

ESCUELA POLITÉCNICA NACIONAL

FACULTAD DE INGENIERÍA MECÁNICA

**CONSTRUCCIÓN Y EVALUACIÓN DE PARÁMETROS ÓPTIMOS
PARA LA IMPRESIÓN 3D DE UNA PRÓTESIS MECÁNICA DE
MANO MUÑECA**

COMPONENTE: MECANIZADO DE PIEZAS CON POLÍMEROS

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

MANOLO ISMAEL DIAZ GUILCAMAIGUA

manolo.diaz@epn.edu.ec

DIRECTOR: CESAR RICARDO AYABACA SARRIA

cesar.ayabaca@epn.edu.ec

DMQ, agosto 2023

CERTIFICACIONES

Yo, MANOLO ISMAEL DIAZ GUILCAMAIGUA 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.

MANOLO ISMAEL DIAZ GUILCAMAIGUA

Certifico que el presente trabajo de integración curricular fue desarrollado por MANOLO ISMAEL DIAZ GUILCAMAIGUA, bajo mi supervisión.

CESAR RICARDO AYABACA SARRIA
DIRECTOR

Certificamos que revisamos el presente trabajo de integración curricular.

REVISOR1 DEL TRABAJO DE
INTEGRACIÓN CURRICULAR

REVISOR2 DEL TRABAJO DE
INTEGRACIÓN CURRICULAR

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.

MANOLO ISMAEL DIAZ GUILCAMAIGUA

CESAR RICARDO AYABACA SARRIA

NOMBRE_COLABORADOR(ES)

DEDICATORIA

Dedico el presente Trabajo de Integración Curricular a mi madre quien me apoyo durante el proceso para comenzar además de culminar mi carrera, a mi padre quien, aunque no tuviera mucho me apoyo de todo corazón, además de Alejandro quien sin llevar una gota de mi sangre se convirtió en mi hermano y se que va a estar orgulloso de mi, por lo antes mencionado el título de Ingeniero se los dedico y espero tener muchos más logros profesionales, así como personales.

AGRADECIMIENTO

Agradezco a mi tutor quien supo guiarme en el proceso para culminar con el trabajo de integración curricular, a la Facultad de Ingeniería Mecánica de la Escuela Politécnica Nacional la cual me abrió las puertas a demás que me acogió por todo este tiempo como un hijo, a mis amigos quienes me dieron una palabra de aliento para no desfallecer en el proceso.

ÍNDICE DE CONTENIDO

CERTIFICACIONES.....	I
DECLARACIÓN DE AUTORÍA.....	II
ÍNDICE DE CONTENIDO.....	V
ÍNDICE DE FIGURAS	VII
ÍNDICE DE TABLAS	IX
RESUMEN	X
ABSTRACT	XI
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
Clasificación de las prótesis.....	4
Anatomía de la Mano Humana	8
Antropometría de la mano	10
Manufactura Aditiva	11
Aplicaciones de la Impresión 3D.....	12
Ventajas de la impresión 3D	12
Desventajas de la impresión 3D	13
Filamentos	14
Filamento PLA	14
Filamento de Fibra de Carbono	15
Parámetros de Impresión 3D	16
2. METODOLOGÍA	17
2.1 Exploratoria	19
Fase 1: Identificación de Parámetros	19
Fase 2: Planteamiento del proceso de impresión	25
Tratamiento en el Slicer (Creality Slicer).....	26
Comprobación del Estado de la impresora	29
Reemplazo de Elementos defectuosos.....	30
Recarga del filamento	¡Error! Marcador no definido.

Calibración de la impresora 3D.....	34
Fase 3: Implementación de la estación de trabajo de impresión 3D.....	36
Impresora 3D Creality CP-01	36
Slicer Creality Slicer.....	37
Filamentos para la impresión 3D	38
Fase 4: Configuración de Accesorios para la impresión.....	40
2.2 Exploratoria	41
Fase 5: Configuración de variables y parámetros en el laminador	41
Fase 6: Impresión 3D.....	44
Fase 7: Postproceso	46
Fase 8: Inspección de los elementos.....	46
Fase 9: Ensamblaje	47
3. PRUEBAS, RESULTADOS, CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES....	49
3.1 Pruebas de Impresión	49
3.2 Elementos impresos en PLA y PLA Fibra de Carbono.....	50
Tiempos de impresión de los elementos en el Filamento PLA	52
3.3 Elementos impresos en TPU.....	54
Tiempos de impresión de elementos en TPU	55
3.4 Análisis de Consumo de material.....	56
3.5 Análisis de resistencia en elementos A y B.....	59
Costo de Fabricación de elementos en PLA, PLA Fibra de Carbono y TPU.	60
3.6 Presentación de Parámetros óptimos para la impresión de una prótesis Funcional	64
4. Conclusiones	66
5. Recomendaciones	68
6. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS	69
ANEXOS	72

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1.1. Prótesis moderna	3
Figura 1.2. Prótesis Estética.....	4
Figura 1.3. Prótesis Eléctrica.....	6
Figura 1.4. Prótesis Mioeléctrica	7
Figura 1.5. Prótesis Híbridas	8
Figura 1.6. Estructura Ósea de la Mano.....	9
Figura 1.7. Medidas antropométricas	10
Figura 1.8. Patrones de relleno en impresión 3D	16
Figura 2.1. Diagrama de flujo del proceso de impresión 3D.....	17
Figura 2.2. Prótesis ensamblada.....	19
Figura 2.3. Diagrama de las etapas para la impresión 3D	26
Figura 2.4. Refuerzo adhesivo para la cama caliente	28
Figura 2.5. Simulación del Elemento A (Palm Left hand).....	28
Figura 2.6. Desconexión del cable de poder.....	32
Figura 2.7. Extracción del filamento	32
Figura 2.8. Cabezal de la impresora desmontada.....	33
Figura 2.9. Desconexión de los cables.....	33
Figura 2.10. Desmontaje del bloque calefactor y ventilador de 24V.....	¡Error! Marcador no definido.
Figura 2.11. Montaje de cabezal de impresión 3D ..	¡Error! Marcador no definido.
Figura 2.12. Recarga de filamento en el mecanismo de extrusión Directa	34
Figura 2.13. Descripción del Proceso de calibración Nivel de la cama	34
Figura 2.14. Descripción del Proceso de nivelación de la cama	35
Figura 2.15. Partes de la impresora Creality CP-01	37
Figura 2.16. Entorno Visual de Creality Slicer	38
Figura 2.17. Parámetros de calidad y espesor de pared.....	42
Figura 2.18. Parámetros de velocidad y temperatura para el Material PLA.	42
Figura 2.19. Parámetros de relleno PLA Y PLA Fibra de Carbono	42
Figura 2.20. Parámetros de relleno TPU.....	43
Figura 2.21. Menú de tipos de adhesión	43
Figura 2.22. Parámetros de adhesión a la cama de impresión 3D.....	43
Figura 2.23. Visualización del <i>G-code</i> entorno de <i>Creality Slicer</i>	44
Figura 2.24. Impresión 3D conjunto de piezas en PLA	45

Figura 2.25. Ejemplo de Finalización de impresión de un elemento en 3D.....	45
Figura 2.26. Postproceso de un elemento F en filamento PLA	46
Figura 2.27. Prótesis Ensamblada en PLA Fibra de Carbono.....	47
Figura 2.28. Monofilamento de Nylon para pesca	48
Figura 2.29. Elemento de unión entre dos Falanges.....	48
Figura 3.1. Corte del elemento B impreso en filamento PLA Fibra de Carbono... ..	49
Figura 3.2. Vista en corte del Elemento A con un 25% de relleno.....	57
Figura 3.3. Tiempo Vs Consumo de material en elementos con el 25% de relleno	57
Figura 3.4. Tiempo Vs Consumo de material en prótesis con el 20% de relleno .	58
Figura 3.5. Tiempo Vs Consumo de material en prótesis con el 40% de relleno .	58
Figura 3.6. Resistencia máxima del elemento A impreso en PLA Fibra de Carbono con un 40% de relleno.....	59
Figura 3.7. Falla del Elemento B a 49,6 lb Impreso en PLA Fibra de Carbono con un 20% de relleno	60
Figura 3.8. Falla del Elemento A de 44,8 lb Impreso en PLA con un 20% de relleno.	60
Figura 3.9. Prótesis mixta Ensamblada.....	63
Figura 3.10. Entorno de Creality Slicer con una configuración del 25%.....	65

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1.1. Tabla descriptiva Manufactura Aditiva.....	12
Tabla 2.1. Metodología planteada.....	18
Tabla 2.2. Lista de Elementos de la prótesis.....	21
Tabla 2.3. Elementos tipo Manibela.....	21
Tabla 2.4. Elementos tipo biela.....	23
Tabla 2.5. Elementos de tensión y flexión.....	24
Tabla 2.6. Parametros de Seleccion en elementos impresos.....	25
Tabla 2.7. Elementos dañados.....	30
Tabla 2.8. Tabla de repuestos.....	31
Tabla 2.9. Herramientas y accesorios para la impresión 3D.....	36
Tabla 2.10. Especificaciones técnicas de los Filamento PLA, PLA Fibra de Carbono, TPU.....	39
Tabla 2.11. Características de las boquillas para impresión 3D.....	40
Tabla 2.12. Requerimientos para los elementos impresos en 3D.....	47
Tabla 3.1. Elementos tipo Manivela impreso en PLA Y PLA Fibra de Carbono... ..	50
Tabla 3.2. Elementos tipo biela impresos en PLA y PLA Fibra de Carbono.....	51
Tabla 3.3. Elementos de tensión impresos en PLA.....	52
Tabla 3.4. Tiempos de impresión en PLA y PLA Fibra de Carbono con calidad Fina con un relleno del 25%.....	53
Tabla 3.5. Tiempos de impresión en PLA y PLA Fibra de Carbono con calidad Fina con variación del relleno.....	53
Tabla 3.6. Elementos de flexión.....	54
Tabla 3.7. Tiempos de impresión en TPU calidad fina.....	55
Tabla 3.8. Material requerido en la impresión de Prótesis Completas.....	56
Tabla 3.9. Costos de impresión de los elementos que componen la prótesis.....	61
Tabla 3.10. Resultado del Análisis de Precios Unitarios.....	62
Tabla 3.11. Precios de Prótesis en distintos materiales.....	62
Tabla 3.12. Tabla de Costos y características de la Prótesis Mecánica.....	64
Tabla 3.13. Datos con los que seteo el laminador.....	65

RESUMEN

Para el desarrollo de la impresión completa de una prótesis en impresión 3D, se debe tomar en consideración las variables necesarias para una impresión óptima antes de generar un gasto excesivo de material en las pruebas de impresión iniciales. La motivación principal se destaca en el alto costo de las prótesis existentes en el mercado ecuatoriano, además de la versatilidad que nos permitimos en cuanto al uso de la manufactura aditiva por estas razones, fue necesario el uso de diferentes filamentos.

El diseño constó de 24 elementos, de los cuales 22 fueron impresos utilizando PLA y PLA con fibra de carbono, variando los rellenos para comparar su desempeño. Además, se imprimieron 2 elementos con TPU para conferir flexión a la mano protésica. Los tendones se conformaron utilizando hilos de nylon.

Para llevar a cabo el proceso de impresión, se empleó el software Creality Slicer para configurar las 24 piezas. En la fase final del proyecto, se evaluaron las prótesis resultantes a partir de los diferentes materiales y configuraciones. Los resultados obtenidos permitieron identificar la combinación óptima para la prótesis mecánica de mano y muñeca, considerando aspectos clave como la resistencia, flexibilidad y funcionalidad.

El desarrollo de esta prótesis ofrece una solución innovadora y accesible para personas con amputaciones en la extremidad superior. La utilización de materiales como el PLA y la fibra de carbono, junto con el TPU para la flexión, demostró ser efectiva en la obtención de una prótesis con características mecánicas adecuadas para una mejor adaptación y desempeño del usuario. Los hallazgos de esta investigación constituyen un importante avance en el campo de las prótesis impresas en 3D y pueden contribuir significativamente a mejorar la calidad de vida de los pacientes que requieren este tipo de soluciones.

PALABRAS CLAVE: Impresión 3D, prótesis, manufactura aditiva

ABSTRACT

For the development of the complete printing of a prosthesis in 3D printing, it is necessary to take into consideration the necessary variables for an optimal printing before generating an excessive expenditure of material in the initial printing tests. The main motivation stands out in the high cost of existing prostheses in the Ecuadorian market, in addition to the versatility that we allow us in terms of the use of additive manufacturing for these reasons, it was necessary to use different filaments.

The design consisted of 24 elements, of which 22 were printed using PLA and PLA with carbon fiber, varying the fillers to compare their performance. In addition, 2 elements were printed with TPU to confer flexion to the prosthetic hand. The tendons were formed using nylon threads.

To carry out the printing process, Creality Slicer software was used to configure the 24 parts. In the final phase of the project, the resulting prostheses were evaluated from the different materials and configurations. The results obtained made it possible to identify the optimal combination for the mechanical hand and wrist prosthesis, considering key aspects such as strength, flexibility and functionality.

The development of this prosthesis offers an innovative and accessible solution for people with upper limb amputations. The use of materials such as PLA and carbon fiber, together with TPU for bending, proved to be effective in obtaining a prosthesis with adequate mechanical characteristics for a better adaptation and performance of the user. The findings of this research constitute an important advance in the field of 3D printed prostheses and can contribute significantly to improving the quality of life of patients who require this type of solution.

KEYWORDS: 3D printing, prosthetics, additive manufacturing

1. DESCRIPCIÓN DEL COMPONENTE DESARROLLADO

En el Ecuador existe una constante evolución en el avance de la tecnología que está presente en diferentes campos profesionales como: salud, educación, tecnología, ingeniería entre otros, en estos últimos años. Sin embargo, es fundamental dar importancia el desarrollo en el campo de impresiones en 3D para el modelamiento de prótesis para cualquier parte del cuerpo humano (Aguirre, 2018).

Tomando como referencia la información del Ministerio de Salud Pública del Ecuador quienes operan tres talleres especializados en la creación de órtesis y prótesis. Estos talleres se encuentran en los hospitales: Eugenio Espejo en Quito, Isidro Ayora en Loja y el hospital Guayaquil en Guayas. Además, estos talleres todavía utilizan métodos tradicionales para fabricar prótesis activas o pasivas. Estas prótesis son de tipo estándar y están cubiertas con PVC o silicona, lo que resulta en largos tiempos de fabricación y un uso ineficiente de recursos.

Debido a estas limitaciones, la demanda de prótesis no puede ser satisfecha y muchas personas deben esperar meses, e incluso años, para poder obtener una prótesis adecuada. (Zuniga, Peck, Srivastava, & Katsavelis, 2016).

La impresión 3D está cambiando la manera de fabricación de las prótesis. Esta tecnología ha logrado que el diseño y la producción de las mismas sean increíblemente asequibles para aquellos que carecen de alguna extremidad, asimismo deben acoplarse a la medida y tamaño de cada parte del cuerpo del individuo, lo que demanda un tiempo de desarrollo del producto que puede ser meses o años, y provoca un malestar para aquellas personas que necesitan de manera urgente. Las prótesis más comunes y de mayor demanda que pueden ser impresas en equipos 3D son manos y brazos.

En 2011, Iván Owen fabricó una mano biónica y distribuyó a la comunidad archivos de su desarrollo para que la comunidad de profesionales pueda imprimir y repartir estas impresiones a la gente que necesita de una prótesis de su cuerpo. Sus esfuerzos condujeron a crear una fundación con el nombre de *e-NABLE*, una red mundial de voluntarios que utilizan las habilidades de la impresión 3D para ayudar y compartir a los necesitados, prótesis de brazos o manos.

Estos implantes oscilan en un costo aproximado de \$ 50,00 que representa un precio mínimo en comparación con aquellas que son solicitadas en hospitales o seguros médicos del país, existiendo una sobrevaloración en el precio, razón suficiente para que la persona discapacitada no vea imposibilitada de adquirir.

CERTIFICACIONES

Yo, MANOLO ISMAEL DIAZ GUILCAMAIGUA 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.

MANOLO ISMAEL DIAZ GUILCAMAIGUA

Certifico que el presente trabajo de integración curricular fue desarrollado por MANOLO ISMAEL DIAZ GUILCAMAIGUA, bajo mi supervisión.

CESAR RICARDO AYABACA SARRIA
DIRECTOR

Certificamos que revisamos el presente trabajo de integración curricular.

**REVISOR1 DEL TRABAJO DE
INTEGRACIÓN CURRICULAR**

**REVISOR2 DEL TRABAJO DE
INTEGRACIÓN CURRICULAR**

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.

MANOLO ISMAEL DIAZ GUILCAMAIGUA

CESAR RICARDO AYABACA SARRIA

NOMBRE_COLABORADOR(ES)

DEDICATORIA

Dedico el presente Trabajo de Integración Curricular a mi madre quien me apoyo durante el proceso para comenzar además de culminar mi carrera, a mi padre quien, aunque no tuviera mucho, me apoyo de todo corazón; además de Alejandro quien sin llevar una gota de mi sangre se convirtió en mi hermano y sé que va a estar orgulloso de mi, por lo antes mencionado el título de Ingeniero se los dedico y espero tener muchos más logros profesionales, así como personales.

AGRADECIMIENTO

Agradezco a mi tutor quien supo guiarme en el proceso para culminar con el trabajo de integración curricular, a la Facultad de Ingeniería Mecánica de la Escuela Politécnica Nacional la cual me abrió las puertas a demás que me acogió por todo este tiempo como un hijo, a mis amigos quienes me dieron una palabra de aliento para no desfallecer en el proceso.

ÍNDICE DE CONTENIDO

CERTIFICACIONES.....	I
DECLARACIÓN DE AUTORÍA.....	II
ÍNDICE DE CONTENIDO.....	V
ÍNDICE DE FIGURAS	VII
ÍNDICE DE TABLAS	IX
RESUMEN	X
ABSTRACT	XI
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
Clasificación de las prótesis.....	4
Anatomía de la Mano Humana	8
Antropometría de la mano	10
Manufactura Aditiva	11
Aplicaciones de la Impresión 3D.....	12
Ventajas de la impresión 3D	12
Desventajas de la impresión 3D	13
Filamentos	14
Filamento PLA	14
Filamento de Fibra de Carbono	15
Parámetros de Impresión 3D.....	16
2. METODOLOGÍA	17
2.1 Exploratoria	19
Fase 1: Identificación de Parámetros	19
Fase 2: Planteamiento del proceso de impresión	24
Tratamiento en el Slicer (Creality Slicer).....	25
Comprobación del Estado de la impresora	28
Reemplazo de Elementos defectuosos	29
Recarga del filamento	33

Calibración de la impresora 3D.....	34
Fase 3: Implementación de la estación de trabajo de impresión 3D.....	36
Impresora 3D Creality CP-01	36
Slicer Creality Slicer.....	37
Filamentos para la impresión 3D	38
Fase 4: Configuración de Accesorios para la impresión.....	40
2.2 Exploratoria	41
Fase 5: Configuración de variables y parámetros en el laminador	41
Fase 6: Impresión 3D	44
Fase 7: Postproceso.....	46
Fase 8: Inspección de los elementos.....	46
Fase 9: Ensamblaje.....	47
3. PRUEBAS, RESULTADOS, CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES....	49
3.1 Pruebas de Impresión	49
3.2 Elementos impresos en PLA y PLA Fibra de Carbono.....	50
Tiempos de impresión de los elementos en el Filamento PLA	52
3.3 Elementos impresos en TPU.....	54
Tiempos de impresión de elementos en TPU.....	55
3.4 Análisis de Consumo de material.....	56
3.5 Análisis de resistencia en elementos A y B.....	59
Costo de Fabricación de elementos en PLA, PLA Fibra de Carbono y TPU.	60
3.6 Presentación de Parámetros óptimos para la impresión de una prótesis Funcional	64
4. Conclusiones	66
5. Recomendaciones	68
6. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS	69
ANEXOS	72

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1.1. Prótesis moderna	3
Figura 1.2. Prótesis Estética.....	4
Figura 1.3. Prótesis Eléctrica.....	6
Figura 1.4. Prótesis Mioeléctrica	7
Figura 1.5. Prótesis Híbridas	8
Figura 1.6. Estructura Ósea de la Mano.....	9
Figura 1.7. Medidas antropométricas	10
Figura 1.8. Patrones de relleno en impresión 3D	16
Figura 2.1. Diagrama de flujo del proceso de impresión 3D.....	17
Figura 2.2. Prótesis ensamblada.....	19
Figura 2.3. Diagrama de las etapas para la impresión 3D	24
Figura 2.4. Refuerzo adhesivo para la cama caliente	26
Figura 2.5. Simulación del Elemento A (Palm Left hand)	27
Figura 2.6. Desconexión del cable de poder.....	30
Figura 2.7. Extracción del filamento	30
Figura 2.8. Cabezal de la impresora desmontada.....	31
Figura 2.9. Desconexión de los cables.....	31
Figura 2.10. Desmontaje del bloque calefactor y ventilador de 24V.....	32
Figura 2.11. Montaje de cabezal de impresión 3D	33
Figura 2.12. Recarga de filamento en el mecanismo de extrusión Directa	34
Figura 2.13. Descripción del Proceso de calibración Nivel de la cama	34
Figura 2.14. Descripción del Proceso de nivelación de la cama	35
Figura 2.15. Partes de la impresora Creality CP-01	37
Figura 2.16. Entorno Visual de Creality Slicer	38
Figura 2.17. Parámetros de calidad y espesor de pared.....	42
Figura 2.18. Parámetros de velocidad y temperatura para el Material PLA.	42
Figura 2.19. Parámetros de relleno PLA Y PLA Fibra de Carbono	42
Figura 2.20. Parámetros de relleno TPU	43
Figura 2.21. Menú de tipos de adhesión	43
Figura 2.22. Parámetros de adhesión a la cama de impresión 3D.....	43
Figura 2.23. Visualización del <i>G-code</i> entorno de <i>Creality Slicer</i>	44
Figura 2.24. Impresión 3D conjunto de piezas en PLA	45
Figura 2.25. Ejemplo de Finalización de impresión de un elemento en 3D.....	45

Figura 2.26. Postproceso de un elemento F en filamento PLA	46
Figura 2.27. Prótesis Ensamblada en PLA Fibra de Carbono	47
Figura 2.28. Monofilamento de Nylon para pesca	48
Figura 2.29. Elemento de unión entre dos Falanges	48
Figura 3.1. Corte del elemento B impreso en filamento PLA Fibra de Carbono...	49
Figura 3.2. Vista en corte del Elemento A con un 25% de relleno.....	57
Figura 3.3. Tiempo Vs Consumo de material en elementos con el 25% de relleno	57
Figura 3.4. Tiempo Vs Consumo de material en prótesis con el 20% de relleno .	58
Figura 3.5. Tiempo Vs Consumo de material en prótesis con el 40% de relleno .	58
Figura 3.6. Resistencia máxima del elemento A impreso en PLA Fibra de Carbono con un 40% de relleno.....	59
Figura 3.7. Falla del Elemento B a 49,6 lb Impreso en PLA Fibra de Carbono con un 20% de relleno	60
Figura 3.8. Falla del Elemento A de 44,8 lb Impreso en PLA con un 20% de relleno.	60
Figura 3.9. Prótesis mixta Ensamblada.....	63
Figura 3.10. Entorno de Creality Slicer con una configuración del 25%.....	64

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1.1. Tabla descriptiva Manufactura Aditiva.....	12
Tabla 2.1. Metodología planteada.....	18
Tabla 2.2. Lista de Elementos de la prótesis.....	20
Tabla 2.3. Elementos tipo Manibela.....	20
Tabla 2.4. Elementos tipo biela.....	22
Tabla 2.5. Elementos de tensión y flexión.....	23
Tabla 2.6. Parametros de Seleccion en elementos impresos.....	24
Tabla 2.7. Elementos dañados.....	29
Tabla 2.8. Tabla de repuestos.....	29
Tabla 2.9. Herramientas y accesorios para la impresión 3D.....	36
Tabla 2.10. Especificaciones técnicas de los Filamento PLA, PLA Fibra de Carbono, TPU.....	39
Tabla 2.11. Características de las boquillas para impresión 3D.....	40
Tabla 2.12. Requerimientos para los elementos impresos en 3D.....	47
Tabla 3.1. Elementos tipo Manivela impreso en PLA Y PLA Fibra de Carbono ...	50
Tabla 3.2. Elementos tipo biela impresos en PLA y PLA Fibra de Carbono.....	51
Tabla 3.3. Elementos de tensión impresos en PLA.....	52
Tabla 3.4. Tiempos de impresión en PLA y PLA Fibra de Carbono con calidad Fina con un relleno del 25%.....	53
Tabla 3.5. Tiempos de impresión en PLA y PLA Fibra de Carbono con calidad Fina con variación del relleno.....	53
Tabla 3.6. Elementos de flexión.....	54
Tabla 3.7. Tiempos de impresión en TPU calidad fina.....	55
Tabla 3.8. Material requerido en la impresión de Prótesis Completas.....	56
Tabla 3.9. Costos de impresión de los elementos que componen la prótesis.....	61
Tabla 3.10. Resultado del Análisis de Precios Unitarios.....	62
Tabla 3.11. Precios de Prótesis en distintos materiales.....	62
Tabla 3.12. Tabla de Costos y características de la Prótesis Mecánica.....	64
Tabla 3.13. Datos con los que seteo el laminador.....	64

RESUMEN

Para el desarrollo de la impresión completa de una prótesis en impresión 3D, se debe tomar en consideración las variables necesarias para una impresión óptima antes de generar un gasto excesivo de material en las pruebas de impresión iniciales. La motivación principal se destaca en el alto costo de las prótesis existentes en el mercado ecuatoriano, además de la versatilidad que nos permitimos en cuanto al uso de la manufactura aditiva por estas razones, fue necesario el uso de diferentes filamentos.

El diseño constó de 24 elementos, de los cuales 22 fueron impresos utilizando PLA y PLA con fibra de carbono, variando los rellenos para comparar su desempeño. Además, se imprimieron 2 elementos con TPU para conferir flexión a la mano protésica. Los tendones se conformaron utilizando hilos de nylon.

Para llevar a cabo el proceso de impresión, se empleó el software Creaform Slicer para configurar las 24 piezas. En la fase final del proyecto, se evaluaron las prótesis resultantes a partir de los diferentes materiales y configuraciones. Los resultados obtenidos permitieron identificar la combinación óptima para la prótesis mecánica de mano y muñeca, considerando aspectos clave como la resistencia, flexibilidad y funcionalidad.

El desarrollo de esta prótesis ofrece una solución innovadora y accesible para personas con amputaciones en la extremidad superior. La utilización de materiales como el PLA y la fibra de carbono, junto con el TPU para la flexión, demostró ser efectiva en la obtención de una prótesis con características mecánicas adecuadas para una mejor adaptación y desempeño del usuario. Los hallazgos de esta investigación constituyen un importante avance en el campo de las prótesis impresas en 3D y pueden contribuir significativamente a mejorar la calidad de vida de los pacientes que requieren este tipo de soluciones.

PALABRAS CLAVE: Impresión 3D, prótesis, manufactura aditiva

ABSTRACT

For the development of the complete printing of a prosthesis in 3D printing, it is necessary to take into consideration the necessary variables for an optimal printing before generating an excessive expenditure of material in the initial printing tests. The main motivation stands out in the high cost of existing prostheses in the Ecuadorian market, in addition to the versatility that we allow us in terms of the use of additive manufacturing for these reasons, it was necessary to use different filaments.

The design consisted of 24 elements, of which 22 were printed using PLA and PLA with carbon fiber, varying the fillers to compare their performance. In addition, 2 elements were printed with TPU to confer flexion to the prosthetic hand. The tendons were formed using nylon threads.

To carry out the printing process, Creality Slicer software was used to configure the 24 parts. In the final phase of the project, the resulting prostheses were evaluated from the different materials and configurations. The results obtained made it possible to identify the optimal combination for the mechanical hand and wrist prosthesis, considering key aspects such as strength, flexibility and functionality.

The development of this prosthesis offers an innovative and accessible solution for people with upper limb amputations. The use of materials such as PLA and carbon fiber, together with TPU for bending, proved to be effective in obtaining a prosthesis with adequate mechanical characteristics for a better adaptation and performance of the user. The findings of this research constitute an important advance in the field of 3D printed prostheses and can contribute significantly to improving the quality of life of patients who require this type of solution.

KEYWORDS: 3D printing, prosthetics, additive manufacturing

1. DESCRIPCIÓN DEL COMPONENTE DESARROLLADO

En el Ecuador existe una constante evolución en el avance de la tecnología que está presente en diferentes campos profesionales como: salud, educación, tecnología, ingeniería entre otros, en estos últimos años. Sin embargo, es fundamental dar importancia el desarrollo en el campo de impresiones en 3D para el modelamiento de prótesis para cualquier parte del cuerpo humano (Aguirre, 2018).

Tomando como referencia la información del Ministerio de Salud Pública del Ecuador quienes operan tres talleres especializados en la creación de órtesis y prótesis. Estos talleres se encuentran en los hospitales: Eugenio Espejo en Quito, Isidro Ayora en Loja y el hospital Guayaquil en Guayas. Además, estos talleres todavía utilizan métodos tradicionales para fabricar prótesis activas o pasivas. Estas prótesis son de tipo estándar y están cubiertas con PVC o silicona, lo que resulta en largos tiempos de fabricación y un uso ineficiente de recursos.

Debido a estas limitaciones, la demanda de prótesis no puede ser satisfecha y muchas personas deben esperar meses, e incluso años, para poder obtener una prótesis adecuada. (Zuniga, Peck, Srivastava, & Katsavelis, 2016).

La impresión 3D está cambiando la manera de fabricación de las prótesis. Esta tecnología ha logrado que el diseño y la producción de las mismas sean increíblemente asequibles para aquellos que carecen de alguna extremidad, asimismo deben acoplarse a la medida y tamaño de cada parte del cuerpo del individuo, lo que demanda un tiempo de desarrollo del producto que puede ser meses o años, y provoca un malestar para aquellas personas que necesitan de manera urgente. Las prótesis más comunes y de mayor demanda que pueden ser impresas en equipos 3D son manos y brazos.

En 2011, Iván Owen fabricó una mano biónica y distribuyó a la comunidad archivos de su desarrollo para que la comunidad de profesionales pueda imprimir y repartir estas impresiones a la gente que necesita de una prótesis de su cuerpo. Sus esfuerzos condujeron a crear una fundación con el nombre de *e-NABLE*, una red mundial de voluntarios que utilizan las habilidades de la impresión 3D para ayudar y compartir a los necesitados, prótesis de brazos o manos.

Estos implantes oscilan en un costo aproximado de \$ 50,00 que representa un precio mínimo en comparación con aquellas que son solicitadas en hospitales o seguros médicos del país, existiendo una sobrevaloración en el precio, razón suficiente para que la persona discapacitada no vea imposibilitada de adquirir.

Partiendo de los antecedentes antes descritos, la propuesta de este Trabajo de Integración Curricular consiste en optimizar los parámetros e imprimir un modelo 3D de una prótesis de mano-muñeca, con base en el uso y desarrollo de materiales económicos y de calidad para socializarlo con la población que lo necesite.

1.1 Objetivo general

Fabricar una prótesis mecánica mediante el uso de tecnología de impresión 3D en 2 tipos de filamentos (PLA, Fibra de carbono), para generar el código G e ingresar los parámetros de impresión se usará el laminador por defecto mediante una impresora CP-01 de *Creality* (*Creality Slicer*)

1.2 Objetivos específicos

1. Estudiar el modelado de prótesis de mano muñeca en base de miembros humanos funcionales, para la impresión de un diseño ergonómico que se pueda fabricar con una impresora de uso personal (Impresora no industrial).
2. Cotejar parámetros mediante el uso de laminador *Creality Slicer* para la impresión en 2 diferentes materiales (PLA y fibra de carbono), comparar las piezas impresas y elegir los parámetros óptimos.
3. Validar las impresiones mediante pruebas de resistencia mecánica de compresión, así como de funcionalidad.

1.3 Alcance

En el presente proyecto se abordará la necesidad de la producción económica de prótesis mecánicas de buena resistencia, así como ergonómicas dentro del mercado nacional. Posteriormente se realizará un análisis de variables involucradas en la impresión 3D como relleno, altura de capa y uso de soportes, y con el análisis previo se definirán las variables adecuadas para generar piezas de buena calidad y resistencia. Dentro del estudio de las variables se tomará en cuenta la opción más viable y barata para la impresión 3D, y finalmente se cotejará el diseño con la normativa vigente para la fabricación de prótesis mecánicas.

1.4 Marco teórico

La impresión 3D es una técnica de fabricación aditiva que ha revolucionado la manera en que se pueden crear objetos personalizados y de alta precisión. Esta técnica se ha utilizado cada vez más en la creación de prótesis de mano debido a sus múltiples ventajas, tales como la capacidad de producir piezas personalizadas y la reducción de los costos de producción.

La prototipación rápida es una técnica que se utiliza en la impresión 3D para crear prototipos de prótesis de mano. También permite construir prototipos en un tiempo corto y a un costo menor que los métodos tradicionales de fabricación, permitiendo una producción de prótesis de mano personalizadas, adaptadas a las necesidades y características de cada paciente. Esto es especialmente importante en el caso de prótesis de mano, ya que cada persona tiene diferentes necesidades y requerimiento, siendo que permite la creación de prótesis de mano más ligeras y cómodas, lo que mejora la calidad de vida de los pacientes. Además, la impresión 3D permite la producción de prótesis de mano más duraderas y resistentes, lo que reduce la necesidad de reemplazo frecuente (Velásquez, 2021).

Por otro lado, ofrece la posibilidad de ofrecer una variedad de materiales para las prótesis de mano, haciendo que se adapten a las necesidades específicas de cada paciente. Por ejemplo, las prótesis de mano impresas en 3D pueden ser más flexibles o más rígidas según sea necesario. La **Figura 1.1**, presenta un ejemplo de un prototipo de una mano impresa en 3D.



Figura 1.1. Prótesis moderna

Fuente: Velásquez, 2021

Clasificación de las prótesis

Existen diferentes tipos de prótesis de mano que se pueden clasificar de la siguiente manera:

Prótesis estéticas

Estas prótesis se diseñan para imitar la apariencia de una mano real, pero no tienen funciones motoras. Están hechas para cubrir la extremidad amputada y ayudar al paciente a sentirse más cómodo con su apariencia (MEDIPRAX, 2020). La **Figura 1.2**, presenta el prototipo de una mano estéticamente humana.



Figura 1.2. Prótesis Estética

Fuente: Mediprax, 2020

Prótesis Funcionales

Las prótesis funcionales de mano son dispositivos diseñados para ayudar a las personas con amputaciones a realizar una variedad de tareas cotidianas, como agarrar y soltar objetos, escribir, comer, vestirse, y otras. También pueden ser controladas mediante una variedad de métodos, incluyendo la activación por los músculos residuales, sensores de presión o un control remoto (Mediprax, 2020).

Algunas de las características y beneficios de las prótesis funcionales de mano son:

1. **Movilidad y funcionalidad mejoradas:** Las prótesis funcionales de mano permiten a los pacientes realizar una variedad de tareas cotidianas y proporcionan una mayor movilidad y funcionalidad en comparación con las prótesis pasivas o estéticas.
2. **Control y precisión:** Las prótesis funcionales de mano pueden ser controladas de manera precisa y con mayor facilidad mediante diferentes mecanismos, lo que permite a los pacientes realizar tareas complejas con mayor eficacia.

3. **Adaptabilidad y personalización:** Las prótesis funcionales de mano pueden ser adaptadas y personalizadas según las necesidades específicas de cada paciente, incluyendo el tamaño, la forma y el nivel de funcionalidad deseado.
4. **Sensación de confianza y normalidad:** Las prótesis funcionales de mano pueden ayudar a los pacientes a sentirse más confiados y seguros en sus actividades diarias y a normalizar su apariencia y funcionalidad.

Prótesis mecánicas

Las prótesis mecánicas de mano son dispositivos simples que proporcionan una funcionalidad básica para las personas con amputaciones de mano, no requieren tecnología avanzada y son generalmente menos costosas que las prótesis eléctricas o híbridas.

Algunas de las características y beneficios de las prótesis mecánicas de mano son:

1. **Funcionalidad básica:** Estas proporcionan una funcionalidad básica que puede ayudar a los usuarios a realizar tareas cotidianas, como agarrar y soltar objetos.
2. **Simplicidad:** Son dispositivos simples y no requieren tecnología avanzada, lo que las hace más asequibles y accesibles para un mayor número de personas.
3. **Durabilidad:** Generalmente son más duraderas que las prótesis eléctricas o híbridas, lo que significa que pueden durar más tiempo y requerir menos reparaciones.
4. **Adaptabilidad:** Pueden ser adaptadas y ajustadas según las necesidades específicas de cada usuario, incluyendo el tamaño, la forma y la funcionalidad deseada.

Prótesis eléctricas

Las prótesis eléctricas de mano son dispositivos que utilizan tecnología avanzada para proporcionar una funcionalidad adicional y un mayor grado de control para las personas con amputaciones de mano. Estas prótesis pueden ser controladas mediante señales eléctricas que se transmiten a través de electrodos que se colocan en la piel, o mediante un sistema de control remoto (OrtoSur, 2023).

Algunas de las características y beneficios de las prótesis eléctricas de mano son:

1. **Movilidad mejorada:** Pueden proporcionar una mayor movilidad y control para las personas con amputaciones, lo que les permite realizar una variedad de tareas cotidianas con mayor facilidad y eficacia.
2. **Control preciso:** Pueden ser controladas con una mayor precisión, lo que permite a los usuarios realizar tareas complejas con mayor facilidad y eficacia.
3. **Funciones personalizadas:** Están programadas para realizar funciones personalizadas según las necesidades y preferencias individuales de cada usuario.
4. **Retroalimentación sensorial:** Son equipadas con sensores que proporcionan retroalimentación sensorial al usuario, lo que les permite sentir el agarre y la presión en la prótesis y adaptarse mejor a su uso.
5. **Adaptabilidad:** Se las pueden adaptar y ajustar según las necesidades específicas de cada usuario, incluyendo el tamaño, la forma y la funcionalidad deseada.

La **Figura 1.3**, presenta el prototipo de una mano de alta tecnología con el uso de sensores musculares y programación digital.

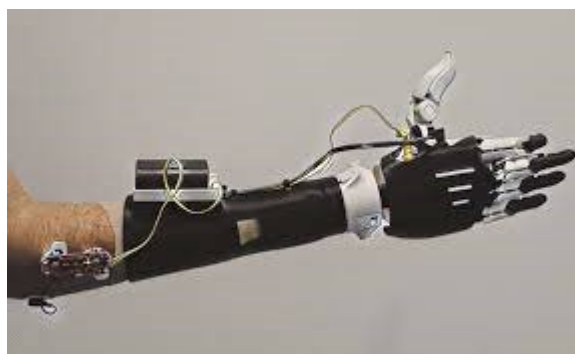


Figura 1.3. Prótesis Eléctrica

Fuente: OrtoSur, 2023

Prótesis mioeléctricas

Las prótesis mioeléctricas de mano son dispositivos avanzados que utilizan tecnología para permitir a las personas con amputaciones de mano controlar su prótesis mediante señales musculares. Estas señales son recogidas por electrodos colocados en la piel del usuario y transmitidas a un microprocesador, que controla la prótesis para realizar movimientos precisos.

Algunas de las características y beneficios de las prótesis mioeléctricas de mano son:

1. **Control preciso:** Estas prótesis permiten un mayor control y precisión en los movimientos, lo que les permite a los usuarios realizar tareas más complejas con mayor facilidad.
2. **Sensación más natural:** Proporcionan una sensación más natural y realista al usuario, ya que el control de la prótesis es similar al de una mano real (Valida, 2023).
3. **Adaptabilidad:** Están diseñadas para ser adaptadas y ajustadas según las necesidades específicas de cada usuario, incluyendo el tamaño, la forma y la funcionalidad deseada.
4. **Retroalimentación sensorial:** Algunas prótesis mioeléctricas de mano están equipadas con sensores que proporcionan retroalimentación sensorial al usuario, lo que les permite sentir el agarre y la presión en la prótesis y adaptarse mejor a su uso.

La **Figura 1.4**, nos presenta el avance de la prótesis eléctrica con la implementación de servomotores y el uso de la inteligencia artificial para el control de sensores musculares.



Figura 1.4. Prótesis Mioeléctrica

Fuente: Valida, 2023

Prótesis Híbridas

Las prótesis híbridas de mano son dispositivos avanzados que combinan la tecnología mioeléctrica y mecánica para proporcionar una funcionalidad mejorada a los usuarios con amputaciones de mano. Utilizan una combinación de sensores mioeléctricos y mecánicos para controlar los movimientos de la prótesis y proporcionar una mayor precisión y control (Lopez, 2015).

Algunas de las características y beneficios de las prótesis híbridas de mano son:

1. **Mayor funcionalidad:** Las prótesis híbridas de mano combinan la tecnología mioeléctrica y mecánica para proporcionar una funcionalidad mejorada y una mayor precisión en los movimientos.
2. **Sensación más natural:** Ayudan a proporcionar una sensación más natural y realista al usuario, ya que el control de la prótesis es similar al de una mano real.
3. **Adaptabilidad:** Permiten ser adaptadas y ajustadas según las necesidades específicas de cada usuario, incluyendo el tamaño, la forma y la funcionalidad deseada.
4. **Retroalimentación sensorial:** Algunas prótesis híbridas de mano están equipadas con sensores que proporcionan retroalimentación sensorial al usuario, lo que les permite sentir el agarre y la presión en la prótesis y adaptarse mejor a su uso.

La **Figura 1.5**, nos permite visualizar la combinación de la arquitectura de las prótesis mecánicas y mioeléctricas con la implementación de soportes o fajas en el cuerpo humano.



Figura 1.5. Prótesis Híbridas

Fuente: Lopez, 2015

Anatomía de la Mano Humana

La mano es una de las partes más complejas del cuerpo humano y está compuesta por una serie de huesos, músculos, tendones, ligamentos, nervios y vasos sanguíneos que trabajan juntos para permitir una amplia gama de movimientos y funciones (Prieto, 2023).

Los principales componentes anatómicos de la mano son:

Huesos: La mano está compuesta por 27 huesos, incluyendo los ocho huesos del carpo en la muñeca, cinco huesos metacarpianos en la palma de la mano y 14 huesos de los dedos.

1. **Músculos:** La mano está controlada por más de 30 músculos que se extienden desde el antebrazo hasta la mano y los dedos.
2. **Tendones:** Los tendones conectan los músculos a los huesos y permiten la movilidad de la mano y los dedos.
3. **Ligamentos:** Los ligamentos son bandas de tejido conectivo que conectan los huesos entre sí y proporcionan estabilidad y soporte a la mano.
4. **Nervios:** La mano está inervada por una compleja red de nervios que permiten la sensibilidad y la movilidad fina.
5. **Vasos sanguíneos:** Existe una red de vasos sanguíneos que suministran sangre y nutrientes a los huesos, músculos y tejidos de la mano.

La mano se divide en tres secciones principales: la muñeca, la palma de la mano y los dedos. La muñeca es la articulación que conecta la mano al antebrazo y permite la flexión y extensión de la mano. La palma de la mano es la superficie de la mano que se utiliza para agarrar y sostener objetos, mientras que los dedos permiten una amplia gama de movimientos y precisión.

La **Figura 1.6**, muestra la anatomía y clasificación ósea de los componentes que forman la mano humana.



Figura 1.6. Estructura Ósea de la Mano

Fuente: Prieto, 2023

Antropometría de la mano

La antropometría de la mano se refiere a las medidas físicas de la mano, incluyendo la longitud, anchura, circunferencia y peso. Estas medidas son importantes en la fabricación de prótesis de mano y en la ergonomía para la selección de herramientas y equipos que se ajusten a la mano del usuario (ICONOFACTO, 2015).

Las medidas antropométricas de la mano incluyen:

- **Longitud de la mano:** se mide desde la punta del dedo medio hasta la base de la palma de la mano.
- **Anchura de la mano:** se mide desde el extremo del dedo meñique hasta el extremo del dedo pulgar, con los dedos juntos.
- **Circunferencia de la mano:** se mide alrededor de la palma de la mano, justo debajo de los nudillos.
- **Longitud de los dedos:** se mide desde la base del dedo hasta la punta del dedo.
- **Anchura de los dedos:** se mide en la parte más ancha de cada dedo.
- **Peso de la mano:** se puede medir utilizando una balanza.

La **Figura 1.7**, muestra estas medidas según la edad, el sexo y la estatura de la persona, por lo que es importante realizar mediciones precisas y tomar en cuenta las diferencias individuales para asegurar un ajuste adecuado de las prótesis y herramientas ergonómicas.

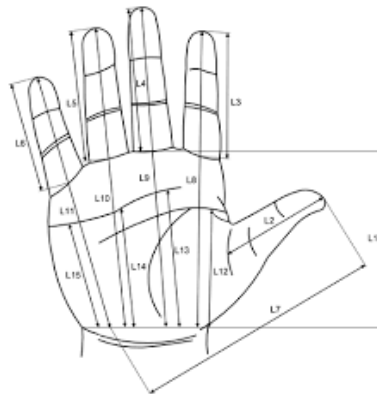


Figura 1.7. Medidas antropométricas

Fuente: ICONOFACTO, 2015

Para visualizar toda la descripción correspondiente en las dimensiones de la palma de la mano humana se puede evidenciar en el **ANEXO I**.

Manufactura Aditiva

La manufactura aditiva, también conocida como impresión 3D, es un proceso revolucionario que permite la creación de objetos tridimensionales mediante la superposición de capas sucesivas de material.

Según Núñez y García (A.Núñez & J.García, 2020), este método de fabricación se ha convertido en una tecnología disruptiva en diversos sectores industriales, incluyendo la medicina, la aeroespacial y la automotriz. La manufactura aditiva ofrece múltiples ventajas en comparación con los métodos de fabricación tradicionales.

A decir de Smith (GARCÍA, 2018), una de las principales ventajas es la capacidad de producir piezas altamente personalizadas y complejas con una mayor eficiencia y precisión. Además, este proceso reduce la cantidad de desperdicio de material, lo que contribuye a una producción más sostenible y amigable con el medio ambiente.

En términos de aplicaciones, la manufactura aditiva ha demostrado ser especialmente útil en la creación de prototipos rápidos, según investigaciones de Johnson y White (Johnson, 2019). Esta tecnología permite a los diseñadores y fabricantes iterar y mejorar sus diseños de manera más ágil y económica. Además, la impresión 3D ha demostrado ser una herramienta valiosa en la medicina, donde se utiliza para la fabricación de prótesis personalizadas, modelos anatómicos y dispositivos médicos.

Existen varios tipos de manufactura aditiva que se utilizan en diferentes aplicaciones industriales. Para Agarwal y Jha (Tavares & Carneiro, 2021), algunos de los métodos más comunes son la estereolitografía (SLA), la fusión por deposición de material (FDM), la sinterización selectiva por láser (SLS) y la impresión de chorro de tinta (*Inkjet*). Estos métodos se diferencian en la forma en que se depositan y solidifican los materiales, lo que afecta las propiedades y la precisión de los objetos producidos.

Cada tipo de manufactura aditiva tiene sus ventajas y limitaciones, lo que los hace más adecuados para ciertas aplicaciones específicas en campos como la medicina, la industria aeroespacial y la fabricación de prototipos (ver **Tabla 1.1**).

Tabla 1.1. Tabla descriptiva Manufactura Aditiva

Fuente: Additive Manufacturing: Current State, Future Potential, Gaps & Needs, and Recommendations, 2015

Suministro	Proceso	Técnicas de deposición de Capas	Fase de Cambio	Materiales
Líquida	Estereolitografía (SLA)	Curado Líquido por capas	Fotopolimerización	Fotopolímeros
	Modelo por deposición Fundida	Extrusión de polímero Fundido	Solidificación por enfriamiento	Polímeros en forma de Filamento
Polvo	Manufactura mediante partículas Balísticas	Deposición de Gotas	Solidificación por enfriamiento	Polímeros y Cera
	Impresión Tridimensional	Capa de polvo y deposición de gotas de aglutinamiento	Sin cambio de Fase	Polímeros, cerámicos, arena y polvos metálicos.
	Sinterización Láser selectiva	Capa de polvo	Sinterización activada por Láser y solidificación	Metales, polímeros cerámicos, arena o material aglutinante
Sólida	Manufactura de Objetos laminados	Deposición de material laminado	Sin cambio de fase	Papel y polímeros

Aplicaciones de la Impresión 3D

La impresión 3D, o manufactura aditiva, ha demostrado tener una amplia gama de aplicaciones en diversos campos. Según Murr et al (Nazir, y otros, 2023), en la medicina, la impresión 3D se utiliza para fabricar prótesis personalizadas, modelos anatómicos para la planificación quirúrgica y dispositivos médicos específicos.

En la industria aeroespacial, se utiliza para crear componentes livianos y complejos, reduciendo el peso de las aeronaves y mejorando la eficiencia. También, en la industria automotriz, la impresión 3D se emplea en la fabricación de piezas de repuesto y prototipos rápidos. Además, se ha utilizado en la arquitectura y la construcción para la creación de maquetas y estructuras complejas. En resumen, la impresión 3D ha demostrado ser una tecnología versátil con aplicaciones en diversos sectores industriales.

Ventajas de la impresión 3D

La impresión 3D, o manufactura aditiva, ofrece numerosas ventajas en comparación con los métodos de fabricación tradicionales.

Kumar y Singaravel (Jaiswal, 2020), sostienen que una de las principales ventajas, es la capacidad de producir piezas altamente personalizadas y complejas de manera más eficiente y precisa. Esto permite la fabricación de objetos únicos y adaptados a las necesidades específicas de cada individuo o aplicación.

En este contexto, la impresión 3D reduce significativamente la cantidad de desperdicio de material en comparación con los métodos convencionales, de acuerdo a investigaciones de Gibson et al (Gibson, Rosen, & Stucker, 2023). Al construir los objetos capa por capa, se utiliza solo la cantidad necesaria de material, lo que contribuye a una producción más sostenible y amigable con el medio ambiente.

Otra ventaja importante de la impresión 3D es la capacidad de realizar iteraciones rápidas en el proceso de diseño y fabricación. Según Melchels y Feijen (Lee, 2014), esto permite a los diseñadores y fabricantes probar y mejorar sus diseños de manera más ágil y económica. Además, la tecnología de impresión 3D facilita la fabricación de prototipos rápidos, lo que acelera el desarrollo de productos y reduce los costos asociados con la fabricación de moldes y herramientas específicas.

Desventajas de la impresión 3D

A pesar de las numerosas ventajas de la impresión 3D, también existen algunas desventajas asociadas con esta tecnología. Para Berman (Berman, 2011), una de las principales limitaciones es la velocidad de impresión. La fabricación aditiva puede ser un proceso lento en comparación con los métodos de producción tradicionales, especialmente cuando se trata de objetos grandes o complejos. Esto puede afectar la eficiencia y la viabilidad de la impresión 3D en ciertos escenarios.

Otra desventaja de la impresión 3D es la limitada variedad de materiales disponibles en comparación con los métodos tradicionales de fabricación, a criterio de Campbell et al (Campbell, Bourell, & Gibson, 2012).

Aunque la gama de materiales utilizados en la impresión 3D ha aumentado en los últimos años, todavía existen limitaciones en términos de propiedades mecánicas, resistencia química y termal, y otros factores críticos para ciertas aplicaciones industriales específicas, también la precisión dimensional y la calidad superficial de los objetos impresos en 3D pueden verse afectadas en comparación con los métodos tradicionales, según investigaciones de Huang et al (Additive Manufacturing: Current State, Future Potential,

Gaps & Needs, and Recommendations, 2015). La resolución y la calidad de la superficie pueden no ser tan altas como las obtenidas con técnicas convencionales, lo que puede ser un factor limitante para ciertas aplicaciones donde se requiere una alta precisión y acabado.

Filamentos

Existen varios tipos de filamentos que se pueden utilizar en la impresión 3D. A continuación, se describen algunos de los más comunes:

PLA (ácido poliláctico): Es uno de los filamentos más utilizados en la impresión 3D debido a su facilidad de uso, bajo costo y amplia disponibilidad. Se compone de ácido láctico, que se produce a partir de recursos renovables como el maíz y la caña de azúcar. El PLA es biodegradable y se puede reciclar.

ABS (acrilonitrilo-butadieno-estireno): Es un filamento resistente y duradero que se utiliza comúnmente en la impresión 3D. Es más difícil de imprimir que el PLA debido a su alta temperatura de fusión y su tendencia a deformarse, pero ofrece una mayor resistencia a los golpes y al calor.

PET (tereftalato de polietileno): Es un filamento transparente y resistente que se utiliza en la impresión 3D de piezas que requieren una alta resistencia a la tracción y al calor. Es fácil de imprimir y se puede reciclar.

Nylon: Es un filamento fuerte y flexible que se utiliza para la impresión 3D de piezas que requieren una alta resistencia a la tracción y al desgaste. Es más difícil de imprimir que el PLA y el ABS, pero ofrece una mayor durabilidad y flexibilidad.

TPU (poliuretano termoplástico): Es un filamento elástico y flexible que se utiliza para la impresión 3D de piezas que requieren una alta flexibilidad y amortiguación de choque. Es fácil de imprimir y se puede reciclar.

PVA (alcohol polivinílico): Es un filamento soluble en agua que se utiliza como material de soporte en la impresión 3D de piezas complejas. Se utiliza para imprimir estructuras de soporte temporales que se pueden disolver en agua después de la impresión.

Filamento PLA

El filamento PLA (ácido poliláctico, por sus siglas en inglés) es uno de los materiales más utilizados en la impresión 3D debido a sus excelentes propiedades. Este material es un termoplástico biodegradable y no tóxico, hecho a partir de recursos naturales como el maíz o la caña de azúcar. Entre las principales características del filamento PLA se encuentran:

- **Facilidad de impresión:** El PLA es fácil de imprimir en una amplia variedad de impresoras 3D debido a su bajo punto de fusión (entre 160 y 220 grados Celsius) y su adhesión a la plataforma de impresión.
- **Biodegradable:** El PLA se descompone en condiciones de compostaje en un período de 6 a 24 meses, lo que lo convierte en una opción ecológica y sostenible.
- **Resistencia y rigidez:** El PLA es un material rígido y resistente a la tracción, lo que lo hace adecuado para la impresión de piezas que requieren alta precisión y estabilidad.
- **Variedad de colores:** El PLA está disponible en una amplia variedad de colores y acabados, lo que permite la impresión de piezas con diferentes estilos y aspectos.
- **Poca contracción:** El PLA tiene una contracción muy baja, lo que significa que las piezas impresas no se deforman ni se encogen después de la impresión.
- **Bajo olor:** A diferencia de otros materiales, el PLA no desprende olores fuertes ni tóxicos durante la impresión.

Filamento de Fibra de Carbono

El filamento de fibra de carbono es un material compuesto utilizado en la impresión 3D para producir piezas fuertes, ligeras y resistentes. Este compuesto por una matriz termoplástica, como el PLA, reforzada con fibras de carbono de alta resistencia. Entre las principales características del filamento de fibra de carbono se encuentran:

- **Resistencia y rigidez:** Las fibras de carbono son extremadamente resistentes y rígidas, lo que proporciona a las piezas impresas una gran resistencia mecánica y estabilidad dimensional.
- **Ligereza:** La relación resistencia-peso del filamento de fibra de carbono es muy alta, lo que significa que las piezas impresas son muy ligeras y pueden soportar cargas pesadas sin deformarse.
- **Estética:** Las piezas impresas con filamento de fibra de carbono tienen un aspecto distintivo y atractivo, con una textura brillante y un patrón de vetas único.
- **Dificultad de impresión:** Debido a la rigidez y dureza de las fibras de carbono, el filamento de fibra de carbono es más difícil de imprimir que otros materiales. Requiere una extrusora de alta temperatura y una cama caliente para evitar la deformación.

- **Costo:** El filamento de fibra de carbono es más caro que otros filamentos, debido al proceso de fabricación de las fibras y a su baja producción en comparación con otros materiales.

Parámetros de Impresión 3D

La impresión 3D, o manufactura aditiva, implica la fabricación de objetos tridimensionales mediante la superposición de capas sucesivas de material.

Según Anzalone et al (Anzalone, Glover, & Pearce, 2013), existen varios parámetros clave que influyen en el proceso de impresión 3D y en la calidad de los objetos resultantes. Estos parámetros incluyen la temperatura de fusión del material utilizado, la velocidad de impresión, la densidad de energía del láser o la potencia del cabezal de extrusión, el espesor de la capa, la orientación y el diseño de soporte, entre otros.

La temperatura de fusión del material es un factor crucial para lograr una correcta adhesión entre las capas y obtener una estructura sólida y resistente. La velocidad de impresión determina la rapidez con la que se depositan las capas de material y puede influir en la precisión dimensional y la calidad superficial del objeto impreso. La densidad de energía del láser o la potencia del cabezal de extrusión afecta la fusión y solidificación del material, y su optimización es necesaria para garantizar la integridad estructural del objeto.

La **Figura 1.8**, muestra el espesor de la capa determina la resolución y la precisión del objeto impreso, siendo una capa más delgada asociada a una mayor calidad y detalle, pero también a un tiempo de impresión más largo. La orientación y el diseño de soporte son importantes para evitar deformaciones y asegurar la estabilidad del objeto durante la impresión.

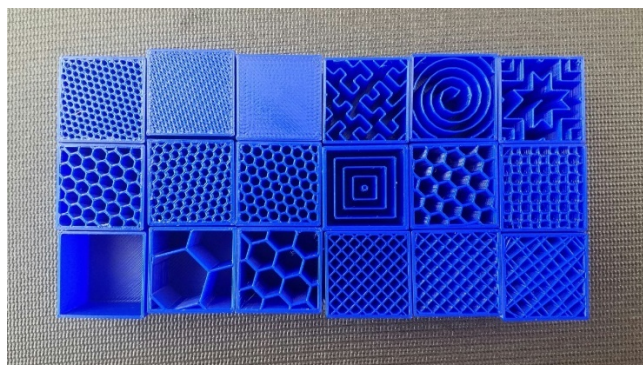


Figura 1.8. Patrones de relleno en impresión 3D

Fuente: Anzalone, Glover, & Pearce, 2013

2. METODOLOGÍA

Para definir y evaluar la impresión 3D de una prótesis mecánica de una mano se toma como inicio un modelo diseñado en un software CAD así como un laminador (*Creativity Slicer*) para analizar los parámetros adecuados para la impresión, así como también un análisis de costos de impresión, materiales, parámetros específicos en cada material usado para imprimir el diseño y el tiempo que se toma en cada elemento. Para cumplir con los objetivos planteados en la metodología

La **Figura 2.1**, muestra el diagrama de flujo que conlleva la lógica y parámetros para el inicio de desarrollo de una prótesis humana mediante la impresión 3D.

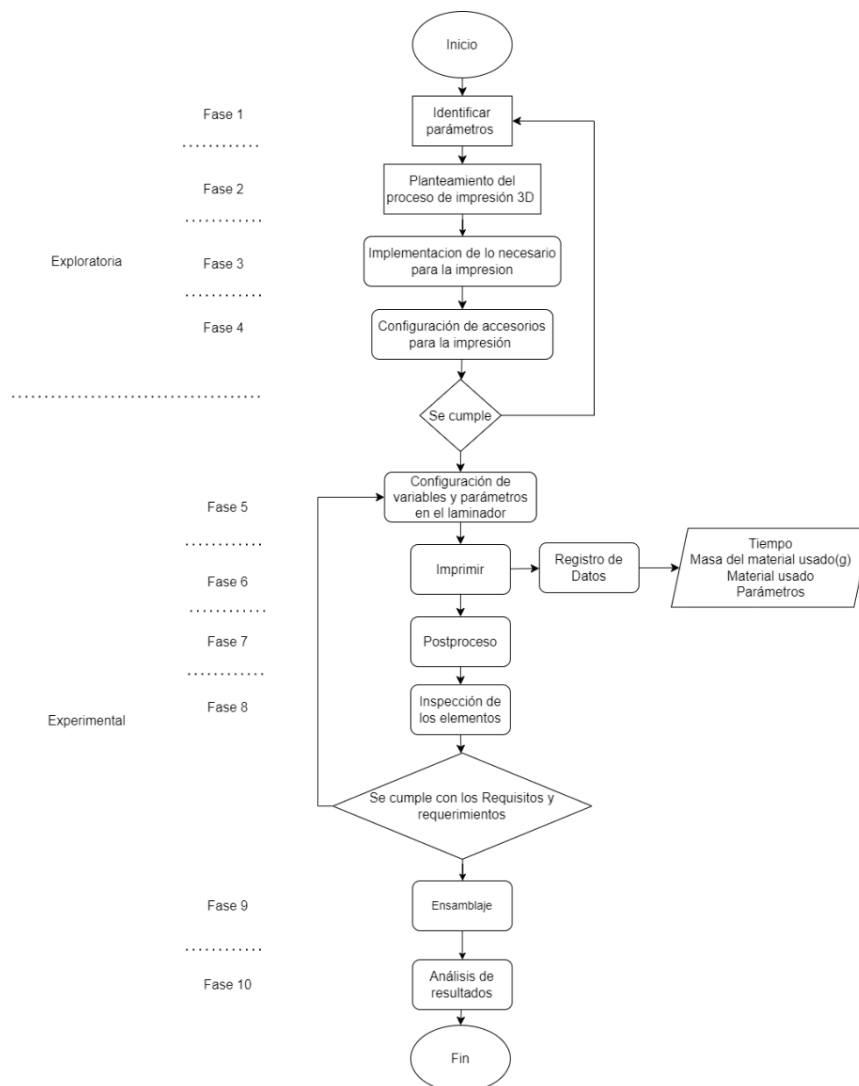


Figura 2.1. Diagrama de flujo del proceso de impresión 3D

Como soporte dentro del proyecto se usarán la metodología exploratoria y experimental, en la impresión de una prótesis de mano se orienta hacia la investigación y desarrollo de nuevos enfoques, técnicas y diseños para crear prótesis de mano personalizadas utilizando tecnologías de impresión 3D, por lo que se tomara en cuenta que debemos tener los materiales necesarios, así como herramientas de postproceso.

El prototipo propuesto en el tema TIC se verificará en el uso de dos materiales distintos los cuales son: PLA y Fibra de Carbono, para los cuales se usarán parámetros distintos que parten de la naturaleza de los materiales propuesto, siendo que las variables a tomar en cuenta son Temperatura del *Nozzle*, Temperatura de cama, Ancho de capa, Ancho de pared, tipo de relleno, densidad del relleno, así como soportes y configuración de los mismos.

Siendo que dentro de la ejecución del proceso se detectaran anomalías, fallas, desperfectos dentro de las etapas que componen la impresión del prototipo se ha propuesto una comparativa que se irá desarrollando durante el proceso para mejorar la calidad de las piezas y optimizar la impresión de las mismas, para obtener satisfactoriamente un prototipo final. Se detalla en la **Tabla 2.1**, una descripción general del contenido de las fases detalladas en la metodología.

Tabla 2.1. Metodología planteada

Fase	Nombre	Descripción
1	Identificación de Parámetros	Esta fase se contempla determinar y solventar las características que se requieren en el prototipo.
2	Planteamiento del proceso de impresión	En esta etapa se determina el proceso, se explica los pasos que se deben seguir para la impresión además de comprobar el estado de la impresora y realizar el mantenimiento adecuado.
3	Implementación	Hace referencia a evidenciar la consecución de los materiales y herramientas que se usaran durante la impresión.
4	Configuración de la máquina para la impresión	Consiste en calibrar la máquina y colocar nuestra capa adherente en la cama de la misma para optimizar los resultados.
5	Configuración de variables y parámetros en el laminador	Se configura en Creality Slicer con la configuración adecuada.
6	Imprimir	Se inicia el proceso de impresión.
7	Postproceso	Una vez que se obtienen las piezas.
8	Inspección de los elementos	Se inspecciona que el elemento cumpla con las características necesarias para su aplicación.
9	Ensamblaje	Se ensamblan las piezas adecuadas para la obtención de la prótesis más óptima.
10	Análisis de Resultados	Se presentan todos los datos y resultados obtenidos, a continuación, la evaluación.

2.1 Exploratoria

Esta etapa se contempla dentro de la fase 1 a la 5, y el objetivo de la misma se contempla en la experimentación y la recopilación del conocimiento necesario, iniciando con el modelo a imprimir, proceso de manufactura, tipos de materiales, herramientas de postproceso, así como la adquisición de algún elemento que no se disponga.

Fase 1: Identificación de Parámetros

Los parámetros y requerimientos que se necesitan dentro del proyecto para obtener piezas funcionales que componen la prótesis mecánica de mano-muñeca creada por BQ_3D, la cual es una de las principales tecnológicas europeas. Su objetivo es ayudar a las personas a entender la tecnología, animarlos a utilizarla e inspirarles a crearla. BQ aplica esta filosofía a sus dispositivos (*smartphones*, impresoras 3D o robótica, entre otros) y trabaja para hacer de la tecnología una herramienta que mejore el mundo y la vida de sus usuarios.

El diseño nos muestra una prótesis mecánica de mano-muñeca que consiste en 25 piezas que a su vez están distribuidas en 19 archivos, estos componen la prótesis completa, así como la variación de izquierda o derecha, los elementos al estar completamente ensamblados simulan una mano y se colocan cables tensores de nylon, estos toman la forma de una mano que permite realizar los movimientos básicos de la misma (abrir y cerrar) así como también sujetar objetos. Los mecanismos están clasificados en un mecanismo de biela-manivela, siendo que su ensamblaje cuenta como bastidor la palma de la mano impresa en 3D (ver **Figura 2.2**).



Figura 2.2. Prótesis ensamblada

Los movimientos que realiza la prótesis se asemejan a los de un mecanismo de biela-manivela por lo que se le clasifica como se presenta en la **Tabla 2.2**.

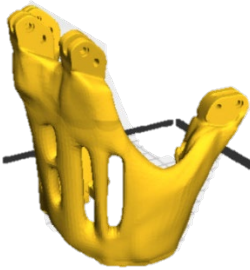
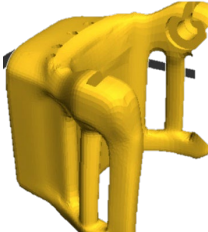

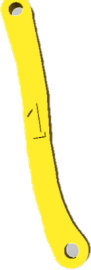

Luego se clasifican los eslabones de la prótesis que transmiten el movimiento lineal, los cuales están sometidos a esfuerzos de tracción y tensión en el mecanismo propuesto.

Tabla 2.2. Lista de Elementos de la prótesis

Elemento	Nombre	Cantidad
A	Palm hand left	1
B	Wrist left	1
K	Link	3
L	Link medio	1
M	Link thumb	1
F	Distal Phalax	3
G	Pinkie Distal	1
H	Thumb Distal	1
I	Proximal Phalax	3
J	Proximal Thumb	1
E	Tensioning Piece	5
D	Joint	2
C	Cover	1



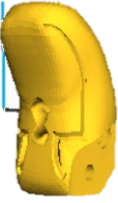
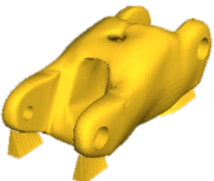
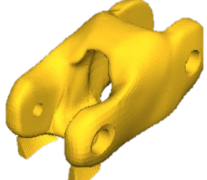
Tal como se presenta en la tabla previamente expuesta, se puede observar el inventario de objetos manufacturados mediante el proceso de impresión 3D. Esta relación incluye no solo la cantidad de cada elemento, sino también su denominación y la designación correspondiente que se empleará en el contexto del presente documento.

Tabla 2.3. Elementos tipo Manivela

Elemento	Nombre	Representación	Cant.
A	Palm hand left		1
B	Wrist left		1
K	Link		3
L	Link medio		1
M	Link thumb		1




Los elementos detallados en la **Tabla 2.4**, tienen la función de biela que transforma el movimiento angular que se genera en la flexión de muñeca a un movimiento giratorio en el extremo de la prótesis.

Tabla 2.4. Elementos tipo biela

Elemento	Nombre	Representación	Cant.
F	Distal Phalax		3
G	Pinkie Distal		1
H	Thumb Distal		1
I	Proximal Phalax		3
J	Proximal Thumb		1

En la **Tabla 2.5**, se muestran elementos de tensión y superficiales que soportan los elementos que funcionan como biela dentro de la prótesis, estos elementos sirven como pines para sujetar los ligamentos de nylon que retraen la misma.

Tabla 2.5. Elementos de tensión y flexión

Elemento	Nombre	Representación	Cant.
E	Tensioning Piece		5
D	Joint		2
C	Cover		1

Considerando las particularidades intrínsecas de cada uno de los componentes, es posible discernir los precisos requisitos que conllevan el proceso de impresión en relación a la prótesis de extremidad superior.

A continuación, se presenta una síntesis concisa de dichos requisitos, como se detalla en la **Tabla 2.6.**

Tabla 2.6. Parámetros de selección en elementos impresos

Detalle	Descripción
Aspecto	El aspecto en un elemento generado por impresión 3D, es importante porque debe tener la forma adecuada y debe acoplarse al diseño durante el ensamblaje.
Funcionalidad	El elemento debe tener la suficiente resistencia para soportar diferentes tipos de esfuerzos.
Dimensiones	Las dimensiones se toman en cuenta al momento de la comprobación del modelado y escala de los elementos en el Software CAD.
Consumo de material	El prototipo se usa para la reducción en el consumo de material durante el proceso de impresión 3D y así no generar un gasto innecesario de filamento.
Resistencia	Este aspecto se toma en cuenta debido al uso que se propone al mecanismo, el mismo que está sujeto a un constante esfuerzo y desgaste.
Detalles	Se verifica si los detalles como agujeros o sujeciones se imprimieron de manera adecuada y con una buena tolerancia mecánica.
Acabado	El aspecto físico es básico en la impresión 3D, se lo puede verificar a simple vista, se debe tomar en cuenta que el acabado debe ser homogéneo, así como liso, que no necesite un postproceso muy detallado.

Fase 2: Planteamiento del proceso de impresión

El proceso para la impresión se muestra en la **Figura 2.3**, se utiliza para obtener los elementos impresos 3D de manera secuencial y ordenada.

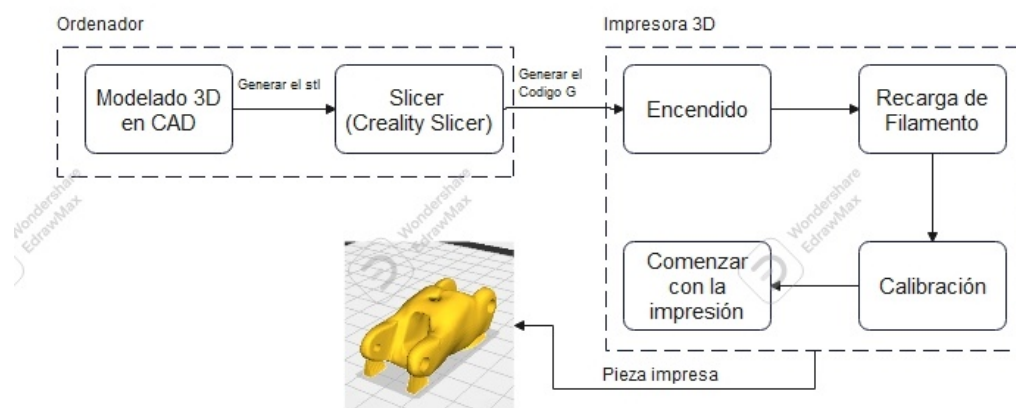


Figura 2.3. Diagrama de las etapas para la impresión 3D

Dentro del proyecto es necesario plantear, recopilar información y dominar los pasos para la correcta realización de la impresión en 3D, como se indica en la **Figura 2.3**, las dos etapas anteriores a la obtención de las piezas se dividen en el uso de un ordenador portátil el cual requiere de un software CAD (*SolidWorks*) y un software de laminado (*Creality Slicer*), así como la etapa final se desarrolla mediante el uso de la impresora 3D se debe tener en cuenta que la impresora debe estar en óptimas condiciones. Finalmente se requiere retirar el elemento de la cama de la impresora 3D.

Modelado 3D en CAD

La etapa de modelado 3D en CAD para la impresión 3D es fundamental para transformar un diseño virtual en un objeto físico, la etapa inicial implica utilizar CAD (*SolidWorks*, *Inventor*, *Fusion 360* entre otros). Para crear el modelo 3D, se utilizan herramientas de modelado para construir la geometría del objeto, definiendo sus dimensiones, formas y detalles.

Una vez que el modelo 3D está completo, se procede a prepararlo para la impresión. Esto incluye realizar una verificación de la calidad del modelo y asegurarse de que esté libre de errores geométricos o inconsistencias. Además, se deben ajustar los parámetros de impresión, como el tamaño, la resolución y el tipo de material a utilizar.

El modelo en CAD generalmente se guarda en un formato específico, como STL (*Standard Tessellation Language*) o AMF (*Additive Manufacturing File Format*), que es compatible con las impresoras 3D. En esta etapa, se convierte el modelo en el formato requerido para que pueda ser interpretado por la impresora 3D.

Tratamiento en el Slicer (Creality Slicer)

Antes de enviar el modelo a la impresora 3D, es necesario configurar los parámetros de impresión adecuados. Esto incluye seleccionar el tipo de material a utilizar, establecer la densidad de relleno, la altura de capa y otros ajustes específicos según las necesidades del objeto y la impresora. Dentro del software se selecciona el tipo de material que se utilizará para imprimir el objeto, como PLA, ABS, PETG, entre otros. Cada material tiene diferentes propiedades, como temperatura de extrusión y adherencia a la cama de impresión, por lo que es importante elegir el adecuado y ajustar los parámetros en consecuencia.

También se determina el grosor de cada capa impresa. Una resolución de capa más fina resulta en un acabado más suave y detallado, pero también puede aumentar el tiempo de

impresión. Este parámetro depende de la precisión requerida y las limitaciones de la impresora.

Se debe determinar también la velocidad de impresión, dentro del proceso una velocidad más alta puede acelerar el proceso, pero puede afectar la calidad de impresión y la adherencia del material.

Otras variables importantes son:

Densidad de relleno: Controlar la cantidad de relleno en el interior del objeto impreso. Esto afecta la resistencia, el peso y el consumo de material. Se puede ajustar la densidad de relleno según las necesidades del objeto, con opciones como relleno sólido, patrones de rejilla o relleno ligero.

Adherencia a la cama de impresión: Configurar la temperatura de la cama de impresión para asegurar una buena adherencia del material. Esto evita que las capas se despeguen durante la impresión. Algunos *slicers* también permiten utilizar adhesivos especiales, como cintas o geles, para mejorar la adherencia también se permite el uso de una película adherente de fijador de cabello (ver **Figura 2.4**) de cualquier marca sobre la cama de la impresión.



Figura 2.4. Refuerzo adhesivo para la cama caliente (Fijador de Cabello Marca DeMert)

Soportes: Activar o desactivar la generación automática de soportes en áreas que requieren soporte durante la impresión, como voladizos o áreas con ángulos pronunciados. Los soportes ayudan a mantener la estabilidad y la precisión del objeto impreso, pero también pueden requerir un postprocesamiento para ser removidos.

Después de haber cargar el archivo *Creality Slicer* nos recomienda una configuración por default por lo cual se debe tomar en cuenta nuestras necesidades en el proceso de impresión individual de los elementos.

Creality Slicer nos permite visualizar capa por capa la impresión 3D que se va a realizar por lo que se procede a revisar la capa numero 52 (ver **Figura 2.5-a**), la capa numero 398 (ver **Figura 2.5-b**), la capa 1117 (ver **Figura 2.5-c**), así como la capa final numero 1952 (ver **Figura 2.5-d**), del elemento tratado por el Slicer.

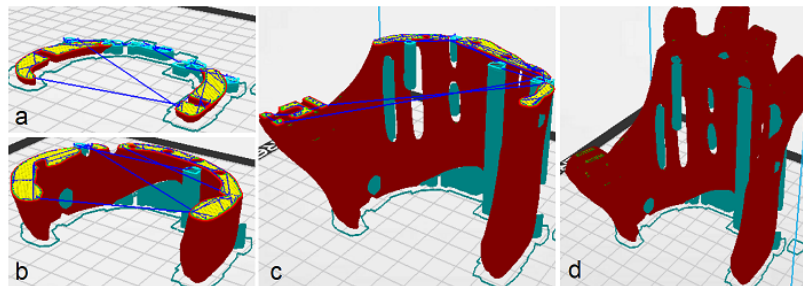


Figura 2.5. Simulación de la impresión del Elemento A (Palm Left hand)

Después de la verificación de parámetros se exporta de *Creality Slicer* el proyecto como un *G-code* que nos permite mediante una MicroSD o una SD, ser ejecutado por la impresora 3D la cual ejecuta el “*G.code*” con las características antes proporcionadas en el laminador.

El *G-code* es un lenguaje de programación de bajo nivel, compuesto por comandos y parámetros numéricos. Está diseñado para ser interpretado por una máquina o un controlador CNC que ejecuta los movimientos y las acciones necesarias para llevar a cabo una tarea específica.

Es importante destacar que el *G-code* puede variar ligeramente dependiendo del fabricante de la impresora 3D o del controlador utilizado. Existen ciertos comandos y parámetros estándar ampliamente utilizados, pero también pueden existir comandos y características específicas de cada máquina o controlador en particular. Por lo tanto, es fundamental consultar la documentación correspondiente y comprender la implementación específica del *G-code* en su contexto de impresión 3D.

Comprobación del Estado de la impresora

Dentro de esta etapa es importante verificar que todos los elementos de la impresora *Creality* CP-01 esto implica verificar el funcionamiento y la condición de diversos componentes clave de la máquina.

A continuación, se describen los elementos principales que se deben comprobar:

Estructura y chasis: Inspeccione visualmente el chasis de la impresora para asegurarse que no haya daños, grietas o componentes sueltos. Verifique que la estructura esté bien ensamblada y que todas las partes estén en su lugar correcto.

Plataforma de impresión: Compruebe la superficie de impresión, ya sea una cama caliente o una plataforma de vidrio, para asegurarse de que esté nivelada y libre de daños. Asegúrese de que esté bien sujeta y que no haya deformaciones o raspaduras que puedan afectar la adherencia del material.

Extrusor: Revise el extrusor para asegurarse de que esté correctamente ensamblado y limpio. Verifique que no haya obstrucciones en el tubo de alimentación del filamento y que la boquilla esté despejada. Si es necesario, limpie o reemplace la boquilla.

Sistema de alimentación del filamento: Asegúrese de que el sistema de extrusión del filamento, como el engranaje de tracción y la rueda dentada, esté en buenas condiciones y funcione correctamente. Asegúrese de que el filamento se alimente suavemente sin atascos o bloqueos.

Cables y conexiones: Verifique todos los cables y conexiones para asegurarse de que estén correctamente enchufados y no estén dañados. Preste especial atención a los cables de alimentación, los cables del motor y los cables de señal.

Ventiladores: Compruebe que los ventiladores estén limpios y funcionen correctamente. Asegúrese de que los ventiladores de enfriamiento estén en buen estado y que los ventiladores de la fuente de alimentación y la electrónica estén funcionando adecuadamente.

Electrónica y controlador: Verifique el estado de la electrónica y el controlador de la impresora. Asegúrese de que no haya componentes sueltos, dañados o quemados. Compruebe que los disipadores de calor estén en su lugar y que no haya señales de sobrecalentamiento.

En este caso se pudo notar que la impresora presentaba daños en el proceso de revisión de la impresora (ver **Tabla 2.7**):




Tabla 2.7. Elementos dañados

Elemento	Foto	Descripción del Daño	Acción
Bloque calefactor		Durante la revisión se nota que el bloque calefactor perdió el ajuste que debe tener con la boquilla.	Se debe reemplazar el elemento
Ventilador		Se observó que el ventilador estaba atascado y tenía 3 alabes completamente rotos.	Se debe reemplazar el elemento

Reemplazo de Elementos defectuosos

Como primera acción se realizar la compra de los repuestos en este caso un bloque calefactor de latón y un ventilador de 24v como se detalla en la **Tabla 2.8.**

Tabla 2.8. Tabla de repuestos

Elemento	Repuesto	Características
		<ul style="list-style-type: none"> • Fabricado en latón. • Dimensiones: 20 x 20 x 10 mm (largo). • Peso neto: 7 g. • Agujero interior para tornillo de montaje: M6 y M3.
		<ul style="list-style-type: none"> • Fabricado en plástico • Tipo de corriente: DC • Voltaje: 24v • Intensidad: 0.10 A • Marca: RoHS

El proceso de cambio del bloque calefactor y ventilador de 24V en una impresora Creality CP-01 implica reemplazar tanto el componente que calienta el filamento dentro del extrusor como el ventilador de enfriamiento. A continuación, se describe el proceso general para realizar este cambio:

1. **Preparación:** Apague la impresora y asegúrese de que esté desconectada de la fuente de alimentación antes de realizar cualquier cambio en los componentes. Asegúrese de tener a mano las herramientas necesarias, como destornilladores y llaves, para desmontar y volver a montar el extrusor como se muestra en la **Figura 2.6**.

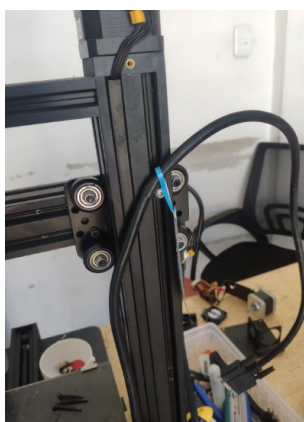


Figura 2.6. Desconexión del cable de poder

2. **Retirar el filamento:** Si hay filamento cagado en el extrusor, extráigalo siguiendo los pasos recomendados por el fabricante. Esto puede implicar calentar el extrusor y liberar la presión sobre el filamento antes de retirarlo (ver **Figura 2.7**).



Figura 2.7. Extracción del filamento

3. **Desmontar el extrusor:** Retire los tornillos que sujetan el extrusor al carril o soporte. En la *Creality CP-01*, es posible que deba desmontar algunos tornillos que aseguran la cubierta del extrusor y el ventilador de enfriamiento (ver **Figura 2.8**).

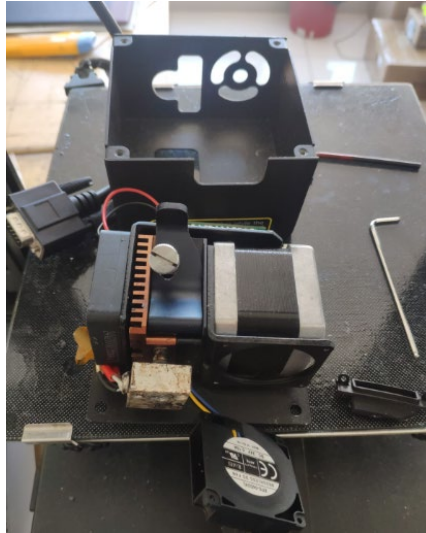


Figura 2.8. Cabezal de la impresora desmontada

4. **Desconectar los cables:** Localice los cables que están conectados al bloque calefactor y ventilador y desconéctelos con cuidado. Esto puede incluir los cables de alimentación del bloque calefactor y los cables de conexión del ventilador (ver **Figura 2.9**).

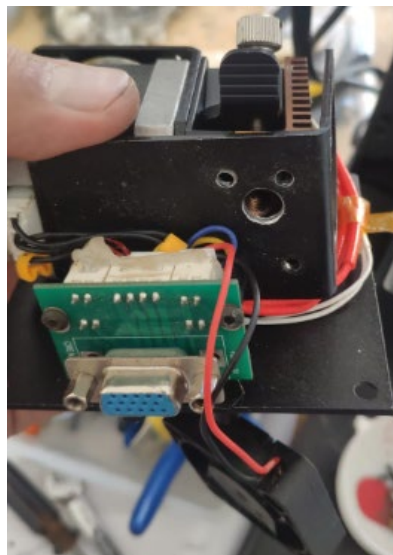


Figura 2.9. Desconexión de los cables

5. **Retirar el bloque calefactor:** Desenrosque y retire el bloque calefactor del extrusor. Asegúrese de tener cuidado al manipularlo, ya que podría estar caliente si se utilizó recientemente (ver **Figura 2.10**).
6. **Retirar el ventilador de 24V:** Desenrosque y retire el ventilador de enfriamiento de 24V del extrusor. Preste atención a la orientación y la posición del ventilador antes de quitarlo (ver **Figura 2.10**).



Figura 2.10. Desmontaje del bloque calefactor y ventilador de 24V

7. **Instalar el nuevo bloque calefactor:** Tome el nuevo bloque calefactor y colóquelo en el extrusor. Asegúrese de que esté correctamente alineado y enroscado de manera segura (ver **Figura 2.11**).
8. **Instalar el nuevo ventilador de 24V:** Tome el nuevo ventilador de enfriamiento de 24V y colóquelo en el extrusor. Asegúrese de que esté correctamente alineado y asegurado en su posición (ver **Figura 2.11**).
9. **Conectar los cables:** Vuelva a conectar los cables al nuevo bloque calefactor y al nuevo ventilador. Asegúrese de que los cables estén correctamente insertados y asegurados (ver **Figura 2.11**).
10. **Volver a montar el extrusor:** Vuelva a colocar la cubierta del extrusor y asegúrela con los tornillos correspondientes. Asegúrese de que todo esté bien ajustado y alineado (ver **Figura 2.11**).

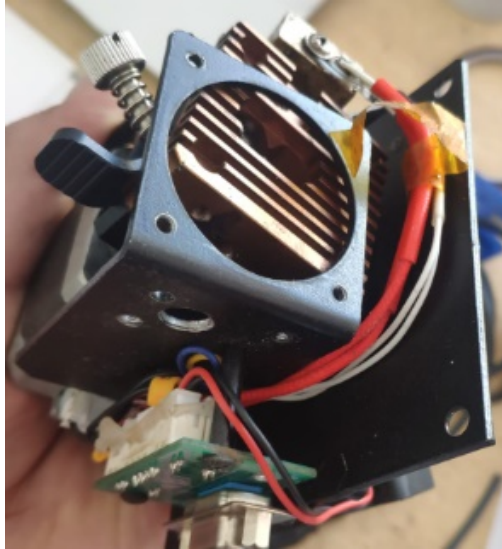


Figura 2.11. Montaje de cabezal de impresión 3D

11. **Cargar el filamento:** Siga las instrucciones del fabricante para cargar nuevamente el filamento en el extrusor. Esto puede implicar calentar el extrusor y realizar el proceso de carga tal como lo hizo anteriormente.

Una vez completado el cambio del bloque calefactor y el ventilador de 24V, encienda la impresora y realice las pruebas necesarias para verificar que el extrusor esté funcionando correctamente y que el nuevo ventilador esté enfriando adecuadamente.

Recarga del filamento

En esta parte de la etapa se ejecuta en la impresora 3D luego de revisar que los componentes estén en óptimas condiciones, para comenzar se procede a encender la impresora 3D y con el uso de la pantalla LCD táctil que tiene la impresora se procede a precalentar el extrusor en el caso de PLA a 200 °C y en Fibra de carbono a 250 °C.

Se coloca el filamento en el tubo de teflón que sobresale del cabezal de impresión 3D, como recomendación el filamento debe tener un corte de 45 grados aproximadamente, esto permitirá que se desplace a través del tubo de teflón y del extrusor.

Se presiona la perilla de impresión en este caso ya que la configuración de la maquina es para la impresión directa, se debe presionar el seguro del cabezal para que el filamento salga por la boquilla en forma de hilo, cuando ya se tiene el hilo se suelta el seguro lo que sujeta al filamento y se procede a la impresión (ver **Figura 2.12**).



Figura 2.12. Recarga de filamento en el mecanismo de extrusión Directa

Calibración de la impresora 3D

El proceso de calibración del cabezal en una impresora 3D *Creality CP-01* implica ajustar la posición del cabezal de impresión para garantizar una distancia adecuada entre la boquilla y la cama caliente. Esto es crucial para lograr una buena adherencia del material y una altura de capa uniforme. A continuación, se describe un proceso general de calibración para la *Creality CP-01* (ver **Figura 2.13**):

Nivelación de la cama

1. Apriete las cuatro tuercas de nivelación en la parte inferior de la plataforma antes de iniciar con la nivelación inicial.
2. Seleccione "ajuste": Nivelación, y de clic en el número (1/2/3/4/5).

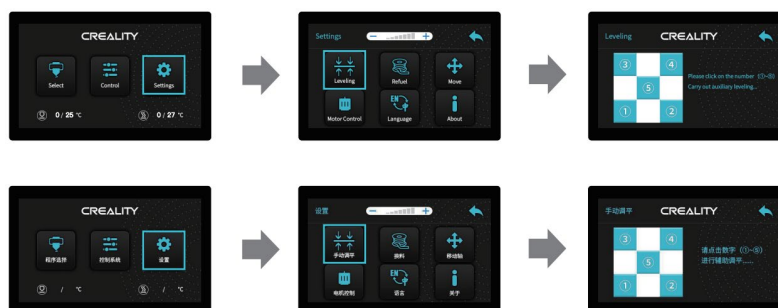


Figura 2.13. Descripción del Proceso de calibración Nivel de la cama

Fuente: Slicer, 2020

La **Figura 2.14**, muestra los siguientes procedimientos para el proceso de nivelación de la cama:

3. Mueva la boquilla del tornillo de nivelación frontal / izquierda y ajustar la altura de la plataforma girando el mando de debajo (El grosor de una hoja de papel A4).
4. Utilice un trozo de papel A4 (papel de impresora estándar) como ayuda para el ajuste, asegurándose de que la boquilla raye ligeramente el papel.
5. Complete el ajuste del tornillo en las 4 esquinas. Repita los pasos anteriores 1-2 veces si es necesario. Siga ajustando hasta que haya una ligera resistencia en el papel A4 de la boquilla.
6. Haga clic en el número 5 para comprobar que la separación de la plataforma es correcta. Repita los pasos anteriores una o dos veces si es necesario.

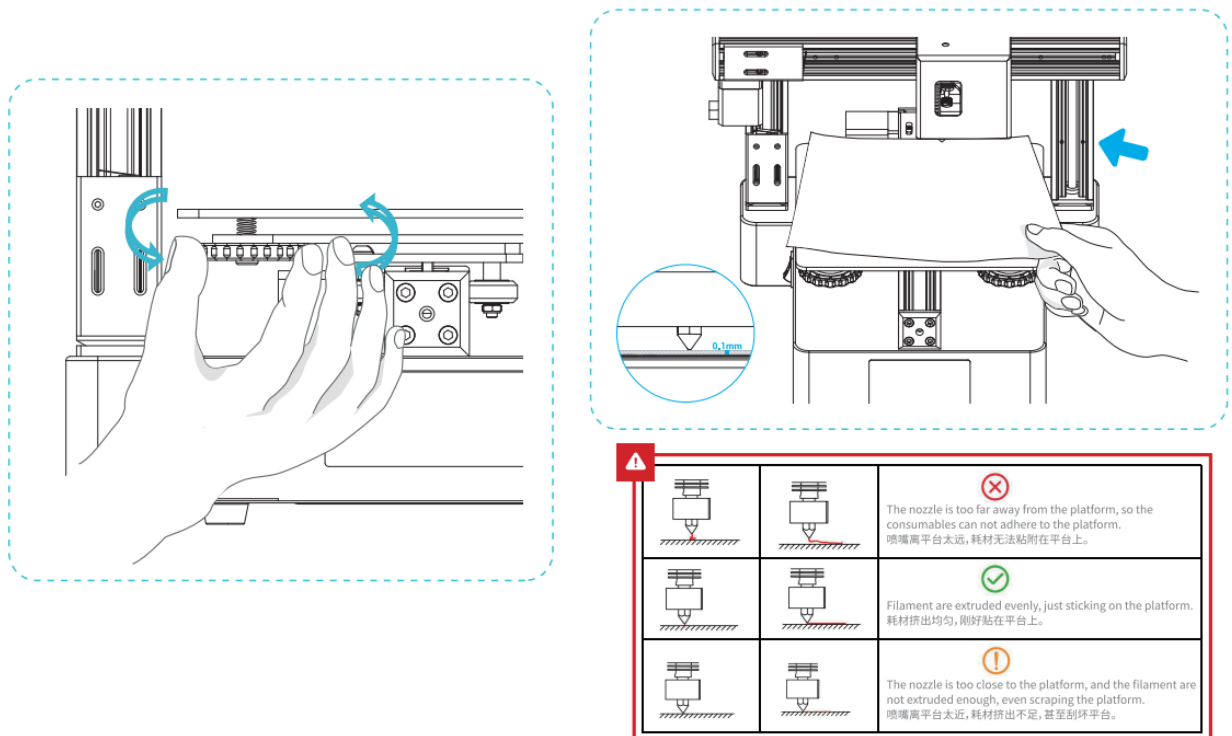


Figura 2.14. Descripción del Proceso de nivelación de la cama

Fuente: Slicer, 2020

Fase 3: Implementación de la estación de trabajo de impresión 3D

Dentro de esta fase se contempla la disposición de todas las herramientas y accesorios requeridos dentro del proceso de impresión 3D. A continuación, se detallan los elementos en la **Tabla 2.9**.

Tabla 2.9. Herramientas y accesorios para la impresión 3D

Tipo	Cant.	Nombre	Detalle
Física	1	Impresora 3D	Creality CP-01
	3	Filamentos	Polímero en la presentación de 1Kg de PLA, PLA Fibra de carbono y TPU.
	1	Espátula	La función es facilitar el retiro de la pieza de la cama de impresión 3D.
	1	Memoria SD	Se usa para guardar el código G generado por el slicer y ejecutarlo en la impresora.
	1	Lector de memoria SD	Utilidad para la lectura y traspaso de archivos en el ordenador.
	1	Pinza de corte	Útil para recortar las rebabas y excesos de filamento.
	1	Ordenador	Sirve para desarrollar la parte digital.
	2	Boquilla	Boquillas de latón y acero inoxidable dependen del tipo de material a usarse.
Digital	1	Slicer	Se usa el laminador Creality Slicer para generar el "G-code"

Impresora 3D Creality CP-01

La impresora *Creality* CP-01 es una impresora 3D todo en uno que también se puede utilizar como máquina de grabado y corte láser. Es un modelo de gama media que ofrece una amplia gama de características y especificaciones técnicas (ver **Tabla 2.9**), útiles para los usuarios que buscan una impresora 3D versátil y multifuncional, también cuenta con una cama de impresión de 200x200x200 mm, una velocidad de impresión de hasta 100 mm/s y una precisión de impresión de hasta 0,1 mm. También cuenta con una pantalla táctil a color de 4,3 pulgadas para una fácil navegación y ajuste de las configuraciones de impresión.

Además de la función de impresión 3D, la CP-01 también cuenta con un cabezal de grabado y corte láser de 500 mW que puede cortar y grabar materiales blandos como papel, cartón, madera y cuero. También cuenta con una función de grabado CNC que puede ser utilizada para tallar madera y otros materiales blandos.

La impresora se puede utilizar con una amplia gama de materiales de impresión, incluyendo PLA, ABS, TPU y PETG. También es compatible con el software de laminado (slicing) *Creativity Slicer*, lo que facilita la preparación de modelos 3D para la impresión.

En general, la *Creativity CP-01* es una impresora 3D todo en uno versátil y multifuncional que ofrece una amplia gama de características y funciones útiles para los usuarios que buscan una impresora 3D versátil y de alta calidad (ver **Figura 2.15**).

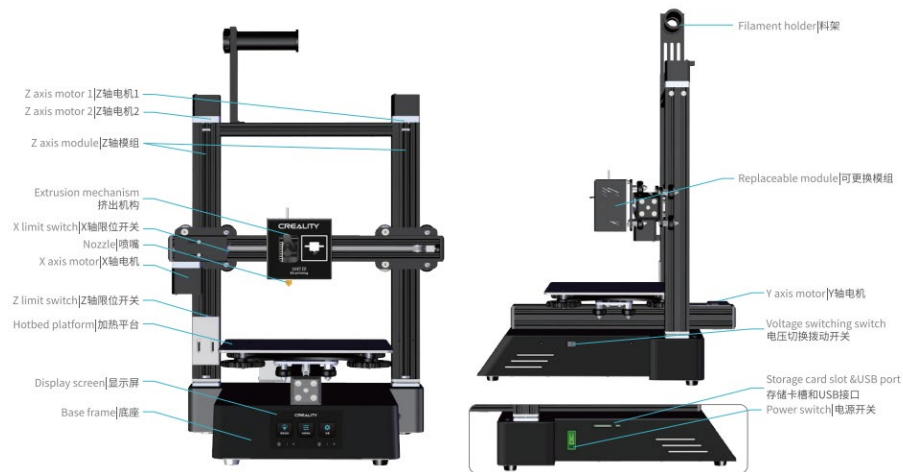


Figura 2.15. Partes de la impresora Creativity CP-01

Fuente: Slicer, 2020

Para visualizar los detalles completos de la impresora *Creativity CP-01* se puede acceder al **ANEXO II**.

Creativity Slicer

Creativity Slicer es un software de laminado (slicing) utilizado para preparar modelos 3D para la impresión en las impresoras 3D de la marca *Creativity*. El software funciona convirtiendo un modelo 3D en un conjunto de capas 2D. El software es gratuito y está disponible para descargar en el sitio web de *Creativity*. Es compatible con una amplia gama de formatos de

archivo 3D, como STL, OBJ y AMF, lo que permite a los usuarios importar y preparar modelos desde una variedad de fuentes.

Antes de pasar al laminador los diseños se realizan en un software CAD en este caso *Solidworks* que ocupa el volumen completo de los elementos y genera el archivo “stl” para luego ser tratado por el laminador *Creativity Slicer* (ver **Figura 2.16**), el cual nos permite configurar los parámetros para la impresión de cada elemento.

Dentro de los parámetros que se configuran dentro del software son ancho de capa, soportes, configuración de los soportes, densidad de relleno, velocidad de la impresión, temperatura del *nozzle* y ancho de capa.

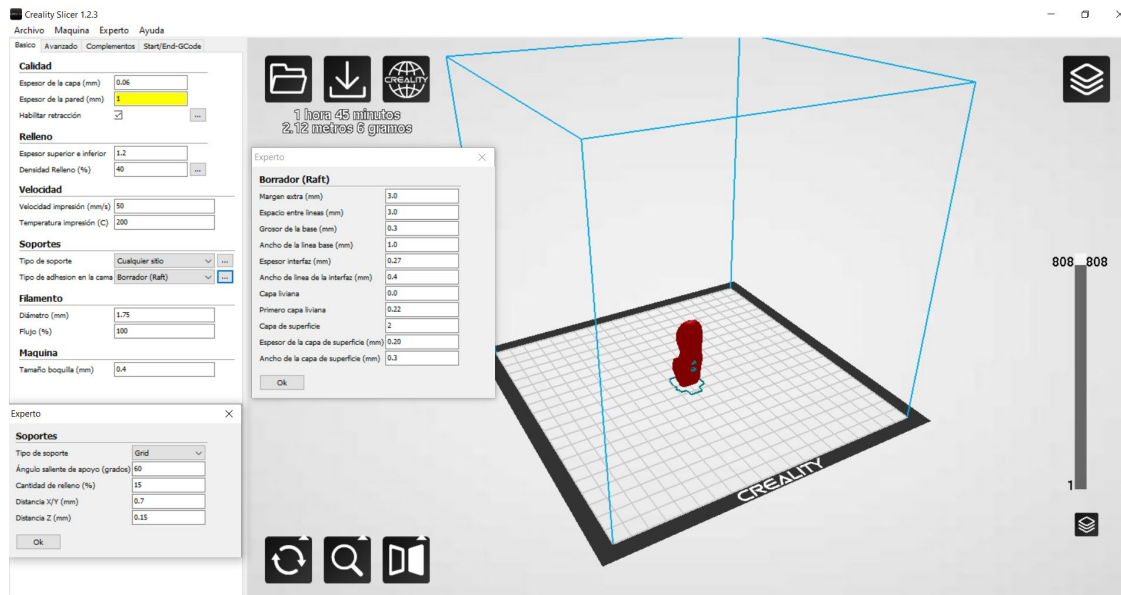


Figura 2.16. Entorno Visual de Creativity Slicer

Filamentos para la impresión 3D

Como se puede observar en la **Tabla 2.10**, se definen las características principales, así como especificaciones técnicas que se tomarán en cuenta dentro de la fase experimental del presente proyecto siendo que se deben tomar en cuenta para la configuración de parámetros de impresión 3D.

Tabla 2.10. Especificaciones técnicas de los Filamento PLA, PLA Fibra de Carbono, TPU

Nombre	PLA	PLA Fibra de Carbono	TPU
Marca	CCTREE	SUNLU	CCTREE
Material Base	100% Material Virgen	100% Material Virgen con refuerzo de fibra de carbono	100% Material Virgen
Diámetro	1,75 mm	1,75 mm	1,75 mm
Dureza	63,5 (Shore)	11-14 Kgf	95 A
Tolerancia	+/-0,02	+/-0,02	+/-0,05
Temperatura de Impresión	190-220 °C	200-230 °C	220-240 °C
Cama caliente	0-60 °C	0-60 °C	40-50 °C
Valor por rollo	\$ 23 USD	\$ 33 USD	\$ 35 USD
Color	Plomo	Negro	Negro
Esfuerzo de tracción a la Rotura (Norma: ASTM D638)	33,09 MPa	49 MPa	39 MPa

En cuanto a la impresión 3D se refiere el PLA y TPU son los materiales más usados, siendo que su impresión es sencilla, así como el almacenamiento del material no tiene una alta complejidad, dándonos una calidad en las impresiones muy buenas sin la necesidad de realizar un trabajo muy exhaustivo, es ideal para principiantes.

En contraste el PLA fibra de carbono, es un material el cual requiere ser cuidado de la humedad, así como se recomienda el uso especial de una boquilla de acero endurecido o inoxidable, siendo que se trata de un material abrasivo el cual daña las boquillas de latón.

El filamento PLA (ácido poliláctico) es uno de los materiales más comunes utilizados en la impresión 3D, es conocido por su facilidad de impresión, baja toxicidad y buenas propiedades mecánica, siendo material versátil que se utiliza para imprimir una amplia variedad de objetos, desde prototipos hasta productos finales.




El filamento TPU (poliuretano termoplástico) es un material elástico y flexible ampliamente utilizado en la impresión 3D, es conocido por su capacidad para estirarse y recuperar su forma original, lo que lo hace ideal para imprimir objetos que requieren flexibilidad y resistencia, como piezas de goma, sellos, juntas, fundas de teléfono y calzado. Además, el TPU ofrece una buena adhesión entre capas y una alta resistencia a la tracción, lo que permite una impresión precisa y duradera.

El PLA fibra de carbono es un tipo de filamento utilizado en la impresión 3D que combina las propiedades del PLA (ácido poliláctico) y la fibra de carbono. Esta combinación permite la creación de piezas y prototipos que requieren una mayor resistencia estructural, como componentes de automóviles, drones, piezas industriales y aplicaciones técnicas.

Fase 4: Configuración de Accesorios para la impresión

Dentro de la impresión 3D existe un número finito de variables, las cuales intervienen en la calidad de los elementos impresos, siendo el que aquí se va a destacar el material de la boquilla para impresión (ver **Tabla 2.11**).

Tabla 2.11. Características de las boquillas para impresión 3D

Boquilla	Representación	Medida	Materiales compatibles	Marca	Costo
Latón		0,4 mm	PLA, ABS, PETG, TPU	Creality	\$ 4,5 USD
Acero Inoxidable		0,4 mm	PLA, ABS, PETG, TPU, PLA Fibra de Carbono	Creality	\$ 5,5 USD
Acero endurecido		0,4 mm	PLA Fibra de Carbono, PLA Wood, PLA con refuerzos metálicos	Creality	\$ 8 USD

En esta parte se hizo uso de boquillas de los 3 materiales debido a los requerimientos que se necesitan para cada material en la impresión.

La boquilla de Latón se usa en el TPU y la primera parte de las impresiones con PLA por su alto coeficiente de transferencia térmica pero debido a su excesivo desgaste se debían cambiar las boquillas cada cierto tiempo, siendo que no resulto una opción viable a largo plazo para el uso continuo en la impresora CP-01.

La boquilla de Acero Inoxidable es compatible con la gran mayoría de filamentos entre ellos PLA, TPU y materiales abrasivos, en este caso se la uso en el 80% del proceso por su alto coeficiente de transferencia térmica además de su alta resistencia al desgaste.

La boquilla de Acero endurecido se usó en las impresiones con el material PLA Fibra de carbono debido a que es un material abrasivo, siendo que desgasta en gran medida las boquillas de latón y acero inoxidable, su costo es más elevado además que por su bajo coeficiente de transferencia térmica este tipo de boquilla solo se recomienda en PLA Fibra de carbono, PLA Wood y PLA con refuerzo metálico, en otros materiales como el PLA genera atascamientos en el extrusor.

2.2 Exploratoria

Fase 5: Configuración de variables y parámetros en el laminador

El software que se usa (*Creality Slicer*) nos permite configurar diferentes parámetros en una interfaz amigable con el usuario, en donde se pueden asignar valores específicos de temperatura, altura de capa, ancho de pared, densidad de relleno, así como la necesidad de soportes y configuración de los mismos. Las figuras que se indican a continuación muestran las configuraciones presentes en los 24 elementos de la prótesis de mano muñeca con los diferentes materiales.

Antes de la configuración de los parámetros el laminador *Creality Slicer* nos permite cargar el elemento a imprimir para configurar la calidad, en este laminador a diferencia de *Ultimaker Cura* no nos despliega un menú de opciones para el acabado del elemento, en el presente laminador debemos configurar los parámetros que requiera cada uno de los elementos como se muestra en la **Figura 2.17** .

Para el presente trabajo se configuraron los parámetros de un acabado fino con una altura de capa de 0,06 mm y un espesor de padre de 1 mm para todos los elementos.

Calidad	
Esesor capa inicial (mm)	0.3
Ancho de linea de la capa (mm)	100
Cortar fondo del objeto (mm)	0.0
Superposición de la extrusión dual	0.15

Figura 2.17. Parámetros de calidad y espesor de pared

Los parámetros individuales para los materiales son específicos para cada uno como se revisó en el proyecto para el PLA la temperatura del extrusor debe ser de entre 200-220 °C con una temperatura de cama de 50 °C, para el PLA fibra de carbono la temperatura debe ser de entre 220-230 °C con una temperatura de 60 °C , para el TPU se configura con una temperatura de 220 °C y la cama de impresión 3D en 68 °C, los demás parámetros se los modifica en la pantalla táctil de la impresora *Ceality* CP-01 (ver **Figura 2.18**).

Velocidad	
Velocidad impresión (mm/s)	50
Temperatura impresión (C)	200

Figura 2.18. Parámetros de velocidad y temperatura para el Material PLA

El siguiente parámetro a configurar corresponde al relleno del elemento (ver **Figura 2.19**), en donde se configura el espesor de la superficie con el fin de controlar el gasto de material, que en este caso es de 1,2 mm. Por otra parte, también se configura la densidad de relleno siendo que para el fin del proyecto se usa un relleno del 40% en los elementos de PLA y PLA fibra de Carbono con la finalidad de que resistan los requerimientos normales de una prótesis, por otro lado, los parámetros para TPU (ver **Figura 2.20**), nos permiten tener un elemento flexible.

Relleno	
Esesor superior e inferior	1.2
Densidad Relleno (%)	40

Figura 2.19. Parámetros de relleno PLA Y PLA Fibra de Carbono

Relleno

Espesor superior e inferior

Densidad Relleno (%) ...

Figura 2.20. Parámetros de relleno TPU

Otro de los parámetros que se pueden modificar es el tipo de adherencia a la cama de impresión 3D, *Creality Slicer* nos permite escoger (ver **Figura 2.21**), entre Borde (*Brim*), Borrador (*Raft*) y nada. De ellos se seleccionó el *Brim*, este nos permite retirar fácilmente los excesos de material en el elemento, además que no refiere un uso innecesario de material, aunque si tomáramos en cuenta el uso de adhesión se pueden configurar parámetros (ver **Figura 2.22**) como margen, grosor de la base, espesor de la interfaz entre otros.

Soportes

Tipo de soporte ...

Tipo de adhesión en la cama ...

Filamento

...

...

...

Figura 2.21. Menú de tipos de adhesión

Borrador (Raft)

Margen extra (mm)

Espacio entre líneas (mm)

Grosor de la base (mm)

Ancho de la línea base (mm)

Espesor interfaz (mm)

Ancho de línea de la interfaz (mm)

Capa liviana

Primero capa liviana

Capa de superficie

Espesor de la capa de superficie (mm)

Ancho de la capa de superficie (mm)

Figura 2.22. Parámetros de adhesión a la cama de impresión 3D

Creality Slicer nos permite visualizar y editar el G-code (ver **Figura 2.23**) de cada elemento antes de ser exportado para generarnos una interfaz más amigable, la cual podremos manipular y configurar a nuestras necesidades individuales.

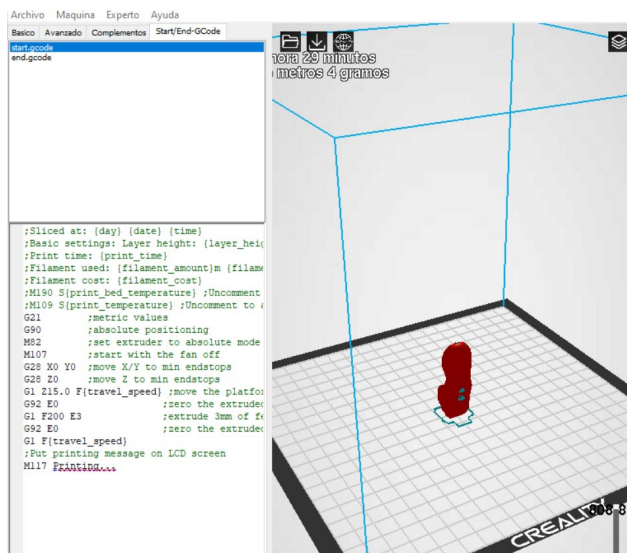


Figura 2.23. Visualización del G-code entorno de *Creality Slicer*

Otros parámetros importantes son los soportes, velocidad de impresión y ventilación, los cuales no se modificaron, se usaron los dados por default en el presente modelo ya que no se necesitaron para tener un buen acabado superficial.

Fase 6: Impresión 3D

Una vez que se verificaron las variables, se mantiene calibrada la máquina, se selecciona la opción de precalentar la maquina en los materiales que viene programada la misma PLA, Fibra de Carbono, TPU, etc. Luego se inserta la tarjeta SD y vamos al menú de impresión que se desplaza, se selecciona el archivo a imprimir posteriormente, se presiona aceptar y la impresora procede a iniciar el proceso de impresión capa por capa (ver **Figura 2.24**).

Posteriormente se indica la fase de inicio de la impresión 3D, el cabezal que está depositando filamento sobre la cama de adherencia, anterior a esto se debe colocar una capa de fijador de cabello como película para mejorar la fijación de la pieza.

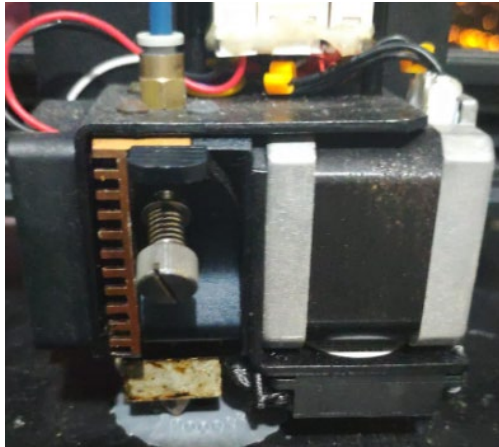


Figura 2.24. Impresión 3D conjunto de piezas en PLA

El tiempo que se demora en finalizar cada impresión 3D depende de las dimensiones de la misma y a su vez de las configuraciones que se le asignaron en el software *Slicer Tales* como altura de capa, existencia de soportes, adherencia a la cama. Tomando en cuenta que la maquina debe llegar a la temperatura de fusión de los materiales, el promedio de inicio de cada impresión con la impresora *Creality CP-01* es de 5 min hasta que se llegue a la temperatura deseada en el extrusor y la cama que en el caso de PLA como referencia son de 200 °C y la cama 50 °C.

Al finalizar la impresión el cabezal de impresión 3D regresa a su origen en el punto máximo del eje Z y al lado izquierdo del eje X, por otro lado, la cama de adherencia regresa a su posición inicial (ver **Figura 2.25**), y para retirar el elemento se debe esperar a que la cama este completamente fría, con la ayuda de una espátula se retira el elemento.



Figura 2.25. Ejemplo de Finalización de impresión de un elemento en 3D

Fase 7: Postproceso

Esta etapa consiste en retirar el material residuo del elemento luego de la impresión 3D tales como: la capa de adherencia, soportes o material excedente, también en caso que la pieza requiera algún tipo de pulido o recubrimiento de pintura.

En la **Figura 2.26**, se puede observar el antes y el después de un elemento que acaba de ser impreso, en esta ocasión se usaron soportes de baja densidad lo que nos produjo rebajas en el elemento, las cuales se retiraron con ayuda de una pinza de corte.

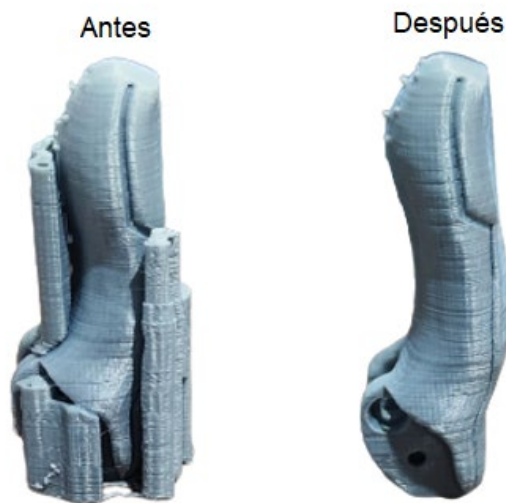


Figura 2.26. Postproceso de un elemento F en filamento PLA

Fase 8: Inspección de los elementos

En esta fase se tienen que revisar los elementos detalladamente en cuanto a su acabado, resistencia y requerimientos mínimos para su uso como elemento de una prótesis (ver **Tabla 2.12**). Tomando como referencia el marcar las casillas de la tabla como un "sí" o un "no" dependiendo si las cumplen con el requerimiento específico.

La inspección tiene como finalidad controlar el acabado de los elementos, mejorar el acabado, refinar las configuraciones y a su vez categorizar e identificar desperfectos en las impresiones, de esta forma se obtendrá elementos de alta calidad. En el caso que el elemento no satisfaga los requerimientos se procede a modificar las variables y se repite desde la fase 5 para mejorar el aspecto además de las propiedades del elemento.

Tabla 2.12. Requerimientos para los elementos impresos en 3D

Elemento	Cumple	
	Si	No
Aspecto	X	
Funcionalidad	X	
Dimensiones	X	
Detalles	X	
Acabado	X	
Adherencia		X
Resistencia	X	

Fase 9: Ensamblaje

El ensamblaje es la etapa final del proceso, consiste en armar elemento por elemento hasta dar forma a la prótesis funcional de la mano muñeca, como se puede observar en la **Figura 2.27**, tomando en consideración la antropometría de la mano además de su funcionalidad.



Figura 2.27. Prótesis Ensamblada en PLA Fibra de Carbono

Para generar los tendones y ligamentos que necesita la prótesis de mano se recurre al uso de monofilamento de nylon transparente para la pesca de 0.35 mm (ver **Figura 2.28**), que tiene un costo de \$ 1 USD en el mercado ecuatoriano, se requiere de una fuerza de

6Kg/12lb, siendo una de las características más importantes la memoria, de la forma que presenta en sedal.



Figura 2.28. Monofilamento de Nylon para pesca

Para la unión de las piezas no se usarán elementos mecánicos debido a que la dureza del elemento de unión, debe ser menor a la de la pieza para prevenir desgaste en los puntos de unión y alargar la vida útil de la prótesis (ver **Figura 2.29**).



Figura 2.29. Elemento de unión entre dos Falanges

3. PRUEBAS, RESULTADOS, CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

3.1 Pruebas de Impresión

Las pruebas que se realizaron durante este proceso de impresión son con el objetivo de verificar la correcta ejecución de la impresión 3D, además de verificar la estructura de los elementos en diferentes partes con cortes axiales. En este caso se usó la técnica de la impresión de la primera capa para comprobar la geometría y adherencia adecuada, además de que se generaron muestras de los elementos cuando estos estaban a un 25 de la impresión para así verificar el cumplimiento de los parámetros y tener una mejor apreciación de los mismos como se puede observar en la **Figura 3.1** .

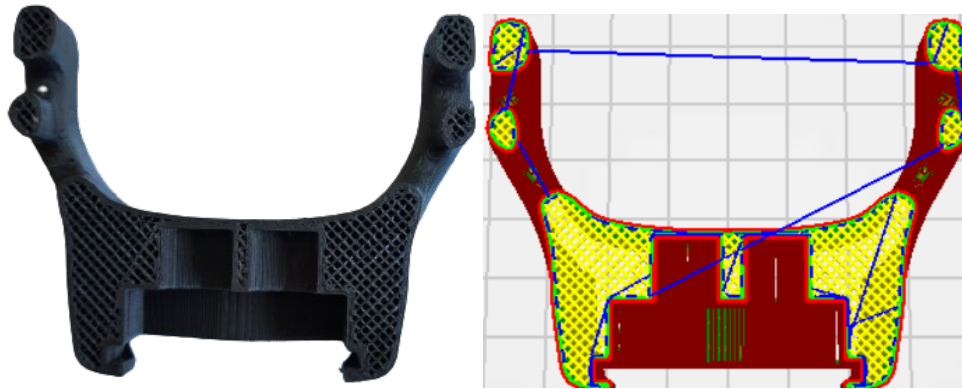


Figura 3.1 Corte del elemento B impreso en filamento PLA Fibra de Carbono y corte en el slicer

Se puede apreciar que el relleno del 40% nos permite tener un elemento bastante resistente independientemente del material que se use, aunque con el PLA reforzado con Fibra de carbono eso aumenta la resistencia mecánica por lo que nos da un elemento con una vida útil más larga.

3.2 Elementos impresos en PLA y PLA Fibra de Carbono

En esta sección se aborda la presentación de los datos, y los resultados obtenidos durante todo el proceso de impresión 3D en dos materiales distintos con los mismos parámetros, al finalizar está la parte experimental tomando como referencia las técnicas de impresión 3D usadas en las 23 piezas que constituyen los elementos para ensamblar la prótesis mano-muñeca como se exponen en la **Tabla 3.1**, **Tabla 3.2** y **Tabla 3.3**.

Tabla 3.1. Elementos tipo Manivela impreso en PLA Y PLA Fibra de Carbono











Elemento	Cant.	Representación (PLA)	Representación (PLA Fibra de Carbono)	Postproceso
A	1			Ninguno
B	1			
K	3			
L	1			
M	1			

Tabla 3.2. Elementos tipo biela impresos en PLA y PLA Fibra de Carbono















Elemento	Cant.	Representación (PLA)	Representación (PLA Fibra de Carbono)	Postproceso
F	3			Limpieza de rebabas Retiro de Soportes
G	1			Ninguno
H	1			Ninguno
I	3			Ninguno
J	1			Ninguno

Tabla 3.3. Elementos de tensión impresos en PLA

Elemento	Cant.	Representación (PLA)	Representación (PLA Fibra de Carbono)	Postproceso
E	5			Ninguno
C	1			Ninguno

Los elementos de los prototipos ejemplares de PLA y PLA de Fibra de carbono pueden ser visualizados en el **ANEXO IV**.

Tiempos de impresión de los elementos en el Filamento PLA

Para estimar los tiempos de impresión se toma como referencia el cronometro individual del laminador *Creality Slicer*, ya que, durante el proceso se tuvo una apreciación bastante exacta en cuanto a la duración total de la manufactura aditiva.

Cabe mencionar que para la comparación se toman los mismos parámetros de impresión tanto en PLA como en PLA Fibra de Carbono, esa información se expone en la **Tabla 3.4**, como resultados obtenidos al categorizar la impresión del elemento individualmente con el filamento PLA y PLA Fibra de Carbono

Se debe resaltar que al ser una prótesis algunos elementos deben ser impresos más de una vez siendo, por lo que es necesario tomar en cuenta el tiempo para la impresión del conjunto de piezas.

En la **Tabla 3.5**, se presentan los tiempos utilizados para imprimir 2 piezas específicas, las cuales debían presentar características diferentes de resistencia, relleno y acabado, con el fin de que cumplan con los requerimientos necesarios.

Tabla 3.4. Tiempos de impresión en PLA y PLA Fibra de Carbono con calidad Fina con un relleno del 25%

Elemento	Cantidad de PLA [g]	Cantidad PLA Fibra de Carbono [g]	Tiempo Unitario [min]	Tiempo Total [min]
K	3	3	14	42
L	1	1	15	15
M	1	1	12	12
F	3	3	97	291
G	1	1	84	84
H	1	1	74	74
I	3	3	64	194
J	1	1	84	84
E	1	1	119	119
D	5	5	29	145
C	1	1	59	59
Total	21	21		1119

Tabla 3.5. Tiempos de impresión en PLA y PLA Fibra de Carbono con calidad Fina con variación del relleno

Relleno	20 %	
Elemento	Tiempo de Impresión PLA [min]	Tiempo de Impresión PLA Fibra de Carbono [min]
A	698	698
B	607	607
Total	1304	1304
Relleno	40%	
Elemento	Tiempo de Impresión PLA [min]	Tiempo de Impresión PLA Fibra de Carbono [min]
A	908	908
B	612	612
Total	1520	1520

Se tomó en consideración que los parámetros a ser alterados son la temperatura del extrusor la cual debe ser de 220 °C y la temperatura de la cama que debe ser de 60 °C siendo el caso del PLA Fibra de Carbono y en PLA la temperatura del extrusor es de 200 °C además que la cama debe estar a 50 °C, para tener un buen acabado, y la boquilla que se usa es de acero endurecido por ser un material abrasivo.

Se debe considerar que para imprimir PLA con una boquilla de acero endurecido el extrusor tiene que estar a una temperatura 5 °C más debido a la baja conductividad térmica de la boquilla antes descrita.


Como se detalla en la Sección 3.2 los tiempos de impresión en PLA y PLA Fibra de Carbono son los mismos siendo que el tiempo que se tomó para la impresión total de los 21 elementos en PLA Fibra de carbono con un 25% de relleno es de 2238 min que al ser transformados a horas son 37h 18min y el tiempo que se toma en imprimir dos elementos con mayores requerimientos, el caso del 20% de relleno su tiempo es de 2608 min, que transformándose a horas son 43h 30min. En el caso de 40% de relleno el tiempo es de 3040 min, estos siendo transformados a horas son 50h 40 min.

3.3 Elementos impresos en TPU

Dentro de esta sección se presentan los datos obtenidos durante el proceso de impresión de 1 elemento cuya función es la unión entre los elementos *Palm Hand Left* y *Wrist Left*, mismo que debe ser flexible para cubrir los requerimientos necesarios dentro de la prótesis.

En la **Tabla 3.6**, se muestra el elemento impreso en filamento TPU, teniendo en cuenta que el elemento debió de ser impreso 4 veces para cumplir con la finalidad del presente proyecto.

Tabla 3.6. Elementos de flexión

Elemento	Cant.	Representación (TPU)	Postproceso
D	4		Ninguno

Tiempos de impresión de elementos en TPU

En este apartado se aborda la impresión de 4 elementos flexibles necesaria para ensamblar las prótesis en PLA y PLA Fibra de Carbono, en la **Tabla 3.7**, se detalla el tiempo que se toma en la manufactura aditiva.

Tabla 3.7. Tiempos de impresión en TPU calidad final

Elemento	Cant.	Tiempo Unitario (min)	Tiempo Total (min)
D	4	13	52

Dentro del conjunto de información recopilada, es importante destacar que no se incluyen los intervalos temporales requeridos para que tanto el extrusor como la cama caliente alcancen las temperaturas óptimas de impresión. Específicamente, en el caso del TPU, se busca alcanzar una temperatura de 215 °C para el extrusor y de 65 °C para la cama caliente antes de comenzar el proceso de impresión.

Cabe señalar que la ausencia de estos tiempos de precalentamiento en los registros puede influir en la evaluación completa de los resultados obtenidos. La eficiencia y la calidad del proceso de impresión están intrínsecamente relacionadas con la capacidad del equipo para alcanzar y mantener estas temperaturas críticas. Por lo tanto, al considerar los datos y sus interpretaciones, es esencial tener en cuenta esta variable como un factor que podría impactar en los resultados finales.

Adicionalmente, es relevante enfocar la atención en el tiempo estimado para la finalización total de todo el proceso. En este caso, se ha determinado que este proceso específico tomaría aproximadamente 52 minutos para completarse. Es crucial resaltar que este período temporal se destaca por su relativa brevedad en comparación con los tiempos requeridos para completar procesos de impresión similares utilizando materiales como PLA y PLA Fibra de Carbono. Este dato resalta la eficiencia inherente del proceso de impresión utilizando TPU, lo cual puede tener implicaciones significativas en términos de producción y productividad.

3.4 Análisis de Consumo de material

Para realizar un análisis comparativo entre el Filamento PLA y PLA Fibra de Carbono se compilan los datos de gramos usados de cada material en cada elemento con diferencia de relleno, así como en la totalidad de la prótesis (ver **Tabla 3.8**), teniendo como resultado una variación de 30 g entre prótesis ensambladas con elementos de relleno variable.

Tabla 3.8. Material requerido en la impresión de Prótesis Completas

			Peso Total [g]			
			PLA		PLA Fibra de Carbono	
Elemento	% Relleno	Cant.	Prótesis 1	Prótesis 2	Prótesis 3	Prótesis 4
A	20	1	73	-	73	-
B	40	1	-	90		90
A	20	1	54	-	54	
B	40	1	-	67	-	67
K	25	3	3	3	3	3
L	25	1	1	1	1	1
M	25	1	1	1	1	1
F	25	3	18	18	18	18
G	25	1	4	4	4	4
H	25	1	4	4	4	4
I	25	3	21	21	21	21
J	25	1	7	7	7	7
E	25	5	5	5	5	5
D	15	2	4	4	4	4
C	25	1	6	6	6	6
		Total	201 g	231 g	201 g	231 g

En la **Figura 3.2**, se puede apreciar la variación del tiempo, el material utilizado en la impresión de elementos con un 25% de relleno en PLA y PLA Fibra de Carbono, que al ser el mismo del filamento se puede asignar una sola grafica para el análisis en este punto,

tomando en cuenta que el total de material gastado es de 74g por prótesis, se procede a mostrar los resultados en las **Figura 3.3** , **Figura 3.4** y **Figura 3.5** .

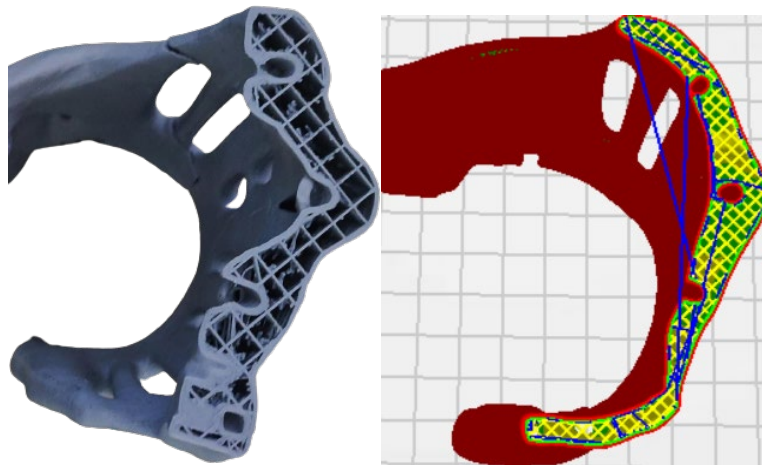


Figura 3.2. Vista en corte del Elemento A con un 25% de relleno

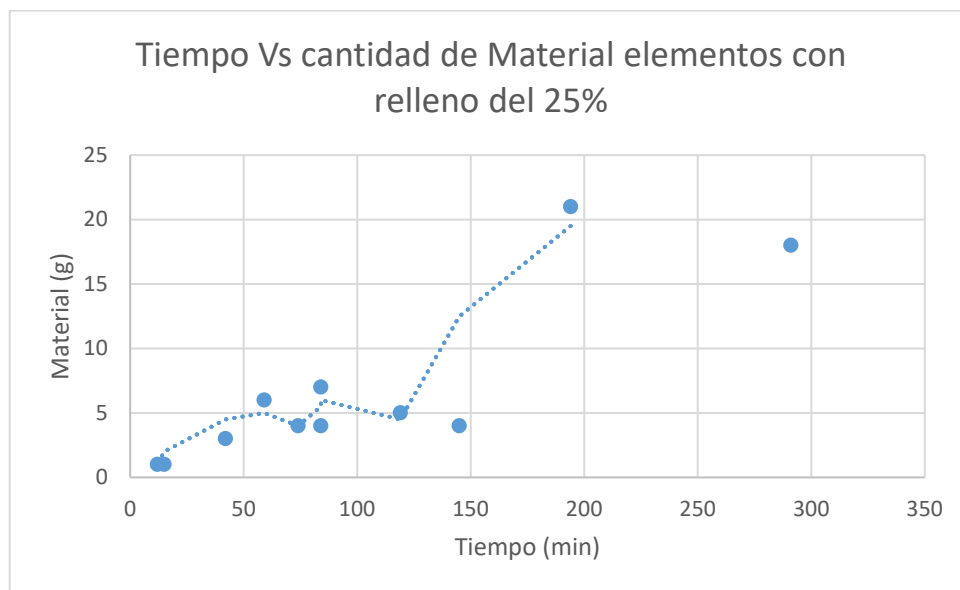


Figura 3.3. Tiempo Vs Consumo de material en elementos con el 25% de relleno

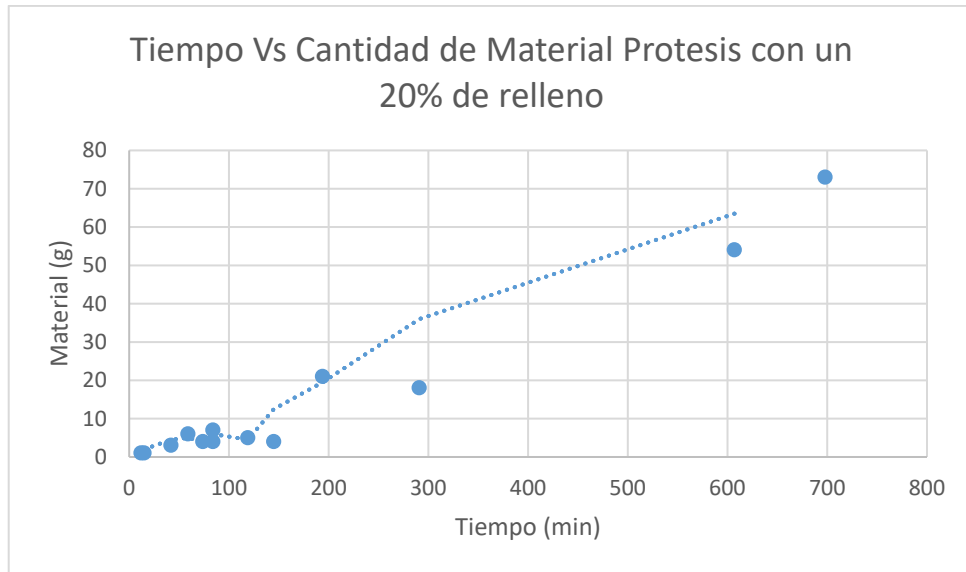


Figura 3.4. Tiempo Vs Consumo de material en prótesis con el 20% de relleno

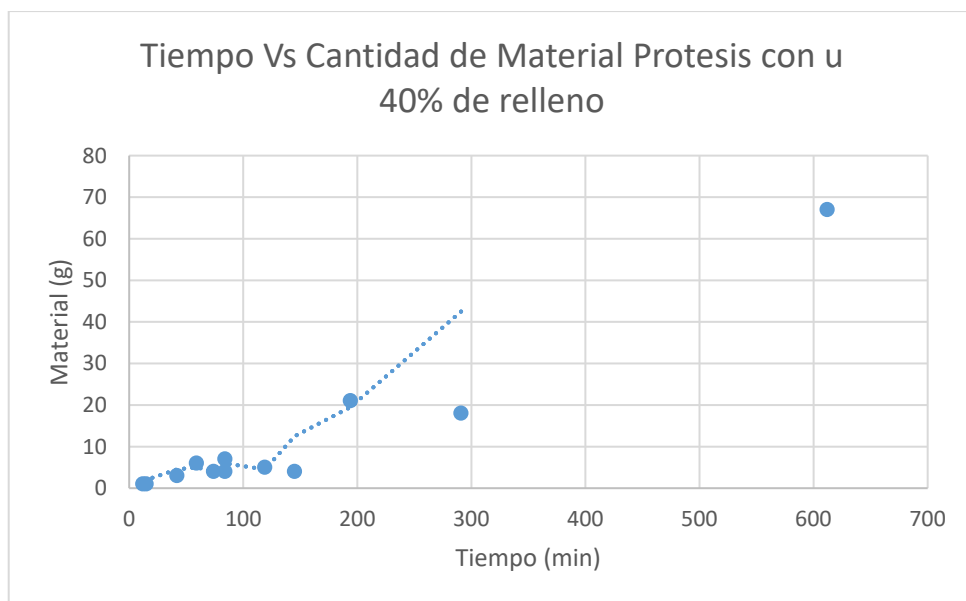


Figura 3.5. Tiempo Vs Consumo de material en prótesis con el 40% de relleno

Mediante el contraste de resultados entre la **Figura 3.3** y **Figura 3.4**, estos nos representan el consumo de material, y el tiempo empleado en la impresión de prótesis completas con la variación de relleno en piezas (Elemento A, Elemento B) las cuales tienen requerimientos más agresivos, por lo que se probó en la fase experimental de la impresión con un 20% y 40% de relleno en Filamento PLA Y PLA Fibra de Carbono; no obstante se debe considerar que para los elementos restantes con excepción del Elemento D, que fue impreso en TPU, el relleno era de un 25%

Así se categorizó que el mayor consumo de material es cuando se imprime una prótesis completa con un 40% de relleno, siendo que el tiempo de impresión es directamente proporcional a la cantidad de material siendo la variación en los entre los dos casos es de 20g.

3.5 Análisis de resistencia en elementos A y B

Habiendo sido los elementos A y B sometidos a mayor desgaste, se realizaron pruebas de resistencia con la ayuda de un *Electronic Hand Dynamometer* EH101 (ver **Figura 3.6**), el cual nos permitió verificar la resistencia de cada elemento con un relleno en específico como se representa en el **ANEXO III**.



Figura 3.6. Resistencia máxima del elemento A impreso en PLA Fibra de Carbono con un 40% de relleno

Como se puede notar en las **Figura 3.7** y **Figura 3.8**, la rotura se da dentro de partes frágiles que presenta el elemento, por lo que en concordancia con la **Tabla 3.9**, la densidad de relleno que se requiere en los elementos A y B es la de 40% independientemente del material en el que se encuentre impreso.

Además, se puede notar que el PLA con refuerzo en Fibra de Carbono tiene más resistencia que su similar sin el refuerzo porque para la construcción de una prótesis duradera el antes mencionado vendría a ser el material ideal.



Figura 3.7. Falla del Elemento B a 49,6 lb Impreso en PLA Fibra de Carbono con un 20% de relleno



Figura 3.8. Falla del Elemento A de 44,8 lb Impreso en PLA con un 20% de relleno

Costo de Fabricación de elementos en PLA, PLA Fibra de Carbono y TPU.

Tomando en cuenta el costo de KW/h es de 10,44 centavos a la fecha de hoy en el territorio ecuatoriano además que nuestra impresora presenta un consumo de 350 W, y de acuerdo a la siguiente información se puede calcular el consumo por hora de impresión.

$$Costo = \frac{CEE}{\left(1 \frac{KW}{h}\right)} \cdot CM$$

CEE: Costo de la Energía Eléctrica

CM: Consumo de la máquina

Ecuación 3.1. Cálculo del valor de consumo por hora

Ejemplo de Cálculo

$$CEE = 10,4 \frac{ctvs}{\frac{kW}{h}}$$

$$CM = 350 W$$

$$Costo = 0,1044 USD * \left(1 \frac{KW}{h}\right) . 0,38 kW$$

$$Costo = 0,03967 \frac{USD}{h}$$

Si se toman en consideración los costos directos e indirectos que se generan durante la impresión como se detalla en la **Tabla 3.9**, e costo directo sería el precio de los filamentos PLA, PLA Fibra de Carbono y TPU todos de 1Kg, se tomaría en cuenta la mano de obra empleada durante el proceso de ensamblaje, teniendo como información base, el salario básico unificado de un trabajador dentro del territorio ecuatoriano.

Entonces, si se divide el salario básico unificado para las horas que se labora durante el mes, se obtiene un aproximado del costo por hora de trabajo, y con base en los datos anteriores se procede a realizar un Análisis de Precios Unitarios (APU).

Tabla 3.9. Costos de impresión de los elementos que componen la prótesis

Costos Directos				
Cantidad	Detalle	Descripción	Valor unitario	Valor total
1	Filamento	PLA	\$23 USD/Kg	\$23 USD/Kg
1	Filamento	PLA Fibra de Carbono	\$33 USD/Kg	\$33 USD/Kg
1	Filamento	TPU	\$35 USD/Kg	\$35 USD/Kg
1	Operador	Mano de Obra	\$2,65 USD/h	\$2,65 USD/h
Costos Indirectos				
Detalle			Valor	
Costo de energía eléctrica por hora de impresión			\$0,03967 USD	

En concordancia con los datos de material en gramos consumidos durante el proceso de impresión 3D de la totalidad de los elementos que componen la prótesis de mano, se calcularan los costos en PLA, PLA Fibra de carbono y TPU calidad superior y con una densidad de relleno del 40%.

Con el fin de determinar los valores se calcularon los costos directos que se muestran en la **Tabla 3.9**, tomando en cuenta el costo de la mano de obra solo durante el ensamblaje y la configuración de parámetros, como se detalla en la **Tabla 3.10**.

Tabla 3.10. Resultado del Análisis de Precios Unitarios

Material	Peso [g]	Tiempo [h]	Tiempo de Trabajo [h]	Costo Mano de Obra [USD]	Costo Directo [USD]	Costo Indirecto [USD]	Costo Total [USD]
PLA	227	44	5	13,25	18,25	1,76	\$20,01
PLA Fibra de Carbono	227	44	5	13,25	20,25	1,76	\$22,01
TPU	4	0,86	0,25	0,67	0,81	0,16	\$0,97

Se sugiere que para minimizar costos se puede realizar el ensamblaje de una prótesis híbrida de PLA, PLA Y TPU (Elementos de Flexión) lo cual se detalla en la **Tabla 3.11**.

Tabla 3.11. Precios de Prótesis en distintos materiales

Nro. Prótesis	Descripción	Costo elementos de Flexión [USD]	Costo [USD]	Costo Total [USD]
1	Prótesis de PLA	\$0,97	\$21	\$21,97
2	Prótesis de PLA Fibra de Carbono	\$0,97	\$23	\$23,97
3	Prótesis Mixta	\$0,97	\$20	\$20,97

Si se comparan los precios de los tres tipos de prótesis existe la variación de \$1 USD entre la híbrida comparada con la de PLA y de \$2 USD en comparación con la de PLA Fibra de Carbono, resultando la híbrida más accesible siendo que es su valor en bruto, sin embargo, dependerá del usuario acoplarse a cualquiera de ellas de la mejor manera para sus actividades (ver **Figura 3.9**).



Figura 3.9. Prótesis mixta de dos materiales Ensamblada

Podremos visualizar la fabricación y ensamble de una prótesis Híbrida Mixta de una Mano Humana en el **ANEXO V**.

3.6 Presentación de Parámetros óptimos para la impresión de una prótesis Funcional

A continuación, en la **Tabla 3.12**, se describen los costos además de variables que intervienen en la impresión 3D de una prótesis completa de mano muñeca además de su costo, tiempo de impresión y tiempo de ensamblaje estimado para cada una.

Tabla 3.12. Tabla de Costos y características de la Prótesis Mecánica

Descripción de la Prótesis	Densidad de relleno [%]	Altura de Capa [mm]	Tiempo de impresión [h]	Cant. de material [g]	Tiempo de Ensamblaje	Costo [USD]
PLA	40	0,1	44h 52min	231	4	\$21,97
PLA Fibra de Carbono	40	0,1	44h 52min	231	4	\$23,97
Híbrida	40	0,1	44h 52min	231	4	\$20,97

Se presenta de igual manera los datos de seteo que se describió en el laminador para el proceso final de la impresión del prototipo 3D (ver **Tabla 3.13**), además que se muestran detalladamente las variables adecuadas para tener una prótesis funcional y resistente (ver **Figura 3.10**).

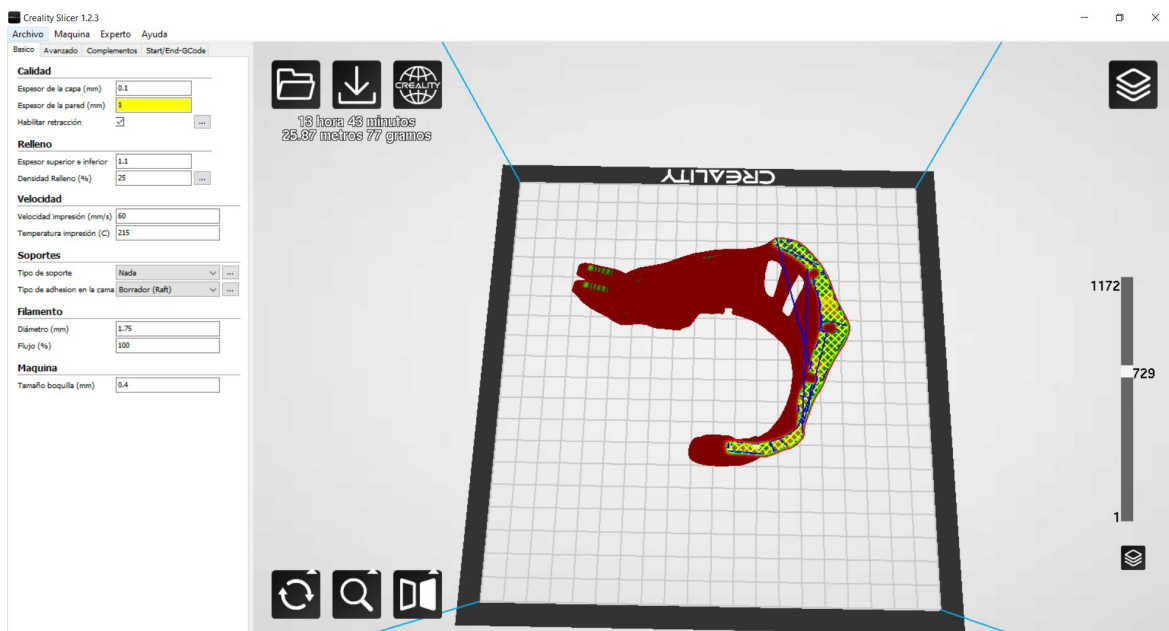


Figura 3.10. Entorno de Creaform Slicer con una configuración del 25%

Tabla 3.13. Datos con los que seteo el laminador

Velocidad de impresión [mm/s]	60					
Espesor de Capa [mm]	0,6					
Espesor de Pared [mm]	0,8					
T. Nossle [°C]	PLA FC	220	PLA	200	TPU	215
Densidad de Relleno	PLA FC	40	PLA	40	TPU	15
T. Cama	PLA FC	50	PLA	70	TPU	65
Tipo de Adhesión						
Raft	Margen Extra [mm]		3			
	Espacio entre líneas [mm]		3			
	Grosor de la Base [mm]		0,3			
	Ancho de la Línea Base [mm]		1			
	Espesor interfaz [mm]		0,27			
	Ancho de la línea de Interfaz (mm)		0,4			
	Capa Liviana(mm)		0			
	Primera capa liviana(mm)		0,22			
	Capa de superficie(mm)		2			
	Espesor de la c. superficie(mm)		0,2			
	Ancho de la capa de Superficie(mm)		0,3			
Configuración de Soportes						
Angulo Saliente	60					
D. soportes (%)	15					
Distancia x/y(mm)	0,7					
Distancia z(mm)	0,5					

4. Conclusiones

El desarrollo de este trabajo de investigación y creación de un prototipo de mano en impresión 3D, permitió fabricar 3 prótesis completas, cada una de ellas cuentan con 22 elementos elaborados mediante manufactura aditiva con un filamento de PLA y PLA Fibra de Carbono. Estos elementos poseen las características adecuadas para soportar los requerimientos solicitados para su factibilidad, no obstante, se obtuvieron 2 elementos impresos en filamento TPU con características de flexión siendo estas necesarias para el movimiento de la prótesis.

También se observó que el laminador por defecto de la impresora *Creality* CP-01 llamado *Creality Slicer*, al ser pensado netamente para el uso dentro de esta máquina, presentó tiempos sin variación considerable durante los procesos de impresión. Por otra parte, permitió dentro de su propia interfaz manipular el “G-code” con el fin de tener elementos más estéticos y funcionales.

Se pudo notar que el costo de la manufactura aditiva de una prótesis con PLA Fibra de Carbono es de \$23,97 USD de costo en bruto a diferencia de una prótesis con las mismas características en el mercado ecuatoriano hecha por la empresa Ecuaprotesis 3D cuyo precio es de \$60 USD, la opción presentada es mucho más económica y accesible al público.

Se imprimieron un total de 24 elementos mecánicos que componen una prótesis mecánica de mano muñeca, aplicando una calidad fina en cada elemento en PLA, así como PLA Fibra de Carbono, para lo que se tomó un tiempo de 44h 22min considerando que en el material TPU solo se imprimieron elementos de flexión, el tiempo empleado fue de 52 min en total.

Se comprobó que para la impresión de los elementos en la *Creality* CP-01 la densidad de relleno en el caso de los dos filamentos tipo PLA es de 40% con una altura de capa de 0.1mm, una temperatura del extrusor y de cama caliente de (200 °C/55 °C) para el PLA, (220 °C/70 °C) para el PLA Fibra de Carbono y (215 °C/ 60°C) para el TPU, siendo estos los parámetros usados en todo el proceso.

En consideración que PLA y PLA Fibra de Carbono tienen un tiempo igual de impresión, al ser el segundo mencionado un PLA con refuerzo mas no un filamento puramente de fibra de carbono, el contraste se obtiene mediante el precio que conlleva su producción individual que es de \$22,97 USD en PLA y de \$23,97 USD en PLA Fibra de carbono, siendo la opción más económica un híbrido entre los dos materiales cuyo precio es de \$ 20,97 USD en su costo en bruto.

En base a las pruebas que se realizaron con la ayuda de un Dinamómetro digital se obtuvo que la resistencia de los materiales en el caso del PLA con un 20% de relleno es de 44,8 lb, PLA con un 40% de relleno es de 52,2 lb, PLA Fibra de carbono con un 20% de relleno es de 58,7 lb y PLA Fibra de carbono con un 40% de relleno es de 60,6 lb, el filamento PLA Fibra de carbono nos permite tener más resistencia en consideración que el peso de la prótesis es igual a la de PLA.

En base a la recopilación y comparación de datos, la opción más viable además de más económica es un híbrido de los dos materiales en zonas específicas, es decir para la zona de la muñeca junto con la palma se requiere el PLA Fibra de Carbono, en la Zona de Flexión TPU y en la zona de los dedos se recomienda el uso de PLA, dando así una prótesis además de resistente económica.

5. Recomendaciones

Entre las recomendaciones necesarias para su correcto funcionamiento y mantenimiento están las siguientes:

Rociar sobre la cama de impresión fría fijador de cabello antes de la impresión, con el fin de mejorar la adherencia, así se previene que el elemento pierda su fijación durante el proceso de impresión, en caso de ser necesario se debe rociar fijador cada 3 usos de la impresora.

Revisar continuamente el estado de la impresora poniendo más atención en el bloque del calefactor y el ventilador, ya que estos elementos representan más desgaste, y en caso de daño, se deberá reemplazar.

La limpieza o cambio de boquillas de la *Creality CP-01* se deben realizar cuando la temperatura del Extrusor sea de 160 °C para prevenir daños en el bloque calefactor, ejemplo un aislamiento de la rosca.

Para recargar el filamento siempre procurar cortar la punta del mismo en un ángulo de 45° para así facilitar el ingreso, eliminando así taponamientos dentro del extrusor.

Cuando se imprima filamentos abrasivos se debe cambiar la boquilla de latón a una de acero endurecido, caso contrario la boquilla de latón sufrirá desgaste o se taponará retardando el proceso de impresión, y en caso de imprimir PLA con la boquilla de acero endurecido la temperatura del extrusor debe ser 5 °C mayor debido a la baja transferencia de calor que presenta.

Para retirar los elementos de la placa de vidrio se debe esperar que esta se enfríe, y luego retirarlos con facilidad sin dañar el elemento.

6. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- A.Nuñez, & J.García. (23 de Mayo de 2020). *Manufactura Aditiva*. (Revista Iberomaricana de Ciencia Tecnología y Sociedad) Recuperado el 8 de Julio de 2023, de <https://riunet.upv.es/bitstream/handle/10251/180383/Nunez%20-%20Modelo%20para%20el%20análisis%20del%20impacto%20de%20la%20manufactura%20aditiva%20en%20la%20gestión%20de%20la%20cadena%20....pdf?sequence=1&isAllowed=y>
- Additive Manufacturing: Current State, Future Potential, Gaps & Needs, and Recommendations*. (27 de Febrero de 2015). (Nist) Recuperado el 11 de Julio de 2023, de <https://www.nist.gov/publications/additive-manufacturing-current-state-future-potential-gaps-needs-and-recommendations>
- Aguirre, A. (4 de Noviembre de 2018). *Acceso a prótesis mejora en Ecuador, pero aún hay deficiencias*. (El Universo) Recuperado el 10 de Julio de 2023, de <https://www.eluniverso.com/noticias/2018/10/28/nota/7016252/acceso-protesis-mejora-ecuador-aun-hay-deficiencias/>
- Anzalone, G. C., Glover, A. G., & Pearce, J. M. (31 de Enero de 2013). *Open-Source Colorimeter*. (Mdpi) Recuperado el 11 de Julio de 2023, de <https://www.mdpi.com/1424-8220/13/4/5338>
- Berman, B. (3 de Noviembre de 2011). *3-D printing: The new industrial revolution*. (Sciencedirect) Recuperado el 10 de Julio de 2023, de <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0007681311001790>
- Campbell, I., Bourell, D., & Gibson, I. (8 de Junio de 2012). *Additive manufacturing: rapid prototyping comes of age*. (Emerald) Recuperado el 11 de Julio de 2023, de <https://www.emerald.com/insight/content/doi/10.1108/13552541211231563/full/html>
- Carvajal, L. (2006). *Metodología de la Investigación Científica. Curso general y aplicado* (28 ed.). Santiago de Cali: U.S.C.
- Definición de dimensiones antropométricas en la construcción de guantes a partir de requerimientos de diseño*. (11 de Abril de 2015). (ICONOFACTO) Recuperado el 8 de Julio de 2023, de <https://dialnet.unirioja.es/descarga/articulo/6302036.pdf>
- GARCÍA, F. R. (6 de Junio de 2018). *ALCANCES Y PERSPECTIVAS DE LA IMPLEMENTACIÓN DE LAS*. (UNIVERSIDAD DE LOS ANDES) Recuperado el 5 de Julio de 2023, de <https://repositorio.uniandes.edu.co/bitstream/handle/1992/39230/u821123.pdf?sequence=1&isAllowed=y>
- Gibson, I., Rosen, D., & Stucker, B. (15 de Diciembre de 2023). *Additive Manufacturing Technologies 3D Printing, Rapid Prototyping, and Direct Digital Manufacturing*. (Springer) Recuperado el 23 de Julio de 2023, de <https://link.springer.com/content/pdf/bfm:978-1-4939-2113-3/1?pdf=chapter%20toc>
- Jaiswal, V. K. (1 de Enero de 2020). *3D Printing: Technology Innovation, Advancement and*. Recuperado el 10 de Julio de 2023, de <https://uijrt.com/articles/v2/i1/UIJRTV2I10004.pdf>

- Johnson, J. (24 de Junio de 2019). *Rapid Prototyping Journal*. (Rapid Prototyping Journal) Recuperado el 8 de Julio de 2023, de https://publications.aston.ac.uk/id/eprint/41000/6/A_Decision_making_Methodology.pdf
- Lee, V. (14 de Octubre de 2014). *Medical Applications for 3D Printing: Current and Projected Uses*. (Ncbi) Recuperado el 10 de Julio de 2023, de [https://www.ncbi.nlm.nih.gov/pmc/articles/PMC4189697/#:~:text=The%20three%20most%20commonly%20used,fused%20deposition%20modeling%20\(FDM\).](https://www.ncbi.nlm.nih.gov/pmc/articles/PMC4189697/#:~:text=The%20three%20most%20commonly%20used,fused%20deposition%20modeling%20(FDM).)
- Lopez, O. (4 de Mayo de 2015). *Funcionalidad y estética en las prótesis de miembro superior*. (Ortopedia Tecnica López) Recuperado el 6 de Julio de 2023, de <https://www.ortopedialopez.com/protesis/funcionalidad-y-estetica-en-las-protesis-de-miembro-superior/>
- Mediprax. (23 de Marzo de 2020). *Prótesis de miembro superior con fines cosméticos y funcionales*. (Mediprax) Recuperado el 10 de Julio de 2023, de <https://mediprax.mx/protesis-de-miembro-superior-con-fines-cosmeticos-y-funcionales/>
- Nazir, A., Gokcekaya, O., Billah, K. M., Ertugru, O., Jiang, J., Sun, J., & Hussain, S. (9 de Julio de 2023). *Multi-material additive manufacturing: A systematic review of design, properties, applications, challenges, and 3D printing of materials and cellular metamaterials*. (Sciencedirect) Recuperado el 2023 de Julio de 2023, de <https://pdf.sciencedirectassets.com/313059/1-s2.0-S0264127523X00021/1-s2.0-S026412752300076X/main.pdf?X-Amz-Security-Token=IQoJb3JpZ2luX2VjEE4aCXVzLWVhc3QtMSJHMEUCIQChmNuDbcRxSQHkMJ%2F85S UajTRAztSzyk9EJXMoNf%2FKdAlgEO72dP7NwQrOf9ivmJxT05KcMD1T0uvzdDYfH3Ai>
- OrtoSur. (4 de Julio de 2023). *Cómo funciona y se ajusta una prótesis mioeléctrica*. (OrtoSur) Recuperado el 4 de Julio de 2023, de <https://www.ortosur.es/como-funciona-protesis-mioelectrica/#:~:text=Como%20su%20nombre%20indica%2C%20las,la%20superficie%20de%20la%20piel.>
- Prieto, P. B. (9 de Julio de 2023). *Huesos de la mano: ¿cuáles hay y cómo se llaman?* (MedicoPlus) Recuperado el 9 de Julio de 2023, de <https://medicoplus.com/medicina-general/huesos-mano>
- Tavares, J. J.-P., & Carneiro, L. R. (1 de Marzo de 2021). *Design and implementation of 3D printer for Mechanical Engineering*. (ScholarsJournals) Recuperado el 2023 de Julio de 10, de <https://scholarsjournal.net/index.php/ijier/article/download/3001/2075/9336>
- Valida. (4 de Julio de 2023). *¿Qué son las prótesis mioeléctricas?* (Valida) Recuperado el 4 de Julio de 2023, de <https://www.valida.es/blog/post/que-son-las-protesis-mioelectricas/>
- Velásquez, P. (14 de Enero de 2021). *Crean prótesis de mano con más del 90% de funcionalidad*. (Consultorsalud) Recuperado el 10 de Julio de 2023, de <https://consultorsalud.com/crean-protesis-de-mano-con-mas-del-90-de-funcionalidad/>
- Zuniga, J., Peck, j., Srivastava, R., & Katsavelis, D. (1 de Mayo de 2016). *An Open Source 3D-Printed Transitional Hand Prosthesis for Children*. (Researchgate) Recuperado el 10 de Julio de

2023, de https://www.researchgate.net/publication/303555223_An_Open_Source_3D-Printed_Transitional_Hand_Prosthesis_for_Children

ANEXOS

Se presenta a continuación los siguientes ANEXOS que componen este documento de Trabajo de Integración Curricular, con información fundamental y detallada que se encuentra en los siguientes puntos:

- ANEXO I. Dimensiones de la Palma de una Mano Humana
- ANEXO II. Especificaciones técnicas Creality CP-01
- ANEXO III. Resistencia de elementos impresos en PLA y PLA Fibra de Carbono
- ANEXO IV. Elementos con materiales PLA y PLA Fibra de Carbono.
- ANEXO V Ensamblaje Final de la Prótesis Mano-Muñeca

ANEXO I

Se muestra la tabla cuyo contenido describe las medidas de cada componente que forma la mano humana entre dedos, grosores y por último la palma de la mano cómo se visualiza en la **Tabla 1.1** y **Tabla 1.2**.

Tabla 1.1. Dimensiones de la mano

Falange dedos	Largo				Total	Ancho			Espesor		
	Falange Proximal	Falange Medial	Falange Distal			Unión de la Palma	Ultima Falange	Promedio	Unión con la palma	Ultima Falange	Promedio
Pulgar	35		33		68	23	28,5	25,75	22	13	17,5
Índice	40	25	25		90	15	19	17	15	13	14
Corazón	43,5	28	27,5		96	15	19	17	15	13	14
Anular	37,5	25	25		87,5	15	19	17	14	12	13
Meñique	35	20	25,5		80,5	15	19	17	13	11	12

Tabla 1.2. Medidas de la palma de la mano

Largo de la palma	110(35)
Largo total de la mano	200(36)
Ancho con Pulga	90(40)
Ancho sin Pulgar	75(41)
Espesor lado pulgar	23(43)
Espesor lado opuesto al pulgar	20(42)

ANEXO II

Se presenta las características que posee la impresora 3D CP-01 *Creality Slicer* con sus respectivas especificaciones de hardware y software en la **Tabla 1.3**.

Tabla 1.3. Especificaciones técnicas Creality CP-01

Fuente: Slicer, 2020

3D Printing Basic Parameters	
Modelo	CP-01
Tamaño de impresión	200*200*200mm
Tecnología de moldeo	FDM
Número de boquillas	1
Grosor de la rebanada	0,1 mm-0,4 mm
Diámetro de boquilla	Standard 0,4 mm
Precisión	0,1 mm
Filamento	1,75 mm PLA
Formato de archivo	STL/OBJ/AMF
Modo de trabajo	En línea o tarjeta de almacenamiento fuera de línea
Slice Software	Creality Slicer/Cura/Repetier-Host/ Simplify 3D
Alimentación	AC: 115/230 V 50/60 Hz
Tensión de salida	24 V
Potencia Total	350 W
Temperatura de la cama	Mayor a 100 °C
Temp. Boquilla	Mayor a 250 °C
Reanudar impresión	Si
Detector de filamentos	No
Dual Z-Axial	Si
Selección de idioma	Si
Sistema Operativo	Windows XP/7/8/10/MAC/Linux
Velocidad de Impresión	Mayor a 180 mm/s

El precio de Venta en Ecuador oscila entre los \$980 a \$1200; este valor se toma en cuenta debido a que se adquirió en la provincia de Quito mediante la empresa SPK 3D por lo que no se agrega el costo de envío o importación.

ANEXO III

Se muestra los resultados específicos de las resistencias que se obtuvieron de los materiales impresos en PLA y PLA Fibra de Carbono como se visualiza en la **Tabla 1.4**.

Tabla 1.4. Resistencia de elementos impresos en PLA y PLA Fibra de Carbono con rellenos variables

Elemento	Material	Densidad de Relleno	Resistencia
A	PLA	20%	44,8 lb
		40%	52,2 lb
B	PLA	20%	37,6 lb
		40%	48,6 lb
A	PLA Fibra de Carbono	20%	58,7 lb
		40%	70,2 lb
B	PLA Fibra de Carbono	20%	49,6 lb
		40%	60,6 lb

ANEXO IV

Se visualiza los ejemplares de PLA y PLA de Fibra de carbono donde nos indica todas las partes que conforman el desarrollo de una prótesis de mano humana en las **Figura 1.1** , **Figura 1.2** y **Figura 1.3**.



Figura 1.1. Elementos Impresos en PLA Fibra de Carbono



Figura 1.2. Elementos Impresos en PLA



Figura 1.3. Elementos de la Prótesis Mixta

ANEXO V

En este presente ANEXO podremos visualizar el ensamblaje, y la inserción de los elementos necesarios para la finalización de una prótesis mixta de una mano humana en las **Figura 1.4** , **Figura 1.5** , **Figura 1.6** y **Figura 1.7** .

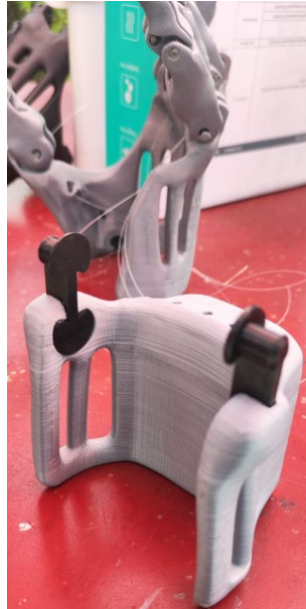


Figura 1.4. Proceso de Ensamblaje, colocación de la Articulación

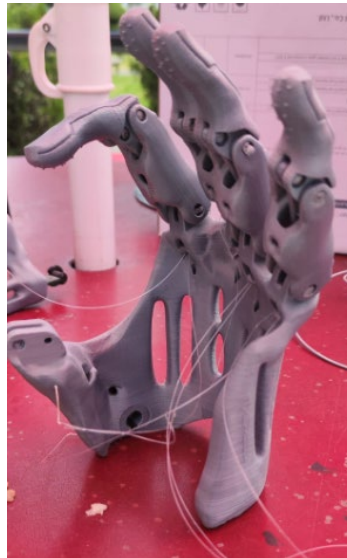


Figura 1.5. Inserción de los Hilos de Nylon



Figura 1.6. Sujeción a los elementos tensores de la Prótesis



Figura 1.7. Prótesis de PLA Funcional