

**DESARROLLO DE UN SISTEMA PROTÉSICO TRANSRADIAL
CONSIDERANDO ALTERNATIVAS MORFOLÓGICAS PARA SU
MANUFACTURA MEDIANTE IMPRESIÓN 3D**

**ANDRES FELIPE LESMES BECERRA
DANIEL FELIPE RODRIGUEZ AREVALO**

**UNIVERSIDAD SANTO TOMÁS
DE INGENIERIAS
FACULTAD DE INGENIERÍA MECÁNICA**

**BOGOTÁ D.C.
2024**

**DESARROLLO DE UN SISTEMA PROTÉSICO TRANSRADIAL
CONSIDERANDO ALTERNATIVAS MORFOLÓGICAS PARA SU
MANUFACTURA MEDIANTE IMPRESIÓN 3D**

ANDRES FELIPE LESMES BECERRA

DANIEL FELIPE RODRIGUEZ AREVALO

Trabajo de Grado para optar al título de Ingeniero Mecánico

Director

Jesús David Villarreal López

**UNIVERSIDAD SANTO TOMÁS
FACULTAD DE INGENIERÍA MECÁNICA
DIVISIÓN DE INGENIERÍAS
BOGOTÁ D.C.
2024**

TABLA DE CONTENIDO

TABLA DE CONTENIDO	2
TABLA DE FIGURAS.....	6
1. RESUMEN	8

2. OBJETIVOS	10
2.1 OBJETIVO GENERAL	10
2.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS	10
3. INTRODUCCIÓN	11
4. PARAMETROS PARA LA SELECCIÓN DE PROTESIS	12
4.1 MANUFACTURA ADITIVA	12
4.1.1 FFF	12
4.1.2 CFR (refuerzo de fibra continua)	13
4.1.3 ADAM	13
4.1.4 SLM	13
4.2 FORMATOS DE IMPRESIÓN 3D	14
4.2.1 STL	14
4.2.2 OBJ	15
4.2.3 3DS	15
4.2.4 SLDprt	15
4.2.5 3MF	15
4.3 MATERIALES DE MANUFACTURA ADITIVA	15
4.3.1 PLA	16
4.3.2 ABS	16
4.3.3 TPU	17
4.3.4 NYLON (PA)	17
4.3.5 POLICARBONATO	17
4.3.6 PETG	17
4.3.7 HIPS	17
4.3.8 PVA	18
4.4 SELECCIÓN DE MATERIAL PARA LA PROTESIS	18
4.5 SELECCIÓN DE PROTESIS TRANSRADIAL	23
5. MOVIMIENTOS DE LA MANO	29
5.1 ANATOMÍA DE LA MANO	29
5.1.1 Huesos de la mano	29
5.1.1.1 Huesos metacarpianos	29
5.1.1.2 Falange	30
5.1.1.3 Huesos carpianos	30
5.2 MÚSCULOS DE LA MANO	30

5.2.1 Extrínsecos	30
5.2.2 Intrínsecos	31
5.3 ARTICULACIONES DE LA MANO	31
5.3.1 Articulaciones interfalángicas.....	32
5.3.2 Articulaciones metacarpofalángica	32
5.4 MOVIMIENTOS DE LA MANO	32
5.4.1 Abducción y aducción de los dedos de la mano.....	32
5.4.2 Flexión y extensión de las articulaciones interfalángicas	33
5.4.3 Flexión y extensión de las articulaciones metacarpofalángicas.....	33
5.4.4 Movimiento de la mano desde la articulación de la muñeca.....	34
5.5 ACTIVIDADES DE LA MANO	35
6.VISIÓN DE MÁQUINA	35
6.1 VISIÓN ARTIFICIAL.....	35
6.1.1 Visión de máquina	36
6.1.2 Estado del arte en el desarrollo de visión de maquina.....	36
7. SISTEMA DE CONTROL	37
7.1 SISTEMA DE CONEXION	37
7.1.1 Raspberry pi4	37
7.1.2 Raspberry pi camera rev 1.3	38
7.1.3 Servomotor mg995	38
7.2 CONECTIVIDAD E INTERFAZ.....	39
7.3 CLASIFICACION DE MOVIMIENTOS.....	40
7.4 SALIDAS DIGITALES DEL RASPBERRY	42
7.5 LÓGICA DEL CÓDIGO	43
7.5.1 Niveles de luz bajos y altos en exceso	44
7.5.2 Uso de lentes.....	44
7.5.3 Angulo de posicionamiento de la cámara	44
7.5.4 Enfoque incorrecto del ojo.....	44
7.6 SISTEMA DE LECTURA.....	44
8.MANUFACTURA DEL SISTEMA PROTÉSICO.....	45
8.1 IMPRESIÓN 3D.....	45
8.1.1 Características de la impresora 3D.....	45
8.1.2 Software de impresión.....	47
8.2 PROCESO DE IMPRESIÓN	49

8.2.1 Proceso N°1.....	50
8.2.2 Proceso N°2.....	51
8.2.3 Proceso N°3.....	53
8.3 PROCESO DE ENSAMBLE	55
8.3.1 Materiales	55
8.3.2 Descripción del proceso de ensamble	55
9 CONCLUSIONES	60
10 BIBLIOGRAFIA	61
11 ANEXOS	68

TABLA DE FIGURAS

TABLA DE FIGURAS.....	6
Figura 1. Impresión 3D FFF.....	12
Figura 2. Impresión 3D CFR.....	13
Figura 3. Impresión 3D SLM.....	14
Figura 4. Modelo solido de triángulos.....	14
Figura 5. Modelo solido de triángulos.....	16
Figura 6. Modelo Inmoov	28
Figura 7. Porción distal del radio y el cúbito, y huesos de la mano.....	29
Figura 8. Anatomía de la mano	30
Figura 9. Músculos Extrínsecos.....	30
Figura 10. Músculos Intrínsecos.....	31
Figura 11. Movimiento de los dedos.....	32
Figura 12. Movimiento del pulgar	32
Figura 13. Movimiento de las articulaciones interfalángicas.....	33
Figura 14. Movimiento de las articulaciones metacarpofalángicas	33
Figura 15. Movimientos de la mano desde la articulación de la muñeca.	34
Figura 16. Artificial Intelligence.....	36
Figura 17. Raspberry PI4.....	37
Figura 18. Raspberry pi camera rev 1.3	38
Figura 19. Servomotor mg995	39
Figura 20. Diagrama de bloques.	39
Figura 21. Diagrama de conexiones.....	40
Figura 22. Clasificación de los servomotores.....	42
Figura 23. Pines raspberry pi4.....	42
Figura 24. Prototipo pruebas	44
Figura 25. Impresora Ultimaker 3 extended	47
Figura 26. Interfaz inicial de Ultimaker	47
Figura 27. Interfaz inicial de Ultimaker	48
Figura 28. Piezas del primer proceso en Ultimaker	50
Figura 29. Piezas impresas del proceso n1	51
Figura 30. Piezas del segundo proceso en Ultimaker.....	52
Figura 31. Impresión inicial para el proceso n2.....	52
Figura 32. Piezas del tercer proceso en Ultimaker	54

Figura 33. Piezas impresas del proceso n3	54
Figura 34. Falanges del dedo impreso	55
Figura 35. Palma de la mano impresa.....	56
Figura 36. Ensamble de la palma con la mano	56
Figura 37. Mano con hilo cáñamo	57
Figura 38. Mano con muñeca	57
Figura 39. Piezas externas del antebrazo	58
Figura 40. Antebrazo	58
Figura 41. Prótesis transradial	59
Figura 48. Sistema final de la prótesis transradial	60

TABLA DE TABLAS

Tabla 1. Tabla con propiedades de material para la impresión 3D	21
Tabla 2. Tabla con ventajas y desventajas de material para la impresión 3D	22

Tabla 3. Tabla con aspectos y valores	24
Tabla 4. Tabla descriptiva para cada modelo de prótesis	26
Tabla 5. Tabla para seleccionar la prótesis.....	27
Tabla 6. Clasificación de movimientos	41
Tabla 7. Conexiones Físicas	43
Tabla 8. Tabla de información Ultimaker 3 extended.....	46
Tabla 9. Parámetros de impresión de proceso N °1	50
Tabla 10. Parámetros de impresión de proceso n °2.....	52
Tabla 11. Parámetros de impresión de proceso n °3.....	53
Tabla 12. Valores enfocados a costos y tiempo	55

1. RESUMEN

El presente trabajo de investigación se enfoca en el diseño, desarrollo y manufactura de una prótesis transradial, donde se aplican áreas de la ingeniería mecánica tales como procesos de fabricación, manufactura y automatización. Las prótesis ofrecen una solución eficaz y accesible para las personas que han sufrido amputación a nivel del antebrazo. Por este motivo la universidad santo

tomas ya ha implementado prototipos de prótesis e investigaciones como, por ejemplo, aquellas que funcionan por medio de señales mioeléctricas. En este caso, se desarrolló de la siguiente manera, comenzando con la selección de una estructura adecuada mediante la evaluación de diferentes alternativas para determinar materiales y características físicas. Por consiguiente, se diseñó un sistema de control, utilizando la visión de máquina que es una tecnología y una metodología que tiene como objetivo el análisis e inspección de imágenes de manera automática, esto es posible usando una Raspberry pi4, una Raspberry pi camera rev 1.3, 5 servo motores; finalmente efectuando la manufactura del sistema protésico por medio de software de prototipado rápido, lo anterior para conseguir un prototipo que se logre mover por medio de la posiciones de la pupila ocular leída por la cámara, como resultado 4 posiciones de la mano.

Palabras claves:

- Visión de maquina
- Sistema de control
- Automatización
- Prótesis transradial

2. OBJETIVOS

2.1 OBJETIVO GENERAL

Desarrollar un sistema protésico transradial considerando alternativas morfológicas para su posterior manufactura mediante impresión 3D

2.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Seleccionar una estructura adecuada para la prótesis transradial mediante la evaluación de diferentes alternativas para determinar sus materiales y características físicas.
- Realizar un sistema de control de movimiento del sistema protésico haciendo uso de sensores y actuadores.
- Efectuar la manufactura del sistema protésico por medio de software de prototipado rápido.

3. INTRODUCCIÓN

En Colombia, Según los datos publicados por el DANE (Departamento Administrativo Nacional de Estadística), señala que la población en situación de discapacidad en Colombia en el 2020 es de 2.65 Millones enfocando que el 34.2% de la población de personas discapacitadas presenta pérdida de sus extremidades como brazos manos y piernas, sin embargo, menciona que el 13.4% presenta dificultades para poder agarrar o mover objetos con la mano. Asimismo, se asegura que la categoría ocupacional las personas con discapacidad demuestra que tienen empleos con menor calidad, según las estadísticas el 48.7% de personas con discapacidad trabajan de forma independiente o por cuenta propia agregando que existe el trabajo sin remuneración. En términos generales las causas principales de aquellas discapacidades son por enfermedades, acompañado de la edad avanzada y casusas congénitas; La actividad destacada en términos de porcentaje es “Agarrar o mover objetos con las manos” con el (57.5%), delante de actividades de mover el cuerpo, caminando o subir y bajar escaleras con un (52%). [1]

La impresión 3D de prótesis en Colombia representa una revolución en el campo de la medicina y la tecnología, y su importancia no puede ser subestimada. La impresión 3D ha emergido como una tecnología transformadora con el potencial de alterar significativamente la fabricación, el diseño y, en particular, la atención médica. En Colombia, la importancia de la impresión 3D de prótesis es especialmente notable.

Colombia, como muchos países en desarrollo, enfrenta desafíos significativos en términos de acceso a la atención médica. La falta de infraestructura médica y la escasez de personal médico capacitado pueden dificultar el acceso a dispositivos médicos esenciales, como las prótesis. Aquí la impresión 3D puede jugar un papel crucial porque permite la producción rápida y rentable de prótesis personalizadas. A diferencia de las prótesis tradicionales, que pueden ser costosas y requieren un largo proceso de ajuste, las prótesis impresas en 3D pueden ser personalizadas para adaptarse perfectamente al individuo. Esto no solo mejora la comodidad y la funcionalidad de la prótesis, sino que también puede mejorar la calidad de vida del usuario. Además, puede ayudar a superar las barreras geográficas al permitir la producción local de prótesis. Esto es especialmente relevante en áreas rurales de Colombia, donde el acceso a la atención médica puede ser limitado.

En resumen, la impresión 3D de prótesis en Colombia tiene el potencial de mejorar la atención médica, aumentar la accesibilidad y mejorar la calidad de vida de aquellos que necesitan prótesis. Conforme esta tecnología continúa evolucionando, probablemente veamos un impacto aún mayor en el futuro.

4. PARAMETROS PARA LA SELECCIÓN DE PROTESIS

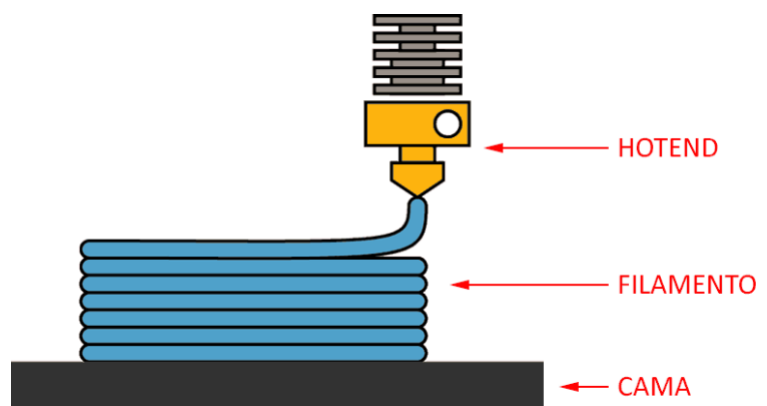
En la selección de la prótesis hay que aclarar su necesidad entre las características predeterminadas y el criterio abarca los objetivos necesarios, pero es indispensable describirlas para considerar que opciones son modulables y su diseño no afecta a la funcionalidad específica, se determina que no todas las prótesis son legibles para el usuario por su capacidad de adaptación. La idea de presentar una prótesis es funcionalmente comparada con otro tipo de prótesis estética, no obstante, se identifican los modelos existentes para realizar una selección adecuada, además hay que aclarar que la prótesis no tendrá un usuario final en términos de sujeción y anclaje por debajo del codo. La división del desarrollo de este objeto está descrita en los tipos de impresoras, formatos de impresión, y materiales preliminares que son usados en el mundo de la protésica.

4.1 MANUFACTURA ADITIVA

4.1.1 FFF

Es un sistema que consta de una fundición del termoplástico, funciona por una boquilla caliente que va derretiendo el filamento y lo va posicionando de acuerdo con el diseño seleccionado, formando la pieza capa por capa se realiza un proceso. [2]

Figura 1. Impresión 3D FFF



Fuente [3]

4.1.2 CFR (refuerzo de fibra continua)

Como su nombre lo describe es un refuerzo a la impresión, funciona agregando una segunda boquilla para un refuerzo de un segundo material por medio de hebras, es un complemento a las piezas para que tengan una mejor resistencia, es más fuerte y rígida, presenta características como alta precisión, gran acabado superficial, y piezas.[4]

Figura 2. Impresión 3D CFR



Fuente: [5]

4.1.3 ADAM

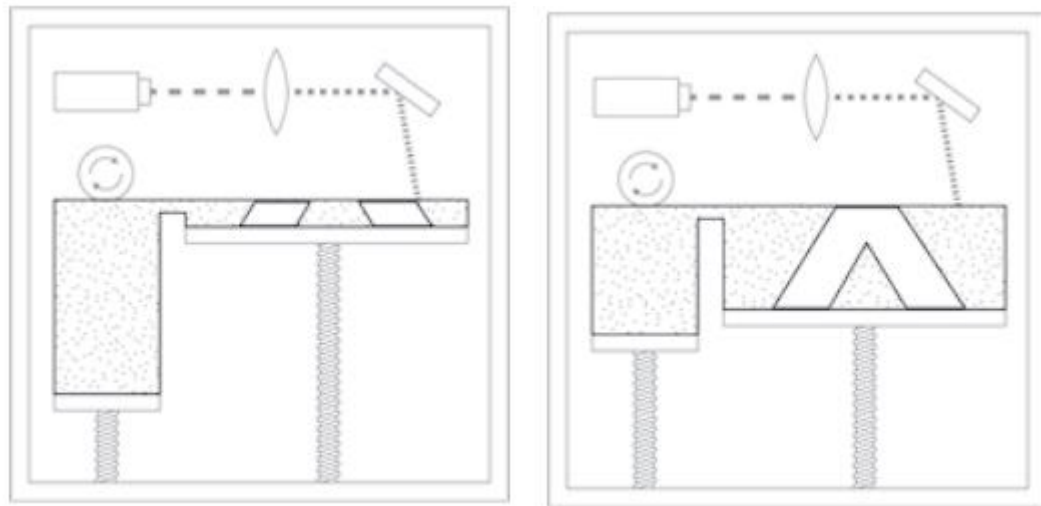
Este tipo de impresión funciona por medio de un polvo metálico con un aglutinante de plástico, con este método se pueden realizar la manufactura de piezas complejas sin embargo existen contradicciones en tema de segura por manipulación del material y post manufactura, el polvo se mezcla con el plástico y se trabaja capa por capa pero se realiza un tipo de escala para igualar el encogimiento que ocurre en el tiempo de sintetizado que consta de un lavado para eliminar impurezas y que finaliza en un horno para que el polvo metálico se convierta en metal.[6]

4.1.4 SLM

Conocido como (Selective Laser Melting) Es un proceso de manufactura aditiva que trabaja por medio de un láser de alta potencia para la fusión de materiales en polvo, se puede usar materiales plásticos o metálicos para fabricar objetos que necesiten niveles de alta precisión presenta ventajas entre disminución de

desechos , calidad y resistencia , gran variedad industrial .Frente al proceso de impresión divide el modelo en capas delgadas aplicando el polvo metálico sobre alguna base metálica , más adelante llega el láser para fundir el polvo exactamente en una determinada posición y las partículas se unen para crear el objeto seleccionado .[7]

Figura 3. Impresión 3D SLM



Fuente: [8]

4.2 FORMATOS DE IMPRESIÓN 3D

Dentro del ámbito de la manufactura aditiva existen diferentes factores dentro del sistema de fabricación, entre diferentes programas de diseño varía los formatos dependiendo el campo de aplicación se distinguen algunos formatos para darle el mejor uso para su desempeño.

4.2.1 STL

Conocido en la industria como "Stereolithography" es un formato que se encuentra en el mercado hace más de 30 años y aún sigue en la actualidad siendo uno de los más usados, describe el objeto en 3D sin tener en cuenta el color, textura etc. Su funcionamiento se basa en el lenguaje de triángulos que representan el modelo sobre su área, entre más difícil el modelo, se utilizan más triángulos para mejor calidad. [9]

Figura 4. Modelo solido de triángulos.

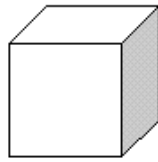


Figure 1

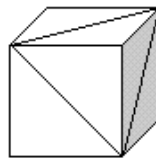


Figure 2



Figure 3

Fuente [10]

4.2.2 OBJ

Es un formato que es común en conjunto al STL, desarrollado para trabajar exclusivamente con Advanced Visualizer sin embargo a lo largo del tiempo agregaron diferentes tipos de programas con la capacidad de tener en cuenta el color y su textura, también es compatible con diferentes programas de diseño.[11]

4.2.3 3DS

Su uso se basa mediante vectores en 3D que se fundamenta en valores binarios, aquel formato guarda información sobre la textura, color, material, iluminación entre otras cosas. Aunque en su inicio en 1990 presentaba diferentes problemas por su plataforma, se destacaba por entregar una excelente calidad entre los detalles e imágenes. ARCHIVOS 3DS [12].

4.2.4 SLDPRT

Desarrollado para trabajar con el software SolidWorks trabaja en configuraciones con otras piezas en un documento de montaje, trabajan como archivos binarios en formatos 3D. [13]

4.2.5 3MF

Conocido como formato de fabricación 3D creado por Microsoft, es una plataforma de código abierto que presenta la competencia de conservar un modelo con los datos e información importantes a comparación de otros formatos de impresión, funciona como un archivo comprimido con la opción de guardar varios conceptos ahorrando tiempo y trabajo. [14]

4.3 MATERIALES DE MANUFACTURA ADITIVA

Para la selección de material se deben considerar características de durabilidad y resistencia a los movimientos ejecutados por los sistemas eléctricos, pero la relación entre aquellas propiedades se relaciona con su valor en el mercado, por lo que hay que mencionar los materiales más usados en la impresión 3D destacando sus características principales.

4.3.1 PLA

Más conocido como PLA el ácido polilactico es un termoplástico biodegradable que se obtiene por medio de la naturaleza y lleva mucho tiempo en el mercado de la fabricación por medio de impresora y sus usos van desde aplicaciones sencillas hasta las industriales. Es un filamento que es elegido fácilmente por facilidad de impresión a bajas temperaturas y no necesita una cama calentada, sus beneficios son la buena precisión dimensional, vida útil amplia y objetos rígidos, sin embargo, frente al calor no es resistente y puede generar grietas para romperse. [15]

Figura 5. Modelo solido de triángulos.



Fuente: [16]

4.3.2 ABS

Es un plástico de la familia de los polímeros donde su consistencia se basa en el conjunto de tres polímeros que aportan características importantes como el estireno con una capacidad de maleabilidad, el acrilonitrilo presenta rigidez y resistencia al calor y finalmente el butadieno garantiza la durabilidad y elasticidad, aquellas propiedades se prestan para que se use en el progreso de creación de productos. Se convierte en un material resistente y liviano.[17]

4.3.3 TPU

Es un elastómero que presenta propiedades únicas para altos niveles de durabilidad y flexibilidad, con capacidad de tolerar fuerzas de tracción y compresión, es un material difícil de romper con la capacidad de absorber golpes, similar al caucho, pero la impresión de este material se puede dificultar si no se obtiene la configuración correcta.[18]

4.3.4 NYLON (PA)

El Poliamida más conocido como nylon es un material de baja densidad y una alta estabilidad térmica, es significativo porque presenta características de resistencia al desgaste, altas temperaturas e impactos, sin embargo, apunta hacia la absorción de humedad, sin embargo, sus propiedades varían de acuerdo con su clasificación y dependiendo su estructura molecular, el PA6 se encuentra disponible como filamento por lo tanto la selección del material se desarrolla en sus propiedades.[19]

4.3.5 POLICARBONATO

El policarbonato es un material proveniente de una fuente orgánica y una química, es liviano, pero se distingue por su resistencia y transparencia, sin embargo, en la impresión 3D presenta algunas dificultades frente a sus temperaturas ya que son demasiado elevadas entre 260° y 290° C y en su efecto secundario por temperatura se produce la demarcación o doblamiento de las capas y se despega de la superficie. [20]

4.3.6 PETG

se produce la demarcación o doblamiento de las capas y se despega de la superficie El PETG es un termoplástico fabricado sobre la base del PET, adicionando glicol al PET, ayudando a la mejora de sus propiedades, mejora en resistencia, durabilidad y sencillez al imprimir, es un filamento ideal para trabajos de alta calidad según precisión y versatilidad. Pero el PET presenta problemas en altas temperaturas es uno de los materiales más empleados en la industria de los plásticos. [21]

4.3.7 HIPS

Conocido como Poliestireno de Alto Impacto, es un material que se destaca por su solubilidad para convertirlo en una buena opción para la impresión con ángulos inclinados, asimismo se usa para material de soporte de la impresión FDM, sin embargo, presenta cierta complejidad al exponerse a productos

químicos ya que tiende a degradarse, y en temperaturas bajas puede volverse quebradizo y no es resistente a los rayos UV.[22]

4.3.8 PVA

Es un termoplástico que es biodegradable que se disuelve con el agua y se puede usar para la creación de soporte de impresión FDM de doble extrusión, físicamente es un polvo blanco o amarillo, asimismo es un material que depende de la humedad ya que con ella puede variar su flexibilidad y elasticidad sus razones son porque el agua funciona como plastificante.

[23]

4.4 SELECCIÓN DE MATERIAL PARA LA PROTESIS

Aunque todos los materiales tienen características únicas comparten varios aspectos en común, que pueden funcionar para la prótesis seleccionada, sin embargo, es necesario destacar cada material por sus propiedades mecánicas pese a que la prótesis no va a realizar movimientos bruscos ni soportar pesos exagerados, es imprescindible estudiar las mejores opciones de acuerdo con el trabajo realizado teniendo en cuenta valoraciones de su importancia. En este caso además de la búsqueda de la mejor opción como material y sus propiedades mecánicas, el valor económico en el mercado de cada material es un factor esencial en este caso.

En general, al ser un objeto de prótesis tiene aspectos básicos de utilidad, por lo que hay que mencionarlos de aquí en adelante.

DURABILIDAD

Para el usuario final es importante que la adquisición de la prótesis presente cierta conservación física independiente del diario vivir y de su forma de uso, por lo tanto, es importante encontrar un material que brinde un excelente tiempo de uso.

RESISTENCIA

Conociendo el uso que se le va a dar a la prótesis también es importante encontrar el material que soporte los esfuerzos y fuerzas se van a aplicar sobre aquella estructura, además de casos hipotéticos de manipulación que le puedan ocasionar danos a la prótesis.

RECICLABLE

En la manufactura aditiva existen materiales que pueden volver a ser utilizados y seguir conservando sus mismas características, en el ciclo de vida del material no necesariamente es para reusarlo en la misma prótesis, sino en otros objetos.

AMIGABLE CON EL MEDIO AMBIENTE

Dependiendo su procedencia, hoy en día es ideal el aporte al medio ambiente, minimizando el uso de recursos en su fabricación o en su defecto sea biodegradable.

COSTO

La economía de producto para su posterior manufactura depende de la materia prima, por lo tanto, se debe encontrar una relación efectiva entre el costo beneficio del material utilizado.

AMBIENTE

Dependiendo del medio en el cual se trabaje la prótesis, es importante resaltar como el ambiente puede afectar la composición de los termoplásticos adquiriendo propiedades deficientes.

FACILIDAD DE IMPRESIÓN

Aunque es un término en cuanto a manufactura los materiales tienden según sus temperaturas de impresión, las camas usadas para retirar el producto impreso, hasta que tipo de impresoras son ideales para cada proceso.

TOXICIDAD

La materia prima tiene propiedades y características únicas, pero cuando hace contacto con la piel o se ingiere conlleva a efectos secundarios, por lo que se evalúa su toxicidad para evitar inconvenientes a futuro.

TEMPERATURA MÁXIMA SE SERVICIO

La temperatura máxima de servicio de los materiales seleccionados en si no se ven afectados por las temperaturas de trabajo y/o uso. Esta determinación se realiza basándose en la climatología colombiana dependiendo de sus pisos térmicos igualmente no supera los 45 Grados de temperatura; sin embargo, aquella dependencia lo genera el ambiente, una contradicción es el uso que se le va a dar la prótesis, por lo tanto, se realiza ciertas recomendaciones para alargar la vida útil de la misma.

COEFICIENTE DE EXPANSIÓN TÉRMICA

El coeficiente de expansión térmica como expansión o contracción relativa de los materiales expuestos a temperaturas pueden generar cierto cambio físicos en la

propiedad, como la forma, el área, el volumen y la densidad, por lo tanto, es importante que en el diseño. [32]

TEMPERATURA DE EXTRUSIÓN

Aunque la temperatura de extrusión es una propiedad de impresión que no genera dificultades a la hora del uso, si es un factor importante en tema de la manufactura es por esto por lo que se clasifica entre cierto rango de temperatura, para tener en cuenta que afecta a la fluidez del material y fundir el material dependiendo variables de impresión, sin embargo, ya existen ciertos parámetros definidos para evitar estos contratiempos.[33]

TEMPERATURA DE TRANSICIÓN VÍTREA

Otro parámetro para tener en cuenta es la temperatura de transición vítrea que nos ayuda a identificar cuando el material cambia las propiedades físicas de un sólido duro y cristalino a la de un sólido amorfo, lo que quiere decir estado gomoso, más sencillo de explicar a un estado blando. Por lo tanto, es importante para su posterior fabricación no afecte las propiedades físicas.[34]

TEMPERATURA DE LA CAMA

La temperatura de la cama es un aspecto relevante a la hora de la excelente adhesión del material a la superficie evitar la deformación de la pieza. Aquel valor puede variar de acuerdo con el filamento y tipo de impresora.[35]

IMPRESIÓN EN RECINTO

La impresión con recinto depende de la materia prima, alguna de ellas necesita el recinto, las opciones generales por las cuales se usa el recinto puede ser control de temperatura, reducción de deformaciones, seguridad, reducción de ruido y protección contra el polvo.[36]

RESISTENCIA A LOS RAYOS UV

Los diferentes filamentos tienen ciertas tendencias al comportamiento frente a los rayos UV, aunque algunos materiales son resistentes, si se encuentran constantemente a los rayos UV puede presentar danos, lo ideal no es tener siempre la exposición de la luz sola directa sobre las piezas.

VELOCIDAD DE IMPRESIÓN

Para la velocidad de impresión tiene relación directa de acuerdo con la producción de impresora, sin embargo, en conjunto de la velocidad también el extrusor tiene que trabajar en medida simultanea para aplicar el material, no

obstante, el requerir el movimiento rápido agrega efectos como vibraciones, puede tener pérdidas de precisión y que la calidad disminuya.[34]

CALIBRE DE MATERIAL

Considerando el material, el diámetro de filamento es relevante, aunque no parezca, entre 1.75 mm o 2.85 mm y se encuentra en todos los materiales, pero son presentaciones adaptadas más hacia el tipo de impresora y su sistema de extrusión. Además, en el caso del filamento de 2.85 mm es más escaso encontrar filamentos en un precio económico a comparación del de 1.75 mm, sin embargo, en este caso en la tabla comparativa se consideran los dos precios.

Antes se mencionaban diferentes materiales ideales con características, pero las propiedades mecánicas, físicas y térmicas son importantes, igual que las de impresión, por lo que se describen en una tabla para seleccionar la mejor opción que son los valores en color amarillo.

Tabla 1. Tabla con propiedades de material para la impresión 3D

MATERIALES	ABS	PLA	PETG	NYLON	POLIPROPILENO	UNIDAD	VALOR
RESISTENCIA MAXIMA	40	65	53	40-85	32	MPa	10
RIGIDEZ	5/10	7.5/10	5/10	5/10	4/10	-	10
DURABILIDAD	4/5	2/5	4/5	5	4,5/539	-	10
TEMPERATURA MAXIMA DE SERVICIO	98	60-74	73	80-95	100	°C	9
COEFICIENTE DE EXPANSION TERMICA	90	68	60	95	150	µm/m-°C	5
DENSIDAD	1.04	1.24	1.23	1.06-1.14	0.9	g/cm3	4
PRECIO (1.75 mm)	\$ 85.000,00	\$ 80.000,00	\$ 90.000,00	\$ 150.000,00	\$ 90.000,00	1 kg	10
PRECIO (2.85 mm)	\$ 300.000,00	\$ 80.000,00	\$ 90.000,00	\$ 350.000,00	\$ 160.000,00	1 kg	10
TEMPERATURA DE EXTRUSION	220-250	190-220	230-245	220-270	220-250	°C	6
TEMPERATURA DE TRANSICION VITREA	110	60-65	80	50	-15 a -300	°C	7
TEMPERATURA DE LA CAMA	80-100	60	60-90	70-90	85-100	°C	6

IMPRESION EN RECINTO (RECOMENDADO)	SI	NO	NO	SI	SI		6
RESISTENTE A LOS RAYOS UV	MEDIA	MEDIA	BUENA	EXCELENTE	BAJA		9
VELOCIDAD DE IMPRESION	30-90	20-100	40-60	30-50	20-40	mm/s	5
TIPO DE IMPRESION	FDM	FDM	FDM	FDM	FDM		8
RECICLABLE	SI	SI	SI	SI	SI		9
TOTAL	7	57	21	29	9		

Fuente: Autor

Para agregar a la tabla anterior también se pueden basar en varias características y usos según foros, documentos y artículos, por lo que se clasifica una tabla con ventajas y desventajas para considerar la selección del filamento para este prototipo.

Tabla 2. Tabla con ventajas y desventajas de material para la impresión 3D

MATERIAL	VENTAJAS	DESVENTAJAS	USOS
ABS	Resistente a los impactos y a las altas temperaturas	Dificultad de impresión, mala adherencia a la cama	Prototipo funcional
PLA	Económico, facilidad de impresión, Rígido, Biodegradable	Frágil, no es flexible, Baja resistencia a los rayos UV y temperatura	Modelos conceptuales. Prototipos estéticos
PETG	Resistencia a las altas temperaturas, Baja deformación. Resistente y duradero	Baja calidad en piezas de alta precisión. Posible encordado, se adhiere bastante a la cama de impresión	Aplicaciones impermeables
NYLON	Excelente resistencia mecánica. Resistencia a altas temperaturas	Gran capacidad de absorción de humedad, Tendencia a deformación.	Prototipos funcionales. Piezas resistentes al desgaste

PP	Resiste a los impactos, resistencia a la fatiga, buen acabado superficial	Material Ligero, precio alto, Tiene un alto nivel de alabeo, bajo nivel de adherencia a la cama	Industria de la inyección de plástico
----	---	---	---------------------------------------

Fuente : Autor

Como se evidencia el precio de cada materia prima, el único que destaca con el precio más bajo conservando la categoría de los filamentos es el PLA, además de conseguir una valoración superior en cada aspecto de selección, el filamento de excelencia es el PLA detrás del nylon, pero, como se mencionó, todos conservan características que se enfocan a los usos específicos y depende del objeto para la impresión; algunos materiales son mejores para trabajar y resistir mejor a altas temperaturas, otros resistentes a los impactos y ventajas y desventajas, pero también su manufactura según el equipo empleado. Por lo tanto, se selecciona el PLA como material para realizar la impresión de acuerdo con sus características adecuadas para este modelo.

4.5 SELECCIÓN DE PROTESIS TRANSRADIAL

Se describirán puntos para determinar la estructura adecuada descrita a continuación, la selección adecuada de una prótesis transradial es fundamental para garantizar la mejor funcionalidad y confort para quienes han sufrido una amputación por debajo del codo. Este proceso implica considerar una variedad de factores que incluyen las necesidades individuales del usuario, el nivel de actividad, y las características específicas de la prótesis.

El objetivo principal es elegir una solución que permita una adaptación óptima, mejorando la capacidad de realizar actividades diarias con mayor facilidad y eficacia. A lo largo de este proceso, es crucial evaluar las opciones disponibles y cómo cada una puede satisfacer las necesidades únicas del usuario, asegurando así una mayor calidad de vida. La selección de la prótesis de basa en ciertos requerimientos sin embargo se plantea diferentes aspectos básicos .

Material

- La selección del material depende del tipo de impresora seleccionada.
- La relación entre las propiedades mecánicas y características de adaptación.
- El valor del material es un factor determinante para su fabricación.

Proporción

-Aunque no se determina un usuario final teniendo en cuenta el tamaño del codo, se tiene en cuenta un brazo desarrollado de una edad de 21 años.

Estética

-Es necesario encontrar un modelo adecuado que conste de características atractivas y que se acomoden las necesidades.

-Conforme con el material es necesario encontrar una superficie lisa y no con texturas diferentes.

Ergonomía

-Junto con el material hay que encontrar una de características livianas para permitir una comodidad diaria vivir.

-Maniobrabilidad sencilla.

Mantenimiento

-Para realizar un mantenimiento tenga facilidad de ensamblaje y cambio de componentes en términos de cambios de algún sistema o componentes.

Economía

-Encontrar un balance entre componentes eléctricos, materiales y mantenimientos justos para ser un producto de calidad con precios reducidos.

Seguridad

-Ningún sistema se encuentre en riesgo de alteración de este.

-Cumpla las normas y leyes establecidas.

En una escala de 1 a 10 se evaluarán los aspectos relacionados para la selección de la prótesis, siendo 10 el valor más alto en la escala resaltando su importancia, y 1 el valor más bajo.

Tabla 3. Tabla con aspectos y valores

ASPECTOS	DESCRIPCIÓN	VALOR
MATERIAL	Material impreso mediante manufactura aditiva	10
PROPORCIÓN	El tamaño tenga correlación con un brazo desarrollado completamente	10
ESTÉTICA	Sea lo más parecido a un brazo y mano humana	10
ERGONOMÍA	Fácil adaptación al codo del usuario	8

MANTENIMIENTO	Facilidad de mantenimiento	8
FUNCIONAMIENTO	Tener sencillez de trabajo para el usuario	6
ACCESORIOS	Capacidad de encontrar repuestos o accesorios con sencillez	9
SEGURIDAD	No presente riesgos para el usuario al manipularlo	7
ECONOMÍA	Su precio sea bajo	8
MATERIAL	Sea amigable con el medio ambiente	7
FORMATO	Encontrar un formato o extensión de impresión 3D	10
FUNCIONALIDAD	capacidad de varios movimientos de la mano	10
ADAPTACIÓN	adaptación al usuario	8
ESTÉTICA	Sea modificable en sus características estéticas	7
MATERIAL	No toxico	6

Fuente: Autor

Para la selección de la prótesis se busca alguna prótesis que se encuentre en internet y que cuente con las características descritas en la tabla a continuación, sin embargo, se seleccionaran 5 prótesis open source para su valoración y calificación.

En la búsqueda preliminar de las prótesis se visualiza diferentes modelos entre diferentes páginas web, sin embargo, existen páginas que se dedican específicamente al diseño de las prótesis con modelos exactos de personas y otras páginas que solo tienen espacios para la publicación de proyectos CAD, además de encontrar publicaciones con costo por proyecto y otras con formatos no indicados. Para la selección de los 5 modelos se destaca encontrar los documentos con extensión de impresión individuales y en conjunto completos. Según los parámetros seleccionados la valoración de los aspectos se ejecuta de 1 a 10, tomando en cuenta el 10 como el valor más alto y 1 menor valor.

Tabla 4. Tabla descriptiva para cada modelo de prótesis

ENLACE	https://hub.e-nable.org/project/devices/2017/01/20/e-nable-Phoenix+Hand+v3	https://www.thingiverse.com/thing:4618922#Post-Printing	https://www.thingiverse.com/thing:3965525	https://hub.e-nable.org/sites/default/files-and-resources/Cyborg+Beast#files-and-resources	https://www.thingiverse.com/thing:2217431	https://inmoov.fr/hand-and-forarm/
IMAGEN						
MODELO	e-nable	Kineti Hand	Forefinger Gripper Hand	Cyborg beast	Reborn Hand	InMoov
MATERIAL	10	10	10	10	10	10
PROPORCIÓN	7	8	5	8	10	10
ESTÉTICA	8	9	10	7	7	8
ERGONOMÍA	8	7	2	8	10	9
MANTENIMIENTO	9	8	6	7	8	8
FUNCIONAMIENTO	8	8	5	8	9	10

ACCESORIOS	9	10	9	9	9	10
SEGURIDAD	10	10	5	10	10	9
ECONOMÍA	10	10	10	10	10	10
MATERIAL	10	10	10	10	10	10
FORMATO	10	10	10	10	10	10
FUNCIONALIDAD	10	9	5	9	8	10
ADAPTACIÓN	7	6	2	9	10	9
ESTÉTICA	7	6	4	6	8	8
MATERIAL	10	10	10	10	10	10

Fuente: Autor

Como se puede evidenciar en la tabla anterior se posicionan ciertos valores en criterio de la mejor opción para la selección de la prótesis clasificada por las descripciones anteriores. Mas adelante se realiza el cálculo de la tabla N3 dividido con la Tabla N4 para obtener el mejor modelo de prótesis transradial mediante el valor de cada ítem.

Tabla 5. Tabla para seleccionar la prótesis

	MODEL O1	MODEL O2	MODEL O3	MODEL O4	MODELO 5	MODELO 06
MATERIAL	1	1	1	1	1	1
PROPORCIÓN	0,7	0,8	0,5	0,8	1	1
ESTÉTICA	0,8	0,9	1	0,7	0,7	0,8
ERGONOMÍA	1	0,875	0,25	1	1,25	1,12
MANTENIMIENTO	1,125	1	0,75	0,875	1	1
FUNCIONAMIENTO	1,3	1,3	0,8	1,3	1,5	1,6
ACCESORIOS	1	1,1	1	1	1	1,11
SEGURIDAD	1,42	1,42	0,71	1,42	1,42	1,28
ECONOMÍA	1,25	1,25	1,25	1,25	1,25	1,25
MATERIAL	1,42	1,42	1,42	1,42	1,42	1,4
FORMATO	1	1	1	1	1	1

FUNCIONALIDAD	1	0,9	0,5	0,9	0,8	1
ADAPTACIÓN	0,875	0,75	0,25	1,125	1,25	1,1
ESTÉTICA	1	1,14	0,57	0,85	1,14	1,1
MATERIAL	1,66	1,66	1,66	1,66	1,66	1,6
TOTAL	16,60	16,586	12,71	16,36	17,41	17,6015873

Fuente: Autor

Como se puede visualizar en la tabla anterior según los valores calculados, el diseño seleccionado se basa en una excelente calificación conforme a los parámetros, el modelo N6 conocido como “Inmoov” presenta características completas de prótesis transradial con extensión del antebrazo completa con su funcionalidad independiente de cada dedo.

Figura 6. Modelo Inmoov



Fuente: [30]

Es un modelo que une todos los aspectos en lo general es una prótesis transradial que tiene movilidad en cada uno de los cinco dedos controlados independientemente por medio de servomotores MG995, los cuales están ubicados en la parte del antebrazo brindando la oportunidad de usar este espacio de manera productiva, además este modelo de prótesis tiene la capacidad de tener movimiento articulado de la muñeca, sin embargo, el proyecto inicial es realizar el movimiento en los dedos.

Es importante recalcar que este modelo tiene el diseño base de los servomotores para posicionarlos y ajustarlos

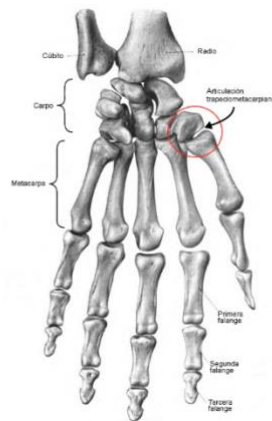
El modelo InMoov está diseñado con las falanges distales, medias y proximales independientes sin embargo el movimiento si es completo de cada uno de los dedos (pulgár, índice, corazón, anular, menique) para el movimiento del pulgar según el InMoov puede generar un movimiento de flexión y extensión. Y en el movimiento de los dedos, presenta la flexión y extensión de las articulaciones metacarpofalángicas.

5.MOVIMIENTOS DE LA MANO

5.1 ANATOMÍA DE LA MANO

La mano es miembro superior del cuerpo humano y se encarga de realizar diferentes movimientos permitiendo controlar los objetos en la vida diaria, es una herramienta esencial en el ser humano, necesario describir cómo funciona su anatomía para identificar sus movimientos. Se compone de varios músculos, huesos y ligamentos, a vista general se compone de 5 huesos metacarpos y 14 falanges, se basa entre dividir los músculos extrínsecos que son aquellos que trabajan con el antebrazo y los intrínsecos que son encargados de transmitir toda su amplitud en movimiento, en la imagen se visualiza a grandes rasgos como se encuentra dividido entre falanges y huesos.[24]

Figura 7. Porción distal del radio y el cúbito, y huesos de la mano



Fuente: [25]

5.1.1 Huesos de la mano

La mano tiene 27 huesos y están distribuidos entre los huesos carpianos, metacarpos y falanges de la mano, es necesario describir cada uno de ellos para identificar exactamente que función cumplen. (véase Figura 8) [26]

5.1.1.1 Huesos metacarpianos

Los huesos metacarpianos se encuentran en la parte central de la mano, conocido como la palma de la mano y une las falanges con el conjunto de huesos distales del carpo. (véase Figura 8) [26]

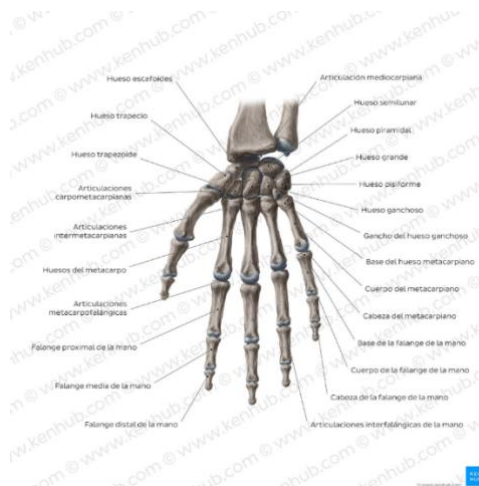
5.1.1.2 Falange

La falange se ubica en los dedos, así como de las manos también en los pies y se dividen entre tres partes conocidos como (distal, media, proximal) excepto el pulgar que se divide en dos (proximal y distal). (véase Figura 8) [26]

5.1.1.3 Huesos carpianos

Son aquellos que están divididos en dos filas sin embargo tienen formas irregulares y están distribuidos como proximal y distal, los ocho huesos tienen diferentes morfologías para poder realizar sus conexiones con varios huesos, músculos y ligamentos. (véase Figura 8) [26]

Figura 8. Anatomía de la mano



Fuente: [27]

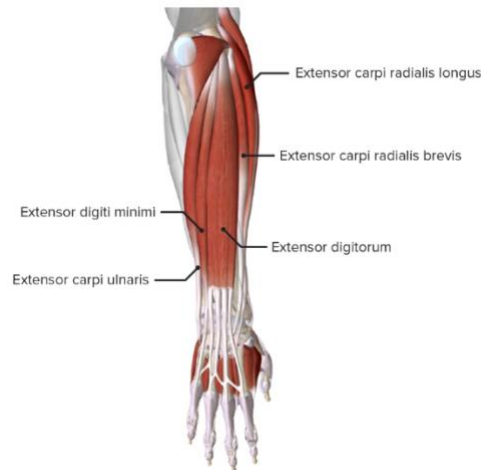
5.2 MÚSCULOS DE LA MANO

En los movimientos de la mano se originan desde los músculos extrínsecos y los intrínsecos.

5.2.1 Extrínsecos

El cuerpo muscular se encuentra en el antebrazo y se encargan de la fuerza y agarre. (véase en la figura 9) [28]

Figura 9. Músculos Extrínsecos

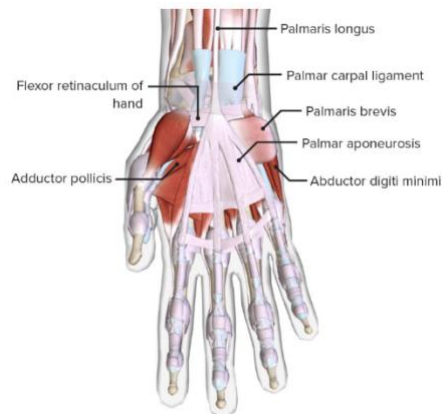


Fuente: [28]

5.2.2 Intrínsecos

El cuerpo muscular se localiza dentro de la mano y es responsable del movimiento preciso de los dedos (véase en la figura 10) [28]

Figura 10. Músculos Intrínsecos



Fuente [28]

5.3 ARTICULACIONES DE LA MANO

Las articulaciones de la mano se componen de dos tipos de articulaciones, las metacarpofalángicas que unen los huesos metacarpianos con los dedos, es necesario recordar que aquellos huesos se encuentran en la palma de la mano, y las articulaciones interfalángicas que se encuentran entre las falanges de los dedos [28]

5.3.1 Articulaciones interfalángicas

Aquellas articulaciones presentan su función entre la flexión y extensión de las falanges de cada uno de los dedos, aquel movimiento significa el agarre los mismos huesos de la mano en conjunto con el pulgar. (véase en la figura 10) [28]

5.3.2 Articulaciones metacarpofalángica

En función de la palma de la mano, el dedo pulgar tiene función de bisagra con características de flexión y extensión a comparación de los otros cuatro dedos que agregando abducción y aducción. (véase en la figura 11) [28]

5.4 MOVIMIENTOS DE LA MANO

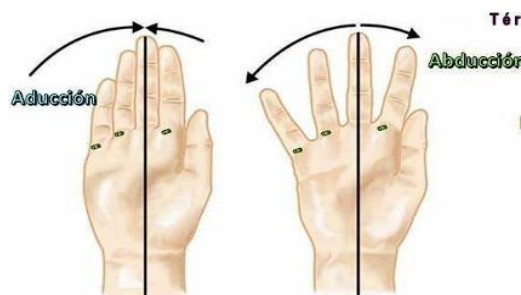
Los movimientos de la mano dependen del tipo de clasificación encontrada dentro de las articulaciones mencionadas anteriormente, para ello se describe mediante ciertos grados de libertad en conjunto con la palma de la mano y los dedos, además en términos generales también existe un movimiento conector entre la mano y la muñeca, el movimiento descrito a continuación se divide en

- Flexión y extensión
- Abducción y aducción.

5.4.1 Abducción y aducción de los dedos de la mano.

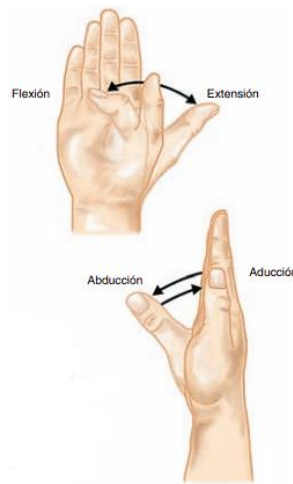
Indica el movimiento de apertura o cierre de los dedos sobre el eje vertical y horizontal de la mano (véase en la figura 11).

Figura 11. Movimiento de los dedos



Fuente: [29]

Figura 12. Movimiento del pulgar



Fuente [29]

5.4.2 Flexión y extensión de las articulaciones interfalángicas

En la imagen evidencia como las articulaciones interfalángicas que se encuentran entre las falanges de los dedos de la mano.

Figura 13. Movimiento de las articulaciones interfalángicas



Fuente: [29]

5.4.3 Flexión y extensión de las articulaciones metacarpofalángicas

En la imagen evidencia como las articulaciones metacarpofalángicas respecto al movimiento de los dedos sin flexionar ninguna falange, y llevando a cabo un movimiento completo.

Figura 14. Movimiento de las articulaciones metacarpofalángicas

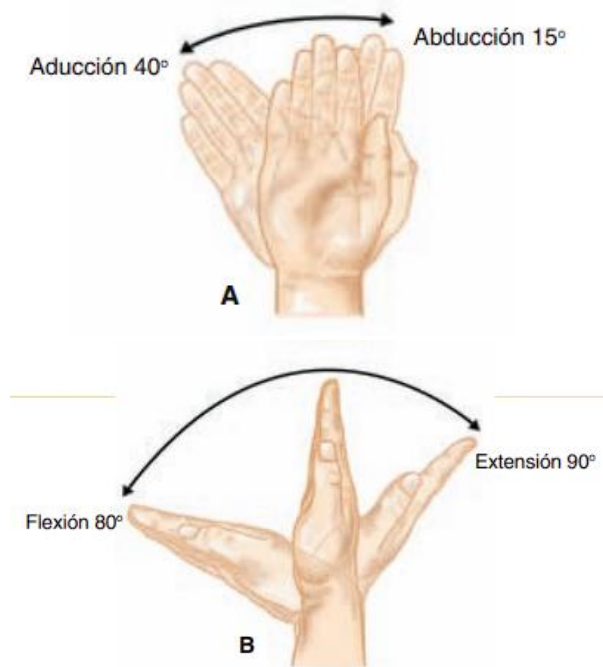


Fuente: [29]

5.4.4 Movimiento de la mano desde la articulación de la muñeca.

La articulación de la muñeca, que es una articulación sinovial de tipo elipsoide, es el punto de inicio para todos los movimientos de la mano. Esta articulación se encuentra entre el hueso del radio y los huesos carpianos proximales, y permite una amplia gama de movimientos. Los movimientos principales de la muñeca son la flexión, la extensión, la abducción y la aducción. Cuando la palma de la mano se mueve hacia el antebrazo, se llama flexión, mientras que el movimiento contrario se llama extensión. La abducción es cuando la mano se mueve hacia el pulgar (hacia el lado), y la aducción es cuando la mano se mueve hacia el meñique (hacia el medio) [31]. Estos movimientos son posibles gracias a los músculos del antebrazo, que extienden sus tendones hacia la mano. En resumen, la muñeca juega un papel vital en la orientación de la mano, permitiendo una amplia gama de movimientos y posiciones. Esto es esencial para tareas cotidianas como agarrar objetos, escribir, dibujar y muchas otras actividades que requieren precisión y control.

Figura 15. Movimientos de la mano desde la articulación de la muñeca.



Fuente: [29]

5.5 ACTIVIDADES DE LA MANO

La mano realiza demasiadas actividades diarias sobre el cuerpo y demanda una cantidad de movimientos , es capaz de ejercer diferentes actividades teniendo en cuenta la precisión y control sobre cualquier objeto , desde movimientos sencillos con cosas pequeñas hasta movimientos bruscos con variedad de pesos , también el tacto se presenta en la sentir el mundo que lo rodea mediante el ambiente , de igual forma la forma de expresarnos y comunicarnos en conjunto con la voz identifica cierto lenguaje frente a nosotros.

6.VISIÓN DE MÁQUINA

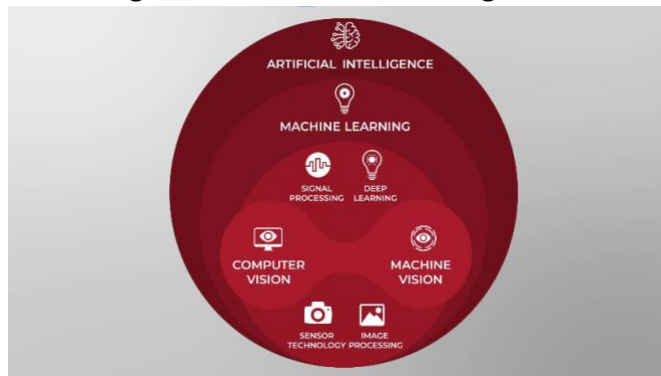
6.1 VISIÓN ARTIFICIAL

La visión artificial usa computadoras potentes para procesar imágenes. Estas máquinas analizan muchos datos visuales para encontrar patrones y tendencias. El objetivo es entender completamente lo que hay en una imagen. El proceso tiene varias partes. Primero, la máquina recibe la imagen. Luego, la mejora para verla mejor. Después, busca las partes importantes. Por último, analiza lo que ve.

Para que funcione bien, la máquina necesita aprender de muchas imágenes. Así puede reconocer cosas nuevas. Cuantas más imágenes ve, mejor entiende lo que mira.

Esta tecnología sirve para muchas cosas. Puede predecir cambios o encontrar cosas que no vemos fácilmente. Cada vez es más precisa y rápida. [37]

Figura 16. Artificial Intelligence.



Fuente: [38]

6.1.1 Visión de máquina

La visión de máquina es una subdivisión de la visión artificial, en donde utiliza controladores integrados que procesan datos rápidamente para realizar tareas automatizadas como control de calidad, inspección y guiado, tomando decisiones sencillas de manera eficiente. [38]

6.1.2 Estado del arte en el desarrollo de visión de maquina

Desde hace un poco más de 60 años los científicos e ingenieros han tratado de desarrollar la captación de imágenes por medios de máquinas para que entiendan datos visuales. Comenzando la década de los 60 se creó la primera tecnología de escaneo de imágenes artificial, permitiendo a las computadoras digitalizar y capturar imágenes. Para esa época, las computadoras ya podían convertir imágenes en dos dimensiones en formas tridimensionales. [39]

En 1974 se introdujo la tecnología de reconocimiento óptico de caracteres (OCR), capaz de identificar texto impreso en cualquier tipo de fuente o estilo de letra; el primer sistema OCR fue creado por el inventor Raymond Kurzweil, diseñado inicialmente para ayudar a los ciegos al permitirles convertir textos impresos en palabras habladas mediante síntesis de voz. Esta tecnología se basaba en la comparación de patrones de texto impresos con una base de datos de caracteres conocidos. [40] [41]

En 1982, el neurocientífico David Marr propuso que la visión tecnológica operaba de manera jerárquica, y desarrolló algoritmos para que las máquinas pudieran identificar bordes, esquinas, curvas y formas básicas. Al mismo tiempo, el

científico informático Kunihiro Fukushima creó una red de células capaz de reconocer patrones, conocida como Neocognitron, la cual incorporaba capas convolucionales en una red neuronal. [42]

A comienzos del 2000, la investigación empezó a enfocarse en el reconocimiento de objetos, y en 2001 aparecen las primeras aplicaciones de reconocimiento facial en tiempo real. Durante los 2000, se establecieron estándares para la etiquetación y anotación de conjuntos de datos visuales. En 2010, se lanzó el conjunto de datos ImageNet, que contenía millones de imágenes etiquetadas en miles de categorías de objetos, proporcionando una base fundamental para las redes neuronales convolucionales (CNN) y los modelos de aprendizaje profundo que se utilizan actualmente. [39]

Desde 2010 se han desarrollado proyectos importantes en grandes industrias como Google, que implementó la traducción instantánea con una cámara de un smartphone, en la industria automotriz claramente para la conducción autónoma se necesitan cámaras y sensores para identificar y analizar lo que sucede al rededor. [39]

7. SISTEMA DE CONTROL

7.1 SISTEMA DE CONEXION

7.1.1 Raspberry pi4

Es una minicomputadora, equipada con un procesador Broadcom BCM2711 de cuatro núcleos Cortex-A72 a 1.5GHz, y se encuentra disponible en versiones con 1GB, 2GB, 4GB y 8GB de RAM. Ofrece conectividad Wi-Fi, Bluetooth 5.0, e Ethernet. Además, cuenta con dos puertos USB 3.0 y dos puertos USB 2.0, soporta salida de video 4K a través de dos puertos micro-HDMI y tiene un conector de audio de 3.5mm. Para el almacenamiento, utiliza tarjetas microSD. Es pequeña pero poderosa computadora funciona para una amplia gama de proyectos, desde electrónica hasta servidores domésticos [43]

Figura 17. Raspberry PI4

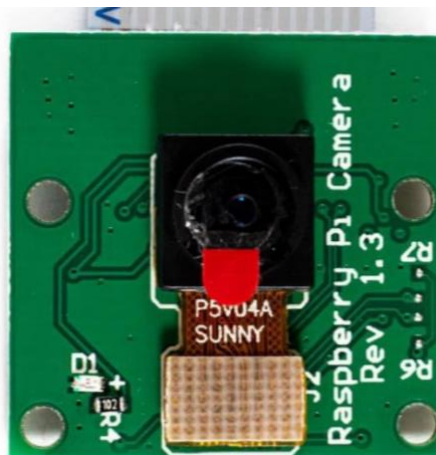


Fuente: [43]

7.1.2 Raspberry pi camera rev 1.3

Raspberry Pi Camera Rev 1.3 es una cámara pequeña diseñada para integrarse con las placas Raspberry Pi. Posee un sensor de 5 megapíxeles y es capaz de grabar video en alta definición (HD) de hasta 1080p a 30 cuadros por segundo. Es compatible con las Raspberry Pi 1, 2, 3 y 4, y se conecta mediante un flex. Esta cámara permite capturar imágenes y videos en color, blanco y negro. [44]

Figura 18. Raspberry pi camera rev 1.3



Fuente: [44]

7.1.3 Servomotor mg995

El servomotor MG995 es conocido por su alto torque de hasta 15 kg-cm, lo que lo hace ideal para aplicaciones que requieren fuerza, como robots y modelos a escala. Tiene una velocidad de 0.16 segundos por 60 grados a 6V y un rango de rotación de 180 grados. Construido con engranajes metálicos, es robusto y duradero, con dimensiones de aproximadamente 40.6 x 19.8 x 42.9 mm y un peso de 55 gramos. Funciona en un rango de voltaje de 4.8 a 6V, lo que lo hace versátil para diversos proyectos de robótica y control remoto. [45]

Figura 19. Servomotor mg995



Fuente: Autor

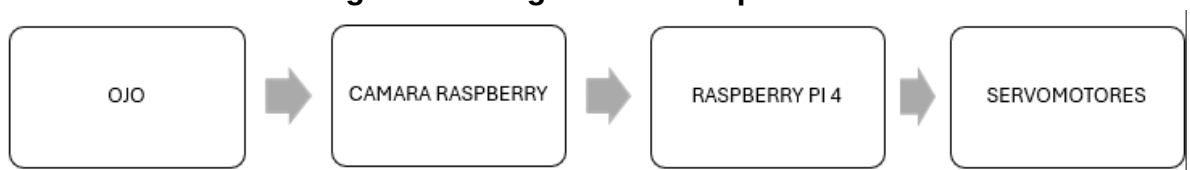
7.2 CONECTIVIDAD E INTERFAZ

El Raspberry funciona mediante un sistema operativo instalado en la tarjeta conocido como Linux, en el que se ejecuta el código mediante el lenguaje de programación distinguido como Python; la tarjeta Raspberry se puede conectar como un ordenador portátil por lo tanto es posible conectarle una pantalla, ratón y teclado para trabajar en ella, sin embargo, existen diferentes sistemas de conexión para poder trabajar de forma inalámbrica buscando la facilidad de trabajo en movilidad del sistema de control .

Aunque la conexión inicialmente se realiza de forma alámbrica, el programa necesitará cargarse y ejecutarse para que funcione correctamente, pero se puede crear un sistema para que lo realice automáticamente y no necesite conectarse a un monitor. En este caso la conexión se basa en trabajar el sistema operativo en un portátil funcionando mediante una misma conexión Wifi, esto nos garantiza una conectividad estable permitiendo monitorear la lectura de los movimientos de la pupila siendo reflejados en la pantalla.

La conectividad se basa en la comunicación del Raspberry hacia los servomotores mediante señales recibidas con el lente de la cámara Raspberry, este sistema funciona con líneas de código ejecutadas desde el computador, que opera de la siguiente manera.

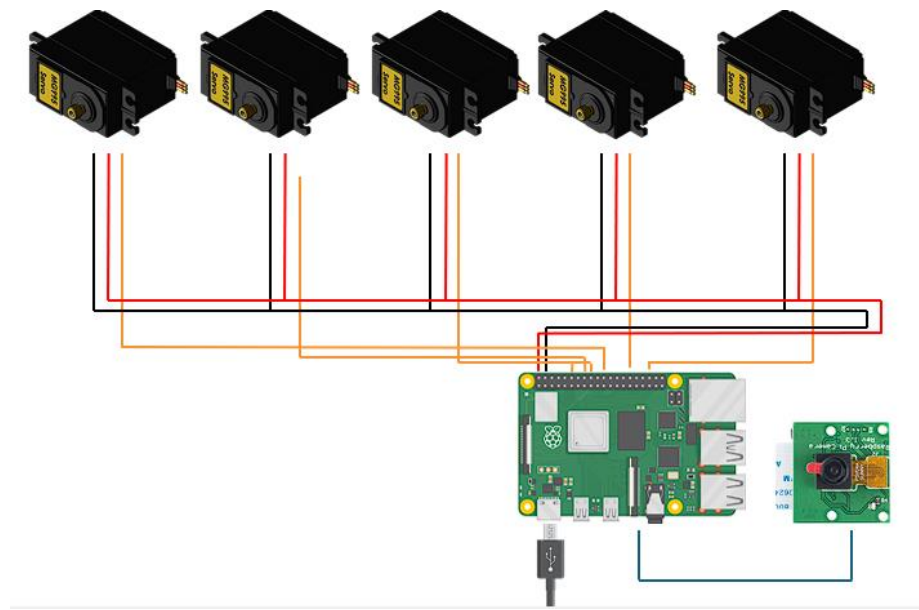
Figura 20. Diagrama de bloques.



Fuente: Autor

La conexión se apoya en la conexión mediante Wifi conectado entre la Raspberry, que funciona como sistema operativo para iterar los datos recibidos por la cámara y los servomotores. Inicialmente.

Figura 21. Diagrama de conexiones

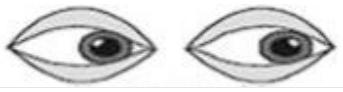


Fuente: Autor

7.3 CLASIFICACION DE MOVIMIENTOS

La clasificación del movimiento de la mano se realiza mediante el movimiento de la pupila, la configuración se realiza mediante el código programado, dejando a la elección la clasificación de los movimientos, sin embargo, se clasifica de la siguiente manera.

Tabla 6. Clasificación de movimientos

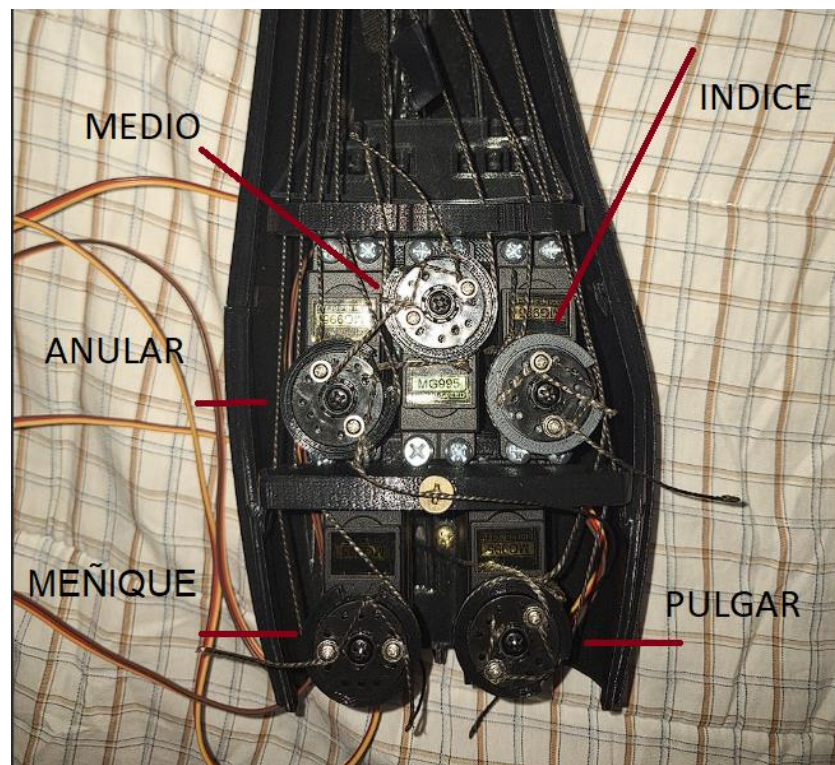
Nombre de la posición	Movimientos Binoculares	Posición de la mano
Mano completamente cerrada	Supra versión 	
Mano medianamente cerrada	Infra versión 	
Mano completamente abierta	Dextro versión 	
Movimiento a 3 dedos	Levo versión 	

Fuente: Autor

Además de la clasificación del movimiento se identifican los dedos mediante los servomotores posicionados en el antebrazo, es importante tener en cuenta su clasificación para cualquier inconveniente poder asociar el problema de forma rápida.

En adición, los movimientos representados en la tabla 6 pueden variar dependiendo de la programación para sus usos.

Figura 22. Clasificación de los servomotores

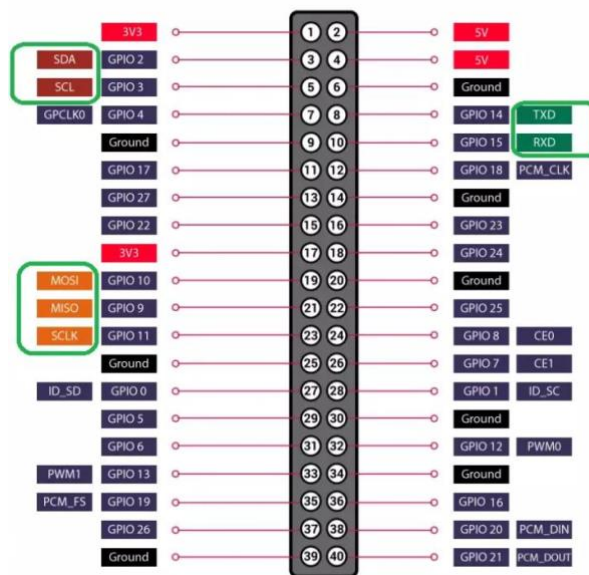


Fuente: Autor

7.4 SALIDAS DIGITALES DEL RASPBERRY

Según el datasheet del dispositivo, tiene 30 pines con diferentes configuraciones para realizar las conexiones necesarias para realizar el sistema de control, sin embargo para el desarrollo de los movimientos y salidas digitales; es necesario el movimiento de los servomotores una fuente de alimentación de 5v DC Con la respectiva señal PWM que va configurada en las salidas GPIO, además de esto se realiza una conexión simplificada con los pines de 5v y GND para una mayor sencillez a la hora de realizar la conectividad.

Figura 23. Pines raspberry pi4



Fuente [46]

La alimentación de los servomotores sale del pin Numero 4 y 6, y las señales para el movimiento son los GPIO 18, 17, 27,22 y 23 las cuales están clasificadas de la siguiente manera.

Tabla 7. Conexiones Físicas

NUMERO DE PIN	NOMBRE CONEXIÓN	DISPOSITIVO	COLOR DE CABLE
FLEX	FLEX	camara	blanco
2	5V	alimentación	rojo
4	GND	alimentación	naranja
12	GPIO18	índice	morado
11	GPIO17	pulgar	verde
13	GPIO27	anular	azul
15	GPIO22	medio	blanco
16	GPIO23	meñique	gris

Fuente: Autor

7.5 LÓGICA DEL CÓDIGO

La lógica del código (se puede observar en anexos) se basa en el movimiento de los servomotores, programando los movimientos de la mano según la clasificación de los movimientos de las pupilas, agregando que existen factores que generan conflicto entre las lecturas del lente dando movimientos incorrectos o retraso en el enfoque de la pupila. Luego se describirán los principales detalles a considerar.

7.5.1 Niveles de luz bajos y altos en exceso

El exceso de luz puede saturar el sensor de una cámara, resultando en imágenes sobreexpuestas donde las áreas brillantes aparecen completamente blancas y se pierden detalles importantes. En pocas luces, el sensor puede tener dificultades para capturar suficiente información, produciendo imágenes subexpuestas con áreas oscuras que aparecen negras y pierden detalles.

7.5.2 Uso de lentes

En combinación con los niveles de luz, el uso de lentes transparentes puede generar confusión según la lectura de la cámara, pero hay que aclarar que las gafas con algún tono de lente de color reducen altamente el nivel de eficacia.

7.5.3 Angulo de posicionamiento de la cámara

Para la lectura del movimiento de la pupila es importante posicionar la cámara de forma horizontal tratando de obtener una posición a 0° entre la cámara y el ojo.

7.5.4 Enfoque incorrecto del ojo

En este caso, la cámara que se usará para el prototipo es una cámara con 5Mpx, pero no es una cámara de alta resolución, por lo que existen inconvenientes según el enfoque a la pupila, lo que dificulta la visualización de detalles finos como el movimiento del ojo.

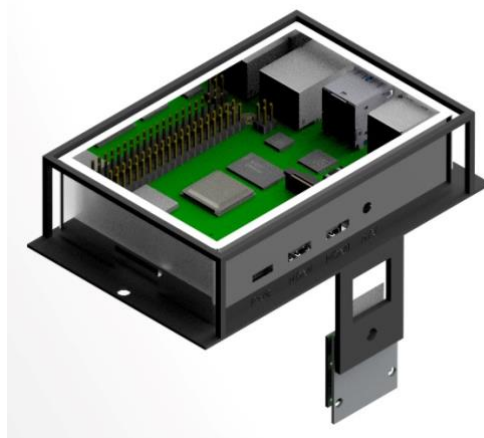
7.6 SISTEMA DE LECTURA

Para el sistema de lectura se tiene en cuenta ciertos parámetros para la facilidad del uso para realizar el trabajo correctamente. Aunque es un prototipo funcional es importante que sea lo más estético y funcional posible, es por esto por lo que es necesario que cumpla con los siguientes requisitos:

- Posicionamiento de altura igual entre la cámara y el ojo.
- Ajuste de la cinta Flex de la cámara a menos de 10 cm del Raspberry.
- Estructura liviana y resistente.
- Ajuste fijo al cuerpo.

Se utilizó un prototipo para que la lectura sea más eficaz para las lecturas para pruebas, pero es importante recalcar que no se toman en cuenta cálculos sobre diseño, es un prototipo pensando en la funcionalidad portátil de este equipo.

Figura 24. Prototipo pruebas



Fuente [Autor]

8.MANUFACTURA DEL SISTEMA PROTÉSICO

8.1 IMPRESIÓN 3D

8.1.1 Características de la impresora 3D

Para la realización de la manufactura de la prótesis seleccionada. Se va a efectuar mediante la tecnología de impresión 3D teniendo en cuenta los parámetros seleccionados anteriormente, sin embargo, la Universidad Santo Tomas presenta la oportunidad de realizar la impresión prestando el servicio de manufactura mediante los laboratorios de la Facultad de Ingeniería Mecánica e industrial; el equipo de impresión es de la marca Ultimaker la cual es una empresa que se dedica a la elaboración de impresoras 3D desde el 2011 con sede en los Países Bajos, asimismo desarrolla su mismo software y venden su mismo material lo que quiere decir que están en todo el campo de la manufactura aditiva. La serie de impresoras es por denominación alfanumérica compartida de las primeras versiones conocidas como Ultimaker Original.

La impresora que se va a usar para la fabricación de la prótesis es la “Ultimaker 3 Extended” la cual es una impresora de doble extrusión comercializada desde octubre del 2016 con características innovadoras mencionadas a continuación.

Extrusión dual: Esta característica permite imprimir con dos materiales o colores diferentes simultáneamente.[47]

Núcleos de impresión intercambiables: Es capaz de cambiar fácilmente entre diferentes núcleos de impresión, lo que significa permite adaptar a diferentes tamaños de boquilla o tipos de material. [47]

Control inalámbrico: Puede enviar trabajos de impresión de forma inalámbrica desde la computadora a la impresora 3D. [47]

Cámara en vivo: permite monitorear tus impresiones en tiempo real.[47]

Nivelación activa: Asegura que la primera capa de la impresión se adhiera correctamente a la plataforma de construcción. [47]

Luces LED en el núcleo de impresión: Ayudan a visualizar y mantener tu impresora correctamente.[47]

Software Cura: Un potente software de corte que se utiliza para preparar tus modelos 3D para la impresión. [47]

En términos de especificaciones técnicas, la Ultimaker 3 tiene un volumen de construcción de 215 x 215 x 200 mm, una resolución de capa de hasta 20 micrones para una boquilla de 0.4 mm, una temperatura de impresión de hasta 280 °C, y utiliza filamentos de 2.85 mm. La impresora mide 342 x 380 x 389 mm y pesa 10.6 kg [48]. En conclusión, la Ultimaker 3 se destaca por su facilidad de uso, la alta calidad de impresión, la impresión fiable y sin errores, y la capacidad de imprimir con dos colores o tipos de filamento.

Para recalcar es una impresora que recolecta todos los aspectos que se mencionaron mediante todo el documento, dando aprobación entre la selección de formato, tipo de material seleccionado y el tipo de impresión.

Tabla 8. Tabla de información Ultimaker 3 extended

MATERIAL SOPORTADO	FORMATO DE IMPRESIÓN	TIPO DE IMPRESIÓN
PLA, PLA Resistente, ABS, Nylon, CPE, CPE+, PC, PP, TPU 95A, PVA, Breakaway	STL, OBJ, 3MF. Etc.	FFF (modelado por deposición fundida)

Fuente: Autor

Figura 25. Impresora Ultimaker 3 extended



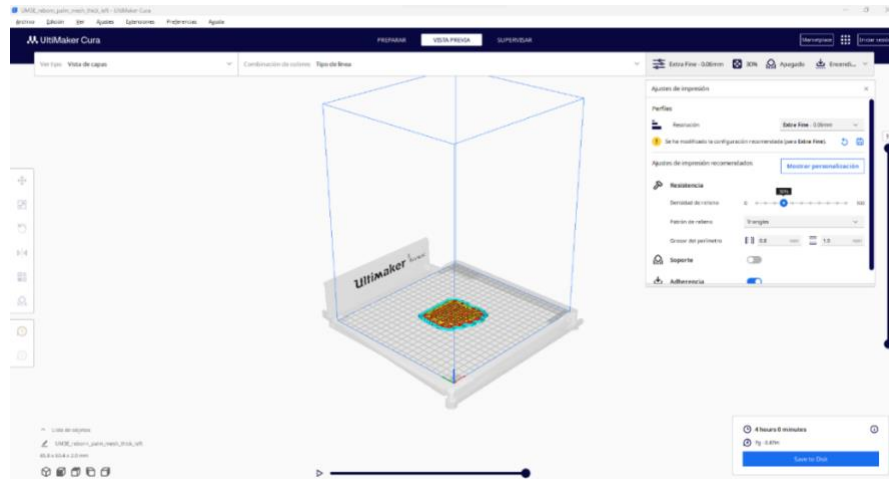
Fuente [49]

8.1.2 Software de impresión

Ultimaker cura es un software dedicado y diseñado para las impresoras Ultimaker , tiene una variedad de configuraciones y modos para poder realizar las impresiones de la mejor manera, adaptando las formas de configuración sencillas para usuarios que apenas están empezando en el mundo de la manufactura aditiva.

permite ajustar tu modelo 3D con más de 400 configuraciones para obtener los mejores resultados de corte e impresión [50]. Además, se integra perfectamente con todos los productos Ultimaker y ofrece integración de complementos CAD con SolidWorks, Siemens NX, Autodesk Inventor y más [46]. Por otra parte, es un software gratuito que se encuentra en versiones de escritorio para Windows Mac y Linux.

Figura 26. Interfaz inicial de Ultimaker

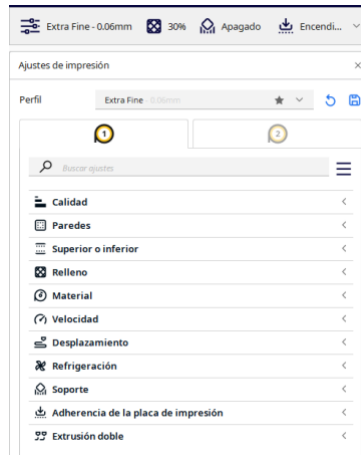


Fuente: Autor

Como se evidencia el software de impresión brinda una interfaz amigable con el usuario; la interfaz presenta la simulación espacio según el modelo de impresora seleccionada, tiene 3 modos de visualización en la parte superior donde muestra la parte de preparación de la pieza. En vista previa realiza un recorrido según cómo va a realizar el proceso de impresión por capas, y en supervisión presenta la opción de ver en tiempo real cómo está conectado directamente a la impresora.

Cabe destacar que la impresora funciona con cualquier filamento de 2.85 mm y no tiene que ser filamento de la misma marca, sin embargo, si se usa el filamento de Ultimaker, el software automáticamente reconoce el material y determina los parámetros de impresión.

Figura 27. Interfaz inicial de Ultimaker



Fuente: Autor

Los ajustes de impresión dependen del usuario y de las necesidades requeridas, ya que se dejan modificar sin problemas, entre las opciones de velocidad, relleno y refrigeración se clasifica con configuraciones dadas por el usuario por medio del material, aunque existen diferentes parámetros predefinidos por foros, páginas y expertos para obtener el mejor resultado. Dependiendo de las condiciones del modelo, las opciones de calidad, paredes y soporte. Lo más importante es la opción de poder visualizar la modificación según tiempo de fabricación, la distancia y peso aproximado de cada pieza.

8.2 PROCESO DE IMPRESIÓN

Para el proceso de impresión del modelo de Inmoov existe una plataforma de Ultimaker que se llama “Thingiverse” donde se puede publicar, comentar, y descargar cualquier modelo para impresión 3D, es allí donde el dueño de Inmoov publica su modelo de brazo y antebrazo comentando las propiedades de impresión ideales. Sin embargo, en este foro los modelos STL se encuentran desactualizados, asimismo se puede guiar por la página web de Inmoov donde publica continuamente las actualizaciones de los modelos del cuerpo humano en forma robótica. Todos los archivos de impresión se pueden descargar en una carpeta comprimida o si desea en archivos individuales, también se puede encontrar por si desea hacerle una modificación independiente. Los procesos de impresión se dividen por secciones intentando aprovechar el tiempo y espacio de la impresora. Según los datos suministrados por el autor son importantes para evitar fallos en la estructura de impresión y garantizar buena calidad de las piezas, independientemente de sus restricciones como los tamaños de los agujeros, dureza de la pieza, etc. La descripción de la tabla presenta los parámetros principales de impresión con sus respectivos valores, así mismo según Ultimaker presenta características entre tiempo y material gastado. En

este caso según los archivos descargados conservan un nombre específico el cual fue puesto en la tabla para aclarar que objetos son impresos.

8.2.1 Proceso N°1

El proceso inicial enfoca la parte de la mano, donde la palma se divide en dos secciones con sus respectivas falanges (proximales, medias y distales) y su movimiento independiente con cada dedo. A continuación, se presenta la tabla de los parámetros de impresión que se usó para lograr una excelente calidad de impresión.

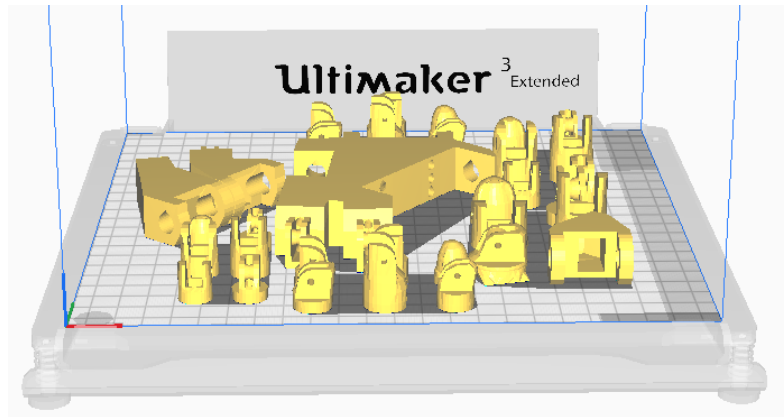
Tabla 9. Parámetros de impresión de proceso N °1

PARAMETROS DE IMPRESIÓN	VALOR
Calidad altura de la capa	0.15 mm
Líneas de pared	5
Grosor de la pared	2.0 mm
Densidad de relleno	30 %
Temperatura de impresión	80 mm/s
Adherencia de la placa de impresión	Ninguno
Tiempo	22 horas 51 Minutos
Material Gastado	162 gramos
Costo	\$12.960
Nombre de pieza	Auriculaire3, Index3, Majeure3, WristargeV4, WristsmallV4, ringfinger3, thumb5
Tipo de Relleno	Giroide

Fuente: Autor

Como se visualiza el software las piezas se insertan en el espacio de impresión y con una opción de “organizar los objetos en el campo “se posicionan de una forma automática, en este caso en el apartado de preparación para organizar las piezas y evaluar si están en el rango de impresión.

Figura 28. Piezas del primer proceso en Ultimaker



Fuente: Autor

Después, la impresión se realizó y hay que retirar las piezas suavemente conservando la estética de las piezas con una espátula ingresando por la parte inferior intentando levantar levemente de la superficie.

Figura 29. Piezas impresas del proceso n1



Fuente: Autor

8.2.2 Proceso N°2

En esta segunda parte se considera la parte media de la impresión, por lo tanto, partes como la muñeca, piezas del ante brazo y complementos del servomotor se imprimen en esta fase intentando ahorrar tiempo usando completamente el espacio de la cama de la impresora 3D, más adelante se presenta los parámetros de impresión para el segundo proceso de impresión.

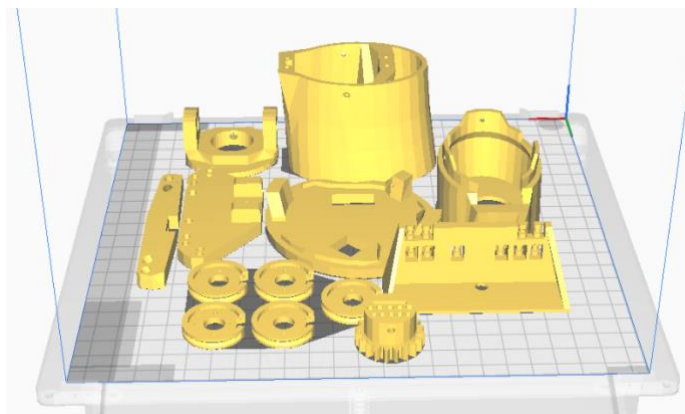
Tabla 10. Parámetros de impresión de proceso n °2

PARAMETROS DE IMPRESIÓN	VALOR
Calidad altura de la capa	0.15 mm
Líneas de pared	3
Grosor de la pared	0.8 mm
Densidad de relleno	30 %
Temperatura de impresión	80 mm/s
Adherencia de la placa de impresión	Ninguno
Tiempo	19 horas 18 Minutos
Material Gastado	143 gramos
Costo	\$11.440
Nombre de pieza	Tension Right V1, Wrist GearsV4, Robcap3V1, Rotawrist1V3, Rotawrist2, Rotawrist3V2, ServoPulleyX5, RobCableFrontV3, RobCableBackV3
Tipo de Relleno	Giroide

Fuente: Autor

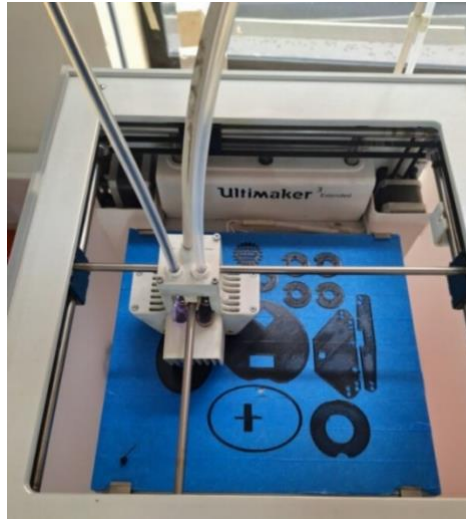
Como se puede evidenciar a comparación de los parámetros anteriores cambia el grosor de pared conjunto las líneas de pared, en este caso se realizó este cambio por las piezas más pequeñas intentando conseguir paredes con menos rigidez ya que aquellas piezas no requieren algún esfuerzo ni van a soportar algún peso.

Figura 30. Piezas del segundo proceso en Ultimaker



Fuente: Autor

Figura 31. Impresión inicial para el proceso n2



Fuente: Autor

Como se puede evidenciar en la imagen anterior, se obtiene la vista superior del proceso inicial de la impresión 3D, cabe resaltar que aquella impresión es por capas y tiene que realizar el recorrido completo por cada una de las piezas hasta completar las capas seleccionadas en el software.

8.2.3 Proceso N°3

Finalmente, este proceso se caracteriza por las piezas que sugieren menos detalle y son más largas, sin embargo, para compensar el tiempo de producción se cambia la calidad de altura de capa a 0.2 mm, además las líneas y grosor de pared y se modificaron en este caso para obtener una pared más robusta de las piezas del antebrazo.

Tabla 11. Parámetros de impresión de proceso n °3

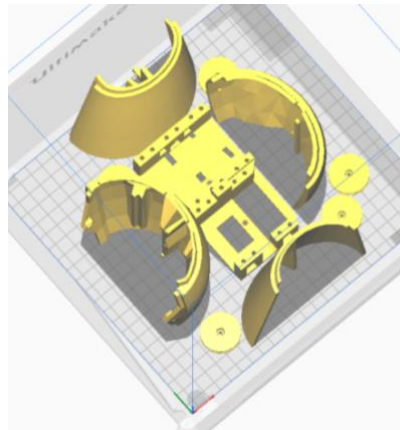
PARAMETROS DE IMPRESIÓN	VALOR
Calidad altura de la capa	0.2 mm
Líneas de pared	3
Grosor de la pared	1.2 mm
Densidad de relleno	30 %
Temperatura de impresión	70 mm/s
Adherencia de la placa de impresión	Ninguno
Tiempo	22 horas 8 Minutos
Material Gastado	288 gramos
Costo	\$23.040
Nombre de pieza	RobRingV3, RobServoBed6, Robpart2V4, Robpart3V4, Robpart4V4, Robpart5V4

Tipo de Relleno	Giroide
-----------------	---------

Fuente: Autor

En este caso se imprime todo el antebrazo con la base de los servomotores y las bases que se ubican por encima de los piñones de los servomotores, es un proceso de impresión bastante robusto pese a que el espacio de impresión es pequeño para estas piezas.

Figura 32. Piezas del tercer proceso en Ultimaker



Fuente: Autor

Figura 33. Piezas impresas del proceso n3



Fuente: Autor

Para resumir, es un proceso que conlleva bastante tiempo sin embargo no se usó ningún tipo de soporte para la impresión y ningún tipo de adherencia a la cama, estas opciones también ayudan a reducir tiempo y material, aunque sea

mínimo, recalcando que ninguna pieza se vio afectada por malas condiciones de impresión o mala manipulación al retirar las piezas. Finalmente, se realiza una tabla con el costo y tiempo ya que son valores importantes en temas enfocados a producción.

Tabla 12. Valores enfocados a costos y tiempo

TIEMPO TOTAL	MATERIAL GASTADO	DINERO GASTADO
64 horas	593 g	\$47.400

Fuente: Autor

8.3 PROCESO DE ENSAMBLE

Para el proceso de ensamble se mencionan los materiales utilizados y la descripción a grandes rasgos de cómo se realiza el ensamble, asumiendo algunos pasos acompañados de imágenes para mayor entendimiento proceso, cabe recalcar que el procedimiento puede variar de acuerdo con la agilidad y materiales usados como lo puede ser el tipo de hilo, pegamento y varilla utilizada.

8.3.1 Materiales

- Piezas impresas
- Tornillo M8x80, Tornillo M8x60, Tornillo M8x40, 3 Tuercas
- Varilla roscada m3
- Pegamento para plásticos
- Hilo cáñamo

8.3.2 Descripción del proceso de ensamble

Para realizar el ensamblaje se inicia con la palma y dedos, es importante separar cada uno de ellos para no confundirlos, ya que cada uno tiene medidas exactas y cuando se realice la unión puede que no encaje y los dedos se unen como se visualiza en la figura [40]. La parte de las “uñas” se quedan para la última parte puesto que solo es de parte recubrimiento y no es funcional.

Figura 34. Falanges del dedo impreso



Fuente: Autor

En la parte de la palma, esta dividida en dos secciones unidas por dos tornillos M8, uno cruza desde exterior hasta el centro de la palma para conectar el meñique y anular, y el otro lado, existe la unión de la palma con el pulgar con otro tornillo M8.

Figura 35. Palma de la mano impresa



Fuente: Autor

Mas adelante se realiza la unión de la falange proximales de cada dedo con los metacarpos completando físicamente el conjunto de una mano completamente funcional, para realizar la unión se ajustaron los agujeros que cruzan de lado a lado con una broca N°3 y si existía algún ajuste de las piezas se lijaban para que quedaran en ajuste de juego, finalmente se unen por medio de la varilla roscada dejando al tope de cada unión.

Figura 36. Ensamble de la palma con la mano



Fuente: Autor

Mientras tanto, según el material utilizado para realizar el movimiento de los dedos, se atraviesa de lado a lado dos hilos separados por medio de los agujeros de las falanges desde la muñeca hasta llegar a la punta del dedo y se realiza un nudo ciego para cerrar la conexión que permite el movimiento, esta operación se repite por cada uno de los dedos hasta llegar a la parte del ante brazo donde se encuentran los servomotores a los cuales se sujetaran por medio de tornillos y una pequeña estructura para permitir su movimiento según la señal activa.

Figura 37. Mano con hilo cáñamo



Fuente: Autor

Después se realiza la unión de la muñeca con la palma con un tornillo M8, de ahí es importante que los hilos no se crucen entre sí, así que en esta sección de la muñeca atraviesan agujeros entre un piñón usado para realizar el movimiento rotacional.

Figura 38. Mano con muñeca



Fuente: Autor

En la sección del ante brazo se identifican cuatro piezas principales de las cuales dos son inferiores y se ubican en conjunto con la base de los servomotores, como se mencionó anteriormente hay unas bases con ciertos divisores posicionados entre ellos. Las uniones de las piezas internas se hacen con tornillería y las exteriores con pegamento para que su fijación sea estéticamente agradable.

Figura 39. Piezas externas del antebrazo



Fuente: Autor

Mas adelante se une el antebrazo con la muñeca para concretar la sección que une los servomotores con hilos que vienen desde la mano, este paso busca la facilidad de ensamble, como la parte superior del antebrazo queda destapada y es la última sección en colocarse.

Figura 40. Antebrazo



Fuente: Autor

Finalmente, se une la base de los servomotores con dos tornillos y sus respectivos tensores de los cables, para terminar de posicionar los hilos con sus servomotores, en todo este proceso es importante no enredar los hilos y tener orden en el posicionamiento de cada uno.

Figura 41. Prótesis transradial



Fuente: Autor

9 CONCLUSIONES

- En este caso la selección de una estructura adecuada para la prótesis transradial es fundamental para garantizar su funcionalidad, comodidad y durabilidad. La evaluación exhaustiva de diferentes alternativas, considerando diversos materiales y características físicas, permite identificar la opción más adecuada que cumpla con los requisitos específicos del usuario. A través de este proceso, se puede lograr una prótesis que no solo se adapte de manera óptima a las necesidades biomecánicas del individuo, sino que también ofrezca un equilibrio entre ligereza, resistencia y confort. La correcta elección de materiales y características físicas contribuirá significativamente a mejorar la calidad de vida del usuario, facilitando una adaptación efectiva y un desempeño eficiente en las actividades diarias.
- Este proyecto muestra cómo la inteligencia artificial, los sensores y los sistemas de control propuestos en conjunto logran mejorar la funcionalidad de las prótesis, lo que hace que el control sea más natural o fácil, tanto la comprensión de uso para el usuario como para ejecutar comandos o movimientos de ella. Los resultados obtenidos nos dan indicios del potencial de la visión de máquina como una herramienta efectiva para mejorar la calidad de vida de las personas con discapacidades físicas tales como parálisis o amputaciones. Esto abre la puerta a futuras investigaciones que podrían optimizar las prótesis con movimiento a través de los ojos.
- La impresión 3D ha revolucionado el campo de la fabricación de prótesis al permitir una personalización sin precedentes y una producción más accesible. La cuidadosa selección de materiales es crucial para garantizar la durabilidad, funcionalidad y comodidad de las prótesis, adaptándose a las necesidades individuales de cada usuario. Este avance tecnológico no solo facilita el desarrollo de prótesis más precisas y adaptadas, sino que también proporciona una solución significativa para las personas que han perdido extremidades, mejorando su calidad de vida y autonomía. Así, la integración de la impresión 3D en la creación de prótesis representa un avance significativo hacia una mayor inclusión y bienestar para quienes requieren estos dispositivos.

Figura 42. Sistema final de la prótesis transradial



Fuente: Autor

10 BIBLIOGRAFIA

1. DANE. Estado actual de la medición de la discapacidad en Colombia [en línea]. Colombia: [s.n.], 2022 [consultado el 10, abril, 2024]. 76 p.
Disponible en Internet:
<https://www.dane.gov.co/files/investigaciones/discapacidad/nota_estadistica_Estado%20actual_de_la_medición_de_discapacidad_en%20Colombia.pdf>
2. TECNOLOGÍAS Y tipos de impresoras 3D [Anónimo]. Markforged [página web]. [Consultado el 8, marzo, 2024]. Disponible en Internet:
<<https://markforged.com/es/resources/learn/3d-printing-basics/3d-printing-introduction/3d-printer-types-technologies>>
3. LLAMAS, Luis. Como funciona una impresora 3D FFF [imagen]. 24, enero, 2020. [Consultado el 7, marzo, 2024]. Disponible en Internet:
<<https://www.luisllamas.es/como-funciona-una-impresora-3d-fff/>>.
4. TECNOLOGÍAS Y tipos de impresoras 3D [Anónimo]. Markforged [página web]. [Consultado el 8, marzo, 2024]. Disponible en Internet:
<<https://markforged.com/es/resources/learn/3d-printing-basics/3d-printing-introduction/3d-printer-types-technologies>>.]
5. ECNOLOGÍAS Y tipos de impresoras 3D [Anónimo] [imagen]. [Consultado el 8, marzo, 2024]. Disponible en Internet:
<<https://markforged.com/es/resources/learn/3d-printing-basics/3d-printing-introduction/3d-printer-types-technologies>>
6. MONDRAGON, Miguel. Impresión 3D en Metal? Como funciona ADAM | TecSol3D | Impresoras y Escáneres 3D en México. TecSol3D | Impresoras y Escáneres 3D en México | Venta de equipos y servicio de Impresión y Escaneo 3D [página web]. (8, enero, 2019). [Consultado el 7, marzo, 2024]. Disponible en Internet:
<<https://tecsol3d.com/es/impresion-3d-en-metal-como-funciona-adam/>>.
7. FUSIÓN SELECTIVA por láser o SLM (Selective Laser Melting) [Anónimo]. Bericht Fabricación de Piezas Metálicas ► Industria Metalúrgica [página web]. [Consultado el 10, marzo, 2024]. Disponible en Internet: <<https://www.bericht.es/fusion-selectiva-por-laser-sml/#:~:text=La%20fusión%20selectiva%20por%20láser,imprimir%20objetos%20tridimensionales%20en%20metal>>.
8. TECNOLOGÍAS Y tipos de impresoras 3D [Anónimo] [imagen]. [Consultado el 8, marzo, 2024]. Disponible en Internet:
<<https://markforged.com/es/resources/learn/3d-printing-basics/3d-printing-introduction/3d-printer-types-technologies>>

9. STL FILES. [Anónimo]. Adobe [página web]. [Consultado el 11, Marzo , 2024]. Disponible en Internet: <<https://www.adobe.com/co/creativecloud/file-types/image/vector/stl-file.html>>
10. STL FILES. [Anónimo]. Adobe [página web]. [Consultado el 11, Marzo , 2024]. Disponible en Internet: <<https://www.adobe.com/co/creativecloud/file-types/image/vector/stl-file.html>>
11. ¿CONOCES LA extensión OBJ? - Descubre qué es y como abrirlos [Anónimo]. Abax Engineering Solutions [página web]. [Consultado el 11, Marzo , 2024]. Disponible en Internet: <<https://abax3dtech.com/2020/09/03/conoces-la-extension-obj/>>
12. Anónimo]. Adobe [página web]. [Consultado el 11, Marzo, 2024]. Disponible en Internet: <<https://www.adobe.com/co/creativecloud/file-types/image/vector/3ds-file.html>>
13. SLDPRT - Tipo de archivo de pieza de SolidWorks [Anónimo]. File Format Docs [página web]. [Consultado el 21, abril, 2024]. Disponible en Internet: <<https://docs.fileformat.com/es/cad/sldprt/>>.
14. KOČÍ, Jakub. El formato de archivo 3MF y porqué es lo mejor - Original Prusa 3D Printers. Original Prusa 3D Printers [página web]. (1, noviembre, 2019). [Consultado el 13, marzo, 2024]. Disponible en Internet: <https://blog.prusa3d.com/es/el-formato-de-archivo-3mf-y-porque-es-lo-mejor_30986/>.
15. C, Lucia. Guía completa: El filamento de PLA en la impresión 3D - 3Dnatives. 3Dnatives [página web]. (11, febrero, 2023). [Consultado el 15, marzo, 2024]. Disponible en Internet: <<https://www.3dnatives.com/es/guia-filamento-pla-en-la-impresion-3d-190820192/>>
16. GUÍA COMPLETA: El filamento de PLA en la impresión 3D - 3Dnatives [C.Lucia] [imagen]. 11, febrero, 2023. [Consultado el 15, marzo, 2024]. Disponible en Internet: <<https://www.3dnatives.com/es/guia-filamento-pla-en-la-impresion-3d-190820192/>>
17. ACEROMAFE, Redaccion. Características del material ABS y por qué usarlo | Aceromafe. Aceromafe [página web]. (5, enero, 2023). [Consultado el 15, marzo, 2024]. Disponible en Internet: <<https://www.aceromafe.com/material-abs/>>.

18. ¿CÓMO ES de flexible el TPU? Todo sobre el filamento TPU [Anónimo]. BCN3D Technologies [página web]. (10, mayo, 2022). [Consultado el 15, marzo, 2024]. Disponible en Internet: <<https://www.bcn3d.com/es/como-es-de-flexible-el-tpu-todo-sobre-el-filamento-tpu/#:~:text=El%20filamento%20TPU%20significa%20poliuretano%20termoplástico.&text=Puede%20absorber%20bien%20los%20impactos,a%20la%20tracción%20150%20MPa>>.
19. POLIAMIDA NYLON PA - TECAMID | Ensinger [Anónimo]. High performance plastic solutions | Ensinger [página web]. [Consultado el 16, marzo, 2024]. Disponible en Internet: <[https://www.ensingerplastics.com/es-br/semielaborados/plasticos-de-ingenieria/poliamida-pa#:~:text=Los%20distintos%20tipos%20de%20nylon,y%20nylon%2066%20\(PA66\)](https://www.ensingerplastics.com/es-br/semielaborados/plasticos-de-ingenieria/poliamida-pa#:~:text=Los%20distintos%20tipos%20de%20nylon,y%20nylon%2066%20(PA66))>.
20. M, Alicia. Guía completa: El plástico de policarbonato en la impresión 3D - 3Dnatives. 3Dnatives [página web]. (14, abril, 2023). [Consultado el 16, marzo, 2024]. Disponible en Internet: <<https://www.3dnatives.com/es/el-plastico-de-policarbonato-en-la-impresion-3d-110220202/>>.
21. ▷ FILAMENTO PETG para impresoras 3D [Anónimo]. Smart Materials 3D [página web]. [Consultado el 16, marzo, 2024]. Disponible en Internet: <<https://www.smartmaterials3d.com/petg-20#:~:text=El%20filamento%20PETG,%20también%20conocido,mejorar%20algunas%20de%20sus%20propiedades>>.
22. M, Alicia. Lo que distingue al HIPS como estructura de soporte en la impresión 3D - 3Dnatives. 3Dnatives [página web]. (20, junio, 2023). [Consultado el 16, marzo, 2024]. Disponible en Internet: <[https://www.3dnatives.com/es/hips-soporte-impresion-3d-070820202/#!](https://www.3dnatives.com/es/hips-soporte-impresion-3d-070820202/#!>)>.
23. M, Alicia. El PVA en la impresión 3D, ¡todo lo que debes saber sobre este filamento soluble! - 3Dnatives. 3Dnatives [página web]. (8, junio, 2023). [Consultado el 16, marzo, 2024]. Disponible en Internet: <<https://www.3dnatives.com/es/pva-impresion-3d-filamento-soluble-230520222/>>.
24. ANATOMY OF the Hand [Anónimo]. Stanford Medicine Children's Health [página web]. [Consultado el 15, marzo, 2024]. Disponible en Internet: <<https://www.stanfordchildrens.org/es/topic/default?id=anatomy-of-the-hand-85-P04195>>.

25. UNIVERSIDAD DE GUANAJUATO. Clase digital 2. Anatomía de la mano y anatomía patológica de la mano reumática - Recursos Educativos Abiertos [imagen]. [Consultado el 15, marzo, 2024]. Disponible en Internet: <<https://blogs.ugto.mx/rea/clase-digital-2-anatomia-de-la-mano-y-anatomia-patologica-de-la-mano-reumatica/>>.
26. GUZMAN, Marcell. Huesos del carpo. Kenhub [página web]. (30, octubre, 2023). [Consultado el 17, marzo, 2024]. Disponible en Internet: <<https://www.kenhub.com/es/library/anatomia-es/huesos-del-carpo>>.
27. GUZMAN, Marcell. Huesos del carpo [imagen]. 30, octubre, 2023. [Consultado el 17, marzo, 2024]. Disponible en Internet: <<https://www.kenhub.com/es/library/anatomia-es/huesos-del-carpo>>.
28. Drake, R.L., Vogl, A.W., & Mitchell, A.W.M. (2014). Gray's Anatomy for Students (3rd ed.). Philadelphia, PA: Churchill Livingstone.
29. ANATOMÍA CLÍNICA [Pro Eduardo]. [s.l.]: Editorial Médica Panamericana, 2012. ISBN 9789500601238.
30. LANGEVIN, Gael. Hand robot InMoov by Gael_Langevin [imagen]. 18, febrero, 2012. [Consultado el 19, mayo, 2024]. Disponible en Internet: <<https://www.thingiverse.com/thing:17773>>.
31. ARTICULACIÓN DE la Muñeca: Estructura, Movimientos, Suministro Neurovascular y Lesiones Asociadas - Arriba Salud [Anónimo]. Arriba Salud - Artículos de Salud, Enfermedades, Síntomas y Tratamientos [página web]. [Consultado el 20, marzo, 2024]. Disponible en Internet: <<https://arribasalud.com/articulacion-de-la-muneca/>>.
32. ADMINISTRADOR. El coeficiente de expansión térmica y su sistema de calefacción | Watlow. Solutions for the Complete Thermal Loop | Watlow [página web]. (6, mayo, 2021). [Consultado el 15, marzo, 2024]. Disponible en Internet: <<https://www.watlow.com/es-es/blog/posts/the-coefficient-of-thermal-expansion-and-your-heating-system>>
33. ¿QUÉ PARÁMETROS afectan a la calidad de la impresión 3D? [Anónimo]. Capa Sobre Capa [página web]. [Consultado el 11, abril, 2024]. Disponible en Internet: <<https://capasobrecapa.com/parametros-calidad-fdm/>>.
34. LA TEMPERATURA de transición vítrea en filamentos 3D [Anónimo]. Filtory 3D - Filamentos para impresoras 3D [página web]. (7, abril, 2022). [Consultado el 12, abril, 2024]. Disponible en Internet: <<https://filtory3d.com/temperatura-de-transicion-vitrea/>>.

35. SOLOELECTRONICOS. Recomendaciones para la temperatura del extrusor y de la cama caliente - SOLOELECTRONICOS. SOLOELECTRONICOS [página web]. (2017). [Consultado el 11, abril, 2024]. Disponible en Internet: <<https://soloelectronicos.com/2017/10/recomendaciones-para-la-temperatura-del-extrusor-y-de-la-cama-caliente/>>
36. FORMLABS. Guía de materiales de impresión 3D: Tipos, aplicaciones y propiedades. Formlabs [página web]. [Consultado el 2, abril, 2024]. Disponible en Internet: <<https://formlabs.com/es/blog/materiales-impresion-3d/>>.
37. ¿Qué es la visión artificial? (2024, enero 11). Ibm.com. <https://www.ibm.com/mx-es/topics/computer-vision>
38. (2021, octubre 22). Visión de máquina es una subcategoría de visión artificial. Russula. <https://www.russula.com/es/press-releases-es/vision-de-maquina-es-una-subcategoria-vision-artificial.html>
39. ¿Qué es la visión artificial? (2024b, enero 11). Ibm.com. <https://www.ibm.com/mx-es/topics/computer-vision>
40. Hill, K. (2023, septiembre 29). What is Intelligent Character Recognition (ICR)? ICR vs OCR. Iig Technology. <https://iig.technology/what-is-intelligent-character-recognition-icr-icr-vs-ocr/>
41. Wikipedia contributors. (s/f). Raymond Kurzweil. Wikipedia, The Free Encyclopedia. https://es.wikipedia.org/w/index.php?title=Raymond_Kurzweil&oldid=161510719
42. (S/f). www.uv.es. Recuperado el 16 de agosto de 2024, de <https://www.uv.es/gotor/Transparencias/MARR1.pdf>
43. SIGMA. RPI4-4GB - Sigma Electrónica [imagen]. 6, mayo, 2020. [Consultado el 1, agosto, 2024]. Disponible en Internet: <<https://www.sigmaelectronica.net/producto/rpi4-4gb/>>.

44. UNIT ELECTRONICS. Cámara Raspberry Pi Rev 1.3 5MP [imagen]. 3, febrero, 2019. [Consultado el 2, agosto, 2024]. Disponible en Internet: <<https://uelectronics.com/producto/camara-raspberry-pi-rev-1-3-5mp/>>.
45. ELECTRONILAB. Servomotor MG995 Piñonería metálica - Electronilab [imagen]. 15, febrero, 2023. [Consultado el 2, agosto, 2024]. Disponible en Internet: <<https://electronilab.co/tienda/mg995-tower-pro-servo-motor-metalico/>>.
46. WHAT IS Raspberry Pi 4? Pinout, Specs, Projects & Datasheet - The Engineering Projects [Anónimo] [imagen]. [Consultado el 15, agosto, 2024]. Disponible en Internet: <<https://www.theengineeringprojects.com/2021/03/what-is-raspberry-pi-4-pinout-specs-projects-datasheet.html>>.
47. ULTIMAKER. Ultimaker 3 Features Explained - Professional 3D printing made accessible [video]. YouTube. (18, octubre, 2016). [Consultado el 10, abril, 2024]. 06:05 min. Disponible en Internet: <<https://www.youtube.com/watch?v=ScfMI3u-uT8>>.
48. ADAM SAVAGE'S TESTED. Tested: Ultimaker 3 3D Printer Review! [video]. YouTube. (13, abril, 2017). [Consultado el 18, abril, 2024]. 23:24 min. Disponible en Internet: <https://www.youtube.com/watch?v=vQc_t4Fu52Q>.
49. 3DING [Anónimo] [imagen]. [Consultado el 10, abril, 2024]. Disponible en Internet: <<https://www.3ding.in/3dprinters/ultimaker-3-extended>>.
50. ULTIMAKER CURA [Anónimo]. UltiMaker [página web]. [Consultado el 28, abril, 2024]. Disponible en Internet: <<https://ultimaker.com/es/software/ultimaker-cura/#:~:text=UltiMaker%20Cura%20es%20un%20software,resultados%20de%20corte%20e%20impresión.>>.

11 ANEXOS

```
import cv2
import time
from picamera2 import Picamera2
import RPi.GPIO as GPIO
from datetime import datetime

# Configuración de los pines para los servos (ajusta según tu configuración)
servo_pulgar = 17 # Pulgar
servo_indice = 18 # Índice
servo_medio = 27 # Medio
servo_anular = 22 # Anular
servo_meñique = 23 # Meñique

# Configuración de GPIO
GPIO.setmode(GPIO.BCM)
GPIO.setup(servo_pulgar, GPIO.OUT)
GPIO.setup(servo_indice, GPIO.OUT)
GPIO.setup(servo_medio, GPIO.OUT)
GPIO.setup(servo_anular, GPIO.OUT)
GPIO.setup(servo_meñique, GPIO.OUT)

# Inicialización de PWM en 50Hz para los servos
servo_thumb = GPIO.PWM(servo_pulgar, 50)
servo_index = GPIO.PWM(servo_indice, 50)
servo_middle = GPIO.PWM(servo_medio, 50)
servo_ring = GPIO.PWM(servo_anular, 50)
servo_pinky = GPIO.PWM(servo_meñique, 50)

#Abrir dedos = 180 grados, excepto el indice que se abre a 90
#Cerrar dedos = 90 grados, excepto el indice que se cierra en 0
#2.5=0degrees 12.5=90degrees

servo_thumb.start(12.5) # Posición inicial 180 grados
servo_index.start(7.5) # Posición inicial 90 grados (distinto)
servo_middle.start(12.5) # Posición inicial 180 grados
servo_ring.start(12.5) # Posición inicial 180 grados
```

```
servo_pinky.start(12.5) # Posición inicial 190 grados # Posición inicial 90
grados
```

```
# Función para mover todos los dedos a la posición abierta
```

```
def abrir_mano():
```

```
    servo_thumb.ChangeDutyCycle(12.5) # 180 grados - abre
```

```
    servo_index.ChangeDutyCycle(7.5) # 90 grados - abre
```

```
    servo_middle.ChangeDutyCycle(12.5) # 180 grados
```

```
    servo_ring.ChangeDutyCycle(12.5) # 180 grados
```

```
    servo_pinky.ChangeDutyCycle(12.5) # 180 grados
```

```
    time.sleep(0.5)
```

```
    # Imprimir la acción y el tiempo
```

```
    print(f"Abrir mano ejecutado a las {datetime.now().strftime('%Y-%m-%d
%H:%M:%S')}")
```

```
def mover_arriba():
```

```
    servo_thumb.ChangeDutyCycle(12.5) # Pulgar extendido (90 grados)
```

```
    servo_index.ChangeDutyCycle(2.5) # Índice cerrado (0 grados invertido)
```

```
    servo_middle.ChangeDutyCycle(7.5) # Medio cerrado (180 grados)
```

```
    servo_ring.ChangeDutyCycle(7.5) # Anular cerrado (180 grados)
```

```
    servo_pinky.ChangeDutyCycle(7.5) # Meñique cerrado (180 grados)
```

```
    # Imprimir la acción y el tiempo
```

```
    print(f"Mover hacia arriba ejecutado a las {datetime.now().strftime('%Y-%m-
%d %H:%M:%S')}")
```

```
def mover_abajo():
```

```
    servo_thumb.ChangeDutyCycle(10) # Posición intermedia (~135 grados)
```

```
    servo_index.ChangeDutyCycle(5) # Posición intermedia (~45 grados
invertido)
```

```
    servo_middle.ChangeDutyCycle(10) # Posición intermedia (~135 grados)
```

```
    servo_ring.ChangeDutyCycle(10) # Posición intermedia (~135 grados)
```

```
    servo_pinky.ChangeDutyCycle(10) # Posición intermedia (~135 grados)
```

```
    # Imprimir la acción y el tiempo
```

```
    print(f"Mover hacia abajo ejecutado a las {datetime.now().strftime('%Y-%m-
%d %H:%M:%S')}")
```

```
def mover_izquierda():
```

```
    servo_thumb.ChangeDutyCycle(7.5) # Pulgar cerrado (180 grados)
```

```
    servo_index.ChangeDutyCycle(2.5) # Índice cerrado (180 grados invertido)
```

```
    servo_middle.ChangeDutyCycle(12.5) # Medio extendido (90 grados)
```

```
    servo_ring.ChangeDutyCycle(12.5) # Anular extendido (90 grados)
```

```
servo_pinky.ChangeDutyCycle(12.5) # Meñique extendido (90 grados)
# Imprimir la acción y el tiempo
print(f"Mover hacia la izquierda ejecutado a las {datetime.now().strftime('%Y-%m-%d %H:%M:%S')}")
```

```
def mover_derecha():
    servo_thumb.ChangeDutyCycle(7.5) # Pulgar cerrado (180 grados)
    servo_index.ChangeDutyCycle(2.5) # Índice cerrado (180 grados invertido)
    servo_middle.ChangeDutyCycle(7.5) # Medio cerrado (180 grados)
    servo_ring.ChangeDutyCycle(12.5) # Anular extendido (90 grados)
    servo_pinky.ChangeDutyCycle(12.5) # Meñique extendido (90 grados)
    # Imprimir la acción y el tiempo
    print(f"Mover hacia la derecha ejecutado a las {datetime.now().strftime('%Y-%m-%d %H:%M:%S')}")
```

```
# Inicializa la cámara
piCam = Picamera2()
piCam.preview_configuration.main.size = (640, 480)
piCam.preview_configuration.main.format = "RGB888"
piCam.preview_configuration.align()
piCam.configure("preview")
piCam.start()
```

```
# Variables de control de movimiento y dirección
direccion_actual = None
tiempo_inicio = None
duracion_texto = 1.5 # Duración en segundos que el texto se mostrará en
pantalla
previous_frame = None
umbral_de_cambio = 50
previous_centro_x = None
previous_centro_y = None
ultima_deteccion = 0
tiempo_espera = 5 # Tiempo en segundos para mantener la posición de los
dedos
mantener_posicion = False
tiempo_ultimo_movimiento = 0 # Para rastrear el tiempo del último movimiento
```

```
try:
    while True:
        frame = piCam.capture_array()
```

```

gris = cv2.cvtColor(frame, cv2.COLOR_BGR2GRAY)

if previous_frame is not None:
    diferencia = cv2.absdiff(gris, previous_frame)
    if cv2.countNonZero(diferencia) < umbral_de_cambio:
        time.sleep(0.1)
        continue

previous_frame = gris.copy()
al, an = gris.shape

x1 = int(an / 3)
x2 = int(x1 * 2)
y1 = int(al / 3)
y2 = int(y1 * 2)

# Dibuja el rectángulo de detección en todos los frames
cv2.putText(frame, 'Ubique su ojo en el rectangulo', (x1 - 50, y1 - 50),
cv2.FONT_HERSHEY_SIMPLEX, 1, (0, 255, 0), 2)
cv2.rectangle(frame, (x1, y1), (x2, y2), (0, 255, 0), 2)

recorte = frame[y1:y2, x1:x2]
gris_recorte = cv2.cvtColor(recorte, cv2.COLOR_BGR2GRAY)
gris_recorte = cv2.GaussianBlur(ggris_recorte, (3, 3), 0)

_, umbral = cv2.threshold(ggris_recorte, 30, 255,
cv2.THRESH_BINARY_INV)
contornos, _ = cv2.findContours(umbral, cv2.RETR_TREE,
cv2.CHAIN_APPROX_SIMPLE)
contornos = sorted(contornos, key=lambda x: cv2.contourArea(x),
reverse=True)

# Dibujar siempre la cruz en la región de interés, incluso si no hay
movimiento detectado
if contornos:
    (x, y, ancho, alto) = cv2.boundingRect(contornos[0])
    centro_x = x1 + x + int(ancho / 2)
    centro_y = y1 + y + int(alto / 2)

# Dibuja la cruz roja en el centro del rectángulo

```

```

cv2.drawMarker(frame, (centro_x, centro_y), (0, 0, 255),
markerType=cv2.MARKER_CROSS, markerSize=20, thickness=2)

# Verifica si han pasado al menos 3 segundos desde el último
movimiento
if time.time() - tiempo_ultimo_movimiento >= 3 and time.time() -
ultima_deteccion >= 2:
    if previous_centro_x is not None and previous_centro_y is not None:
        movimiento_x = centro_x - previous_centro_x
        movimiento_y = centro_y - previous_centro_y

    if abs(movimiento_x) > abs(movimiento_y):
        direccion = "Derecha" if movimiento_x > 0 else "Izquierda"
    else:
        direccion = "Abajo" if movimiento_y > 0 else "Arriba"

    print(f"Movimiento detectado: {direccion}")

# Actualiza la dirección actual y el tiempo de inicio
direccion_actual = direccion
tiempo_inicio = time.time()

# Realiza la acción según la dirección detectada
if direccion == "Arriba":
    mover_arriba()
elif direccion == "Abajo":
    mover_abajo()
elif direccion == "Izquierda":
    mover_izquierda()
elif direccion == "Derecha":
    mover_derecha()

# Inicia el temporizador para mantener la posición
mantener_posicion = True
tiempo_inicio_mantener = time.time()

# Registra el tiempo del último movimiento
tiempo_ultimo_movimiento = time.time()

previous_centro_x = centro_x
previous_centro_y = centro_y

```

```

# Si se está manteniendo la posición, verifica el tiempo
if mantener_posicion:
    if time.time() - tiempo_inicio_mantener >= tiempo_espera:
        abrir_mano() # Abre la mano (todos los servos a 90 grados)
        mantener_posicion = False # Resetea la bandera para permitir
nuevas detecciones

# Si hay una dirección actual, muestra el texto durante un tiempo
específico
if direccion_actual is not None:
    if time.time() - tiempo_inicio < duracion_texto:
        cv2.putText(frame, f"Movimiento: {direccion_actual}", (50, 50),
cv2.FONT_HERSHEY_SIMPLEX, 1, (0, 255, 255), 2)
    else:
        direccion_actual = None # Después de que el tiempo haya pasado,
resetea la dirección actual

cv2.imshow("Deteccion", frame)

t = cv2.waitKey(1)
if t == 27:
    break

except KeyboardInterrupt:
    pass

finally:
    # Detiene los servos y limpia la configuración de GPIO
    servo_thumb.stop()
    servo_index.stop()
    servo_middle.stop()
    servo_ring.stop()
    servo_pinky.stop()
    GPIO.cleanup()
    cv2.destroyAllWindows()

```