



**FACULTAD DE INGENIERÍAS Y CIENCIAS APLICADAS**

**Trabajo de fin de Carrera titulado:**

PROTOTIPO FUNCIONAL POR MÉTODO DE MANUFACTURA ADITIVA FMD  
DE UNA PRÓTESIS DE MANO ARTICULADO CON SENSOR MUSCULAR EMG

Realizado por:

Ing. Darwin Gustavo Jaque Puca

**Director del proyecto:**

Ing. Jaime Vinicio Molina Osejos Msc.

**Como requisito para la obtención del título de:**

**MAGISTER EN DISEÑO INDUSTRIAL Y DE PROCESOS**

QUITO, OCTUBRE del 2022

## DECLARACIÓN JURAMENTADA

Yo, Darwin Gustavo Jaque Puca, ecuatoriano, con cédula de ciudadanía N° 1803738580, declaro bajo juramento que el trabajo aquí desarrollado es de mi autoría, que no ha sido presentado anteriormente para ningún grado o calificación profesional, y se basa en las referencias bibliográficas descritas en este documento.

A través de esta declaración, cedo los derechos de propiedad intelectual a la UNIVERSIDAD INTERNACIONAL SEK, según lo establecido en la Ley de Propiedad Intelectual, reglamento y normativa institucional vigente.



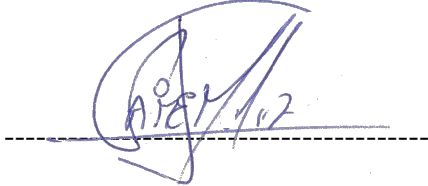
---

Darwin Gustavo Jaque Puca

C.I.: 1803738580

## **DECLARACIÓN DEL DIRECTOR DE TESIS**

Declaro haber dirigido este trabajo a través de reuniones periódicas con el estudiante, orientando sus conocimientos y competencias para un eficiente desarrollo del tema escogido y dando cumplimiento a todas las disposiciones vigentes que regulan los Trabajos de Titulación.



Jaime Vinicio Molina Osejos

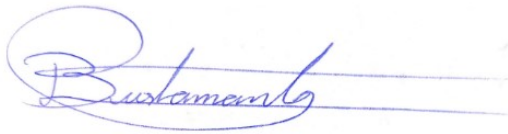
Máster en Diseño Industrial y de Procesos

**LOS PROFESORES INFORMANTES:**

Ing. Diego Fernando Bustamante Villagómez

Ing. Diego Patricio Gonzáles Sacoto

Después de revisar el trabajo presentado lo han calificado como apto para su defensa  
oral ante el tribunal examinador.



---

Ing. Diego Fernando Bustamante Villagómez

---

Ing. Diego Patricio Gonzáles Sacoto

Quito, 20 de octubre del 2022

## DECLARACIÓN DE AUTORÍA DEL ESTUDIANTE

Declaro que este trabajo es original, de mi autoría, que se han citado las fuentes correspondientes y que en su ejecución se respetaron las disposiciones legales que protegen los derechos de autor vigentes.



---

Darwin Gustavo Jaque Puca

C.I.: 1803738580

## Índice de Contenido

DECLARACIÓN JURAMENTADA .....	2
DECLARACIÓN DE AUTORÍA DEL ESTUDIANTE .....	5
RESUMEN .....	13
ABSTRACT.....	14
Introducción .....	15
Planteamiento del Problema .....	16
Objetivo General .....	17
Objetivos específicos.....	17
Justificación .....	18
1. Estado del Arte .....	19
1.1. La mano humana y su anatomía .....	19
1.2. Prótesis.....	22
1.2.1. Tipo de prótesis .....	22
1.3. Manufactura Aditiva FMD o impresión en 3D.....	25
1.4. Filamento para impresoras 3D .....	27
1.4.1. Tipos de filamentos para impresión en 3D.....	27
1.5. Sistema de control de movimiento de la mano .....	29
1.6. Sensores de señal muscular EMG.....	30
2. Metodología.....	32
2.1. Tipo de investigación.....	32
2.1.1. Métodos de investigación.....	32
2.1.2. Técnicas de investigación.....	32
2.3. Diagramación del diseño .....	33
2.3.1. Requisitos del diseño.....	33
2.3.2. Bosquejo del prototipo .....	34
2.3.3. Elaboración de plantillas .....	35
2.4. Toma de datos antropométricos .....	36
2.5. Diseño asistido por computadora (CAD).....	38
2.5.2. Diseño de la palma de la mano.....	40
2.5.3. Diseño de pernos para unión de articulaciones .....	42
2.5.4. Diseño de Antebrazo .....	42
2.5.5. Diseño de tapas de protección de antebrazo.....	43
3.1. Diagramación cinemática directa de Denavit - Hartenberg.....	43

5. Ensamblaje de los componentes de la prótesis de la mano derecha .....	52
5.1.1. Prototipo terminado.....	55
6. Resultados.....	56
6.1. Cambios en el diseño .....	57
7. Costos del diseño.....	59
7.1. Determinación del costo de consumo de energía en impresión 3D.....	61
7.2. Determinación del costo de consumo de filamento PLA .....	61
7.3. Determinación del costo de Dispositivos Electrónicos.....	62
Protocolo de Pruebas.....	66
Pruebas físicas.....	67
Discusión.....	71
Conclusiones.....	72
Recomendaciones.....	74
<u>Bibliografía.....</u>	75

## ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1 <i>Clasificación de los movimientos de la mano según Therblig</i> .....	21
Tabla 2 <i>Beneficios específicos de la impresión 3D para cada sector.</i> .....	26
Tabla 3 <i>Tabla comparativa del filamento PLA y ABS</i> .....	28
Tabla 4 <i>Especificaciones de la tarjeta Nano Arduino</i> .....	29
Tabla 5 <i>Especificaciones técnicas del sensor de señal muscular EMG</i> .....	30
Tabla 6 <i>Requisitos del diseño del prototipo de mano articulada</i> .....	33
Tabla 7 <i>Longitudes de la mano derecha</i> .....	36
Tabla 8 <i>Ancho del metacarpiano para el diseño de la prótesis</i> .....	37
Tabla 9 <i>Dimensiones estimadas del ancho y largo para los dos géneros, dadas en mm (milímetros)</i> .....	38
Tabla 10 <i>Medidas de las falanges en Solid Works</i> .....	39
Tabla 11 <i>Dimensiones de soportes de dedos en la palma de la mano</i> .....	41
Tabla 12 <i>Parámetros de Denavit - Hartenberg</i> .....	44
Tabla 13 <i>Valores de ángulos de movimiento de la falange</i> .....	44
Tabla 14 <i>Posición de la resultante final de cada dedo</i> .....	46
Tabla 15 <i>Parámetros de impresión en 3d manufactura aditiva FDM</i> .....	49
Tabla 16 <i>Materiales utilizados para el ensamble de dedos</i> .....	52
Tabla 17 <i>Materiales utilizados para generar el movimiento de la articulación</i> .....	52
Tabla 18 <i>Componentes electrónicos utilizados en el ensamble</i> .....	54
Tabla 19 <i>Peso de las partes de la prótesis de la mano derecha</i> .....	56
Tabla 20 <i>Partes defectuosas de las uniones de las falanges</i> .....	57
Tabla 21 <i>Partes en buen estado de las uniones de las falanges</i> .....	58
Tabla 22 <i>Costo de en base al tiempo empleado en el Diseño Cad</i> .....	59
Tabla 23 <i>Tiempo de Impresión 3d y porcentaje (%) de Relleno</i> .....	60
Tabla 24 <i>Costo consumo energía en la impresión 3d</i> .....	61



Tabla 25 <i>Costo consumo de filamento en Kg</i> .....	61
Tabla 26 <i>Costo de dispositivos electrónicos</i> .....	62
Tabla 27 <i>Tiempo de impresión</i> .....	62
Tabla 28 <i>Materiales indirectos</i> .....	63
Tabla 29 <i>Resumen de costos y gastos</i> .....	64
Tabla 30 <i>Precios y características de prótesis existentes en el mercado</i> .....	65
Tabla 31 <i>Flexión y extensión</i> .....	66
Tabla 32 <i>Prueba de agarre</i> .....	67

## ÍNDICE DE GRÁFICOS

Figura 1 <i>Anatomía de la mano</i> .....	19
Figura 2 <i>Huesos del carpo</i> .....	20
Figura 3 <i>Huesos del metacarpo</i> .....	20
Figura 4 <i>Movimientos básicos</i> .....	22
Figura 5 <i>Prótesis mecánica</i> .....	23
Figura 6 <i>Prótesis eléctrica</i> .....	24
Figura 7 <i>Prótesis híbrida</i> .....	25
Figura 8 <i>Impresión por FDM.</i> .....	25
Figura 9 <i>Impresión en filamento de ABS, Impresión con filamento PLA</i> .....	28
Figura 10 <i>Placa Nano Arduino</i> .....	30
Figura 11 <i>Sensor de señal muscular EMG</i> .....	31
Figura 12 <i>Colocación de electrodos sobre el musculo</i> .....	31
Figura 13 <i>Diagrama de proceso del diseño y construcción de la prótesis de mano derecha</i> .....	33
Figura 14 <i>Bosquejo del prototipo</i> .....	35
Figura 15 <i>Esquematación de la mano</i> .....	35
Figura 16 <i>Longitudes de la mano en el diseño de la prótesis articulada</i> .....	37
Figura 17 <i>Ancho del metacarpiano de la mano</i> .....	38
Figura 18 <i>Diseño de falanges de los dedos de la mano derecha en Solid Works</i> .....	39
Figura 19 <i>Diseño de conductos internos para el desplazamiento del elástico (articulación)</i> .....	40
Figura 20 <i>Diseño del bisel angulares internos, flexión y extensión</i> .....	40
Figura 21 <i>Diseño de la Parte superior interna de la muñeca de la mano</i> .....	41
Figura 22 <i>Pernos M3 y M4 para ensamble de falanges y palma de muñeca</i> .....	42
Figura 23 <i>Partes del diseño del antebrazo</i> .....	42
Figura 24 <i>Tapas de protección de antebrazo</i> .....	43
Figura 25 <i>Diagramación de cinemática utilizando matriz de DH</i> .....	44

Figura 26_	<i>Condiciones de borde o frontera</i>	47
Figura 27_	<i>Eslabon fijo de la falange</i>	47
Figura 28_	<i>Deformación de Von Mises</i>	47
Figura 29_	<i>Simulación flexión de la mano</i>	48
Figura 30	<i>Simulación de agarre de esfera</i>	48
Figura 31_	<i>Impresión en 3D de falanges de los dedos</i>	49
Figura 32	<i>Base de la palma de la mano</i>	50
Figura 33	<i>Tapa de protección superior de la palma de la mano</i>	50
Figura 34_	<i>Impresión en 3D tapa interna</i>	51
Figura 35_	<i>Antebrazo de la prótesis</i>	51
Figura 36_	<i>Tapa superior del antebrazo con alojamiento para sensor muscular EMG y regulador de voltaje</i>	51
Figura 37_	<i>Ensamble de la mano con antebrazo</i>	53
Figura 38_	<i>Ensamble de la mano con el antebrazo</i>	53
Figura 39_	<i>Instalación de servos motores</i>	54
Figura 40_	<i>Instalación de regulador de voltaje y sensor muscular</i>	55
Figura 41_	<i>Colocación de accesorios de la prótesis</i>	55
Figura 42_	<i>Prototipo ensamblado</i>	55
Figura 43_	<i>Rotura de unión de falanges al momento de ensamble</i>	57
Figura 44_	<i>Comparación de rendimiento del rediseño en las falanges de los dedos.</i>	58
Figura 45_	<i>Ensamble con modificación de diámetro en la parte de unión de las falanges.</i>	58
Figura 46_	<i>Comparación costo de las prótesis</i>	65
Figura 47_	<i>Prototipo de la prótesis</i>	66
Figura 48_	<i>Prueba de flexión y extensión</i>	66
Figura 49_	<i>Movimiento de la mano mediante el uso de electrodos</i>	67
Figura 50_	<i>Prueba de agarre de una esfera de Ø30mm</i>	68
Figura 51_	<i>Prueba de agarre de una esfera de Ø30mm</i>	68

Figura 52 <i>Prueba de agarre de una esfera de Ø70mm</i> .....	69
Figura 53 <i>Prueba de agarre de un flexómetro</i> .....	69
Figura 54 <i>Prueba de agarre de una botella lisa</i> .....	70
Figura 55 <i>Resultados de la prueba de agarre</i> .....	70

## RESUMEN

El presente proyecto se enfoca en la elaboración de un prototipo funcional por método de manufactura aditiva FMD de una prótesis de mano articulada con sensor muscular EMG; En la primera fase se parte del diseño en el programa Solid Works, en donde se tomará en cuenta la antropometría de la mano humana para la fabricación a medida y personalizada , en la segunda fase se imprime en 3D las partes del prototipo con coyuntura flexible que genere movimientos biomecánicos que contribuya a personas con capacidad reducida por la pérdida parcial o total de su mano. En la tercera fase se hace uso de la biomecánica con la implementación de servomotores los cuales darán funcionalidad a las articulaciones de la prótesis con la utilización de placas electrónicas programables en el software Arduino que recolectan las señales generadas por los sensores musculares EMG (Palacios, Cruz, Luna, & Villalba, 2019). Finalizada la construcción y la programación de la prótesis se procede a realizar pruebas de agarre y manipulación de objetos para validar su utilidad y funcionalidad.

Palabras clave: Prótesis de mano, prototipo, filamento

## **ABSTRACT**

This project focuses on the development of a functional prototype by FMD additive manufacturing method of an articulated hand prosthesis with EMG muscle sensor; In the first phase, the design is based on the Solid Works program, where the anthropometry of the human hand will be taken into account for custom and personalized manufacturing, in the second phase the parts of the prototype are printed in 3D with a flexible joint that generate biomechanical movements that contribute to people with reduced capacity due to the partial or total loss of their hand. In the third phase, biomechanics is used with the implementation of servomotors which will give functionality to the joints of the prosthesis with the use of programmable electronic plates in the Arduino software that collect the signals generated by the EMG muscle sensors (Palacios, Cruz, Luna, & Villalba, 2019). Once the construction and programming of the prosthesis is finished, grip tests and manipulation of objects are carried out to validate its usefulness and functionality.

Keywords: Hand prosthesis, prototype, filament

## Introducción

El ser humano se caracteriza por poseer muchas habilidades motoras que permiten realizar actividades diarias e indispensables para su subsistencia, el uso de las manos es un factor primordial que en muchas de las ocasiones ya sea por factor genético o accidentes las personas han perdido esta extremidad (Dimitris Rodríguez Ramirez, Torres, & Rueda, 2020). Por tal razón con los avances de la tecnología que están disponibles en el país y que aplicada en la ingeniería asistida por computador combinada con la medicina se puede crear nuevos diseños de prótesis que contribuyan al estilo de vida de las personas.

El diseño e impresión de prototipos en 3D ha sido aplicados en diferentes industrias como el sector automotriz, medicina, deporte, arquitectura, electrónica (Rainer Christoph, 2016), este es un campo relativamente nuevo y se ha convertido en una tecnología con gran futuro en la elaboración de las prótesis, la funcionalidad de la misma permite que las personas se vuelvan independientes, eleven su autoestima y calidad de vida (Rodríguez & Saldaña, 2018). Las investigaciones recientes a nivel mundial en materia de prótesis han señalado como una potencial solución el remplazo la pérdida de la extremidad.

En la actualidad la impresión en 3D está revolucionando la fabricación de prótesis, permitiendo que sea asequible y que no represente una carga financiera para los pacientes, además el diseño y fabricación de la prótesis es realizado a medida, a detalle y en menor tiempo, esta manufactura por adicción permite obtener objetos, partes y piezas de medidas específicas, según las necesidades de las personas (Rodríguez & Saldaña, 2018).

Diseñar una prótesis funcional de mano articulada es complejo debido a su anatomía y a la simulación de todos los movimientos que realiza la mano del ser humano, además también requiere de dimensiones antropométricas de acuerdo a la edad de la persona, en los estudios realizados por (Becerra & Acosta, 2020), exterioriza referencia de medidas de los dedos y de la mano de una persona de edad promedio, la cual se tomará como base de referencia para la ejecución del diseño de prótesis de este proyecto.

Según (Fuentes, Beltrán, & Hernández, 2014) en su investigación de lesiones de manos manifiesta que la mano derecha es la que más daños sufre, debido a que la mayoría de las actividades se realiza con la misma. Por consiguiente, en el presente proyecto se diseña un prototipo de mano (derecha) articulada a bajo costo, mediante la aplicación del método de manufactura aditiva FDM para la impresión en 3D, utilizando servomotores y sensores

musculares que al interactuar sincronizadamente permita simular el movimiento de agarre de objetos, que beneficie a personas de bajos recursos económicos, contribuya a la realización de sus actividades diarias y mejore su calidad de vida.

### **Planteamiento del Problema**

A nivel mundial miles de personas sufren amputaciones de mano por diferentes causas como: accidentes laborales, accidentes de tránsito, actos violentos, enfermedades como la diabetes, mal formaciones, entre otros (Vargas & Flor, 2019), este tipo de amputaciones representa el 5% según estudios realizados por (LeBlanc, 2008) lo cual significa que un millón de personas al año sufren dicha discapacidad.

En el Ecuador según el Instituto Nacional de Estadísticas y Censos (INEC, 2020), en su anuario estadístico de registro de egresos hospitalarios al año alrededor de 1.200 personas son amputadas en regiones específicas y múltiples regiones del cuerpo, la edad de los pacientes que con mayor frecuencia sufren amputación oscila entre 35 y 44 años, el cual representa el 0,96% de la población, en donde el sexo masculino predomina con 76,80% y el 23,98% corresponde al sexo femenino en amputaciones traumáticas. Las contusiones de las manos son de gran importancia, debido a que es una zona anatómica de gran valor por su uso cotidiano y laboral, por ello las prótesis de manos son de gran utilidad para que las personas realicen funciones básicas como presión, agarre o manipulación de objetos (Galli & Pelozo, 2017).

Las prótesis ha permitido a las personas mejorar su calidad de vida, pese a ser una solución, muchos seres humanos no han podido acceder a una prótesis debido al alto costo de adquisición, por ejemplo la prótesis I Limb que tiene un valor monetario aproximado de 70 mil dólares en Inglaterra (Gutiérrez, y otros, 2017), En el Ecuador la fabricación de prótesis es limitada debido a los altos costos de importación de materiales, una prótesis con control de dedos puede llegar a costar entre 20 y 60 mil dólares (Líderes, 2020). Otro factor es la influencia de la demanda con el nivel de exigencia estética y la inexistencia de prototipos realizada a medida, esto hace que se genere una brecha entre el paciente y la prótesis.

En referencia a las precisiones anteriormente indicadas, se hace muy necesario la impresión en 3D de una prótesis funcional de la mano derecha utilizando el método de manufactura aditiva FMD, cuyo propósito es realizar un prototipo a bajo costo con coyuntura flexible que permita ejecutar eficientemente el movimiento de agarre de objetos mediante



señales transmitidas por sensores musculares, contribuyendo de esta manera a las personas con capacidades reducidas a mejorar su calidad de vida.

### **Objetivo General**

Diseñar un prototipo funcional por método de manufactura aditiva FDM de una prótesis de mano articulada con sensor muscular EMG con coyuntura flexible que contribuya a la movilidad a personas con capacidades reducidas.

### **Objetivos específicos**

- Definir el tipo de articulación a utilizar para la construcción de la prótesis de la mano.
- Diseñar el prototipo de la mano articulada en el CAD utilizando los materiales resistentes.
- Simular el funcionamiento del movimiento de la articulación de la prótesis con la ayuda del software SolidWorks.
- Utilizar el proceso de manufactura aditiva FDM para la impresión 3D y construcción de la prótesis de la mano articulada.
- Validar el funcionamiento del prototipo de la prótesis de la mano mediante pruebas de agarre y movilidad de las articulaciones.

## **Justificación**

En la actualidad la tecnología ha dado pasos agigantados que ayudan a las personas a solucionar problemas de deficiencia de las partes del cuerpo, que puede verse afectado su calidad de vida, a lo largo del tiempo las amputaciones parciales o totales de una extremidad del cuerpo ha ido en aumento debido traumatismos graves causados por accidentes de trabajo, por heridas graves o condiciones genéticas (Montero et al 2018). En el Ecuador la discapacidad física por deficiencia de articulaciones y amputaciones de extremidades superiores en las personas es de 45,66% y a su vez el grado de esta discapacidad está entre un rango del 30% al 49% (CONADIS, 2022). Según el Ministerio de Salud del Ecuador se considera personas con discapacidad a toda aquella con deficiencia física, mentales, sensoriales o intelectuales que se ve restringida su independencia. El costo de las prótesis en el Ecuador depende del tipo de material y la funcionalidad que el paciente requiere, los materiales usados en la elaboración de las prótesis son la fibra de carbono relleno de plástico PVC color carne y un peso moderado para su funcionalidad, Suspensión Harmony (Vacío Elevado), Liners de Silicona, (Chejín, 2019), toda prótesis requiere modificaciones o mantenimiento después de un cierto tiempo que en muchas ocasiones requiere cambios de piezas por el desgaste de uso que se le da.

Con el diseño y construcción de una prótesis articulada de la mano utilizando el método de manufactura aditiva FMD se logrará solucionar la problemática de discapacidad de la mano, facilitando la vida a las personas que sufren de amputaciones en el cuerpo y la inclusión normal de su diario vivir y a la convivencia sostenible. Es muy importante identificar el tipo de prótesis tomando en cuenta la edad de la persona, el tipo de accionamiento y mecanismo, las propiedades físicas y químicas de los materiales que se utilizará para su construcción, la combinación de materiales rígidos y flexibles, con aleaciones livianas y resistentes a los impactos. Según III Congreso Internacional de Ciencia y Tecnología para el Desarrollo Sostenible, Chiriquí, Panamá 27 al 29 de junio de 2018, en el cual (Rodríguez & Saldaña, 2018) en su investigación proponen la elaboración de prótesis a bajo costo y llega a la conclusión que la prótesis mecánica requiere implementar sistemas electrónicos que faciliten la movilidad y hacen referencia a la aplicación de la biomecánica.

En consecuencia, el presente proyecto se debe considerar su gran utilidad del prototipo a fabricar empleando la biomecánica, que permita solventar las necesidades del ser humano como la independencia de realizar sus actividades cotidianas y no depender de otras personas, la durabilidad a los ambientes hostiles, fabricado a medida con accionamiento

electromecánico utilizando sensores musculares EMG, que sea a bajo costo y accesible a pacientes de recursos limitados.

## Hipótesis

Con el diseño del prototipo funcional de mano articulada y el uso del método de manufactura aditiva FDM con coyuntura flexible contribuye a la movilidad a personas con capacidades reducidas y su fabricación a bajo costo.

### 1. Estado del Arte

#### 1.1. La mano humana y su anatomía

El cuerpo humano está compuesto por extremidades bien definidas como son la extremidad superior y la inferior. La mano humana es un instrumento relativamente importante para el hombre ya que permite movimiento y manipulación física de objetos y su desenvolvimiento social, en casos particulares algunas personas pierden esta extremidad ya sea por enfermedad o condiciones genéticas, las cuales optan por sustituirlas con una prótesis. Por ello, la mano es considerada como parte de la extremidad superior del cuerpo humano, la cual cumple funciones vitales para la supervivencia de hombre, este órgano está compuesto por 27 huesos, 5 dedos; su extensión comprende desde la muñeca hasta la yema de los dedos (Dimitris Rodríguez Ramirez, Torres, & Rueda, 2020). Durante muchas décadas la mano humana ha sido objeto de estudios científicos que evidencian que es una extremidad compleja debido a su estructura anatómica y su dinámica motriz (Lombraña, 2021) en sus investigaciones describe la aponeurosis palmar media, compartimentos y sus contenidos de la extremidad, así como también explica el aparato tendinoso extensor de la muñeca y de los dedos y la compleja estructuración del extensor del carpo y su biomecánica.

Figura 1

*Anatomía de la mano*



**Nota:** La anatomía de la mano humana realiza funciones específicas (Pierce-Smith, 2020) hace notar que existe una sinergia en el sistema ostiomuscular.

La mano se compone de huesos, músculos y diferentes ligamentos lo que permite una gran cantidad de movimientos y destrezas en el diario vivir. Contiene tres regiones anatómicas bien definidas como son: carpo, metacarpo y las falanges (Dimitris Rodríguez Ramirez, Torres, & Rueda, 2020), los mismos que para mayor entendimiento se detallan a continuación: Falanges. - Son los 14 huesos que se encuentran en los dedos de cada mano y también en los dedos de cada pie. Cada dedo tiene 3 falanges) distal, media y proximal). El pulgar solo tiene 2 falanges. Metacarpianos. - Los 5 huesos que componen la parte media de la mano.

Figura 2

*Huesos del carpo*

Huesos del carpo

**Hilera proximal**

1. Escafoides
2. Semilunar
3. Piramidal
4. Pisiforme

**Hilera distal**

5. Trapecio
6. Trapezoide
7. Grande
8. Ganchoso

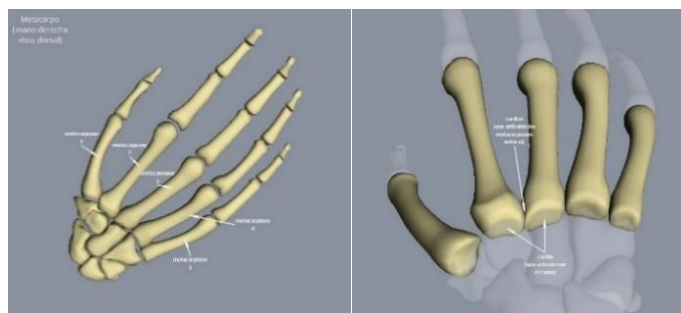


**Nota:** el hueso del carpo está conformado por la hilera proximal y la hilera distal (Dimitris Rodríguez Ramirez, Torres, & Rueda, 2020).

Huesos del carpió. - Los 8 huesos que forman la muñeca. Las 2 filas de huesos del carpo están conectados a los 2 husos del antebrazo: el radio y el cúbito (Pierce-Smith, 2020).

Figura 3

*Huesos del metacarpo*



**Nota:** el metacarpo está compuesto por 5 huesos metacarpianos (Moreno, 2018)

Usos de la mano humana. - La mano humana cumple una de las funciones básicas y vitales para el hombre el principal uso es de sujetar y sostener objetos, por consiguiente, la gran capacidad de la mano humana permite conseguir movimientos cambiantes (Guaricela, Abril, & Patiño, 2013). El científico Frank Gilbreth, realizó una categorización de los movimientos primordiales de las manos que realiza un ser humano.

**Tabla 1**

*Clasificación de los movimientos de la mano según Therblig*

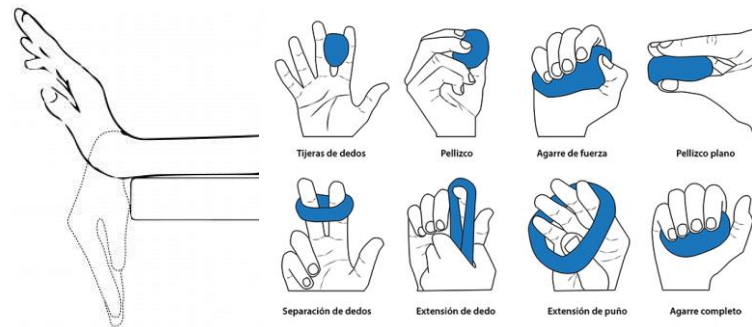
N°	Movimiento
1	Buscar
2	Seleccionar
3	Sujetar
4	Alcanzar
5	Mover
6	Sostener
7	Soltar
8	Colocar en posición
9	Precolocar en posición
10	Inspeccionar
11	Ensamblar
12	Desensamblar
13	Usar
14	Retraso inevitable
15	Retraso evitable
16	Planear
17	Descansar

**Nota:** La clasificación del movimiento de la mano humana fue realizado por el estadounidense Frank Gilbreth mediante un estudio de tiempos y movimiento y los clasificó en 17 numerales (Guaricela, Abril, & Patiño, 2013)

La mano realiza diversas funciones como: de agarre, flexión, extensión, sujeción y manipulación de objetos gracias a los movimientos de los dedos y las articulaciones que la conforman.

Figura 4

*Movimientos básicos*



Nota: los movimientos de la mano permiten la flexión y extensión de los dedos para ejecutar actividades que el ser humano requiera (Flintrehab, 2020).

## 1.2.Prótesis

Al indagar todos los acontecimientos que dieron origen al desarrollo de las prótesis y haciendo referencia a (Galli & Pelozo, 2017) quienes determinan el siguiente concepto: “Una prótesis es una extensión artificial que reemplaza o provee una parte del cuerpo que falta por diversas razones, entre ellas por amputación”, la prótesis de mano tiene como objetivo contribuir a realizar algunas funciones, pero nunca reemplazar el miembro amputado, además (Moles, 2018) dice que el campo prostético ha sufrido una revolución tecnológica en los últimos años, lo cual ha contribuido para crear diseños miméticos al comportamiento del miembro perdido, de manera que se interrelacionen la prótesis con el hombre.

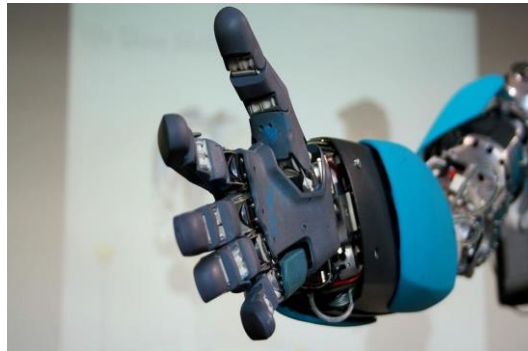
### 1.2.1. Tipo de prótesis

La elección de una prótesis de acuerdo a las necesidades de las personas juega un rol importante en relación al nivel de amputación que se pretenda mejorar. Existe un sin número de modelos en el mercado, con diferentes tipos de funcionalidades, por ejemplo, las prótesis mecánicas cumplen funciones básicas de motricidad de la mano como la apertura y el cierre de la misma, limitadas al agarre de objetos grandes y los movimientos imprecisos, estos movimientos son netamente mecánicos transmitidos por una señal obtenida por otro miembro del cuerpo humano como puede ser el codo u hombro (Weir, 2004). El desarrollo y producción de estas prótesis son sencillas y económicas en el mercado manifiesta (Autofabricantes, 2021), este tipo de prótesis son impresas en 3D, son diseñadas para niños y adultos las mismas que son desarrolladas por Enable the Futures, esta es una asociación

estadounidense que usa modelos de códigos abiertos. Según (Machain, 2018) la utilización de esta prótesis ha confirmado su durabilidad y son una excelente opción en el ámbito socioeconómico del paciente, pero recomienda que el usuario de la prótesis se haga un control médico periódico para evitar rasgamientos o laceraciones en la piel de la parte de la extremidad amputada.

Figura 5

*Prótesis mecánica*



**Nota:** (Consalud.es, 2017) las prótesis de mano mecánica realiza movimientos impresos.

En cambio, las prótesis eléctricas hacen uso de motores eléctricos que logran ser intervenidos por medio de servo controles accionados por pulsadores o interruptores, su principal desventaja es la reparación, su alto costo y la exposición a ambientes hostiles así como también su peso en la figura tenemos una prótesis eléctrica de la compañía Otto Bock que la principal ventaja es el agarre muy rápido de objetos y con mucha precisión de una forma activa, esto se debe a la ayuda de los sensores colocados en los dedos (Carvajal, 2011). Según el diario (El Universo, 2022) DASE (Empresa Pública Desarrollo, Acción Social y Educación) ubicada en la ciudad de Guayaquil, pretenden entregar hasta finales del año 2022 prótesis eléctricas gratuitamente. Un beneficiario de esta prótesis fue un hombre de 34 años quien utilizó en la fase de prueba para ultimar detalles técnicos y con ello entregar en óptimas condiciones y funcionando, esta asociación también otorgará capacitaciones en impresión en 3D y robótica. El objetivo de la elaboración de esta prótesis es facilitar las labores en el área de supervisión de obras civiles y en las actividades cotidianas.

Figura 6

*Prótesis eléctrica*



**Nota:** Hacen uso de motores eléctricos, pulsadores e interruptores para su funcionamiento(Laverde, 2015).

Así mismo, las prótesis neumáticas son asociadas por medio de ácido carbónico comprimido que proporciona una gran cantidad de energía, esta prótesis presenta complicaciones de sus partes y accesorios, por el riesgo del uso de carbono (Loaiza & Arzola, 2011). El desarrollo de este tipo de prótesis en el Ecuador, fue por docentes de la carrera de Mecánica de la Escuela Superior Politécnica de Chimborazo (Espoch), esta prótesis genera movimientos por medio de señales que emite el cerebro. El proceso inicia con la unión del muñón con la prótesis, luego colocan sensores en la cabeza para que capten señales del cerebro y posterior a ello realizar los movimientos que el paciente requiera. Con esta prótesis el usuario puede cepillarse el cabello y alimentarse. Este modelo es ergonómico y de bajo costo, cuyos estudios previos a su desarrollo tomaron alrededor de seis meses y fue usada por primera vez por una joven que perdió el brazo derecho en un accidente, lo cual permitió darle autonomía para el desarrollo de las actividades cotidianas (Líderes, 2020).

Por consiguiente, la prótesis híbrida combina la acción del cuerpo con el accionamiento de la electricidad, combina el uso de la fuerza propia y la fuerza ajena (Loaiza & Arzola, 2011). Este tipo de prótesis son funcionales, pero a la vez restringen los movimientos de la mano, según los estudios realizados por (Rios, 2017) dice que la prótesis híbrida fusiona la fuerza propia + fuerza ajena, es decir usa la fuerza del cuerpo, de la electrónica, el codo como control mecánico y un mecanismo terminal en forma de gancho.



Figura 7

*Prótesis híbrida*



Fuente: (Arce, 2005)

### **1.3. Manufactura Aditiva FMD o impresión en 3D**

Según (Rainer Christoph, 2016) manifiesta que la manufactura aditiva es un procedimiento de fabricación digitalizada que tiene por objetivo elaborar objetos tridimensionales mediante impresión capa por capa de filamento. Uno de los primeros métodos aditivos fue creado por la empresa 3D-Systems que usaba la técnica de fabricación capa por capa (GIL, 2017), también menciona que gracias a la impresora 3D de manufactura aditiva se puede realizar prototipos de cualquier medida o diseño que se adaptan a las necesidades de cualquier proyecto que se desee realizar.

Figura 8

*Impresión por FDM.*



**Nota:** La impresión en 3D se realiza mediante la utilización de filamentos (Rainer Christoph, 2016)

El descubrimiento de la impresión 3D ha permitido identificar significativos beneficios en varios sectores industriales que se han favorecido de este tipo de tecnología (Rainer Christoph, 2016), así como se muestra en la tabla 2.

**Tabla 2**

*Beneficios específicos de la impresión 3D para cada sector.*

<b>Sector Industrial</b>	<b>Beneficios específicos de la impresión 3D para el sector</b>
Automotriz y manufactura industrial	Elaboración de piezas complejas. Fabricación de herramientas para la producción. Elaboración de componentes y repuestos. Reducción de tiempos de desarrollo de productos.
Electrónica	Fabricación de circuitos impresos mediante la aplicación de tintas conducidas. Fabricación de dispositivos electromecánicos.
Aeroespacial	Creación de partes con geometrías complejas. Control de producto impreso Creación de partes más livianas
Farmacia/ medicina	Planificación de cirugías usando modelos anatómicos precisos Desarrollo de implantes ortopédicos y prótesis adaptadas a las necesidades y dimensiones específicas del paciente. Uso de partes humanas impresas en 3D para educación en medicina Impresión de tejidos vivos (desarrollo de la medicina)
Arquitectura	Realización de modelos de alta visualización y precisión.
Venta al por menor	Creación de juguetes y objetos de acuerdo a las necesidades de las personas Elaboración de repuestos para carros y hogar
Deportes	Creación de geometrías y forma de equipos. Creación de prendas específicas de acuerdo a datos biométricos del deportista. Creación de prototipos de materiales y colores para prueba de producto.

**Nota:** El poder fabricar artículos de dimensiones específicas acorde a las necesidades reales de las personas a bajo costo representa una oportunidad para la industria manufacturera que se dedica a la impresión en 3D (Rainer Christoph, 2016)

## **1.4. Filamento para impresoras 3D**

### **1.4.1. Tipos de filamentos para impresión en 3D**

Según (Medina, 2017) el filamento para impresión 3D es un material plástico que se encuentra en un estado sólido que se suele almacenar en bobinas, los cuales son fundidos a una temperatura promedio de 200° a 250°. Este tipo de filamento se encuentra en el mercado de varios colores, son muy resistente al impacto (golpes), al ambiente y es duradero. En los estudios realizados por (Sánchez, Jiménez, Meneses, & Franco, 2018) en donde la construcción de la piezas de una prótesis de mano realizan con filamento ABS, PLA y TPE, las falanges y la palma de la mano fueron impresos en ABS por la resistencia mecánica del material, las uniones interfalángica fueron construidos con TPE con el fin de darles flexibilidad y los soportes del antebrazo en PLA por la durabilidad y firmeza en el ensamble de las piezas, todo este estudio dio como resultado flexibilidad al realizar el movimiento de cierre de la mano. Este tipo de material favorece al avance de la tecnología para la realización de piezas resistentes de cualquier medida, todos los análisis realizados a este tipo de filamentos han permitido que se indague sobre el diseño y construcción de prótesis e impresión en 3D (Vizueta & Criollo, 2021) manifiestan que el uso de este tipo de tecnología permitirá obtener un prototipo de larga duración.

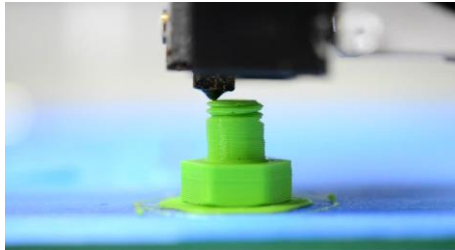
El Acrilonitrilo Butadieno Estireno (ABS) es un termoplástico de ingeniería derivado del petróleo, su elaboración es diferente a los plásticos comunes, se usa tres monómeros para su producción: Acrilonitrilo + Butadieno+ Estireno, estos elementos suministran rigidez, firmeza a ataques químicos, resistencia a altas temperaturas y mecánica, la suma de estos elementos proporcionan sinergia para usos industriales, a este material se puede pulir, lijar, pintar y su calidad se mantiene (Bordignon, Iglesias, & Hahn, 2018) . En cambio, el Ácido Poliláctico (PLA) es un poliéster alifático termoplástico, este material es biodegradable y no es nocivo se obtiene del almidón del maíz, de la caña de azúcar. Este filamento es un material fácil de manejar, es ideal para personas que recién empiezan a manejar la impresión en 3D, la temperatura para la fusión es de 180° (Bordignon, Iglesias, & Hahn, 2018).

Por consiguiente, los dos filamentos el ABS y PLA se utilizaron en el estudio denominado “Desarrollo de una prótesis mioeléctrico de brazo de bajo costo, para un niño de un año de edad con el efecto congénito de brida amniótica” (Tierra, 2017), el cual se imprimieron con una combinación de estos materiales de acuerdo a las características y

composición mecánica, la impresión de la mano se lo realizó en material ABS y el antebrazo en PLA dando resultados favorables en cuanto a su resistencia y durabilidad, por ello se utilizará el PLA para la fabricación del prototipo propuesto en esta investigación.

Figura 9

*Impresión en filamento de ABS*



*Impresión con filamento PLA*



**Nota:** La impresión en ABS y el PLA es muy resistente (Lorenzo, 2020), se puede imprimir cualquier objeto (Contreras, 2019)

**Tabla 3**

*Tabla comparativa del filamento PLA y ABS*

PLA	ABS
No tiene las mismas propiedades mecánicas que el filamento ABS	Es muy resistente y flexible
Es muy resistente a factores externos	Resistencia mecánica
Es de uso sencillo	Suministra rigidez
Temperatura de fusión 180-230°	Temperatura de fusión 200-250°, es ajustable según el fabricante
Temperatura de plataforma 60° y 70° para piezas finas	Temperatura de cama: 100°
Uso de laca en cama para mejorar adhesión	Uso de laca sobre la cama para fijar la pieza
Biodegradable y no emite olores	No es biodegradable, emite olores
Reciclable	Reciclable
No tiene flexibilidad	Adecuado para productos y piezas que requiera tratamiento posterior

**Nota:** Los dos filamentos tienen similares usos, pero diferentes propiedades (Bordignon, Iglesias, & Hahn, 2018)

### 1.5. Sistema de control de movimiento de la mano

Arduino es una placa electrónica para el control de múltiples dispositivos que contiene entradas y salidas digitales y analógicas, se pueden programar para diferentes funciones y está basada en micro controladores con procesador ATmega 328 y cargar programas en una plataforma de código abierto y utiliza un software libre donde pueden ser ampliados por programadores con mucha experiencia (Alpiste, Torner, & Brigós, 2017).

El microcontrolador nano Arduino se utilizó en el estudio realizado por (García & Betancourt, 2020) “Sistema electrónico para la realización de funciones básicas de la mano humana en prótesis de bajo costo para miembro superior” donde manifiesta que esta placa tiene similares características que un Arduino Uno, con relación a la potencia y en la conectividad, en relación a lo anteriormente expuesto, en el proyecto se utilizará la placa nano Arduino debido a que es una placa de tamaño consistente, flexible y de fácil uso. Es compatible con los softwares utilizados para el funcionamiento de la prótesis, la capacidad de memoria es de 16 KB, tiene una tensión de alimentación de 5v y 3v, las mismas que se puede observar en la tabla 4.

**Tabla 4**

*Especificaciones de la tarjeta Nano Arduino*

<b>Especificaciones</b>	<b>Descripción</b>
Microcontrolador	ATMega328
Voltaje de trabajo	3V / 5V
Pines	14 (6 son PWM)
Pines analógicos	8
Memoria Flash	32KB
Conector alimentación	Mini B
Dimensiones	1,85cm (ancho) / 4,31cm (largo)
Peso	7g

**Nota:** Las especificaciones técnicas de la placa Nano Arduino contribuye a la utilización correcta de la placa para el funcionamiento de la prótesis (García & Betancourt, 2020).

Figura 10

*Placa Nano Arduino*



**Nota:** controla múltiples dispositivos (García & Betancourt, 2020)

### **1.6. Sensores de señal muscular EMG**

(Konrad, 2017) Manifiesta que los sensores de señal muscular EMG son dispositivos electrónicos basado en la electromiografía donde obtienen señales micros eléctricos emitidos por los músculos del brazo de la persona y a su vez genera el movimiento de los servos motores y permite la movilidad de las articulaciones de la prótesis de la mano. En los estudios realizados por (Luque, 2019) de la integración de estos sensores para el control de la estimulación, sostiene que estos dispositivos son resistentes a los movimientos que genera la persona y que son sensibles al ruido. Estos sensores disponen de electrodos desechables que reconocen señales de pulsación eléctrica originada de la actividad muscular que trasfigura en una señal identificable para el Arduino, donde se puede observar las principales especificaciones del sensor de señal muscular EMG en la tabla 5.

**Tabla 5**

*Especificaciones técnicas del sensor de señal muscular EMG*

<b>Especificaciones</b>	<b>Descripción</b>
Tipo	Electrografía - muscular
Voltaje de alimentación mínima	$\pm 3,5v$
Compatibilidad	Microcontroladores Arduino
Voltaje de la fuente energía	0 – vs volts
Dimensiones	2,73cm (ancho) / 2,73cm (largo)

**Nota:** Las especificaciones técnicas del sensor muscular EMG contribuye a una correcta utilización del dispositivo para generar el movimiento de la mano, mediante la captación de señales emitidas por el musculo del brazo (C&D tecHNología, 2022).

Figura 11

*Sensor de señal muscular EMG*

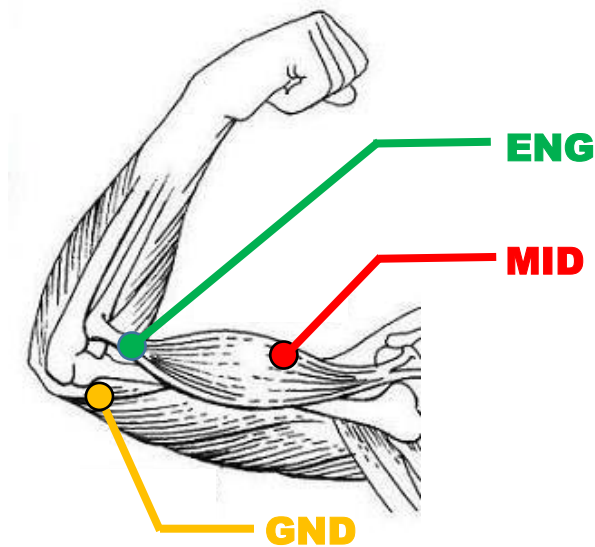


**Nota:** Los sensores musculares permiten captar señales del músculo (REES52, 2021)

Este tipo de sensor se utilizó en el estudio realizado por (García, López, Villela, & Medina, 2018) "Aplicación del análisis de señales EMGS para el control de una prótesis de mano" donde indica que la adquisición de las señales del sensor se realiza mediante los electrodos bipolares que se debe colocar sobre la piel, también manifiesta que los electrodos deben ser colocados adecuadamente en el musculo a analizar para poder receptor buenas señales, el electrodo de color rojo (MID) en la mitad del musculo, el verde (ENG) al final y el amarillo (GND) se utilizaría como tierra colocándose cercano a un tendón o hueso de forma opuesta al musculo como se indica en la figura 12.

Figura 12

*Colocación de electrodos sobre el musculo*



**Nota:** se puede observar la posición o la ubicación de los electrodos en el musculo para generar señales (García, López, Villela, & Medina, 2018)

## **2. Metodología**

### **2.1. Tipo de investigación**

La presente investigación contiene un enfoque cualitativo que parte de un análisis de las causas que generan la amputación de una mano y la necesidad de crear una prótesis funcional que contribuya a la calidad de vida de las personas.

Descriptiva. - se aplica métodos y técnicas de diseño para la impresión en 3D mediante la manufactura aditiva.

#### **2.1.1. Métodos de investigación**

Inductivo. - se aplica este método porque parte de la observación y diagnóstico de la situación actual de la fabricación de prótesis en el Ecuador mediante el uso de manufactura aditiva.

Deductivo. - se parte de un enfoque integral de la construcción de una prótesis y se especifica en la elaboración de una prótesis funcional de mano derecha.

Analítico. - permite identificar las causas y efectos que motivan al diseño y fabricación de una prótesis de mano articulada.

#### **2.1.2. Técnicas de investigación**

Análisis documental: se analizó información bibliográfica digital y documentos como revistas y artículos científicos disponibles en la plataforma Scopus, Academia y e-book, que permita abordar el tema de investigación.

### **2.2. Proceso de diseño y construcción de una prótesis funcional de la mano derecha**

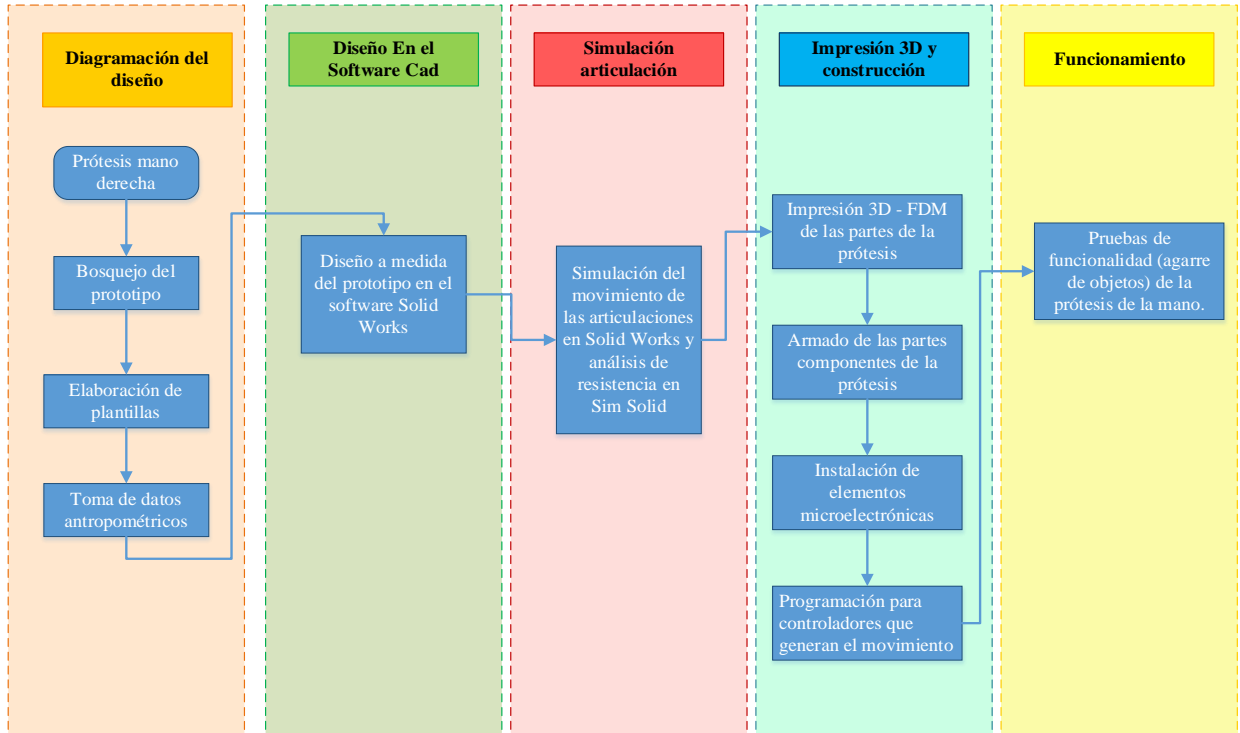
El diseño del prototipo contiene varios procedimientos que enmarcan los requisitos de los objetivos específicos para el diseño y construcción del proyecto, los mismos que se describe a continuación:



Figura 13

Diagrama de proceso del diseño y construcción de la prótesis de mano derecha

PROCESO DEL DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DE UNA PRÓTESIS FUNCIONAL DE LA MANO DERECHA



2.3. Diagramación del diseño

2.3.1. Requisitos del diseño

Los requisitos o especificaciones del diseño deben estar encaminados en base a las necesidades del usuario de la prótesis que conlleve a satisfacer sus requerimientos, además contribuye en el cumplimiento de los objetivos del presente proyecto permitiendo obtener una arquitectura innovadora, atractiva, funcional, ergonómica, de fácil usabilidad y a bajo costo. El diseño de la prótesis se enmarca en las siguientes especificaciones:

Tabla 6

Requisitos del diseño del prototipo de mano articulada

Factor	Requisito
Estética	• Agradable a la vista
	• Innovador debido a que la prótesis contiene piezas intercambiables
	• Diseñado para ambos sexos
	• Colores exclusivos

Dimensiones	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Acorde a las medidas antropométricas de la persona entre 30 y 40 años.</li> <li>• Diseño a medida</li> <li>• Accionamiento por medio de servo Motores</li> </ul>
Funcionalidad	<ul style="list-style-type: none"> <li>• El prototipo realizará funciones de agarre de objetos, flexión y extensión de dedos</li> <li>• No tóxico para las personas ni el medio ambiente</li> </ul>
Material	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Ergonómico, no produce reacciones alérgicas o llagas</li> <li>• Impreso en 3D lo cual reduce costos de fabricación</li> <li>• Es reciclable</li> <li>• Brinda comodidad al realizar actividades de agarre de objetos.</li> </ul>
Ergonomía	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Acople cómodo con la parte amputada</li> <li>• Su peso es ligero y el tamaño será muy similar a la mano humana</li> <li>• La unión y ensamblaje debe ser sencillo, de tal manera que el usuario lo pueda hacer de manera independiente.</li> <li>• Es fácil de limpiar</li> </ul>
Uso	<ul style="list-style-type: none"> <li>• En caso de sufrir cierto daño algún componente de la prótesis, se pueda sustituir de manera rápida, fácil y económica.</li> <li>• Puede ser de uso diario u ocasional, depende de la preferencia de la persona.</li> <li>• Resistencia a ambientes hostiles, al peso y a impactos</li> </ul>
Duración	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Resistente a productos químicos de limpieza</li> <li>• De larga duración</li> </ul>
Precio	<ul style="list-style-type: none"> <li>• A bajo costo</li> </ul>
Seguridad	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Componentes deben cumplir parámetros de calidad de ensamble que evite la pérdida de algún componente de la prótesis.</li> </ul>

---

**Nota:** Todos estos aspectos se tomarán en consideración para el diseño de la prótesis de mano articulada impresa en 3D.

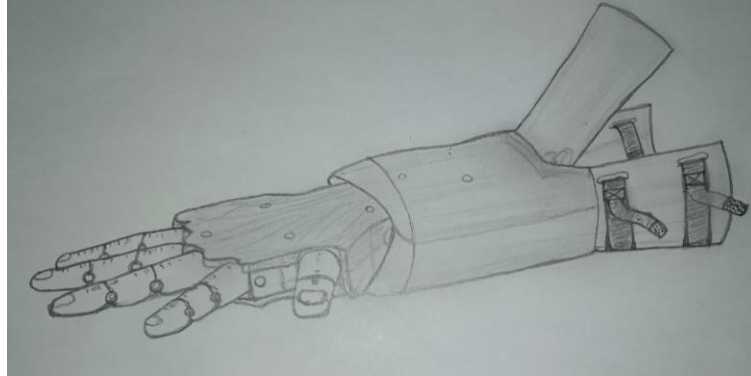
### **2.3.2. Bosquejo del prototipo**

El bosquejo realizado para el diseño del prototipo se utilizó para tener una referencia gráfica que permita modelar en el software CAD que permita obtener un modelo a escala

de manera rápida. Además, se tomó como punto de partida los requisitos del diseño mencionados en la tabla 6.

Figura 14

*Bosquejo del prototipo*

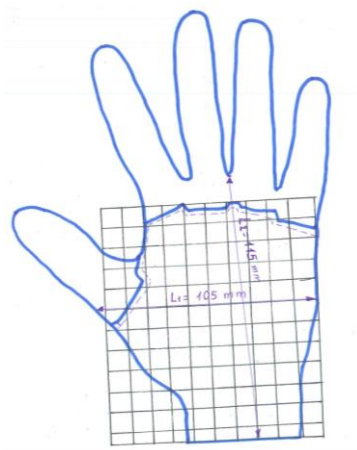


### 2.3.3. Elaboración de plantillas

La elaboración de plantillas de mano se realizó mediante la técnica de la cuadrícula porque es ideal para tener una guía de dibujo que se desea plasmar, es decir simplifica la estrategia de arquitectura de la prótesis de mano. Esta técnica consiste en realizar un bosquejo a escala en tamaño real, en este caso de la mano izquierda como se observa en la figura 12, luego se procede a trazar una cuadrícula sobre el papel del dibujo y posteriormente se traza otra cuadrícula de igual proporción en el croquis de trabajo del software Solid Works, esta escala nos permite obtener las medidas exactas de la palma de la mano y dedos, una vez dibujado en el software se realiza un mirror (espejo) para obtener la mano derecha que el cual se utilizará para el desarrollo del proyecto.

Figura 15

*Esquematización de la mano*



## 2.4. Toma de datos antropométricos

### 2.4.1. Definición de medidas antropométricas de la mano para personas de 30-40 años de edad.

El establecimiento de medidas antropométricas de la mano es un factor primordial para el diseño del prototipo en el CAD. En primera instancia se obtuvo las características de las personas quienes serán beneficiados con la prótesis:

- **Género:** Masculino
- **Edad:** 30-40
- **Altura:** 1,70 m
- **Peso:** 65 kg
- **Tipo de amputación:** traumática de muñeca

Para el proceso del diseño de la prótesis de la mano articulado se toma como referencia las dimensiones de la mano basado en el estudio colombiano denominado “Estimación de medidas antropométricas de la mano para el diseño de guantes cosidos, a partir del método de relaciones de escala” realizado por (Becerra & Acosta, 2020), con percentil P50 comprendidos en un rango de edad entre 18 – 60 años, se hace referencia a este estudio porque en nuestro país no existe investigaciones relacionadas a la antropometría de mano y porque la población colombiana tiene similares características en cuanto a herencias genéticas, dimensiones, costumbres, hábitos alimenticios, geografía, etc.

**Tabla 7**

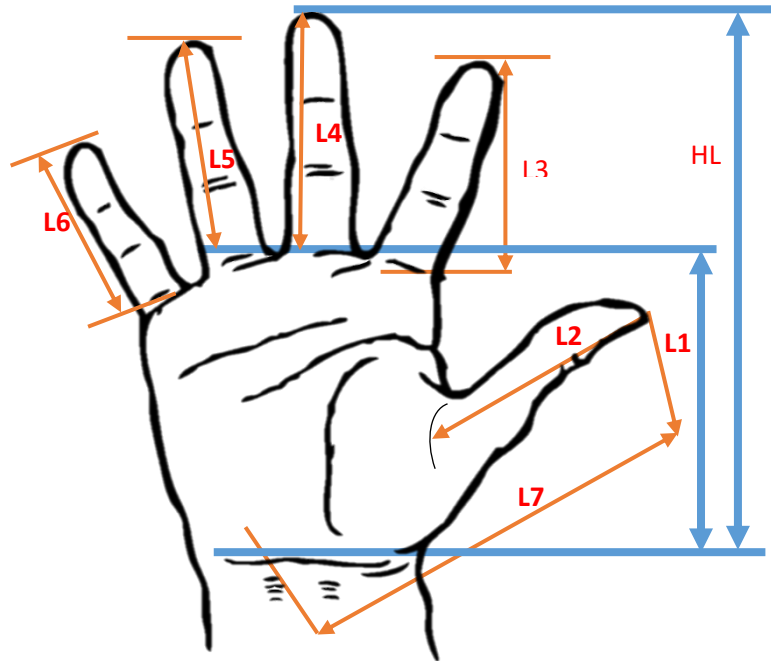
*Longitudes de la mano derecha*

Código	Variabes
L1	Longitud de la palma
L2	Longitud del pulgar
L3	Longitud del índice
L4	Longitud del medio
L5	Longitud anular
L6	Longitud meñique
L7	Longitud pliegue de la muñeca

**Nota:** En la tabla se puede apreciar la descripción de la nomenclatura utilizada en la figura 13 la misma que fue utilizada para establecer las longitudes de la palma de la mano.

Figura 16

*Longitudes de la mano en el diseño de la prótesis articulada*



**Tabla 8**

*Ancho del metacarpiano para el diseño de la prótesis*

Código	Dedo	Variables
B2	Pulgar	Anchura de articulación interfalángica
B3	Índice	Anchura de articulación interfalángica
B4		Anchura de articulación interfalángica proximal
B5	Medio	Anchura de articulación interfalángica distal
B6		Anchura de articulación interfalángica proximal
B7	Anular	Anchura de articulación interfalángica distal
B8		Anchura de articulación interfalángica proximal
B9	Meñique	Anchura de articulación interfalángica distal
B10		Anchura de articulación interfalángica proximal

**Nota:** en esta tabla se describe el significado de los códigos utilizados para identificar la anchura de cada dedo de la mano.

Figura 17

Ancho del metacarpiano de la mano

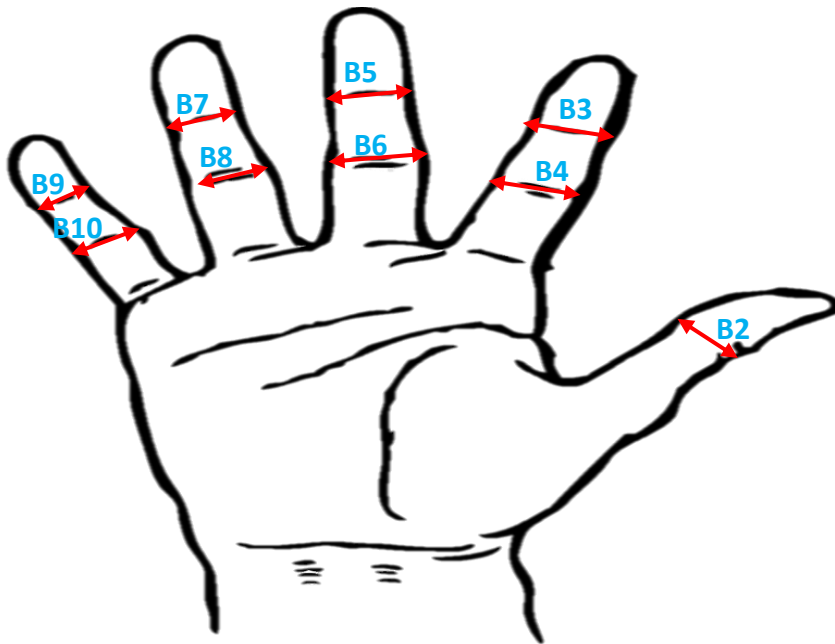


Tabla 9

Dimensiones estimadas del ancho y largo para los dos géneros, dadas en mm (milímetros)

Variable	Female (percentile)					Male (percentile)				
	5th	25th	50th	75th	95th	5th	25th	50th	75th	95th
B3	13.8	14.4	15.5	16.2	17.4	15.8	16.8	17.6	18.6	19.8
B4	16.0	16.6	17.9	18.6	19.7	18.2	19.3	20.2	21.1	22.4
B5	13.6	14.2	15.5	15.9	17.1	15.6	16.6	17.4	18.2	19.3
B6	15.5	16.2	17.4	18.1	19.3	17.8	18.9	19.8	20.7	21.8
B7	12.5	13.1	14.2	14.8	15.9	14.5	15.5	16.2	17.1	18.2
B8	14.7	15.3	16.5	17.1	18.5	17.1	18.0	18.8	19.7	20.9
B9	11.6	12.1	13.3	13.8	14.9	13.7	14.6	15.3	16.0	17.0
B10	13.1	13.7	14.9	15.5	16.6	15.3	16.1	16.9	17.6	18.5
L2	52.0	56.0	58.0	61.0	65.0	58.0	63.0	66.0	69.0	73.0
L3	58.0	61.0	64.0	67.0	70.0	63.0	68.0	71.0	74.0	79.0
L4	65.0	68.0	71.0	74.0	78.0	71.0	76.0	79.0	83.0	88.0
L5	60.0	64.0	66.0	69.0	73.0	67.0	71.0	75.0	78.0	83.0
L6	48.0	51.0	54.0	56.0	60.0	53.0	58.0	61.0	65.0	69.0
L7	105.0	111.0	115.0	121.0	128.0	117.0	125.0	130.0	136.0	144.0
L8	145.0	151.0	156.0	162.0	170.0	160.0	169.0	175.0	181.0	190.0
L9	153.0	159.0	164.0	170.0	178.0	168.0	177.0	183.0	190.0	200.0
L10	144.0	150.0	155.0	161.0	169.0	160.0	168.0	174.0	181.0	191.0
L11	123.0	129.0	134.0	140.0	147.0	136.0	145.0	151.0	158.0	167.0
L12	58.0	61.0	64.0	67.0	71.0	66.0	70.0	72.0	76.0	80.0
L13	65.0	69.0	72.0	75.0	80.0	70.0	76.0	80.0	84.0	90.0
L14	59.0	63.0	66.0	69.0	74.0	65.0	70.0	74.0	78.0	83.0
L15	55.0	59.0	62.0	66.0	71.0	61.0	66.0	70.0	74.0	79.0

**Nota:** Se realiza la extracción de medidas antropométricas, en base a la tabla 6 de las dimensiones de ancho y largo de la mano que están dadas en milímetros este proceso se realiza en base a la investigación de (Becerra & Acosta, 2020)

## 2.5. Diseño asistido por computadora (CAD)

### 2.5.1. Diseño de falanges de los dedos

El proceso de diseño de prótesis de mano en el CAD Solid Works inicia con la elaboración de los dedos (pulgarcillo, índice, medio, anular y meñique) de la mano derecha, la misma que se describe a continuación:

**Tabla 10**

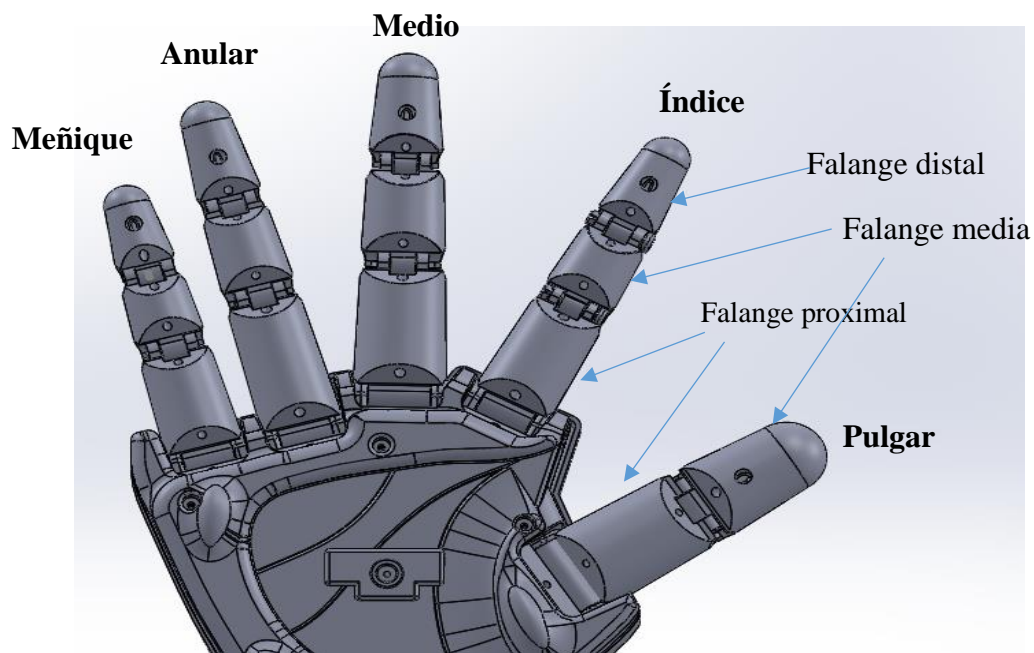
*Medidas de las falanges en Solid Works*

	Falange proximal (mm)	Falange media (mm)	Falange distal (mm)
Pulgar	36	-	34,5
Índice	33	23	28
Medio	36	27	30
Anular	39	25,5	29
Meñique	31	21	24,5

El diseño de las falanges consta de tres partes o piezas independientes a las cuales se ha establecido espacios y espesor específico para el correcto funcionamiento en simulación de agarre de objetos.

Figura 18

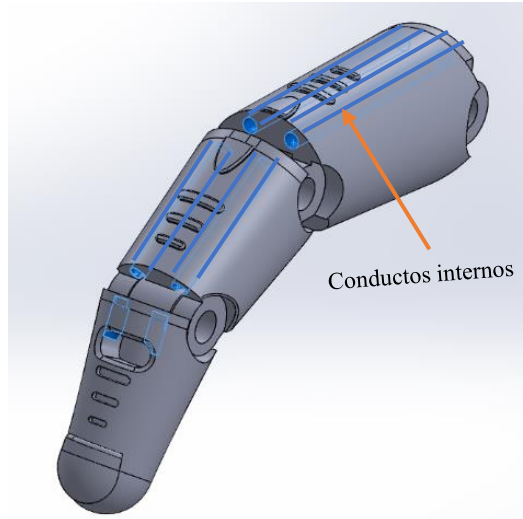
*Diseño de falanges de los dedos de la mano derecha en Solid Works*



Para que el elástico logre pasar por el interior de los dedos se procedió a diseñar canales internos con dimensiones proporcionales que permita el desplazamiento flexible del material.

Figura 19

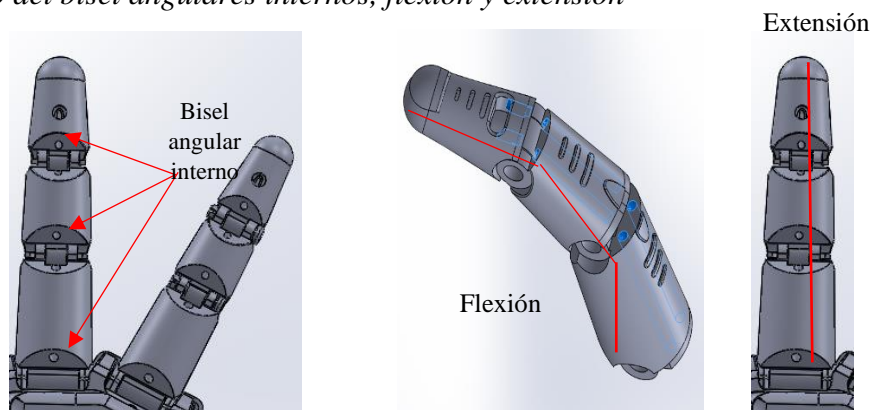
*Diseño de conductos internos para el desplazamiento del elástico (articulación)*



Además, se realizó un bisel angular internos que sirve para controlar la flexión y la extensión del dedo, el desplazamiento angular será de  $0^{\circ}$  a  $90^{\circ}$  con dirección hacia el centro de la palma de la mano ejerciendo una fuerza similar a los dedos humanos.

Figura 20

*Diseño del bisel angulares internos, flexión y extensión*



### 2.5.2. Diseño de la palma de la mano

La palma de la mano tiene un espesor de 4mm con la finalidad de que sea resistente a desgastes prematuros por manipulación y uso diario; también se ha diseñado soportes para los dedos los mismos que se detalla a continuación:



**Tabla 11**

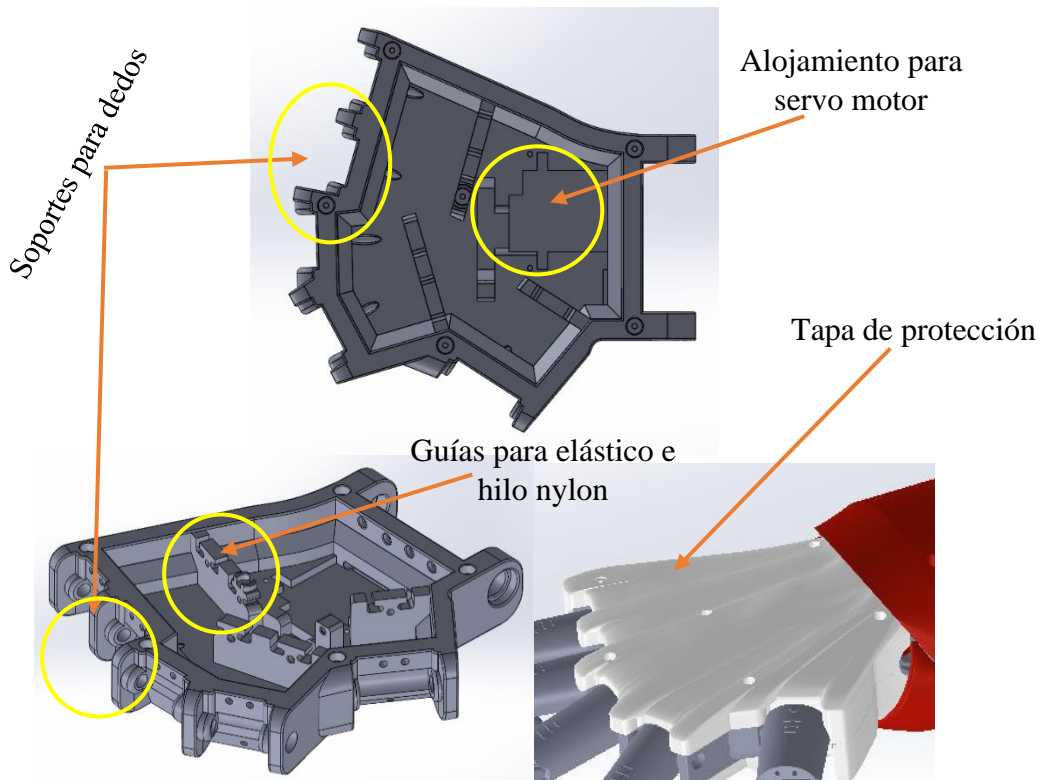
*Dimensiones de soportes de dedos en la palma de la mano*

	Dimensión de Soporte (mm)
Pulgar	20
Índice	14
Medio	15
Anular	13
Meñique	12,5

En la parte superior interna contiene un alojamiento para un servo motor de tres kg. fuerza, posicionado detrás de las bases para el tensado de los elásticos y guías de hilos nylon que generarán el movimiento de las articulaciones de los dedos, además contiene una tapa de protección para aislar dichos componentes. En la parte inferior de la palma de la mano contiene pequeñas elevaciones que simular la eminencia tenar e hipotenar que soportarán la presión de agarre de los objetos.

Figura 21

*Diseño de la Parte superior interna de la muñeca de la mano*

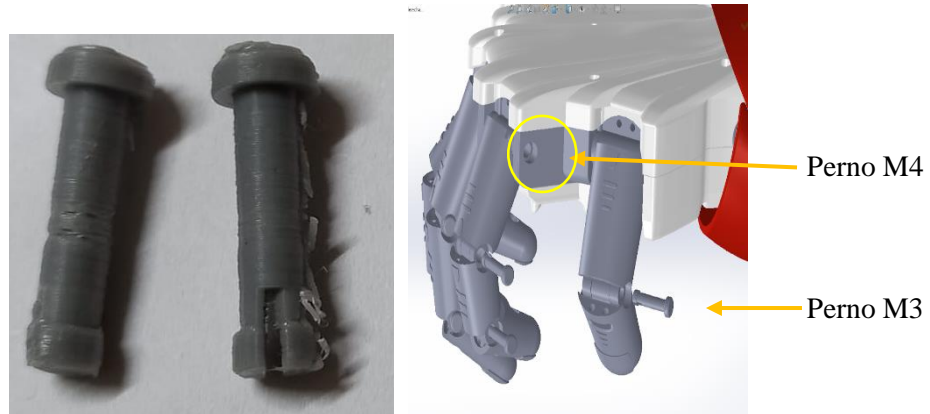


### 2.5.3. Diseño de pernos para unión de articulaciones

Para el ensamble de las falanges de los dedos se utiliza diseño de perno M3 y para la unión del dedo con la base de la palma de la mano se utiliza perno M4.

Figura 22

*Pernos M3 y M4 para ensamble de falanges y palma de muñeca*

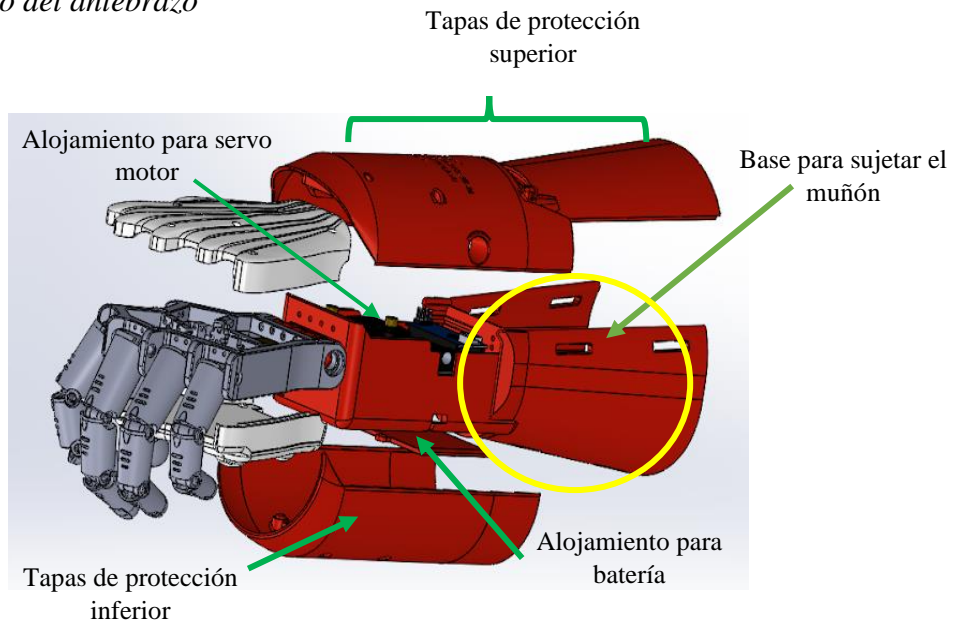


### 2.5.4. Diseño de Antebrazo

El antebrazo se diseña con una pared de 4mm donde se realiza un alojamiento para dos servo motores de 12 kg.f, una tarjeta microelectrónica, cargador de batería y base para sujetar el muñón (sección amputada).

Figura 23

*Partes del diseño del antebrazo*

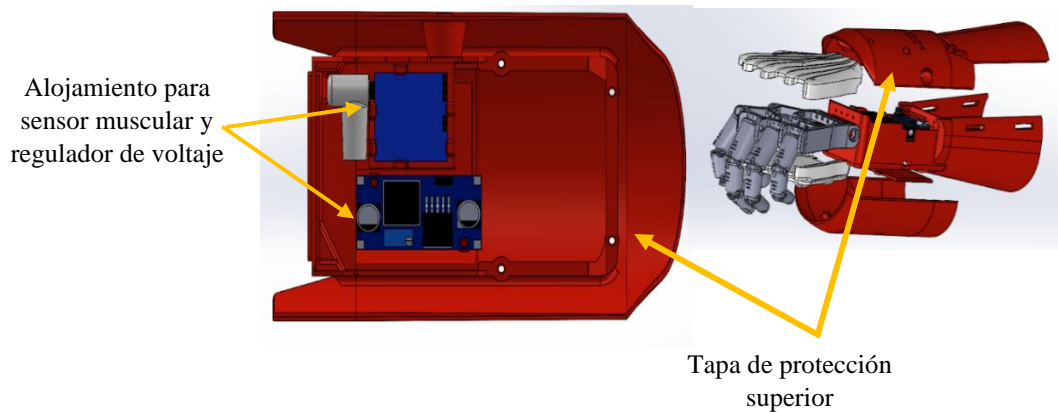


### 2.5.5. Diseño de tapas de protección de antebrazo

En su parte interna se diseñada milimétricamente un alojamiento para albergar el sensor muscular MG y un regulador de voltaje con el objetivo de optimizar el espacio interno mediante una adecuada distribución, además esta tapa sirve como protección de todos componentes electrónicos que conforman la prótesis.

Figura 24

*Tapas de protección de antebrazo*



Nota: El diseño final de la prótesis de la mano articulada realizado en el software SolidWorks con todas las partes descritas se lo puede apreciar en el ANEXO 1.

### 3. Simulación de articulación

Para dar inicio a la simulación de las articulaciones de la mano se utiliza la cinemática directa para calcular la posición del actuador final de acuerdo al número de juntas que contiene una articulación en nuestro caso los dedos (pulgar, índice, medio, anular y meñique).

#### 3.1. Diagramación cinemática directa de Denavit - Hartenberg

Mediante la diagramación se pudo determinar el origen inicial donde se encuentra la posición vectorial en donde:

L1= falange proximal

$q_1, q_2, q_3$ = Número de Articulaciones

L2= falange medio

$\theta_1, \theta_2, \theta_3$ = Posición de giro

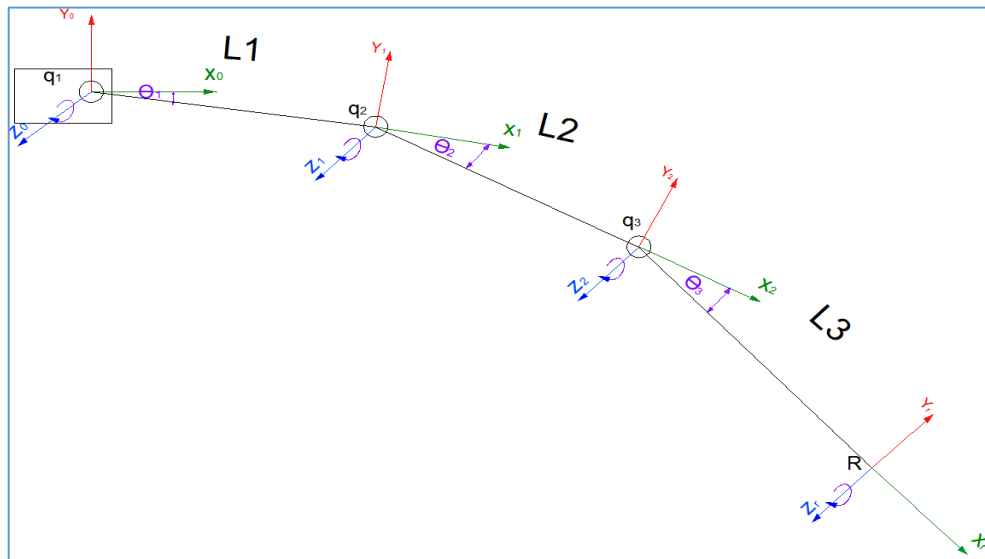
L3 falange distal

$x, y, z$  = Posiciones Vectoriales

R= resultante

Figura 25

Diagramación de cinemática utilizando matriz de DH



**Nota:** Los resultados obtenidos de la diagramación del movimiento de cada junta del dedo se reflejan en la tabla 12.

**Tabla 12**

*Parámetros de Denavit - Hartenberg*

Articulación	$d_i$	$\theta_i$	$a_i$	$\alpha_i$
1	0	$\theta_1+q_1$	$L_1$	0
2	0	$\theta_2+q_2$	$L_2$	0
3	0	$\theta_3+q_3$	$L_3$	0

Para los cálculos con la matriz de transformación homogénea se utiliza los ángulos de giro que realiza cada falange.

**Tabla 13**

*Valores de ángulos de movimiento de la falange*

Tipo	Ángulo	Radian
Falange proximal	15°	$\pi/12$
Falange media	45°	$\pi/4$
Falange distal	30°	$\pi/6$

### 3.2. Matriz de Transformación Homogénea

Con la ayuda del software COLAB realizamos la programación para determinar la matriz de transformación homogénea y calcular los valores de las coordenadas finales de posición de la resultante, llegando a obtener las siguientes matrices: ((VER ANEXO 2))

$$T_{01}: \begin{bmatrix} \cos(q_1 + \frac{\pi}{12}) & -\sin(q_1 + \frac{\pi}{12}) & 0 & l_1 \cos(q_1 + \frac{\pi}{12}) \\ \sin(q_1 + \frac{\pi}{12}) & \cos(q_1 + \frac{\pi}{12}) & 0 & l_1 \sin(q_1 + \frac{\pi}{12}) \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

$$T_{12}: \begin{bmatrix} \cos(q_2 + \frac{\pi}{4}) & -\sin(q_2 + \frac{\pi}{4}) & 0 & l_2 \cos(q_2 + \frac{\pi}{4}) \\ \sin(q_2 + \frac{\pi}{4}) & \cos(q_2 + \frac{\pi}{4}) & 0 & l_2 \sin(q_2 + \frac{\pi}{4}) \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

$$T_{23}: \begin{bmatrix} \cos(q_3 + \frac{\pi}{6}) & -\sin(q_3 + \frac{\pi}{6}) & 0 & l_3 \cos(q_3 + \frac{\pi}{6}) \\ \sin(q_3 + \frac{\pi}{6}) & \cos(q_3 + \frac{\pi}{6}) & 0 & l_3 \sin(q_3 + \frac{\pi}{6}) \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

Para el cálculo determinamos los valores de las falanges de cada dedo asignando los desplazamientos entre cada articulación se toma como referencia la tabla 10 de medidas de las falanges obtenidas del software Solid Works para proceder con el cálculo de la posición de los dedos en donde:

F. proximal= L1

F. media = L2

F. distal= L3

Matriz para posición del dedo pulgar

$$\begin{bmatrix} [ [ 0. & -1. & 0. & 0.03 ] \\ [ 1. & 0. & 0. & 0.04 ] \\ [ 0. & 0. & 1. & 0. ] \\ [ 0. & 0. & 0. & 1. ] ] \end{bmatrix}$$

Matriz para posición del dedo índice

$$\begin{bmatrix} [ [ 0. & -1. & 0. & 0.04 ] \\ [ 1. & 0. & 0. & 0.06 ] \\ [ 0. & 0. & 1. & 0. ] \\ [ 0. & 0. & 0. & 1. ] ] \end{bmatrix}$$

Matriz para posición del dedo medio

$$\begin{bmatrix} 0. & -1. & 0. & 0.05 \\ 1. & 0. & 0. & 0.06 \\ 0. & 0. & 1. & 0. \\ 0. & 0. & 0. & 1. \end{bmatrix}$$

Matriz para posición del dedo anular

$$\begin{bmatrix} 0. & -1. & 0. & 0.05 \\ 1. & 0. & 0. & 0.06 \\ 0. & 0. & 1. & 0. \\ 0. & 0. & 0. & 1. \end{bmatrix}$$

Matriz para posición del dedo meñique

$$\begin{bmatrix} 0. & -1. & 0. & 0.04 \\ 1. & 0. & 0. & 0.05 \\ 0. & 0. & 1. & 0. \\ 0. & 0. & 0. & 1. \end{bmatrix}$$

Aplicado la fórmula de matriz homogénea en el software COLAB se obtiene los siguientes valores finales para cada dedo.

**Tabla 14**

*Posición de la resultante final de cada dedo*

<b>Dedos</b>	<b>X (mm)</b>	<b>Y (mm)</b>
Pulgar	30	40
Índice	40	60
Medio	50	60
Anular	50	60
Meñique	40	50

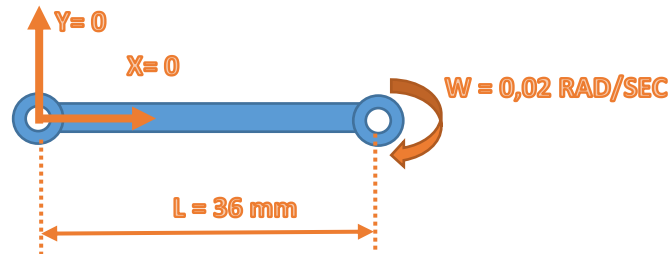
### **3.2.1. Momento de inercia rotacional en el software SimSolid.**

Seleccionamos a la falange proximal del dedo medio porque es el elemento que tiene mayor longitud con relación a los otros que conforman los dedos y porque en el soporte que une esta falange con la base de la palma de la mano es el eslabon fijo que mayor esfuerzo.

Se establece las condiciones de borde donde en el eslabon fijo es la unión entre la falange proximal y de la palma de la mano.

Figura 26

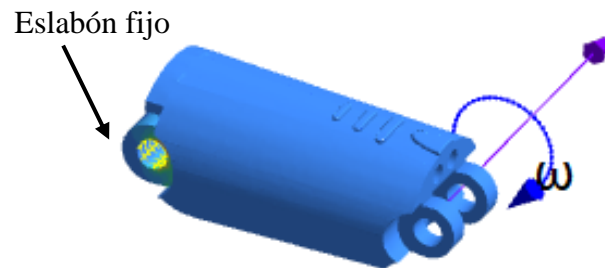
*Condiciones de borde o frontera*



Utilizando los datos de referencia de las condiciones de borde en el software simsolid se realiza el analisis de momento de inercia rotacional aplicando una velocidad rotacional de  $0,02 \text{ rad/sec}$  y con una restricción de soporte fijo en la cara interna del eslabon.

Figura 27

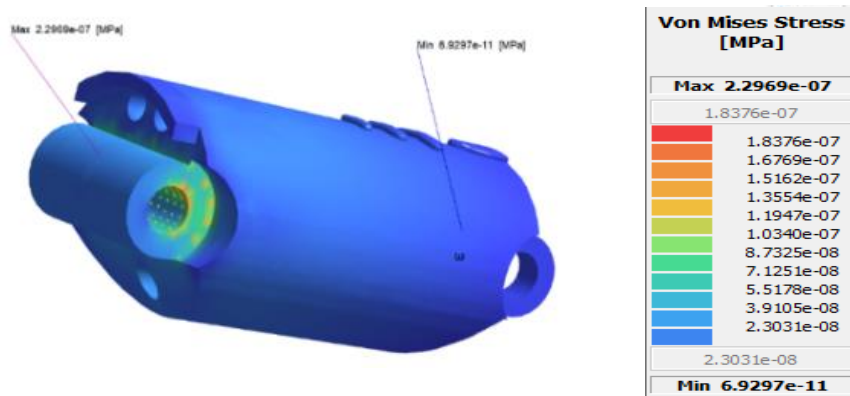
*Eslabon fijo de la falange*



Ejecutado la simulación obtenemos el siguiente resultado de la deformación de Von Mises maxima de  $2,3 \times 10^{-7}$  y una minima  $6,9 \times 10^{-7}$ , también se puede determinar que el esfuerzo se reparte en toda la superficie del eslabon.

Figura 28

*Deformación de Von Mises*



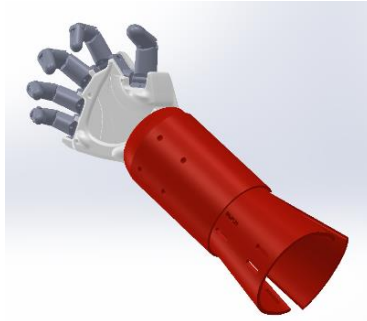
### 3.3. Simulación en el software Solid Works

La simulación del modelo de prótesis en el software Solid Works en primera instancia se procede mediante el uso de la cinemática que consiste en un accionamiento remoto incorporado sistemas de transmisión, asignación de sensores con dispositivos de transporte que produce el movimiento de agarre de objetos en las articulaciones de los dedos de la mano derecha.

Flexión de la mano. - Esta simulación se realiza para ver el grado de movimiento al momento de abrir y cerrar los dedos de la mano como se muestra en la figura 29.

Figura 29

*Simulación flexión de la mano*



Agarre de objetos. - Para la simulación de agarre se realizó con dos esferas de 30 y 50 mm de diámetro, la misma que se utilizó en posición hacia abajo, hacia arriba y de forma vertical.

Figura 30

*Simulación de agarre de esfera*





#### 4. Método de manufactura aditiva FDM

La impresión 3d se lo realizó utilizando el software cura 10.0 y la impresora de marca Wanhao D12 de doble filamento utilizando los siguientes parámetros para la impresión de las piezas que componen la prótesis de la mano articulada derecha. Los parámetros que se refleja en la tabla 15, se tomaron de acuerdo a las especificaciones técnicas de la impresora y del material a utilizar.

**Tabla 15**

*Parámetros de impresión en 3d manufactura aditiva FDM*

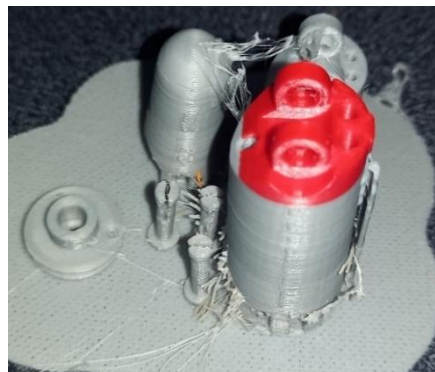
Aspecto	Parámetros
Tipo de material	PLA
Temperatura de la cama	60 °C
Temperatura del extructor	195 °C
Altura de la capa	0,1
Velocidad de avance	40 mm/s
Retracción	8mm
Calidad de relleno	40% - (Tipo de relleno: cuadrícula)

#### 4.1. Características generales aplicadas a las partes de la prótesis durante el proceso de impresión 3D.

Falanges. - Cada uno de las falanges de los dedos está impresa al 50% de relleno con filamento PLA de color gris, para darle mayor durabilidad al desgaste prematuro a causa del tensado del hilo nylon que pasa internamente en toda su longitud.

Figura 31

*Impresión en 3D de falanges de los dedos*



Palma de la mano. - La base de soporte de la mano se imprimió al 100% de relleno con filamento PLA de color gris con el propósito de que brinde mayor durabilidad y además porque es un elemento soporte de las falanges de los dedos, el servomotor de 3kgf y alojamientos de los elásticos para generar la presión de flexión y extensión de los dedos y las guías por donde pasara el hilo nylon que genera el movimiento de las articulaciones de los dedos.

Figura 32

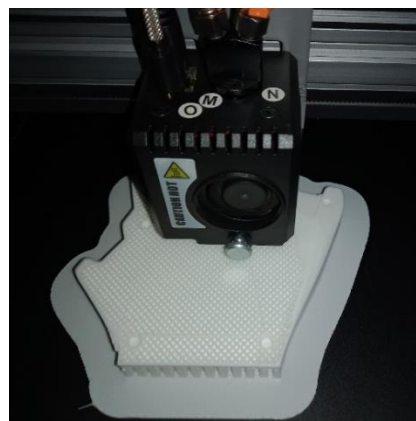
*Base de la palma de la mano*



Tapa de protección superior palma de la mano. - La tapa superior del soporte de la mano se imprime al 40% con filamento de color blanco para alivianar el peso de la prótesis a construir.

Figura 33

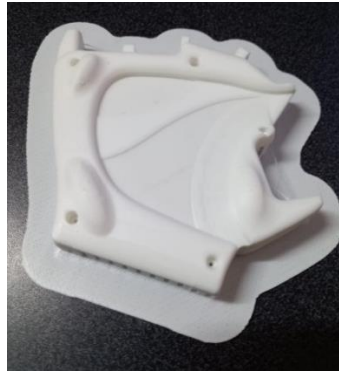
*Tapa de protección superior de la palma de la mano*



Tapa interna de la palma de la mano. - Está impresa al 40% de relleno con filamento PLA de color blanco, este elemento contribuirá a que genere estabilidad al momento de generar el movimiento de agarre.

Figura 34

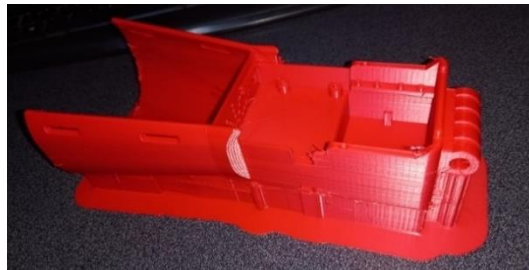
*Impresión en 3D tapa interna*



Antebrazo. - La base antebrazo está impresa al 40% para alivianar su peso, está diseñado con un espesor en el Cad de 4mm de relleno con filamento PLA de color rojo, con la finalidad de compensar el peso de la base con la de los servomotores, la Shield y la tarjeta nano, que irán instalados internamente en esta pieza.

Figura 35

*Antebrazo de la prótesis*



Tapas de protección. - Las tapas superiores de la base antebrazo está impresa al 40% de relleno con filamento PLA de color rojo, con una velocidad del 40mm/s y un espesor de diseño del Cad de 4mm. Además, contiene un soporte de la placa del sensor muscular EMG y de la placa del regulador del voltaje para los servomotores. (VER ANEXO 3)

Figura 36

*Tapa superior del antebrazo con alojamiento para sensor muscular EMG y regulador de voltaje*



## 5. Ensamblaje de los componentes de la prótesis de la mano derecha.

Una vez impreso todos los componentes que componen la mano articulada derecha la misma que consta de 14 piezas, se procede al ensamblado de los componentes. (VER ANEXO 4)

### Ensamble de dedos

Para iniciar con el proceso de ensamble de dedos se utiliza los siguientes materiales que se detalla a continuación:

**Tabla 16**

*Materiales utilizados para el ensamble de dedos*

Dedos	Cantidad	Elemento unión falanges	Cantidad	Elemento unión dedos base soporte mano
Pulgar	1		1	Perno galvanizado M4 de 34mm
Índice	2	Perno M3 impreso 3D de	1	Perno galvanizado M4 de 28mm
Medio	2	12mm	1	Perno galvanizado M4 de 50mm
Anular	2		1	
Meñique	2			

**Nota:** Para la unión de los dedos anular y meñique con la base de la palma de la mano se utilizó un solo perno galvanizado M4 de 50mm.

**Tabla 17**

*Materiales utilizados para generar el movimiento de la articulación*

Dedos	Elástico Ø 0,8mm	Hilo nylon Ø 0,7mm
Pulgar	20cm	18cm
Índice	28cm	14cm
Medio	28cm	26cm
Anular	27cm	25cm
Meñique	23cm	24cm

**Nota:** Para simular el movimiento de los dedos se utilizó como tendones el elástico y el hilo nylon.

Para la unión de las falanges de los dedos se usa un pasador impreso de diámetro de 3mm, y a la vez se pasa internamente por todas las articulaciones que conforman el dedo un elástico de diámetro de 0,7 mm dejándolos en sus extremos un excedente de 3cm aproximadamente y el hilo nylon de diámetro de 0,8mm dejándolo en su extremo con un excedente de 120mm aproximadamente, este hilo generará presión para generar el movimiento de flexión y extensión de la articulación.

Una vez ensamblado los componentes se aseguran y se tensa cada uno de los dedos con los elásticos y el hilo nylon comprobando uno a uno, simulando el movimiento articulado hasta que se regrese con facilidad a su posición inicial al generar una pequeña presión.

Figura 37

*Ensamble de la mano con antebrazo*



Para el acople de la palma de la mano con el antebrazo se utiliza un perno inoxidable M8 con de longitud 60 mm asegurándolo en su extremo con una tuerca.

Figura 38

*Ensamble de la mano con el antebrazo*



## 5.1. Instalación microelectrónica

Con las piezas de la prótesis armada en su totalidad se procede situar la parte electrónica, para lo cual se hará uso de los siguientes componentes:

**Tabla 18**

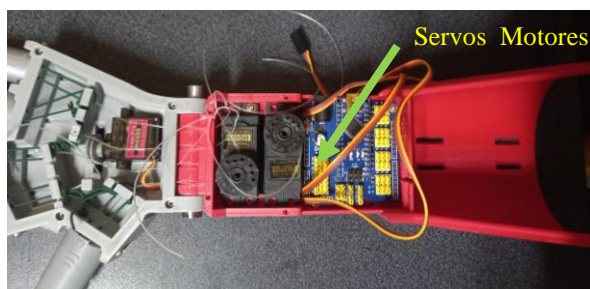
*Componentes electrónicos utilizados en el ensamble*

Cantidad	Materiales
1	Shield Nano V3.0
1	Arduino Nano V3.0 – ATMA 328P
1	Batería de Litio 11V
2	Servomotores de 11 kg.f
1	Servomotor de 3 kg.f

En este proceso se coloca el servomotor de 3kgf en el alojamiento de la base soporte de la mano y se enlaza con el hilo nylon del dedo índice. Posteriormente se instala los dos servomotores de 11kgf en los alojamientos correspondientes de la base antebrazo, el primer servo lo conecta con el dedo pulgar y el siguiente con los tres dedos faltantes (medio, anular y meñique). Posteriormente se instala el Shield Nano V3.0 y la placa Arduino nano v3 con atmega 328p asegurándole con tornillos M2,5.

Figura 39

*Instalación de servos motores*



### **Tapa superior del antebrazo**

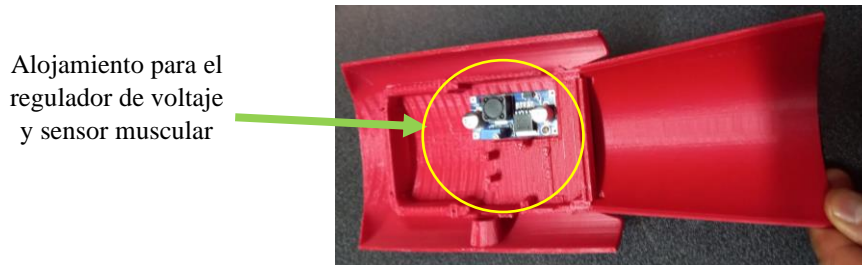
En la tapa superior del antebrazo se instala la tarjeta del regulador de voltaje para los servomotores y la tarjeta del sensor muscular EMG, se conecta el jack de los cables de los sensores con las conexiones electrónicas de acuerdo al diagrama (VER ANEXO 5) y se carga la programación para el control de los servomotores con el sensor muscular EMG generados



en el software Arduino (VER ANEXO 6), también se coloca la tapa superior del alojamiento de sujeción de la prótesis con el antebrazo derecho de la persona y se sujeta con tornillos M2,5 a la base antebrazo.

Figura 40

*Instalación de regulador de voltaje y sensor muscular*

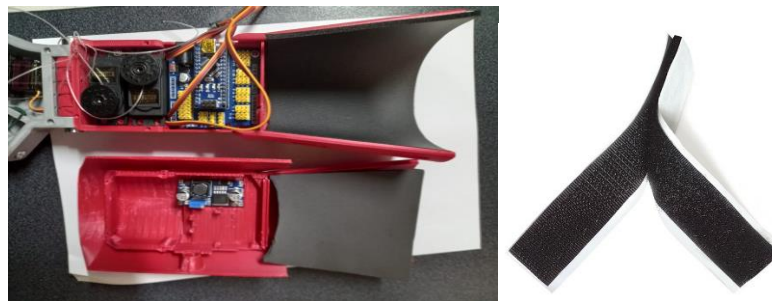


### **Colocación de accesorios para sujeción de la prótesis**

Como parte final del proceso de ensamblaje de la prótesis de mano se procede a ubicar los accesorios los mismos que están compuestos por las correas de sujeción (velcro) y el tapizado de la base donde se depositará el muñón.

Figura 41

*Colocación de accesorios de la prótesis*



### **5.1.1. Prototipo terminado**

Figura 42

*Prototipo ensamblado*



## 6. Resultados

En el proceso de contribución de los componentes de la prótesis por el método FMD se realizarlo las siguientes configuraciones de temperatura, velocidad de impresión, soportes y relleno, se obtuvo los pesos reales de las diferentes partes que conforman la prótesis, que se muestran en la Tabla 19.

**Tabla 19**

*Peso de las partes de la prótesis de la mano derecha*

N°	Partes de la prótesis	%	Peso teórico	Peso Real
		Relleno	(gr)	(gr)
1	Base antebrazo servo	40%	205,00	210,2
2	Base soporte mano	100%	300,00	324,6
3	Dedo pulgar	60%	24,00	25,6
4	Dedo índice	60%	20,00	22,3
5	Dedo medio	70%	32,00	34,1
6	Dedo anular	60%	39,00	33,0
7	Dedo meñique	40%	15,00	17,1
8	Tapa superior de la mano	40%	78,00	81,2
9	Tapa inferior palma de la mano	40%	65,00	62,5
10	Tapa superior base tarjeta antebrazo	40%	124,00	125,2
11	Tapa muñón antebrazo	40%	35,00	35,4
12	Tapa batería	40%	12,00	13,6
13	Tapa inferior antebrazo	20%	155,00	156,2
14	Pernos M3 y soporte sujeción servo	40%	8,00	9,1
		<b>Total</b>	1112,00	1150,1

**Nota:** Mediante el cálculo del peso de cada componente de la prótesis se determina que el peso real es de 1,15 kg lo que representa un peso razonable en función de las características de fabricación de la misma.

### Impresión de piezas en 3d

La impresión de las primeras falanges del prototipo se lo realizo al 40 % de relleno, resultando ser la parte más sensible y complicada al momento de imprimir y posterior al



ensamblaje porque las uniones de las falanges se rompieron en su totalidad, lo que obligó a cambiar los diámetros externo e interno.

Figura 43

Rotura de unión de falanges al momento de ensamble

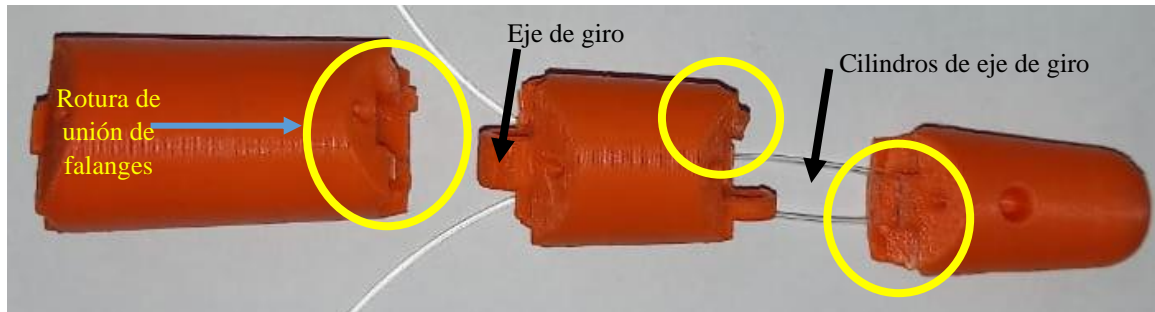


Tabla 20

Partes defectuosas de las uniones de las falanges

Dedos	Falange proximal		Falange media		Falange distal		Porcentaje defectuoso %
	Eje giro	Cilindro Eje giro	Eje giro	Cilindro Eje giro	Eje giro	Cilindro Eje giro	
Pulgar	0	0	-	-	1	0	25
Índice	1	0	1	0	1	0	50
Medio	0	0	0	1	0	0	17
Anular	0	1	0	1	0	0	33
Meñique	0	0	0	1	0	0	17

Nota: el número (1) representa que esa parte está en buen estado y el número (0) está en mal estado o roto.

### 6.1.Cambios en el diseño

Con el cambio realizado en los diámetros externos (de  $\varnothing = 6 \text{ mm}$  a  $\varnothing = 8 \text{ mm}$ ) e internos (de  $\varnothing = 3 \text{ mm}$  a  $\varnothing = 4,2 \text{ mm}$ ), se consiguió los resultados esperados, logrando una buena resistencia a la fractura durante el ensamblaje y el funcionamiento de estos alojamientos de las articulaciones. Las dimensiones de los diámetros de falanges rediseñadas impresas al 60% de relleno se refleja en la tabla 21.

**Tabla 21**

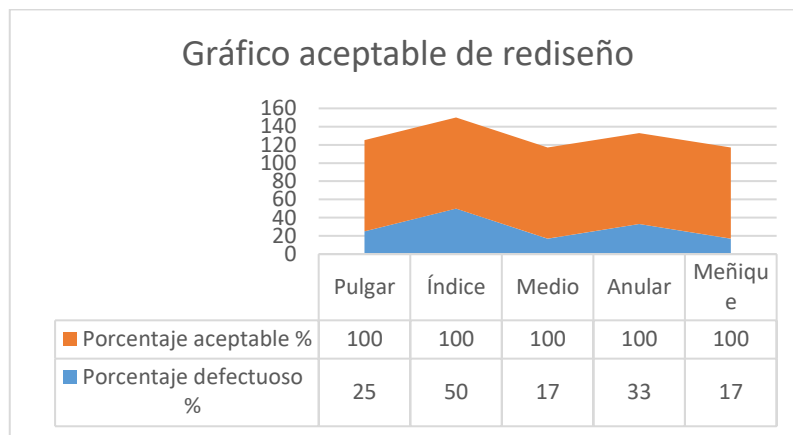
*Partes en buen estado de las uniones de las falanges.*

Dedos	Falange proximal		Falange media		Falange distal		Porcentaje aceptable %
	Eje giro	Cilindro	Eje giro	Cilindro	Eje giro	Cilindro	
	Eje giro		Eje giro		Eje giro		
Pulgar	1	1	-	-	1	1	100
Índice	1	1	1	1	1	1	100
Medio	1	1	1	1	1	1	100
Anular	1	1	1	1	1	1	100
Meñique	1	1	1	1	1	1	100

**Nota:** el número (1) representa que esa parte está en buen estado y el número 0 está en mal estado o roto.

**Figura 44**

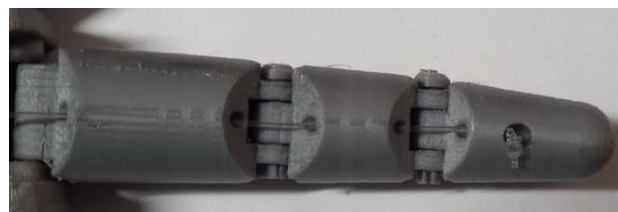
*Comparación de rendimiento del rediseño en las falanges de los dedos.*



Los nuevos parámetros utilizados para la impresión fueron eficientes debido a que se pudo obtener un producto consistente que no presentaba alteraciones en el PLA. La combinación de colores en la en la fabricación de partes y piezas de la prótesis dio un plus para generar un atractivo visual del prototipo.

**Figura 45**

*Ensamble con modificación de diámetro en la parte de unión de las falanges*



## 7. Costos del diseño

El proceso de diseño es la parte fundamental del proyecto porque de este depende obtener todas las partes y componentes que conforman la prótesis de mano articulada donde conlleva un tiempo representativo para determinar el costo de construcción de la prótesis. El valor del costo de fabricación de la prótesis de mano articulada se ha determinado en base al tiempo, equipos, materiales y suministros utilizados.

**Tabla 22**

*Costo de en base al tiempo empleado en el Diseño Cad*

<b>Partes de la prótesis</b>	<b>Tiempo utilizado (horas)</b>
Base antebrazo servo	10,00
Base soporte mano	7,50
Dedo Pulgar	3,90
Dedo Índice	4,20
Dedo Medio	5,30
Dedo Anular	4,00
Dedo Meñique	3,50
Tapa superior de la mano	5,40
Tapa inferior palma de la mano	3,20
Tapa superior base tarjeta antebrazo	6,20
Tapa muñón antebrazo	1,20
Tapa batería	0,30
Tapa inferior antebrazo	2,50
Elementos de sujeción	2,00
Simulación y pruebas	5,00
<b>Total</b>	<b>64,20</b>

Según el Ministerio de Trabajo en el Ecuador el Sueldo Básico Unificado (S.B.U.) es de 425 dólares lo que corresponde a 1,77 de dólar la hora – hombre:

**Fórmula:**

$$\text{Costo} = \text{Horas empleadas} \times \text{Costo hora - hombre}$$

$$\text{Costo} = 64,20 \text{ horas} \times 1,77 = \$ 113,63$$

## Tiempo real de impresión de las partes del prototipo

El tiempo utilizado para la fabricación aditiva de cada parte que compone la prótesis de la mano derecha mediante la impresión 3d realizada en una maquina Wanhao D12-300 se detalla en la siguiente tabla:

**Tabla 23**

*Tiempo de Impresión 3d y porcentaje (%) de Relleno*

N°	Partes de la prótesis	% Relleno	Tiempo impresión (horas)
1	Base antebrazo servo	40%	38:00
2	Base soporte mano	100%	22:00
3	Dedo Pulgar	60%	5: 50
4	Dedo Índice	60%	5:00
5	Dedo Medio	70%	7:00
6	Dedo Anular	60%	7: 50
7	Dedo Meñique	40%	4:00
8	Tapa superior de la mano	40%	13:00
9	Tapa inferior palma de la mano	40%	12:00
10	Tapa superior base tarjeta antebrazo	40%	22:00
11	Tapa muñón antebrazo	40%	7:50
12	Tapa batería	40%	1:50
13	Tapa inferior antebrazo	20%	13:00
14	Pernos M3 y soporte sujeción servo	40%	2:00
<b>Total</b>			<b>160:00</b>

**Nota:** El tiempo de impresión lo determina de acuerdo al porcentaje de relleno, a la velocidad de impresión, al espesor de la pared, dándonos un tiempo total de la impresión de 160 horas.

### 7.1. Determinación del costo de consumo de energía en impresión 3D

En Ecuador según El Directorio de la Agencia de Regulación y Control de Energía y Recursos Naturales No Renovables (ARCERNNR), la tarifa nacional promedio del servicio eléctrico es de 0,092 centavos de dólar por cada Kilovatio/hora, este valor referencial se utilizará para determinar el costo de consumo de energía utilizado para la impresión de las partes. Además, se tomó el dato la potencia de 350w de la impresora WANHAO, mediante el uso de la etiqueta técnica de la misma. (VER ANEXO 7), para lo cual se aplica la siguiente fórmula:

#### Fórmula:

$$\text{Energía} = \text{Potencia equipo} \times \text{horas de uso.}$$

$$\text{Energía} = 350\text{w} \times 160 \text{ horas} = 56000 \text{ wh} / 1000 = 56\text{Kwh}$$

**Tabla 24**

*Costo consumo energía en la impresión 3d*

Detalle	Consumo Kwh	Valor
Consumo Kwh	56	
Costo Kwh		\$ 0,09
<b>Costo total consumo de energía</b>		<b>\$ 5,15</b>

**Nota:** El costo real del Kw/h utilizado en la impresión 3D es de 5,15 el cual representa un valor razonable.

### 7.2. Determinación del costo de consumo de filamento PLA

El filamento utilizado para la impresión en 3D es el PLA el cual se adquirió de los siguientes colores: tomate, rojo, blanco y plomo, el color tomate fue utilizado para realizar pruebas iniciales de impresión debido a que era la primera vez que se estaba trabajando con este tipo de material.

**Tabla 25**

*Costo consumo de filamento en Kg*

Detalle	Cantidad (gr)	Valor
Consumo total filamento PLA en gramos	1112,00	
Consumo total filamento PLA en kg	1,11	
Precio de rollo 1kg filamento PLA		\$ 22,00
	<b>TOTAL</b>	<b>\$ 24,46</b>

### 7.3.Determinación del costo de Dispositivos Electrónicos

El accionamiento de la prótesis de mano mediante servomotores es un factor primordial para la realizar la función de agarre los mismos que fueron adquiridos en el mercado local, fueron seleccionados cuidadosamente para que cumplan con el objetivo deseado.

**Tabla 26**

*Costo de dispositivos electrónicos*

N°	Cantidad	Descripción	Costo
1	1	Shield V3.0 expansión para Arduino Nano	5,36
2	1	Arduino Nano V3.0 FT232 + cable	8,48
3	1	Kit sensor muscular EMG 3.3V AD8832	40,72
4	1	Regulador de voltaje DC-DC LM2596	2,52
5	1	Batería lipo turnigy 450mah 3S 60CW/XT30	16,79
6	1	Conector XT30 hembra	0,84
7	2	Servomotor MG995 - 12kg / 180°	18,76
8	1	Servomotor MG90S - 3,5kg / 180°	5,04
9	1	Pulsador on/off	0,54
		<b>Valor Total</b>	<b>110,93</b>

### 7.4.Determinación del costo de post procesamiento

El tiempo de post procesamiento es el que requerimos para realizar la limpieza de las partes de las prótesis impresas y retocar los excedentes de material para dar un mejor acabado final o aplicar pintura.

**Tabla 27**

*Tiempo de limpieza*

N°	Partes de la prótesis	Tiempo (min)
1	Base antebrazo servo	10:00
2	Base soporte mano	12:50
3	Dedo Pulgar	3: 30
4	Dedo Índice	3:50
5	Dedo Medio	3:20
6	Dedo Anular	3: 10
7	Dedo Meñique	3:00
8	Tapa superior de la mano	2:30

9	Tapa inferior palma de la mano	3:00
10	Tapa superior base tarjeta antebrazo	8:20
11	Tapa muñón antebrazo	2:50
12	Tapa batería	0:30
13	Tapa inferior antebrazo	4:00
14	Pernos M3 y soporte sujeción servo	3:10
		64 min

El tiempo total del post procesamiento es de 64 min que es igual 1,07 horas

El costo del post procesamiento = 1,07 horas x 1,66 \$ hora – hombre = 1,77 \$

**Depreciación de equipo.** - La impresora de marca Wanhao D12 fue adquirida para el desarrollo del proyecto en estudio por un valor de 450\$ incluido Iva, como es un equipo electrónico su depreciación es para 3 años.

**Fórmula:**

Depreciación equipo = Costo total del equipo / años de vida útil

Depreciación impresora 3d = 450 \$ / 3 años = 150 \$

**Otros Costos.** - Es costos generados por la adquisición de materiales indirectos para la construcción de la prótesis de la mano derecha.

**Tabla 28**

*Materiales indirectos*

Nº	Cantidad	Descripción	Costo
1	1 (u)	Perno M8 inoxidable x 3” + tuerca	3,36
2	1 (u)	Tornillo M4 galvanizado x 2 <sup>1/4</sup> ”	1,25
3	3 (u)	Tornillo M4 galvanizado x 1”	1,74
4	18 (u)	Tornillo M3 inoxidable x 6mm	4,48
5	18 (u)	Tornillo M2.5 inoxidable x 10mm	5,92
6	2 (m)	Elástico Ø 7mm	0,85
7	2 (m)	Hilo nylon Ø 8mm	0,65
8	1,5 (m)	Cinta velcro	1,50
<b>Valor Total</b>			<b>\$ 19,75</b>
<b>Costo Total incluido IVA</b>			<b>\$ 22,12</b>

## Costo total de fabricación (CF)

Es el gasto total que se empleó para producir un producto, donde se analiza desde las materias primas (MP), tiempo utilizado en la fabricación y el resultado final, para el cálculo se utilizará la siguiente fórmula:

$$CF = MD + MO + GGF.$$

### Tabla 29

#### *Resumen de costos y gastos*

<b>Materiales directos</b>		\$ 135,39
Costo de filamento	\$ 24,46	
Costos dispositivos electrónicos	\$ 110,93	
<b>Mano de obra directa</b>		\$ 115,4
Costo del diseño Cad	\$ 113,63	
Costo post procesamiento	\$ 1,77	
<b>Gastos generales</b>		\$ 177,27
Depreciación impresora 3d	\$ 150,00	
Costo consumo energía eléctrica	\$ 5,15	
Otros costos	\$ 22,12	
<b>Total costos</b>		\$ 428,06

---

El costo total de la construcción de la prótesis de la mano derecha utilizando la manufactura FMD es de 428 dólares con 6 centavos donde a continuación se realiza una comparación con otras prótesis existentes en el medio.

El costo de una prótesis de alto rendimiento existentes en el mundo que puede emular a la perfección como el tomado como referencia el I Limb, otros estudios realizados determinan un costo aproximadamente entre 20 y 60 mil dólares (Líderes, 2020). Esto representa valores inalcanzables para personas de escasos recursos que la remuneración básica es de \$ 425 dolares americanos.



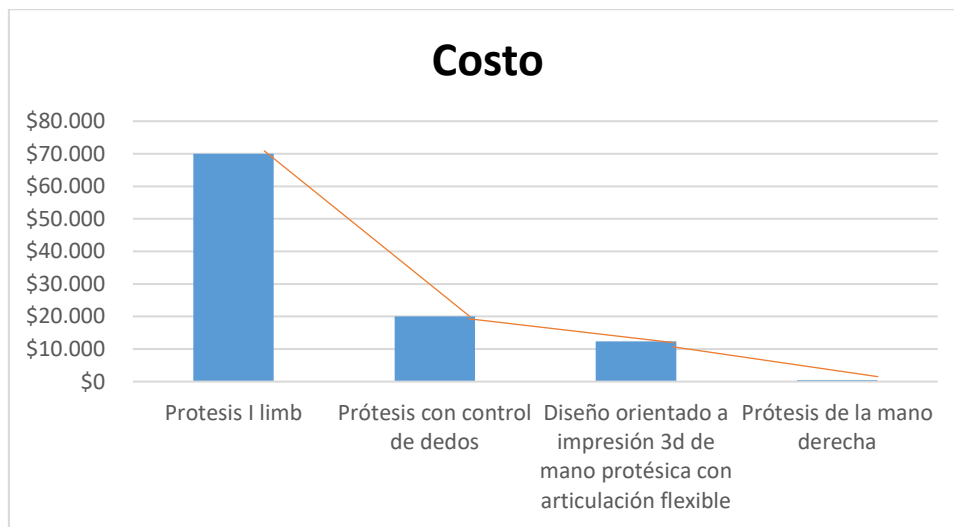
**Tabla 30**

*Precios y características de prótesis existentes en el mercado*

<b>Tipo de prótesis</b>	<b>Tiempo empleado</b>	<b>Movilidad</b>	<b>Costo</b>
Prótesis I limb	-	Agarre, flexión, extensión, sujeción y manipulación de objetos	\$70.000
Prótesis con control de dedos	-	Agarre, sujeción y manipulación de objetos	\$20.000
Diseño orientado a impresión 3d de mano protésica con articulación flexible	474 min.	Agarre, sujeción y manipulación de objetos	\$12.355,55
prótesis de mano derecha articulada con sensor muscular EMG impresa en 3D	225,27 min.	Agarre, sujeción de objetos	\$428,06

**Figura 46**

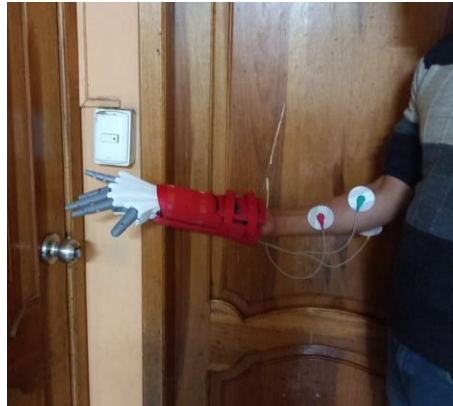
*Comparación costo de las prótesis*



Mediante el grafico se puede determinar que el prototipo diseñado en este proyecto es factible en relación a los existentes en el mercado debido a que representa un bajo costo adquisitivo de 428 dólares, este valor es promedio con el ingreso de un salario básico en nuestro país, además el tiempo de construcción de la misma es mucho más rápido, en la figura 47 podemos apreciar el prototipo final de la prótesis de la mano derecha.

Figura 47

*Prototipo de la prótesis*



## Protocolo de pruebas

### Pruebas sensoriales

Las pruebas sensoriales se realiza los movimientos de flexión y extensión, que consistió en utilizar un sensor muscular receptor señales del musculo por medio de electrodos que son procesadas por el software Arduino en un rango de 9600 baud, dando como resultado lo siguiente:

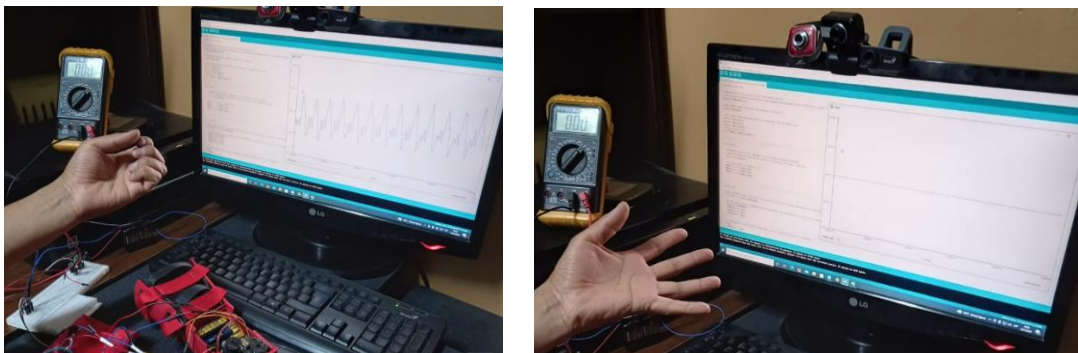
**Tabla 31**

*Flexión y extensión*

<b>Fuerza</b>	<b>Flexión (bits)</b>	<b>Extensión (bits)</b>
Baja	250	0
Media	380	0
Alta	820	0

Figura 48

*Prueba de flexión y extensión*



En las pruebas realizadas con el software se pudo determinar el rango para funcionen correctamente los servomotores, debe sobrepasar los 350 bits que representa a la fuerza media. Además, en la visualización de los datos micro sensoriales que al momento de la flexión la gráfica tiende a subir y cuando se realiza la acción de extensión la gráfica se mantiene constante (0 bits).

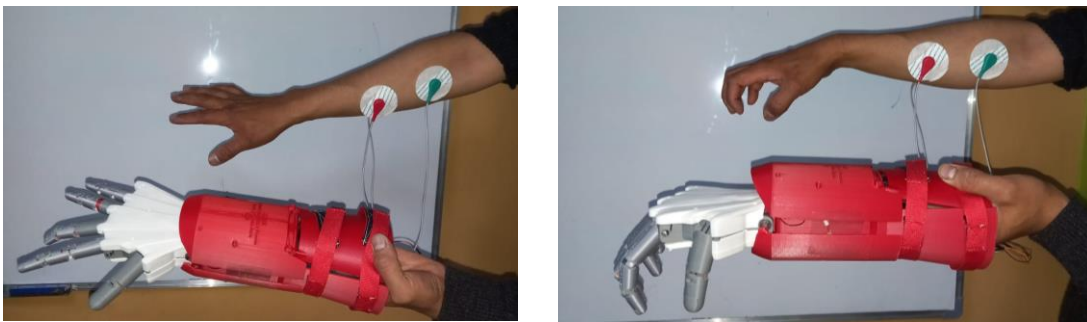
## Pruebas físicas

### Movimiento de la mano mediante el uso de electrodos

Este proceso se lleva a cabo mediante una prueba con el uso de los electrodos para determinar el funcionamiento correcto de la flexión y extensión de la mano y con ello comprobar su funcionalidad antes de proceder al agarre de los objetos, así como se puede apreciar en la figura 49.

Figura 49

*Movimiento de la mano mediante el uso de electrodos*



El protocolo de pruebas físicas contiene 5 pruebas de agarre en el cual se puede evidenciar en la tabla 32.

**Tabla 32**

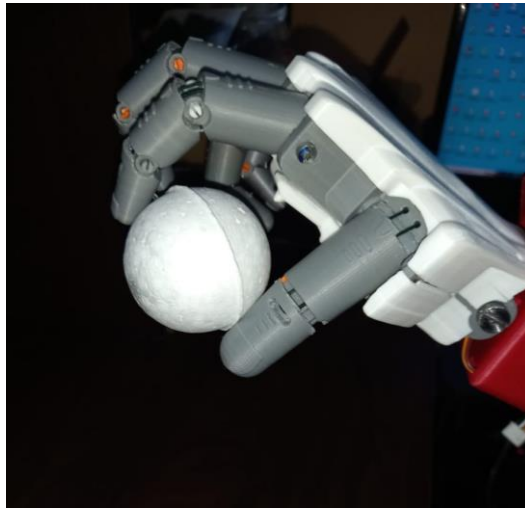
*Prueba de agarre*

	<b>Esfera Ø30mm</b>	<b>Esfera Ø50mm</b>	<b>Esfera Ø70mm</b>	<b>Flexómetro</b>	<b>Botella lisa</b>
Prueba 1	1	1	1	1	0
Prueba 2	1	1	0	1	0
Prueba 3	1	1	1	0	0
Prueba 4	1	1	0	1	1
Prueba 5	1	1	1	1	0
Promedio	1	1	0,6	0,8	0,2
Nº Efectivos	5	5	3	4	1

**Prueba esfera Ø30mm:** La prueba se realiza el agarre de una esfera de espuma Flex de 30mm de diámetro en el cual consistió realizar una repetición de cinco veces la misma actividad, dando un resultado positivo debido a que el prototipo pudo ejecutar correctamente la acción.

Figura 50

*Prueba de agarre de una esfera de Ø30mm*



**Prueba esfera ø50mm:** De igual forma se procede a experimentar el agarre con una esfera de espuma Flex de 50mm de diámetro con las mismas repeticiones y dio un resultado positivo el prototipo ejecuta correctamente la actividad.

Figura 51

*Prueba de agarre de una esfera de Ø50mm*



**Prueba esfera Ø70mm:** Al experimentar el agarre con una esfera de espuma Flex de 70mm de diámetro con las mismas repeticiones dando un resultado aceptable, porque dos agarres fallaron.

Figura 52

*Prueba de agarre de una esfera de Ø70mm*



**Prueba del agarre con un flexómetro:** se evidenció un resultado favorable, el agarre del objeto se dio con mayor precisión debido a la textura del mismo, solo presentó una falla de agarre.

Figura 53

*Prueba de agarre de un flexómetro*



**Botella Lisa:** Al realizar el agarre con una botella lisa, presentó dificultades se procedió hacer cuatro intentos de agarre, pero fueron fallidos, debido a la textura del objeto.

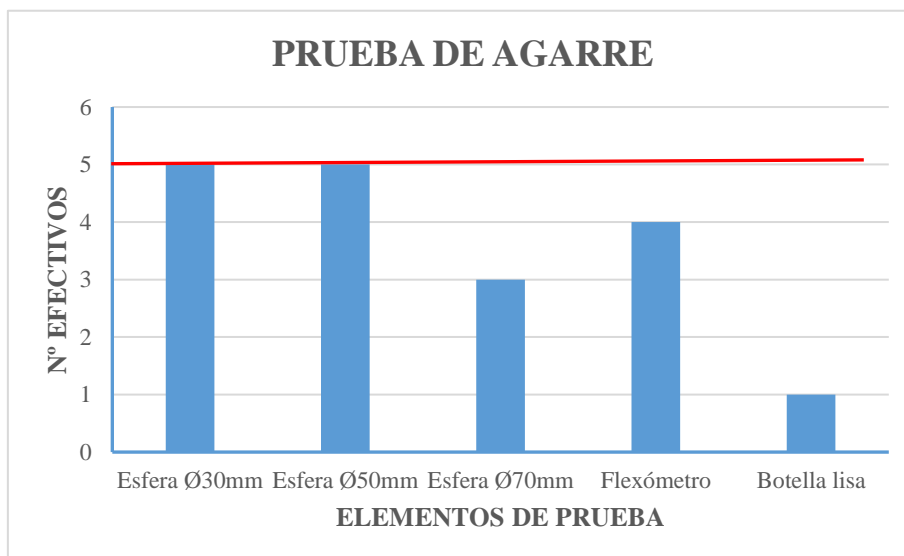
Figura 54

*Prueba de agarre de una botella lisa*



Figura 55

*Resultados de la prueba de agarre*



Las pruebas de agarre realizados con los tres objetos antes mencionados corroboran el funcionamiento de la prótesis de mano, a pesar que no dio el resultado esperado en algunas pruebas, se puede destacar que el prototipo sujeta objetos livianos y ligeramente pesados como es el caso de la prueba con el flexómetro, en donde se pudo determinar que hace falta incorporar en las partes internas de los dedos una especie de caucho con rugosidad para que se pueda sujetar objetos con textura lisa.

## **Discusión**

Esta investigación de construcción de una prótesis de mano articulada con sensores EMG tuvo como propósito el solventar una necesidad social que en nuestro medio es muy difícil adquirir con facilidad este tipo de prótesis, en vista de que la economía del país es muy inferior al de los países desarrollados.

De los resultados obtenidos en esta investigación, se puede deducir que el tipo de manufactura FMD aplicada para el desarrollo del proyecto es factible aplicarlo en nuestro País porque de acuerdo al análisis económico y el tiempo de fabricación empleado, refleja que es accesible para las personas de recursos limitados que en relación con el análisis realizado a otras investigaciones de similares a esta investigación se llegó a la conclusión que existe prótesis de alto costo y sofisticadas que simulan casi a exactitud todos los movimientos de las manos, como es el caso de los modelos de prótesis reflejadas en la tabla 27, que llegan a tener un costo superior a los 10 mil dólares, como es el estudio de la prótesis I Limb realizado por (Gutiérrez, y otros, 2017) en Inglaterra teniendo un costo de 70 mil dólares que lo cual resulta inaccesible para personas discapacitadas de bajos recursos económicos.

También se puede decir que esta tecnología aplicada es de bajo costo porque el proceso de manufactura aditiva nos ahorra tiempo y dinero con relación a la manufactura tradicional, los dispositivos electrónicos son de fácil iteración con los softwares libres que en la actualidad lo podemos encontrar en código abierto lo cual beneficia al usuario final, personalizando diseños y generando múltiples soluciones de acuerdo a las posibilidades socio-económicas, además se contribuye al desarrollo sostenible del uso adecuado de las tecnologías con materiales de bajo impacto ambiental como el que empleamos en este proyecto.

## Conclusiones:

- El diseño del prototipo se parte de un bosquejo del modelo que se desea construir, en el cual se aplicó los criterios y requisitos de diseño para la construcción de la prótesis de mano innovadora, ergonómica, de calidad y de bajo costo, la misma que mediante un estudio económico se determinó que el costo fabricación es de 428,06 dólares americanos y que es un valor relativamente bajo en relación a las prótesis existentes en el mercado.
- La utilización del software CAD permite una ilustración a detalle de los componentes de las prótesis, además se puede modelar con los colores del PLA con el que se quiere imprimir y generar una simulación de funcionamiento de la misma y valorar el comportamiento real de la mano, el relleno utilizado en su primera fase fue 20% el cual no dio los resultados esperados en las uniones de la falanges, se rompían con mucha facilidad, por lo cual en la segunda fase se procede a realizar un relleno al 60% y se realiza la simulación en el software SolidWorks y la resistencia de las uniones dieron un resultado positivo.
- La fabricación de la prótesis de mano articulada se ha realizado en base a medidas antropométricas similares a las dimensiones de la mano humana, además sus piezas pueden ser intercambiables si sufren algún desgaste o desperfecto, consta de cinco dedos independientes que cumplen la función de agarre de objetos. También se usó el método manufactura aditiva, porque permitió plasmar ideas innovadoras y obtener impresiones en 3D personalizadas que da soluciones inmediatas, que posteriormente se somete a pruebas de resistencia de materiales y de funcionalidad, en las cuales en este proyecto las primeras impresiones sufrieron roturas en las uniones de las falanges debido a que el diámetro de espesor era demasiado delgado para soportar la presión de los tornillos.
- La forma de operar de la prótesis es a través de mecanismos de cuerdas que se encuentran en conductos internos y permite la unión de las falanges que al accionar realizan la función de flexión y extensión de los dedos y además se ha incorporado un mecanismo electrónico de servomotores que genera el movimiento articulado de la mano.
- En las pruebas físicas realizadas con tres objetos de diferentes texturas se encontró varias dificultades, en las derivaciones de estas simulaciones se pudo evidenciar que



la prótesis no agarra objetos con texturas lisas debido a que la impresión de los dedos en material PLA es rígido y ligeramente llano. En cambio, los objetos con texturas que poseen hendiduras como es el caso del flexómetro si lo agarra porque posee un material de caucho con grietas en los costados lo cual permite una correcta manipulación.

## **Recomendaciones**

- Realizar un estudio de requisitos de diseño que permita mejorar o seguir innovando el esquema del prototipo, como por ejemplo incluir un sistema de ventilación interno para evitar recalentamiento en sus componentes electrónicos y proporcionarle mayor seguridad al usuario final.
- Realizar pruebas de resistencia de material de acuerdo al porcentaje de relleno que se va imprimir por lo menos en las dos primeras piezas de las falanges debido a que son los elementos más sensibles de la prótesis y con ello evitar tiempos de impresión innecesarios y gastos de material, en piezas que necesiten mayor resistencia el relleno debe ser alto, para tener una dureza media el tipo de relleno debe ser de rejilla o triángulos.
- Para este diseño se debe prolongar la base del dedo pulgar con una inclinación que sea perpendicular a la del dedo anular con el propósito de lograr un mejor agarre de objetos.

## Bibliografía

- (s.f.). Obtenido de <https://guiapolyclay.jimdofree.com/anatom%C3%ADa-art%C3%ADstica/>
- Acosta, E. (27 de 05 de 2021). *El metro*. Obtenido de <https://www.metroecuador.com.ec/ec/noticias/2021/05/27/cuanto-cuesta-la-hora-de-trabajo-en-ecuador.html>
- Alpiste, F., Torner, J., & Brigós, M. (2017). *Mano robótica controlada mediante visión y sensores biomecánicos*. Bilbao, España.
- Arce, G. C. (2005). *Prótesis de Miembros Superiores Mecánicas - Híbridas - Mioeléctricas*. Obtenido de <http://www.arcesw.com/pms1.htm>
- Autofabricantes. (11 de 12 de 2021). *Autofabricantes*. Recuperado el 01 de 08 de 2022, de <https://autofabricantes.org/investigacion/protesismecanicas/>
- Becerra, O. R., & Acosta, G. G. (2020). Estimación de medidas antropométricas de la mano para el diseño de guantes cosidos, a partir del método de relaciones de escala. *a DYNA*.
- Bordignon, F., Iglesias, A. A., & Hahn, Á. (2018). *Diseño e impresión de objetos en 3D*. Buenos Aires: UNIPE.
- Brito, J. L., Quinde, M. X., Cusco, D., & Calle, y. J. (s.f.). Estudio del estado del arte de las prótesis de mano. *Ingenius revista de ciencia y tecnología*. Recuperado el 07 de 07 de 2022, de <file:///C:/Users/Asus%202/Downloads/Dialnet-EstudioDelEstadoDelArteDeLasProtesisDeMano-5972783.pdf>
- C&D tecHNología. (2022). *Sensor de señal muscular de electromiografía EMG*. Obtenido de <https://cdtecnologia.net/sensores/2478-sensor-de-senal-muscular-de-electromiografia-emg.html>
- C.A.S., C. (9 de enero de 2013). Diseño mecánico y cosmético de una prótesis. *Revista Cubana de Investigaciones Biomédicas*, 25.
- CARVAJAL, L. (2011). Diseño de un Método para Capturar Señales Mioeléctricas de Miembros Superiores. 10. Recuperado el 18 de Mayo de 2013, de <http://uametodología.files.wordpress.com/2011/05/articulo-metodologia2.pdf>.
- Chejín, S. R. (28 de 07 de 2019). *Una prótesis te cambia la vida*. Obtenido de <https://gk.city/2019/07/28/protesis-ecuador-discapacidad/>
- Chingal, I. G., & López, C. A. (2017). *Prótesis subactuadas de manos humanas: una revisión* (Vol. 18). Colombia: Ingenium.
- CONADIS. (31 de enero de 2022). Estadísticas de discapacidad. *Personas con discapacidad resgistradas*. Obtenido de <https://www.consejodiscapacidades.gob.ec/estadisticas-de-discapacidad/>
- Consalud.es. (03 de 06 de 2017). *Salud Digital*. Obtenido de SuperGiz, la prótesis mecánica que devuelve la movilidad a los niños:

[https://www.consalud.es/saludigital/71/supergiz-la-protesis-mecanica-que-devuelve-la-movilidad-a-los-ninos\\_41582\\_102.html](https://www.consalud.es/saludigital/71/supergiz-la-protesis-mecanica-que-devuelve-la-movilidad-a-los-ninos_41582_102.html)

- Contreras, L. (09 de 06 de 2019). *El filamento de ABS en la impresión 3D*. Obtenido de <https://www.3dnatives.com/es/filamento-de-abs-impresion-3d-06062019/>
- Dimitris Rodríguez Ramirez, C. E., Torres, S. A., & Rueda, M. Á. (2020). La mano. Aspectos anatómicos I. Generalidades, osteología y artrología. *Morfología*, 14-29.
- El Universo. (28 de 08 de 2022). *Diario el Universo*. Obtenido de <https://www.eluniverso.com/guayaquil/comunidad/protesis-mioelectricas-se-entregaran-gratuitamente-a-20-personas-hasta-finales-del-2022-victor-uno-de-los-beneficiados-espera-tener-mas-facilidades-con-el-dispositivo-nota/>
- Flintrehab. (2020). *37 ejercicios de terapia ocupacional para manos que mejoran la fuerza y la destreza*. Recuperado el 21 de 04 de 2022, de <https://www.flintrehab.com/es/ejercicios-de-terapia-ocupacional-para-mano/>
- Fuentes, T. E., Beltrán, J. H., & Hernández, D. A. (2014). Manejo inicial de las lesiones de punta de dedo: guía de tratamiento basado en la experiencia en el Hospital San José. *Investigación original*, 356.
- Galli, K., & Pelozo, S. (2017). *Órtesis y prótesis*. Recuperado el 20 de 04 de 2022, de <https://auditoriamedicahoy.com.ar/biblioteca/Karina%20Galli%20Sabrina%20Peloso%20Ortesis%20y%20pr%C3%B3tesis.pdf>
- García, A. A., López, N. E., Villela, V. J., & Medina, E. P. (19 al 21 de Septiembre de 2018). Aplicación del análisis de señales EMGS para el control de una prótesis de mano. *Memorias del xxiv congreso internacional anual de la somim*, 2. Obtenido de [http://somim.org.mx/memorias/memorias2018/articulos/A1\\_152.pdf](http://somim.org.mx/memorias/memorias2018/articulos/A1_152.pdf)
- García, N. J., & Betancourt, J. C. (2020). *SISTEMA ELECTRÓNICO PARA LA REALIZACIÓN DE funciones básicas de la mano humana en prótesis de bajo costo para miembro superior*. Barranquilla, colombia.
- GIL, I. G. (2017). *LA IMPRESIÓN 3D y sus alcances en la arquitectura*. Madrid.
- Guaricela, L. J., Abril, X. M., & Patiño, D. J. (2013). *Diseño, construcción e implementación de una prótesis biomecánica de mano derecha*. Cuenca.
- Gutiérrez, M. J., Calderón, P. I., C, P. R., A., P. H., M., M. M., & S, M. R. (2017). De una mano mecánica impresa en 3d a una prótesis mioeléctrica a bajo costo (parte i: interfaz emg). *Revista Colombiana de Tecnologías de Avanzada*, 64.
- INEC. (2020). *Anuario de Estadísticas Hospitalarias Camas y Egresos 2020*. Obtenido de Tabulados\_series\_ECEH\_2020.xlsx: <https://www.ecuadorencifras.gob.ec/anuario-de-camas-y-egresos-hospitalarios/>
- Konrad, P. (2017). *El ABC de la EMG*. Carolina del Norte, USA: Naraxon.
- Laverde, S. (01 de 2015). *Colombia avanza en el desarrollo de prótesis mioeléctricas*. Obtenido de <https://www.elhospital.com/temas/Colombia-avanza-en-el-desarrollo-de-protesis-mioelectricas+102438>

- LeBlanc, M. (2008). *"Give Hope - Give a Hand" - The LN-4 Prosthetic Hand*. Obtenido de [file:///C:/Users/Asus/Downloads/dokumen.tips\\_maurice-leblanc-msme-cp-give-hope-give-a-hand-the-leblanc-msme-cp-give.pdf](file:///C:/Users/Asus/Downloads/dokumen.tips_maurice-leblanc-msme-cp-give-hope-give-a-hand-the-leblanc-msme-cp-give.pdf)
- Líderes. (06 de 06 de 2020). *Prótesis robótica local de bajo costo*. Obtenido de <https://www.revistalideres.ec/lideres/protesis-robotica-costo-universidad-chimborazo.html>
- Loaiza, J. L., & Arzola, N. (2011). *Evolución y tendencias en el desarrollo de prótesis de mano*. Medellín: Dyna.
- Lombraña, J. V. (2021). *Anatomía quirúrgica de la mano*. Sevilla, España: Punto Rojo. Obtenido de Atlas Ilustrado.
- López, F. (2017). *Bobinas y filamentos para impresión en 3D*. Obtenido de <https://inkintaytoner.es/blog/bobinas-filamentos-abs-pla-impresoras-3d/>
- Lorenzo, J. (10 de 07 de 2020). *Qué es y cómo imprimirlo. Mi filamento favorito*. Obtenido de <https://of3lia.com/guia-filamento-pla-impresion-3d/>
- Luque, J. S. (2019). *Integración de sensor EMG para control de electroestimulación*. Sevilla: Escuela Técnica Superior de Ingeniería.
- Machain, H. (2018). Prótesis mecánicas. *Revista Argentina de Cardiología*, 170.
- Medina, L. A. (2017). *Fabricación y caracterización de filamentos para impresora 3d a partir de materiales reciclados*.
- Moles, J. A. (2018). *Diseño conceptual de una prótesis de mano*. Barcelona, España.
- Montero, J. S., Florentini, D. M., Gavancho, D. J., Carrión, E. R., Calderón, L. C., & Quispe, M. W. (2018). Avances tecnológicos en desarrollo de prótesis inteligentes. Revisión de la Literatura. *Revista Médica Carriónica*, 6.
- Moreno, J. L. (12 de 04 de 2018). *Metacarpo*. Obtenido de <https://twitter.com/jlmgarvayo/status/984352676979924992/photo/2>
- Orozco, A. M. (2018). Análisis descriptivo de accidentes de trabajo que causan incapacidad permanente en la provincia del Guayas en el periodo 2018. *JHA*, 20.
- Palacios, A. V., Cruz, D. L., Luna, J. F., & Villalba, A. L. (2019). *Diseño y Construcción de una Prótesis de Mano Controlada por Medio de un Sensor Mioeléctrico*. Juárez, Mx: ISBN.
- PENALVA, J. (18 de 03 de 2018). *13 proyectos asombrosos con Arduino para ponerte a prueba y pasar un gran rato*. Obtenido de <https://www.xataka.com/makers/13-proyectos-asombrosos-con-arduino-para-ponerte-a-prueba-y-pasar-un-gran-rato>
- Pierce-Smith, D. (2020). Anatomía de la mano. *UC San Diego Health*, <https://myhealth.ucsd.edu/Spanish/RelatedItems/85,P04195>.
- Rainer Christoph, R. M. (Junio de 2016). Manufactura Aditiva. *Realidad Reflexión*, 4. Obtenido de

<http://www.redicces.org.sv/jspui/bitstream/10972/2873/1/Manufactura%20aditiva.pdf>

- REES52. (2021). *Sensor De Electromiografía (EMG) Para Aplicaciones Biométricas/Médicas De Plataforma De Salud*. Obtenido de <https://rees52.com/arduino-sensors/4407-electromyography-sensor-emg-for-e-health-platform-biometric-medical-applications-rs2334>
- Rios, O. A. (2017). *Diseño y construcción de un prototipo robótico de mano y antebrazo diestro para prótesis*. Quito.
- Rodríguez, V. A., & Saldaña, J. J. (2018). Prótesis en impresiones 3D de bajo costo “Hand To Hand”. 53.
- Sánchez, E. J., Jiménez, L. E., Meneses, A. A., & Franco, R. A. (2018). Diseño, construcción e implementación de una prótesis de mano mecánica. *Revista de Ingeniería Biomédica y Biotecnología*, 12.
- Tierra, M. A. (2017). *Desarrollo de una prótesis mioeléctrica de brazo de bajo costo, para un niño de un año de edad con el defecto congénito de brida amniótica*. Riobamba, Ecuador.
- Vargas, O., & Flor, O. (2019). *Diseño de un prototipo robótico de mano y antebrazo diestro para prótesis*. Quito.
- Vizueta, M. S., & Criollo, J. K. (2021). *Protesis impresa en 3D y aplicativo movil de geolocalizacion*. Guayaquil, Ecuador.
- WEIR, F. F. (2004). *Desing of artificial armas and handas for prothetic applications*. Chicago, Illinois, Estados Unidos: McGraw-Hill. Recuperado el 10 de mayo de 2013
- Wilfredor. (04 de 06 de 2008). *Diseción profunda palmar de mano y muñeca.svg*. Obtenido de [https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Wrist\\_and\\_hand\\_deeper\\_palmar\\_dissection-es.svg](https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Wrist_and_hand_deeper_palmar_dissection-es.svg)

Anexo 1

Despiece con las partes de la prótesis de la mano derecha articulada con sensor EMG.

N.º DE ELEMENTO	N.º DE PIEZA	CANTIDAD
1	Base servo - tarjeta - mano	1
2	Base soporte de dedos Palma Mano	1
3	Dedo pulgar	1
4	Dedo indice	1
5	Dedo medio	1
6	Dedo anular	1
7	Dedo meñique	1
8	Base tapa de placa y antebrazo	1
9	Base superior mano	1
10	Tapa Palma de mano	1
11	Tapa inferior - batería antebrazo	1
12	Tapa superior del antebrazo	1
13	Tapa de batería	1
14	Perno M3	9

IIIUNO

**Prótesis de mano derecha articulada con sensor EMG**

A4

PESO: 1.11 kg      ESCALA: 1:3      HOJA 1 DE 1

## Anexo 2

### Programación en el software Colab.

#### 1. Calculo simbolico de cinemática directa del Dedo Medio

```
import sympy as sp #Biblioteca cálculo simbólico

def sTdh(d, th, a, alpha):
    cth = sp.cos(th);
    sth = sp.sin(th);
    ca = sp.cos(alpha);
    sa = sp.sin(alpha);
    Tdh = sp.Matrix([
        [cth, -ca*sth, sa*sth, a*cth],
        [sth, ca*cth, -sa*cth, a*sth],
        [0, sa, ca, d],
        [0, 0, 0, 1]])
    return Tdh
```

#### Matriz de transformación homogénea

```
q1, q2, q3 = sp.symbols("q1 q2 q3")
l1, l2, l3 = sp.symbols("l1 l2 l3")
T01 = sTdh(0, sp.pi/12+q1, l1, 0)
T12 = sTdh(0, sp.pi/4+q2, l2, 0)
T23 = sTdh(0, sp.pi/6+q3, l3, 0)

print("T01:"); display(T01)
print("T12:"); display(T12)
print("T23:"); display(T23)
```

$$T_{01}: \begin{bmatrix} \cos\left(q_1 + \frac{\pi}{12}\right) & -\sin\left(q_1 + \frac{\pi}{12}\right) & 0 & l_1 \cos\left(q_1 + \frac{\pi}{12}\right) \\ \sin\left(q_1 + \frac{\pi}{12}\right) & \cos\left(q_1 + \frac{\pi}{12}\right) & 0 & l_1 \sin\left(q_1 + \frac{\pi}{12}\right) \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$
$$T_{12}: \begin{bmatrix} \cos\left(q_2 + \frac{\pi}{4}\right) & -\sin\left(q_2 + \frac{\pi}{4}\right) & 0 & l_2 \cos\left(q_2 + \frac{\pi}{4}\right) \\ \sin\left(q_2 + \frac{\pi}{4}\right) & \cos\left(q_2 + \frac{\pi}{4}\right) & 0 & l_2 \sin\left(q_2 + \frac{\pi}{4}\right) \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$
$$T_{23}: \begin{bmatrix} \cos\left(q_3 + \frac{\pi}{6}\right) & -\sin\left(q_3 + \frac{\pi}{6}\right) & 0 & l_3 \cos\left(q_3 + \frac{\pi}{6}\right) \\ \sin\left(q_3 + \frac{\pi}{6}\right) & \cos\left(q_3 + \frac{\pi}{6}\right) & 0 & l_3 \sin\left(q_3 + \frac{\pi}{6}\right) \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

#### Matriz de transformación homogénea final

```
[3] Tf = sp.simplify(T01*T12*T23)
print("Transformación final T04:"); display(Tf)
```

Transformación final T04:

$$\begin{bmatrix} \left(-\sin\left(q_1 + \frac{\pi}{12}\right) \sin\left(q_2 + \frac{\pi}{4}\right) + \cos\left(q_1 + \frac{\pi}{12}\right) \cos\left(q_2 + \frac{\pi}{4}\right)\right) \cos\left(q_3 + \frac{\pi}{6}\right) + \left(-\sin\left(q_1 + \frac{\pi}{12}\right) \cos\left(q_2 + \frac{\pi}{4}\right) - \sin\left(q_2 + \frac{\pi}{4}\right) \cos\left(q_1 + \frac{\pi}{12}\right)\right) \sin\left(q_3 + \frac{\pi}{6}\right) & \dots \\ \left(-\sin\left(q_1 + \frac{\pi}{12}\right) \sin\left(q_2 + \frac{\pi}{4}\right) + \cos\left(q_1 + \frac{\pi}{12}\right) \cos\left(q_2 + \frac{\pi}{4}\right)\right) \sin\left(q_3 + \frac{\pi}{6}\right) + \left(\sin\left(q_1 + \frac{\pi}{12}\right) \cos\left(q_2 + \frac{\pi}{4}\right) + \sin\left(q_2 + \frac{\pi}{4}\right) \cos\left(q_1 + \frac{\pi}{12}\right)\right) \cos\left(q_3 + \frac{\pi}{6}\right) & \dots \\ 0 & \dots \\ 0 & \dots \end{bmatrix}$$



$$\begin{pmatrix} q_3 + \frac{\pi}{6} & -\left(-\sin\left(q_1 + \frac{\pi}{12}\right)\sin\left(q_2 + \frac{\pi}{4}\right) + \cos\left(q_1 + \frac{\pi}{12}\right)\cos\left(q_2 + \frac{\pi}{4}\right)\right)\sin\left(q_3 + \frac{\pi}{6}\right) + \left(-\sin\left(q_1 + \frac{\pi}{12}\right)\cos\left(q_2 + \frac{\pi}{4}\right) - \sin\left(q_2 + \frac{\pi}{4}\right)\cos\left(q_1 + \frac{\pi}{12}\right)\right)\cos\left(q_3 + \frac{\pi}{6}\right) & 0 \\ q_3 + \frac{\pi}{6} & \left(-\sin\left(q_1 + \frac{\pi}{12}\right)\sin\left(q_2 + \frac{\pi}{4}\right) + \cos\left(q_1 + \frac{\pi}{12}\right)\cos\left(q_2 + \frac{\pi}{4}\right)\right)\cos\left(q_3 + \frac{\pi}{6}\right) - \left(\sin\left(q_1 + \frac{\pi}{12}\right)\cos\left(q_2 + \frac{\pi}{4}\right) + \sin\left(q_2 + \frac{\pi}{4}\right)\cos\left(q_1 + \frac{\pi}{12}\right)\right)\sin\left(q_3 + \frac{\pi}{6}\right) & 0 \\ & 0 & 1 \\ & 0 & 0 \end{pmatrix}$$

$$\left. \begin{array}{l} l_1 \cos\left(q_1 + \frac{\pi}{12}\right) - l_2 \sin\left(q_1 + \frac{\pi}{12}\right)\sin\left(q_2 + \frac{\pi}{4}\right) + l_2 \cos\left(q_1 + \frac{\pi}{12}\right)\cos\left(q_2 + \frac{\pi}{4}\right) + l_3 \left(-\sin\left(q_1 + \frac{\pi}{12}\right)\sin\left(q_2 + \frac{\pi}{4}\right) + \cos\left(q_1 + \frac{\pi}{12}\right)\cos\left(q_2 + \frac{\pi}{4}\right)\right)\cos\left(q_3 + \frac{\pi}{6}\right) + l_3 \left(-\sin\left(q_1 + \frac{\pi}{12}\right)\cos\left(q_2 + \frac{\pi}{4}\right) - \sin\left(q_2 + \frac{\pi}{4}\right)\cos\left(q_1 + \frac{\pi}{12}\right)\right)\sin\left(q_3 + \frac{\pi}{6}\right) \\ l_1 \sin\left(q_1 + \frac{\pi}{12}\right) + l_2 \sin\left(q_1 + \frac{\pi}{12}\right)\cos\left(q_2 + \frac{\pi}{4}\right) + l_2 \sin\left(q_2 + \frac{\pi}{4}\right)\cos\left(q_1 + \frac{\pi}{12}\right) + l_3 \left(-\sin\left(q_1 + \frac{\pi}{12}\right)\sin\left(q_2 + \frac{\pi}{4}\right) + \cos\left(q_1 + \frac{\pi}{12}\right)\cos\left(q_2 + \frac{\pi}{4}\right)\right)\sin\left(q_3 + \frac{\pi}{6}\right) + l_3 \left(\sin\left(q_1 + \frac{\pi}{12}\right)\cos\left(q_2 + \frac{\pi}{4}\right) + \sin\left(q_2 + \frac{\pi}{4}\right)\cos\left(q_1 + \frac{\pi}{12}\right)\right)\cos\left(q_3 + \frac{\pi}{6}\right) \end{array} \right\} \begin{matrix} 0 \\ 1 \end{matrix}$$

```
print("Matriz Transformación Homogenea final cuando q1=q2=q3=0:")
Tf.subs([(q1,0), (q2,0), (q3,0)])
```

Matriz Transformación Homogenea final cuando q1=q2=q3=0:

$$\begin{bmatrix} -\frac{\sqrt{2}\left(\frac{\sqrt{2}}{4} + \frac{\sqrt{6}}{4}\right)}{4} - \frac{\sqrt{2}\left(-\frac{\sqrt{2}}{4} + \frac{\sqrt{6}}{4}\right)}{4} + \frac{\sqrt{3}\left(-\frac{\sqrt{2}\left(-\frac{\sqrt{2}}{4} + \frac{\sqrt{6}}{4}\right)}{2} + \frac{\sqrt{2}\left(\frac{\sqrt{2}}{4} + \frac{\sqrt{6}}{4}\right)}{2}\right)}{2} & \frac{\sqrt{3}\left(-\frac{\sqrt{2}\left(\frac{\sqrt{2}}{4} + \frac{\sqrt{6}}{4}\right)}{2} - \frac{\sqrt{2}\left(-\frac{\sqrt{2}}{4} + \frac{\sqrt{6}}{4}\right)}{2}\right)}{2} & -\frac{\sqrt{2}\left(\frac{\sqrt{2}}{4} + \frac{\sqrt{6}}{4}\right)}{4} + \frac{\sqrt{2}\left(-\frac{\sqrt{2}}{4} + \frac{\sqrt{6}}{4}\right)}{4} & 0 \\ -\frac{\sqrt{2}\left(-\frac{\sqrt{2}}{4} + \frac{\sqrt{6}}{4}\right)}{4} + \frac{\sqrt{2}\left(\frac{\sqrt{2}}{4} + \frac{\sqrt{6}}{4}\right)}{4} + \frac{\sqrt{3}\left(\frac{\sqrt{2}\left(-\frac{\sqrt{2}}{4} + \frac{\sqrt{6}}{4}\right)}{2} + \frac{\sqrt{2}\left(\frac{\sqrt{2}}{4} + \frac{\sqrt{6}}{4}\right)}{2}\right)}{2} & -\frac{\sqrt{2}\left(\frac{\sqrt{2}}{4} + \frac{\sqrt{6}}{4}\right)}{4} - \frac{\sqrt{2}\left(-\frac{\sqrt{2}}{4} + \frac{\sqrt{6}}{4}\right)}{4} + \frac{\sqrt{3}\left(-\frac{\sqrt{2}\left(-\frac{\sqrt{2}}{4} + \frac{\sqrt{6}}{4}\right)}{2} + \frac{\sqrt{2}\left(\frac{\sqrt{2}}{4} + \frac{\sqrt{6}}{4}\right)}{2}\right)}{2} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}$$

$$\left. \begin{array}{l} l_1 \left(\frac{\sqrt{2}}{4} + \frac{\sqrt{6}}{4}\right) - \frac{\sqrt{2}l_2\left(-\frac{\sqrt{2}}{4} + \frac{\sqrt{6}}{4}\right)}{2} + \frac{\sqrt{2}l_2\left(\frac{\sqrt{2}}{4} + \frac{\sqrt{6}}{4}\right)}{2} + \frac{l_3\left(-\frac{\sqrt{2}\left(\frac{\sqrt{2}}{4} + \frac{\sqrt{6}}{4}\right)}{2} - \frac{\sqrt{2}\left(-\frac{\sqrt{2}}{4} + \frac{\sqrt{6}}{4}\right)}{2}\right)}{2} + \frac{\sqrt{3}l_3\left(-\frac{\sqrt{2}\left(-\frac{\sqrt{2}}{4} + \frac{\sqrt{6}}{4}\right)}{2} + \frac{\sqrt{2}\left(\frac{\sqrt{2}}{4} + \frac{\sqrt{6}}{4}\right)}{2}\right)}{2} \\ l_1 \left(-\frac{\sqrt{2}}{4} + \frac{\sqrt{6}}{4}\right) + \frac{\sqrt{2}l_2\left(-\frac{\sqrt{2}}{4} + \frac{\sqrt{6}}{4}\right)}{2} + \frac{\sqrt{2}l_2\left(\frac{\sqrt{2}}{4} + \frac{\sqrt{6}}{4}\right)}{2} + \frac{l_3\left(-\frac{\sqrt{2}\left(-\frac{\sqrt{2}}{4} + \frac{\sqrt{6}}{4}\right)}{2} + \frac{\sqrt{2}\left(\frac{\sqrt{2}}{4} + \frac{\sqrt{6}}{4}\right)}{2}\right)}{2} + \frac{\sqrt{3}l_3\left(\frac{\sqrt{2}\left(-\frac{\sqrt{2}}{4} + \frac{\sqrt{6}}{4}\right)}{2} + \frac{\sqrt{2}\left(\frac{\sqrt{2}}{4} + \frac{\sqrt{6}}{4}\right)}{2}\right)}{2} \end{array} \right\} \begin{matrix} 0 \\ 1 \end{matrix}$$

## 2. Cálculo numérico de Cinemática Directa del Dedo Medio

```
[26] import numpy as np

def Tdh(d, th, a, alpha):
    cth = np.cos(th);   sth = np.sin(th);
    ca = np.cos(alpha); sa = np.sin(alpha);
    Tdh = np.array([[cth, -ca*sth, sa*sth, a*cth],
                   [sth, ca*cth, -sa*cth, a*sth],
                   [0,   sa,   ca,   d ],
                   [0,   0,   0,   1]])

    return Tdh
```

```
[27] def cdirecta_rrr(q, l1, l2, l3):

    T01 = Tdh(0, np.pi/12+q[0], l1, 0)
    T12 = Tdh(0, np.pi/4+q[1], l2, 0)
    T23 = Tdh(0, np.pi/6+q[2], l3, 0)

    Tf = T01.dot(T12).dot(T23)

    return Tf
```

```
l1 = 0.036
l2 = 0.027
l3 = 0.030

q = [np.deg2rad(0), np.deg2rad(0), np.deg2rad(0)]

Te = cdirecta_rrr(q, l1, l2, l3)

print("Matriz Transformación Homogenea Final Numérica")
print(np.round(Te,2))
```

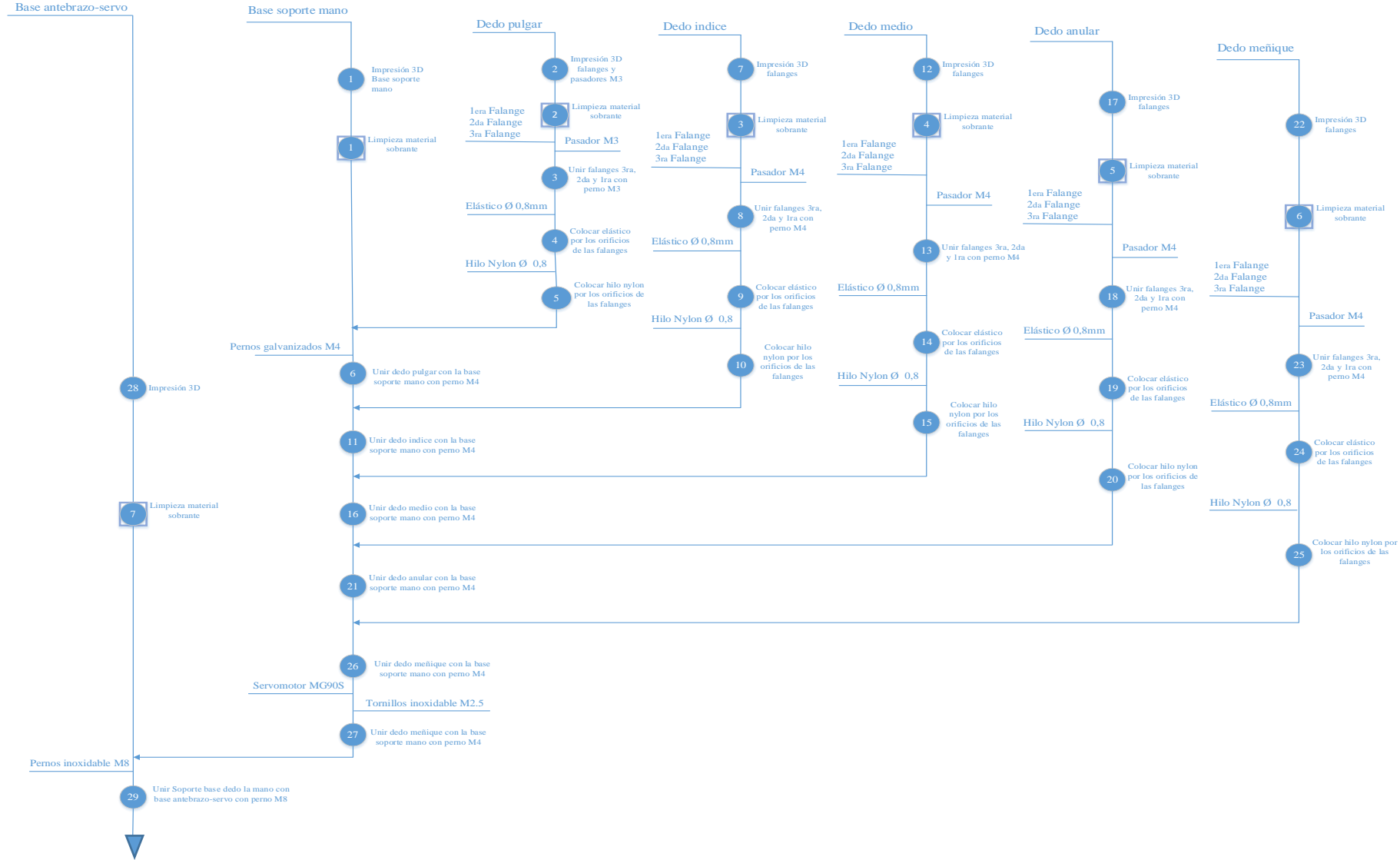
Matriz Transformación Homogenea Final Numérica

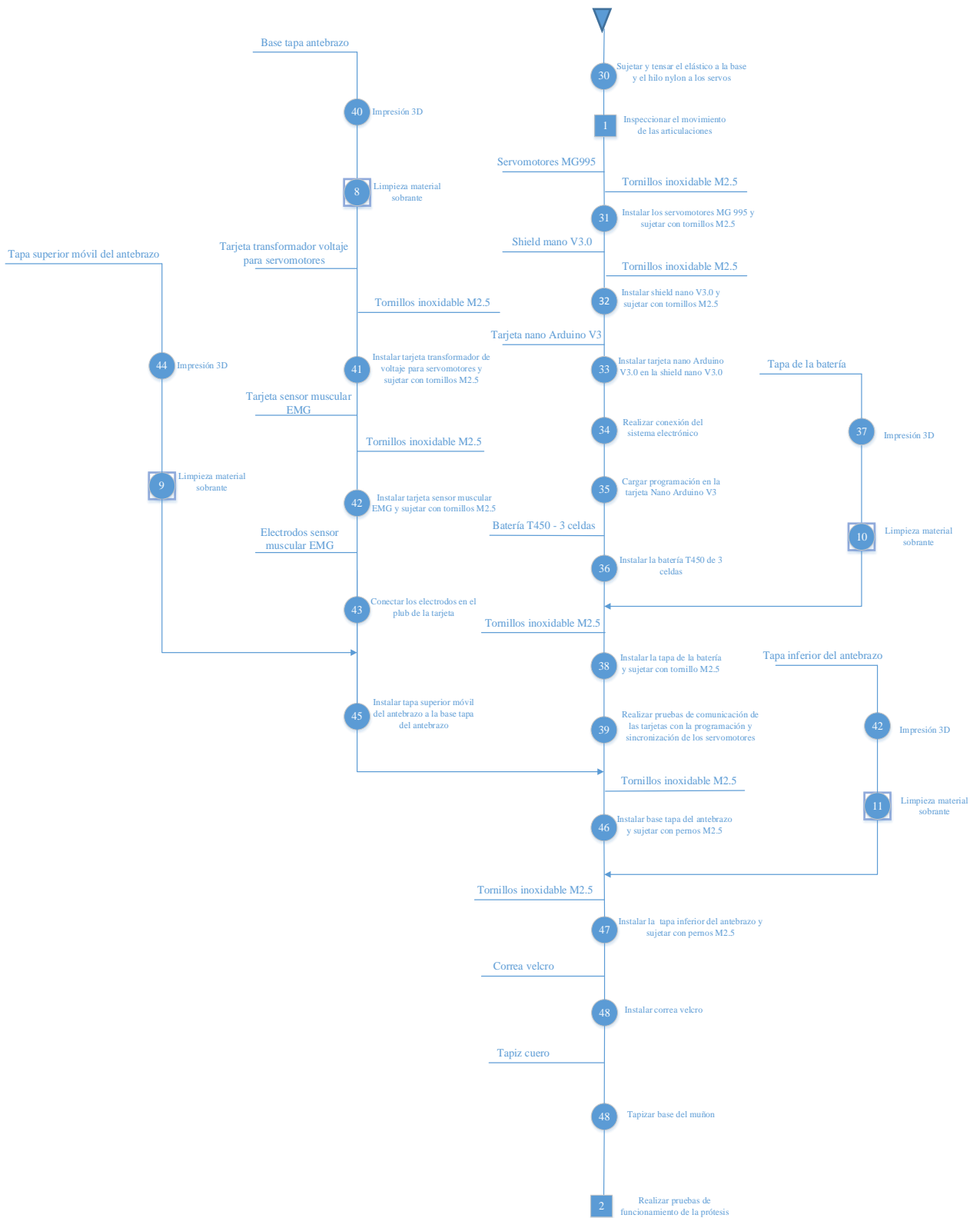
```
[[ 0.   -1.   0.   0.05]
 [ 1.   0.   0.   0.06]
 [ 0.   0.   1.   0.   ]
 [ 0.   0.   0.   1.   ]]
```

Anexo 3: Características y consumos durante la impresión 3D con filamento PLA.

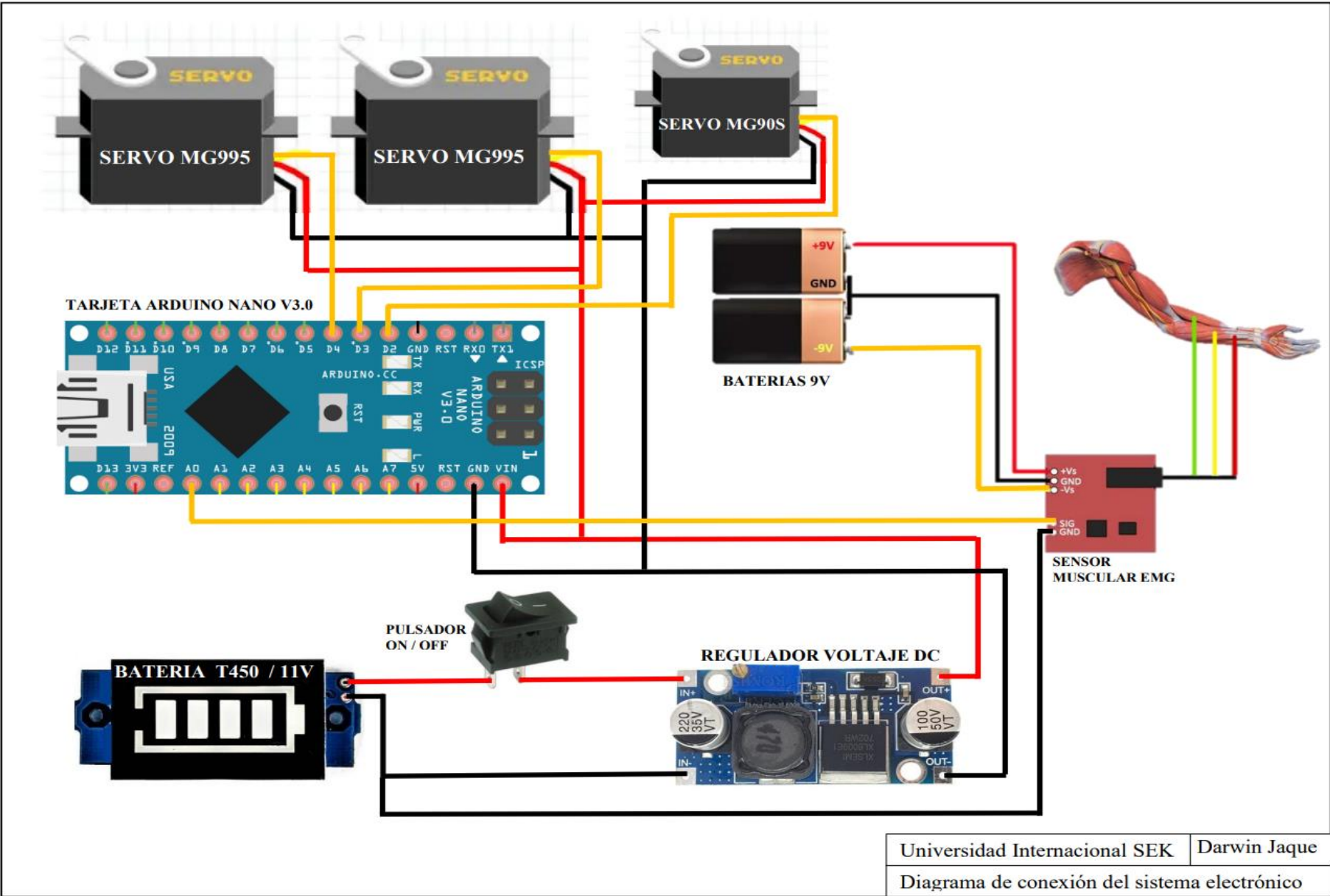
CARACTERÍSTICAS Y CONSUMOS EN LA IMPRESIÓN 3D CON FILAMENTO PLA						
Nº	Partes de la prótesis	Fotos	% Relleno	Altura de la capa	Tiempo impresión (horas)	Consumo Filamento (gramos)
1	Base antebrazo servo		40%	0,10	38,00	205,00
2	Base soporte mano		100%	0,10	22,00	300,00
3	Dedo Pulgar		60%	0,10	5,50	24,00
4	Dedo Indice		60%	0,10	5,00	20,00
5	Dedo Medio		70%	0,10	6,80	32,00
6	Dedo Anular		60%	0,10	7,50	39,00
7	Dedo Meñique		40%	0,10	4,00	15,00
8	Tapa superior de la mano		40%	0,10	13,00	78,00
9	Tapa inferior palma de la mano		40%	0,10	12,00	65,00
10	Tapa superior base tarjeta antebrazo		40%	0,10	22,00	124,00
11	Tapa muñon antebrazo		40%	0,10	7,50	35,00
12	Tapa batería		40%	0,10	1,50	12,00
13	Tapa inferior antebrazo		20%	0,18	13,00	155,00
14	Pernos M3 y soporte sujeción servo		40%	0,10	2,00	8,00
<b>Total</b>					159,80	1112,00

### Anexo 4: Diagrama de flujo para el ensamblaje de las partes de la prótesis de la mano articulada.



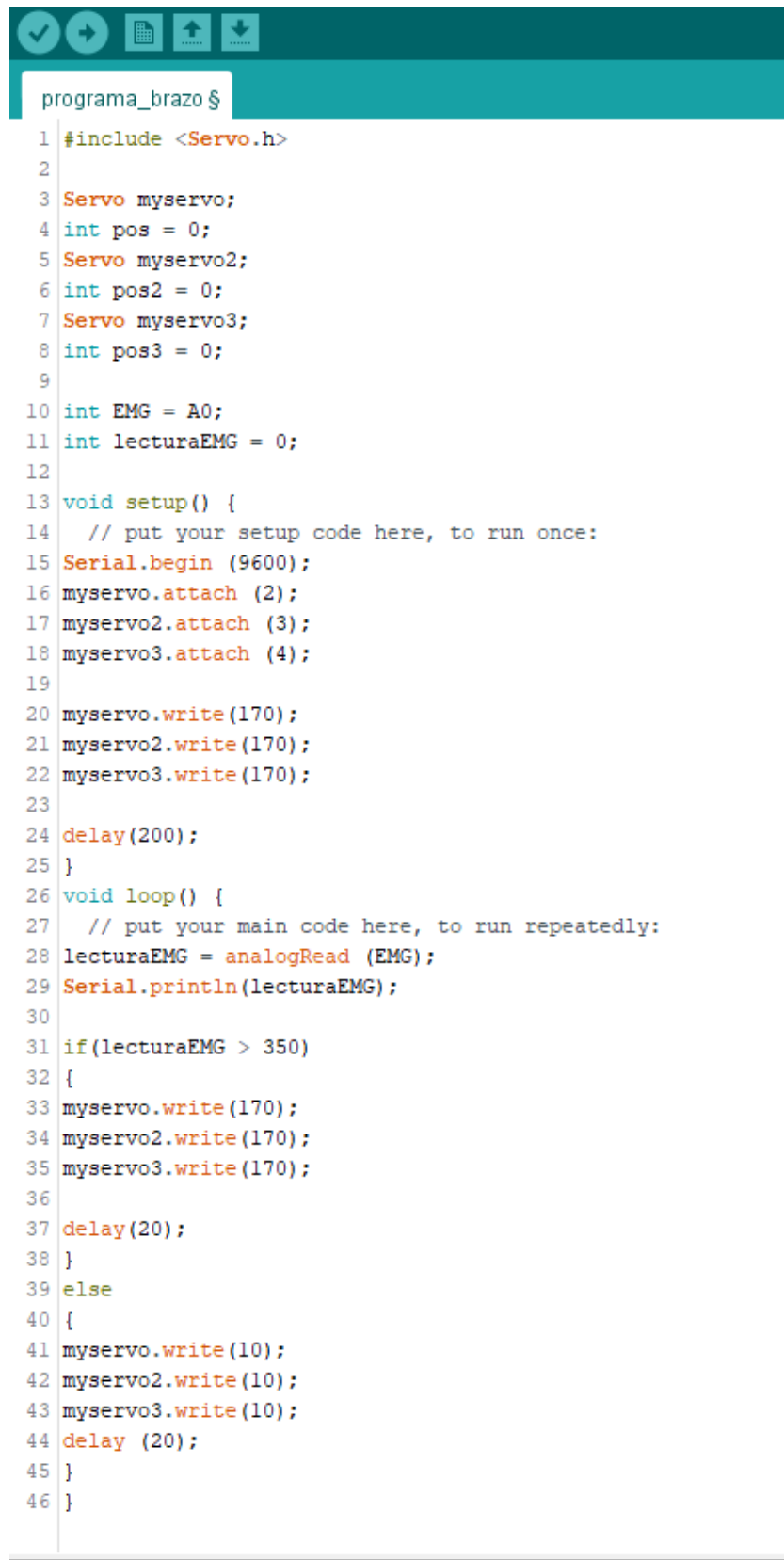


Anexo 5: Diagrama de conexión del sistema electrónico de la prótesis de la mano derecha articulada con sensor muscular EMG



## Anexo 6

Programación de controlador de sensor muscular EMG y servos motores en el software Arduino.



```
programa_brazo $
1 #include <Servo.h>
2
3 Servo myservo;
4 int pos = 0;
5 Servo myservo2;
6 int pos2 = 0;
7 Servo myservo3;
8 int pos3 = 0;
9
10 int EMG = A0;
11 int lecturaEMG = 0;
12
13 void setup() {
14   // put your setup code here, to run once:
15   Serial.begin (9600);
16   myservo.attach (2);
17   myservo2.attach (3);
18   myservo3.attach (4);
19
20   myservo.write(170);
21   myservo2.write(170);
22   myservo3.write(170);
23
24   delay(200);
25 }
26 void loop() {
27   // put your main code here, to run repeatedly:
28   lecturaEMG = analogRead (EMG);
29   Serial.println(lecturaEMG);
30
31   if(lecturaEMG > 350)
32   {
33     myservo.write(170);
34     myservo2.write(170);
35     myservo3.write(170);
36
37     delay(20);
38   }
39   else
40   {
41     myservo.write(10);
42     myservo2.write(10);
43     myservo3.write(10);
44     delay (20);
45   }
46 }
```

## Anexo 7

### Ficha técnica de la impresora 3D (Wanhao D12-300)

<b>TECHNICAL SPECIFICATIONS</b>	
Software	WANHAO Cura
Extruder system	MK12
Material support	PLA,PETG,SILK
Max printable area	300*300/400mm/ 400*400*400mm/ 500*500*500mm
Filament diameter/light	1.75MM
Max printing speed	30 mm/s-150mm/s
Case material	Steel case
Extruder quantity	1
Net weight(kg)	13.2kg/ 19.4kg/ 20.5kg
Gross weight(kg)	16.2kg/ 23.4kg/ 24.5kg
Accuracy	Motor Accuracy
Machine size(cm)	40*58*71cm/ 50*67*72cm/ 60*80*82cm
Packing size(cm)	53.5*48*27.5cm/ 63*72*30cm/ 70*90*30cm
Layer thickness	100-400 um
Platform	Aluminium platform W/ heating
Certification	CE,CB, FCC
LCD display size	75*51 mm
Language	Chinese simplify, English, Russian, Spanish, French, Italian, OEM any other language
Power supply unit	Input 110 AND 250V(optional), 50/60Hz, 350W, 1.9A. Output 24V 4.5A