Model Generation from 2D Images for Small Furniture Items,” in *2023 International Mobile, Intelligent, and Ubiquitous Computing Conference (MIUCC)*, 2023, pp. 1–6. doi: 10.1109/MIUCC58832.2023.10278343.
- [35] Y. j. Ban, H. s. Kim, and C. j. Park, “3D Mesh Reconstruction from Height map and Post Processing,” in *2018 International Conference on Information and Communication Technology Convergence (ICTC)*, 2018, pp. 1491–1493. doi: 10.1109/ICTC.2018.8539362.
- [36] S. P. Deshmukh *et al.*, “Design and development of XYZ scanner for 3D printing,” in *2017 International Conference on Nascent Technologies in Engineering (ICNTE)*, 2017, pp. 1–5. doi: 10.1109/ICNTE.2017.7947905.
- [37] Z. Qi and Y. Chen, “Investigation of Ergonomics in Photocuring 3D Printing Post-Processing Using Jack,” in *2020 IEEE 7th International Conference on Industrial Engineering and Applications (ICIEA)*, 2020, pp. 326–329. doi: 10.1109/ICIEA49774.2020.9101927.

- [38] D. Sergio Valverde González, D. Francisco, and J. Santos Martín, “Puesta a punto de un sistema de digitalización 3D para la medición de piezas de revolución metálicas sin contacto,” 2017, Accessed: Oct. 27, 2025. [Online]. Available: <https://uvadoc.uva.es/handle/10324/23306>
- [39] “¿Qué es el escaneo 3D y qué tipos de escáneres hay? - EinScan.” Accessed: Oct. 22, 2025. [Online]. Available: <https://www.einscan.com/applications/que-es-el-escaneo-3d-y-que-tipos-de-escaneres-hay/>
- [40] R. B. Taqriban, R. Ismail, M. Ariyanto, and A. F. Y. S. Putra, “3D Model of Photogrammetry Technique for Transtibial Prosthetic Socket Design Development,” in *2019 International Seminar on Research of Information Technology and Intelligent Systems (ISRITI)*, 2019, pp. 456–461. doi: 10.1109/ISRITI48646.2019.9034670.
- [41] I. Drofova, H. Wang, W. Guo, M. Pospisilik, M. Adamek, and J. Valouch, “3D reconstruction of a group of plants by the ground multi-image photogrammetry method,” in *2023 33rd International Conference Radioelektronika (RADIOELEKTRONIKA)*, 2023, pp. 1–4. doi: 10.1109/RADIOELEKTRONIKA57919.2023.10109045.
- [42] A. M. Samad, N. H. Sauri, M. A. Hamdani, R. Adnan, and A. Ahmad, “Kellie’s Castle facade recording using digital close-range photogrammetry,” in *2012 IEEE 8th International Colloquium on Signal Processing and its Applications*, 2012, pp. 216–222. doi: 10.1109/CSPA.2012.6194721.
- [43] H. Bi, W. Zheng, J. Zeng, and X. Fan, “Modeling the topography of fault zone based on structure from motion photogrammetry,” in *2017 IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium (IGARSS)*, 2017, pp. 6251–6254. doi: 10.1109/IGARSS.2017.8128437.

- [44] S. Liu and M. J. Bin Mamat, “Application of 3D laser scanning technology for mapping and accuracy assessment of the point cloud model for the Great Achievement Palace heritage building,” *Herit. Sci.*, vol. 12, no. 1, 2024, doi: 10.1186/s40494-024-01252-y.
- [45] “¿Escáner láser 3D o escáner de luz estructurada? - 3Dnatives.” Accessed: Oct. 22, 2025. [Online]. Available: <https://www.3dnatives.com/es/escaner-laser-3d-escaner-luz-estructurada-mejor-080820192/>
- [46] Y. Wan *et al.*, “Application of Structured-light 3D Reconstruction in Virtual Assembly,” in *2021 3rd International Conference on Advances in Computer Technology, Information Science and Communication (CTISC)*, 2021, pp. 393–397. doi: 10.1109/CTISC52352.2021.00077.
- [47] M. Piccirilli, G. Doretto, A. Ross, and D. Adjeroh, “A Mobile Structured Light System for 3D Face Acquisition,” *IEEE Sens. J.*, vol. 16, no. 7, pp. 1854–1855, 2016, doi: 10.1109/JSEN.2015.2511064.
- [48] X. Zhu, Z. Zhang, L. Hou, L. Song, and H. Wang, “Light field structured light projection data generation with Blender,” in *2022 3rd International Conference on Computer Vision, Image and Deep Learning & International Conference on Computer Engineering and Applications (CVIDL & ICCEA)*, 2022, pp. 1249–1253. doi: 10.1109/CVIDLICCEA56201.2022.9824921.
- [49] X. Xia, Z. Xu, Z. Han, and Z. Chen, “Research on target measurement based on fusion of binocular and TOF system,” in *2022 3rd International Conference on Computer Vision, Image and Deep Learning & International Conference on Computer Engineering and Applications (CVIDL & ICCEA)*, 2022, pp. 290–293. doi: 10.1109/CVIDLICCEA56201.2022.9824353.

- [50] S. Huang, F. Gu, Z. Cheng, and Z. Song, "A Joint Calibration Method for the 3D Sensing System Composed with ToF and Stereo Camera," in *2018 IEEE International Conference on Information and Automation (ICIA)*, 2018, pp. 905–910. doi: 10.1109/ICInfA.2018.8812532.
- [51] L. Gargalis *et al.*, "Development and Testing of Soft Magnetic Rotor for a Switched Reluctance Motor Built Through Additive Manufacturing Technology," in *2020 23rd International Conference on Electrical Machines and Systems (ICEMS)*, 2020, pp. 263–268. doi: 10.23919/ICEMS50442.2020.9290893.
- [52] T. S. Tamir *et al.*, "Terms Development of Additive Manufacturing," in *2022 IEEE 2nd International Conference on Digital Twins and Parallel Intelligence (DTPI)*, 2022, pp. 1–5. doi: 10.1109/DTPI55838.2022.9998939.
- [53] F. Cheng, "Comparative study on the application of 3D printing and digital printing technology in fashion design," in *2022 World Automation Congress (WAC)*, 2022, pp. 202–206. doi: 10.23919/WAC55640.2022.9934299.
- [54] M. M. Strljic, I. Younes, and O. Riedel, "Study on Available Cloud Manufacturing Platforms for Additive Manufacturing Technologies," in *2022 IEEE 4th Eurasia Conference on IOT, Communication and Engineering (ECICE)*, 2022, pp. 416–421. doi: 10.1109/ECICE55674.2022.10042822.
- [55] S. Hemajothi, S. K. S, V. J. Kumar, and S. V, "Stereolithography using Poly Lactic Acid (PLA) Filament," in *2023 International Conference on Recent Advances in Science and Engineering Technology (ICRASET)*, 2023, pp. 1–7. doi: 10.1109/ICRASET59632.2023.10420243.

- [56] W.-D. Li *et al.*, “Additive Manufacturing of Polymer-Matrix Composite Dielectric Materials Using Stereolithography Technique,” in *2021 International Conference on Electrical Materials and Power Equipment (ICEMPE)*, 2021, pp. 1–4. doi: 10.1109/ICEMPE51623.2021.9509221.
- [57] Z. Miller, B. Stidham, T. Fairbanks, and C. Maldonado, “The Use of Stereolithography (SLA) Additive Manufacturing in Space-Based Instrumentation,” in *2023 IEEE Aerospace Conference*, 2023, pp. 1–10. doi: 10.1109/AERO55745.2023.10115988.
- [58] K. J. Jhong and W. H. Lee, “Fabricating soft magnetic composite by using selective laser sintering,” in *2016 IEEE International Conference on Industrial Technology (ICIT)*, 2016, pp. 1115–1118. doi: 10.1109/ICIT.2016.7474910.
- [59] M. H. Ali, Y. Zhantlessov, A. Zhagiparova, D. Adair, and E. Shehab, “Development of a Multi-Material Selective Laser Sintering-Based 3D Printer,” in *2023 IEEE 11th Conference on Systems, Process & Control (ICSPC)*, 2023, pp. 177–181. doi: 10.1109/ICSPC59664.2023.10420321.
- [60] M. M. Hoque, M. M. H. Jony, M. M. Hasan, and M. H. Kabir, “Design and Implementation of an FDM Based 3D Printer,” in *2019 International Conference on Computer, Communication, Chemical, Materials and Electronic Engineering (IC4ME2)*, 2019, pp. 1–5. doi: 10.1109/IC4ME247184.2019.9036538.
- [61] A. C. Russo *et al.*, “FDM 3D Printing of high performance composite materials,” in *2019 II Workshop on Metrology for Industry 4.0 and IoT (MetroInd4.0&IoT)*, 2019, pp. 355–359. doi: 10.1109/METROI4.2019.8792862.

- [62] P. M. Hernandez Castellano, *Tecnologías de fabricación aditiva*. Universidad de Las Palmas de Gran Canaria. Servicio de Publicaciones y Difusión Científica, 2018. [Online]. Available: <https://elibro.net/es/lc/utnorte/titulos/57246>
- [63] A. Lamikiz Mentxaka, A. M. Camacho Lopez, and S. Ferrandiz Bou, *Fabricación Aditiva*. UNED - Universidad Nacional de Educación a Distancia, 2023. [Online]. Available: <https://elibro.net/es/lc/utnorte/titulos/246705>
- [64] X. Xu, “Application of Image Recognition Technology in 3D Printing Material Selection,” in *2024 International Conference on Electrical Drives, Power Electronics & Engineering (EDPEE)*, 2024, pp. 557–560. doi: 10.1109/EDPEE61724.2024.00110.
- [65] M. Berchon and B. Luyt, *La impresión 3D: guía definitiva para makers, diseñadores, estudiantes, profesionales, artistas y manitas en general*. Editorial GG, 2016. [Online]. Available: <https://elibro.net/es/lc/utnorte/titulos/45582>
- [66] “Impresión 3D en el sector del automóvil | Dassault Systèmes.” Accessed: Oct. 27, 2025. [Online]. Available: <https://www.3ds.com/es/make/solutions/industries/automotive-3d-printing>
- [67] “Aston Martin utiliza la impresión 3D y la fibra de carbono para su nuevo DBR22 - 3Dnatives.” Accessed: Oct. 15, 2025. [Online]. Available: <https://www.3dnatives.com/es/aston-martin-fibra-carbono-dbr22-300820222/#!>
- [68] “Piezas de coche impresas en 3D: Porsche presenta pistones impresos en 3D para el GT2 RS - 3DPrint.com | Fabricación aditiva.” Accessed: Oct. 15, 2025. [Online]. Available: [https://3dprint.com/270300/mahle-trumpf-porsche-introduce-3d-printed-pistons-for-gt2-rs/?utm\\_source=chatgpt.com](https://3dprint.com/270300/mahle-trumpf-porsche-introduce-3d-printed-pistons-for-gt2-rs/?utm_source=chatgpt.com)

- [69] “NERA: World’s first 3D printed E-Motorcycle - BigRep Industrial 3D Printers.” Accessed: Oct. 16, 2025. [Online]. Available: <https://bigrep.com/nera-e-motorbike/>
- [70] “Los mejores softwares CAD para todos los niveles - 3Dnatives.” Accessed: Oct. 16, 2025. [Online]. Available: <https://www.3dnatives.com/es/mejores-softwares-cad-programa-180320192/#!>
- [71] “Todo lo que necesita saber sobre las maquinas de medición por sus tipos y aplicaciones – Máquinas de medición por coordenadas.” Accessed: Oct. 16, 2025. [Online]. Available: <https://maquinasdemedicionporcoordenadas.com/2023/05/04/todo-lo-que-necesita-saber-sobre-las-maquinas-de-medicion-por-coordenadas-sus-tipos-y-aplicaciones/>
- [72] “3D Printing Dimensional Accuracy – Raise3D: Reliable, Industrial Grade 3D Printer.” Accessed: Oct. 16, 2025. [Online]. Available: <https://www.raise3d.com/blog/3d-printing-dimensional-accuracy/>
- [73] “¿Qué son las pruebas destructivas y no destructivas?” Accessed: Oct. 22, 2025. [Online]. Available: <https://dewesoft.com/es/blog/que-son-pruebas-destructivas-y-no-destructivas>
- [74] G. Chang Nieto, *Guías de laboratorio: resistencia de materiales*. Editorial Unimagdalena, 2015. [Online]. Available: <https://elibro.net/es/lc/utnorte/titulos/70100>
- [75] ASTM International, “Standard Test Method for Tensile Properties of Plastics,” West Conshohocken, PA, 2014.
- [76] ISO 527-3:2018, “Plastics — Determination of tensile properties — Part 3: Test conditions for films and sheets,” Geneva, Nov. 2018.
- [77] D. Martins Galina, D. Pereira Garcia, G. Gonçalves de Souza, L. R. Resende da Silva, and R. Maziero, “Caracterización de las propiedades mecánicas de los cuerpos de prueba ABS confeccionados con diferentes parámetros de extrusión vía impresión 3D,” *Revista*

- Iberoamericana de Polímeros*, ISSN 1988-4206, ISSN-e 0121-6651, Vol. 17, N<sup>o</sup>. 6, 2016, págs. 303-309, vol. 17, no. 6, pp. 303–309, 2016, Accessed: Jan. 19, 2026. [Online]. Available:  
<https://dialnet.unirioja.es/servlet/articulo?codigo=5726367&info=resumen&idioma=SPA>
- [78] “Línea de productos EMIC - GDAQ - Soluciones de ensayos destructivos y no destructivos.” Accessed: Oct. 17, 2025. [Online]. Available: <https://gdaq.com.br/linha-de-produtos-emic/>
- [79] “Software de análisis de elementos finitos (FEA) | Autodesk.” Accessed: Oct. 22, 2025. [Online]. Available: <https://www.autodesk.com/solutions/simulation/finite-element-analysis>
- [80] G. Alonso Ruiz-Domínguez, M. Rodolfo Ulises Rivera-Landaverde, M. Gilberto Orrantia-Daniel, M. María de Jesús Tellez-Moroyoqui, and I. Ángel Adrián Valenzuela-Martínez, “Estudio de esfuerzo y deformación de piezas de impresión 3D,” *ConCiencia Tecnológica*, ISSN-e 1405-5597, N<sup>o</sup>. 57 (Enero-Julio), 2019 (Ejemplar dedicado a: 50 aniversario de las carreras de Ingeniería Eléctrica e Ingeniería Mecánica), págs. 28-33, no. 57, pp. 28–33, 2019, Accessed: Oct. 17, 2025. [Online]. Available: <https://dialnet.unirioja.es/servlet/articulo?codigo=7082355&info=resumen&idioma=ENG>
- [81] “Perfilómetro.” Accessed: Oct. 17, 2025. [Online]. Available: <https://www.infinitiaresearch.com/equipamiento-laboratorio/perfilometro/>
- [82] “El acabado de superficies en la impresión 3D: los diferentes métodos existentes - 3Dnatives.” Accessed: Oct. 17, 2025. [Online]. Available: <https://www.3dnatives.com/es/acabado-superficies-impresion-3d-180420232/#!>

- [83] “Ford LTD Wagon.” Accessed: May 29, 2025. [Online]. Available: [https://www.autopista.es/clasicos/ford-ltd-wagon\\_90079\\_102.html](https://www.autopista.es/clasicos/ford-ltd-wagon_90079_102.html)
- [84] C. Cruz del Castillo and S. Olivares Orozco, *Metodologia de la investigacion*. Grupo Editorial Patria, 2014. [Online]. Available: <https://elibro.net/es/lc/utnorte/titulos/39410>
- [85] MIRACO, “Guía rápida del usuario MIRACO V3.0,” 2024.
- [86] “Revopoint Miraco 3D Scanner Review – Maker Hacks.” Accessed: May 21, 2025. [Online]. Available: <https://www.makerhacks.com/revopoint-miraco-3d-scanner-review/>
- [87] “Impresora 3D de resina ELEGOO Saturn 2 8K – ELEGOO US.” Accessed: Jan. 20, 2026. [Online]. Available: <https://eu.elegoo.com/es/products/elegoo-saturn-2-8k-10-inches-mono-lcd-3d-printer>
- [88] Revopoint, “Revo Scan 5 User Manual | Revopint 3D.” Accessed: May 23, 2025. [Online]. Available: <https://revopedia.revopoint3d.com/en/Revoscan/Revoscan5usermanual>
- [89] “Todo lo que necesitas saber sobre el software MeshMixer - 3Dnatives.” Accessed: May 23, 2025. [Online]. Available: <https://www.3dnatives.com/es/meshmixer-software-modelado-261020202/#!>
- [90] “Mezclador de mallas | Fusion | Autodesk App Store.” Accessed: May 23, 2025. [Online]. Available: <https://apps.autodesk.com/FUSION/en/Detail/Index?id=4108920185261935100&appLang=en&os=Win64>
- [91] A. García Sancho, “Manual para el diseño paramétrico con SolidWorks,” 2019, Accessed: May 29, 2025. [Online]. Available: <http://uvadoc.uva.es/handle/10324/37828>
- [92] “Introduction | CHITUBOX Docs.” Accessed: May 29, 2025. [Online]. Available: <https://docs.chitubox.com/en-US/chitubox-basic/latest/introduction>

- [93] “Material ABS-like - manfacter.” Accessed: May 29, 2025. [Online]. Available: <https://manfacter.com/material-abs-like/>
- [94] “Thinner: Encuéntrelo en Sección de Solventes | Pinturas Condor| Ficha tecnica Pdf| Thiner Laca 104 SM-07.” Accessed: Nov. 05, 2025. [Online]. Available: <https://www.pinturascondor.com/product/thinner/>
- [95] “¿Limpiar plástico? Así se hace | Planchasdeplastico.es.” Accessed: Nov. 05, 2025. [Online]. Available: <https://planchasdeplastico.es/procesado/limpiar/>
- [96] “PINTURA EN SPRAY EVANS BLANCO MATE | Pintulac|Ficha técnica PDF.” Accessed: Nov. 05, 2025. [Online]. Available: <https://www.pintulac.com.ec/spray-evans-blanco-mate-400ml.html?srsltid=AfmBOorRdd0X1e5Y2Vu14n1pOqPJwtQYT7IWIHRQOPMlzSBtRwJIYTjR>
- [97] “Lija de agua B-99 Plus - FANDELI- Ficha Tecnica PDF.” Accessed: Nov. 05, 2025. [Online]. Available: <https://www.fandeli.com/usa/es/producto/lija-de-agua-b-99-plus/>
- [98] “Tensión y deformación unitaria - 2021 - Ayuda de SOLIDWORKS.” Accessed: Nov. 12, 2025. [Online]. Available: [https://help.solidworks.com/2021/Spanish/SolidWorks/cworks/c\\_stress\\_strain.htm](https://help.solidworks.com/2021/Spanish/SolidWorks/cworks/c_stress_strain.htm)
- [99] “Soportes de impresión 3D: La guía completa - 3Dnatives.” Accessed: Nov. 13, 2025. [Online]. Available: <https://www.3dnatives.com/es/guia-soportes-de-impresion-3d-200920222/#!>
- [100] “Mecmesin | Esfuerzo de cierre de la puerta del coche.” Accessed: Dec. 08, 2025. [Online]. Available: <https://www.mecmesin.com/es/publications/car-door-closure-effort>

- [101] “Módulo de Young del plástico ABS - Jieya.” Accessed: Dec. 08, 2025. [Online]. Available: <https://jieyatwinscrew.com/es/blog/youngs-modulus-of-abs-plastic/>
- [102] “Revisión del filamento de acrilonitrilo butadieno estireno (ABS).” Accessed: Dec. 16, 2025. [Online]. Available: <https://juggerbot3d.com/3d-printing-material-capabilities/abs-filament-review/>
- [103] V. Ciriello, B. Webster, and P. Dempsey, “Maximal Acceptable Torques of Highly Repetitive Screw Driving, Ulnar Deviation, and Handgrip Tasks for 7Hour Workdays,” *AIHA J. (Fairfax, Va.)*, vol. 63, pp. 594–604, Sep. 2002, doi: 10.1080/15428110208984745.
- [104] Hibbeler Russell C., *Mecánica de materiales*, 8th ed. México: Pearson Educación, 2011.