



**UNIVERSIDAD DE TALCA
FACULTAD DE INGENIERÍA
ESCUELA DE INGENIERÍA CIVIL MECÁNICA**

**USO DE TECNOLOGÍAS 3D EN EL DISEÑO Y
FABRICACIÓN DE PROTOTIPOS**

**MEMORIA PARA OPTAR AL TÍTULO DE
INGENIERO CIVIL MECÁNICO**

PROFESOR GUÍA: GONZALO PINCHEIRA ORELLANA

MARCELO NAVARRETE VÁSQUEZ

CURICÓ - CHILE

2018

CONSTANCIA

La Dirección del Sistema de Bibliotecas a través de su encargado Biblioteca Campus Curicó certifica que el autor del siguiente trabajo de titulación ha firmado su autorización para la reproducción en forma total o parcial e ilimitada del mismo.



Two circular official stamps and handwritten signatures in blue ink. The left stamp is from the 'DIRECCIÓN SISTEMA DE BIBLIOTECAS' of the 'UNIVERSIDAD DE TALCA'. The right stamp is from the 'SISTEMA DE BIBLIOTECAS CAMPUS CURICO' of the 'UNIVERSIDAD DE TALCA'.

Curicó, 2022

DEDICATORIA

*Quiero dedicar esta memoria a mis padres,
mi hermano y mi polola, quienes me han
apoyado incondicionalmente en mi formación
personal.*

Gracias por motivarme a ser mejor persona.

AGRADECIMIENTOS

Quiero agradecer en primera instancia a mi familia, mi polola y amigos por los consejos, compañía y motivación en cada momento.

Quiero agradecer a mi profesor guía Gonzalo Pincheira por el interés, apoyo y buena disposición para contribuir al desarrollo de este proyecto.

Quiero agradecer al equipo que compone a la escuela de ingeniería civil mecánica por mantener siempre su cercanía, disposición, enseñanzas y apoyo para/con los estudiantes.

Quiero agradecer a la FHEU, organización que pertencí a lo largo de esta etapa y en la cual hice grandes amigos.

RESUMEN

El presente documento se desarrolla en torno al área de diseño de ingeniería, contiene un flujo de trabajo para el uso de tecnologías 3D (principalmente del software Geomagic Wrap) disponibles en el laboratorio de desarrollo de productos y prototipos de la escuela de ingeniería civil mecánica de la Universidad de Talca. Sin embargo, la estructura base de la metodología es genérica para las alternativas en el campo de la digitalización e impresión 3D, es decir, primero escanear, segundo procesar nube de puntos, tercero editar y/o analizar computacionalmente y por ultimo fabricar.

El escáner y la impresora 3D tienen una relación directa entre sí, ya que, mediante la digitalización de un objeto se obtiene el modelo 3D de forma rápida y precisa, que luego puede ser estudiado y/o modificado, y finalmente, mediante la impresión 3D se fabrican prototipos de manera eficiente para probar el nuevo diseño o generar nuevas piezas.

Para validar el procedimiento propuesto se elaboró el diseño de una prótesis de mano en base a una real, obteniendo el modelo 3D con el escáner Geomagic Capture y procesando los datos con Geomagic Wrap. luego, se utilizó el software CAD AutoDesk Inventor en la creación de las articulaciones y guías para los tendones artificiales. Posteriormente fabricada en la impresora uPrint SE en material ABS.

Finalmente, se puede concluir que, dentro del proceso de diseño utilizar las tecnologías 3D es muy útil para obtener prototipos de objetos de geometrías complejas con gran precisión y nivel de detalles, ahorrándose tiempo útil. No obstante, el grado de dificultad del proceso, expresado en términos de tiempo necesario para llevar a cabo el proceso y la calidad del producto, variara en función del objeto escaneado.

Palabras Claves: Tecnologías 3D, Escáner 3D, Impresora 3D, Geomagic Wrap, Prótesis de mano, Diseño.

ABSTRACT

This document is developed around the area of engineering design, contains a workflow for the use of 3D technologies (mainly Geomagic Wrap software) available in the laboratory of product development and prototypes of the school of civil engineering the University of Talca. However, the base structure of the methodology is generic for alternatives in the field of digitization and 3D printing, i.e. first scan, second process point cloud, third edit and / or computationally analyze and finally manufacture.

The scanner and the 3D printer have a direct relationship with each other, since, by digitizing an object, the 3D model is obtained quickly and accurately, which can then be studied and / or modified, and finally, by means of 3D printing Prototypes are manufactured efficiently to test the new design or generate new parts.

To validate the proposed procedure, the design of a hand prosthesis based on a real one was obtained, obtaining the 3D model with the Geomagic Capture scanner and processing the data with Geomagic Wrap. then, CAD software AutoDesk Inventor was used in the creation of articulations and guides for artificial tendons. Subsequently manufactured in the uPrint SE printer in ABS material.

Finally, it can be concluded that, within the design process, using 3D technologies is very useful for obtaining prototypes of complex geometry objects with great precision and level of detail, saving useful time. However, the degree of difficulty of the process, expressed in terms of the time needed to carry out the process and the quality of the product, will vary depending on the scanned object.

Keywords: 3D technologies, 3D scanner, 3D printer, Geomagic Wrap, Hand prosthesis, Design.

ÍNDICE

CAPÍTULO 1: INTRODUCCIÓN.....	1
1.1. Antecedente y motivación.....	2
1.2. Descripción del problema	3
1.3. Objetivos	4
1.3.1. Objetivo General.....	4
1.3.2. Objetivos específicos.....	4
1.4. Alcances del proyecto	4
1.5. Metodología y herramientas utilizadas	5
1.6. Resultados esperados	5
1.7. Organización del documento	5
CAPÍTULO 2: MARCO TEÓRICO	6
2.1. Escáner 3D.....	7
2.2. Tipos de escáner 3D.....	7
2.2.1. Contacto.....	7
2.2.2. Sin contacto	8
2.3. Reconstrucción y modelado.....	13
2.3.1. Modelos sólidos CAD	13
2.3.2. Modelos de malla de polígonos	14
2.3.3. Modelos de superficies	15
2.4. Impresora 3D	15
2.5. Tipos de impresoras 3D	16
2.5.1. Modelado por deposición fundida (FDM).....	16
2.5.2. Estereolitografía (SLA)	17
2.5.3. Sinterización selectiva por láser (SLS).....	17
2.5.4. Inyección de material (material jetting).....	17
2.5.5. Inyección de aglutinante (binder jetting).....	18
2.5.6. Fusión en lecho de polvo metálico (powder bed fusion).....	19
2.6. Aplicaciones actuales de las tecnologías 3D	19
CAPÍTULO 3: DISEÑO Y FABRICACIÓN MEDIANTE TECNOLOGÍAS 3D	21
3.1. Características generales de la línea 3D.....	22

3.2.	Digitalización 3D.....	25
3.2.1.	Entorno laboral.....	25
3.2.2.	Posicionamiento del escáner.....	25
3.2.3.	Interfaz de escaneo.....	27
3.2.4.	Software Geomagic Wrap.....	28
3.3.	Impresión 3D.....	31
3.3.1.	Proceso de Impresión 3D.....	31
3.3.2.	Caracterización del material.....	32
3.4.	Flujo de trabajo.....	33
3.4.1.	Escanear.....	33
3.4.2.	Procesar datos.....	34
3.4.3.	Editar o analizar.....	42
3.4.4.	Fabricar.....	43
CAPÍTULO 4: DISEÑO Y FABRICACIÓN DEL PROTOTIPO.....		44
4.1.	Definición del prototipo.....	45
4.2.	Proceso de digitalización.....	46
4.3.	Rediseño en Inventor.....	49
4.4.	Fabricación y ensamble de la prótesis de mano.....	51
CAPÍTULO 5: CONCLUSIÓN Y TRABAJO FUTURO.....		53
5.1.	Conclusiones.....	54
5.2.	Trabajo futuro.....	56
REFERENCIAS.....		57
ANEXOS.....		59
Anexo 1: Posicionamiento del escáner.....		60
Anexo 2: Menú de ajustes.....		61
Anexo 3: Propiedades mecánicas de la resina flexible formlabs.....		63
Anexo 4: Planimetrías.....		64

ÍNDICE DE ILUSTRACIONES

Ilustración 1: Funcionamiento de un escáner de tiempo de vuelo	9
Ilustración 2: Escáner 3D por triangulación	10
Ilustración 3: Funcionamiento escáner 3D por cambio de fase	11
Ilustración 4: Funcionamiento escáner 3D por holografía conoscópica	11
Ilustración 5: Esquema proyección de luz estructurada	12
Ilustración 6: Modelo solido	14
Ilustración 7: Comparativa de modelo poligonal y superficie NURBS	14
Ilustración 8: Modelado por deposición fundida	16
Ilustración 9: Estereolitografía	17
Ilustración 10: Inyección de aglutinante	18
Ilustración 11: Fusión en lecho de polvo	19
Ilustración 12: Características técnicas del escáner 3D	22
Ilustración 13: Impresora 3D modelo uPrint SE	24
Ilustración 14: Temas básicos para la digitalización 3D	25
Ilustración 15: Vista del escáner	26
Ilustración 16: Ajuste de exposición	26
Ilustración 17: Vista del escaneo	27
Ilustración 18: Barra de herramientas	29
Ilustración 19: Interfaz gráfica CatalystEX	31
Ilustración 20: Probeta para ensayo en Tensión	32
Ilustración 21: Flujo de trabajo	33
Ilustración 22: Digitalización del objeto	34
Ilustración 23: Nube de puntos del objeto escaneado	34
Ilustración 24: Registro manual	35
Ilustración 25: Registro global	36
Ilustración 26: Opciones del comando wrap	36
Ilustración 27: Relleno de agujeros	37
Ilustración 28: Antes y después del comando defeature	37
Ilustración 29: Mesh doctor	38
Ilustración 30: Planos creados para alinear al origen	38

Ilustración 31: Alineación a mundo	39
Ilustración 32: Grosor del modelo	40
Ilustración 33: Vista de corte del objeto antes y después de definir un grosor	40
Ilustración 34: Superficie automática	41
Ilustración 35: Análisis de desviación	41
Ilustración 36: Guardar modelo 3D en formato STEP	41
Ilustración 37: Cinta de trabajo de Inventor	42
Ilustración 38: Modelo editado listo para impresión 3D	42
Ilustración 39: Paquete para impresión 3D	43
Ilustración 40: Comparación entre modelo original y réplica	43
Ilustración 41: Resolución de la digitalización	46
Ilustración 42: Nube de puntos de la mano sin dedos	47
Ilustración 43: Proceso de alineación entre dedos y mano	47
Ilustración 44: Geometría reparada del prototipo	48
Ilustración 45: Modelo importado en inventor	49
Ilustración 46: Boceto para seccionar el meñique	49
Ilustración 47: Dedo meñique seccionado	49
Ilustración 48: Rediseño del modelo 3D	50
Ilustración 49: Sistema de acople y rotación	50
Ilustración 50: Detalle del paquete para impresión 3D	51
Ilustración 51: Prótesis impresa y ensamblada	52
Ilustración 52: Menú de ajustes del escáner	61

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1: Comparación de costos del material de modelado de la prótesis	52
Tabla 2: Comparación de costos de material para modelado de las puntas de dedo	52

CAPÍTULO 1: INTRODUCCIÓN

CAPÍTULO 1: INTRODUCCIÓN

1.1. Antecedente y motivación

Se le denomina ingeniería inversa al proceso de descubrir los principios tecnológicos de un objeto, herramienta, dispositivo o sistema, mediante el razonamiento abductivo (haciendo conjeturas) de su estructura, función y operación. Dicho de otra manera, se trata de tomar algo, por ejemplo, un dispositivo mecánico o electrónico, para analizar su funcionamiento en detalle, con el objetivo de crear un dispositivo que haga la misma tarea o una similar sin copiar los detalles del original. Bajo este concepto se toma una mayor relevancia del uso de tecnologías 3D en las diferentes áreas como la industria o la salud, ya que reduce considerablemente los tiempos de diseño y fabricación de prototipos. La principal problemática radica en que se desconocen el uso, alcance y las áreas de aplicación del escáner 3D.

La importancia de las impresoras 3D; radica en la posibilidad de obtener modelos tridimensionales reales de objetos previamente modelados en un software. Este dispositivo se basa en imprimir capas sucesivas de materiales que se forman uno encima del otro, obteniendo como resultado un objeto tangible sin la necesidad de utilizar moldes y logrando geometrías complejas en la fabricación.

Uno de los principales motivos de la aparición de los escáneres 3D es la importancia de las impresoras 3D en los diferentes procesos que pueden ser utilizadas, ya que, con esto es posible obtener un modelo 3D de algún objeto real y luego imprimirlo. El escáner 3D se basa en obtener una nube de puntos que posteriormente es reconstruida y unida entre sí, de esta manera se obtiene el modelo CAD (modelos sólidos), modelos 3D poligonales o modelos de superficies NURBS. Los escáneres pueden llegar a ser muy precisos en formas complejas, incluso capturar los colores y de esta manera utilizando el tipo de impresora 3D adecuada, se podría fabricar un modelo muy real de lo escaneado, teniendo así una gran relevancia en la construcción de prototipos.

1.2. Descripción del problema

Dentro de las instalaciones del departamento de tecnologías industriales de la universidad se encuentran los equipos necesarios para realizar diversas tareas de ingeniería, durante el último año el área de diseño mecánico se ha visto potenciada con la incorporación de nuevos equipos de impresión y digitalización 3D, estos equipos requieren software computacional para procesar los diferentes datos y en ocasiones pueden ser utilizados en más de uno, por lo que solicitan licencias de uso.

El escáner 3D utilizado es el modelo Geomagic Capture® de la compañía 3D Systems, este dispositivo fue adquirido con la intención de replicar piezas dentales utilizadas en la práctica por los aspirantes a odontología, así también, recipientes para membranas de filtración de líquidos, ya que tiene una excelente precisión de grado industrial y relación precio/calidad. Una vez adquirido el dispositivo su uso quedó estancado, por ende, el motivo de este documento.

El problema radica principalmente en el software Geomagic Wrap®, el cual sirve para transformar la nube de puntos obtenida durante el escaneo en modelos 3D. Dicho de otro modo, no se tiene la suficiente información sobre su uso y el procedimiento de obtención de modelos 3D, además, no está enfocado al diseño asistido por computador (CAD), por lo tanto, presenta la desventaja de no poder realizar operaciones de edición al modelo dentro del programa, teniendo que ser procesado hasta lograr un archivo común entre estos dos tipos de programas.

A modo de solución del principal problema se opta por recopilar información sobre su uso, alcances y restricciones, por otro lado, los softwares complementarios al escáner 3D que ofrece la misma compañía son del tipo propietario o de código cerrado, es decir, es necesario la compra de licencia de uso, uno de estos integra comandos de un software de escaneo y CAD, el cual está enfocado a realizar todo tipo de ingeniería inversa (Geomagic® Design X), pero no se considera factible por el elevado costo de la licencia, ya que fluctúa en torno a los USD \$20.000.

CAPÍTULO 1: INTRODUCCIÓN

Finalmente, se opta por crear un flujo de trabajo en Geomagic Wrap® para escanear y realizar el modelo 3D, y luego exportar a AutoDesk Inventor® donde se realiza la edición, ya que, se posee el dominio de ambas licencias de uso.

1.3. Objetivos

1.3.1. Objetivo General

Crear un flujo de trabajo para el uso de tecnologías 3D en el diseño y fabricación de prototipos, las cuales, están disponibles en el laboratorio de desarrollo de productos y prototipos de la Universidad de Talca.

1.3.2. Objetivos específicos

- Clasificar las tecnologías utilizadas en escáneres e impresoras 3D
- Detallar los equipos y programas utilizados.
- Especificar las principales funciones de programa Geomagic Wrap®.
- Describir el procedimiento de digitalización y procesamiento de datos.
- Digitalizar, rediseñar y fabricar un prototipo.

1.4. Alcances del proyecto

Este proyecto contempla agrupar la información con respecto al uso y condiciones de trabajo del escáner 3D modelo Capture®, además de la demostración del procedimiento de digitalización y el procesamiento de los datos obtenidos en el software Geomagic Wrap®, con el fin de obtener modelos 3D editables en un software CAD o directamente ser impresos en 3D.

Además, considera la fabricación de una prótesis de mano que posea articulaciones, para la automatización de los movimientos. Por otro lado, no está considerados el análisis de elementos finitos o selección de componentes para la automatización de la prótesis.

CAPÍTULO 1: INTRODUCCIÓN

1.5. Metodología y herramientas utilizadas

En primera instancia se investigó lo relacionado con el escáner y la impresora 3D, tipos de tecnologías, usos, alcances, etc., luego se procedió a escoger una aplicación, para así validar el procedimiento propuesto en la digitalización del objeto y posteriormente sea editado en AutoDesk Inventor.

La fabricación de la prótesis de mano tiene como finalidad contribuir e innovar con el desarrollo de este sector, brindando un diseño más realista, además, busca diferenciarse del resto de las prótesis disponibles.

Finalmente, el prototipo es fabricado mediante el método de impresión 3D en Acrilonitrilo Butadieno Estireno (ABS).

1.6. Resultados esperados

- Integrar y poner funcionamiento el escáner 3D a la línea de diseño.
- Documento con el procedimiento de digitalización 3D.
- Construcción de una prótesis mediante impresión 3D.

1.7. Organización del documento

El documento está organizado de la siguiente manera.

- a) CAPÍTULO 1:INTRODUCCIÓN
- b) CAPÍTULO 2: MARCO TEÓRICO
- c) CAPÍTULO 3: DISEÑO Y FABRICACIÓN MEDIANTE TECNOLOGÍAS 3D
- d) CAPÍTULO 4: DISEÑO Y FABRICACIÓN DEL PROTOTIPO
- e) CAPÍTULO 5: CONCLUSIÓN Y TRABAJO FUTURO
- f) REFERENCIAS
- g) ANEXOS

CAPÍTULO 2: MARCO TEÓRICO

CAPÍTULO 2: MARCO TEÓRICO

2.1. Escáner 3D

Un escáner 3D es un dispositivo que sirve para la conversión de un objeto real en un modelo digital. Durante el proceso de detección, el escáner recopila con la ayuda de diferentes tecnologías información sobre la geometría y las dimensiones del objeto escaneado, según la tecnología, también puede registrar, por ejemplo, información sobre el color del objeto. Los datos escaneados se componen de nubes de puntos; esto significa que cada punto escaneado tiene una posición en el espacio en términos de un sistema de coordenadas, posiblemente también un color. [1]

Los datos resultantes posteriormente pueden ser utilizados en diferentes propósitos a través de software especializados para procesar y orientar la nube de puntos, el cual dependerá de cada fabricante. Estos programas son los encargados de dar la interfaz digital al usuario para la manipular la nube de puntos.

2.2. Tipos de escáner 3D

Existen dos tipos de escáneres 3D, dependiendo si hay o no contacto con la pieza. Por otro lado, los que no tienen contacto con la pieza también tienen una subdivisión en dos categorías, las cuales son activos y pasivos. A continuación, se detallarán cada tipo de escáner 3D.

2.2.1. Contacto

Este tipo de escáner examina la superficie del objeto apoyando un elemento de medida denominado palpador, usualmente una es punta de acero o zafiro. Los sensores internos permiten determinar la posición espacial del elemento de medida. Una máquina de medición por coordenada (MMC) o un brazo de medición son un ejemplo de este tipo de escáner 3D. La mayoría de las MMC utilizan una sonda de tipo disparador, pero existen las que tienen una sonda de exploración analógica mecánica. La MMC de tipo disparador adquiere datos de punto al tocar la sonda en la pieza, de modo que es apropiada para medir características primitivas que necesitan un número pequeño de datos de punto. Las MMC de tipo escaneo

CAPÍTULO 2: MARCO TEÓRICO

pueden capturar más puntos de muestreo que el tipo de disparador táctil y tener una mayor precisión que los sensores de visión. Se pueden usar para medir características de forma libre. Sin embargo, no pueden medir una pieza hecha de materiales blandos y tienen una velocidad de escaneo relativamente menor en comparación con los escáneres sin contacto[2]. Se usan en su mayoría en control dimensional en procesos de fabricación y pueden conseguir precisiones típicas de 0,01 mm. La mayor desventaja es que requiere de contacto físico con el objeto, por lo tanto, puede resultar dañado o modificado, esta desventaja toma gran relevancia al momento de escanear piezas delicadas o históricas. Otra dificultad, esta lo lento que operan en comparación a los métodos sin contacto.

2.2.2. Sin contacto

A la luz de los inconvenientes MMC de tipo contacto, los dispositivos de medición sin contacto han ganado un mayor interés y han tomado parte integral en diversas aplicaciones industriales. Este punto se puede separar en dos subcategorías, las cuales son activo y pasivos.

2.2.2.1. Activos

Los escáneres activos son aquellos que emiten una señal, ya sea radiaciones electromagnéticas o ultrasonido, y luego analizan su retorno para capturar la geometría del objeto. Dependiendo de cómo se emite la señal y se obtienen los datos existen diferente tipo, tales como:

a) Tiempo de vuelo

Un escáner 3D de tiempo de vuelo determina la distancia al objetivo cronometrando el tiempo de viaje (ida y vuelta) de un pulso de luz. Un diodo laser emite un pulso de luz, se toma el tiempo que pasa hasta que la luz es reflejada y vista por un detector. La velocidad con la que se desplaza la luz es conocida, el tiempo que se demoró la luz en recorrer es dos veces la distancia hasta el objeto. La certeza del escáner laser de tiempo de vuelo depende exclusivamente de la precisión de cómo se mida el tiempo. La Ilustración 1 muestra el funcionamiento de este tipo de dispositivo.

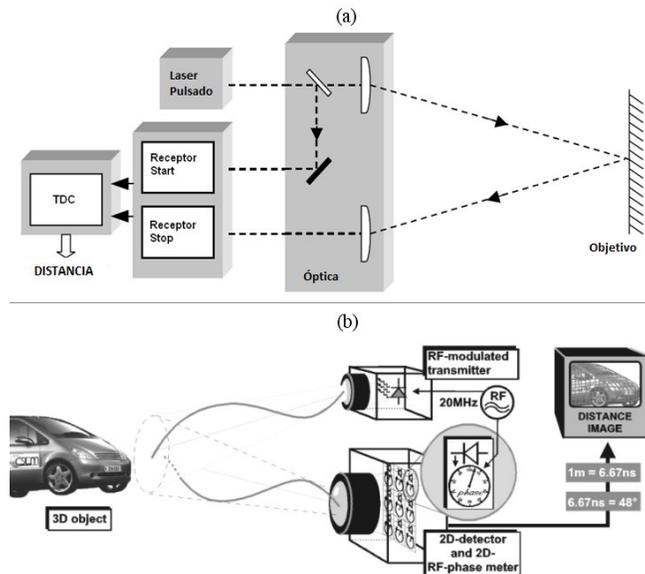


Ilustración 1: Funcionamiento de un escáner de tiempo de vuelo [3]

Para realizar una completa lectura 3D, se va variando la dirección del distanciómetro o deflactando el haz en cada medida realizada. Presentan variadas características, tales como, un rápido muestreo (velocidades entre 10.000 a 100.000 puntos por segundo), una alta precisión (submilimétricas), apto para trabajos constructivos, etc.

b) Triangulación

En el diseño del escáner láser 3D deben tenerse en cuenta muchos factores, como el consumo de energía, el tamaño del escáner, la velocidad de escaneo, el rango del ángulo de escaneo, la velocidad de cuadros, la precisión de medición, la repetibilidad y el costo[4]. El escáner láser por triangulación 3D al igual que anterior utiliza una luz de láser para examinar el entorno del objeto, con la diferencia que, adicionalmente opera una cámara, por lo que una vez que el láser incide en el objeto la cámara busca el punto de incidencia y dependiendo de la distancia en la que el haz golpea la superficie aparecerá en diferentes lugares del sensor de la cámara. Esta técnica es definida como triangulación, pues, el punto del láser, la cámara y el emisor forman un triángulo, se conoce la distancia entre el emisor del haz y la cámara, además, se conoce el ángulo en el lado transmisor del láser. Finalmente, el ángulo en el lado de la cámara es posible determinarlo observando la ubicación del punto láser en el campo de visión de la cámara. Conociendo estos datos ya se puede determinar la forma y dimensiones del triángulo, lo que implica la posición de cada punto en el espacio[2].

CAPÍTULO 2: MARCO TEÓRICO

El láser utilizado en esta técnica tiene un alcance limitado pero una precisión muy grande (milésimas de milímetros), la certeza dependerá del ángulo del vértice opuesto al escáner, es decir, cuanto más se aparte de 90° la precisión ira disminuyendo. Para aumentar el alcance es necesario agrandar el tamaño del equipo de medida. A continuación, en Ilustración 2 se muestra un esquema de este tipo de escáner.

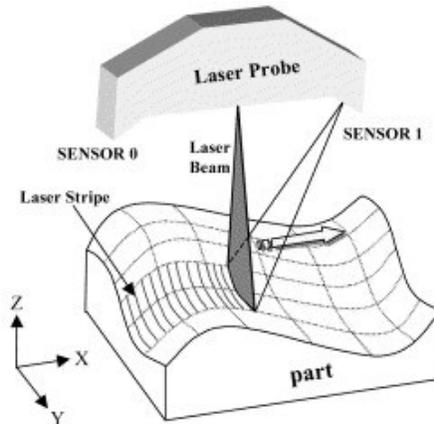


Ilustración 2: Escáner 3D por triangulación [2]

c) Diferencia de fase

En este tipo se mide la diferencia de fase entre luz emitida y luz recibida, la que es utilizada para estimar la distancia hasta el objeto, como se muestra en la Ilustración 3. El haz es continuo y la longitud de onda emitida varía generalmente por fabricante. Presenta un rango y precisión intermedio, lo que lo sitúa entre los dispositivos de tiempo de vuelo (alcance) y triangulación (precisión), se estima que el alcance es de alrededor de 200 metros en condiciones óptimas y el error asociado es aproximado de 2 mm. cada 25 metros. Por otro lado, alcance está limitado precisamente por su modo de funcionamiento, ya que, al modular el haz con una frecuencia constante, existe ambigüedad en la medida de la distancia proporcional a la longitud de onda de la modulación utilizada. Por otro lado, precisión depende de la frecuencia de manera inversa a como lo hace el alcance, por lo que se debe buscar un punto de equilibrio o bien utilizar diferentes frecuencias para cada característica. Otra característica relevante es la velocidad de adquisición de puntos, la cual oscila entre los 0,1 y 1 millón de puntos por segundo.

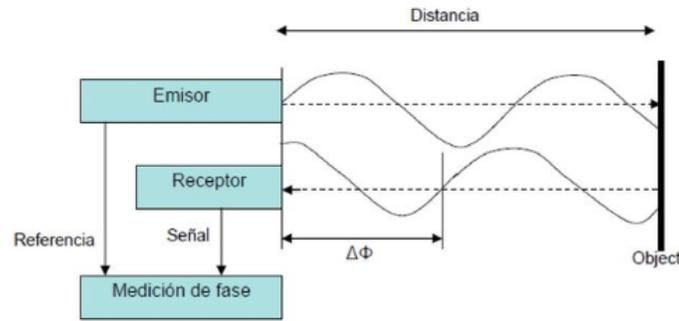


Ilustración 3: Funcionamiento escáner 3D por cambio de fase [5]

d) Holografía conoscópica

Este tipo de escáner el haz de luz reflejado en la superficie atraviesa un cristal que posee dos índices de refracción, uno ordinario y fijo y otro extraordinario que es función del ángulo de incidencia del rayo en la superficie del cristal. En la Ilustración 4 se muestra el funcionamiento de este tipo de escáner.

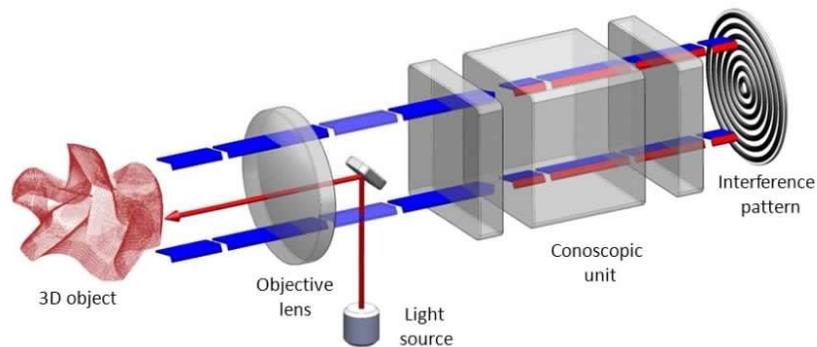


Ilustración 4: Funcionamiento escáner 3D por holografía conoscópica [5]

Como resultado de atravesar el cristal obtienen dos rayos paralelos que se hacen interferir utilizando para ello una lente cilíndrica, esta interferencia es capturada por el sensor de una cámara convencional obteniendo un patrón de franjas. La frecuencia de esta interferencia determina la distancia del objeto en el que se proyectó el haz. La ventaja es que permite utilizar luz no coherente, esto quiere decir que la fuente de iluminación no tiene que ser un láser, si no que la única condición es que sea monocromática.

Esta técnica puede ser de muy alta precisión, incluso puede ser mayor a los métodos telemétricos basados en el tiempo de vuelo o modulación de haz. Sin embargo, se obtiene su

CAPÍTULO 2: MARCO TEÓRICO

máximo provecho en ambientes interiores o de atmosfera controlada y distancias que no excedan las decenas de metros.

e) Luz estructurada

En esta categoría, los escáneres utilizan un patrón estructurado de luz (generalmente azul o blanca) proyectado sobre la pieza para capturar nubes de puntos densas sobre diferentes superficies en tiempos muy cortos. Esta característica hace que este equipo sea adecuado para una diversidad de tareas en la industria.[6]

La proyección de patrones es la técnica más rápida y versátil para la captura de datos, los cuales consiste en la proyección de multitud de rayas correlativas entre sí o distribuidas arbitrariamente. También están los patrones que se proyectan en forma de reja de puntos que iluminan parte del objeto de una sola vez. Estos dos métodos permiten la adquisición de un gran número de muestras simultáneamente. El reflejo se captura con una cámara fotográfica y posteriormente analizando las deformaciones de las proyecciones causadas por el objeto y mediante unos algoritmos se determina la posición de cada punto en el espacio 3D[7].

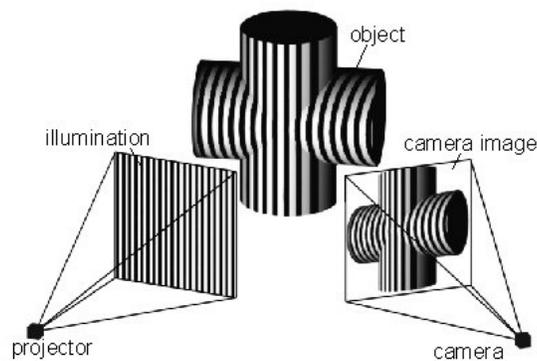


Ilustración 5: Esquema proyección de luz estructurada [8]

La ventaja de los escáneres 3D de luz estructurada es la velocidad. Esto se debe a que no se centra en escanear un punto a la vez, sino que, escanean múltiples puntos o el campo entero. Esto reduce o elimina el problema de la deformación del movimiento.

CAPÍTULO 2: MARCO TEÓRICO

f) Luz modulada

En este tipo, los escáneres emiten una luz continuamente cambiante el en objeto, por lo general la amplitud de fuente de luz responde a un patrón senoidal, una cámara detecta la luz y el patrón que es reflejada en el objeto, para así poder determinar la distancia viajada por la luz.

2.2.2.2. Pasivos

Al contrario de los activos, estos no emiten ninguna clase de radiación por sí mismo, si no que captan la radiación del medio ambiente, por lo que son capaces de detectar la luz del día. Dentro de los escáneres pasivos están los estereoscópicos, de Silueta y con ayuda del usuario o modelado basado en imagen, los cuales tiene poca relevancia en lo que respecta a realizar ingeniería inversa por las condiciones menos favorables en comparación a los escáneres de tipo activos.

2.3. Reconstrucción y modelado

Para poder hacer uso la nube de puntos producidas por los escáneres 3D en mediciones o visualización del objeto, es necesario tener una reconstrucción con el fin de clasificar los datos que sirven, al generar un modelo 3D se utilizan principalmente polígonos, superficies o sólidos (CAD).

2.3.1. Modelos sólidos CAD

Los archivos CAD son el lenguaje común de la industria para describir, editar y producir la forma de los modelos 3D, pues, son totalmente editables.

Los modelos CAD describen la forma del objeto, características fundamentales y relación con otras funciones. Utilizan el análisis de los datos para crear un modelo editable basado en los rasgos que se importa en CAD con el árbol de características intacto, produciendo un modelo completo y nativo. También, pueden ser exportados mediante superficies NURBS

CAPÍTULO 2: MARCO TEÓRICO

para ser usado luego en un modelo CAD. En la Ilustración 6 se muestra un modelo solido de un objeto luego de finalizar la reconstrucción.

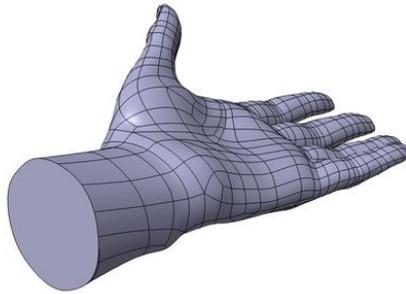


Ilustración 6: Modelo solido [9]

2.3.2. Modelos de malla de polígonos

Corresponde a una presentación poligonal de una forma, las curvas son modeladas mediante pequeñas superficies planas. En esta reconstrucción de la nube de puntos busca conectar los puntos adyacentes mediante líneas rectas, para finalmente obtener un modelo poligonal 3D. Estos modelos son bastante útiles para la visualización (renderizado) o aplicaciones como fabricación asistida por computador (CAM), pero, presentan inconvenientes al momento de editar el archivo o el tamaño (datos muy grandes). En la Ilustración 7 se muestra el modelo de polígonos y de superficie de un mismo objeto.

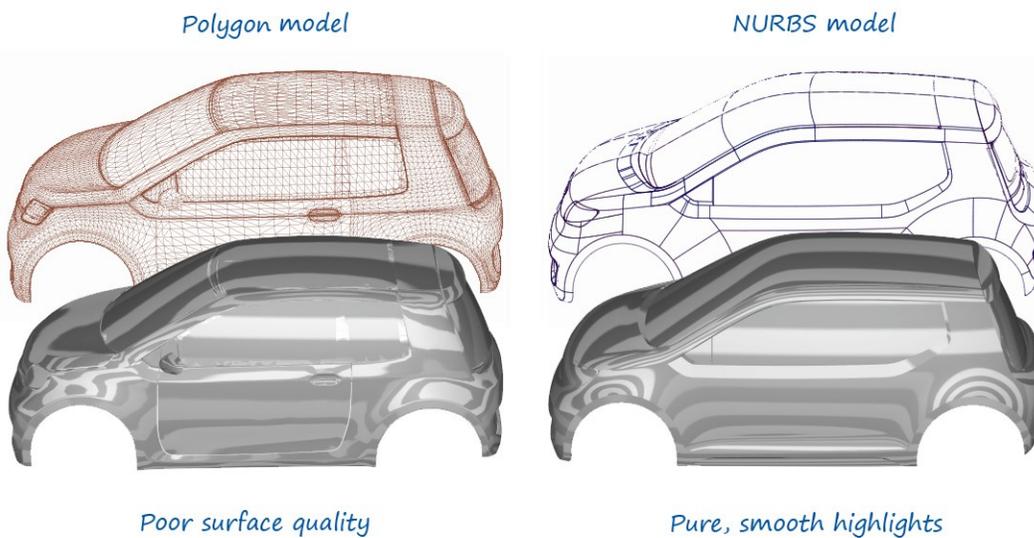


Ilustración 7: Comparativa de modelo poligonal y superficie NURBS [10]

2.3.3. Modelos de superficies

Estos modelos utilizan un conjunto de pequeñas superficies curvas que unidas entre sí modelan la geometría[11]. Estas superficies pueden ser B-Splines racionales no uniformes (NURBS), T-Splines u otras representaciones de curvas. Esta reconstrucción tiene como ventaja ser más ligera y manipulables al exportar a CAD, pero sólo en un sentido escultórico de empujar y tirar para deformar la superficie.

2.4. Impresora 3D

“Esta tecnología ha sido desarrollada por Charles Hull en 1986 en un proceso conocido como estereolitografía (SLA), a la que siguieron desarrollos posteriores como la fusión de lecho de polvo, el modelado por deposición fundida (FDM), impresión de inyección de tinta. La impresión 3D, que involucra diversos métodos, materiales y equipos, ha evolucionado a lo largo de los años y tiene la capacidad de transformar los procesos de fabricación y logística. La fabricación aditiva se ha aplicado ampliamente en diferentes industrias, incluidas la construcción, la creación de prototipos y la biomecánica. El uso de la impresión 3D en la industria de la construcción, en particular, fue muy lento y limitado a pesar de las ventajas, por ejemplo, menos desperdicio, libertad de diseño y automatización”[12].

La impresora 3D es un dispositivo que utiliza la técnica de fabricación aditiva para fabricar una amplia gama de estructuras y geometrías complejas a partir de modelos 3D. El proceso consiste en imprimir capas sucesivas de materiales que se forman uno encima del otro[12],[13]. En otras palabras, este dispositivo permite crear objetos sin la necesidad de utilizar algún tipo de molde, además, permite la producción de elementos con geometrías complejas directamente desde el modelo 3D en períodos de tiempo relativamente cortos y, a menudo, sin ser excesivamente costosos[14].

2.5. Tipos de impresoras 3D

Los principales métodos utilizados por las impresoras 3D son los que se detallan a continuación:

2.5.1. Modelado por deposición fundida (FDM)

Este tipo de tecnología es uno de los más comunes, se basa en la fundición de filamento de un termoplástico, generalmente PLA (poliácido láctico) o ABS (acrilonitrilo butadieno estireno), que pasa por el cabezal extrusor, este a su vez este posee una boquilla que calienta el material hasta la temperatura de fundición y luego, es depositado, enfriado y solidificado en las coordenadas deseadas, es así, como se repite el proceso capa por capa hasta crear el modelo 3D, tal como se muestra en la Ilustración 8. El grosor de la capa, el ancho y la orientación de los filamentos y el espacio de aire (en la misma capa o entre capas) son los principales parámetros de procesamiento que afectan las propiedades mecánicas de las partes impresas. La calidad de impresión está directamente relacionada al tamaño de las capas, es decir, mientras más finas, mejor precisión.

Este método es utilizado para la construcción de prototipos, pruebas de forma y ajuste, ya que, logra ser bastante económico y rápido, por otro lado, es necesario realizar una estructura de soporte en la base del objeto para evitar que se desprege, así también, en las secciones complejas o en voladizo de la pieza.

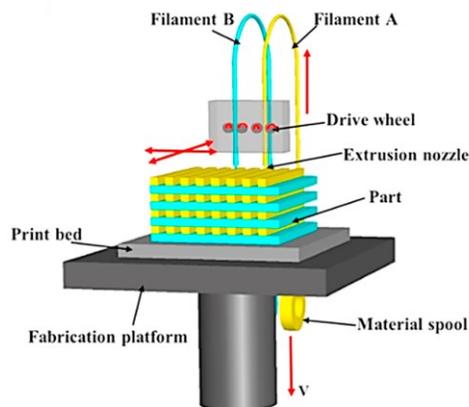


Ilustración 8: Modelado por deposición fundida [12]

CAPÍTULO 2: MARCO TEÓRICO

2.5.2. Estereolitografía (SLA)

Su funcionamiento se basa en un estanque con resina líquida fotoreactiva, donde se sumerge una base en la cual se fabricará el modelo 3D, así la profundidad de sumersión equivale al tamaño de la capa, luego por medio de luz ultravioleta se activa el proceso de curación para que la resina sea solidificada, en la Ilustración 9 se muestra gráficamente. El proceso se repite capa tras capa hasta conseguir el modelo 3D. Con este tipo de tecnología es posible conseguir una mayor precisión en las piezas.

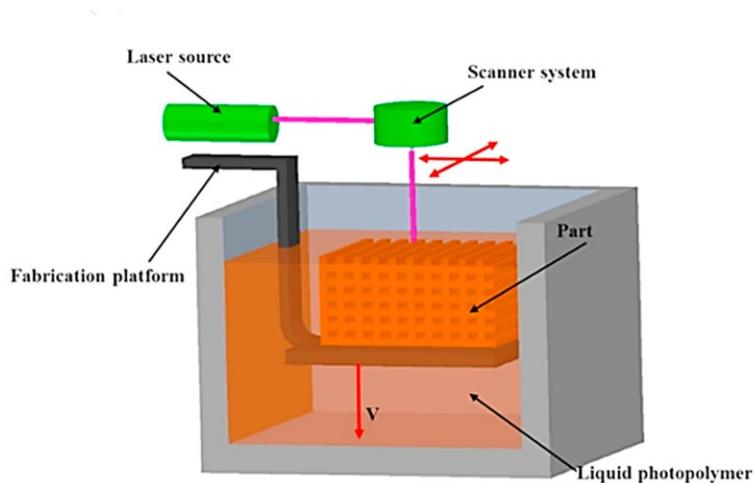


Ilustración 9: Estereolitografía [12]

2.5.3. Sinterización selectiva por láser (SLS)

Esta tecnología utiliza un recipiente de polvo de polímero que se calienta por debajo de su punto de fusión, luego se deposita y nivela una delgada capa de material sobre la superficie de construcción, luego, las partículas de polvo son fusionadas empleando un cabezal láser, térmico o de haz de electrones enfocado en las coordenadas deseadas. una vez creada la capa, la plataforma de construcción bajará el grosor de una capa en altura, para repetir el proceso hasta formar todo el modelo 3D. Finalmente, es necesario que los objetos creados en la cámara pasen por una etapa de enfriamiento de reposo dentro de la máquina, para que el material caliente recién conformado se enfríe y solidifique.

2.5.4. Inyección de material (material jetting)

Es un proceso donde es depositado material líquido en forma de gotas de manera controlada y luego, se cura (solidifica) mediante luz ultravioleta, el material utilizado suele ser cera o un

CAPÍTULO 2: MARCO TEÓRICO

polímero fotosensible, una vez que se ha depositado y curado una capa, la plataforma de construcción se reduce un grosor de una capa y el proceso se repite para construir un objeto 3D. Suele ser usado en prototipos de productos a todo color, moldes de inyección de baja carrera, modelos médicos, etc. Los beneficios que presenta esta tecnología es que se logra obtener un mejor acabado superficial, a todo color y más de un material si se desea, por otro lado, se tiene como desventaja que sea frágil, no apto para piezas mecánicas y mayor costo que la Estereolitografía.

2.5.5. Inyección de aglutinante (binder jetting)

Esta tecnología es similar a la SLS, es necesario de una capa inicial de polvo en la plataforma de construcción, la diferencia radica en que acá se mueve el cabezal sobre la superficie del polvo depositando gotas de aglomerante que suelen tener un diámetro de 80 micras, así estas gotas unen las partículas de polvo para producir cada capa del modelo 3D. Luego la plataforma de construcción baja el grosor de la siguiente capa y se repite el proceso anterior hasta concluir con el objeto. Con este método se pueden utilizar materiales como arena o polvo metálico y obtener piezas metálicas funcionales con propiedades mecánicas no tan buenas como la fusión de lecho de polvo metálico

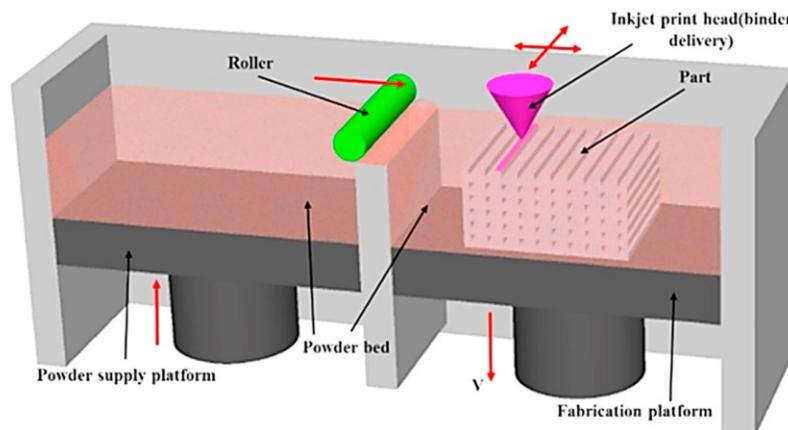


Ilustración 10: Inyección de aglutinante [12]

2.5.6. Fusión en lecho de polvo metálico (powder bed fusion)

Este tipo de proceso es similar a la sinterización selectiva por láser y produce objetos sólidos utilizando una fuente térmica para inducir la fusión entre partículas de polvo metálico de una capa a la vez. Las piezas corren el riesgo de deformarse debido a las tensiones residuales producidas durante la impresión, debido a las altas temperaturas, sin embargo, las piezas son sometidas a tratamientos térmicos para aliviar las tensiones internas,

La tecnología utilizada en este proceso suelen ser sinterización directa por láser de metal (DMLS), fusión láser selectiva (SLM) o fusión de haz de electrones (EBM). Es aplicado en la fabricación de piezas metálicas funcionales, medicina o dental, pues logran tener uniones fuertes y funcionales.

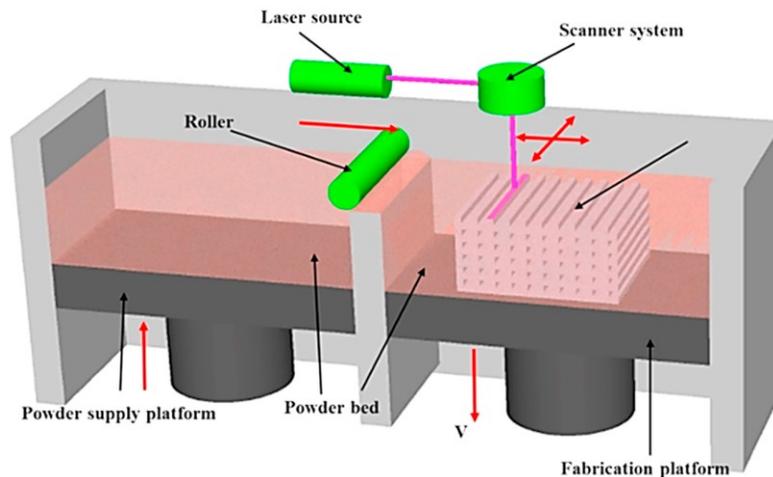


Ilustración 11: Fusión en lecho de polvo [12]

2.6. Aplicaciones actuales de las tecnologías 3D

Las aplicaciones de estas herramientas son muy variadas, por lo que, pueden ser utilizadas en múltiples áreas como la salud, ingeniería, entretenimiento, etc., pues, permiten obtener un modelo 3D o crear uno, generalmente en menor tiempo o costo que los procesos de manufactura convencionales.

CAPÍTULO 2: MARCO TEÓRICO

Los escáneres tridimensionales actualmente son utilizados en la topografía durante el proceso de recogida de datos, también, son utilizados en la geología y la minería para obtener información de superficies complejas de lugares poco accesibles, control de avance de la excavación, cubicación de volúmenes de material extraído, monitoreo de zonas críticas, simulaciones virtuales para zonas restauradas en estudios de impacto ambiental, etc. Otro uso es la preservación del arte y patrimonio cultural para documentar edificios de lugares históricos, monumentos, esculturas, entre otras. Por otra parte, en la construcción y plantas industriales son utilizados para obtener modelos “as built”, los que representan el estado real de la instalación en el momento y suele ser comparada con el diseño original. En el área del entretenimiento son empleados en la producción de modelos 3D para videojuegos y películas, ya que, es más fácil trabajar digitalmente con el objeto procedente del digitalizado. Ahora bien, en el diseño industrial y manufactura son empleados en el control y medición de calidad de los productos. Las aplicaciones en el área de ingeniería son muy variadas, en las que destacan la obtención de modelos para realizar ingeniería inversa, análisis FEA o CFD, etc. Finalmente, en el área de salud son aplicados para el diseño de prótesis y ortesis, sillas de rueda a medida, obtención de modelos para placas dentales, etc.

Por su parte las impresoras 3D tienen aplicaciones similares en las áreas descritas anteriormente, solo con la diferencia que estas materializan los modelos 3D digitales. Los usos comunes son la creación de prototipos y productos en diferentes tipos materiales, moldes, réplicas de piezas de museo, piezas dentales, prótesis y ortesis, casas, piezas mecánicas, entre otras.

**CAPÍTULO 3: DISEÑO Y FABRICACIÓN MEDIANTE
TECNOLOGÍAS 3D**

3.1. Características generales de la línea 3D

Para la digitalización de objetos será utilizado el escáner 3D modelo Capture™, de la marca 3D Systems®, el cual es un sistema de escaneo de luz estructurada, que utiliza la tecnología de la luz led azul, un sistema totalmente Plug & Play mediante cable Ethernet de categoría 5e (CAT5e) y posee una calidad industrial. A continuación, en la Ilustración 12 se presenta las características técnicas del escáner 3D.



Propiedad	Capturar
Medidas (La x An x Al)	276 x 74 x 49 mm
Peso	1,35 kg
Profundidad de campo	180 mm
Campo de visión	124 x 120 mm (cerca) 190 x 175 mm (lejos)
Distancia de toma de datos	300 mm
Tasa de captura de datos	985.000 puntos/escaneo (0,3 seg. por escaneo)
Precisión	0,060 mm
Resolución	0,110 mm a 300 mm; 0,180 mm a 480 mm

Ilustración 12: Características técnicas del escáner 3D [15]

El dispositivo requiere de recursos informáticos mínimos, tales como: procesador Intel® o AMD® Quad core de 2 GHz o superior, memoria RAM de 4 GB o más, en disco duro se recomiendan 30 GB o más (la caché de archivos temporales requiere que el disco disponga de aproximadamente 3 GB de espacio libre por cada 100 millones de puntos), una tarjeta gráfica de 512 MB o superior, cabe destacar que mientras más recursos permitirá el procesamiento de modelos de mayor tamaño[15].

CAPÍTULO 3: DISEÑO Y FABRICACIÓN MEDIANTE TECNOLOGÍAS 3D

Este escáner en particular puede ser aplicado en diferentes áreas, las cuales se logran clasificar en ingeniería inversa para el diseño de nuevos productos, personalización o documentación 3D de piezas. Otra área, es el diseño industrial y manufactura para los procesos de inspección, medición, comprobación y control de calidad de piezas con superficies complejas, elaboración rápida de prototipos o industria aeroespacial. También se utilizan en el cuidado de salud para diseñar ortesis y prótesis hechas a medidas o que requieran una precisión y prestar atención especial a la anatomía de cada paciente. Finalmente, en el área de ciencia y educación es posible utilizarlo para digitalizar artefactos de museo o la preservación de patrimonio histórico y crear galerías en línea o replicar los objetos de manera menos invasiva.

En complemento al escáner se utiliza el software Geomagic Wrap®, que proporciona el paso más sencillo, asequible, rápido y preciso desde nubes de puntos a modelos de superficie y mallas poligonales 3D que se pueden utilizar al instante en procesos subsiguientes de ingeniería, fabricación, arte, diseño industrial, etc., como el análisis de elementos finitos (FEA) y la dinámica de fluidos computacional (CFD) o utilizarlos directamente en impresión 3D, es necesario señalar que este programa está enfocado a procesar nubes de puntos obtenidos durante el escaneo, por tanto, la mayor desventaja que presenta es no poder realizar operaciones de edición al modelo dentro del programa, por ejemplo, realizar nuevos bocetos, extrucciones, revoluciones, etc. así como en cualquier otro software CAD. Este programa puede ser utilizado en cualquier sector y, además, según la compañía desarrolladora es compatible con todos los escáneres, cámaras y digitalizadores 3D en formato XYZ/ASCII.[16]

Para la edición de los modelos obtenidos anteriormente se utiliza el software Inventor, que permite modelar la geometría, dimensión y material de manera que, si se alteran las dimensiones, la geometría se actualiza automáticamente basándose en las nuevas dimensiones.



Ilustración 13: Impresora 3D modelo uPrint SE [17]

La impresora 3D mostrada en la Ilustración 13 corresponde al modelo uPrint SE del fabricante stratasys®, esta impresora usa la tecnología de modelado de fusión por deposición (FDM) para construir en termoplástico ABS, lo que tiene como resultado modelos y prototipos funcionales duraderos, estables y precisos. También, utiliza material de soporte SR-30 soluble para dar estabilidad a la geometría donde lo necesite, tiene un tamaño de construcción de 203 x 152 x 152 mm y un espesor de capa de 0,254 mm. El software que utiliza es CatalystEX (dimension), el cual convierte el archivo STL del programa CAD en rutas de impresión de modelado 3D e incluye las estructuras de soporte que sean necesarias. Además, brinda opciones como vista 3D del modelo, capacidad de escalar del tamaño, orientación en la cámara de construcción, cola de impresión, tiempo y consumo de material estimado, etc.[17]

Finalmente, la impresora y el escáner están relacionados directamente, pues, son un complemento mutuo para obtener réplicas exactas de objetos reales, además al incluir Inventor se puede modificar la geometría original a conveniencia del usuario.

3.2. Digitalización 3D

Para comprender el proceso de escaneo es importante conocer las condiciones de trabajo del escáner y las funciones que ofrece el software para procesar los datos obtenidos.

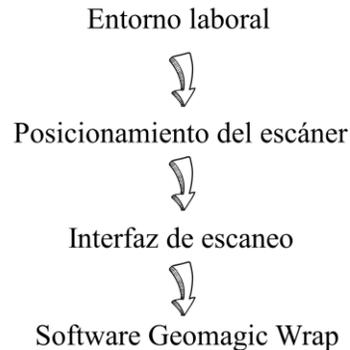


Ilustración 14: Temas básicos para la digitalización 3D [18]

3.2.1. Entorno laboral

La calidad de escaneo puede variar en función de los siguientes factores externos:

- **Condiciones ambientales:** La luz y la vibración pueden provocar imprecisiones. Es necesario que el equipo esté en una posición estable y la exposición se ajuste a las condiciones lumínicas.
- **Estabilidad:** Los datos serán imprecisos si el escáner o el objeto se mueve durante el escaneo.
- **Forma y tamaño del objeto:** Si la pieza tiene características limitadas será necesario utilizar marcadores de destino o esferas para tener una mejor referencia y poder alinear los escaneos.
- **Precalear el dispositivo:** Se recomienda precalentar el escáner 3D durante más de 10 minutos.

3.2.2. Posicionamiento del escáner

Para optimizar la cantidad y calidad de datos es necesario tener en cuenta los siguientes factores:

CAPÍTULO 3: DISEÑO Y FABRICACIÓN MEDIANTE TECNOLOGÍAS 3D

- **Posición:** Utilizar el escáner en posición perpendicular del objeto escaneado optimiza la cantidad de datos que se recopilan.
- **Campo de visión:** El escáner puede capturar solo lo que está en su campo de visión.
- **Volumen y área del objeto:** Una gran pieza puede requerir varios escaneos para capturar todos los lados.
- **Preparación de la pieza:** Algunas piezas requieren de una preparación previa a ser escaneadas, tales como, marcadores de referencia y recubrimiento de la pieza (más información en anexo 1).
- **Distancia óptima:** El punto de la mira en rojo muestra el centro de la cámara y la sección transversal gris sobre el objeto muestra el patrón de la estructura, como se describe en la Ilustración 15.

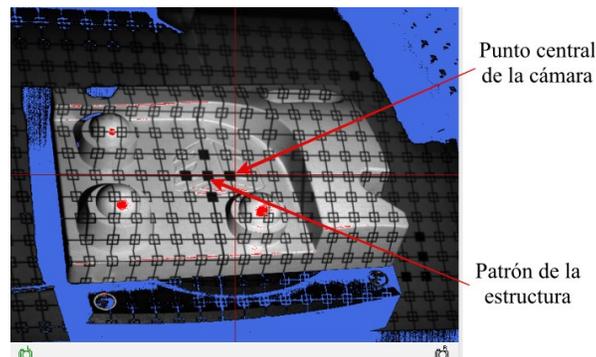


Ilustración 15: Vista del escáner [18]

- **Exposición:** En la Ilustración 16 se muestra una comparación para obtener una exposición óptima para optimizar la obtención de datos.

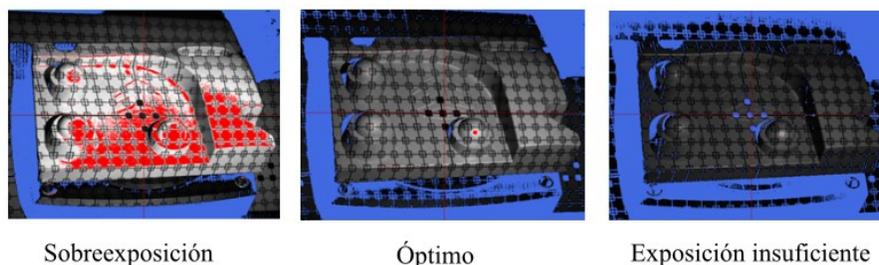


Ilustración 16: Ajuste de exposición [18]

3.2.3. Interfaz de escaneo

En la Ilustración 17 se muestran las opciones que están disponibles al realizar el escaneo.

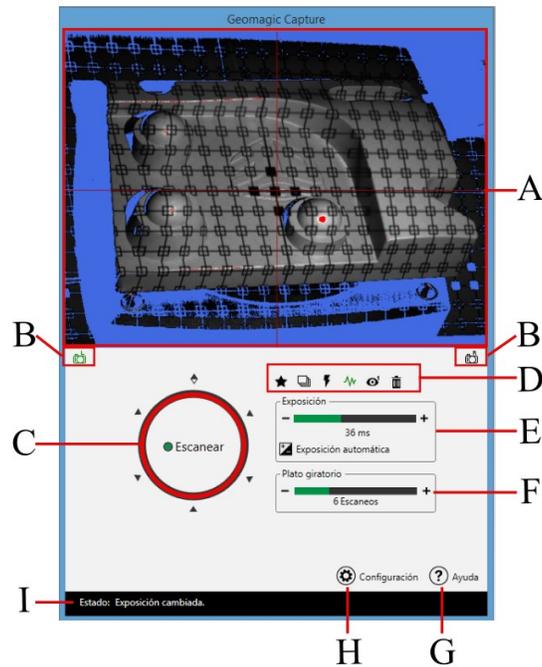


Ilustración 17: Vista del escaneo [18]

- A. **Vista actual:** Muestra la vista actual de la cámara.
- B. **Vista de la cámara:** Permite cambiar el lado de la vista de la cámara.
- C. **Escanear:** Realiza una captura de datos y la envía a la aplicación Geomagic Wrap®.
- D. **Opciones de captura:** Permiten administrar el entorno de trabajo y escanear un objeto con resultados óptimos, a continuación, se presentan las opciones.
 - **Escaneo sencillo** : Determina automáticamente los mejores ajustes de exposición, luego escanea el objeto y utiliza HDR si es necesario.
 - **HDR** : Escanea varias veces a niveles de exposición cambiantes para capturar objetos con grandes diferencias de contraste.
 - **Alta sensibilidad** : Modo de escaneo especial que permite capturar superficies con ruido difíciles de capturar de otra forma.
 - **Reducción de distorsión facial** : Reduce la distorsión en escaneos de la cara.

CAPÍTULO 3: DISEÑO Y FABRICACIÓN MEDIANTE TECNOLOGÍAS 3D

- **Último escaneo**  : Muestra solo el escaneo más reciente.
 - **Eliminar el último escaneo**  : Elimina el escaneo más reciente.
- E. **Exposición:** Cambia de forma manual la cantidad de luz que recoge el escáner. Las piezas de colores oscuros requieren exposiciones más largas.
- **Exposición automática**  : Determina automáticamente la exposición en función de la luminosidad y el color de la pieza.
- F. **Plato giratorio:** Permite manipular cuantos escaneos se realizan mientras el plato giratorio rota 360°.
- G. **Ayuda:** Muestra el documento de ayuda
- H. **Ajustes:** Abre el menú de ajustes. (ver anexo 2)
- I. **Estado:** Muestra el estado de trabajo actual.

3.2.4. Software Geomagic Wrap

Es necesario interiorizarse con las funciones y herramientas que ofrece este programa, las cuales, en su mayoría son comandos bastante intuitivos, por lo que facilita la manera de trabajar.

El programa ofrece múltiples funciones para manipular la nube de puntos obtenida durante el proceso de digitalización 3D de una forma sencilla, que luego puede ser sintetizada en tres tipos de modelos 3D, los cuales son: polígonos, usados usualmente para renderizar o exportar directamente a fabricación CAM o impresión 3D; superficie NURBS, usadas para el análisis computacional y software CAD; finalmente, la opción CAD que es similar a la anterior, pero con el modelado de forma sólida.

En la Ilustración 18 se puede visualizar la interfaz gráfica de la aplicación, la cual presenta una cinta que categoriza en diferentes niveles los comandos disponibles en el programa.

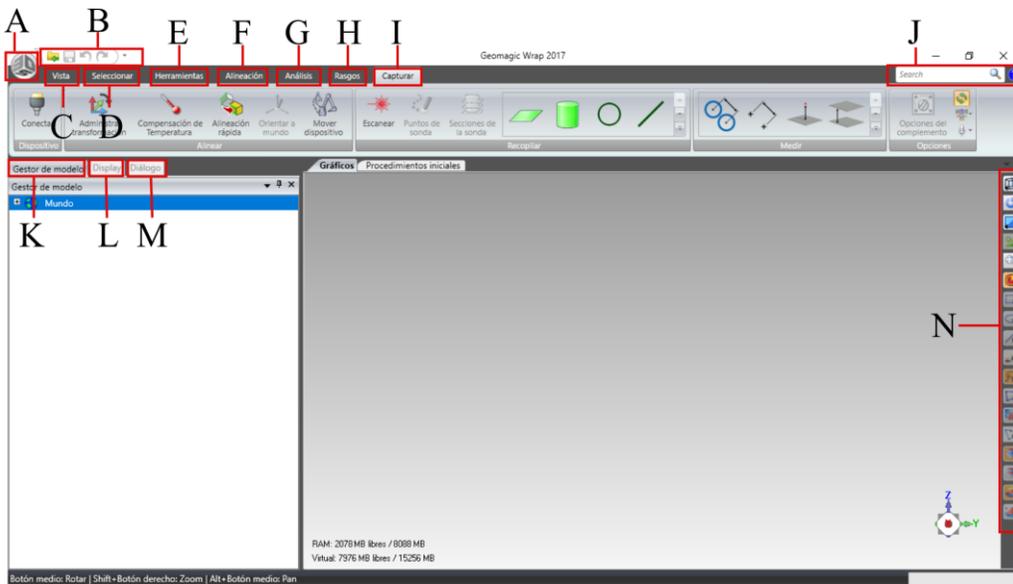


Ilustración 18: Barra de herramientas [18]

- A. **Botón 3D System:** provee el acceso a funciones básicas, tales como, abrir, guardar, importar un archivo, configuraciones, licencia, etc.
- B. **Barra de herramienta de acceso rápido:** contiene comandos de uso frecuente, como abrir, guardar, deshacer, rehacer.
- C. **Vista:** tiene acceso a comandos para controlar la pestaña de gráficos, tales como, color del objeto, zoom, ángulos de visión, orientación, texturas estándar, entre otros. También, permite controlar la visibilidad y configuración de la interfaz gráfica.
- D. **Seleccionar:** ofrece comandos de selección específica de datos del modelo 3D
- E. **Herramienta:** están agrupados los comandos para la manipulación del objeto.
- F. **Alineación:** consiste en la reorientación del sistema de coordenadas de un objeto para que coincida con las coordenadas de otro o una entidad geométrica, como un plano.
- G. **Análisis:** en esta sección están las herramientas que miden y comparan objetos.
- H. **Rasgos:** esta pestaña contiene herramientas para la creación, edición y conversión de características.
- I. **Capturar:** en esta sección se agrupan comandos para recopilar, alinear y medir los nuevos datos utilizando un dispositivo de digitalización 3D.
- J. **Cuadro búsqueda:** permite localizar todos los comandos mediante la búsqueda por palabras claves.

- K. **Gestor de modelo:** muestra una estructura jerárquica de los objetos y grupos disponibles en el archivo, los que se visualizan en la pestaña gráficos. Además, se pueden manejar los datos cambiando de nombre, agrupándolos, ocultándolos, etc.
- L. **Display:** esta pestaña es posible controlar el comportamiento y visualización de los modelos en la pestaña de gráficos como, por ejemplo, si se muestran los puntos, triángulos, bordes, origen del sistema de coordenada, color de textura, iluminación, entre otros.
- M. **Dialogo:** esta pestaña muestra los diferentes controles o configuraciones que se pueda acceder cada vez que se ejecuta un comando, con el fin de ajustar la configuración del comando a gusto del usuario, sin embargo, hay comandos que no ofrecen esta opción.
- N. **Barra de herramientas:** los comandos de los niveles de vista y seleccionar tienen un acceso rápido en esta barra, más bien, para los comandos que afectan a la orientación, visualización y selección.

Otros menús aparecen a medida que se procesan los datos, tales como:

- **Puntos:** Se agrupan comandos disponibles que permiten manipular objetos de puntos, tales como, reducir el ruido, combinar, comando wrap, el cual convierte el objeto de puntos en un objeto poligonal.
- **Polígonos:** Esta pestaña se muestra solo cuando un objeto poligonal está activo y agrupa comandos para manipular y reparar el modelo, los grupos más relevantes son:
- **Superficies exactas:** Este comando convierte el objeto poligonal en uno de superficie, que, con la mínima interacción del usuario es posible crear un modelo NURBS.
- **Modelos CAD:** En esta pestaña se pueden usar los comandos para eliminar, combinar, recortar, etc. a objetos CAD

3.3. Impresión 3D

3.3.1. Proceso de Impresión 3D

El primer paso es preparar la impresora con una bandeja nueva en la que se realizara la impresión y precalentar la cámara.

El modelo 3D debe ser cargado al programa CatalystEX (dimension) en formato STL, luego, se pueden ajustar algunos parámetros de impresión, tales como, relleno del interior del modelado, relleno del soporte, unidad y escala del modelo 3D, orientación de fabricación (eje x, y o z), etc. En la Ilustración 19 se muestra la interfaz gráfica del programa.

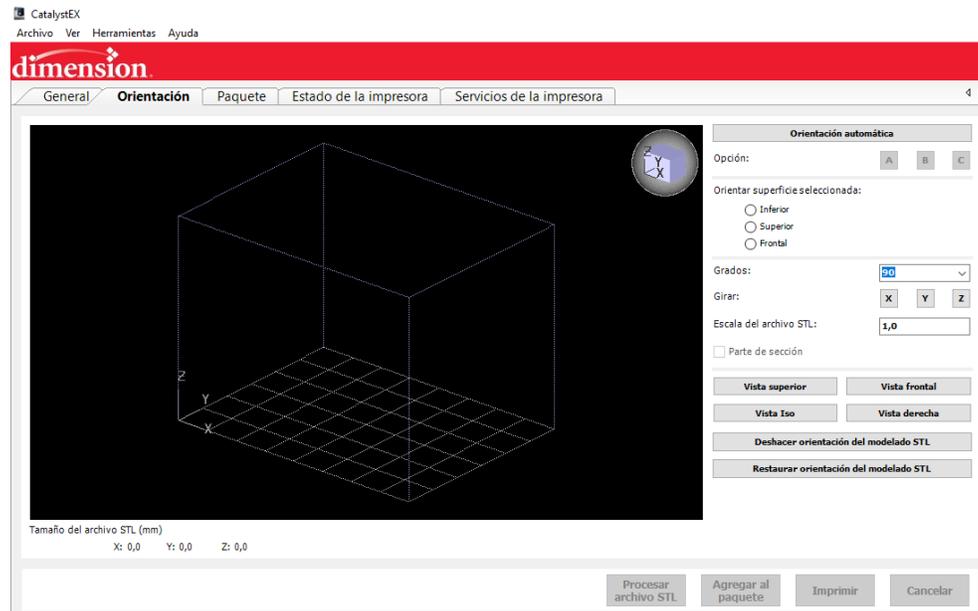


Ilustración 19: Interfaz gráfica CatalystEX [18]

Posteriormente, se selecciona la función “agregar al paquete” para procesar el modelado y los parámetros seleccionados en un archivo CMB, el cual utiliza la impresora para crear la pieza, es decir, la ruta de impresión capa a capa que debe seguir. Una vez realizado todo esto, se estima automáticamente la cantidad de material utilizado, además, permite distribuir las piezas en la bandeja.

Al terminar las piezas, son llevadas a la lavadora SCA 1200HT para remover el material de soporte de las piezas mediante una solución en base a agua, la cual cuenta con una combinación de temperatura y agitación capaz de disolver los soportes.

3.3.2. Caracterización del material

El material utilizado por la impresora es ABSplus (P430), corresponde a un material comercial patentado por Stratasys Inc. con mejores propiedades mecánicas que el ABS normal, este elemento es un polímero compuesto por tres bloques, acrilonitrilo, butadieno y estireno. Cada uno de los tres bloques aporta características distintas. El acrilonitrilo aporta rigidez, resistencia a ataques químicos, dureza y estabilidad a las altas temperaturas. El butadieno aporta tenacidad a la temperatura cuando ésta es especialmente baja y resistencia a impacto; y el estireno, resistencia mecánica, rigidez, brillo, dureza.

Las probetas sometidas a ensayos fueron impresas en las diferentes configuraciones, direcciones y combinaciones que ofrece el programa, de las cuales destaca la orientación vertical al eje x como la mejor, tal como se muestra en la Ilustración 20 y un relleno de alta densidad para los ensayos de tensión y flexión.



Ilustración 20: Probeta para ensayo en Tensión [19]

Los valores típicos de esta configuración obtenidos en el ensayo de tensión bajo Norma ASTM D 638 son: [19]

- Módulos de elasticidad: 2154,3 (MPa).
- Esfuerzo de ruptura: 28,78 (MPa).

Por otro lado, en el ensayo de flexión bajo Norma ASTM D 790 se obtuvieron los siguientes valores: [19]

- Módulos de elasticidad: 2016,0 (MPa).
- Esfuerzo de ruptura: 57,4 (MPa)

3.4. Flujo de trabajo

El flujo de trabajo para la línea de diseño 3D se resume a la Ilustración 21.

Flujo de trabajo para línea de diseño 3D

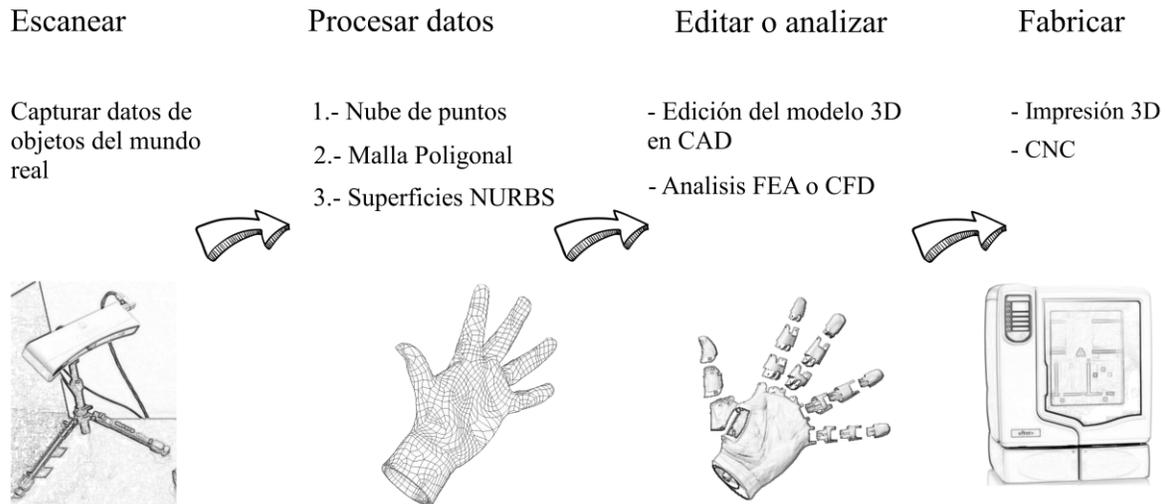


Ilustración 21: Flujo de trabajo [18]

3.4.1. Escanear

El primer paso para comenzar el proceso es preparar la pieza (si es necesario) y el dispositivo de digitalización, es decir, se debe conectar el escáner y el plato giratorio al computador antes de abrir el programa para evitar errores de conexión, luego, se procede a escoger el método de transformación del dispositivo que más se acomode a las características de la pieza, así también la resolución y el plato giratorio si es necesario su uso. Posteriormente, es recomendable utilizar la opción de ajuste sencillo, ya que, esta determina automáticamente la exposición y utiliza HDR (si es necesario) generando las condiciones óptimas para la digitalización, cabe destacar que al utilizar esta opción el tiempo de escaneo aumenta considerablemente. Por otro lado, se puede ajustar la exposición de forma automática solo una vez y luego escanear el resto de la pieza con esa misma exposición, esto tiene como ventaja lo rápido que es por cada escaneo. En la Ilustración 22 se muestra el momento de escaneo de un objeto.



Ilustración 22: Digitalización del objeto [18]

3.4.2. Procesar datos

Una vez realizado el escaneado completo de la pieza se procede a gestionar la nube de puntos resultante, es usual que se obtengan puntos que no son parte de la pieza, por tanto, es necesario realizar una limpieza de estos, es decir, eliminar lo que no sirva. En el mejor de los casos el método de registro seleccionado funciona correctamente, de modo que se podrá visualizar el objeto como se aprecia en la Ilustración 23 (a). Luego, se debe realizar un filtrado por distancia o seleccionar manualmente las áreas a eliminar. Por el contrario, si los están desordenados entre sí, se procede a efectuar la limpieza por cada escaneo, pues resultara más fácil realizar el registro. En la Ilustración 23 (b) se visualiza el modelo una vez finalizado la filtración de los datos.

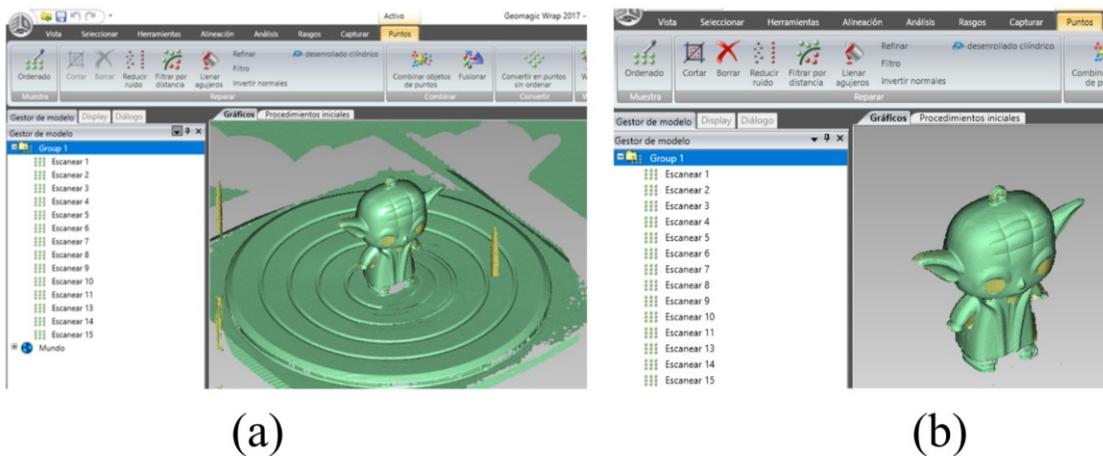


Ilustración 23: Nube de puntos del objeto escaneado [18]

CAPÍTULO 3: DISEÑO Y FABRICACIÓN MEDIANTE TECNOLOGÍAS 3D

Continuando con el proceso de la nube de puntos, se procede a realizar la operación de registro de análisis (alineación → registro de análisis). Dentro de las opciones destaca registro manual y registro automático. Es necesario mencionar que la herramienta de alineación puede ser utilizados en cualquier momento y con más objetos o grupos, es decir, se puede utilizar en cualquier fase del modelo, sólo que los datos a registrar deben ser del mismo tipo.

Es imprescindible realizar un registro manual (alineación → registro de análisis → registro manual) cuando los escaneos están alejados entre sí o no hay regiones superpuestas. Una vez ejecutado el comando se despliega la pestaña diálogo donde permite escoger el modo de registro, así también, las exploraciones que estarán fijas y las flotantes.

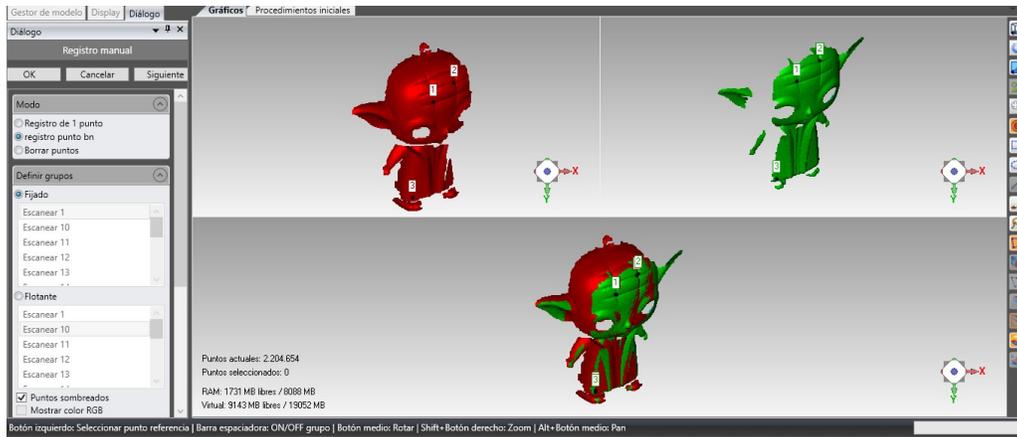


Ilustración 24: Registro manual [18]

Siguiendo con el procedimiento, se ejecuta el comando de registro global, el cual mediante algoritmos geométricos busca coincidencias entre los escaneos y los reorienta de manera que exista la menor desviación posible. En la Ilustración 25 se aprecia como cada color representa a un escaneo y se superponen unos a otros. Este comando presenta dos operaciones, una es el registro global y la otra es el análisis, esta última sirve para ver la desviación entre los datos activos en la alineación.

CAPÍTULO 3: DISEÑO Y FABRICACIÓN MEDIANTE TECNOLOGÍAS 3D

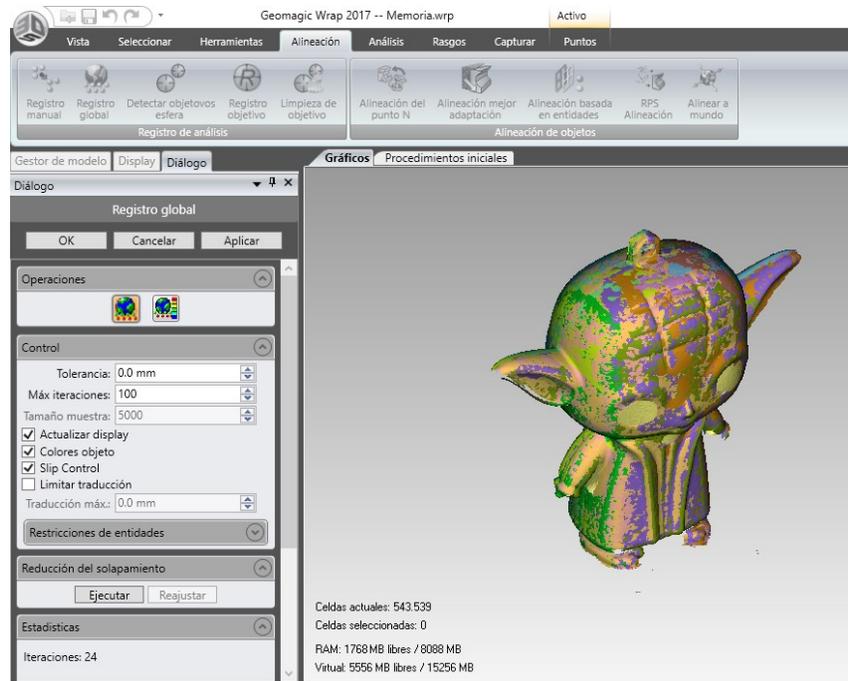


Ilustración 25: Registro global [18]

Posteriormente, se procede a combinar los puntos (Puntos → combinar objetos de puntos → OK) y ejecutar el comando Wrap (Puntos → Wrap → OK), el cual transforma el objeto de puntos en uno poligonal. Este comando ofrece algunas configuraciones que se ven en la Ilustración 26 que pueden ser modificadas dependiendo el requerimiento del usuario o simplemente usar las que ofrece por defecto.

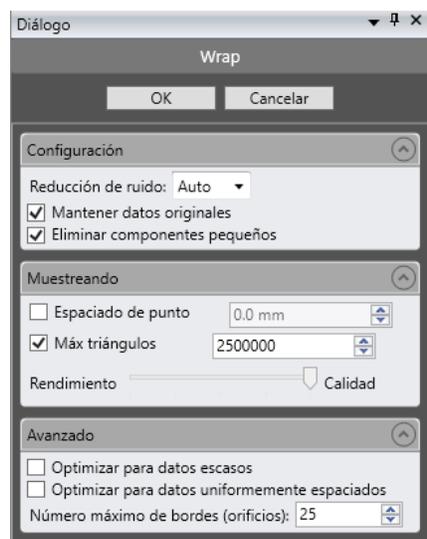


Ilustración 26: Opciones del comando wrap [18]

CAPÍTULO 3: DISEÑO Y FABRICACIÓN MEDIANTE TECNOLOGÍAS 3D

Una vez obtenido el modelo poligonal, se deben llenar y reparar las irregularidades que presente, con el fin de preparar el objeto para la fase de superficies NURBS.

El primer paso para esta etapa es llenar los agujeros presentes en el modelo, tal como se muestra en la Ilustración 27 (a), se pueden realizar todos de una vez o ir uno a uno de forma manual para cerciorarse de que se adapta a lo requerido, al escoger esta última opción permite seleccionar opciones de llenado y la cobertura de la malla. En la Ilustración 27 (b) se visualiza como quedo el modelo una vez completada esta operación.

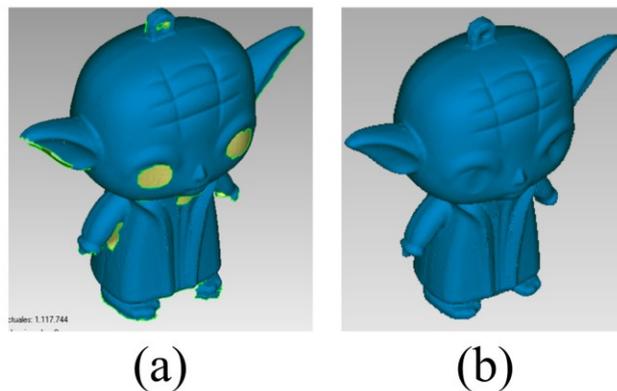


Ilustración 27: Relleno de agujeros [18]

Es probable que en zonas el llenado de agujeros deje irregularidades en la superficie del modelo por la malla circundante o simplemente no satisface las necesidades del usuario, de modo que, resulta bastante útil el comando defeature (polígonos → reparar → defeature), su función es eliminar los triángulos seleccionado y luego rellena el orificio resultante. En la Ilustración 28 se refleja el antes y después de ejecutar el comando.

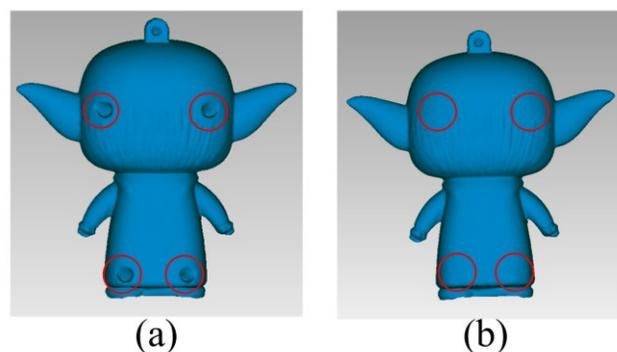


Ilustración 28: Antes y después del comando defeature [18]

CAPÍTULO 3: DISEÑO Y FABRICACIÓN MEDIANTE TECNOLOGÍAS 3D

Ahora que la malla poligonal del objeto está reparada, se ejecuta el comando mesh doctor (polígonos → reparar → mesh doctor) para compensar errores que no son visibles a simple vista. Lo que está en rojo de la Ilustración 29 son irregularidades detectadas por este comando.

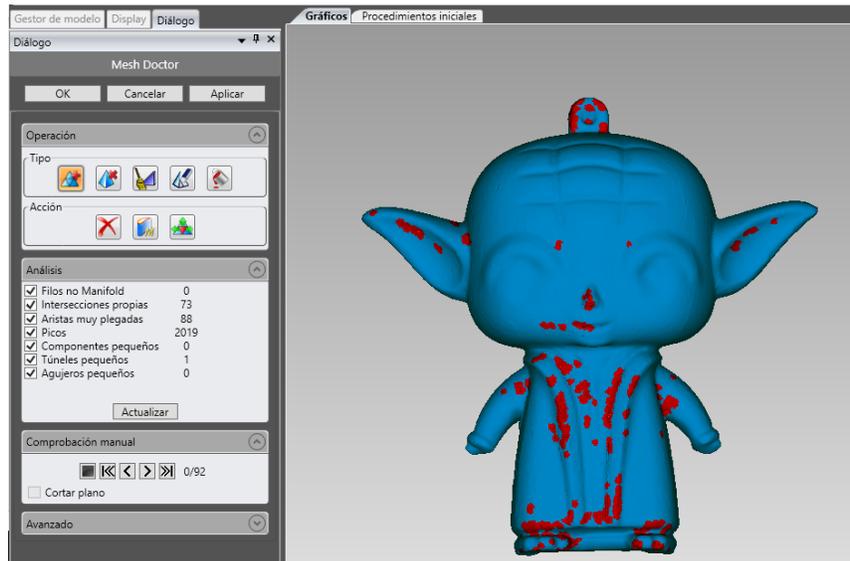


Ilustración 29: Mesh doctor [18]

Terminada la operación, es recomendable crear entidades como por ejemplo planos, con el fin de alinear el objeto al origen del sistema coordinado. Para ello, se dirige a rasgos → crear → plano, se debe escoger entre las opciones la que más acomode. En la Ilustración 30 se muestran tres planos creados mediante el método mejor adaptación.

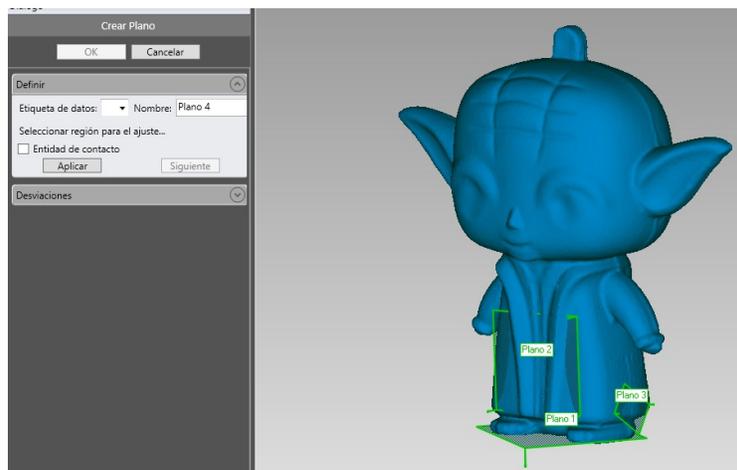


Ilustración 30: Planos creados para alinear al origen [18]

CAPÍTULO 3: DISEÑO Y FABRICACIÓN MEDIANTE TECNOLOGÍAS 3D

A continuación, se ejecuta el comando alinear a mundo (alineación → alinear a mundo), esta instrucción despliega en el cuadro de dialogo la opción de crear los pares coordenado de tal forma que el modelo quede alineado a los planos xy, xz, yz.



Ilustración 31: Alineación a mundo [18]

Tener la malla poligonal completamente cerrada implica dos cosas importantes luego de haber transformado el modelo en superficie exacta, por un lado, esta servirá para programas de análisis computacional como una geometría sin espesor (superficie), el espesor es posible especificarlo en el programa de análisis y es útil si se desean economizar recursos computacionales o buscar un espesor crítico. Por otra parte, al importarlo en CAD el modelo 3D estará completamente sólido.

Ahora bien, para darle un espesor al modelo 3D es necesario que la malla poligonal no esté completamente cerrada, además, realizar esta operación resulta muy conveniente si se desea que el interior del objeto este hueco y los procesos subsiguientes sean en programas CAD o CAM.

Utilizando el comando Shell (Polígonos → Shell) permite crear el grosor, en la Ilustración 32 se muestra el cuadro de dialogo. Se ingresa el valor en negativo con el fin de no modificar la geometría escaneada. En la Ilustración 33 se visualiza el antes (a) y después (b).

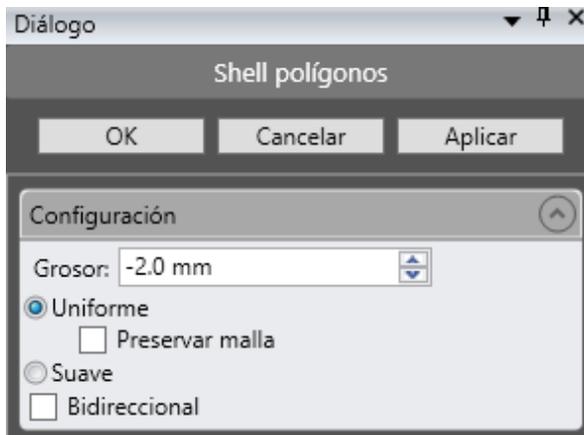


Ilustración 32: Grosor del modelo [18]

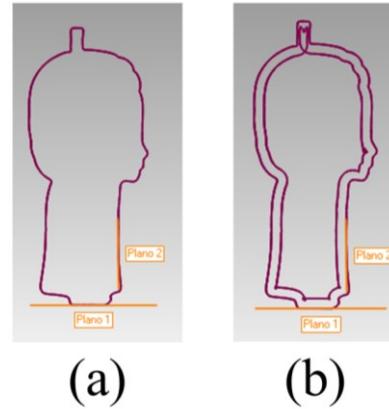


Ilustración 33: Vista de corte del objeto antes y después de definir un grosor [18]

Nota: En esta fase del procedimiento el objeto está listo para ser exportado como un modelo poligonal, pues, ya pueden ser impresos 3D (exportándolo en formato STL) o renderizados (generar texturas, colores, etc) evitándose el trabajo posterior innecesario en el programa para estos fines.

El siguiente paso es convertir el modelo en uno de superficie, ya que es el punto donde podrá ser exportado en formato STEP (formato neutro de transición de datos), compatible entre ambos programas usados en este procedimiento. Para ello se debe ejecutar el comando superficie exactas, luego, superficie automática, el que despliega la pestaña de la Ilustración 34.

Se debe tener en claro que, al seleccionar un tipo de geometría mecánico (valor predeterminado) da como resultado un modelo NURBS con énfasis en la precisión de las áreas de transición (áreas curvilíneas) y es el más adecuado para los objetos diseñados originalmente en CAD. Por el contrario, una geometría orgánica da como resultado modelos NURBS con énfasis en la precisión de la forma general, siendo la más apropiada para objetos esculpidos a mano o la naturaleza. Otro punto importante es la adaptación de la superficie, al ser adaptativa crea parches de tamaño m por n , ahora bien, si es constante creara parches de tamaño m por m , sin embargo, ambos se verán afectados por la superficie.

CAPÍTULO 3: DISEÑO Y FABRICACIÓN MEDIANTE TECNOLOGÍAS 3D

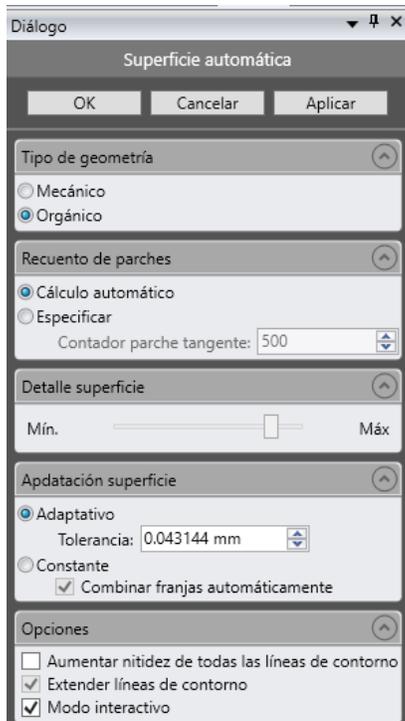


Ilustración 34: Superficie automática [18]

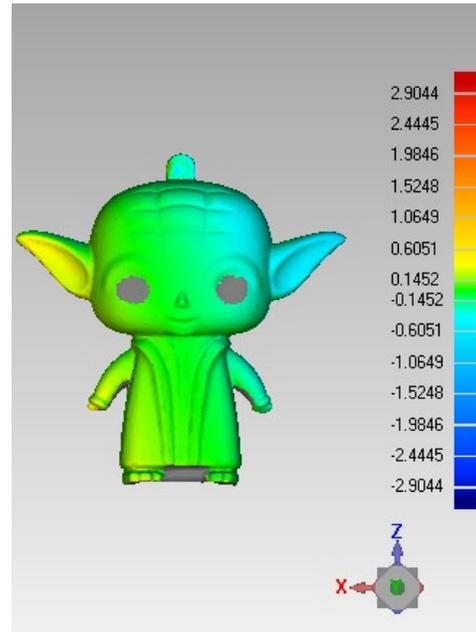


Ilustración 35: Análisis de desviación [18]

En la Ilustración 35 se muestra un análisis de desviación entre el modelo como nube de puntos y superficie NURBS, además, se puede apreciar que la desviación en el objeto en general es inferior a 0,6 mm.

Finalizado esta operación, se procede a guardar el modelo 3D en formato STEP (CAD) o IGES (Análisis computacional) haciendo clic derecho sobre el objeto de superficie, tal como se muestra en la Ilustración 36.

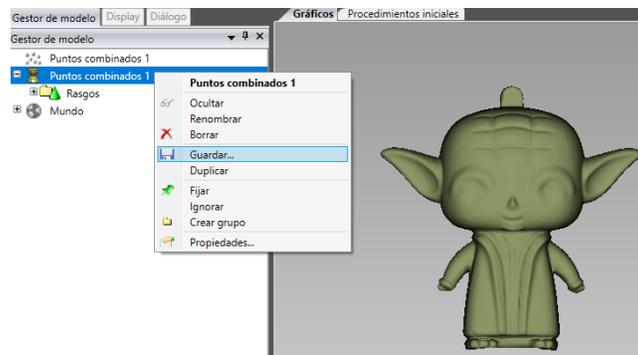


Ilustración 36: Guardar modelo 3D en formato STEP [18]

3.4.3. Editar o analizar

El modelo 3D obtenido de Geomagic Wrap es necesario importarlo a inventor u otro CAD si se desea seguir con la edición, la ventaja de todo esto es que logra reducir el tiempo en modelar un objeto complejo desde cero.

La cinta de la Ilustración 37 señala las opciones para modificar el modelo. La metodología de ataque en este programa consiste en crear bocetos 2D directamente sobre una superficie o planos de trabajos y luego son ejecutadas las operaciones 3D, tales como, barrido, extrucciones, revolución, etc.



Ilustración 37: Cinta de trabajo de Inventor [18]

Este programa incluye la opción de un análisis de elementos finitos (FEA), sin embargo, el software no está enfocado en esto. Ahora bien, si se desea profundizar en un análisis FEA o CFD es recomendar utilizar ANSYS®.

Finalmente se edita el modelo obtenido anteriormente para corregir la geometría en zonas que presente errores o se deseen modificaciones. El resultado final se presenta en la Ilustración 38.



Ilustración 38: Modelo editado listo para impresión 3D [18]

3.4.4. Fabricar

La última etapa de este flujo de trabajo es fabricar el objeto. Por lo tanto, antes de comenzar a imprimir es necesario insertar una bandeja nueva donde se realizara la impresión, además, se debe precalentar la cámara hasta la temperatura de operación. Luego, se cargan los archivos a imprimir. Una vez finalizada las piezas son sometidas a un lavado para retirar el material de soporte. En la Ilustración 39 se puede apreciar el detalle del paquete para la impresión del modelo que se tomó como ejemplo. Así también, en la Ilustración 40 se muestra el modelo original y la réplica fabricada.

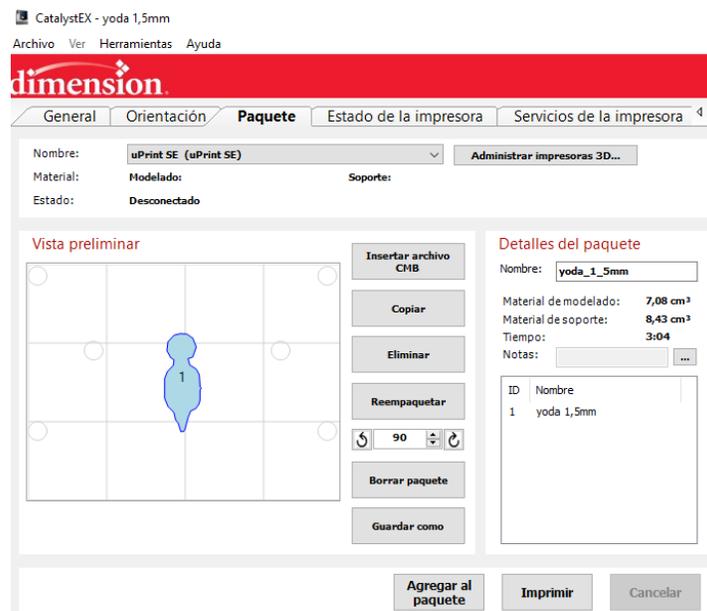


Ilustración 39: Paquete para impresión 3D [18]



Ilustración 40: Comparación entre modelo original y réplica [18]

CAPÍTULO 4: DISEÑO Y FABRICACIÓN DEL PROTOTIPO

4.1. Definición del prototipo

Se realizó un prototipo de prótesis de mano con el fin de validar el procedimiento planteado en el capítulo anterior, en otras palabras, una aplicación real del proceso. Siendo considerados para esta elección los siguientes motivos:

- La pérdida de movilidad en una extremidad superior, como la amputación total o parcial, pueden dejar un efecto muy negativo en la persona que lo padece, tales como tristeza, rabia y frustración.
- El 16,7% de la población chilena vive con alguna condición de discapacidad[20]. Por lo tanto, dentro de este porcentaje existen personas que han sufrido de la amputación de a lo menos una fracción de sus extremidades superiores.
- Las prótesis de mano funcionales desarrolladas en general carecen del factor estético, es decir, que tengan un aspecto real. Por lo que el uso del escáner 3D en esta aplicación toma una gran relevancia, logrando capturar rasgos propios de cada persona.
- Durante el desarrollo de este proyecto, se realizó uno en paralelo relacionado a la captación y control de señales electromiográficas, aplicado en prótesis de extremidad superior.
- Demostrar las aplicaciones y alcances de las tecnologías 3D, además, contribuir con el desarrollo e innovación de las prótesis de mano de bajo costo.

4.2. Proceso de digitalización

El proceso de digitalización comenzó ajustando los parámetros en el interfaz para usar el escáner 3D, los ajustes seleccionados fueron los siguiente:

- Resolución: media
- Método de transformación: ajuste perfecto
- Sin plato giratorio
- Escaneo sencillo

En la Ilustración 41 se puede ver las líneas de expresión presentes en la piel captadas con el escáner, lo que muestra el nivel de precisión de este dispositivo.

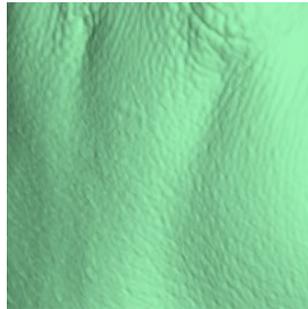


Ilustración 41: Resolución de la digitalización [18]

La metodología de ataque para capturar la geometría fue, en un principio, intentar inmobilizar dada una posición que estuvieran los dedos bien abiertos, con el fin de lograr numerosas coincidencias entre pocos escaneos, la cual no resultó satisfactoria, ya que, no se consideró utilizar separadores y a la mínima variación resultaba que la alineación fuera inútil. Luego, se modificó la metodología incluyendo un separador fijo entre los dedos, pero, no bastó, pues los dedos o el antebrazo seguían presentando complicaciones.

Finalmente, se optó por digitalizar la forma de la mano en secciones, que posteriormente fueran unidas y alineadas dentro del programa, por ejemplo, escanear múltiples tomas de la mano, eliminando parte de los dedos de forma intencional, así posteriormente alinear los escaneos entre sí, formando la mano tal como se representa en la Ilustración 42. De igual forma se procede hasta obtener los 5 dedos.

CAPÍTULO 4: FABRICACIÓN DEL PROTOTIPO

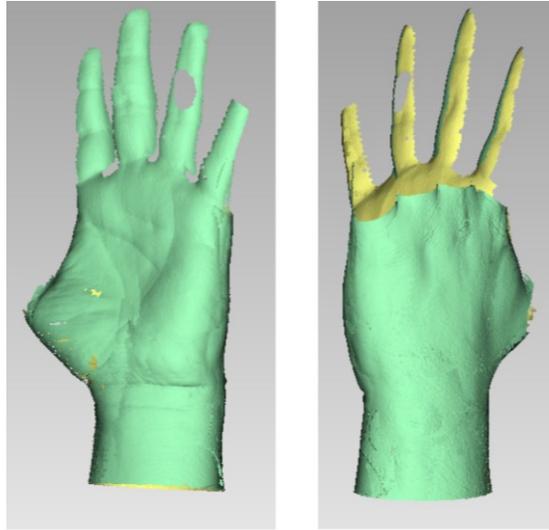


Ilustración 42: Nube de puntos de la mano sin dedos [18]

Continuando con el procedimiento, los diferentes grupos fueron combinado dejando un solo objeto por cada sección, así también, convertidos en objetos poligonales, que posteriormente, son alineado de tal forma que representen la mano real, tal como se muestra en la Ilustración 43. Una vez completada esta operación con los 5 dedos son fusionados en uno nuevo.

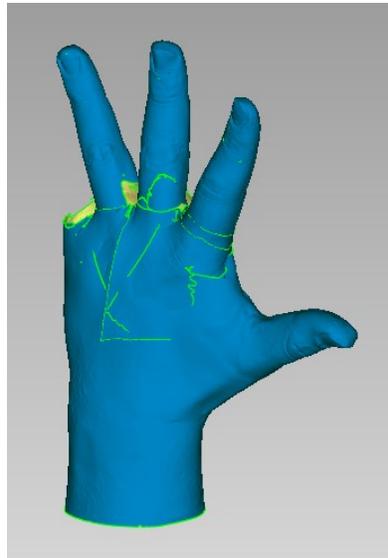


Ilustración 43: Proceso de alineación entre dedos y mano [18]

CAPÍTULO 4: FABRICACIÓN DEL PROTOTIPO

El siguiente paso fue obtener una geometría sin imperfecciones del modelo 3D, por lo tanto, se aplicaron sistemáticamente las operaciones de reparación, consiguiendo el objeto que aparece en la Ilustración 44. Para concluir con la fase poligonal, se alinea el objeto al origen del sistema coordenado y además se añade un espesor de 3,5 mm en toda la superficie.

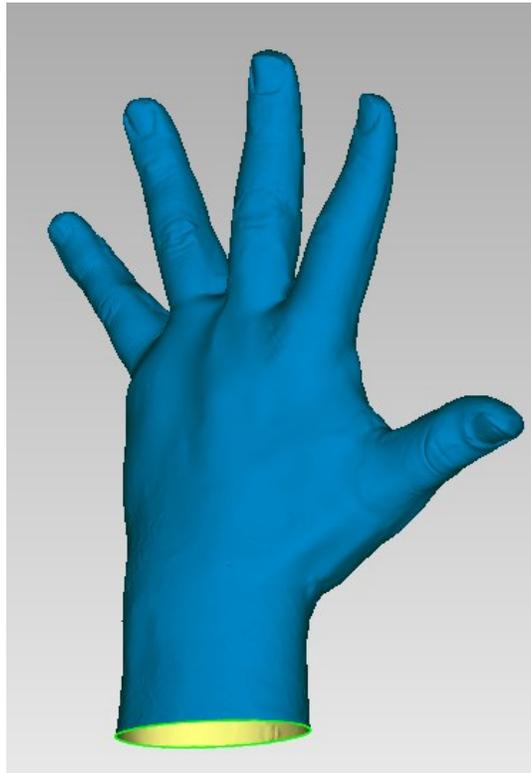


Ilustración 44: Geometría reparada del prototipo [18]

Finalmente se procedió a convertir el modelo en superficie NURBS, utilizando un tipo de geometría orgánico, ya que, la prioridad es la forma general del modelo y luego se exporta en formato STEP para continuar con el rediseño en AutoDesk Inventor.

4.3. Rediseño en Inventor

El modelo 3D es completamente rígido y similar en apariencia a una mano, tal como se muestra en la Ilustración 45, por ende, estaría cumpliendo la función de una prótesis estética, entonces, el paso siguiente correspondió a crear articulaciones, las que luego servirán para generar movimientos, dicho de otra forma, hacerla funcional.

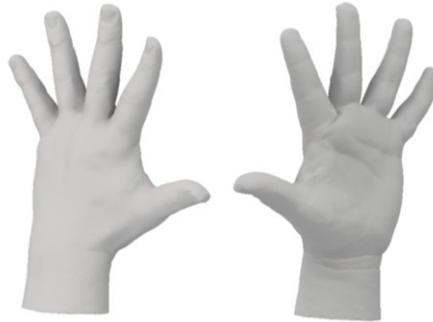


Ilustración 45: Modelo importado en inventor [18]

La metodología de ataque consistió en seccionar reiteradas ocasiones el modelo original en las diferentes articulaciones donde se produce el movimiento creando así múltiples piezas, en la Ilustración 46 se muestra cómo se secciono un dedo en tres objetos diferentes. En la Ilustración 47 se muestra el resultado final de este proceso.

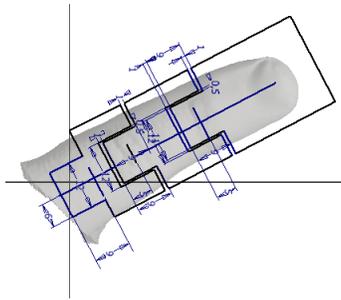


Ilustración 46: Boceto para seccionar el meñique [18]

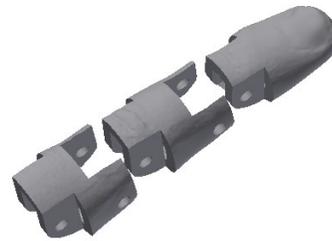


Ilustración 47: Dedo meñique seccionado [18]

Cada dedo consta de tres componentes individuales unidos entre sí con pasadores de 3,5 mm. de diámetro y un juego entre la articulación de 1 mm., por otro lado, el tendón artificial atraviesa guías al interior de cada parte del dedo, cuando se tira del tendón, se aplican fuerzas

CAPÍTULO 4: FABRICACIÓN DEL PROTOTIPO

de rotación a todas las articulaciones y el dedo se dobla. El final del dedo debe tener un punto de bloqueo para que cuando se tensa el tendón, tire de la punta del dedo y haga que todas las articulaciones giren. Para abrir el dedo desde una posición cerrada, se aplica tensión en el otro extremo del tendón.

Finalmente, se obtuvo el ensamble mostrado en la Ilustración 48. La mano escaneada llega hasta la parte de la muñeca, es decir, la parte gris de la Ilustración 48, por otro lado, la fracción negra es del modelo utilizado en el proyecto sobre el diseño e implementación de sistema para detección de señales electromiográficas, pero, ahora son integradas mejoras, tales como, sistema de acople y rotación (Ilustración 49), disposición de los servomotores, etc.



Ilustración 48: Rediseño del modelo 3D [18]

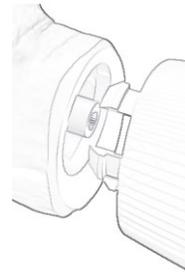


Ilustración 49: Sistema de acople y rotación [18]

CAPÍTULO 4: FABRICACIÓN DEL PROTOTIPO

4.4. Fabricación y ensamble de la prótesis de mano

La fabricación del prototipo solo consta de la mano escaneada y el sistema de rotación, ya que se reutilizó el modelo impreso disponible sin modificaciones hasta que fueron bien definidos los servomotores óptimos para generar un producto útil.

Para la construcción de la mano se necesitó aproximadamente 30 horas de impresión, 179 cm³ de ABS y 88 cm³ de material de soporte. En la Ilustración 50 se muestra el detalle del paquete.

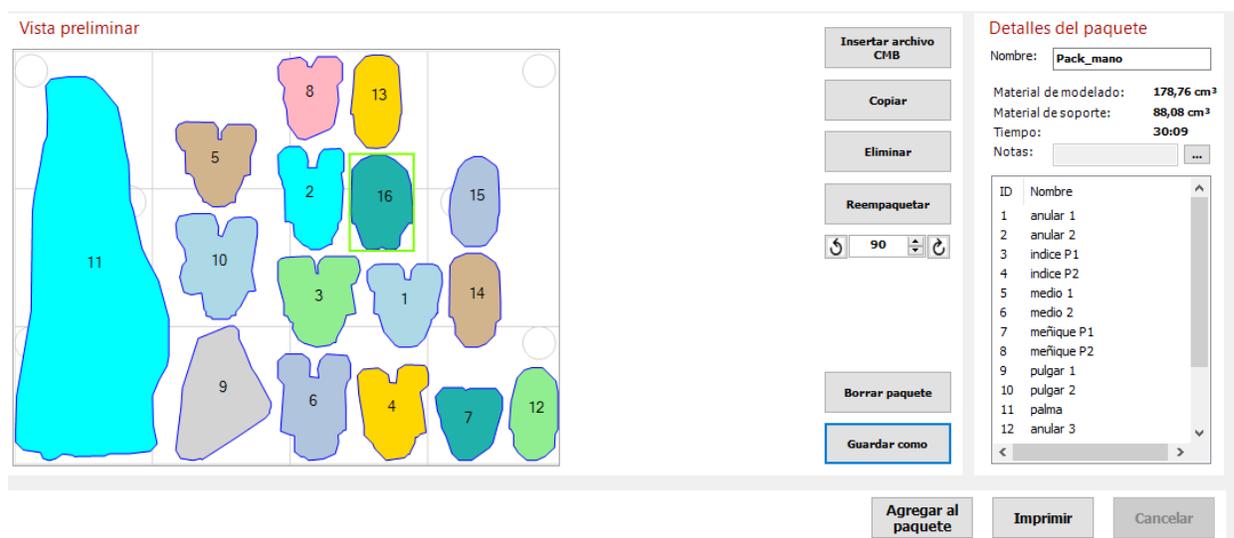


Ilustración 50: Detalle del paquete para impresión 3D [18]

En la Ilustración 51 se logra apreciar la mano escaneada una vez impresa y ensamblada (dimensiones generales del tamaño de la prótesis y despiece en el anexo 4). Las partes negras corresponden a las puntas de los dedos, que fueron construidas en una impresora 3D con tecnología SLA (modelo "Form 2") en resina flexible (propiedades mecánicas en el anexo 3), a fin de mejorar el agarre de objetos con este material, obteniendo resultados significativos.

CAPÍTULO 4: FABRICACIÓN DEL PROTOTIPO



Ilustración 51: Prótesis impresa y ensamblada [18]

En la Tabla 1 están considerados costos por material para producir una prótesis, comparando el ABS plus P430 y otros materiales para el modelado que ocupa la impresora uPrint y ABS plus para impresoras 3D Open Source.

Items	Formato	Unidad	Precio referencial (CLP)	Cantidad utilizada	Impresora uPrint SE	Impresora 3D Open Source
					Total	Total
ABS P430	688	cm3	\$ 200.000	178,8	\$ 51.977	
Material de soporte SR-30	688	cm3	\$ 100.000	88	\$ 12.791	
Base de modelado		1 Unidad	\$ 6.700	1	\$ 6.700	
ABS Plus open source	940	cm3	\$ 23.000	266,8		\$ 6.528
Total					\$ 71.467	\$ 6.528

Tabla 1: Comparación de costos del material de modelado de la prótesis [18]

Por otro lado, como se fabricaron las puntas de los dedos usando la tecnología de SLA, a continuación en la Tabla 2 se muestra una comparación de costos entre estas dos impresoras.

Items	Formato	Unidad	Precio referencial (CLP)	Cantidad utilizada	Impresora uPrint SE	Form 2
					Total	Total
ABS P430	688	cm3	\$ 200.000	22	\$ 6.395	
Material de soporte SR-30	688	cm3	\$ 100.000	9,9	\$ 1.439	
Resina Fotosensible	1000	ml	\$ 160.000	32		\$ 5.120
Total					\$ 7.834	\$ 5.120

Tabla 2: Comparación de costos de material para modelado de las puntas de dedo [18]

En las estimaciones mostradas anteriormente no están asociados costos tales como, horas hombre, consumo de energía, horas máquinas, depreciación del equipo, etc.

CAPÍTULO 5: CONCLUSIÓN Y TRABAJO FUTURO

5.1. Conclusiones

Los dispositivos utilizados en la línea 3D tienen una relación directa entre sí, ya que, mediante la digitalización de un objeto se obtiene el modelo 3D de forma rápida y precisa, que luego puede ser estudiado y/o modificado, y finalmente, mediante la impresión 3D fabricar prototipos para probar o generar nuevos diseños y piezas. En cuanto al escáner Geomagic Capture utiliza tecnología de luz estructurada, por lo que ofrece un excelente desempeño en cuanto a precisión y velocidad de escaneo, conjuntamente, el software Geomagic Wrap es muy intuitivo en cuanto a la ejecución de comandos. Por otra parte, la impresora es el modelo uPrint SE, la cual es muy confiable durante el proceso de construcción, sin embargo, solo imprime en ABS. Este material ofrece buenas características de resistencia y durabilidad, logrando ser un excelente material para aplicaciones de prototipado rápido.

El objetivo principal del proyecto fue crear un flujo de trabajo para la línea de diseño 3D disponible en el laboratorio de desarrollo de productos y prototipos (recursos disponibles), el cual se puede resumir en los siguientes pasos:

1. Preparar y escanear el objeto.
2. Eliminar datos ajenos a la geometría.
3. Alinear los escaneos individuales entre sí y combinar los puntos.
4. Convertir en polígonos, reparar la geometría y alinear al origen.
5. Convertir en superficie exacta y exportar modelo 3D.
6. Rediseñar en CAD y/o analizar computacionalmente.
7. Fabricar o imprimir.

Sin embargo, la estructura base de la metodología puede ser genérica para las alternativas en el campo de la digitalización e impresión 3D, es decir, primero escanear, segundo procesar nube de puntos, tercero editar y/o analizar computacionalmente y por último fabricar.

La mayor complicación para crear el prototipo estuvo presente al momento de obtener las diferentes capturas para generar el modelo 3D de la mano y luego alinearlas, ya que, a la mínima variación los datos no eran coincidentes entre sí. Por lo tanto, al digitalizar objetos

CAPÍTULO 5: CONCLUSIÓN Y TRABAJO FUTURO

móviles se debe variar lo menos posible su forma, dado que, se puede transformar en una tarea bastante laboriosa al momento de crear el modelo 3D.

Con respecto a la prótesis se puede concluir que:

- Es un gran avance desarrollar este tipo de prótesis a nivel local, logrando generar expectativas en la comunidad para continuar con el desarrollo y transformarlo en un producto útil, ya que, actualmente muchas de las prótesis funcionales son de alto costo y/o deben ser encargadas al extranjero.
- Es posible realizar prótesis ajustando las dimensiones y medidas de cada usuario, digitalizando la extremidad que se posee para ayudar a amortiguar el trauma por la amputación sufrida.
- Con el modelo en curso se pretende obtener un diseño propio para la universidad y continuar con el desarrollo e innovación de esta área, implementando el sistema para control y detección de señales electromiográficas. Además, se espera que las mejoras futuras conduzcan a un sistema más duradero y mejor destreza, con el fin de beneficiar a los amputados mejorando su calidad de vida.
- El principal material utilizado es ABS, sin embargo, se fabricaron las puntas de los dedos en resina flexible con el fin de mejorar el agarre de objetos, obteniendo como resultado una diferencia significativa.
- Para disminuir costos en la fabricación de prótesis se recomienda utilizar ABS comercializado en cualquier tienda de impresión 3D.

Finalmente, se puede concluir que, dentro del proceso de diseño utilizar las tecnologías 3D es muy útil para obtener prototipos de objetos con geometrías complejas en un gran nivel de precisión y detalles, ahorrándose tiempo útil en generar un modelo, comparado al dibujar el mismo objeto completamente desde cero. No obstante, el grado de dificultad del procedimiento, expresado en términos de tiempo necesario para llevar a cabo el proceso y la calidad del producto, variara en función de las características del objeto escaneado.

5.2. Trabajo futuro

Con respecto al prótesis se recomienda profundizar en los siguientes temas:

- Analizar computacional para conseguir puntos críticos y espesor óptimo en todo el objeto respecto a las cargas generadas por el torque de los servomotores en la estructura, situaciones impacto, apriete de objetos, etc.
- Probar otros materiales que mejoren características tales como textura, sujeción de objetos, flexibilidad, etc. Una opción de material a evaluar es elastómero termoplástico (TPE), Con el fin que sea capaz de absorber choques repentinos y soportar cargas pesadas sin fallar.
- Mejorar el sistema de rotación de la muñeca para que permita movimientos de flexión hacia adelante y atrás. Además, evaluar los puntos críticos para integrar retroalimentación sensorial de fuerza ejercida sobre la prótesis.

REFERENCIAS

- [1] T. Tóth and J. Živčák, “A comparison of the outputs of 3D scanners,” *Procedia Eng.*, vol. 69, pp. 393–401, 2014.
- [2] S. Son, H. Park, and K. H. Lee, “Automated laser scanning system for reverse engineering and inspection,” *Int. J. Mach. Tools Manuf.*, vol. 42, no. 8, pp. 889–897, 2002.
- [3] P. Palojärvi, *Integrated electronic and optoelectronic circuits and devices for pulsed time-of-flight laser ranging*. Oulun yliopisto, 2003.
- [4] G. Fu, A. Menciassi, and P. Dario, “Development of a low-cost active 3D triangulation laser scanner for indoor navigation of miniature mobile robots,” *Rob. Auton. Syst.*, vol. 60, no. 10, pp. 1317–1326, 2012.
- [5] N. M. Barrio, “Análisis y aplicación de un escáner 3D en el ámbito médico-estético,” 2016.
- [6] S. Martínez-Pellitero, E. Cuesta, S. Giganto, and J. Barreiro, “New procedure for qualification of structured light 3D scanners using an optical feature-based gauge,” *Opt. Lasers Eng.*, vol. 110, no. June, pp. 193–206, 2018.
- [7] Q. Tang, C. Liu, Z. Cai, H. Zhao, X. Liu, and X. Peng, “An improved spatiotemporal correlation method for high-accuracy random speckle 3D reconstruction,” *Opt. Lasers Eng.*, vol. 110, no. May, pp. 54–62, 2018.
- [8] 3Dnatives, “Escáner de luz estructurada,” 2016. [Online]. Available: www.3dnatives.com/es/escaner-de-luz-estructurada-06122016/.
- [9] solidhumans.xyz in CAD, “CAD-friendly Casual Woman Hand Model F1P1D0V1hand 3D model,” 2018. [Online]. Available: <https://www.cgtrader.com/3d-models/character/woman/cad-friendly-casual-female-hand-model-f1p1d0v1hand>.
- [10] Autodesk, “NURBS 1: Introducción | Productos Alias 2019 | Autodesk Knowledge

Network.” [Online]. Available: <https://knowledge.autodesk.com/support/alias-products/getting-started/caas/CloudHelp/cloudhelp/2019/ENU/Alias-Tutorials/files/GUID-366304CB-16FF-46F9-9F64-D7385358D855-htm.html>. [Accessed: 04-Jan-2019].

- [11] M. Coelho, D. Roehl, and K. U. Bletzinger, “Material model based on NURBS response surfaces,” *Appl. Math. Model.*, vol. 51, pp. 574–586, 2017.
- [12] T. D. Ngo, A. Kashani, G. Imbalzano, K. T. Q. Nguyen, and D. Hui, “Additive manufacturing (3D printing): A review of materials , methods , applications and challenges,” *Compos. Part B*, vol. 143, no. February, pp. 172–196, 2018.
- [13] X. Wang, M. Jiang, Z. Zhou, J. Gou, and D. Hui, “3D printing of polymer matrix composites : A review and prospective,” *Compos. Part B*, vol. 110, pp. 442–458, 2017.
- [14] C. Balletti, M. Ballarin, and F. Guerra, “3D printing : State of the art and future perspectives,” *J. Cult. Herit.*, vol. 26, pp. 172–182, 2017.
- [15] 3D Systems®, “3D Systems Capture scanner,” 2014.
- [16] 3D Systems®, “Geomagic Wrap 3D Scanning Software.” [Online]. Available: <https://www.3dsystems.com/software/geomagic-wrap>. [Accessed: 21-Nov-2018].
- [17] stratasy® and COMGRAP, “uPrint SE 3D Printers.” .
- [18] M. Navarrete, “Elaboración propia.” 2018.
- [19] G. Pincheira and F. González, “Caracterización mecánica en tensión y flexión de plástico abs plus manufacturado aditivamente,” 2018.
- [20] Instituto Nacional de Estadísticas de Chile, *II Estudio Nacional de la Discapacidad I*. 2016.

ANEXOS

Anexo 1: Posicionamiento del escáner

Preparación de la pieza

Algunas piezas requieren de una preparación previa a ser escaneadas, ya que, presentan una geometría limitada o bien son de un material transparente o reflectante.

- **Marcadores de destino**

Para las piezas que tienen una geometría limitada, por ejemplo, curvaturas constantes o superficies planas, o bien, son tan grandes como insuficiente el rango de vista del escáner, entonces, es necesario colocar marcadores de destino en la pieza para usar estas características durante la alineación.

Los marcadores de objetivos son generalmente etiquetas redondas pequeñas que se colocan sobre un objeto o sobre una superficie móvil en la que se apoya la pieza. Después de escanear la pieza y generar una malla, el escáner busca los marcadores de destino e intenta alinearlos con el o los escaneos anteriores. Si se encuentran suficientes coincidencias, la alineación es exitosa y está listo para un nuevo escaneo. Si no se encuentran suficientes marcadores de destino coincidentes, la alineación falla y puede reintentar o usar otro método de alineación.

- **Recubrimiento de una pieza**

Las superficies reflectantes o transparentes dispersan la luz del escáner y crean artefactos de ruido en los datos de escaneo finales, así también, los colores complementarios al azul (luz led utilizada por el escáner) como naranja o rojo. El escáner funciona mejor cuando se digitalizan superficies blancas y mates. Para ello se utiliza un aerosol de polvo blanco con el fin de crear una película sobre la superficie del objeto. Se debe rociar la pieza con una capa uniforme y ligera, por lo tanto, cuanto más fino sea el recubrimiento, mejor. Al agregar más de una fina capa de polvo puede afectar el grosor de la pieza al escanear, además, la superficie se desprende fácilmente y es propensa a las huellas dactilares, por lo tanto, es recomendable montar el objeto sobre una plataforma que permita mover la pieza después de estar recubierta.

Anexo 2: Menú de ajustes

En la Ilustración 52 se puede apreciar las opciones de ajustes.

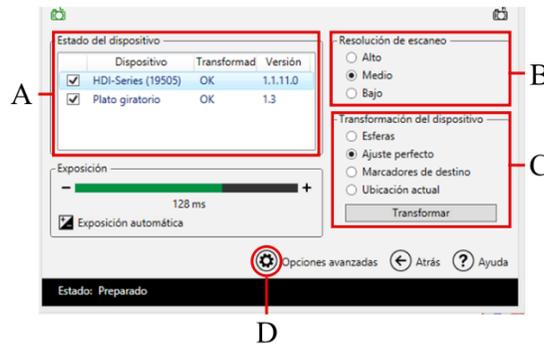


Ilustración 52: Menú de ajustes del escáner [18]

A. Estado del dispositivo: Permite gestionar el estado de los dispositivos conectados.

B. Resolución de escaneo: Ajusta la resolución en los siguientes tres niveles.

- **Alta:** Crea una malla de alta densidad (relación de captura 1/1). Recomendable para piezas con gran riqueza de detalles.
- **Media:** Crea una malla de media densidad (relación de captura 1/4). Recomendable para piezas normales.
- **Baja:** Crea una malla de baja densidad (relación de captura 1/9). Recomendable para piezas con superficies suaves.

C. Transformación del del dispositivo: Esta opción alinea y registra automáticamente los escaneos en un mismo sistema coordenado cuando se tienen las suficientes características dependiendo del método de registro seleccionado. A continuación, se describe cada método disponible.

- **Esferas:** Este método de registro detecta características esféricas y luego las utiliza para alinear los escaneos entre sí. Es necesario que se coloquen a la vista de la cámara al menos 3 características esféricas y que puedan coincidir entre escaneos para completar exitosamente este método de registro. Estas características pueden ser propias de la pieza, como también, sobrepuestas de forma manual al igual que los marcadores de destino.

- **Ajuste perfecto:** Este método de registro automático se puede aplicar a objetos comunes y se basa en alinear características geométricas similares. Si las características del objeto son complejas y variadas, este método representa la alternativa más sencilla y rápida para completar todo el escaneo. Por otra parte, si el objeto tiene pocas características y/o curvaturas constantes este método no es el correcto.
- **Marcadores de destino:** Este método de registro consiste en colocar marcadores circulares con un diámetro entre 4 y 12 mm. en piezas de gran tamaño (mayor al campo de visión del escaner), curvaturas constantes, superficies planas o con características limitadas, para así facilitar la alineación entre los escaneos. El objeto debe colocarse de manera que a lo menos cuatro marcadores de destino coincidan entre los escaneos y sean visibles a la vista del escáner, con el fin de garantizar una correcta alineación automática.
- **Ubicación actual:** Registra la posición del dispositivo conectado utilizando la alineación del escaneo anterior.

Configuración avanzada: Despliega un menú para configurar la red con la que se comunicara el escáner, además, la opción de actualizar el firmware de los dispositivos disponibles.

Anexo 3: Propiedades mecánicas de la resina flexible formlabs

Material Properties Data

	METRIC ¹		IMPERIAL ¹		METHOD
	Green	Post-Cured ²	Green	Post-Cured ²	
Mechanical Properties					
Ultimate Tensile Strength ³	3.3 - 3.4 MPa	7.7 - 8.5 MPa	483 - 494 psi	1100 - 1230 psi	ASTM D 412-06 (A)
Elongation at Failure ³	60 %	75 - 85 %	60 %	75 - 85 %	ASTM D 412-06 (A)
Compression Set ⁴	0.40 %	0.40 %	0.40 %	0.40 %	ASTM D 395-03 (B)
Tear Strength ⁵	9.5 - 9.6 kN/m	13.3 - 14.1 kN/m	54 - 55 lbf/in	76 - 80 lbf/in	ASTM D 624-00
Shore Hardness	70 - 75 A	80 - 85 A	70 - 75 A	80 - 85 A	ASTM 2240
Thermal Properties					
Vicat Softening Point ⁶	231 °C	230 °C	448 °F	446 °F	ASTM D 1525-09

¹ Material properties can vary with part geometry, print orientation, print settings and temperature.

² Data was obtained from parts printed using Form 2, 100 µm, Flexible settings, and post-cured with 80.5 mW/cm² of 365 nm fluorescent light for 60 minutes.

³ Tensile testing was performed after 3+ hours at 23 °C, using a Die C dumbbell and 20 in/min cross head speed.

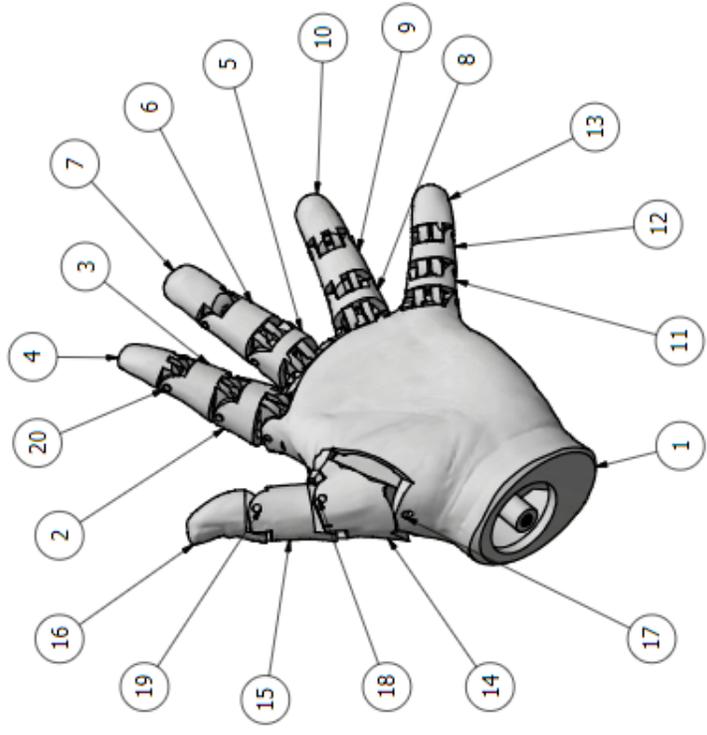
⁴ Compression testing was performed at 23 °C after aging at 23 °C for 22 hours.

⁵ Tear testing was performed after 3+ hours at 23 °C, using a Die C tear specimen and a 20 in/min cross head speed.

⁶ Thermal testing was performed after 40+ hours with a 10 N loading at 50 °C/hour. Cracks formed in samples during testing.

Anexo 4: Planimetrías

A continuación se presentan la planimetría de la prótesis de mano.

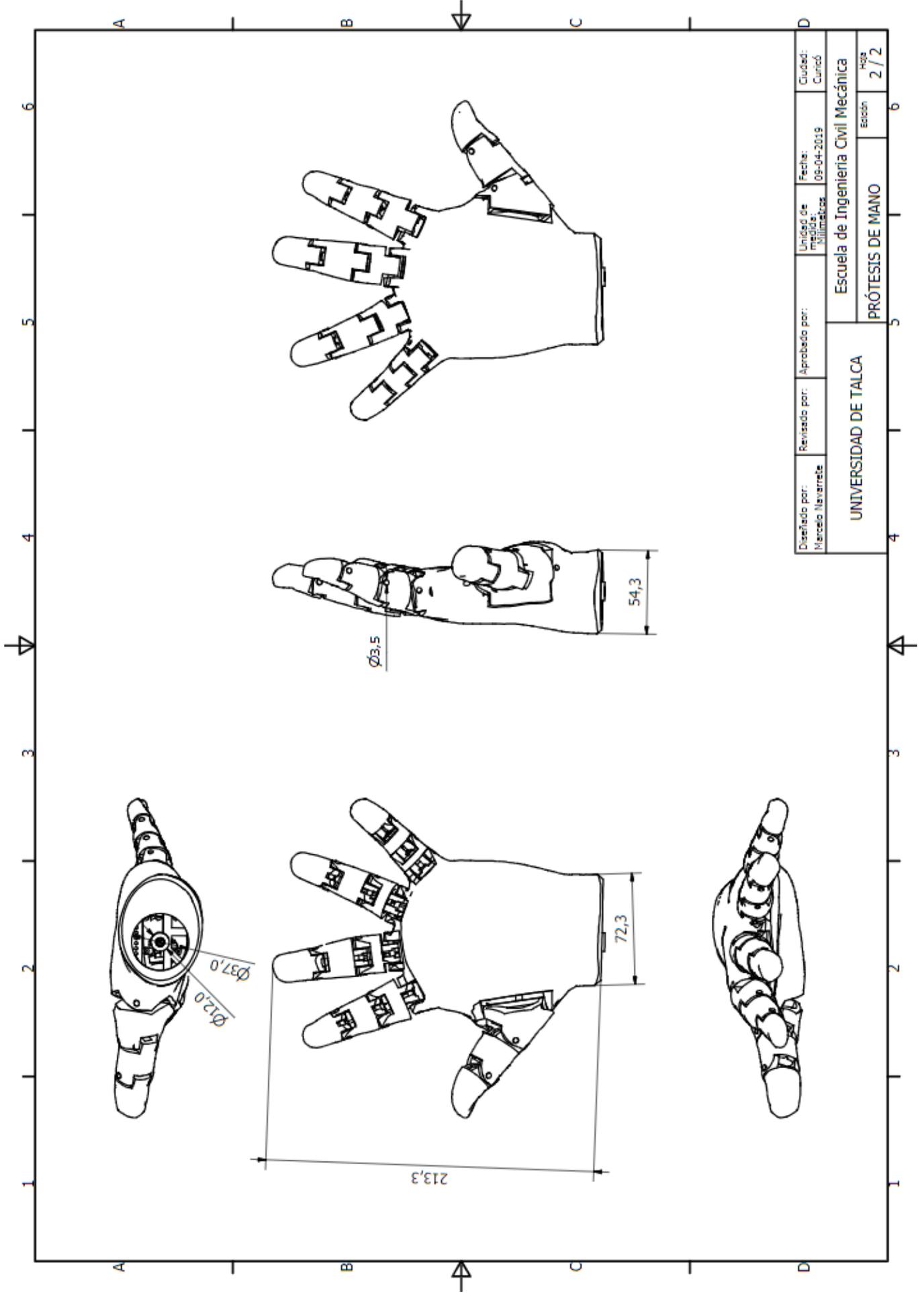


LISTA DE PIEZAS

ELEMENTO	CTDAD	Nº DE PIEZA	MATERIAL	MASA
1	1	PALMA	Plástico ABS	111,56 g
2	1	INDICE 1	Plástico ABS	5,91 g
3	1	INDICE 2	Plástico ABS	5,17 g
4	1	INDICE 3	Plástico ABS	3,97 g
5	1	MEDIO 1	Plástico ABS	5,33 g
6	1	MEDIO 2	Plástico ABS	6,07 g
7	1	MEDIO 3	Plástico ABS	5,03 g
8	1	ANULAR 1	Plástico ABS	4,32 g
9	1	ANULAR 2	Plástico ABS	4,88 g
10	1	ANULAR 3	Plástico ABS	4,34 g
11	1	MENIQUE P1	Plástico ABS	2,97 g
12	1	MENIQUE P2	Plástico ABS	3,12 g
13	1	MENIQUE P3	Plástico ABS	3,80 g
14	1	PULGAR 1	Plástico ABS	9,16 g
15	1	PULGAR 2	Plástico ABS	7,36 g
16	1	PULGAR 3	Plástico ABS	6,65 g
17	1	Pasador 60mm	Plástico ABS	0,57 g
18	1	Pasador 30mm	Plástico ABS	0,31 g
19	6	Pasador 25mm	Plástico ABS	0,25 g
20	7	Pasador 20mm	Plástico ABS	%Varia*

Diseñado por: Marcelo Navarrete
 Revisado por:
 Aprobado por:
 Unidad de medida: Milímetros
 Fecha: 09-04-2019
 Ciudad: Curicó

UNIVERSIDAD DE TALCA
 Escuela de Ingeniería Civil Mecánica
 PRÓTESIS DE MANO
 Escala: 1/2
 Hrs: 6



Diseniado por: Marcelo Navarrete	Revisado por:	Aprobado por:	Unidad de Midiométricas	Fecha: 09-04-2019	Ciudad: Cunibó
UNIVERSIDAD DE TALCA			Escuela de Ingeniería Civil Mecánica		
			PRÓTESIS DE MANO		Hora 2/2