

ESCUELA POLITÉCNICA NACIONAL

FACULTAD DE INGENIERÍA MECÁNICA

**EXO-ESQUELETO POTENCIADOR DE FUERZA PARA LA
MANO**

**ANÁLISIS DE PATRONES FUNCIONALES E IMPRESIÓN 3D
(FDM) DE UN PROTOTIPO EXO-ESQUELETO DE LA MANO.
ENFOQUE EN LA REHABILITACIÓN DE AGARRE DE LA MANO**

**TRABAJO DE INTEGRACIÓN CURRICULAR PRESENTADO COMO
REQUISITO PARA LA OBTENCIÓN DEL TÍTULO DE INGENIERO
MECÁNICO**

JAIRO ANDRES MANGIA CUICHAN

jairo.mangia@epn.edu.ec

DIRECTOR: WILLIAM RICARDO VENEGAS TORO

william.venegas@epn.edu.ec

Quito, Febrero 2022

CERTIFICACIONES

Yo, Jairo Andres Mangia Cuichan declaro que el trabajo de integración curricular aquí descrito es de mi autoría; que no ha sido previamente presentado para ningún grado o calificación profesional; y, que he consultado las referencias bibliográficas que se incluyen en este documento.



Jairo Andres Mangia Cuichan

Certifico que el presente trabajo de integración curricular fue desarrollado por Jairo Andres Mangia Cuichan, bajo mi supervisión.



William Ricardo Venegas Toro

DIRECTOR

DECLARACIÓN DE AUTORÍA

A través de la presente declaración, afirmamos que el trabajo de integración curricular aquí descrito, así como el (los) producto(s) resultante(s) del mismo, son públicos y estarán a disposición de la comunidad a través del repositorio institucional de la Escuela Politécnica Nacional; sin embargo, la titularidad de los derechos patrimoniales nos corresponde a los autores que hemos contribuido en el desarrollo del presente trabajo; observando para el efecto las disposiciones establecidas por el órgano competente en propiedad intelectual, la normativa interna y demás normas.

Jairo Andres Mangia Cuichan

William Ricardo Venegas Toro

DEDICATORIA

AGRADECIMIENTO

ÍNDICE DE CONTENIDO

EXO-ESQUELETO POTENCIADOR DE FUERZA PARA LA MANO	1
CERTIFICACIONES.....	1
DECLARACIÓN DE AUTORÍA.....	2
DEDICATORIA.....	3
AGRADECIMIENTO.....	4
ÍNDICE DE CONTENIDO.....	5
RESUMEN	8
ABSTRACT	9
1 DESCRIPCIÓN DEL COMPONENTE DESARROLLADO	1
1.1 Objetivo general.....	2
1.2 Objetivos específicos	2
1.3 Alcance	2
1.4 Marco teórico	3
1.4.1 Discapacidad en el Ecuador.....	3
1.4.2 El exo-esqueleto	4
1.4.3 Patrones funcionales (movimiento del brazo-antebrazo-mano).....	5
1.4.4 Tipos de ortesis	5
1.4.4.1 Ortesis estáticas.....	6
1.4.4.2 Ortesis dinámicas.....	6
1.4.5 Estructura de funcionamiento	7
1.4.5.1 Exo-esqueletos pasivos	7
1.4.5.2 Exo-esqueletos activos	7
1.5 Estado del arte.....	9
1.5.1 Análisis Tecnológico	9
1.5.2 Análisis Técnico.....	11
1.5.3 Fabricación aditiva	14
1.5.4 Tipos de operaciones de fabricación aditiva	15
1.5.4.1 Estereolitografía (SLA)	16
1.5.4.2 Procesamiento digital de luz (DLP)	17
1.5.4.3 Modelado por deposición fundida (FDM)	19
1.5.4.4 Sinterización selectiva por láser (SLS).....	20
1.5.4.5 Fusión selectiva por láser (SLM).....	21
1.5.4.6 Fusión por haz electrónico (EBM).....	22

1.5.4.7	Fabricación de objetos laminados (LOM)	23
1.5.5	Proceso de impresión 3D	23
1.5.6	Impresión 3D FDM	24
1.5.6.1	Errores de impresión	25
1.5.6.2	Estructuras soporte	25
1.5.6.3	Relleno del modelo	26
1.5.6.4	Ventajas de usar la impresión FDM	26
2	METODOLOGÍA	28
2.1	Fase experimental de patrones funcionales en sujetos sanos	28
2.1.1	Protocolo experimental (sistema de fotogrametría kinescan 200 fps, sensor de fuerza)	29
2.2	Análisis de materiales	29
2.3	Fase experimental de construcción del prototipo	32
2.4	Impresión 3D	32
2.5	Configuración y errores en la impresión 3D (FDM)	33
2.5.1	Temperatura de boquilla y de la cama de impresión	33
2.5.2	Altura de capa	33
2.5.3	Espesor de pared	33
2.5.4	Porcentaje de relleno	33
2.5.5	Velocidad de impresión	34
2.5.6	Retracción	34
2.5.7	Estructura de apoyo	35
2.5.8	Patrón de soporte	35
2.5.9	Balsa	35
2.5.10	Orientación de impresión	35
2.6	Inicio y final GCode	36
2.7	Selección del material en el Software	37
2.8	Posicionamiento elementos Software Ultimaker Cura	39
2.9	Ensamble	40
3.1	RESULTADOS	42
3.1.1	Impresión 3D(FDM)	42
3.1.2	Ejercicio patrones funcionales en personas sanas	43
3.2	CONCLUSIONES	47
3.3	RECOMENDACIONES	47
4	REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS	48
5	ANEXOS	51
5.1	ANEXO I. PROTOCOLO DE ANÁLISIS CINEMÁTICO DEL MOVIMIENTO DE FLEXO-	

EXTENSIÓN BRAZO.....51

RESUMEN

La mano puede afectarse por lesiones en el sistema nervioso periférico y o patologías traumatológicas causadas en distintas áreas donde está inmerso el ser humano, la rehabilitación a la que el ser humano procede permite recuperar la funcionalidad afectada por los métodos establecidos por el especialista, para ellos se requiere la ayuda de un exo-esqueleto o también llamada ortesis, la misma que será utilizada por el paciente.

En el ámbito tecnológico existen diferentes métodos para la fabricación de una ortesis, la misma que es diseñada por especialistas, teniendo como contra el método de fabricación de esta por la razón del detalle o forma de elemento.

En la actualidad existen tecnologías dedicadas a la fabricación aditiva como son, SLA, SLS, FDM, LOM, DLP que serían capaces de realizar este tipo de trabajos, de acuerdo con el avance actual en la tecnología FDM es la más adecuada para la realización de esto, ya que su estudio ha incrementado en estos años ya sea en la actualización continua de impresoras 3D o la creación de filamentos aptos para ser utilizados en distintas aplicaciones ingenieriles.

De acuerdo con la selección de características de impresión y material, se procederá a la impresión total de una ortesis de mano para después realizar un ensamble de esta con elementos de sujeción metálicos, y con la ayuda de datos tomados de características antropométricas, ser capaces de usar esta ortesis la mayoría de las personas adultas.

PALABRAS CLAVE: rehabilitación, exo-esqueleto, fabricación aditiva, filamento.

ABSTRACT

The hand can be affected by lesions in the peripheral nervous system or traumatological pathologies caused in different areas in which the human being is immersed, the rehabilitation to which the human being proceeds allows to recover the functionality affected by the methods established by the specialist, for them it requires the help of an exoskeleton or also called an orthosis, the same one that will be used by the patient.

In the technological field there are different methods for the manufacture of an orthosis, the same one that is designed by specialists, having as a contrast the method of manufacturing it for the reason of the detail or shape of the element.

Currently there are technologies dedicated to additive manufacturing such as SLA, SLS, FDM, LOM, DLP that would be able to carry out this type of work, according to current advances in technology FDM is the most appropriate to do this, since its study has increased in these years either in the continuous updating of 3D printers or in the creation of filaments suitable for use in different engineering applications.

According to the selection of printing and material characteristics, a total printing of a hand orthosis will be made to later assemble it with metallic fastening elements, and with the help of data taken from anthropometric characteristics, the orthosis can be used by most adult people.

KEYWORDS: rehabilitation, exoskeleton, additive manufacturing, filament.

1 DESCRIPCIÓN DEL COMPONENTE DESARROLLADO

El componente busca establecer un movimiento de brazo para ser analizado, se realizará la construcción del exo-esqueleto de mano, utilizando una impresión 3D, previo a la investigación y selección de materiales, así como también el levantamiento del estudio del estado del arte de tecnologías fabricadas para poder relacionarlas en el proceso de fabricación de una ortesis.

Para permitirnos realizar lo mencionado anteriormente se han realizado dos fases.

Primera fase: “Levantamiento de información” se obtiene de información acerca de exoesqueletos de mano, impresión aditiva, componentes, material de trabajo, características de los tipos de tecnologías fabricadas en la actualidad.

Segunda fase: La segunda fase se enfoca en dos etapas, la primera etapa establecer patrones funcionales asociados a la pérdida funcional del agarre de la mano y la segunda etapa se enfoca en la construcción de un prototipo para rehabilitación del agarre de la mano.

Primera etapa: “Establecer un movimiento” Identificar movimientos críticos asociados a las patologías del agarre de la mano, donde se establece un movimiento del (brazo-antebrazo-muñeca) asociados a la pérdida funcional del agarre de la mano, para el cual se determina variables cinemáticas y fuerza de agarre que nos permiten establecer los patrones funcionales en sujetos sanos que servirán en contraste para los sujetos patológicos.

Segunda etapa: Construcción de un prototipo para rehabilitación del agarre de la mano

Selección de materiales: Conforman la utilización del software CES Edupack 2010, el cual de acuerdo con el levantamiento de información del tipo de materiales disponibles para ser utilizados en impresión 3D (FDM), se obtienen datos característicos de estos materiales para dar solución a la elección del filamento óptimo para la fabricación del exo-esqueleto de mano.

Impresión 3D: Mediante el método de fabricación aditiva esta etapa comprende el estudio de características de impresión 3D como son temperaturas de cama y extrusor, nivelación de cama, colocación del material, posicionamiento del elemento, generación de soportes.

Ensamble: Se establece un procedimiento para la unión de los elementos de la ortesis, así como la obtención de los elementos de sujeción de estas.

Análisis de resultados: Aquí se enfoca en la realización de un protocolo de fabricación de la ortesis mediante el sistema de impresión 3D, así como también la interpretación de las gráficas obtenidas de fuerza y velocidad de agarre.

1.1 Objetivo general

Analizar los patrones funcionales e impresión 3D (FDM) de un prototipo exo-esqueleto de la mano.

1.2 Objetivos específicos

1. Levantar un estudio del estado del arte de las tecnologías fabricadas que utilizan el método de fabricación aditiva en aplicaciones de rehabilitación de la mano.
2. Análisis de movilidad y fuerza de empuñamiento en voluntarios sanos, sin el exoesqueleto para determinar patrones de funcionalidad.
3. Analizar las características de materiales (filamentos) que existen en el mercado y permiten la utilización de la tecnología FDM.
4. Fabricar y ensamblar el exo-esqueleto de la mano con la utilización de una impresora 3D con sus respectivas especificaciones.

1.3 Alcance

El análisis de los patrones funcionales de un prototipo exo-esqueleto se enfoca al análisis del movimiento del brazo de personas sanas que servirán a futuro para comparar con personas patológicas

Estudiar tecnologías de fabricación aditiva para proceder a seleccionar el material adecuado por medio de la utilización del software CES Edupack 2010 en la obtención de las características adecuadas de los materiales (filamentos) para la selección y que esté disponible en el mercado e impresora 3D.

Realizar la impresión 3D(FDM) mediante una impresora Ender 3 Pro, tomando en cuentas los detalles externos de impresión como son temperatura de cama, extrusor, alineamiento de cama e internos como son la creación de soportes, tipo de impresión (horizontal, vertical), selección de material con sus características de impresión, velocidad de impresión, velocidad de enfriamiento, alto de capa, todo esto para poder obtener una impresión 3D optima y acorde al diseño establecido.

Ensamblar los elementos Impresos en 3D como se establece en el diseño, partiendo de la obtención de uniones para el ensamble.

Realizar un esquema de metodología para el procedimiento de impresión en 3D (FDM) y analizar las gráficas de los patrones funcionales entregadas al realizar el movimiento del brazo.

1.4 Marco teórico

Este trabajo de integración curricular tiene como propósito el estudio de movimiento de los dedos de la mano (pulgar, índice, meñique) mediante el uso de sensores de movimiento logrando obtener datos en tiempo real para ser analizados al ser emulado.

El estudio tecnológico por parte del ser humano ha sido inmerso en varios campos laborales, en el campo medico se desarrollan herramientas que facilitan o mejoran la calidad de vida de los humanos mediante la creación de ortesis o exo-esqueletos, un exo-esqueleto se basa en una estructura que puede ser utilizada como parte del diario vivir del paciente con el fin de dar apoyo o soporte a distintas variables que se requieran, es decir que podrá ser utilizada como una prenda de vestir permitiendo mejorar o aumentar las capacidades del paciente.[1]

1.4.1 Discapacidad en el Ecuador

La discapacidad obtenida en la mano cada vez es más representativa como un problema social, yendo en aumento a causa de la no rehabilitación del paciente o la no disponibilidad de ortesis propias, para ello, el Consejo Nacional para la igualdad de Discapacidades (CONADIS) presenta una estadística en el 2021, en el Ecuador existe un total de 470820 personas con discapacidad, teniendo en cuenta que 215125 de este conteo esta registrado como Discapacidad Física, de este valor según el CONADIS, afirma que el existe un porcentaje alto de Discapacidad física en personas jóvenes que por ende se requerirá algún método de tratamiento para su discapacidad, terminando como un valor costoso de la rehabilitación tanto por parte del estado como de la persona, asimismo de la perdida de años de vida productiva aumente. [2]

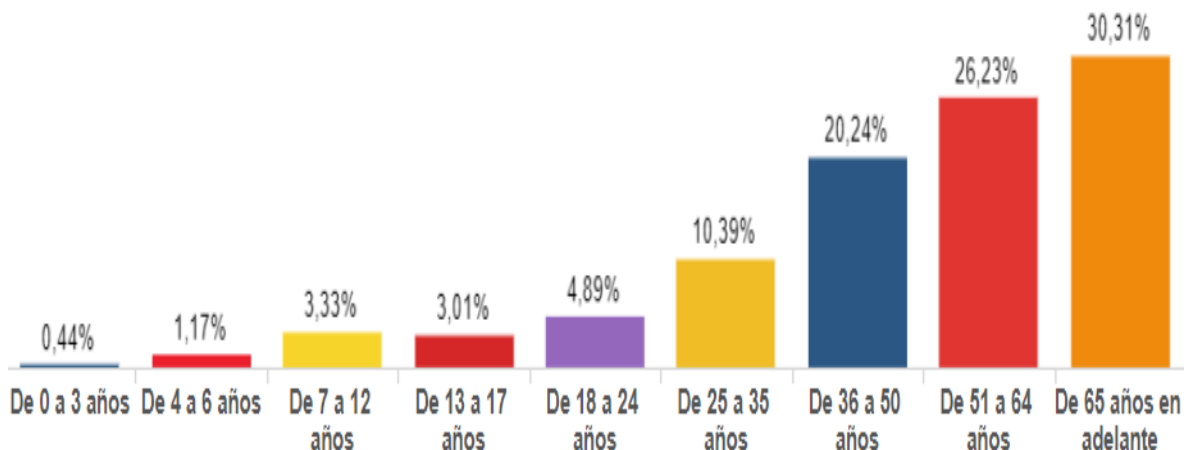


Figura 1. Grupos etarios, discapacidad física. Elaborado por: Consejo Nacional para la Igualdad de Discapacidades-CONADIS. Fuente [2]

1.4.2 El exo-esqueleto

Tecnológicamente se presentan dos tipos de exo-esqueletos, activos y pasivos en donde su característica fundamental se basa en el control de actuadores para su funcionamiento, en el campo de la medicina se han propuesto alternativas para la obtención de resultados, así como son variantes de materiales en su fabricación, toma de datos mediante el censado para de esta manera permitir una toma de decisiones antes y después de un estudio , teniendo en cuenta que la elección de los distintos elementos electrónicos empleados presenten resultados apropiados en cada proceso realizado. [1]

Según Gómez, Moreno, Gil, Becerra & Orozco (2016) *“la incapacidad de la mano es un inconveniente social, que ha aumentado al pasar del tiempo siendo la principal causa de los eventos traumáticos, con ello la administración de salud”* y la seguridad Ocupacional Norteamericana (OSHA), en (Sirit, Fernández & Lubo, 2002) *“afirma que el 90% de acontecimientos traumáticos son de carácter laboral y que de rededor de los 2 millones de trabajadores que resultan con incapacidad cada año alrededor de 400000 accidentes pertenecen a lesiones de los dedos o de la mano en su totalidad”*. [3]

Al conocer las distintas funciones y utilidades que permite obtener un exo-esqueleto se es posible concretar que se genera un campo amplio de estudio por parte del ser humano en cuanto a dar soluciones a problemas traumáticos o del sistema nervioso que lleven como afección la mano, para todo esto se presentan aplicaciones y beneficios en donde se es primordial un estudio a detalle.

- Reducción de la carga laboral al personal médico (terapeutas), para poder manejar a más pacientes en menos tiempo.
- Incorporación en el ámbito laboral de personas que están activas, generando un enfoque de confianza de la persona a no ser dada en para.
- Mejorar la calidad de vida de la persona afectada al dar solución de movilidad de sus manos para no estar dependientes de cuidado externo[4].

De acuerdo con los resultados obtenidos en [4], se obtienen características antropométricas generalizadas que serán promediadas para la fabricación de la ortesis y de esta manera no exista variación significativa entre pacientes, permitiendo realizar una adecuada regulación del exo-esqueleto sin que presente alteraciones o movimientos involuntarios, permitiendo un beneficio equitativo entre pacientes y sea optima su rehabilitación.

1.4.3 Patrones funcionales (movimiento del brazo-antebrazo-mano)

Los esguinces y fracturas en la parte superior del cuerpo humano relacionados con el (codo-mano-muñeca) están detectados por parte de la traumatología, pero esto posee complejidad de acuerdo con las variantes en movilidad de las articulaciones lo que afectara en el tiempo de recuperación del paciente y secuelas a futuro.

Por lo general los esguinces, accidentes de muñeca y fracturas del extremo inferior del radio son estables y no presentan mejor solución que con la colocación de férulas de protección, teniendo en cuenta que la mayoría de estas anomalías son a causa de caídas, para el caso de existir fracturas en donde es de requerimiento un tratamiento quirúrgico se procederá a la colocación de una ortesis estática para su recuperación, esto se presentara al tener fracturas de radio distal, cuando la muñeca presenta movimiento de dorsiflexión y al tener la mano extendida.

En la toma de decisiones se presenta por parte del terapeuta de la mano, el cual junto con demás profesionales de la salud se garantiza una rehabilitación coordinada, para permitir a los pacientes incorporarse de manera precoz a sus rutinas diarias en el ámbito laboral, casa, exteriores, etc.

El objeto de estudio se presenta como la identificación de los patrones funcionales de movimiento, siendo de soporte la evaluación de intensidad del dolor del paciente y los arcos de movilidad con la ayuda de las escalas DASH (valoración de la extremidad superior, hombro-codo y mano) y EVA (valoración del dolor), todos los movimientos terapéuticos aquí realizados son supervisados por medio de softwares de toma de datos con la utilización de ortesis electrónicas en la mano y muñeca.

1.4.4 Tipos de ortesis

El uso de las ortesis y exo-esqueletos han sido estudiadas en su mayoría para el ser humano, al ser este llamado como un esqueleto exterior, no es parte del cuerpo humano, sino más bien cumple las características de proteger y apoyar el sistema locomotor esto mediante la sujeción, estabilización, alineación o en su bien corrección, tanto las ortesis como exo-esqueletos pueden ser utilizadas y diseñadas de acuerdo al área donde sean necesarias su utilización, para lo cual se han establecido tres grupos: [5]

- Ortesis para miembros superiores.
- Ortesis para miembros inferiores.
- Ortesis para columna vertebral.
-

Según las recomendaciones médicas se podrá o no inmovilizar total o parcialmente la zona corporal, para esto se establecen dos tipos de ortesis: estáticas y dinámicas:

1.4.4.1 Ortesis estáticas

Se basan en dar una postura fija es decir sin movimiento del área a estudiar, mayormente utilizado en fracturas, tendones inflamados o nervios.



Figura 2. Ortesis estática para la mano (Pulgar). Fuente: [28]

1.4.4.2 Ortesis dinámicas

A diferencia de las anteriores, estas permiten realizar movimiento ayudando al movimiento de músculos mediante rehabilitación asignada de acuerdo con el especialista.[4]

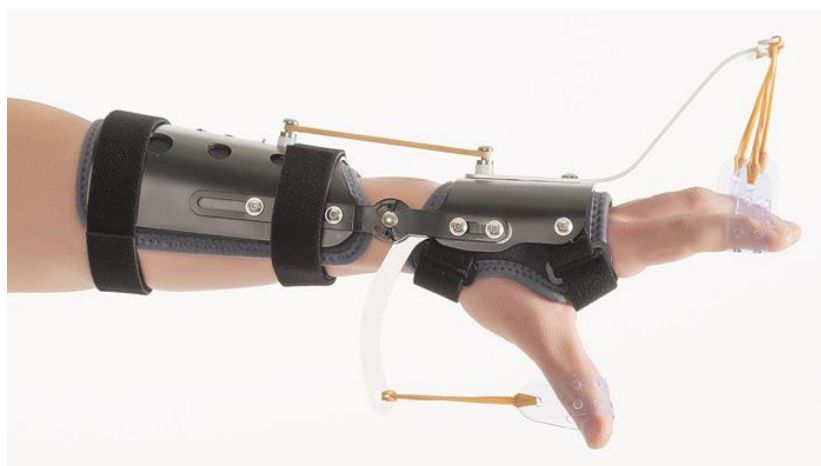


Figura 3. Ortesis dinámica para la mano. Fuente: SANICOR

En el ámbito de selección de materiales, los exo-esqueletos están fabricados con materiales rígidos, livianos después de esto para poder ser ensamblados por medio de tornillos, correas, varillas, de acuerdo con el diseño y funcionalidad, esto dependiendo de los grados de libertad (GLD) que posea el diseño asistiendo dinámicamente, al igual que facilita características antropométricas del paciente en ámbitos de regulación del equipo. [6]

Pheasant & Haslegrave (2015) Consideran que no sería coherente realizar un producto para una sola persona en común, ya que las características antropométricas de cada persona no son semejantes para ello se diseña para un rango de tamaños para de esta manera sea regulable a los requerimientos del paciente sin que se presenten alteraciones, presentando el máximo beneficio posible.

1.4.5 Estructura de funcionamiento

Dentro de la fabricación de los exo-esqueletos se presentan dos grupos: activos y pasivos.

1.4.5.1 Exo-esqueletos pasivos

Son diseñados para ser aplicados mediante componentes mecánicos, en donde no poseen accionamientos para su funcionamiento, sino que receptan la energía proveniente de apoyos o del suelo para poder funcionar.

1.4.5.2 Exo-esqueletos activos

Utilizan elementos de accionamiento activo que permitirán reducir la fuerza y carga, para esto, se utilizan preferiblemente reductores armónicos de estructura corta, como ejemplo las series CSD y SHD de Harmonic Drive AG, estos combinados con motores eléctricos y sensores, ambos grupos son utilizados de acuerdo a las necesidades requeridas ya que poseen ventajas y desventajas, las ventajas de un activo, no se requieren fuerzas externas para su funcionamiento a diferencia de un pasivo que requiere un apoyo para poder continuar en funcionamiento, los exo-esqueletos activos son más pesados ya que al requerir una fuente de energía, elementos eléctricos, electrónicos, etc. se generan masa extra, teniendo como desventaja utilización limitada de estos, cabe tener en cuenta que las ventajas y desventajas que se presentan en cada uno de estos productos serán determinados de acorde a la necesidad del paciente en este caso.[8]

En el mercado podemos encontrar varias empresas dedicadas a la fabricación de exo-esqueletos de acuerdo con su aplicación, describiendo las siguientes:

Armeo Spring y Manovo Spring Hand Module:

Este tipo de exoesqueleto permite principalmente a la recuperación del movimiento activo del brazo y mano del paciente, este modelo ergonómico permite un movimiento por parte de mecanismo y por iniciativa propia del paciente, posee un sistema de registro para de esta manera poder realizar evaluaciones y por ende un mejor análisis.

Este modelo fue diseñado para la movilidad en diferentes grados de libertad y permitir un agarre en pacientes que poseen desordenes neurológicos. [9]



Figura 4. Sistema de rehabilitación brazo (Armeo Spring y Manovo Spring Hand Module).

Fuente: Hocoma

Armeo Spring Pediatric

Este modelo posee características de masa del equipo y por esta razón está adaptado para niños de entre 4 y 12 años, al igual que el mencionado anteriormente está diseñado y adaptado para pacientes que presentan disfunciones del movimiento de sus manos y brazos a causa de enfermedades neurológicas. [10]



Figura 5. Sistema de rehabilitación brazo Niños (Armeo Spring Pediatric). Fuente: Hocoma

1.5 Estado del arte

En este apartado se presentan diferentes casos que comprenden diseño, fabricación o análisis de proyectos realizados en distintas partes del mundo, aquí se pueden presentar dos grupos para un adecuado análisis, tecnológico y técnico, el primero conlleva los avances de comercio de las ortesis y exo-esqueletos para utilizarlos en rehabilitación y terapia física de mano, y tecnológico que se presenta en artículos, investigación que contienen información para la realización del proyecto.



1.5.1 Análisis Tecnológico



El avance de la robótica ha permitido crear dispositivos capaces de realizar asistencias en terapias en general.

La gran ventaja que ofrecen los sistemas robotizados es su capacidad de ayudar a realizar terapias simples, repetitivas e intensivas, incluso sin la presencia física del terapeuta. Algunos de los esfuerzos actuales se encaminan a crear dispositivos portátiles que puedan usarse en casa y en las actividades diarias. (Destarac Eguizabal, 2018)

Tabla 1: Dispositivos utilizados en terapias que son comercializados en el mercado mundial.

Fuente: [20]

Producto	Descripción	Imagen	Fabricante
Hand of Hope	Sistema de rehabilitación de mano robotizado, permitiendo el reaprendizaje y facilitando la reeducación muscular detectando y amplificando el movimiento.		Rehab-Robotics
ManovoSpring	Configuración para ordenar Equipo tridimensional que abarca la mano y brazo		Hocoma



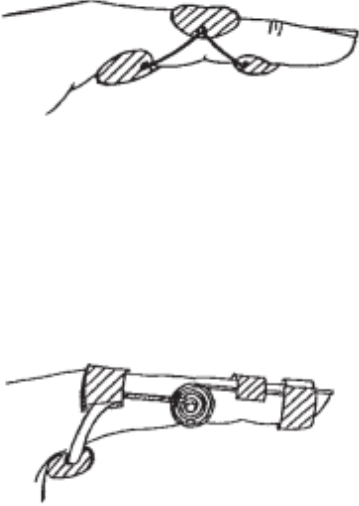
	del paciente, asegurando el trabajo completo de la parte superior.		
Sifrehab-1.0	Sistema de mano pediátrico y adulto y robotizado que es capaz de detectar los movimientos de esta para impulsarlo para poder realizar el trabajo en su mayoría.		Sifsof
Sinfonia	Dispositivo configurado para ordenar, siendo uno de los más avanzados en el mercado para rehabilitación de mano, capaz de detectar movimientos de los dedos y movilizarlos.		Gloreha


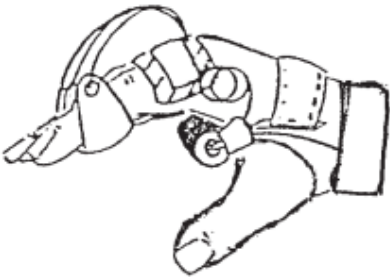
ManovoPower	<p>Robotizado. Módulo para mano que permite a pacientes que presentan complicaciones graves lograr abrir y cerrar la mano</p>		Hocoma
Anika Kids	<p>Sistema pediátrico capaz de monitorear la ubicación y movimiento de los dedos del niño para mediante un software que proceder a la simulación de la terapia.</p>		Zarya

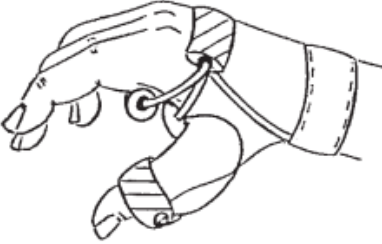
1.5.2 Análisis Técnico

Aquí se presentan alcances y procesos técnicos estudiados y evaluados acerca de mecanismos utilizados en los dispositivos presentados en el aspecto tecnológico, de igual manera de artículos, investigaciones, tesis que existen para solucionar diferentes problemas técnicos.

Tabla 2. estudios técnicos y evaluaciones de mecanismos. Fuente: [21]

Producto	Descripción	Indicaciones	Código Homologado
Férula pasiva para dedo pulgar	Consiste en un material rígido tipo guante que deja libres las articulaciones metacarpofalángicas, procediendo a impedir la movilidad del pulgar.		060603000
Férula activa para dedo pulgar	Basada en una ortesis dinámica con un soporte para el dedo pulgar y el otro para que se logre un apoyo en la palma de la mano. Permite realizar movimientos del pulgar abduciendo y extendiendo este.		060603100
Férula activa extensora para dedo	Ortesis dinámica provista de tres soportes en donde el mecanismo se acción se basa en la fuerza de tensión que produce el resorte para lo cual se generan tres puntos de apoyo, logrando la		060603110

	extensión de la articulación.		
Férula activa extensora de articulaciones metacarpofalángicas	Ortesis dinámica. 3 apoyos, los soportes de la palma están unidos al soporte dorsal mediante un material metálico en donde se proporciona una fuerza constante en los tres puntos de la férula para permitir aumentar la extensión de las articulaciones metacarpofalángicas.		06606100
Férula activa flexora de articulaciones metacarpofalángicas y aditamento extensor de dedos.	Se procede a controlar la capacidad de flexión, así como aumentarla mediante los 3 apoyos, facilitando la flexión de las articulaciones metacarpofalángicas combinando con la extensión de los dedos del paciente.		060606120

Férula activa extensora de articulaciones metacarpofalángicas y aditamento extensor/abductor de pulgar.	Ortesis dinámica, que es capaz de facilitar la extensión de las articulaciones metacarpofalángicas junto con la movilidad del pulgar.		060606130
---	---	--	-----------

1.5.3 Fabricación aditiva

Additive Manufacturing (AM)

Consiste principalmente en el empleo de un material a una escala micrométrica para de cierto método ser capaz de depositarlo en un lugar preciso y poder crear un sólido, al existir varios métodos que sean capaces de realizar un sólido la (AM) se encuentra en uno de los procesos utilizados en la actualidad ya que permite la obtención de sólidos que su fabricación es difícil.[13]

Por esta razón por medio de la utilización de la deposición controlada del material paso a paso es a su vez otra variante a los procesos realizados, como son por medio del mecanizado, troquelado, etc. en donde existe un desprendimiento de viruta y como también en la utilización de utilajes o moldes para la realización de fundiciones, inyecciones para lo cual existirá una pérdida de material significativa a diferencia de la (AM).

Al relacionar todas estas nuevas características a favor de la (AM) se es capaz de introducirse en la fabricación de elementos en diferentes campos como son, aeroespacial, medicina, arquitectura, joyería, educación, moldeo, etc. [13]



Figura 6. fabricación sustractiva comparando con Manufactura aditiva. Fuente:[14]

Como se puede observar en la figura 6, el elemento (a) es el sólido deseado, por ende, el (b) de sustracción se requerirá a un molde o elemento exterior para poder retirar el material sobrante, y el elemento (c) se puede observar de una mejor manera el método de adición por capas, en el cual no se presenta material extra o innecesario.

Para todo lo mencionado en la figura se observan dos características de fabricación, la una el tamaño del sólido y la segunda su forma interna y externa en la cual con un proceso de mecanizado resultaría casi imposible realizarlo o demasiado caro.



Figura 7. Tamaño y geometría de un elemento sólido realizado por medio de impresión 3D.

Fuente:[14]

1.5.4 Tipos de operaciones de fabricación aditiva

Según Sabrie Soloman [22], a finales del año 197 se inició con la creación de impresoras 3D, estas inicialmente eran grandes, robustas, limitadas y lógicamente costosas, para esta época se conocen varios procesos aditivos, diferenciándose principalmente una de otra en la técnica con la cual se depositan las capas para la fabricación de elementos, así como también los materiales que se utilizaran en el proceso (un método derrite o suaviza el material que será depósito por capas).

Cabe recalcar que todo método tiene sus ventajas y desventajas ya que algunos fabricantes de impresoras 3D nos permiten elegir entre el polvo y polímero como material que será realizado el elemento, los parámetros considerados al momento de seleccionar una máquina de impresión 3D son:

- Velocidad de impresión.
- Costo de objeto impreso.
- Costo de material escogido (disponibilidad).
- Costo de tiempo de impresión. [22]

Desde la creación de máquinas 3D, se han producido varios procesos de fabricación aditiva que a cierto punto causan distorsión por parte del ser humano, para esto se presentan las distintas categorías según la tecnología que utilizan.

1.5.4.1 Estereolitografía (SLA)

Considerada como el origen de impresión 3D (1984).

Método que utiliza el principio de fotopolimerización para la creación del modelo en 3D en donde mediante un láser se procede a solidificar el material capa por capa, con la utilización de resinas (líquidas) que son sensibles a los rayos UV.

En el mercado existen gran variedad de modelos que realizan el método SLA, para lo cual se presentan los siguientes modelos y características:

Tabla 3. Características de Maquinas con tecnología SLA en el mercado. Fuente: 3Dnatives

Maquina	Características	Precio
	Fabricante: Longer 3D Máquina de escritorio. Volumen de impresión: 120*68*170 mm 5 resinas de colores diferentes.	215 euros
ProJet 6000 HD, la mejor impresora SLA de 3D System	Fabricante: ProJet 6000HD Máxima calidad y precisión de la pieza terminada. Volumen producto: 215*250*250 mm Espesor mínimo: 50 micrómetros Amplia gama de resinas.	100000 – 250000 euros



Figura 8. Elementos creados con tecnología de estereolitografía. Fuente: 3Dnatives

1.5.4.2 Procesamiento digital de luz (DLP)

El proceso DLP posee similitudes al proceso SLA en que estas dos exponen fotopolímeros líquidos a una fuente de luz, al igual que cada proceso consta con un reservorio de resina que ambos permiten una fabricación de elementos pequeños que poseen detalles precisos.

Este proceso se basa en la tecnología de proyección de imágenes en donde utiliza un proyector como fuente de luz [22], como característica de esta tecnología se basa en la curación o secado del espesor de la capa de fotopolímero que la realiza con luz ultravioleta después de que este haya sido roseado. [22]

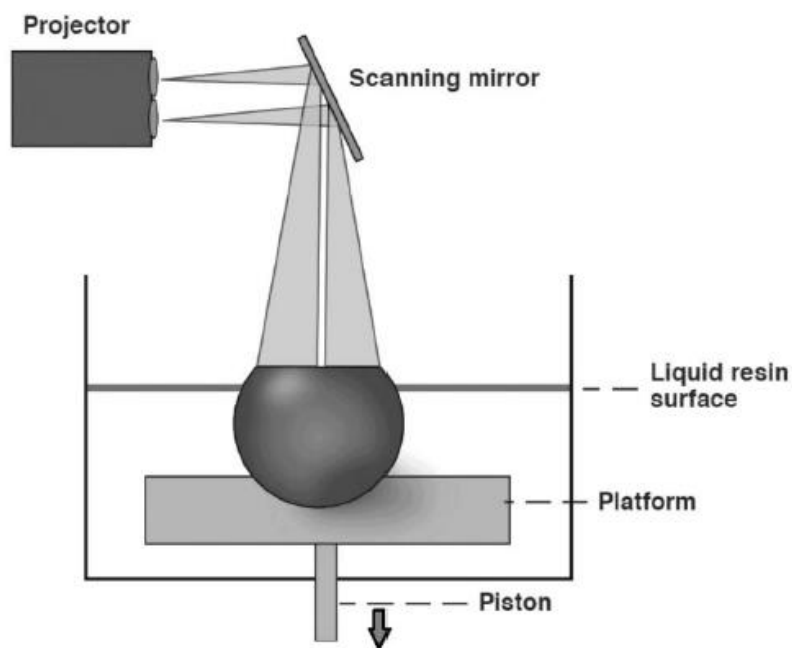



Figura 9. Proceso DLP, tanque de polímero expuesto continuamente a luz laser. [22]

Dentro de esta tecnología, se presenta variedad un poco más reducida a la SLA, dentro de las cuales podemos mencionar las siguientes:

Tabla 4. Características de Maquinas con tecnología DLP en el mercado. Fuente: ComprarImpresoras-3D.com

Máquina	Características	Precio
<p>Anycubic</p> 	<p>Impresora 3D 4K</p> <p>Mejora en la estabilidad con la ayuda de dos ejes Z.</p> <p>Fácil operación por medio de pantalla táctil.</p> <p>Secado rápido con el uso de luz ultravioleta, dando un resultado preciso de impresión.</p> <p>Impresión silenciosa con filtrado de aire.</p>	<p>699 euros</p>
<p>Solidator 2</p>	<p>Impresora 3D DLP</p> <p>Realiza impresiones de mayor dimensión (336*210*210) mm.</p>	<p>10115 euros</p>

	<p>Fácil impresión de modelos muy pequeños en una sola impresión, siendo capaz de realizar pequeñas producciones en serie.</p> <p>Ayuda de transferencia mediante WiFi.</p>	
---	---	--

1.5.4.3 Modelado por deposición fundida (FDM)

Modelo comercializado alrededor de 1990, tecnología en la cual el elemento se fabrica al extruir gotas del material que es endurecido rápidamente para ser depositado por capas, esto por medio del control por parte de servomotores y dispositivos electromecánicos comandados por un paquete de software (CAM), para esta tecnología es necesaria la utilización de soportes en el diseño e impresión de la pieza ya que podría resultar una defectuosa o errónea impresión si esto no se lo genera.



Figura 10. Mesa de impresión Zortrax M200, impresión con soportes. Fuente: 3DNatives

Para esta tecnología se han fabricado varios polímeros dentro de los cuales [22] menciona al acrilonitrilo butadeno estireno (ABS), policarbonato (PC), polietileno de alta densidad (HDPE), etc. todos ellos prefabricados de acuerdo con el diámetro deseado de filamento.

Tabla 5. Características de Maquinas con tecnología FDM en el mercado. Fuente: TAICED

Máquina	Características	Precio
<p data-bbox="432 320 576 349">Ender 3V2</p> 	<p data-bbox="775 320 1137 398">Impresión 3D., tecnología FDM.</p> <p data-bbox="775 421 1137 555">Fácil adaptabilidad, bajo precio, diseño, desempeño.</p> <p data-bbox="775 566 1137 656">Se entrega 100% ensamblada, probada.</p> <p data-bbox="775 678 1137 757">Dimensiones de impresión: 475*470*620 mm.</p> <p data-bbox="775 768 1137 857">Peso estimado de 7.8 kilogramos.</p>	<p data-bbox="1163 320 1230 349">\$480</p>
<p data-bbox="260 931 443 960">Prusa MK3S+</p> 	<p data-bbox="775 931 1137 1010">Dimensiones de impresión 500*550*400 mm.</p> <p data-bbox="775 1021 1137 1111">Peso estimado: 7 kilogramos.</p> <p data-bbox="775 1122 1137 1211">Temperatura máxima cabezal: 300°C.</p> <p data-bbox="775 1223 1137 1312">Temperatura máxima de cama: 120°C.</p>	<p data-bbox="1163 931 1246 960">\$1500</p>

1.5.4.4 Sinterización selectiva por láser (SLS)

Tecnología desarrollada en la década de 1980, no utiliza sinterización para la fusión de gránulos de polvo [22], sino más bien, a través de un láser es capaz de derretir el polvo para permitir fabricar diseños de alta densidad por medio de la técnica de construcción por capas, teniendo como resultado un elemento con propiedades mecánicas similares a los metales convencionalmente manufacturados, en esta tecnología no se requerirá la utilización de soportes a diferencia de otras tecnologías como la FDM , ya que el diseño está constantemente rodeado de polvo de soporte.

Como se muestra en la figura 11, como primer paso se procede a calentar el área donde será fabricada la pieza a una temperatura menos de la temperatura de fusión del polvo, para después

en el paso 2, ser descargado el polvo (primera capa), para el proceso 3 se procede a realizar un escáner con la ayuda de un láser de CO2 se realiza la fusión de acuerdo al diseño pre ingresado al sistema, permitiendo realizar la primera capa, luego de esto la mesa de trabajo bajara para continuar con las siguientes capas hasta que la pieza este realizada.

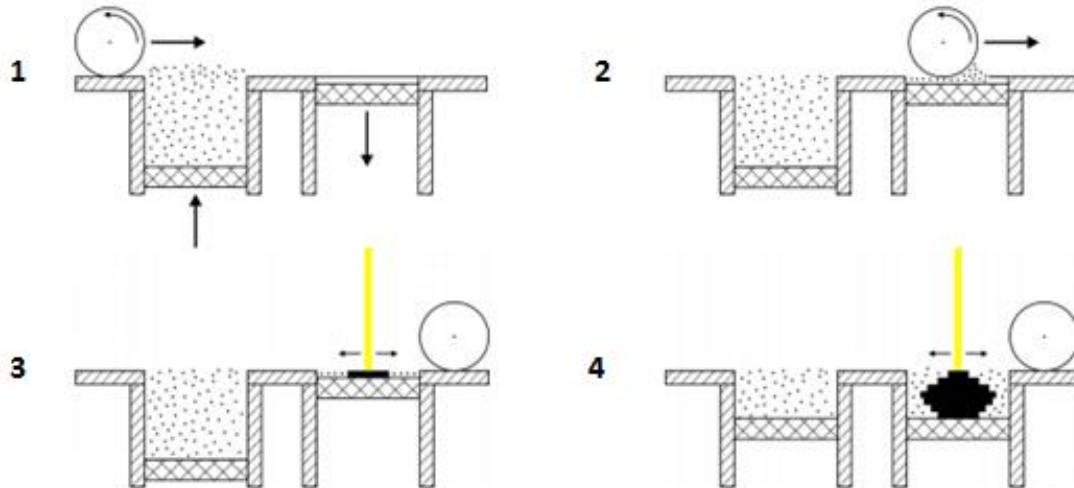


Figura 11. Funcionamiento del sinterizado selectivo por láser (SLS). Fuente: [23]

1.5.4.5 Fusión selectiva por láser (SLM)

Esta técnica utiliza un rayo láser de alta potencia para poder ser capaz de fusionar y derretir polvos metálicos, esto por medio de un archivo CAD 3D que es realizado como principio para formar la pieza, esta tecnología se establece como parte de la SLS, a diferencia que en el proceso SLM se procede a fundir completamente el polvo de metal en una pieza solida en 3D. [22]

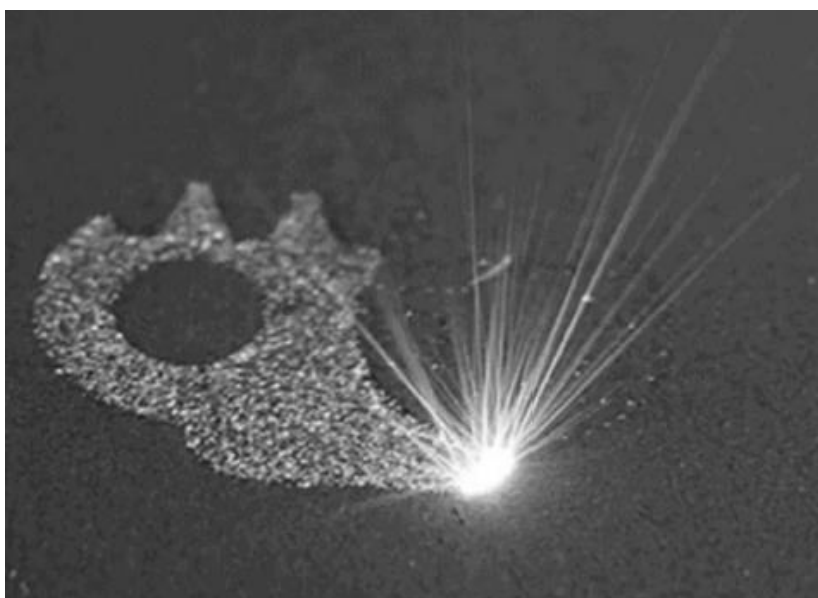


Figura 12. Impresión tecnología SLM en funcionamiento. Fuente: [22].

Como se observa en la figura 13, esta tecnología se asemeja a las demás en la utilización del láser, manejando de distinta manera las variantes de temperatura ya que al requerir que el polvo se funda completamente se requerirá una mayor temperatura de trabajo, así como también la utilización de gas inerte para poder mantener las condiciones necesarias en el proceso de fabricación y variaciones de enfriamiento por razones antes mencionadas.

Este proceso es capaz de realizar piezas con gran precisión, razón por la cual es mayormente utilizado en la industria aeroespacial en la fabricación de turbinas de gas. [24]

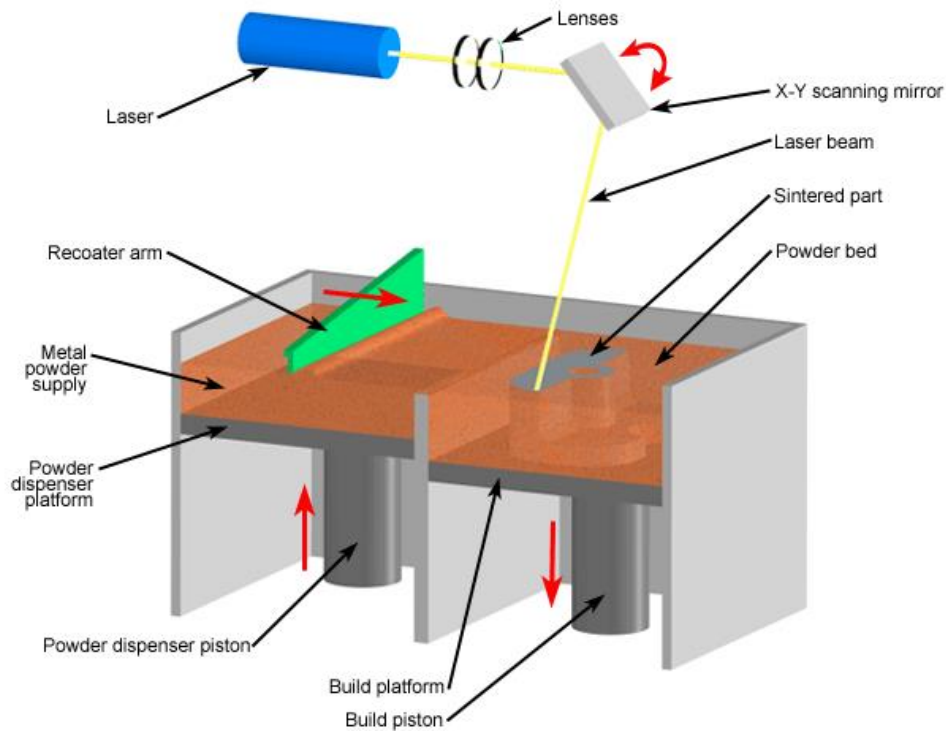


Figura 13. Funcionamiento de la fusión selectiva por láser (SLM). Fuente [24]

1.5.4.6 Fusión por haz electrónico (EBM)

Método utilizado principalmente para crear piezas sólidas, sin huecos metálicas, dando características de alta resistencia como por ejemplo aleaciones de titanio, por medio de la utilización de un haz de electrones en alto vacío para crear elementos al fundir polvo metálico capa por capa, proceso semejante a la tecnología SLM, a diferencia del haz que estas manejan, siendo en EBM haz de electrones y SLM has laser de alta potencia, la temperatura de fusión del polvo metálico que trabaja con la tecnología EMB puede llegar a alcanzar los 1000°C.

En la actualidad este tipo de tecnología no es muy utilizada por su elevado costo, tiempo de fabricación, limitación de soporte de material, por ende, esta tecnología se encuentra establecida principalmente en el área médica e implantes aeroespaciales [22].

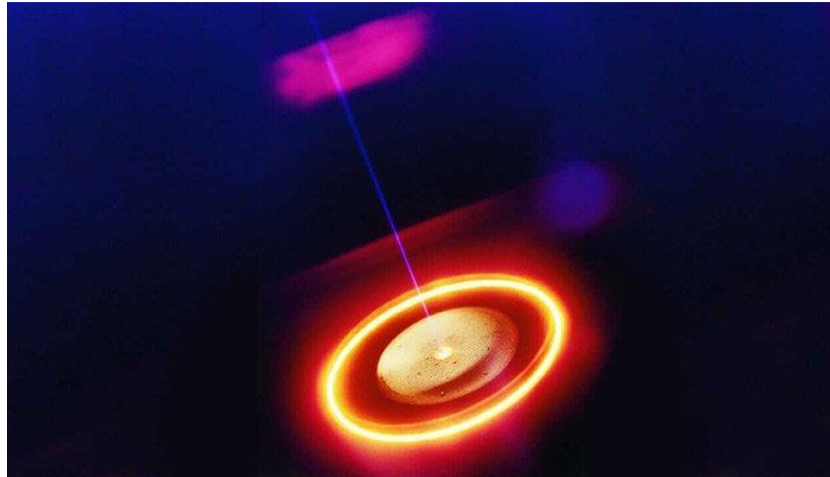


Figura 14. Tecnología EBM, utilización haz de electrones. Créditos: Arcam

1.5.4.7 Fabricación de objetos laminados (LOM)

Tecnología característica en la cual el plástico, capas de papel revestido con adhesivo, o laminados metálicos se fusionan por medio del calor y presión para después ser cortado de acuerdo con la forma requerida mediante un láser, en este proceso se podrá requerir de siguientes mecanizados o perforaciones.

Como aspecto negativo es el desperdicio de material que esta tecnología presenta, llegando a un 90% del total, como aspecto positivo es su materia prima que puede ser desde papel (papel Kraft con un polietileno termoestable por su disponibilidad y rentabilidad), disminuyendo este con coste significativamente. [22].

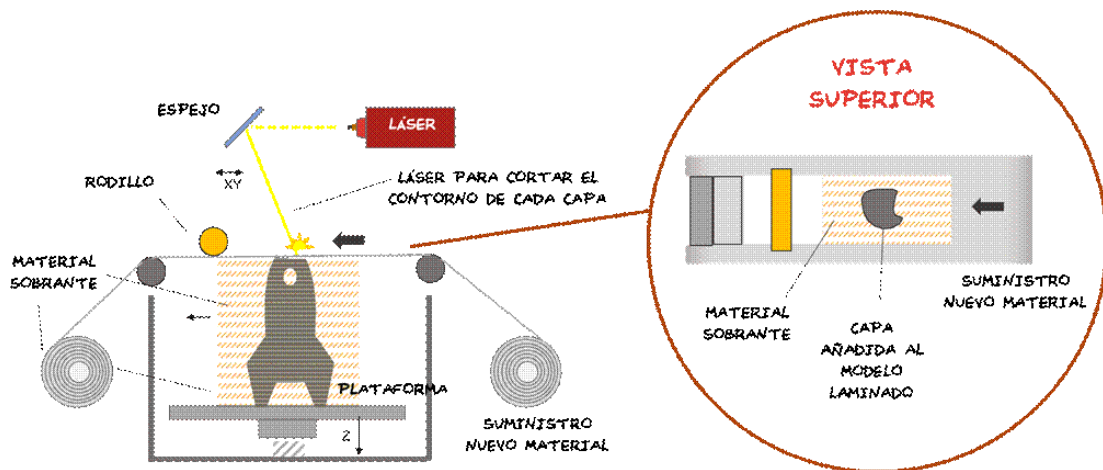


Figura 15. Proceso de trabajo Tecnología LOM. Fuente: fabricacionaditiva.online/107.htm

1.5.5 Proceso de impresión 3D

Inicialmente se requiere con la obtención o creación de un diseño virtual del objeto que se requiera realizar la impresión, principalmente se pueden realizar con la utilización de softwares CAD o modelado 3D, así como también la utilización de scanner 3D, el mismo que permite

realizar una copia virtual, si no es el caso de la realizar el diseño, actualmente existen librerías con diseños gratis.

Dentro de los softwares de modelado 3D que se utilizan en la actualidad son:

Tabla 6. Editores STL y modelado 3D. Fuente: [15]

	Detalle		Detalle
Alas 3D	Editor STL	Blender	Modelado 3D
Autodesk Meshmixer	Editor STL	SketchUp	Modelado 3D
MeshLab	Diseño 3D	OnShape	Modelado 3D
MeshMagic	Editor STL	Sculptris	Modelado 3D
3DCrafter	Modelado 3D	Wings3D	Modelado 3D
Diseño de Autodesk 123	Impresión 3D Editor STL	SelfCAD	Impresión 3D Modelado 3D

Para después del proceso de diseño se procede a la utilización de un software para que mediante el archivo. STL nos permita obtener el GCode, de esta manera la impresora 3D ya es capaz de leer el documento con las instrucciones a realizar, este proceso se muestra en la figura16.

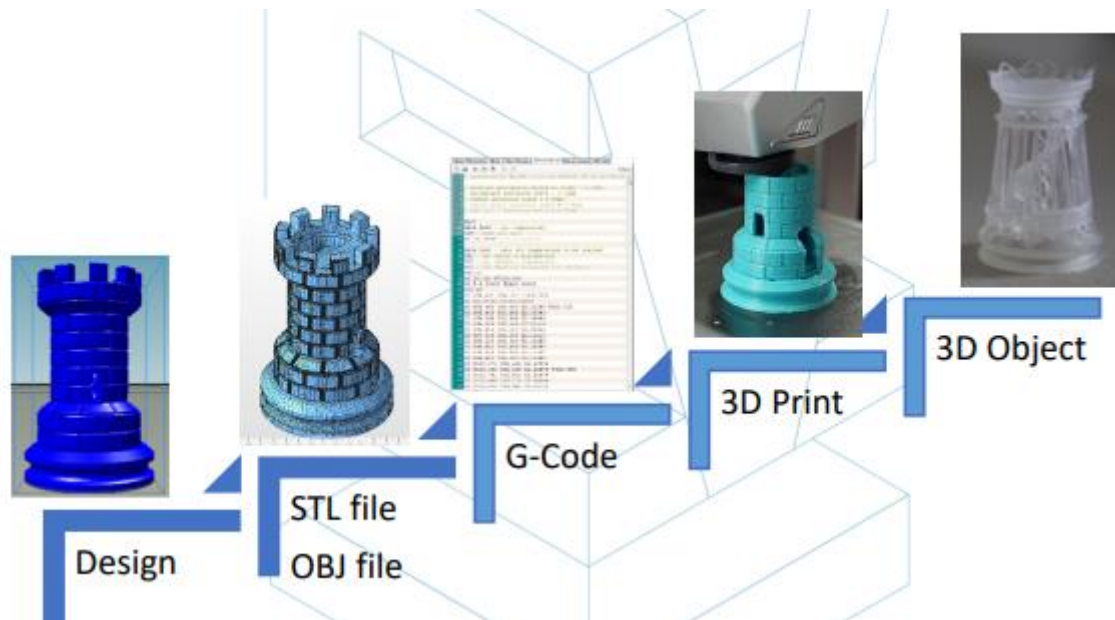


Figura 16. Proceso de impresión 3D. Fuente:[16]

1.5.6 Impresión 3D FDM

En la actualidad existen varias formas de realizar una impresión 3D, siendo la impresión FDM (modelado por deposición fundida) la más utilizada, presentándose como manera de trabajo la deposición de un material fundido por capas, dando un lapso de enfriamiento entre estas para una adecuada impresión.

Al igual que una computadora CNC se presenta un código G de movimiento, variando la disposición de trabajo ya que la impresión FDM es aditiva y en el CNC es un método sustractivo, al relacionar este dato se establece que en el FDM se requerida el material exacto para la realización del elemento y en el CNC se requerirá un sobre espesor para su elaboración. Otro detalle al momento de realizar los elementos se deberá tener en cuenta que en el FDM para distintos elementos se requerirán soportes que podrán ser extraídos al finalizar la impresión a diferencia del CNC que no se requiere de esta ayuda.

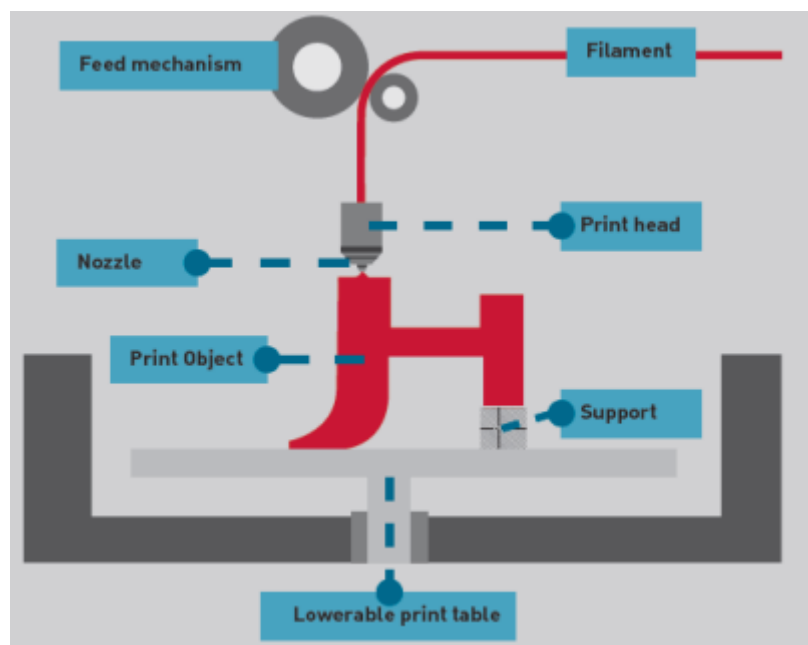


Figura 17. Tecnología FDM. Fuente: [16]

1.5.6.1 Errores de impresión

Los errores de impresión FDM (modelado por deposición fundida) no solo se basan en anomalías en el elemento a imprimir, sino también al echo que la impresora puede causar riesgos, eléctricos, incendios, sonoros, que afectaran a lo largo que esta esté realizando el proceso, para ello se recomienda informarse más a detalle de cada uno de estas fallas y si es posible realizar adecuaciones en el área de trabajo, así como protecciones físicas, ventilación, etc., que nos faciliten una relación adecuada de impresión y manipulador.

1.5.6.2 Estructuras soporte

Para vencer la gravedad es indispensable la colocación de estructuras soporte en el proceso de impresión 3D esto principalmente cuando se imprime agujeros internos o en voladizo, considerando que se recomienda utilizar soportes cuando la inclinación del solido es mayor a

45°, la impresora FDM presenta varias características de soportes, así como también formas, en la cual el diseñador deberá escoger la más adecuada a su diseño.[17]

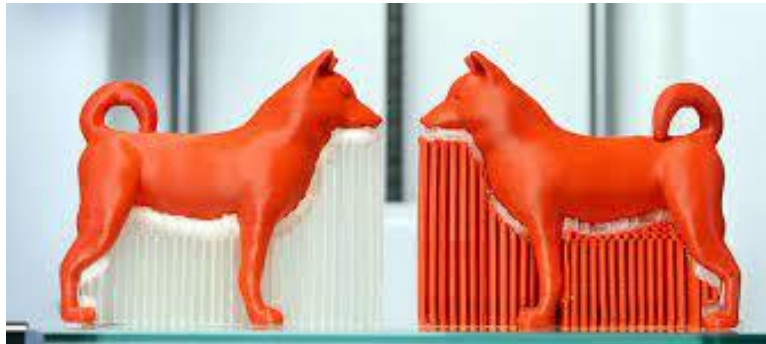


Figura 18. Estructuras de soporte en impresión FDM. Fuente:[18]

1.5.6.3 Relleno del modelo

Todo elemento impreso posee relleno, esto de acuerdo con el diseñador y características que desee, cabe recalcar que mientras menos relleno se requiera, menos resistente será el elemento y menos tiempo de impresión a diferencia que a mayor relleno más tiempo de impresión, esto se puede seleccionar en el software a utilizar, según [16], se recomienda una superficie de entorno del 15%.

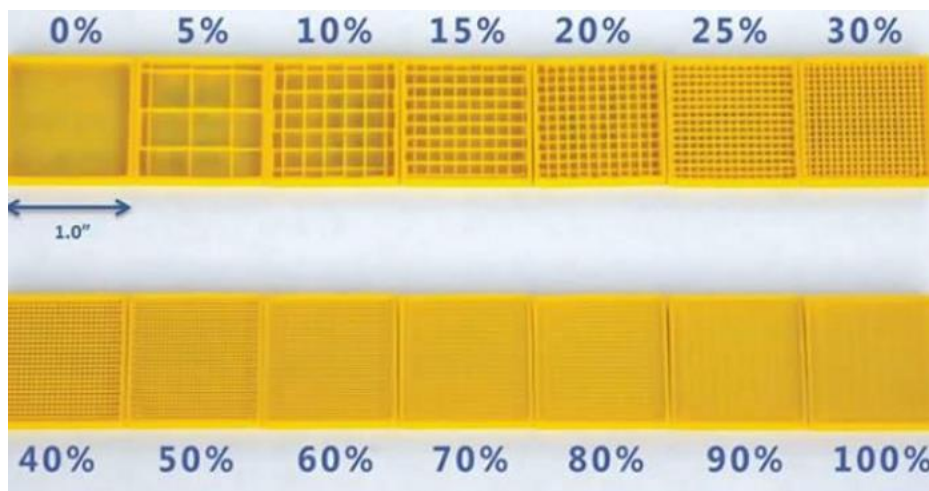


Figura 19. Porcentaje de relleno según que permite el software Ultimaker Cura. Fuente [19]

1.5.6.4 Ventajas de usar la impresión FDM

La principal ventaja es el costo final del proceso de impresión a diferencia de los otros métodos, al igual que la obtención de estos materiales son fáciles de conseguir de acuerdo con los requerimientos técnicos de impresión, siendo que el método con resina asemeja el precio y ha ido en decaimiento, aun no deja de ser más económico que la impresión FDM.

Al ser un método que ha ido en auge su utilización, las empresas se han permitido la fabricación de varios materiales para cada uso respectivo así, permitiendo la obtención de materiales como

nailon, fibra de carbono, policarbonato y más, siendo un estimado que en la actualidad existan más de tipos de materiales para el uso en impresión FDM.

Cabe recalcar que el tener un ambiente limpio en el área de trabajo, garantizara una adecuada realización del proceso de impresión [12]

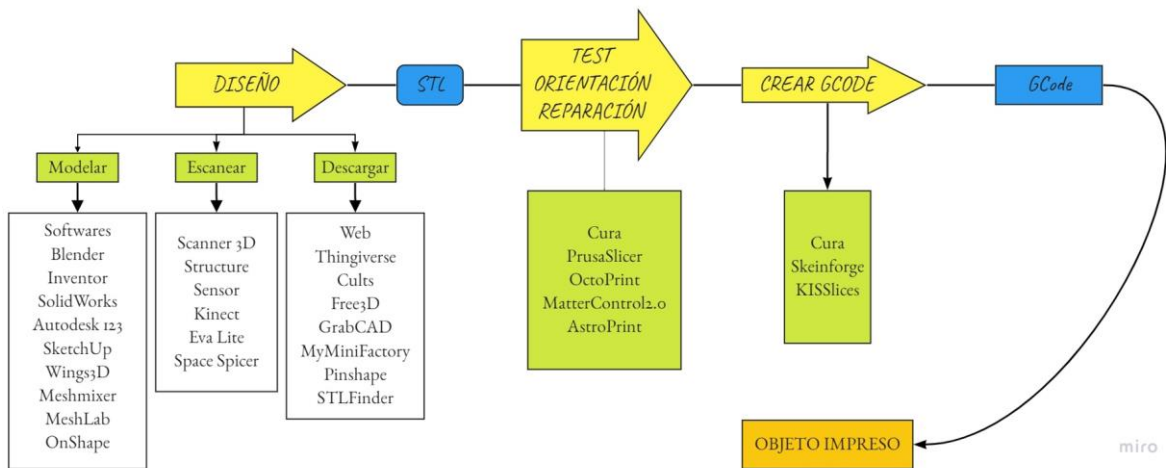


Figura 20. Diagrama de flujo Impresión 3D. Fuente: Propia

2 METODOLOGÍA

2.1 Fase experimental de patrones funcionales en sujetos sanos

Se realizó un ejercicio (movimiento crítico que afecta al agarre en la mano) relacionado al brazo (cuando se producen problemas en el codo se obtienen problemas en el agarre), por ende, se ha realizado movimientos con sujetos sanos para identificar los patrones funcionales de movimiento que servirán como referencia para comparaciones con personas patológicas.

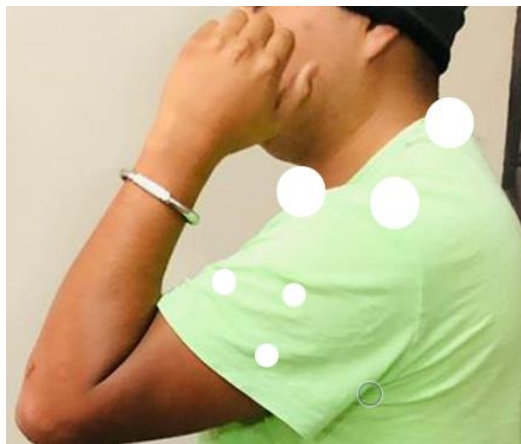


Figura 21. Posición inicial al movimiento, ubicación de sensores. Fuente: Propia.



Figura 22. Posición final al movimiento, ubicación de sensores. Fuente: Propia.



Figura 23. Ubicación de sensores en la mano

Anexo I (se establece un protocolo de análisis del movimiento del brazo)

2.1.1 Protocolo experimental (sistema de fotogrametría kinescan 200 fps, sensor de fuerza)

Para la toma de datos y relaciones entre los sensores, software, ortesis se procedió a la utilización del sistema de fotogrametría Kinescan, el cual trabaja con 200 fotogramas por segundo (fps), junto con un sensor de fuerza Kforce.

En la figura se presentan patrones de movilidad funcionales de sujetos sanos, con la finalidad de que personas que tengan baja capacidad de movimiento se presentarán en una ubicación distinta de la franja celeste que se presenta en la figura de color celeste se presenta la banda de sujetos sanos

La capacidad de movilidad del brazo para el movimiento realizado se presenta en la línea (X) de la figura

2.2 Análisis de materiales

De acuerdo con los métodos de fabricación de elementos funcionales, se optó por el método de impresión 3D en el cual, al conocer las posibilidades de obtención y tipos de materiales se genera una tabla con las características de cada uno de estos, estos datos son obtenidos gracias al software Cambridge CES Edupack 2010, el mismo que presenta una base de datos amplia a los requerimientos ingenieriles.

Tabla 7. Características Materiales. Fuente: Cambridge CES Edupack 2010

	PET	ABS	PLA	Nylon	Fibra de carbono
Punto de fusión [°C]	212-265	230-260	160-177	210-220	215-370
Máximo servicio de temperatura [°C]	66.9-86.9	61.9-76.9	70-80	110-140	140-220
Módulo de Young [Gpa]	2.76-4.14	1.1-2.9	3.45-3.83	2.62-3.2	69-150
Resistencia a la fatiga a 10⁷ ciclos [Mpa]	19.3-29	11-22.1	14-18	36-66	150-300
Densidad [kg/m³]	1.29e3-1.433	1.01e3-1.21e3	1.21e3-1.25e3	1.12e3-1.14e3	1.5e3-1.6e3
Precio [\$/kg]	24	25	23	30	35
Reciclable	SI	SI	SI	SI	NO
Toxico	NO	NO	NO	NO	---
Biodegradable	NO	NO	SI	NO	NO
Energía incorporada, producción primaria [Mj/kg]	79.6-88	91-102	52-54	121-135	259-286

PET: Polyethylene terephthalate

ABS: Acrylonitrile butadiene styrene

PLA: Polylactide

Acorde con el proceso de reciclaje en la figura, se presenta la contribución fraccionada del material reciclado al consumo actual, para lo cual se observa en polímeros el PET es el material mayormente reciclado, es muy baja su relación de acuerdo con los hierros fundidos, pero debemos darnos cuenta de que una característica de la ortesis es su bajo peso por ende se descarta este tipo de metales, cerámicos y algunos materiales híbridos por su manipulación.

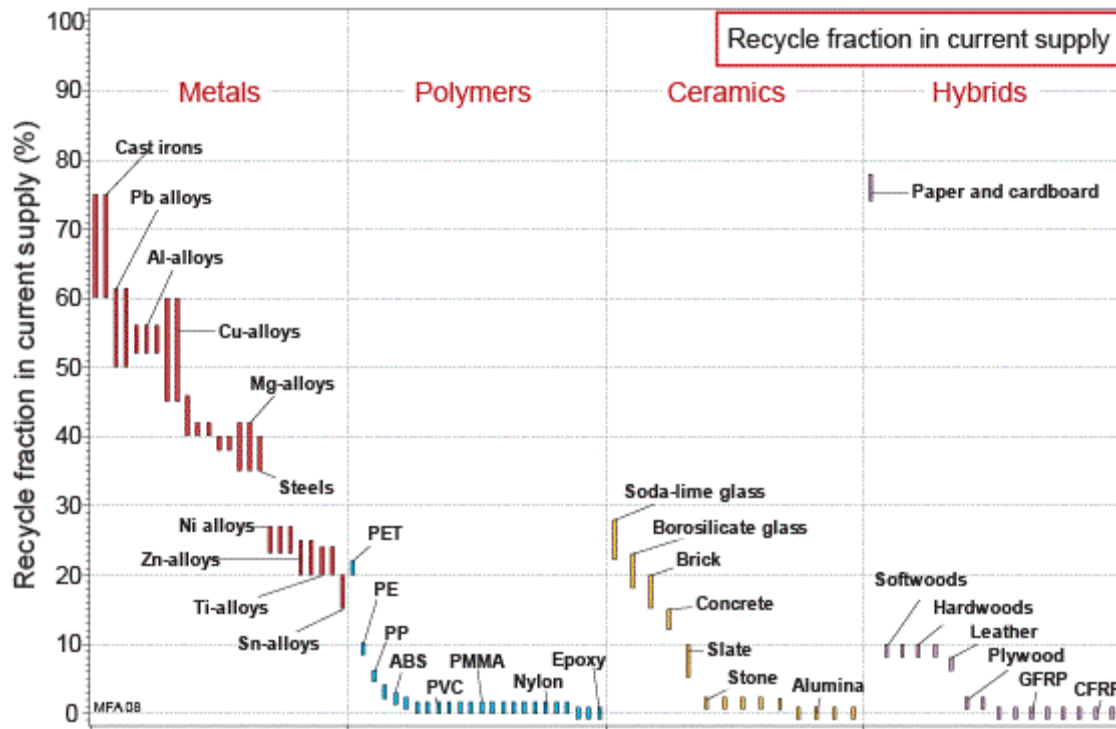


Figura 24. Contribución fraccionada de reciclaje del material reciclado al consumo actual.

Fuente: Cambridge CES Edupack 2010

Actualmente poseemos varios estudios tanto de impresión FDM como de sus materiales dentro de lo cual a manera de estudio se presenta la figura. en la cual se observan los principales materiales que están disponible en el mercado y sus cualidades o requerimientos, que nos servirá como base de selección en nuestra impresión 3D.

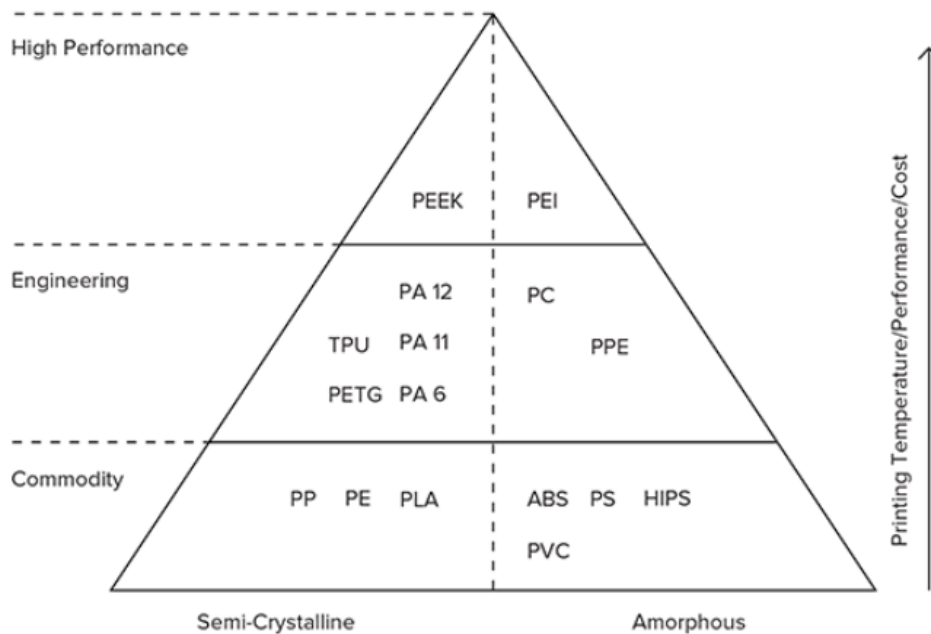


Figura 25. Principales materiales disponibles para impresión 3D. Fuente: 3dhubs.com

2.3 Fase experimental de construcción del prototipo

2.4 Impresión 3D

Para la realización de la impresión en 3D se realizó mediante la utilización de la impresora Ender 3 Pro, además con la utilización del material PLA, el mismo que se encuentra disponible en el País.

Las características de impresión se detallan en la figura 26, en donde el software Ultimaker Cura versión 4.12.1 posee una biblioteca con las características principales de cada impresora como son los detalles de dimensiones de cama, temperatura de extrusor, temperatura de cama, altura de impresión en el eje z, velocidad de impresión, soportes, etc. en donde de acuerdo con el tipo de material y forma del elemento a imprimir se procedió a realizar las variantes necesarias para una impresión óptima.

Como características principales de la impresora 3D se menciona principalmente como una versión mejorada del modelo Ender 3, como variantes su fuente de alimentación, nuevos elementos y detalles que mejoran una estabilidad de impresión y el rediseño de la zona de extrusión al realizarla de aluminio, los elementos principales de la maquina se presentan en la figura 26. [11]

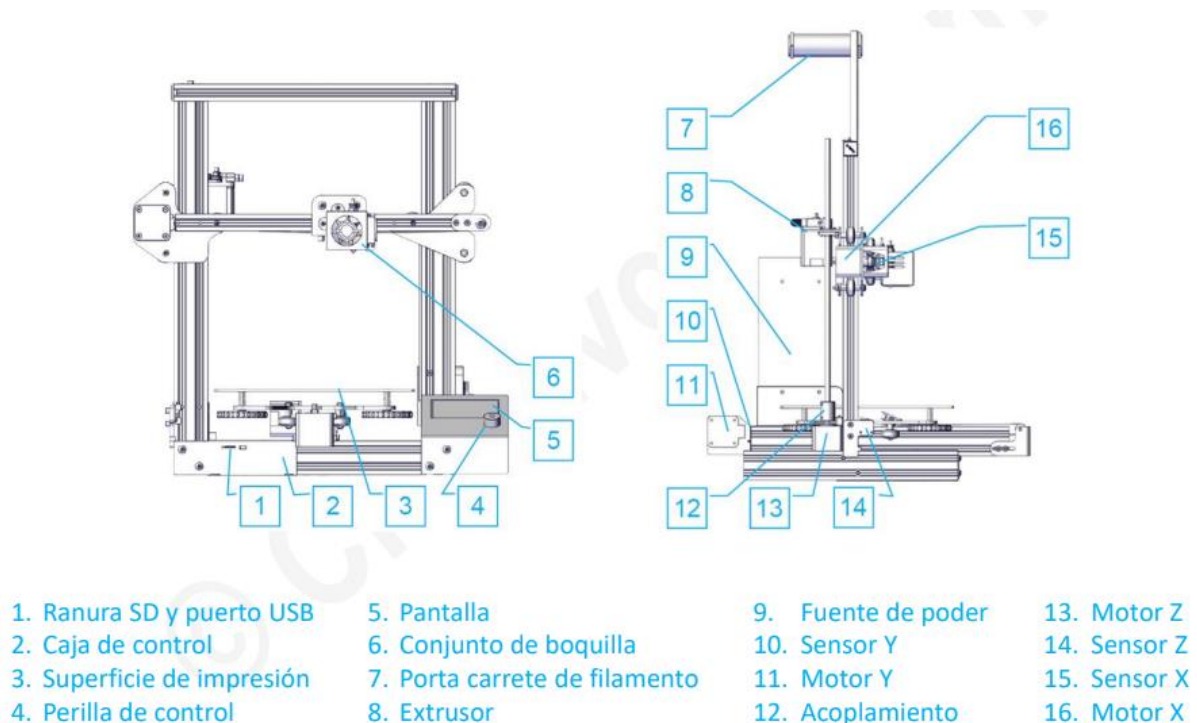


Figura 26. Elementos principales Impresora Ender 3 pro. Fuente [11]

2.5 Configuración y errores en la impresión 3D (FDM)

2.5.1 Temperatura de boquilla y de la cama de impresión

Esta característica dependerá del tipo de material que vaya a ser utilizado en el proceso, se tiene como recomendación por ejemplo al plástico PLA, el cual su temperatura de impresión varía entre 190°C-215°C en la boquilla y en la cama de impresión entre 20°C – 70°C [22].

2.5.2 Altura de capa

Es un ítem a selección del personal, en donde el rango varía de 0.1 mm a 0.3 mm, en el cual 0.2mm de altura de capa es el recomendado como estándar en la mayoría de las impresoras, la selección de altura de capa depende de la calidad de impresión ya que a menos altura de capa mejor será el resultado, pero el tiempo de impresión aumenta.

2.5.3 Espesor de pared

Esta elección va acorde a la resistencia que se requiera de la pieza impresa, se relaciona directamente con el ancho de la boquilla (0.4 mm estándar) que resulta como la dimensión del ancho de pared en cada pasada. [22]

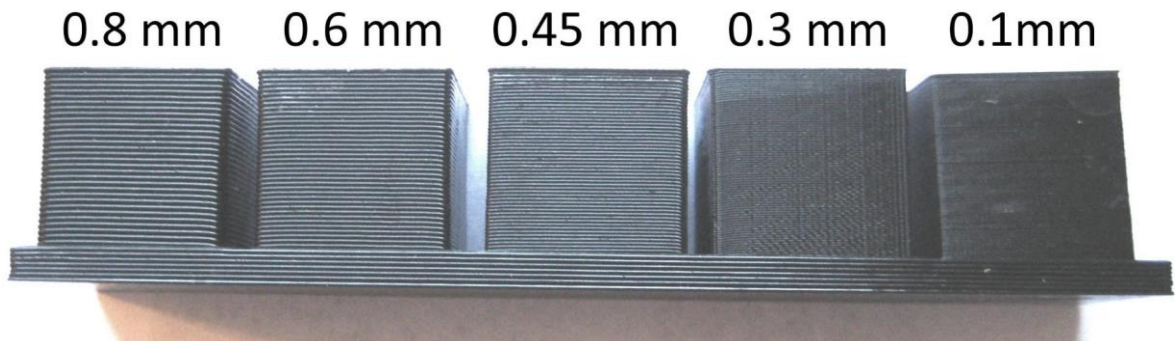


Figura 27. Alturas de capa, acabado superficial. Fuente: 3DWorks.

2.5.4 Porcentaje de relleno

Los diseños que se requieren imprimir tienen la característica de ser rellenos o huecos, de acuerdo con el diseño y características de resistencia y soporte de la pieza se colocara más relleno, [22] recomienda un relleno del 10% para impresiones en general.

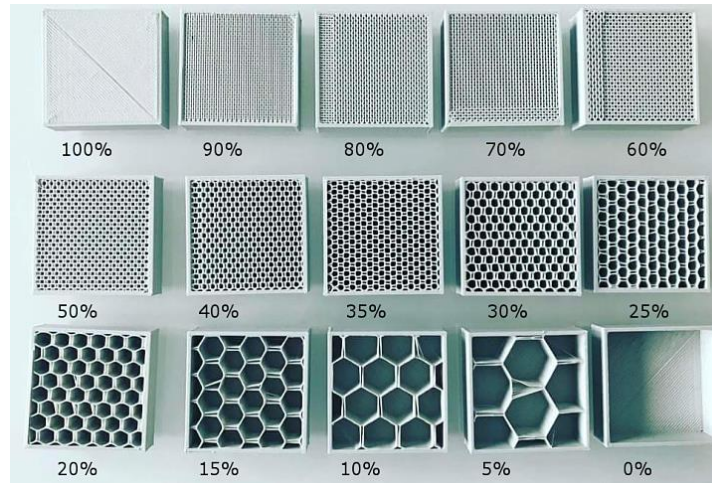


Figura 28. porcentajes de relleno habilitados para impresión 3D. Fuente: Demoss Prototipado

2.5.5 Velocidad de impresión

Detalle que establece la rapidez que se mueve la boquilla en la impresión en donde se establece un rango de 30 mm/s a 60 mm/s para la mayoría de las impresoras de escritorio, rango que dependerá de la pieza que se esté imprimiendo y del material utilizado [22].

2.5.6 Retracción

En la mayoría de las impresiones se requiere que la boquilla se desplace de un lugar a otro sin extruir material, al no tener activada esta característica podría ser que se extruya material innecesario en la pieza, generando imperfecciones, por lo que se realiza una retracción que es una inversión de giro del motor permitiendo retroceder el material cierta distancia para no permitir lo mencionado.

Se recomienda una retracción que varía entre 3mm y 5 mm para extrusoras de estilo “bowden” y de 1mm para transmisión directa [22].

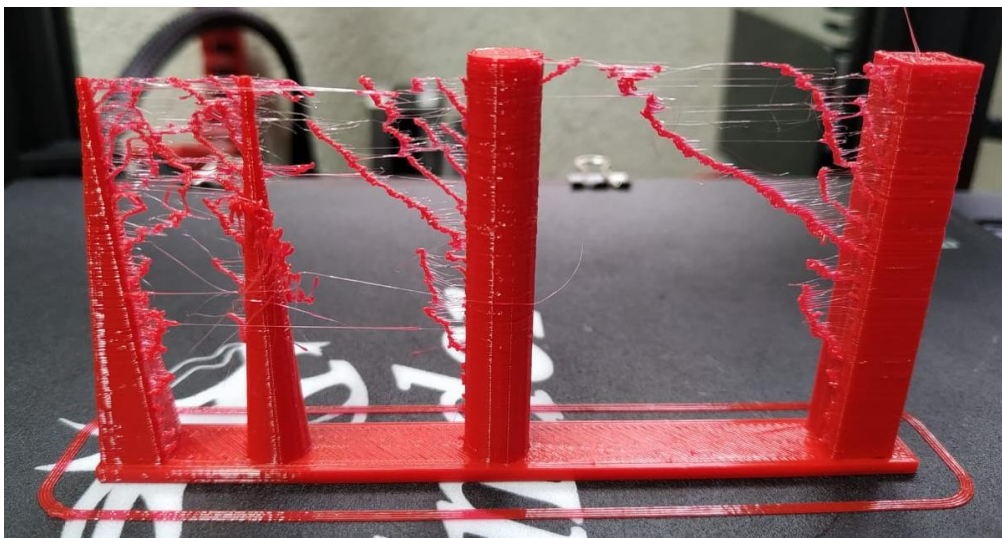


Figura 29. Impresión defectuosa por falta de retracción del material y velocidad alta.

Fuente: JEFETRONIC

2.5.7 Estructura de apoyo

En la realización de voladizos es importante poner hincapié al momento de realizar la impresión 3D ya que, por efecto de gravedad, esos tienen a inclinarse hacia abajo, lo que conlleva a la utilización de soportes en ciertos lugares del objeto.

2.5.8 Patrón de soporte

Aparte de colocar la opción de soporte en el elemento mediante el software utilizado es necesario escoger el tipo de patrón de este, siendo el tipo “concéntrico y líneas” los más fáciles de eliminar después de la impresión, pero son los más débiles, el soporte tipo “cuadrícula” tiende a ser uno de los más rígidos pero difícil de eliminar, para ello dependerá en su totalidad del personal a efectuar esta característica.

Como se puede observar en la figura 30. Acorde la ubicación del elemento se podrá o no utilizar soportes para no tener falencias de desplazamiento hacia abajo del material por efectos de material.

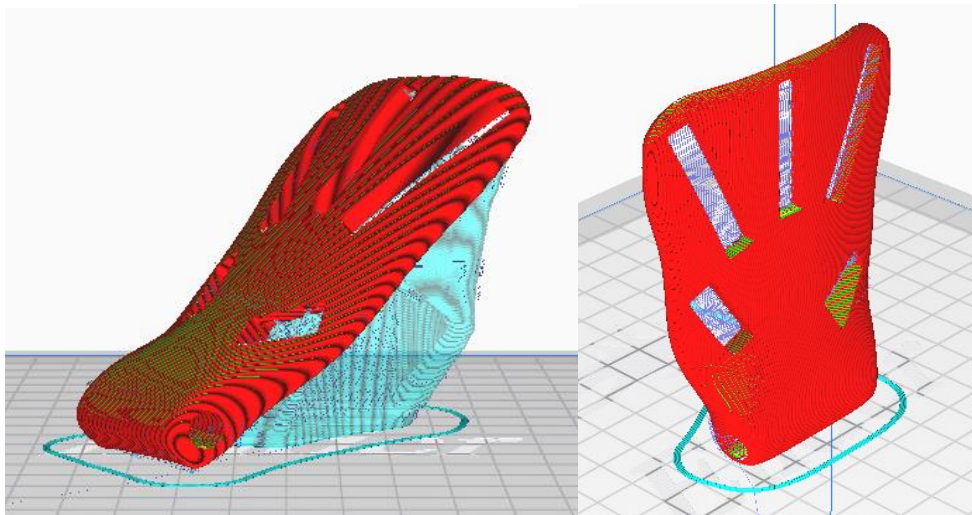


Figura 30. Posicionamiento del elemento a ser impreso con y sin la utilización de soportes (celeste). Fuente: Propia.

2.5.9 Balsa

Al habilitar esta opción, se crea una base en el objeto a imprimir en 3D, siendo útil cuando se requiere un mejor acabado en la parte inferior, como aspectos negativos se presenta un desperdicio de material, mayor tiempo de impresión, reducción de temperatura entre la cama soporte y la pieza.

2.5.10 Orientación de impresión

La orientación en la cual se proceda a realizar la impresión conlleva aspectos importantes del resultado final como son el acabado superficial, detalle, resistencia, necesidad de soportes. Los mismos que deberán ser predeterminados por el personal, en el ámbito de resistencia es el

elemento siempre será más frágil a lo largo del eje Z y vertical a diferencia que en el plano horizontal por la razón que la adherencia entre capas siempre es inferior a la adherencia entre líneas de una misma capa.[25]

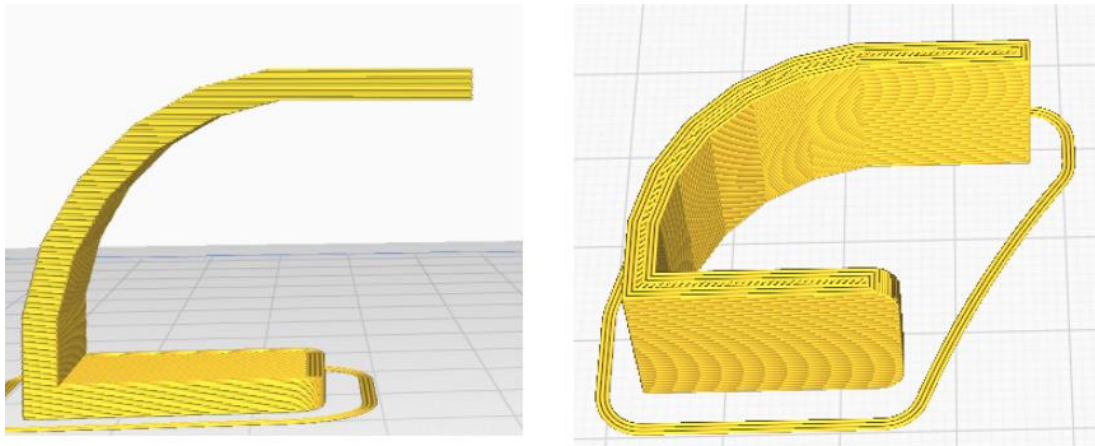


Figura 31. Posicionamiento del objeto a imprimir, Fuente: [25]

2.6 Inicio y final GCode

Las características físicas de la maquina se presentan en la figura, en donde como se observa, la anchura, profundidad y altura máxima de impresión, al igual que el ajuste del cabezal de impresión.

Creality Ender-3 Pro			
Impresora	Extruder 1		
Ajustes de la impresora	Ajustes del cabezal de impresión		
X (anchura)	220.0 mm	X mín	-26 mm
Y (profundidad)	220.0 mm	Y mín	-32 mm
Z (altura)	250.0 mm	X máx	32 mm
Forma de la placa de impresión	Rectangular	Y máx	34 mm
Origen en el centro	<input type="checkbox"/>	Altura del puente	25.0 mm
Plataforma calentada	<input checked="" type="checkbox"/>	Número de extrusores	1
Volumen de impresión calentado	<input type="checkbox"/>	Aplicar compensaciones del extrusor a GCode	<input checked="" type="checkbox"/>
Tipo de GCode	Marlin		

Figura 32. Detalles generales Impresora 3D Creality Ender 3 Pro. Fuente: Propia (Software Ultimaker Cura)

Inicio y Finalización GCode

Por medio de este software se puede realizar variantes en el inicio y final del GCode, por ende, se podrán realizar impresiones de prueba como líneas para expulsar el material sobrante de otras impresiones antes de empezar el elemento, así como también posicionar el extrusor de la menor manera antes y al finalizar el proceso.

Tabla 8. Inicio y Finalización GCode. Fuente: Propia (Software Ultimaker Cura)

Inicio GCode	Finalizar GCode
; Ender 3 Custom Start G-code G92 E0 ; Reset Extruder G28 ; Home all axes G1 Z2.0 F3000 ; Move Z Axis up little to prevent scratching of Heat Bed G1 X0.1 Y20 Z0.3 F5000.0 ; Move to start position G1 X0.1 Y200.0 Z0.3 F1500.0 E15 ; Draw the first line G1 X0.4 Y200.0 Z0.3 F5000.0 ; Move to side a little G1 X0.4 Y20 Z0.3 F1500.0 E30 ; Draw the second line G92 E0 ; Reset Extruder G1 Z2.0 F3000 ; Move Z Axis up little to prevent scratching of Heat Bed G1 X5 Y20 Z0.3 F5000.0 ; Move over to prevent blob squish	G91 ;Relative positioning G1 E-2 F2700 ;Retract a bit G1 E-2 Z0.2 F2400 ;Retract and raise Z G1 X5 Y5 F3000 ;Wipe out G1 Z10 ;Raise Z more G90 ;Absolute positioning G1 X0 Y{machine_depth} ;Present print M106 S0 ;Turn-off fan M104 S0 ;Turn-off hotend M140 S0 ;Turn-off bed M84 X Y E ;Disable all steppers but Z

2.7 Selección del material en el Software

En el software Ultimaker Cura se presenta una lista de Materiales actualizada para poder ser seleccionados, para esto se procede a seleccionar el material y verificar las características como se presentan en la figura 33.

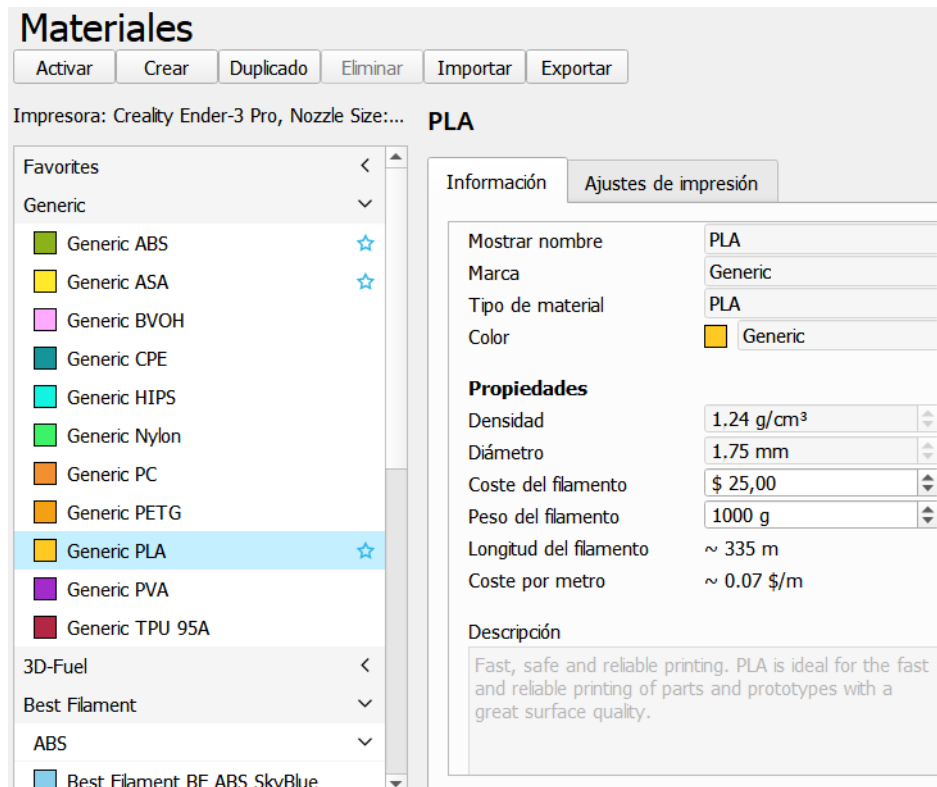


Figura 33. Selección del material en el Software Ultimaker Cura

Fuente: Propia (Software Ultimaker Cura).

Al seleccionar el material se procede a verificar principalmente las temperaturas de impresión tanto del extrusor como de la cama, esto de acuerdo con los requerimientos del material a utilizar, además se establecen características de distancia y velocidad de retracción, esto para realizar un mejor acabado al elemento a imprimir.

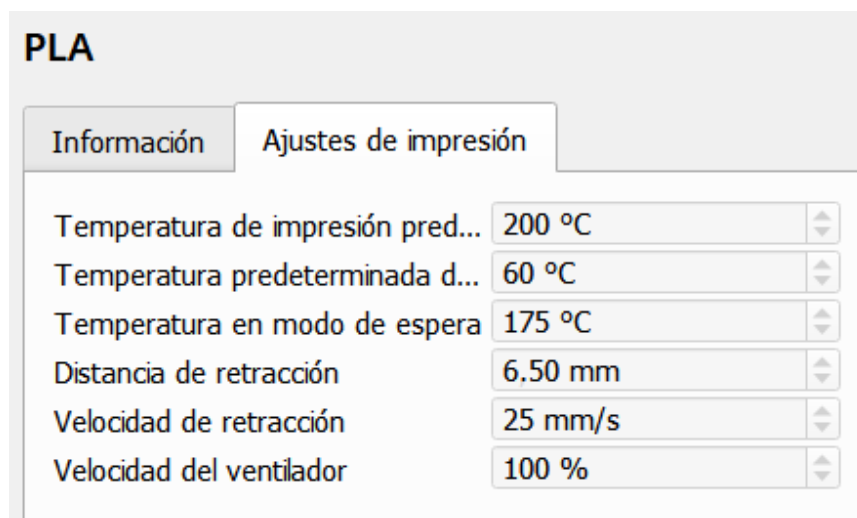


Figura 34. Ajustes de impresión en el Software Ultimaker Cura

Fuente: Propia (Software Ultimaker Cura)

2.8 Posicionamiento elementos Software Ultimaker Cura

Al tener cada uno de los elementos diseñados se procede a guardarlos en un software que nos permita guardar en archivo. STL, esto para poder continuar con la preparación de estos en la mesa de trabajo del software como se muestra en la figura 35.

Gracias al software, tipo de material a extruir, posicionamiento del diseño, soportes, adherencia, etc., nos permite obtener un tiempo estimado de impresión, así como también la cantidad de material a ser utilizado.

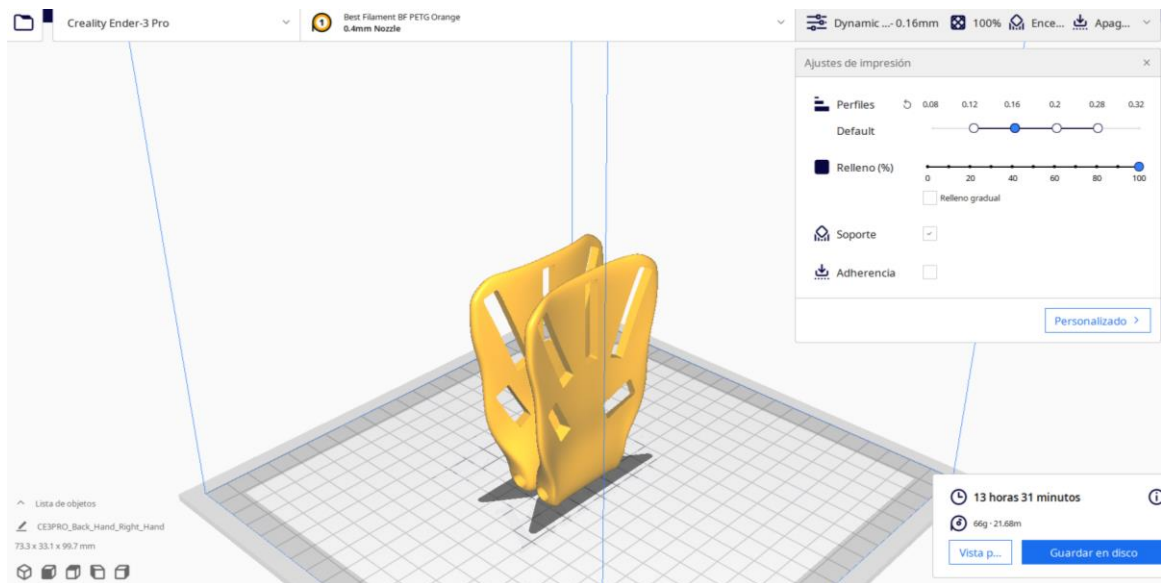


Figura 35. Posicionamiento elementos Back_Hand_Left_right_Hand.stl en Software Ultimaker Cura. Fuente: Propia (Software Ultimaker Cura)

El software nos permite observar una vista previa de la impresión y variar el tiempo de esta, figura, para lo cual es de gran ayuda la toma de decisiones de colocación de soportes en el elemento en el transcurso de la impresión, en este proceso podemos observar el movimiento del extrusor, desplazamientos, relleno, inicios y finales.

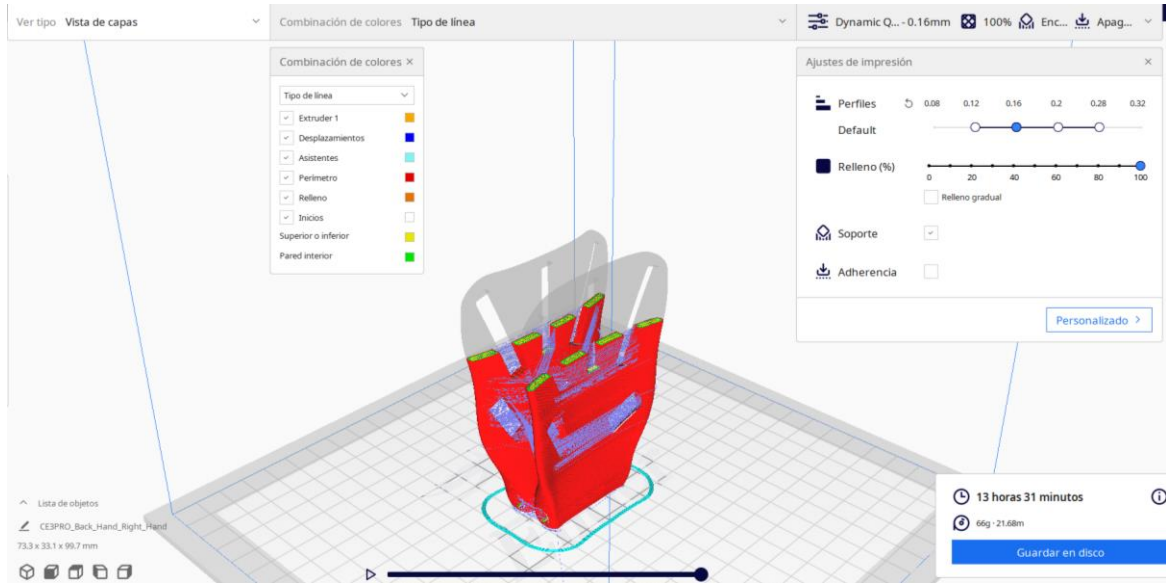


Figura 36. Vista previa de impresión 3D Back_Hand_Left_right_Hand.stl en Software Ultimaker Cura. Fuente: Propia (Software Ultimaker Cura)

2.9 Ensamble

Para la realización del ensamble se utilizaron uniones (tornillo) y arandelas planas como se muestran en la figura 37, esto para poder tener una unión móvil de cada una de las partes que comprenden la ortesis.



Figura 37. Ensamble ortesis. Fuente; Propia.

Al finalizar el ensamble de la ortesis se procedió a determinar si es posible manejar cada uno de los movimientos que se realizan con la mano sin ortesis para que no existan complicaciones en la toma de datos.

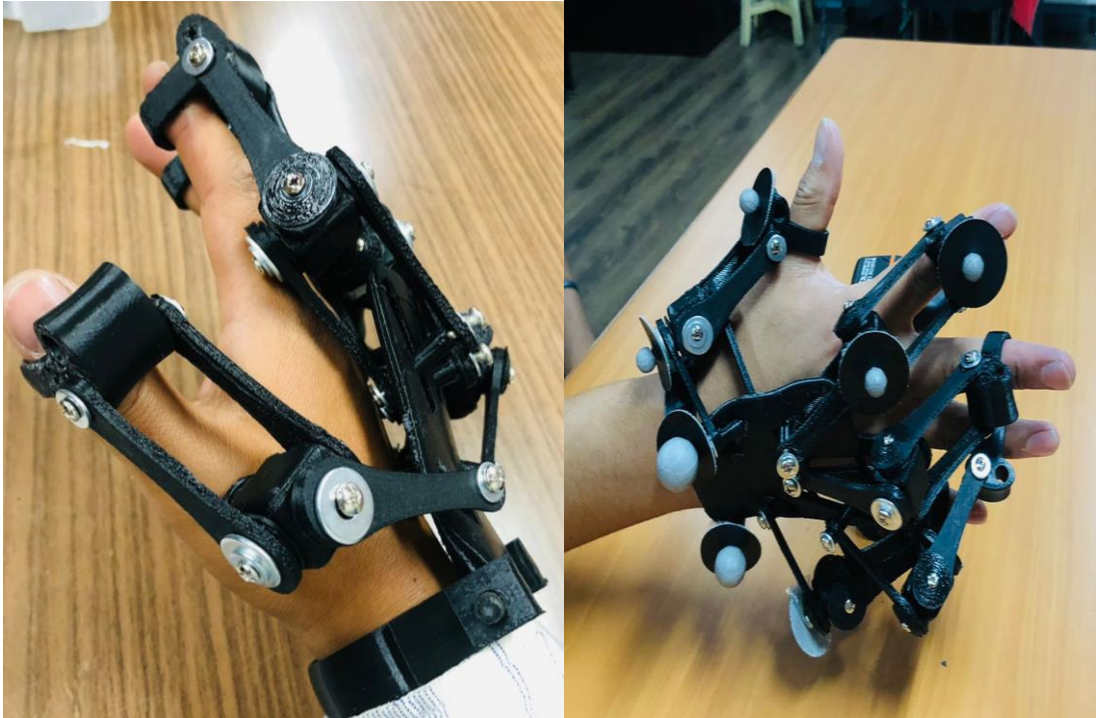


Figura 38. Generación de movimientos (abducción – aducción) con la ortesis colocada.

Fuente: Propia.

Para la obtención de la masa total de la ortesis se procedió a la toma de datos mediante una balanza electrónica en donde se obtuvo el resultado de 242 gramos.



Figura 39. Masa Ortesis ensamblada. Fuente: Propia

3 RESULTADOS, CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

3.1 RESULTADOS

3.1.1 Impresión 3D(FDM)

En el proceso de impresión 3D (FDM) se presenta un esquema como resultado final del proceso de impresión 3D para cualquier elemento, poniendo atención en las características de cada proceso, así como también de posibles errores.

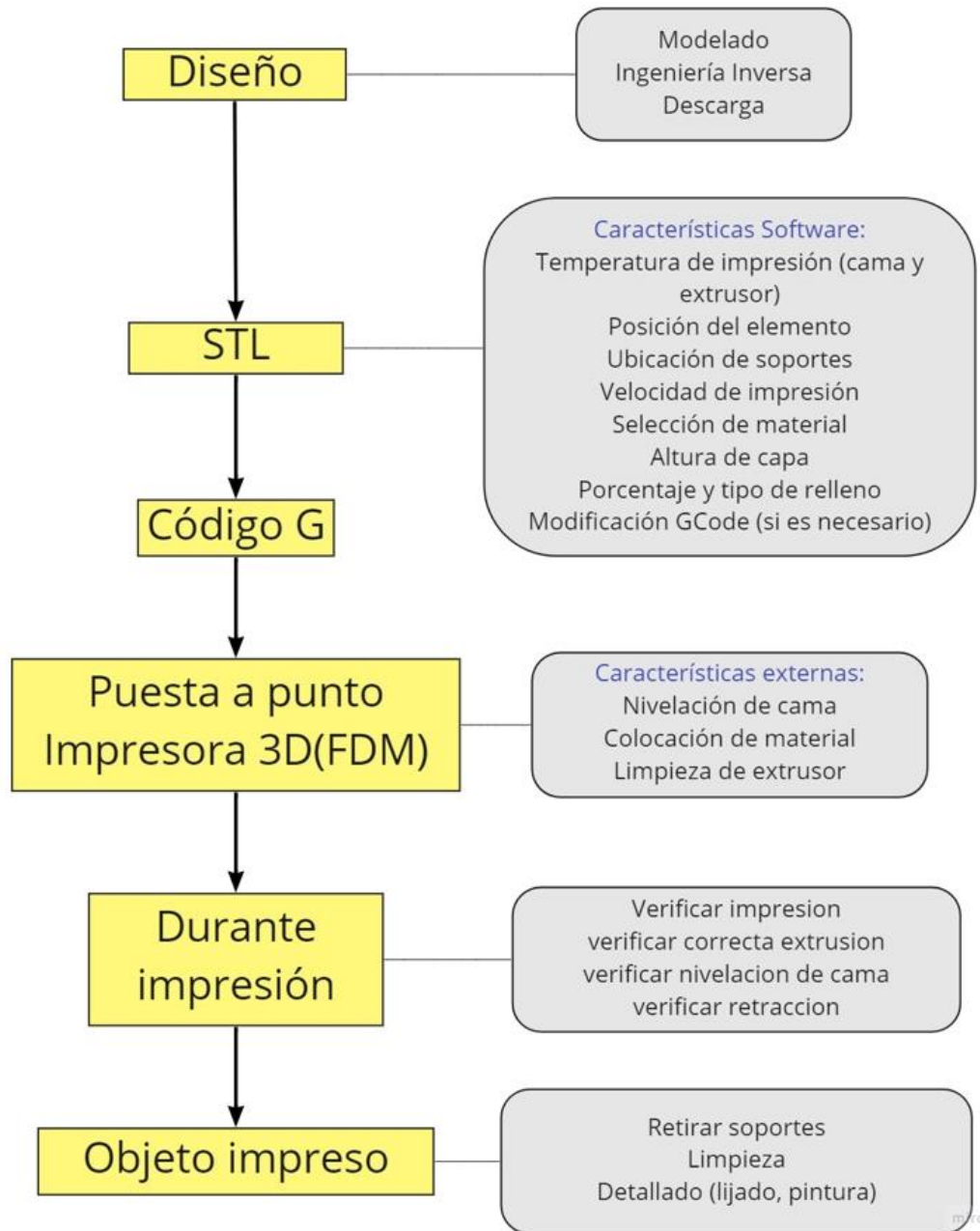


Figura 40. Esquema metodología par a producir, fabricar el prototipo mediante impresión 3D (FDM). Fuente: Propia.

3.1.2 Ejercicio patrones funcionales en personas sanas

Para el análisis de patrones funcionales en la realización del movimiento en sujetos sanos se presentan las siguientes graficas.

En la figura 41. se presenta el resultado de las pruebas realizadas de movilidad del brazo en el cual se establece una zona de movimiento y posición angular (celeste) en donde se podrá obtener una metodología para conocer patrones funcionales, teniendo presente si al realizar pruebas en otros sujetos y grafica del movimiento no está en el rango establecido, será de análisis para afirmar patologías.

La capacidad de movimiento estiramiento (extensión) y para la contracción (flexión), del brazo en el ciclo de movimiento de extensión es de (0-60) ° que se estima como un patrón funcional para sujetos sanos.

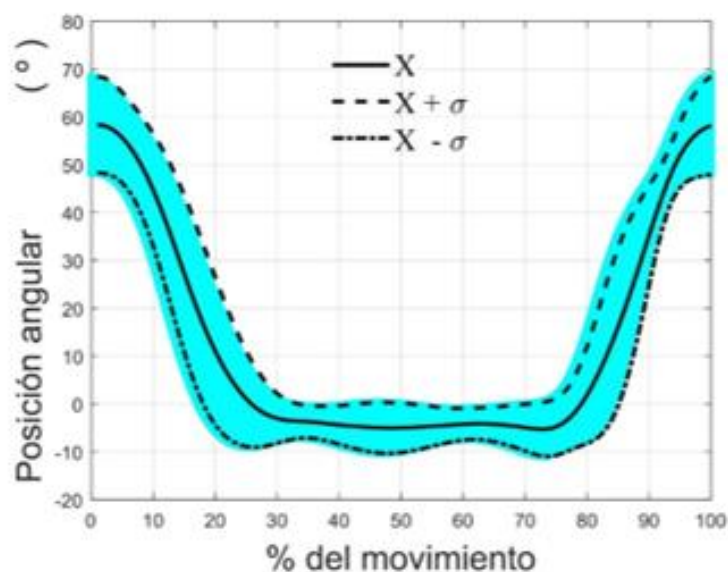


Figura 41. Resultado de las pruebas realizadas de movilidad del brazo. Fuente: Propia.

Para la figura 42. se puede observar un comportamiento elíptico al realizar el procedimiento de movilidad por parte de sujetos sanos presentando velocidades mayores a las finalizaciones del movimiento esto se debe a que en el movimiento ANEXO I, se menciona al sujeto realice el movimiento a la velocidad que mejor se acomode.

Para valores negativos de velocidad se estima que es un proceso de contracción (flexión) en el proceso de movimiento y valores positivos para el estiramiento (extensión) del brazo, para el caso de la figura 42 se presenta una media de +/- 45°/s en un ciclo completo, lo que se entiende que fue bien realizado el movimiento por parte del sujeto.

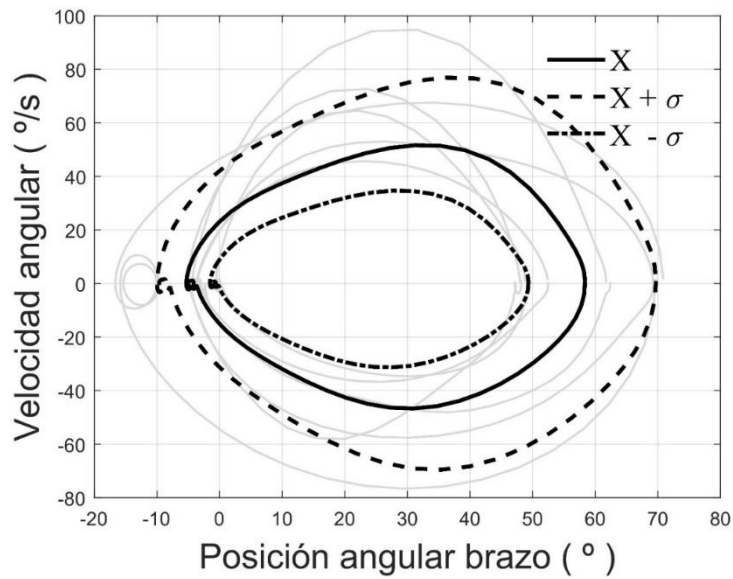


Figura 42. Resultado de las pruebas realizadas de velocidad del brazo. Fuente: Propia.

Al igual que en las pruebas realizadas de movilidad del brazo, se obtuvo una gráfica del movimiento de la muñeca semejante a la mencionada a diferencia del rango que en este caso disminuye por la razón que la mano no presenta variación significativa de posición, se deberá tomar en cuenta igualmente la zona celeste como punto de partida en comparaciones con demás sujetos puestos a prueba.

La capacidad de movimiento de la muñeca estiramiento (extensión) y valores negativos para la contracción (flexión) va alrededor de (-15 a 10) °

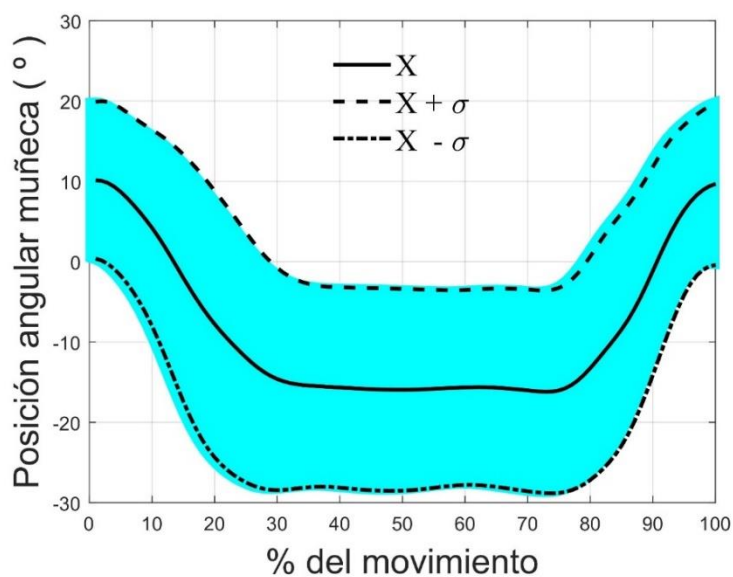


Figura 43. Resultado de las pruebas realizadas de movilidad de la mano, muñeca.

Fuente: Propia.

Para el caso del análisis de velocidad no se presentan similitudes con el estudio anterior, analizando la media X , se observan variaciones de velocidad que son analizadas de acuerdo con la funcionalidad de cada dedo, esto debido a que cada uno de estos se mueve indistintamente, así como su velocidad a pesar de que es muy baja, pero nos permite obtener resultados de movilidad que podrán ser comparados con sujetos patológicos.

En la figura 44 se presentan valores positivos que representan el inicio del movimiento de estiramiento (extensión) y valores negativos para la contracción (flexión), para el caso de estudio se observa una variación de $(10 \text{ a } -10)^\circ$.

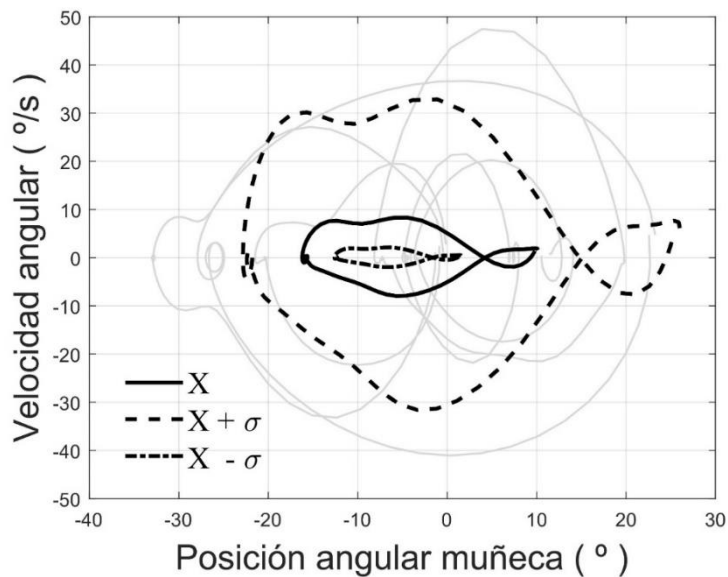


Figura 44. Resultado de las pruebas realizadas de velocidad angular de la mano, y posición angular de la muñeca. Fuente: Propia.

Existen diferentes capacidades de posición angular donde se asocian la posición angular de la mano con la fuerza de agarre como se muestra en la figura 45. al relacionar ambas características se pueden observar similitud en la forma de las gráficas, cabe recalcar que esta grafica tiende a variar entre sujeto analizado en su rango, pero en forma debería permanecer semejante.

En la figura 45 se observa una media de 17 para la fuerza y de 22 para la posición angular, al realizar una sincronización de las gráficas se establecería una mejor correlación de resultados, pero al ser instrumentos diferentes se observa esta variación.

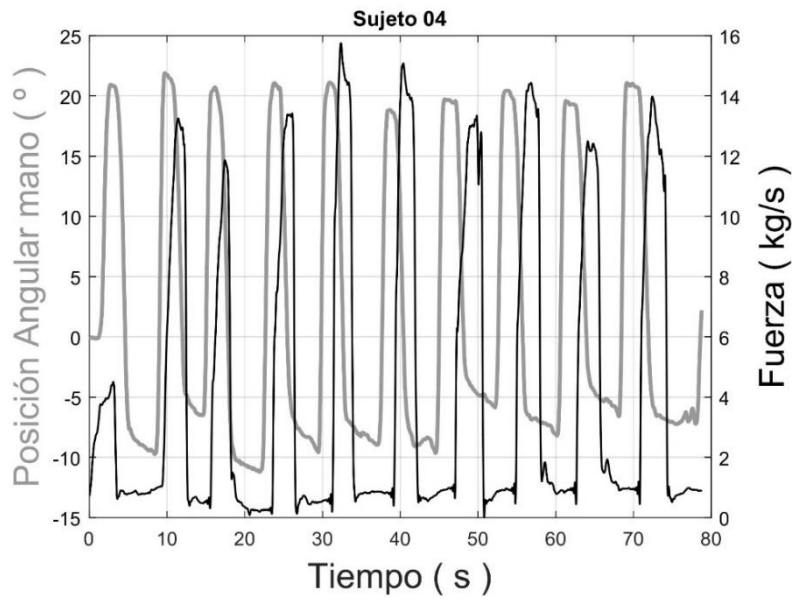


Figura 45. asociación de la posición angular de la mano con la fuerza de agarre.

Fuente: Propia,

3.2 CONCLUSIONES

Se definió un ejercicio de patrones funcionales que servirán a futuro para comparar con personas patológicas, los mismos que posibilitan una proyección de estudio basados en esta metodología propuesta.

Los análisis de agarre de la mano están basados en la posición angular y la activación de la fuerza de agarre en mano extendida. Las variables de posición angular y fuerza tienen comportamientos que caracterizan la movilidad (brazo-codo-muñeca) y la capacidad de agarre en brazo extendido, los mismos que aparecen parcialmente sincronizados a la capacidad de movilidad y fuerza.

El uso de la FDM nos permite significativamente no limitarnos en la forma, diseño del elemento a imprimir, lo que permitirá a los diseñadores tener rienda suelta a su imaginación y de esta manera realizar diseños que no se han podido crear, tal es nuestro caso que fuimos capaces de realizar una impresión de diferentes elementos que no fuesen sido capaces de realizar con máquinas convencionales o su realización tendría costos elevados.

Queda claramente demostrado que en el uso de la FDM el material desperdiciado es muy bajo a diferencia de otros procesos de fabricación y de igual manera influye la ubicación del elemento en el software antes de la impresión para poder disminuir este desperdicio.

Al obtener un levantamiento de información del uso de ortesis, niños, jóvenes y adultos están propensos a utilizar este tipo de accesorio, por ende, para introducirlo en el ámbito médico es necesaria la investigación de toxicidad del material a utilizar, así como también su inflamabilidad y detalles que conllevan perjuicios para el ser humano.

Existen varias razones por las cuales es necesario reemplazar un material en una aplicación específica, como son la utilidad del producto, costo, proceso de fabricación, cuidado con el medio ambiente, etc., todo esto conlleva a un estudio minucioso por parte de los fabricantes de nuevos materiales.

3.3 RECOMENDACIONES

Conocer a detalle las características de impresión del filamento (temperatura de cama, temperatura extrusión) a ser extruido ya que de aquí dependerá la calidad, detalle, finalización de la pieza a fabricar.

En el ámbito laboral, se requiere actualización por parte del personal que está a cargo de procesos en los cuales se presentan un trabajo semejante al uso de la FDM y se tendrá una mayor competencia de mercado.

Estudiar los detalles de trabajo de cada tecnología a futuro nos ayudara decidirnos por cual de estos realizar un trabajo ya que como avanza la competencia en este tipo de fabricación aditiva, tenderán a reducir costos y ser más accesibles al público, instituciones y/o universidades.

Analizar adecuadamente el tipo de soportes a colocar al momento de realizar la impresión, así como también la ubicación de la pieza ya que una adecuada ubicación nos permitirá ahorrar tiempo de post trabajo de esta.

Se recomienda realizar una nivelación de cama antes de iniciar la impresión, por parte automática de la maquina y otra por el personal, recomendando dejar un espacio del espesor de una hoja entre la cama y la punta del extrusor.

Para poder obtener una mejor relación en las gráficas presentadas por parte del movimiento de brazo, se recomienda realizar un proceso estadístico.

4 REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

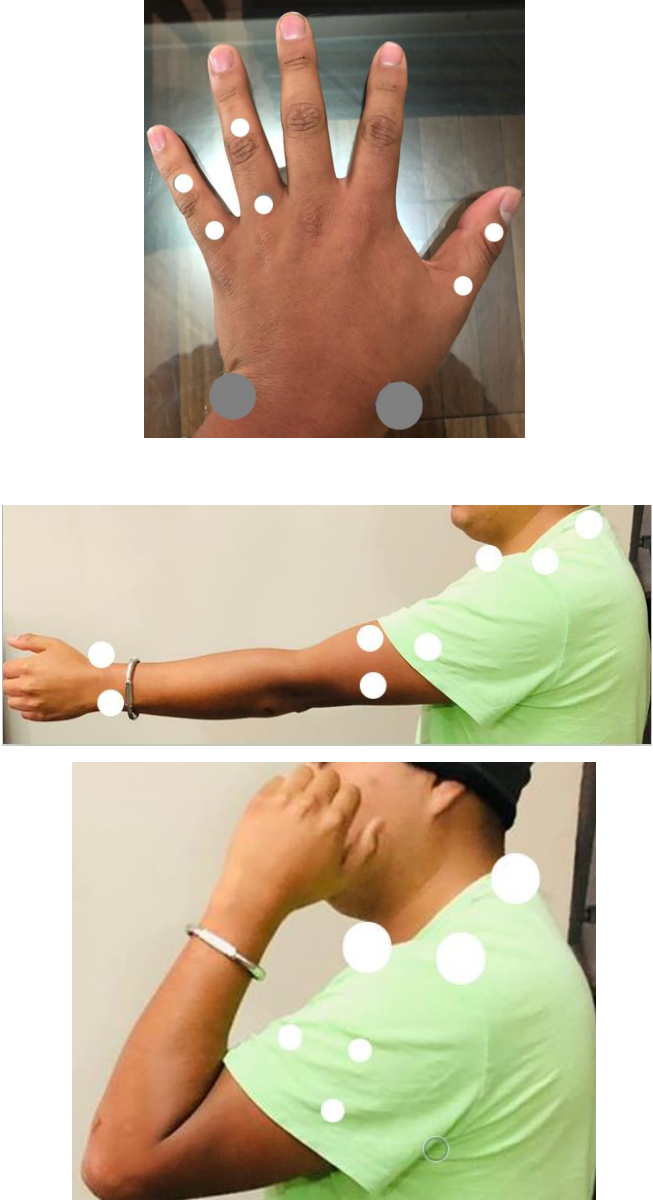
- [1] Manuel Chavez, Felipe Spitia, Asfur Lopez. Colombia (2010). Exoesqueleto para potenciar las capacidades humanas y apoyar la rehabilitación. Volumen 4, numero 7, págs. 63-73.
- [2] Organización Mundial de la Salud. (2016). Discapacidad y salud. Recuperado de <http://www.who.int/mediacentre/factsheets/fs352/es/>
- [3] Sirit, Y., Fernández, J. & Lubo, A. 2002. Accidentes de la mano en trabajadores de la Costa Oriental del Lago de Maracaibo del Estado Zulia, Venezuela, 1986-1993. Investigación Clínica, 43 (2), 79-87.
- [4] Jennifer Ortiz, Gabriela Toro. Ecuador (2018). Evaluación antropométrica de manos en estudiantes de la carrera de terapia física de la puce para la elaboración de una base de datos antropométrica de mano aplicada en el rediseño de un exoesqueleto. Pontifica universidad Católica del Ecuador. Carreta Terapia Física.
- [5] Ortopedia y ayudas técnicas. España (2022). Recopilado de: <http://www.ortopediayayudastecnicas.com/es/content/6-ortesis-que-es-y-para-que-se-utiliza#:~:text=Ortesis.,utiliza%20%2D%20Ortopedia%20y%20ayudas%20tecnicas&text=Las%20ortesis%20son%20dispositivos%2C%20soportes,%2C%20estabilizaci%C3%B3n%2C%20alineaci%C3%B3n%20o%20correcci%C3%B3n.>
- [6] Marcelino Lozada. Ecuador (2018). Diseño y construcción de un exoesqueleto mecatrónico para rehabilitación del pulgar. Escuela Politécnica Nacional. Facultad de Ingeniería Mecánica.

- [7] Pheasant & Haslegrave, C.M. (2015) Pheasant, S. & Haslegrave, C. M. (2005). BodySpace Anthropometry, Ergonomics, and the design of work. New York: Taylor & Francis Group.
- [8] Harmonic Drive SE. Alemania (2022). El exoesqueleto. Recopilado de: <https://harmonicdrive.de/es/glosario/el-exoesqueleto>
- [9] Hocoma. Armeo spring - functional arm and hand therapy. 2009. <http://www.hocoma.com/en/products/armeo/armeospring/>.
- [10] Hocoma. Armeo spring pediatric - functional arm and hand therapy for children. 2009. <http://www.hocoma.com/en/products/armeo/armeospring-pediatric/>.
- [11] Creality. Impresora 3D Ender 3Pro. China (2021). Recopilado de: <https://www.creality.com/es/goods-detail/ender-3-pro-3d-printer>.
- [12] Sean Aranda (2022). How to diagnose and Repair all Desktop 3D printing issues. 3D Printing Failures
- [13] Manuel Zahera. Valencia (2012). Congreso Internacional de Ingeniería de Proyectos Fundación Cotec. La fabricación aditiva, tecnología avanzada para el diseño y desarrollo de productos.
- [14] Cotec (2011). Fabricación aditiva. Documentos Cotec de Oportunidades Tecnológicas. Fundación Cotec. Madrid.
- [15] TRESDE. Perú (2021) Softwares de modelado 3D para crear los mejores archivos STL. Recopilado de: <https://tresde.pe/los-6-mejores-softwares-de-modelado-3d-para-crear-los-mejores-archivos-stl/>
- [16] ERASMUS3D+ (2017). Guía Técnica de impresión 3D. Unión Europea. Transferencia de conocimientos sobre conceptos básicos de impresión 3D a profesores de VET.
- [17] Fonseca Christian, Miranda Pablo. Ecuador (2018). Diseño e implementación de un prototipo de impresora 3D de cinco ejes para el ahorro de material y mejoramiento de la resistencia mecánica en piezas fabricadas mediante el método de deposición de material fundido.
- [18] Filament2print. España. Como escoger la tecnología más adecuada. Recopilado de: https://filament2print.com/es/blog/92_tecnologia-fdm-sla-sls-impresion-3d.html
- [19] Javier Paz. Chile. Porcentaje de relleno en impresión 3D. 3DWorks. Recopilado de: <https://www.3dworks.cl/post/porcentaje-de-relleno-en-impresi%C3%B3n-3d>

- [20] Medical Expo. Sistemas de Rehabilitación de mano. Recopilado de: <https://www.medicalexpo.es/fabricante-medical/sistema-rehabilitacion-mano-15840.html>
- [21] Guía descriptiva de orto prótesis, Tomo II. España. Ortesis de mano. Ortesis de miembro superior y miembro inferior. Pag 17 a 60
- [22] Dr. Sabrie Soloman. USA. Additive Manufacturing 3D Printing & Design. 4th Industrial Revolution. American SensorRx.
- [23] Lucia C (2012). 3D natives. Sinterizado selectivo por láser o SLS. Recopilado de: <https://www.3dnatives.com/es/sinterizado-selectivo-por-laser-les-explicamos-todo/#!>
- [24] ComprarImpresoras-3D. Fusión selectiva por láser (SLM). Recopilado de: <https://comprarimpresoras-3d.com/tipo/slm/>
- [25] Bitaf. Madrid. Orientación de la pieza en una impresora 3D. Recopilado de: <https://bitfab.io/es/blog/orientacion-impresion-3d/>
- [26] JEFETRONIC (2021). Retracción impresión 3D. Recopilado de: <https://jfetronic.wordpress.com/retraccion-impresion-3d/>
- [27] Demoss Prototipado S.A.S. Colombia. Impresión 3D. Recopilado de: <https://demosspro.com/cb/inicio/320-impresion-3d.html>
- [28] José Gorgues. España. (2009). Ortesis para los dedos de la mano. Recopilado de: <https://www.elsevier.es/es-revista-offarm-4-articulo-ortesis-dedos-mano-13132753>

5 ANEXOS

5.1 ANEXO I. PROTOCOLO DE ANÁLISIS CINEMÁTICO DEL MOVIMIENTO DE FLEXO-EXTENSIÓN BRAZO.

Marcadores	Localización	Imagen
<p>Sistema de marcadores de acuerdo con los movimientos (flexión, extensión)</p> <p>Marcadores: Técnicos (14)</p>	<p>Ocho marcadores técnicos estarán ubicados en la mano.</p> <p>Dos en la muñeca (uno a cada lado).</p> <p>Dos en el dedo pulgar.</p> <p>P1: primera falange P2: segunda falange</p> <p>Dos en el dedo índice.</p> <p>I1: primera falange I2: segunda falange</p> <p>Dos en el dedo meñique.</p> <p>D1: primera falange D2: segunda falange</p>	

	<p>6 marcadores técnicos se ubicarán:</p> <p>Tres a nivel del cuello.</p> <p>C7: Cuello</p> <p>H1: Hombro</p> <p>E1: esternón</p> <p>Tres en el brazo.</p> <p>Tres en el brazo.</p>	
Sistemas de referencia		
<p>Se basará en el sistema de referencia ubicado en el centro del laboratorio, ya determinado anteriormente.</p>		
Ubicación del Sujeto		
<p>El sujeto deberá ubicarse sentado en posición erguida sin apoyos.</p>	<p>Se deberá de realizar una serie de repeticiones del movimiento de flexo extensión del brazo.</p>	
Cámara de Grabación		
<p>Por medio de la utilización de fotogrametría que trabaja a 120 fotogramas por segundo disponible en el laboratorio de Bioingeniería de la Escuela Politécnica Nacional, además de la ayuda de un sensor de fuerza y cámara (teléfono móvil)</p>		

Indumentaria:

El sujeto deberá utilizar vestimenta no holgada para no permitir que los sensores sufran movimientos bruscos mientras se realiza la práctica.

Protocolo de Medición:

1. El sujeto será informado del procedimiento a ser realizado bajo su consentimiento.
2. Ubicación del sujeto en el sistema de referencia establecido.

3. Colocación de los marcadores en las posiciones correctas.
4. Información del movimiento a ser realizado.
5. El sujeto deberá permanecer en la posición establecida para proceder con los siguientes pasos.
6. El sujeto deberá realizar alrededor de 5 repeticiones o más del movimiento establecido a la velocidad más favorable para este.
7. Repetir el desde el ítem 6 las veces que sea necesaria.

