



UNIVERSIDAD TÉCNICA DEL NORTE

FACULTAD DE INGENIERÍA EN CIENCIAS APLICADAS

CARRERA DE INGENIERÍA EN MECATRÓNICA

**TRABAJO DE GRADO PREVIO A LA OBTENCIÓN DEL TÍTULO DE
INGENIERO EN MECATRÓNICA**

TEMA:

“DISEÑO MECÁNICO DE UN PROTOTIPO DE PRÓTESIS DE MANO”

AUTOR: MAYRA DANIELA YÉPEZ ROSERO

DIRECTOR: ING. CARLOS VILLARREAL

IBARRA - ECUADOR

SEPTIEMBRE 2017



UNIVERSIDAD TÉCNICA DEL NORTE
BIBLIOTECA UNIVERSITARIA
AUTORIZACIÓN DE USO Y PUBLICACIÓN A FAVOR DE LA
UNIVERSIDAD TÉCNICA DEL NORTE

IDENTIFICACIÓN DE LA OBRA

La UNIVERSIDAD TÉCNICA DEL NORTE dentro del proyecto Repositorio Digital Institucional, determinó la necesidad de disponer de textos completos en formato digital con la finalidad de apoyar los procesos de investigación, docencia y extensión de la universidad.

Por medio del presente documento dejo sentada mi voluntad de participar en este proyecto, para lo cual pongo a disposición la siguiente información:

DATOS DEL CONTACTO	
Cédula de Identidad	de 1003399589
Apellidos y Nombres	y Mayra Daniela Yépez Rosero
Email	mdyepez@utn.edu.ec
Teléfono Fijo	062611458
Teléfono Móvil	0994614486
DATOS DE LA OBRA	
Título	DISEÑO MECÁNICO DE UN PROTOTIPO DE PRÓTESIS DE MANO
Autor	Mayra Daniela Yépez Rosero
Fecha	18 de septiembre del 2017
Programa	Pregrado
Título por el que aspira	Ingeniero en Mecatrónica
Director	Ing. Carlos Villarreal

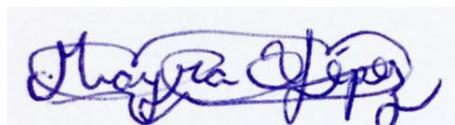
AUTORIZACIÓN DE USO A FAVOR DE LA UNIVERSIDAD

Yo, Mayra Daniela Yépez Rosero, con cédula de identidad Nro. 100339958-9, en calidad de autor y titular de los derechos patrimoniales de la obra o Trabajo de Grado descrito anteriormente, hago entrega del ejemplar respectivo en forma digital y autorizo a la Universidad Técnica del Norte, la publicación de la obra en el Repositorio Digital Institucional y el uso del archivo digital en la biblioteca de la Universidad con fines académicos, para ampliar la disponibilidad del material y como apoyo a la educación, investigación y extensión; en concordancia con la Ley de Educación Superior Artículo 144.

CONSTANCIAS

El autor manifiesta que la obra objeto de la presente autorización es original y se la desarrolló sin violar derechos de autor de terceros, por lo tanto la obra es original y que es el titular de los derechos patrimoniales, por lo que asume la responsabilidad sobre el contenido de la misma y saldrá en defensa de la Universidad en caso de reclamos por parte de terceros.

Ibarra, a los 18 días del mes de septiembre del 2017



Firma

Nombre: Mayra Daniela Yépez Rosero

Cédula: 100339958-9

**UNIVERSIDAD TÉCNICA DEL NORTE****CESIÓN DE DERECHOS DE AUTOR DEL TRABAJO DE GRADO A FAVOR DE
LA UNIVERSIDAD TÉCNICA DEL NORTE**

Yo, Mayra Daniela Yépez Rosero, con cédula de identidad Nro. 100339958-9, manifiesto mi voluntad de ceder a la Universidad Técnica del Norte los derechos patrimoniales consagrados en la Ley de Propiedad Intelectual del Ecuador, artículo 4, 5 y 6 en calidad de autor (es) de la obra o trabajo de grado denominado: **“DISEÑO MECÁNICO DE UN PROTOTIPO DE PRÓTESIS DE MANO”**, que ha sido desarrollado para optar por el título de Ingeniero en Mecatrónica, en la Universidad Técnica del Norte, quedando la Universidad facultada para ejercer plenamente los derechos cedidos anteriormente. En mi condición de autor me reservo los derechos morales de la obra antes citada. En concordancia suscribo este documento en el momento que hago la entrega del trabajo final en formato impreso y digital a la Biblioteca de la Universidad Técnica del Norte.

Ibarra, a los 18 días del mes de septiembre del 2017

Firma

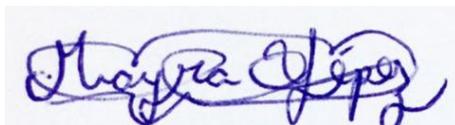
Mayra Daniela Yépez Rosero

CI: 100339958-9

DECLARACIÓN

Yo, Mayra Daniela Yépez Rosero, declaro bajo juramento que el trabajo aquí descrito es de mi autoría; que este no ha sido previamente presentado para ningún grado o calificación profesional; y que he consultado las referencias bibliográficas que se incluyen en este documento.

A través de la presente declaración cedo mis derechos de propiedad intelectual correspondientes a este trabajo, a la Universidad Técnica del Norte - Ibarra, según lo establecido por la Ley de Propiedad Intelectual, por su Reglamento y por la normativa institucional vigente.

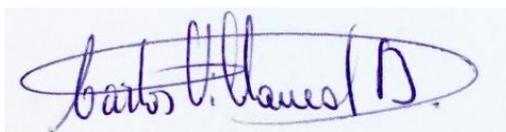


Mayra Daniela Yépez Rosero

C.I. 1003399589

CERTIFICACIÓN

La señorita egresada Mayra Daniela Yépez Rosero, ha trabajado en el desarrollo del proyecto de Tesis "DISEÑO MECÁNICO DE UN PROTOTIPO DE PRÓTESIS DE MANO", previo a la obtención del Título de Ingeniero en Mecatrónica, realizándola con interés profesional y responsabilidad, lo cual certifico en honor a la verdad.

A handwritten signature in blue ink, reading "Carlos Villarreal D.", enclosed in a light blue rectangular box.

Ing. Carlos Villarreal

DIRECTOR DEL PROYECTO

DEDICATORIA

A mi madre, Carmela Rosero

Mayra Daniela Yépez Rosero

AGRADECIMIENTOS

Mi gratitud hacia mi Padre Celestial por responder a mis oraciones siempre.

A mis padres Marco Yépez y Carmela Rosero, por ayudarme, cuidarme y procurar que ante todo sea feliz y pueda luchar por mis sueños.

A mi compañero de tesis Oliver Ortega, no pude haber tenido una mejor persona con quien compartir este tema de tesis, te considero mi hermano.

A Ángel Rosero, te agradezco por todo el apoyo brindado en éste tiempo, siempre has creído en mí.

A mi tutor Ing. Carlos Villarreal y todos los docentes que participaron con sus conocimientos en el desarrollo de éste proyecto.

Ing. Fernando Valencia, gracias por compartir sus conocimientos y su ayuda constante.

Danilo Bastidas, gracias por tu amistad incondicional, tus consejos y contribuciones para lograr culminar este proyecto.

A la familia Orbes Padilla y todos los amigos que han contribuido de diferente manera para que ésta meta pueda materializarse.

Mayra Daniela Yépez Rosero

RESUMEN

El presente proyecto muestra el diseño y construcción de un prototipo de prótesis de mano para amputación transradial que asemeja la antropomorfía y ciertas funcionalidades de la mano humana, realizando dos tipos de agarres: cilíndrico y pinza.

Las características de diseño se establecieron en función de las medidas antropométricas del sujeto de estudio, así como los movimientos, ángulos de flexión y tipos de agarres a realizar por el prototipo para lograr las funcionalidades propuestas.

Se usó mecanismos de cuatro barras para constituir el movimiento de flexo - extensión de los dedos y la transmisión de potencia para los dedos: medio, anular y meñique. Para la transmisión de potencia en el dedo índice se usó un tren de engranes rectos.

Se realizaron diferentes pruebas virtuales, entre ellas la de esfuerzo, mediante análisis de elementos finitos para determinar los puntos críticos y asegurar la confiabilidad del prototipo.

La construcción se realizó mediante impresión tridimensional en material ABS. Finalizada la construcción, se ejecutaron pruebas prácticas de validación de los agarres. En el agarre cilíndrico, el máximo valor de masa levantado por la mano es 300 g, con una sujeción de aproximadamente 50 mm de diámetro y en el agarre de pinzase realizó la sujeción de objetos pequeños con precisión.

Finalmente se obtuvo un prototipo de prótesis de mano que cumple las condiciones de diseño, con características antropométricas y antropomórficas de la mano del sujeto de estudio, siendo posible aplicar las mismas en un futuro a cualquier sujeto con medidas aproximadas.

SUMMARY

This research is about the design and construction of a prototype of hand prosthesis for transradial amputation which analyzes the anthropomorphism and some functionalities of the human hand; It makes two types of grip: cylindrical and clamp.

The characteristics of the desing were established in function its anthropometric measures, as well as the movements, angles of flexion and types of grips to make the prototype to achieve the proposed functionalities.

The 4 - bar mechanisms were used for the movement of the flexion - extension of the fingers to transmit power for medium, annular and pinky fingers; a straight gear train was used to transmit power for the index finger.

Different virtual tests were carried out, including the one for effort, through the analysis of finite elements to determine the critical points and to guarantee the reliability of the prototype.

Its construction was done by three-dimensional printing with ABS material. Finish the construction, practical tests to validate the grips were executed. In the cylindrical grip, lifting 300 g with a maximum clamping of 63.7 millimeters and minimum 35 millimeters in diameter and for the gripping claws allowing to pick up small objects accurately.

Finally, a prototype of a hand prosthesis was obtained finding the design conditions, with anthropometric and anthropomorphic characteristics of the hand and it will be possible to apply them in the future for any subject with approximate measures.

CONTENIDO

IDENTIFICACIÓN DE LA OBRA	II
AUTORIZACIÓN DE USO A FAVOR DE LA UNIVERSIDAD	III
CONSTANCIAS	III
CESIÓN DE DERECHOS DE AUTOR	IV
DECLARACIÓN	V
CERTIFICACIÓN.....	VI
DEDICATORIA.....	VII
AGRADECIMIENTOS.....	VIII
RESUMEN	IX
ABSTRACT	X
INTRODUCCIÓN.....	1
PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA.....	2
OBJETIVO GENERAL	3
OBJETIVOS ESPECÍFICOS	3
I. ESTADO DEL ARTE.....	4
INTRODUCCIÓN.....	4
ANTECEDENTES	16
JUSTIFICACIÓN.....	21
ALCANCE	22
CAPÍTULO I.....	23
MARCO TEÓRICO	23
1.1.Introducción.....	23
1.2.Estructura ósea de la mano humana	23
1.2.1.Grupo 1: Las falanges.....	24
1.2.2.Grupo 2: Metacarpianos	24
1.2.3.Grupo 3: Carpianos.....	25

1.3.Estructura muscular	25
1.3.1.Primer grupo.....	26
1.3.2.Segundo grupo.....	26
1.3.3.Tercer grupo.....	26
1.4.Tipos de movimientos	27
1.4.1.Flexión.....	27
1.4.2.Extensión	27
1.5.Tipos de Agarres.....	28
1.6.Mecanismos	29
1.6.1.Trenes de engranajes	29
1.6.2.Mecanismos de cuatro barras	30
1.6.2.1 Criterio de Gruebler.....	31
1.6.2.2 Criterio de Grashof.....	31
1.7.Actuadores	31
1.7.1.Servomotores	31
1.7.2.Motores DC	32
1.8.Resorte de torsión	33
CAPÍTULO II.....	34
METODOLOGÍA.....	34
2.1.Revisión bibliográfica.....	34
2.2.Características de la persona de estudio	34
2.3.Selección de mecanismos	34
2.4.Síntesis dimensional	35
2.4.1.Diseño del mecanismo Manivela – Balancín para los dedos.....	36
2.5.Resorte de torsión	38
2.6.Selección de materiales	38
2.7.Diseño mecánico del prototipo de prótesis de mano	39

2.8.Simulación del prototipo	39
2.9.Construcción y ensamblaje del prototipo	39
2.10.Pruebas de validación	39
CAPÍTULO III	40
RESULTADOS	40
3.1.Requisitos de diseño	40
3.2 Medidas antropométricas de la persona de estudio	40
3.3 Dimensiones del mecanismo	41
3.4 Verificación de la ley de Grashof	42
3.5 Análisis de posición.....	43
3.6 Análisis de la torsión del resorte.....	44
3.7 Materiales	45
3.8 Diseño mecánico del prototipo	47
3.8.1 Diseño de los dedos.	47
3.8.2 Diseño del pulgar.....	51
3.8.3 Diseño de la palma inferior.	52
3.9 Análisis estático.....	53
3.9.1 Cálculo de las fuerzas normales.	53
3.9.2 Cálculo del torque del motor para el dedo índice.....	55
3.9.3Cálculo del torque del motor para la transmisión en los dedos.....	61
3.10Método de elementos finitos	62
3.10.1 Condiciones de borde dedo índice.....	63
3.10.2 Análisis de elementos finitos del dedo índice.	64
3.10.3 Condiciones de borde del dedo pulgar.	66
3.10.4 Análisis de elementos finitos del dedo pulgar.	67
3.10.5 Condiciones de borde para la barra doble	68
3.10.6 Análisis de elementos finitos de la barra doble	70

3.10.7 Condiciones de borde para la palma.....	72
3.10.8 Análisis de elementos finitos de la palma	73
3.11 Manufactura.....	74
3.12 Costos de diseño y fabricación del prototipo de prótesis de mano.....	78
3.12.1 Costos directos de fabricación.....	78
3.12.2 Costos indirectos de fabricación.....	78
3.13 Costo total de diseño y manufactura del prototipo.....	79
3.14 Validación del prototipo	79
3.14.1 Pruebas de agarre de precisión.	79
3.14.2 Pruebas de agarre de fuerza.	80
CAPÍTULO IV	81
CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES	81
4.1 Conclusiones.....	81
4.2 Recomendaciones	82
REFERENCIAS	83
ANEXOS	85
ANEXO 1	85
ANEXO 2.....	85

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura I: Prótesis de marcus sergius _____	16
Figura II: Mano de alt-ruppin construida con hierro en el año 1400 _____	17
Figura III: Mecanismo de palanca tórax de conde beaforten el siglo xix. _____	17
Figura IV: Características i-lim _____	18
Figura V: Características diseño sospedra bruno _____	20
Figura VI: Tipos de agarre y movimientos diseño quinayás cesar _____	20

Capítulo I

Figura 1. 1 Estructura ósea de la mano _____	23
Figura 1. 2 Falanges del dedohumano _____	24
Figura 1. 3 Metacarpianos de la palma de la mano _____	25
Figura 1. 4 Huesos carpianos _____	25
Figura 1. 5 Músculos intrínsecos de la mano _____	26
Figura 1. 6 Movimientos trocleares y Movimientos de rotación fisiológica _____	27
Figura 1. 7 Tipos de agarres: _____	29
Figura 1. 8 Trenes de engranes rectos _____	30
Figura 1. 9 Mecanismo de cuatro barras _____	30
Figura 1. 10 Ejemplos de servomotores _____	32
Figura 1. 11 Motores dc tipo brushes _____	32
Figura 1. 12 Resorte de torsión _____	33

Capítulo II

Figura 2. 1 Parámetros de medición del dedo del sujeto de estudio	35
Figura 2. 2 Ángulos de flexión de los dedos	36
Figura 2. 3 Ángulo de rotación de la articulación metacarpofalángica.....	36
Figura 2. 4 Diseño del mecanismo manivela balancín.....	37
Figura 2. 5 Grafico de la posiciones del resorte.....	38

Capítulo 3

Figura 3. 1 Medidas aproximadas del dedo del sujeto de estudio.....	42
Figura 3. 2 Medidas aproximadas del dedo del sujeto de estudio.....	42
Figura 3. 3 Mecanismo de 4 barras dimensionado en el dedo.	43
Figura 3. 4 Posición inicial del dedo índice con el mecanismo de 4 barras.....	43
Figura 3. 5 Resorte de torsión en el dedo índice.	44
Figura 3. 6 Resistencia vs precio.....	45
Figura 3. 7 Resistencia vs densidad.	46
Figura 3. 8 Vista isométrica del prototipo del prototipo de prótesis de mano.	47
Figura 3. 9 Vista isométrica del dedo.....	48
Figura 3. 10 Diseño de las partes constitutivas de los dedos.	49
Figura 3. 11 Ángulos de flexión en los dedos del prototipo.	50
Figura 3. 12 Diseño del dedo pulgar.	51
Figura 3. 13 Diseño de la palma inferior.....	52
Figura 3. 14 Agarres que realiza el prototipo.....	53
Figura 3. 15 Puntos de contactode los dedos al agarrar un objeto cilíndrico.....	54
Figura 3. 16 Diagrama de las fuerzas aplicadas a los puntos de contacto.....	54
Figura 3. 17 Diagrama de cuerpo libre para el mecanismo de 4 barras de los dedos.	56
Figura 3. 18 Diagrama de cuerpo libre para el mecanismo de 4 barras de los dedos.	56
Figura 3. 19 Diagrama de cuerpo libre del eslabón 1.....	57
Figura 3. 20 Diagrama de cuerpo libre del eslabón 3.....	58
Figura 3. 21 Diagrama de cuerpo libre del eslabón 2.....	58
Figura 3. 22 Diagrama de cuerpo libre del eslabón 4.....	59
Figura 3. 23 Diagrama de cuerpo libre del eslabón 4.....	60
Figura 3. 24 Actuador para el dedo índice	61
Figura 3. 25 Actuador para el mecanismo de los tres dedos.	62
Figura 3. 26 Fuerzas aplicadas en el dedo índice:.....	63
Figura 3. 27 Geometría fija aplicada en los pasadores del dedo índice	63
Figura 3. 28 Esfuerzo de von mises en el dedo índice.	64
Figura 3. 29 Factor de seguridad del dedo índice.	65
Figura 3. 30 Desplazamientos en el dedo índice.....	65
Figura 3. 31 F3 colocada en el extremo del pulgar.....	66
Figura 3. 32 Geometría fija en el acople del motor y pernos de la base del dedo pulgar.	66

Figura 3. 33 Esfuerzo de von mises en el dedo pulgar.....	67
Figura 3. 34 Factor de seguridad del dedo pulgar	67
Figura 3. 35 Desplazamiento máximo del dedo pulgar.....	68
Figura 3. 36 Transmisión de potencia del servomotor a los dedos: medio, anular y meñique	68
Figura 3. 37 Fuerza del servomotor	69
Figura 3. 38 Ángulo de desfase de la barra doble	69
Figura 3. 39 Aplicación de la fuerza en la barra doble	70
Figura 3. 40 Esfuerzo de von mises en la barra doble.....	71
Figura 3. 41 Factor de seguridad en la barra doble.	71
Figura 3. 42 Desplazamiento máximo en la barra doble.....	72
Figura 3. 43 Geometría fija en la base	72
Figura 3. 44 Colocación de las fuerzas en la palma	73
Figura 3. 45 Esfuerzo de von mises en la palma.	73
Figura 3. 46 Factor de seguridad en la palma.	74
Figura 3. 47 Desplazamiento en la palma.	74
Figura 3. 48 Prototipo de prótesis obtenido	78
Figura 3. 49 Pruebas de precisión en sujeción de objetos en agarre de pinza:.....	79
Figura 3. 50 Pruebas de sujeción de objetos en agarre cilíndrico	80

ÍNDICE DE TABLAS

Capítulo 1

Tabla 1. 1. Ángulos de flexión – extensión de las articulaciones la mano.....	28
---	----

Capítulo 3

Tabla 3. 1. Longitud de las articulaciones de la mano derecha del sujeto de estudio.....	40
Tabla 3. 2 Altura de las articulaciones tomadas de la mano derecha del sujeto de estudio	41
Tabla 3. 3 Anchura de las articulaciones tomadas de la mano derecha del sujeto de estudio.	41
Tabla 3. 4 Posiciones del resorte a distintos ángulos.	44
Tabla 3. 5 Propiedades generales y mecánicas del abs	46
Tabla 3. 6 Longitud de las articulaciones en mm.....	48
Tabla 3. 7 Altura de las articulaciones en mm	48
Tabla 3. 8 Anchura de las articulaciones en mm.....	48

Tabla 3. 9 Tabla comparativa del mat de los dedos.....	50
Tabla 3. 10 Longitud de las articulaciones en mm.....	51
Tabla 3. 11 Altura de las articulaciones en mm.....	51
Tabla 3. 12 Anchura de las articulaciones en mm.....	51
Tabla 3. 13 Dimensiones de la palma inferior en mm.....	52
Tabla 3. 14 Datos del motor pololu.....	61
Tabla 3. 15 Datos del servomotor.....	62
Tabla 3. 16 Manufactura de piezas.....	75
Tabla 3. 17 Costos directos de fabricación.....	78
Tabla 3. 18 Costos indirectos de fabricación del prototipo.....	78
Tabla 3. 19 Costo total del prototipo.....	79

ÍNDICE DE ECUACIONES

Capítulo 1

Ecuación 1. 1 Fórmula para el cálculo de los grados de libertad.....	31
Ecuación 1. 2 Criterio para mecanismo manivela-balancín.....	31
Ecuación 1. 3 Fórmula para el cálculo de la constante en un resorte de torsión.....	33
Ecuación 1. 4 Fórmula para el cálculo de la fuerza en resortes de torsión.....	33
Ecuación 1. 5 Fórmula para el cálculo del momento en resortes de torsión.....	33

Capítulo 3

Ecuación 3. 1 Fórmula para el cálculo del peso.....	55
Ecuación 3. 2 Fórmula para el cálculo de la fuerza de rozamiento.....	55
Ecuación 3. 3 Fórmula para el cálculo del momento.....	57
Ecuación 3. 4 Fórmula para el cálculo de la relación de engranes.....	60

INTRODUCCIÓN

PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

El progreso de la humanidad va de la mano del desarrollo tecnológico (Leff, 2005), en miras de que ésta alcance una mejor calidad de vida se ha venido desarrollando en el transcurso de la historia diferentes tecnologías aplicables a distintas áreas, entre ellas la mecatrónica en el diseño de prótesis que suplen la pérdida o mal funcionamiento de algún miembro (Vargas, 2014). Estos prototipos han ido evolucionando de simples diseños que suplían tan solo la parte estética del miembro faltante a sistemas que imitan en gran medida los complejos movimientos de los órganos que suplen (Arzola, 2011).

Debido a accidentes laborales o calamidad doméstica muchas personas han sufrido amputaciones. Actualmente, en la provincia de Imbabura existen 4826 personas con discapacidad física, según datos del CONADIS (CONADIS, 2015). Estas personas se encuentran limitadas en cuanto al acceso a prótesis robóticas que, si bien existen en el mercado mundial, ésta tecnología es de difícil acceso, ya que las prótesis deben ser personalizadas y además son considerablemente costosas.

Actualmente la mayoría de las prótesis de mano son mecánicas, poco funcionales o netamente estéticas, la mayoría de las cuales usan una pinza como efector final en lugar de dedos. Por lo tanto, es necesario proponer un mecanismo que se asemeje a la funcionalidad de los dedos de la mano humana y en base a ello, seleccionar los materiales y actuadores necesarios para diseñar un prototipo de prótesis de mano.

OBJETIVO GENERAL

Realizar el diseño mecánico de un prototipo de prótesis de mano.

OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Estudiar la información disponible referente al estado del arte.
- Identificar los parámetros y requerimientos necesarios para el diseño del prototipo.
- Realizar el diseño CAD del prototipo de prótesis de mano.
- Construir el prototipo de prótesis en función del diseño.
- Analizar los resultados obtenidos a través de las pruebas de validación virtuales y prácticas aplicables al prototipo.

I. ESTADO DEL ARTE

Introducción

El diseño de prototipos de prótesis de mano ha evolucionado con el transcurso del tiempo, partiendo de modelos básicos que solo suplían la parte estética del miembro perdido, hasta la actualidad en la cual la funcionalidad es lo más imperante al momento de generar nuevas propuestas.

Tras requerimientos cada vez más exigentes, el diseño de prótesis se ha potencializado con programas más dinámicos, capaces de procesar con mayor eficacia la información y generar una mejor respuesta en el control de movimiento y agarres.

Antecedentes

La primera prótesis surgió en el año 600 a.C. la cual fue encontrada en Egipto, ésta se encontraba sujeta al antebrazo de una momia por medio de un cartucho.

Con el transcurso del tiempo el hombre incrementó su conocimiento y manipulación sobre otros materiales lo cual le permitió mejorar significativamente los mismos, un ejemplo es aquella usada por el General Marcus (218-202 a. C.) del ejército Romano, como se muestra en la figura I, la cual constituye la primera mano de hierro registrada en la historia.



Figura I: Prótesis de Marcus Sergius un General romano que luchó en la 2ª Guerra Púnica contra los cartagineses (Brito *et al.* , 2013).

En el siglo XIV surgió la mano de “alt-Ruppín”, como se muestra en la figura II contaba con dedos flexibles fijados a un mecanismo de trinquete, que permitían su movilidad y además contaba con una muñeca móvil.



Figura II: Mano de alt-Ruppín construida con hierro en el año 1400(González *et al.*, 2005)

En el siglo XIX, Peter Beil realizó diseños que permitían controlar el cierre de los dedos por medio del movimiento del tronco y hombro, los cuales fueron mejorados por el Conde Beaforten que acondiciona una palanca al mecanismo en el tórax mejorando la eficiencia y movilidad del mecanismo, como se observa en la figura III.

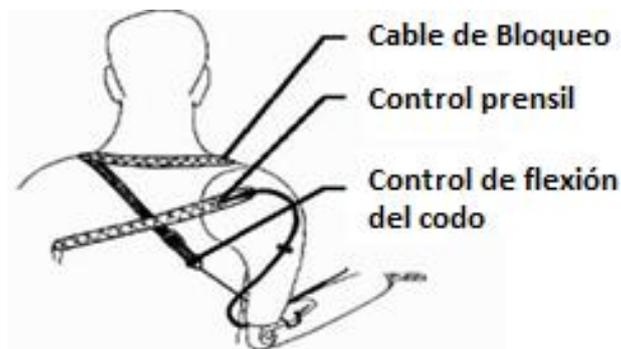


Figura III: Mecanismo de palanca tórax de Conde Beaforten el siglo XIX(González *et al.*, 2005).

Ya para 1960 nace el concepto de prótesis mioeléctrica basada en los mecanismos iniciales de la interconexión muscular del muñón terminal y la capacidad para conducirlos y ampliarlos

para generar un movimiento. Los países de mayores avances en éste campo son Alemania, Estados Unidos, Francia, Inglaterra y Japón, con desarrollos tecnológicos muy notables.

La empresa mundial ha visto en el diseño de prótesis un mercado comercial importante, aportando económicamente a ésta área con el diseño de prótesis altamente funcionales con mejores diseños, los cuales han ganado alta popularidad en función a su alto nivel tecnológico y apariencia estética.

Prótesis Bebionic

Ésta prótesis, es un ícono en la fabricación de prótesis de mano, posee 5 dedos, actuadores individuales para cada dedo, 14 formas de sujeción y precisión en el control de movimientos (Vargas *et al.*, 2015).

Prótesis I-LIMB.

Los modelos permiten al usuario personalizar la mano para sus necesidades y actividades diarias (Aguilar, 2012), presenta las características mostradas en la figura IV.

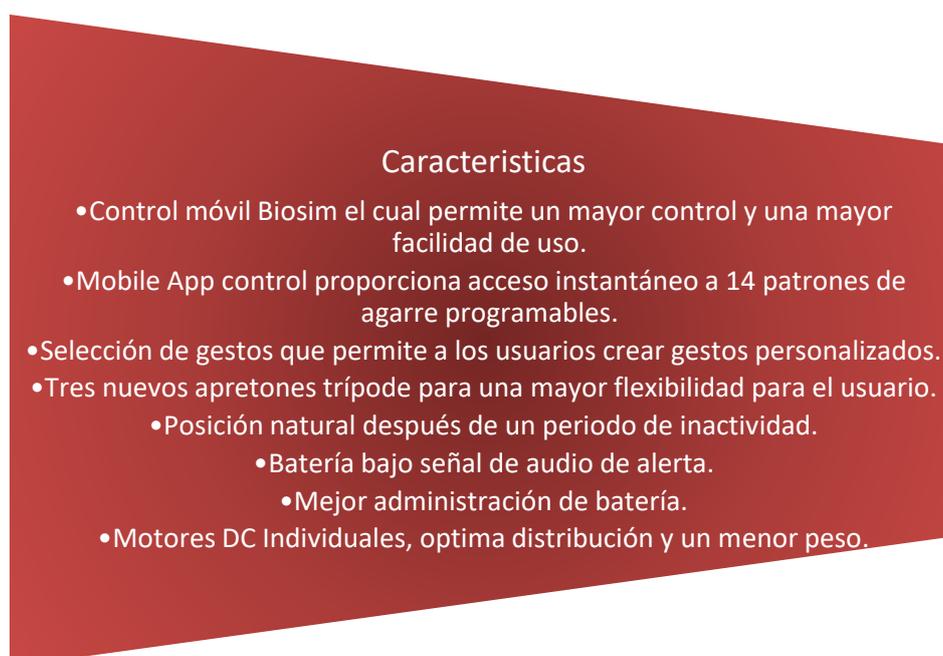


Figura IV: Características I-LIMB(Aguilar, 2012)

Prótesis de Mano Michelangelo

La empresa Ottobock generó prototipos como la mano Michelangelo, la cual posee el sistema protésico Axon-Bus, con sus diversas funciones y un agarre más natural de objetos, este prototipo se encuentra manufacturado con materiales que buscan asemejarse a los de una mano natural, posee varios tipos de agarres: pinza lateral, pinza tridigital, agarre fuerte lateral, entre otros.

Prótesis de mano CENIDET.

El CENIDET (Centro Nacional de Investigación y Desarrollo Tecnológico), perteneciente a México, presenta un modelo de mano robot con cuatro dedos, que a su vez tienen cuatro grados de libertad indistintamente, dicho diseño busca imitar los movimientos de la mano humana con articulaciones capaces de generar movimientos independientes que actúan con motores DC por medio de tensores, que le permiten sostener objetos de hasta 0.5 kg (Herrera, 2006).

Prótesis PRMA

ESTCE/PRMA, busca implementar aspectos creativos en el diseño, valorando la anatomía de la mano humana en su diseño, tomando como base de su diseño las dimensiones reales de la mano humana a partir de tomografías y de estudios morfológicos (Pérez, 2011).

A nivel general éste diseño presenta un mecanismo conformado por cinco dedos, posee cinco formas de sujeción en su sistema de grados de libertad, su transmisión es por medio de tendones dirigidos por actuadores lineales y un mecanismo de cuatro barras.

Prótesis de mano propuesta por Sospedra Bruno.

Éste diseño se basa en varias prótesis de manos presentadas en el mercado de los cuales ha obtenido importantes mejoras en aspectos de funcionalidad del diseño en los usos

cotidianos(Sospedra et al., 2004). En la figura V se muestran las principales características de dicho diseño.

Número de dedos	• 5
Número de Grados de Libertad	• 14 formas de sujeción
Actuadores	• Servomotores
Tipos de transmisión	• Tendones
Medios de transmisión	• Mecanismos de 4 barras

Figura V: Características diseño Sospedra Bruno (Bruno et al., 2004).

Prótesis propuesta por Quinayás Cesar.

Quinayás (2010), presenta un prototipo con tres dedos, seis motores DC en su estructura, seis grados de libertad, con un tipo de transmisión basada en engranes y fabricado mayormente de aluminio y resina de poliéster(Quinayás *et al.*, 2010). En la figura VI se muestran los agarres y tipos de movimientos que posee éste diseño.

Agarres	Movimientos
<ul style="list-style-type: none"> • Lateral • Cilíndrico • Esférico • De gancho • Lateral • De precisión. 	<ul style="list-style-type: none"> • Flexo-extensión • Prono-supinación

Figura VI: Tipos de Agarre y Movimientos diseño Quinayás Cesar (Quinayás *et al.*, 2010)

JUSTIFICACIÓN

Se establece el requerimiento de desarrollar proyectos en el ámbito de la biomecánica, específicamente de prótesis mioeléctricas en la zona 1 del país en función de la necesidad de estudios que traten esta temática a profundidad. Por lo cual la carrera de Ingeniería en Mecatrónica de la Universidad Técnica del Norte busca posicionarse, como referente de desarrollo tecnológico y biomecánico en la zona norte del país.

Si bien este tipo de prótesis se están desarrollando en el resto del país y del mundo, existen limitaciones de acceso a causa del precio que dichas prótesis tienen, el cual es relativamente elevado y debido a que cada prótesis debe ser personalizada en función a las medidas de la mano del paciente. Actualmente la mayoría de prótesis de mano disponibles en nuestro medio son mecánicas o netamente estéticas.

En el presente proyecto busca realizar el diseño mecánico de un prototipo de prótesis de mano, mediante la minimización en el uso de actuadores para reducir el peso y costo de la prótesis y la implementación de mecanismos de accionamiento para realizar varios tipos de agarres y de esta manera aumentar la funcionalidad de la prótesis de mano.

Para el diseño y construcción se usará tecnología local, la cual representará menos costos de fabricación para que sea económicamente viable y tecnológicamente accesible.

Adicionalmente los investigadores de este proyecto se beneficiarán con la adquisición de conocimientos y experiencias tras la realización del prototipo; así como los investigadores futuros que se pueden basar en este diseño para investigaciones posteriores en el mismo ámbito.

ALCANCE

El prototipo de prótesis de mano constará de mecanismos para realizar la flexo – extensión de los dedos y mecanismos de transmisión de potencia de los actuadores hacia los dedos. Para lograr que el prototipo realice varios tipos de agarres, con tres grados de libertad.

Se realizará el diseño mecánico mediante un software CAD, el cual permitirá realizar el análisis de esfuerzo del prototipo.

En el diseño se considerará los parámetros ergonómicos y de funcionalidad de la mano humana, se concluirá con la construcción del prototipo y las pruebas de validación en cuanto a precisión y levantamiento de peso.

CAPÍTULO I

MARCO TEÓRICO

1.1 Introducción

Éste capítulo trata de la anatomía de la mano humana, los componentes que estructuran la palma y la generación del movimiento de los dedos.

Las funcionalidades de la mano humana son considerablemente complejas; sin embargo, su función principal en la vida cotidiana es la prensión y sujeción de objetos, puede agarrar grandes objetos con fuerza o pequeños objetos con sutileza y precisión. En el ser humano se ha logrado tal perfección en el movimiento y las funcionalidades de la mano, gracias a la oposición del pulgar con respecto a los otros dedos.

1.2 Estructura ósea de la mano humana

La mano humana está constituida por un complejo sistema óseo conformado por 27 huesos; en la figura 1.1 se muestra la subdivisión de dicho sistema en tres grupos: falanges, metacarpianos y carpianos (Valenzuela, 2012).

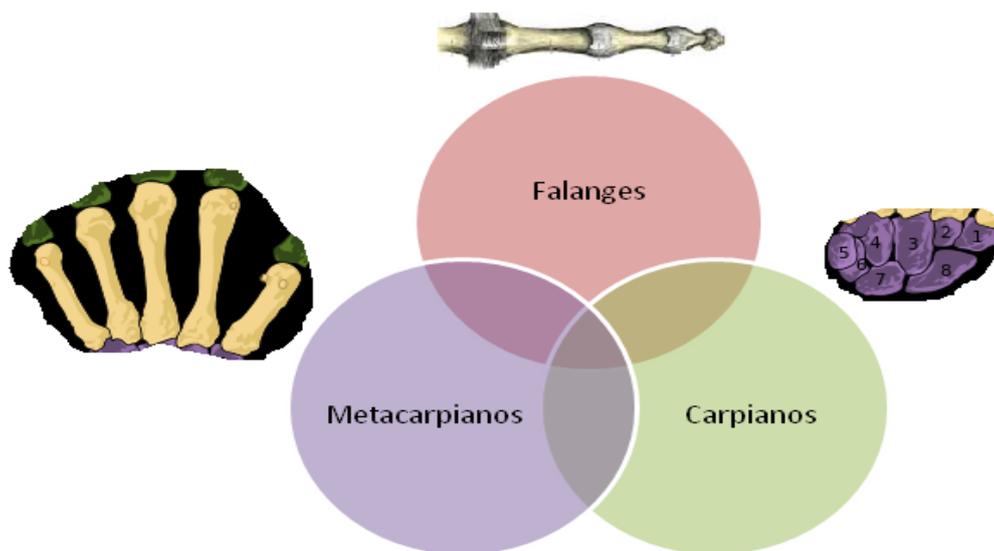


Figura 1. 1: Estructura ósea de la mano (Derique, 2015).

1.2.1 Grupo 1: Las falanges.

Con un total de 14 falanges, se constituyen como los huesos de los dedos y se sub dividen de acuerdo a la proximidad a la palma de la mano, como se indica en la figura 1.2, colocándose tres de ellas en cada dedo, a excepción del dedo pulgar el cual cuenta con solo dos falanges.



Figura 1. 2: Falanges del dedo humano (Sánchez, 2017)

1.2.2 Grupo 2: Metacarpianos

Estos huesos son los que conforman la palma de la mano, pero no son parte de la muñeca si no que se unen a ella, son cinco y constituyen las uniones entre las falanges y el bloque de huesos carpianos, y se nombran desde el dedo pulgar hasta el dedo meñique, como se muestra en la figura 1.3.

- Primer metacarpiano
- Segundo metacarpiano
- Tercero metacarpiano
- Cuarto metacarpiano
- Quinto metacarpiano

METACARPOS

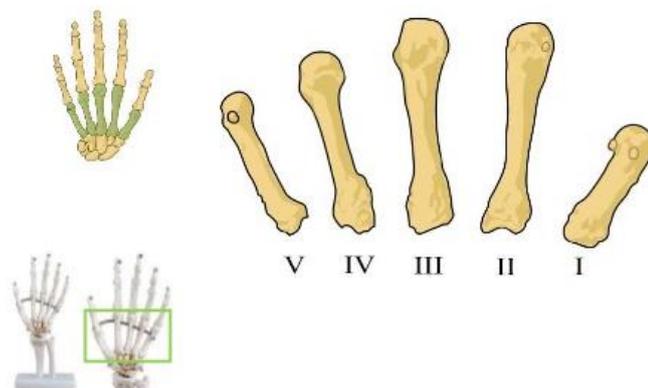


Figura 1. 3: Metacarpianos de la palma de la mano (Saldin, 2015)

1.2.3 Grupo 3: Carpianos

Llamados también huesos de la muñeca, son 8 huesos, que se encuentran en la base de la mano y unidos a los huesos metacarpianos, ellos son los que permiten la movilidad de la muñeca, en la figura 1.4 se muestran cada uno de dichos huesos.



Figura 1. 4: Huesos carpianos(Saldin, 2015)

1.3 Estructura muscular

Los músculos de la mano se encuentran divididos en tres principales grupos, los primeros se los denomina intrínsecos y son los responsables de los movimientos de la mano, los siguientes son los interóseos y lumbricales que son partes del primero, pero por su complejidad se los estudia por separado. Estos grupos se dividen a su vez de acuerdo a las acciones que realizan de la siguiente forma:

1.3.1 Primer grupo.

El primer grupo es el principal y se los denomina músculos intrínsecos como se indica en la figura 1.5, son los responsables de generar los movimientos de flexión y extensión de la mano, así como los de aducción y abducción.

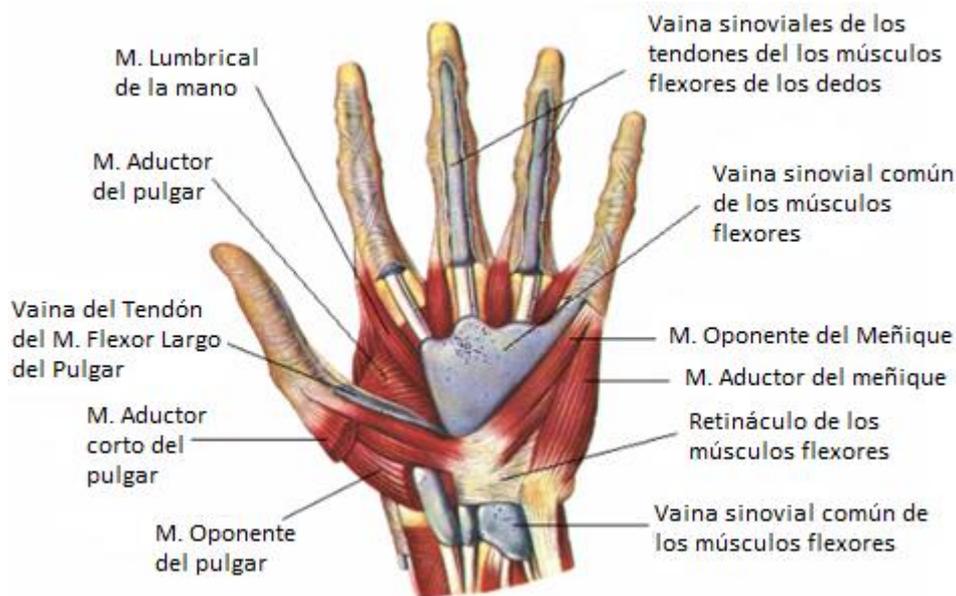


Figura 1. 5: Músculos intrínsecos de la mano(López, 2015).

1.3.2 Segundo grupo.

Son aquellos músculos situados entre los metacarpianos y se los denominan Músculos interóseos, los cuales a su vez se subdividen en: 4 interóseos dorsales y 4 interóseos palmares.

1.3.3 Tercer grupo.

Se originan en el tendón del flexor común de los dedos y terminan en el tendón del extensor común de los dedos, sus acciones principales son:

- Flexión de las metacarpo-falángicas
- Extensión de las inter-falángicas

1.4 Tipos de movimientos

El principal movimiento que realizan las articulaciones de los dedos de la mano, a excepción del pulgar es el de flexo – extensión, como se muestra en la figura 1.6. Adicional a este movimiento podemos encontrar a aquellos basados en la abducción y aducción con usos limitados en función de su grado de rotación (García, 2015).

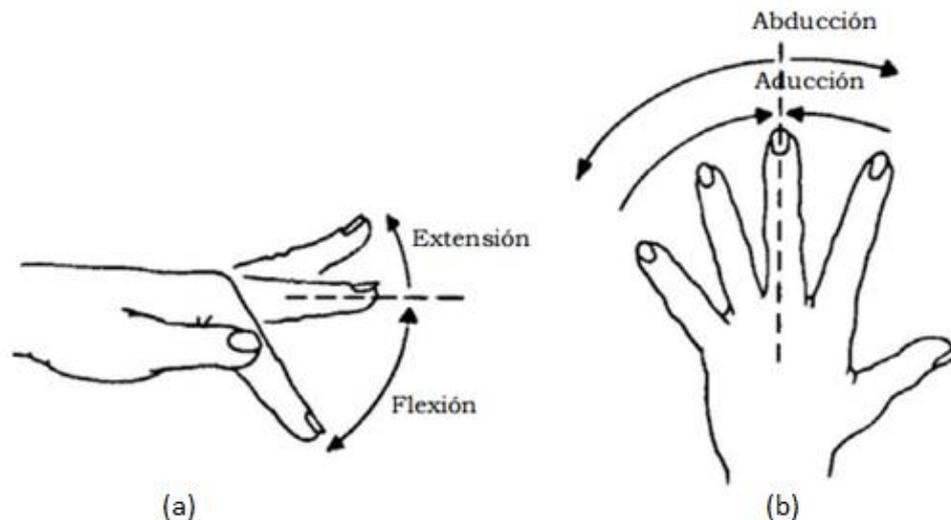


Figura 1. 6: (a) Movimientos trocleares,(b)Movimientos de rotación fisiológica (García, 2015).

1.4.1 Flexión

El movimiento de flexión, es aquel en el cual las articulaciones metacarpo-falángicas (MCF) e inter-falángica proximal (IFP) que participan en él, aumentan su ángulo de apertura linealmente, desde el índice al meñique sin incluir el dedo pulgar(García, 2015).

1.4.2 Extensión

Es aquel que habiendo alcanzado una flexión completa denominada flexión palmar de 0 ò 180 grados a nivel de las articulaciones de los dedos, se da un incremento de ángulo que no supera los 20 grados, logrando una apertura mayor que incluyendo la apertura de flexión (Huraroto, 2014).

En la tabla 1.1 se muestra la relación de la extensión y flexión que se da en función del grado de apertura de las articulaciones de la mano, así como el movimiento activo total (MAT), el cual es la suma de la flexión y la extensión que se producen en las articulaciones MCF, IFP e inter-falángica distal (IFD).

Tabla 1. 1. Ángulos de flexión – Extensión de las articulaciones la mano (García, 2015).

ARTICULACIONES	FLEXIÓN	EXTENSIÓN
Metacarpofalángica (MCF)	90°	-20°
Interfalángica proximal (IFP)	100°	0
Interfalángica distal (IFD)	35°	0
(MAT)	225°	-20° = 205°

1.5 Tipos de Agarres

En la vida cotidiana la mano humana ejecuta varios tipos de agarre para la sujeción de objetos con el fin de realizar diferentes tareas. Naiper (1956) clasificó los tipos de agarres en agarres de fuerza y agarres de precisión.

Sin embargo, (Skinner, 1975) realiza su clasificación mediante 6 agarres básicos mostrados en la figura 1.11, los cuales son: (a) cilíndrico, (b) puntual, (c) palmar, (d) lateral, (e) esférico y (f) gancho.

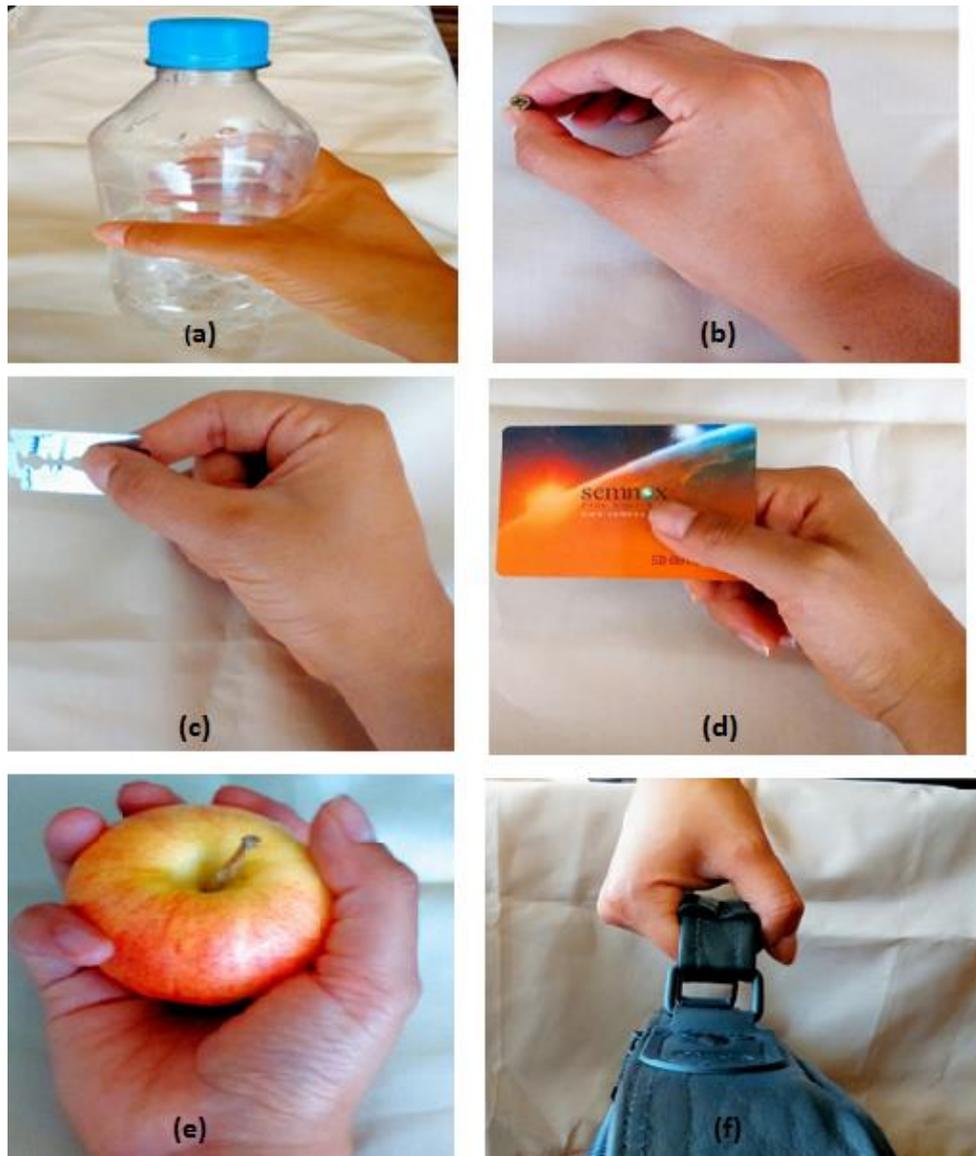


Figura 1. 7: Tipos de agarres: (a) Cilíndrico, (b) Puntual, (c) Palmar, (d) Lateral, (e) Esférico, (f) Gancho

1.6 Mecanismos

1.6.1 Trenes de engranajes

Los trenes de engranajes son medios mecánicos utilizados para transmitir movimiento entre dos ejes conectados entre sí como se muestra en la figura 1.7. Es un sistema complejo pero adaptativo que trasfiere el movimiento de un sistema a otro, así como el sentido y ángulo del giro (Alopezro, 2010).

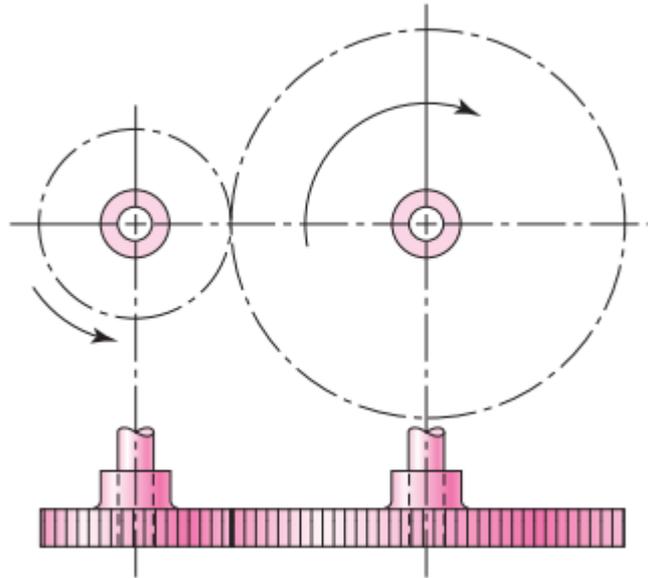


Figura 1. 8: Trenes de engranes rectos((Shigley, 2010)

1.6.2 Mecanismos de cuatro barras

Según (Pinto Linares, 2007) el mecanismo de cuatro barras constituye un sistema formado por tres barras móviles y una cuarta fija, como se observa en la figura 1.8, las barras están unidas por medio de nudos articulados y los constituyen los siguientes eslabones:

Eslabón tierra.- Se mantiene fijo (Eslabón 1).

Eslabón de entrada.- Es el eslabón por el que ingresa el movimiento (Eslabón 2).

Eslabón acoplador.- Conecta los dos pivotes móviles (Eslabón 3).

Eslabón seguidor.- Conecta el pivote móvil al pivote de tierra (Eslabón 4).

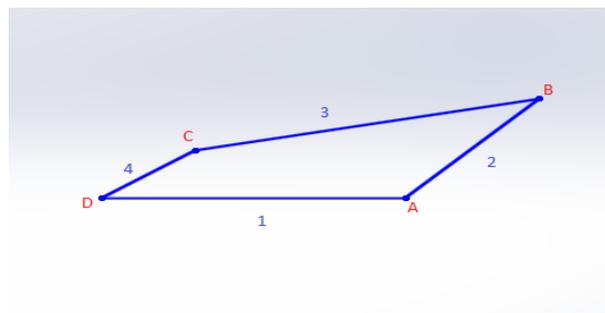


Figura 1. 9 Mecanismo de cuatro barras

1.6.2.1 Criterio de Gruebler.

La ecuación del Gruebler sirve para calcular los grados de libertad por eslabonamientos planos conectados mediante uniones comunes en los mecanismos. Se calcula mediante la ecuación 1.1.

Ecuación 1. 1 Fórmula para el cálculo de los grados de libertad (Myszka, 2012)

$$M = 3(n - 1) - 2j_p - j_h$$

Donde M son los grados de libertad, n el número total de eslabones en el mecanismo, j_p el número de pares cinemáticos de un grado de libertad y j_h el número de pares cinemáticos de dos grados de libertad.

1.6.2.2 Criterio de Grashof.

Se usa para predecir el comportamiento de rotación de un mecanismo de 4 barras, basado en las longitudes de los eslabones (Myszka, 2012). La ecuación 1.2, muestra la condición a cumplirse.

Ecuación 1. 2 Criterio para mecanismo manivela-balancín (Myszka, 2012)

$$l_3 + l_4 < l_1 + l_2$$

Donde l_1 , l_2 , l_3 y l_4 son las longitudes de los eslabones que conforman el mecanismo.

1.7 Actuadores

1.7.1 Servomotores

Los servomotores son dispositivos mecánicos de accionamiento similar a los motores pero de menor tamaño, como se muestra en la figura 1.9, se los considera de alto nivel en lo referente a control, precisión, torque y posición. Su control es mediante pulsos eléctricos de intermitencia e intensidad específica, que son procesados para el cumplimiento de tareas que no requieran un alto torque (Cobo, 2010).



Figura 1. 10 Ejemplos de servomotores(Cobo, 2010).

1.7.2 Motores DC

Este tipo de motores convierten la energía eléctrica en energía mecánica, gracias a un rotor móvil con imanes en sus paredes, un estator fijo y un sistema de bobinas, que transforman las cargas eléctricas actuantes en campos de fuerza para obtener un movimiento cinético rotacional en su eje y energía mecánica gracias al mismo (Bueno, 2013). En la figura 1.10 se observan las partes constitutivas de este tipo de motores.

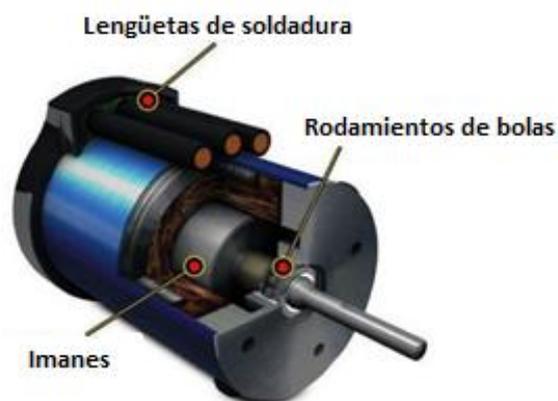


Figura 1. 11 Motores DC tipo brushes(Bueno, 2013).

1.8 Resorte de torsión

Un resorte de torsión es un elemento de máquina que permite aplicar un par de torsión (Shigley, 2010, p.534), almacena energía mecánica generando una fuerza que equidista del eje de las espiras como se muestra en la figura 1.12.

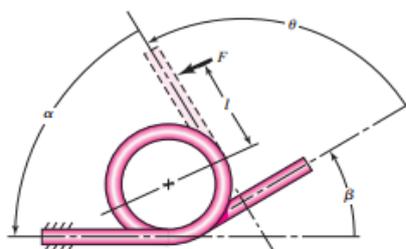


Figura 1. 12 Resorte de torsión (Shigley, 2010).

La razón del resorte k en unidades de par de torsión/radian es:

Ecuación 1. 3 Fórmula para el cálculo de la constante en un resorte de torsión (Shigley, 2010)

$$K = \frac{(E * d^4)}{64 * N * D}$$

Donde K es la Razón del resorte, d el diámetro del alambre, D = diámetro del mandril o eje, N = número de espirales activos y E el módulo de elasticidad.

Ecuación 1. 4 Fórmula para el cálculo de la fuerza en resortes de torsión (Shigley, 2010)

$$F = K \frac{\theta}{r}$$

Donde F es la fuerza ejercida por el resorte de torsión, θ es la deflexión angular del cuerpo de espiras y r es la distancia del centro al punto de apoyo.

De la ecuación 1.4 se obtiene que el momento ejercido en el resorte de torsión, como se muestra mediante la ecuación 1.5.

Ecuación 1. 5 Fórmula para el cálculo del momento en resortes de torsión (Shigley, 2010)

$$M = K * \theta$$

CAPÍTULO II

METODOLOGÍA

2.1 Revisión bibliográfica

Es necesario conocer los estudios más recientes y los métodos empleados en el diseño de prótesis de mano según investigaciones realizadas, trabajos de grado y publicaciones, para conocer aspectos relevantes como transmisiones, materiales, actuadores y sistemas que mejor se adapten al medio en el cual se está desarrollando éste proyecto.

La conformación general del prototipo requiere el estudio de la anatomía de la mano humana, características importantes como tipos de movimientos y tipos de agarres; así como los ángulos de flexión y extensión de las articulaciones de los dedos.

2.2 Características de la persona de estudio

Se estableció al Sr. Alexander Aguilar, estudiante de la carrera de fisioterapia y participante del proyecto de investigación de Biomecánica como persona de estudio, con el propósito de aproximar las dimensiones del prototipo de prótesis de mano a las medidas antropométricas de su mano derecha, para replicar la mano izquierda, la cual carece debido a una malformación congénita. Usando un calibrador digital de marca Mitutoyo con un error instrumental de $\pm 0.02\text{mm}$ y resolución de $0,01\text{mm}$, se tomaron medidas de cada una de las falanges de los dedos y la palma, dichas medidas se redondearon a números enteros, las cuales son usadas como referencia para las dimensiones finales del prototipo.

2.3 Selección de mecanismos

Mediante el estudio del estado del arte se determinan los mecanismos en base a situaciones resueltas con resultados favorables. Los mecanismos más usados en prótesis de mano para flexo - extensión de los dedos son: cadenas de engranajes, poleas y mecanismos de cuatro barras (simple e invertido).

Entre los aspectos importantes para seleccionar los mecanismos tanto para la flexo – extensión de los dedos, como para la transmisión de potencia de los actuadores hacia los dedos; se considera que pueda realizar los ángulos necesarios para cumplir las trayectorias requeridas y se delimiten a las medidas antropométricas planteadas.

2.4 Síntesis dimensional

Ya elegido el mecanismo, es necesario realizar la síntesis dimensional de mecanismos de cuatro barras para determinar las longitudes de los eslabones, se considera la antropometría indicada en la figura 2.1, para que el mecanismo no exceda las dimensiones de la falange proximal de los dedos.

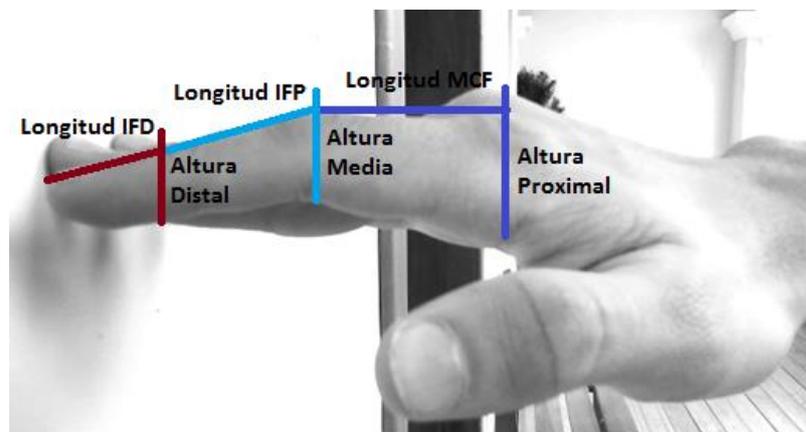


Figura 2. 1 Parámetros de medición del dedo del sujeto de estudio

La figura 2.2 muestra los ángulos de flexión de las articulaciones de los dedos de la mano humana, los cuales son usados como referencia para la conformación del mecanismo de cuatro barras, para que éste cumpla la trayectoria requerida.

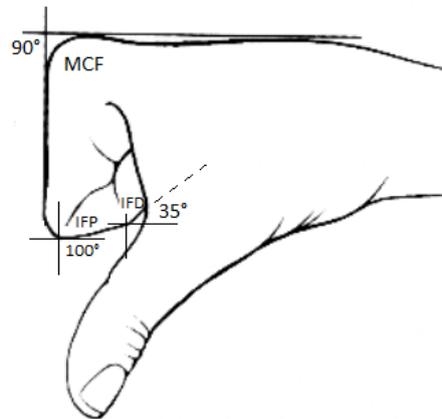


Figura 2. 2 Ángulos de flexión de los dedos (García, 2015)

Para el mecanismo de transmisión de potencia de los actuadores hacia los dedos es importante que las articulaciones metacarpofalángicas puedan rotar 90 grados como se muestra en la figura 2.3 y no supere las medidas de la antropometría de la palma del sujeto de estudio.

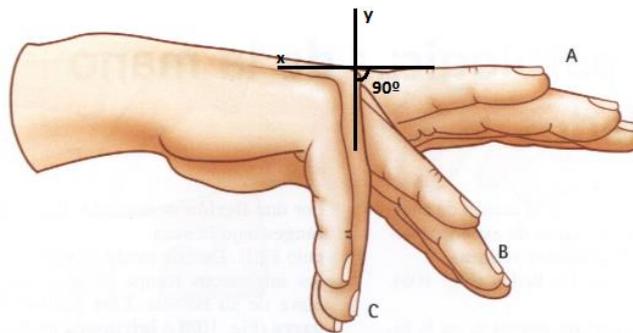


Figura 2. 3 Ángulo de rotación de la articulación metacarpofalángica (Kapandji, 2010).

2.4.1 Diseño del mecanismo Manivela – Balancín para los dedos.

El procedimiento gráfico para la conformación del mecanismo es el siguiente:

1. Se coloca el pivote O del balancín como se muestra en la figura 2.4.

2. Se elige una longitud para L_2 , la cual está restringida por el dimensionamiento espacial del mecanismo, es decir la altura del dedo, en éste caso es 12mm y constituye el eslabón de entrada.
3. Se dibujan las dos posiciones del balancín, separadas por el ángulo de desplazamiento θ_1 , de momento puede ser un ángulo cualquiera momentáneamente, ya que en la síntesis gráfica del mecanismo se determinará cuantos grados son necesarios para la trayectoria.
4. Construir una línea M desde una de las posiciones extremas del eslabón de entrada en cualquier dirección.
5. Desde la otra posición extrema del eslabón de entrada se dibujó la línea N , a inclinada un ángulo β en relación a la línea M .
6. La intersección entre las líneas M y N forman el pivote A en la gráfica de la manivela.
7. La longitud entre el pivote A y el pivote O constituye la longitud L_1 .
8. Se une el punto C del eslabón de entrada con el punto B del eslabón de salida, obteniendo así el eslabón acoplador del mecanismo de 4 barras, en la figura 2.4 se puede observar la conformación del mecanismo.

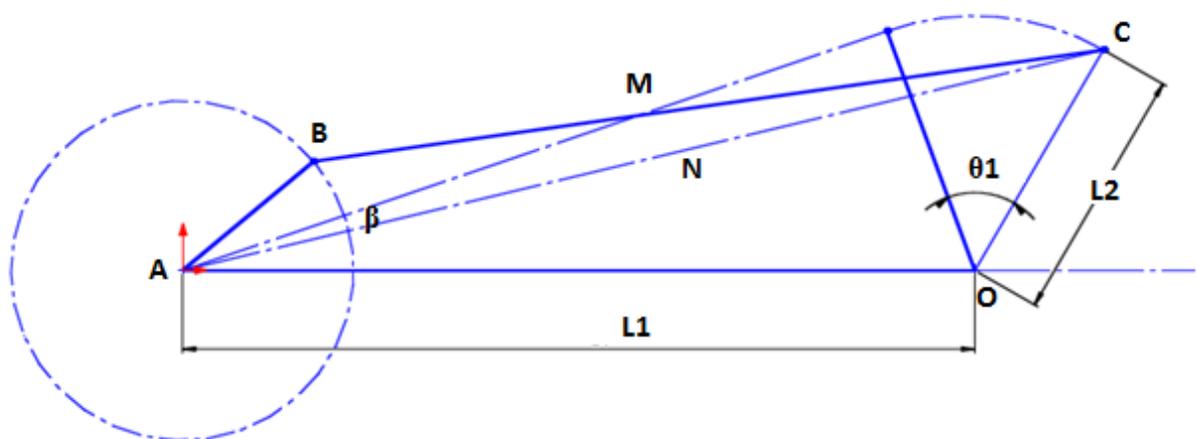


Figura 2. 4 Diseño del mecanismo manivela balancín

2.5 Resorte de torsión

Un resorte de torsión está ubicado en la unión de las falanges media y proximal de los dedos: índice, medio, anular y meñique, con el objetivo de regresar los dedos a su posición original cuando los dedos ya no se encuentran flexionados. Para calcular el torque ejercido en el resorte de torsión se realizó la medición de fuerza ejercida en uno de los extremos del resorte mediante un dinamómetro de 1 N de capacidad y $\pm 0,3\%$ de precisión, variando el ángulo de apertura (figura 2.5).

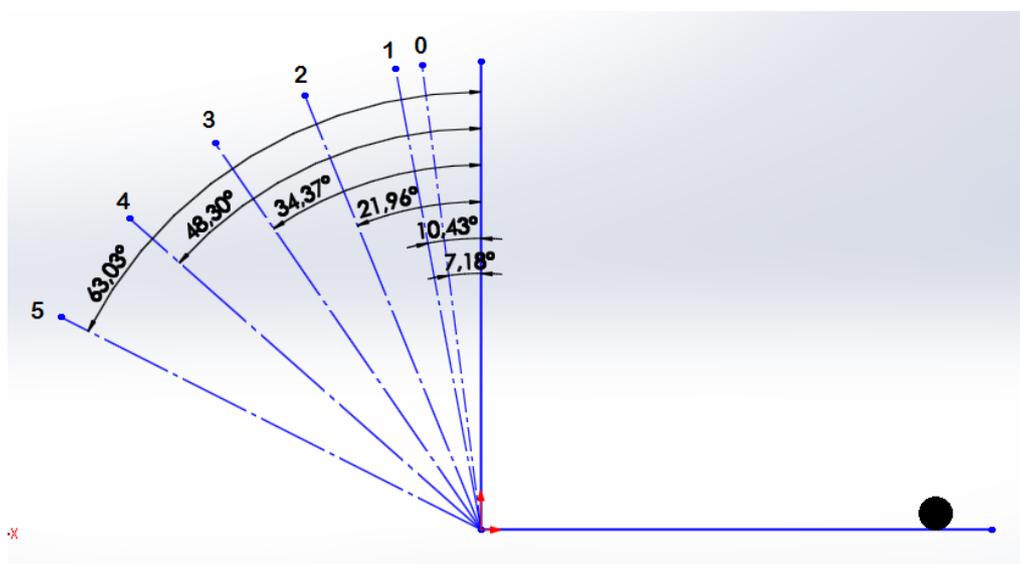


Figura 2. 5 Grafico de la posiciones del resorte.

2.6 Selección de materiales

El estudio preliminar de materiales usados para prótesis de mano es necesario en la elección del material para la construcción del prototipo.

Se utiliza un software que contiene las características de una extensa variedad de materiales con el fin de elegir un material ligero, resistente y económico. Adicionalmente un parámetro importante a considerar en ésta elección es la facilidad de manufactura, para garantizar la adecuada fabricación del prototipo.

2.7 Diseño mecánico del prototipo de prótesis de mano

Se realiza el diseño CAD del prototipo mediante un software 3D, considerando la antropomorfía de la mano humana, las dimensiones correspondientes al sujeto de estudio, los espacios para los actuadores y demás elementos electrónicos.

2.8 Simulación del prototipo

Debido a la complejidad morfológica de los elementos que constituyen el prototipo de prótesis de mano a analizar, se hace necesario el uso de una herramienta computacional basada en el método de elementos finitos para determinar las deformaciones máximas en las principales partes que conforman el prototipo, así como los desplazamientos y factor de seguridad.

2.9 Construcción y ensamblaje del prototipo

Finalizado el diseño del prototipo y las simulaciones respectivas de los principales elementos constitutivos, se procede a manufacturar cada una de las piezas mediante impresión tridimensional, posteriormente cada pieza impresa pasa por un post proceso de pulido y acabados para garantizar la apariencia estética del prototipo. Se ensamblan cada uno de los dedos con sus respectivos resortes, pernos y pasadores, los cuales previamente han sido cortados y pulidos a la medida exacta requerida, cada dedo se inserta en la palma mediante pasadores. Se acopla los actuadores y transmisiones en la palma de la mano para componer el prototipo total de prótesis.

2.10 Pruebas de validación

Mediante la implementación del sistema electrónico y de control para el prototipo de prótesis de mano (Ortega, 2017); se realizan las pruebas de validación del prototipo en cuanto a agarres de precisión y fuerza con diferentes objetos.

CAPÍTULO III

RESULTADOS

Se detallan los resultados alcanzados en esta investigación de acuerdo a la arquitectura conseguida en su diseño, al análisis de esfuerzos y el factor de seguridad con el que se manufacturó. También se detalla los costos directos e indirectos invertidos en éste proyecto.

3.1 Requisitos de diseño

- El prototipo de prótesis debe aproximar sus medidas a la antropometría de la mano de Alexander Aguilar (sujeto de estudio).
- Debe realizar dos tipos de agarres: cilíndrico y puntual.
- En el agarre cilíndrico el prototipo debe ser capaz de realizar una sujeción de objetos de hasta 300 g con 50 mm de diámetro aproximadamente y en el agarre de puntual debe sujetar objetos pequeños con precisión.
- Debe ser capaz de rotar las articulaciones metacarpofalángicas de los dedos: índice, medio, anular y meñique 90 grados para cumplir con los ángulos de flexión de los dedos en la anatomía humana.
- Se debe minimizar el uso de actuadores en el prototipo a tres, que son los necesarios para realizar los agarres propuestos.

3.2 Medidas antropométricas de la persona de estudio

Longitudes falángicas (mm)

Tabla 3. 1. Longitud de las articulaciones de la mano derecha del sujeto de estudio.

	Índice	Medio	Anular	Meñique	Pulgar
Proximal	40	46	43	40	41
Medio	28	36	26	23	-
Distal	27	29	25	23	34

Altura Falángica (mm)

Tabla 3. 2 Altura de las articulaciones tomadas de la mano derecha del sujeto de estudio

	Índice	Medio	Anular	Meñique	Pulgar
Proximal	17	17	16	13	15
Medio	15	14	13	13	-
Distal	12	14	11	12	17

Anchura Falángica (mm)

Tabla 3. 3 Anchura de las articulaciones tomadas de la mano derecha del sujeto de estudio.

	Índice	Medio	Anular	Meñique	Pulgar
Proximal	17	16	15	15	17
Medio	16	17	15	15	-
Distal	15	15	15	13	19

Longitud de la palma= 113,8 mm

Anchura de la palma= 82 mm

Grosor de la palma=36 mm (la parte del pulgar) / 28 mm (la parte de los dedos)

3.3 Dimensiones del mecanismo

Se conformó el mecanismo de cuatro barras para flexo – extensión de los dedos: índice, medio, anular y meñique considerando las longitudes y alturas medias de las falanges proximales, las cuales se muestran en la figura 3.1. Mediante la síntesis dimensional se obtuvo el mecanismo mostrado en la figura 3.2.

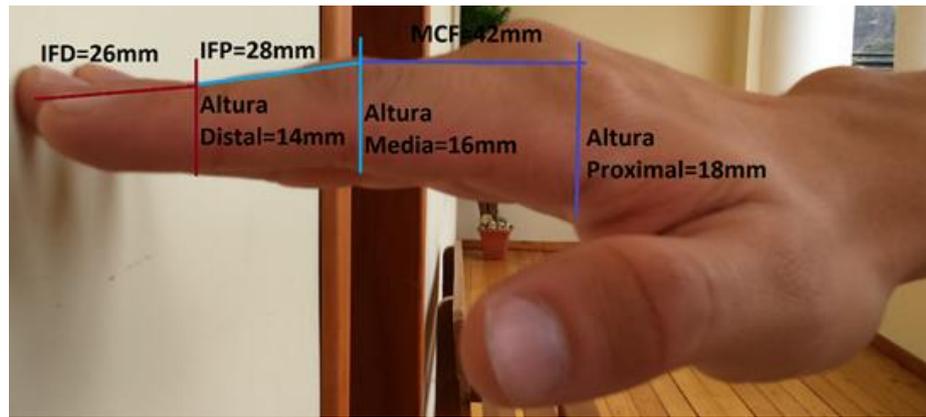


Figura 3. 1 Medidas aproximadas del dedo del sujeto de estudio.

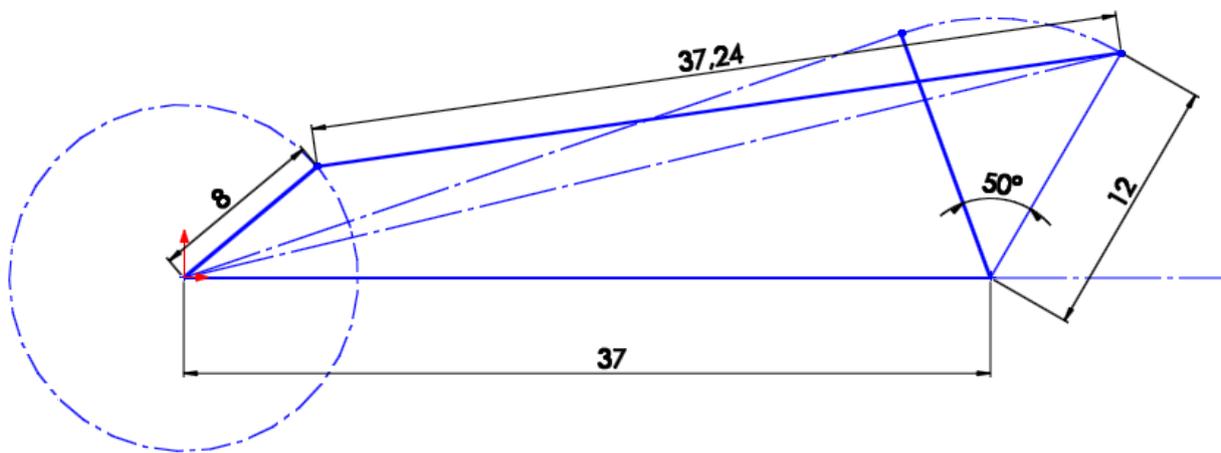


Figura 3. 2 Medidas aproximadas del dedo del sujeto de estudio

3.4 Verificación de la ley de Grashof

Haciendo uso de la ecuación 1.2, se demuestra que el mecanismo cumple el criterio de Grashof en la configuración manivela – balancín, como se observa en la figura 3.3, lo que garantiza el correcto funcionamiento del mismo.

$$l3 + l4 < l1 + l2$$

$$34,95mm + 7,58mm < 36,4mm + 12mm$$

$$42,53mm < 48,4mm$$

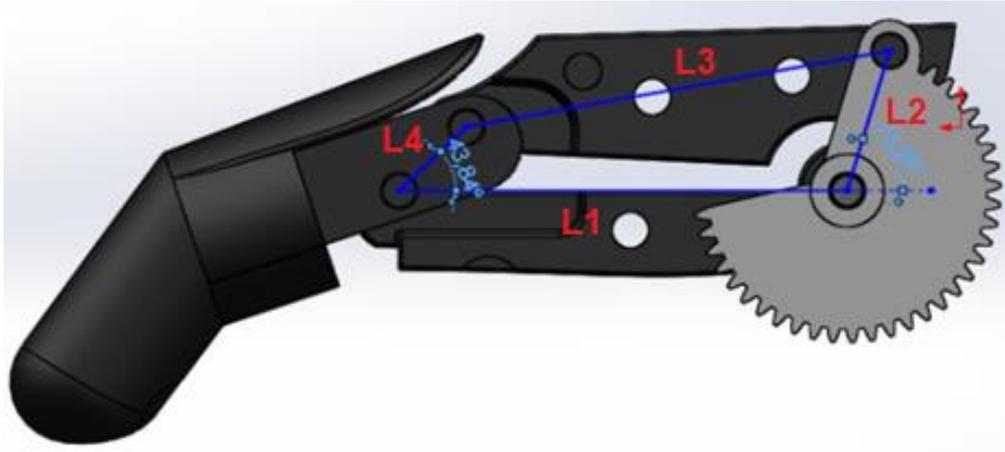


Figura 3. 3 Mecanismo de 4 barras dimensionado en el dedo.

3.5 Análisis de posición

Se realiza una síntesis de tres posiciones para determinar la trayectoria y ángulos de flexión del mecanismo, para cumplir con las funcionalidades propuestas.

Utilizando un software para mecanismos, se observa la trayectoria que describe el mecanismo durante el cierre del dedo, cuando se bloquea la falange proximal, así como los ángulos de las articulaciones mencionados en la tabla 1.1, como se indica en la figura 3.4.

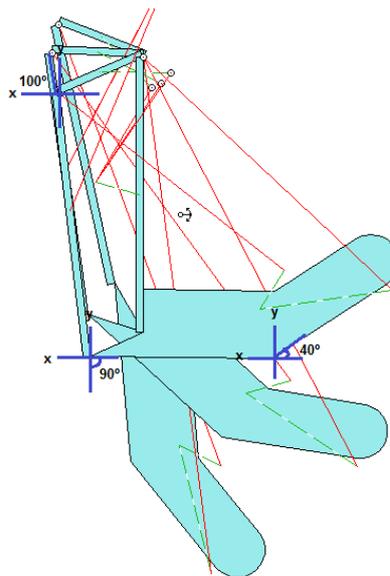


Figura 3. 4 Posición inicial del dedo índice con el mecanismo de 4 barras.

3.6 Análisis de la torsión del resorte

El resorte de torsión, que en su posición de reposo se encuentra con una apertura de 90° , al colocarse en el dedo llega a los $153,03^\circ$ aproximadamente como se muestra en la figura 3.5, por lo que el ángulo de deflexión θ es $63,03^\circ$.

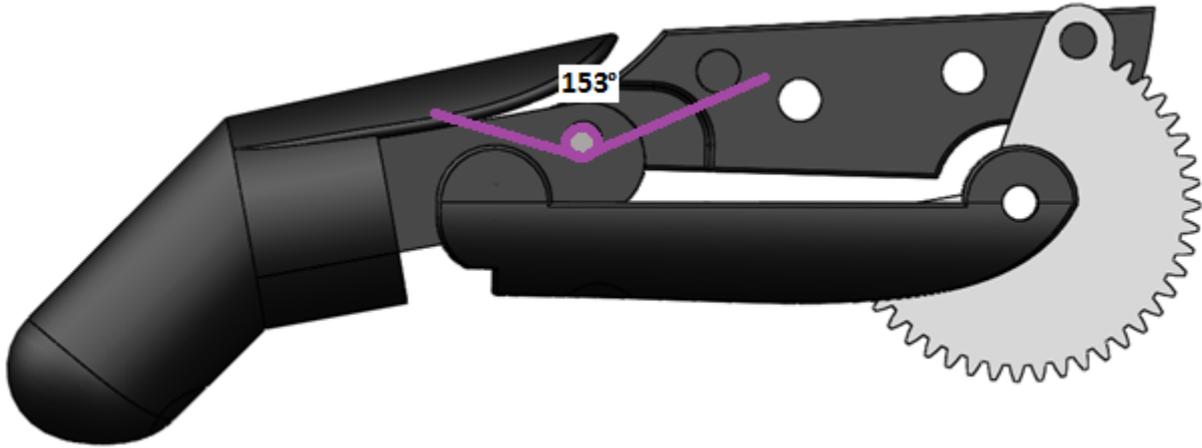


Figura 3. 5 Resorte de torsión en el dedo índice.

Mediante la medición experimental ejercida a los diferentes ángulos de apertura (tabla 3.4), se logró obtener la fuerza F , el módulo de elasticidad E y la constante K del resorte a los $63,03^\circ$, haciendo uso de la ecuación 1.3.

Tabla 3. 4 Posiciones del resorte a distintos ángulos.

Posición	Θ	Θ	Fuerza [N]	K	E
	[$^\circ$]	[rad]		$\left[\frac{\text{Nmm}}{\text{rad}}\right]$	$\left[\frac{\text{N}}{\text{mm}^2}\right]$
0	7,18	0,13	-	-	-
1	10,43	0,18	-	-	-
2	21,96	0,38	0,1	5,26	22037,08
3	34,37	0,59	0,23	7,8	32644,76
4	48,3	0,84	0,31	7,38	30904,38
5	63,03	1,1	0,35	6,36	26644,83

Finalmente se realizó el cálculo del momento ejercido en el resorte de torsión mediante la ecuación 1.5. Donde $K = 6,36 \frac{Nmm}{rad}$ y el ángulo de deflexión es $63,03^\circ$.

$$M = K * \theta$$

$$M = 0,006 N.m$$

El momento M en el resorte de torsión es poco significativo, por lo que no se afecta la potencia impulsada por los actuadores hacia los dedos.

3.7 Materiales

En la Figura 3.6 se hace una relación de resistencia vs precio. Los materiales posibles son: ABS (Acrilonitrilo, Butadieno Estireno), aleaciones de aluminio, aleaciones de magnesio, acero al carbono medio, poliuretano, acero inoxidable, entre otros.

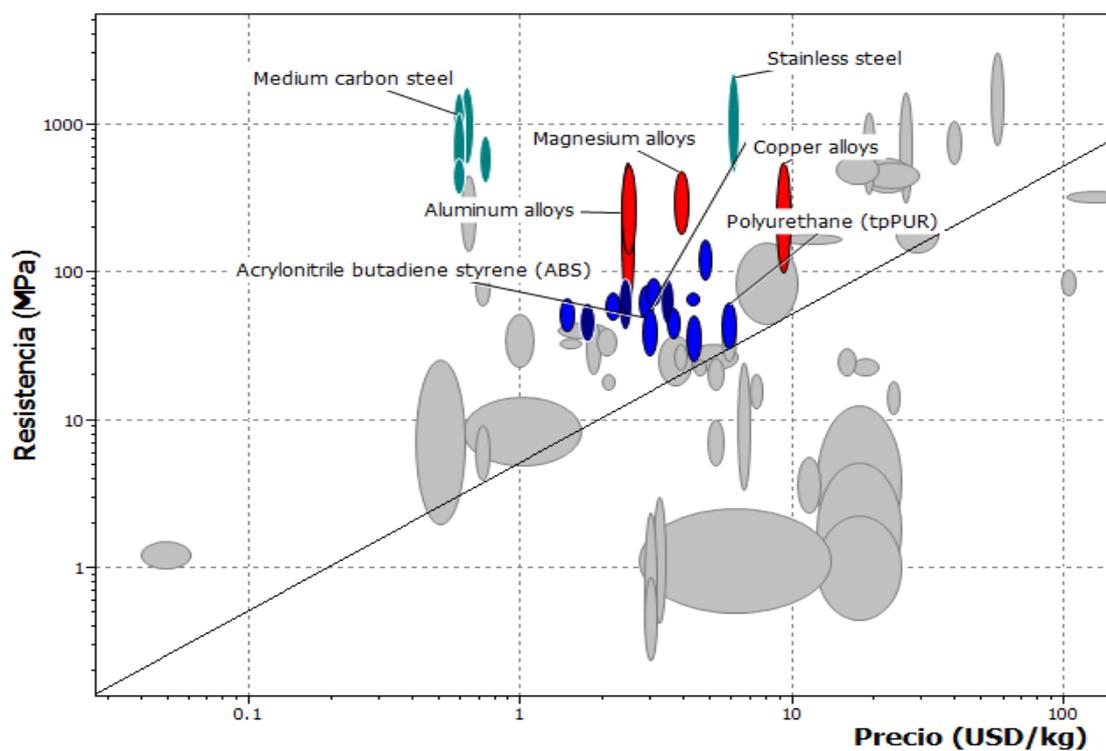


Figura 3. 6 Resistencia Vs Precio.

Se busca minimizar el peso y aumentar la resistencia del prototipo por lo que las aleaciones de aluminio, magnesio y ABS son opciones aceptables como lo muestra la figura 3.7.

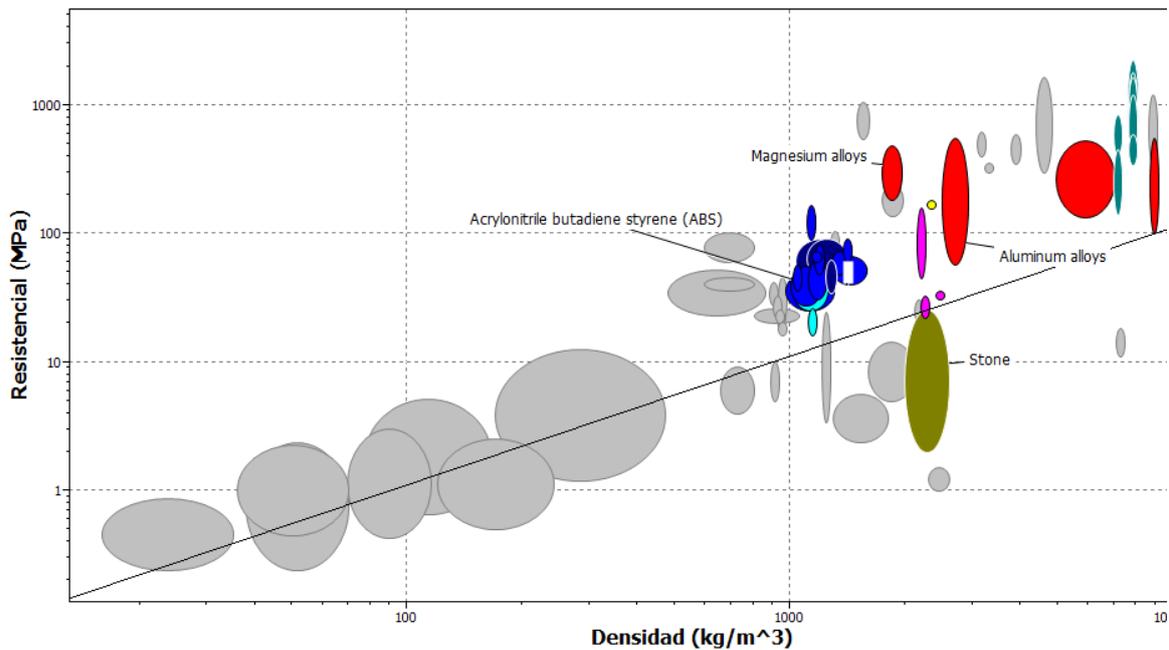


Figura 3. 7 Resistencia Vs densidad.

Los materiales posibles en cuanto a resistencia, precio y ligereza son: aleaciones de aluminio, magnesio, poliuretano, acero inoxidable y ABS, sin embargo considerando la facilidad de manufactura del material se selecciona el ABS. En la tabla 3.5 se presentan las propiedades del ABS.

Tabla 3. 5 Propiedades generales y mecánicas del ABS

Propiedades	ABS
Módulo elástico	2000 N/mm ²
Densidad	1020 Kg/m ³
Límite de tracción	30 N/mm ²
Límite de compresión	
Límite elástico	31 Mpa
Calor específico	1386 J/Kg*k
Resistencia a la flexión	48 Mpa
Resistencia a la tracción	45 Mpa

3.8 Diseño mecánico del prototipo

En la figura 3.8 se muestra el diseño global del prototipo, con los mecanismos de transmisión, actuadores y partes constitutivas del mismo.

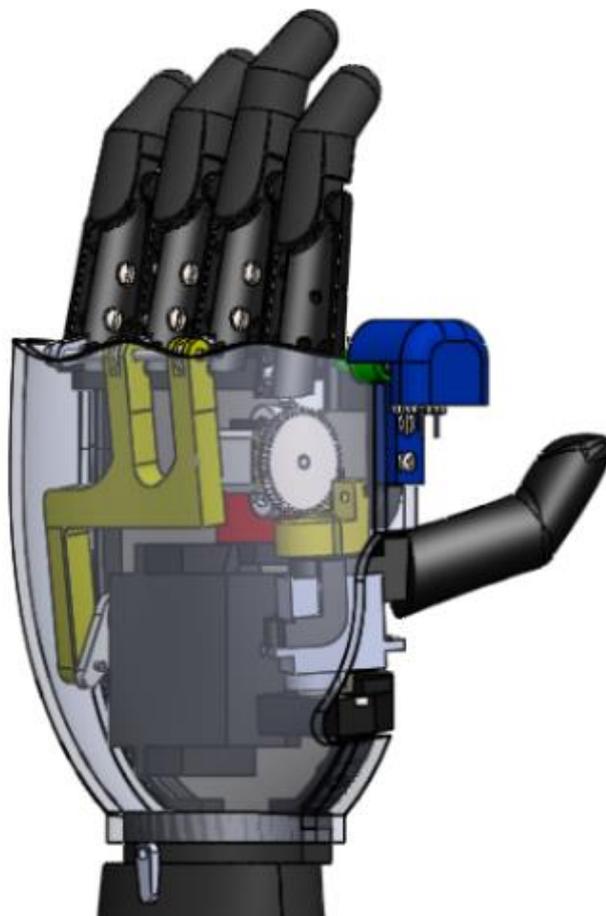


Figura 3. 8 Vista isométrica del prototipo del prototipo de prótesis de mano.

3.8.1 Diseño de los dedos.

Una vez configurado el mecanismo de los dedos que cumple los ángulos de flexión requeridos, se considera las medidas antropométricas como base para realizar el CAD (diseño asistido por computadora). Para los dedos: índice, medio, anular y meñique, se obtiene un promedio de las dimensiones de cada articulación y en base a ello se realiza el diseño, considerando las medidas de la articulación metacarpofalángica como iguales para los 4 dedos debido a que el mecanismo para la flexo-extensión es el mismo.

En las tablas 3.6, 3.7 y 3.8 se hace una comparación entre las medidas antropométricas del sujeto de estudio y las medidas aproximadas en el CAD.

Tabla 3. 6 Longitud de las articulaciones en mm

Articulación	Medidas Antropométricas	Medidas CAD
Proximal	44	42,25
Media	26,75	28
Distal	26	26

Tabla 3. 7 Altura de las articulaciones en mm

Articulación	Medidas Antropométricas	Medidas CAD
Proximal	18,25	19,28
Media	16,5	17,57
Distal	13,5	14,85

Tabla 3. 8 Anchura de las articulaciones en mm

Articulación	Medidas Antropométricas	Medidas CAD
Proximal	15,75	15,1
Media	15,75	14,98
Distal	14,5	14,26

La figura 3.9 muestra la vista isométrica de un dedo, mientras que en la figura 3.10 se observan las partes constitutivas que conforman cada de las partes de los dedos.



Figura 3. 9 Vista isométrica del dedo.

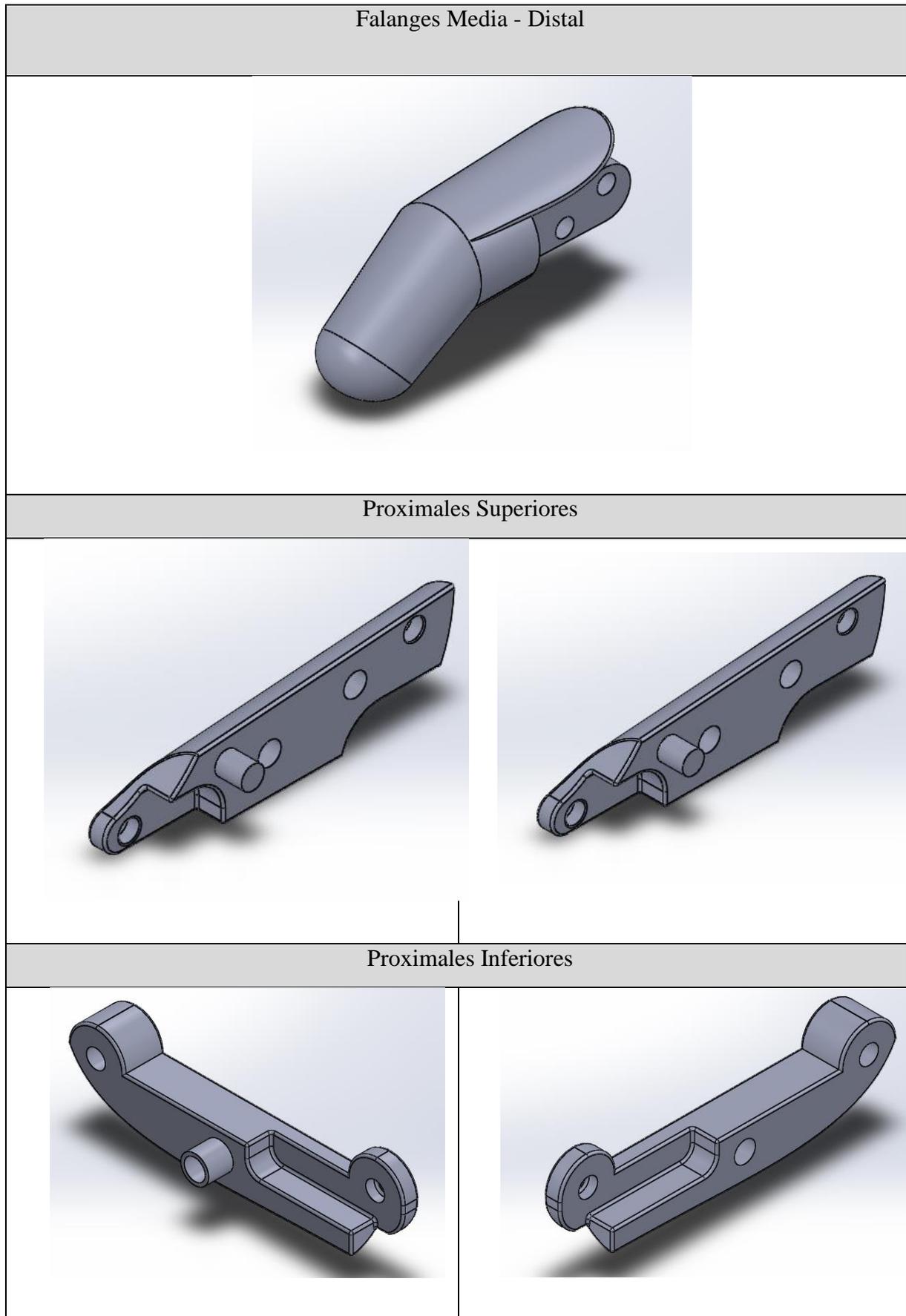


Figura 3. 10 Diseño de las partes constitutivas de los dedos.

Una vez ensambladas las piezas que constituyen de los dedos se comprobó la trayectoria y los ángulos de flexión como se muestra en la figura 3.11

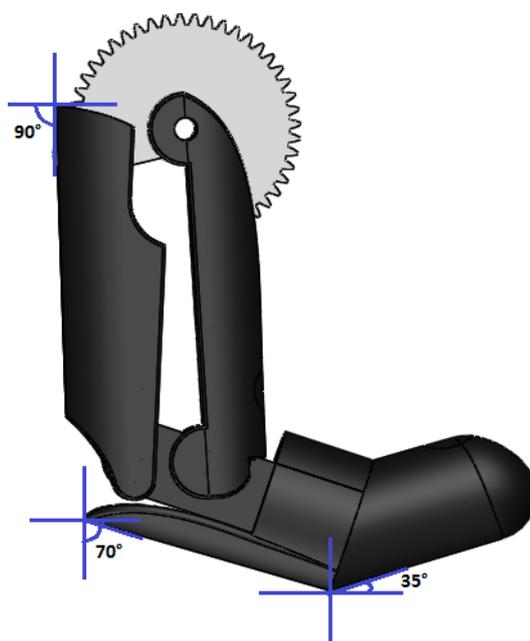


Figura 3. 11 Ángulos de flexión en los dedos del prototipo.

Considerando el movimiento activo total de 205° (tabla 3.9) de la fisiología de la mano humana como el 100%, lo cual es la suma total de la flexión y extensión de las articulaciones, el porcentaje de MAT que realiza la sumatoria en las articulaciones de cada dedo del prototipo es 95,12%.

Tabla 3. 9 Tabla comparativa del MAT de los dedos.

Articulaciones	ARTICULACIONES MANO HUMANA		Prototipo de prótesis	
	Flexión	Extensión	Flexión	Extensión
Metacarpofalángica (MCF)	90°	-20°	90°	0
Interfalángica proximal (IFP)	100°	0	70°	0
Interfalángica distal (IFD)	35°	0	35°	0
(MAT)	205°		195°	

3.8.2 Diseño del pulgar.

El pulgar está diseñado para girar en su propio eje y hacer la oposición con respecto al dedo índice para hacer el agarre de puntual. Está conformado por el dedo y un soporte para colocar el micro servo como se observa en la figura 3.12. En las tablas 3.10, 3.11 y 3.12 se hace una comparación de las medidas antropométricas y las del diseño computacional.

Tabla 3. 10 Longitud de las articulaciones en mm

Articulación	Medidas Antropométricas	Medidas CAD
Proximal	41	40
Distal	34	33

Tabla 3. 11 Altura de las articulaciones en mm

Articulación	Medidas Antropométricas	Medidas CAD
Proximal	15	20
Distal	17	18

Tabla 3. 12 Anchura de las articulaciones en mm

Articulación	Medidas Antropométricas	Medidas CAD
Proximal	17	20
Distal	19	20,5



Figura 3. 12 Diseño del dedo pulgar.

3.8.3 Diseño de la palma inferior.

La palma inferior se encuentra conformada por una base con sus respectivos soportes para los ejes de los dedos y alojamientos para los servomotores como se indica en la figura 3.12. Se considera las medidas antropométricas de la persona de estudio para su dimensionamiento y diseño, como se muestra en la tabla 3.13.

Tabla 3. 13. Dimensiones de la palma inferior en mm

	Medidas Antropométricas	Medidas CAD
Longitud	113,8	113,5
Anchura	82	93,6

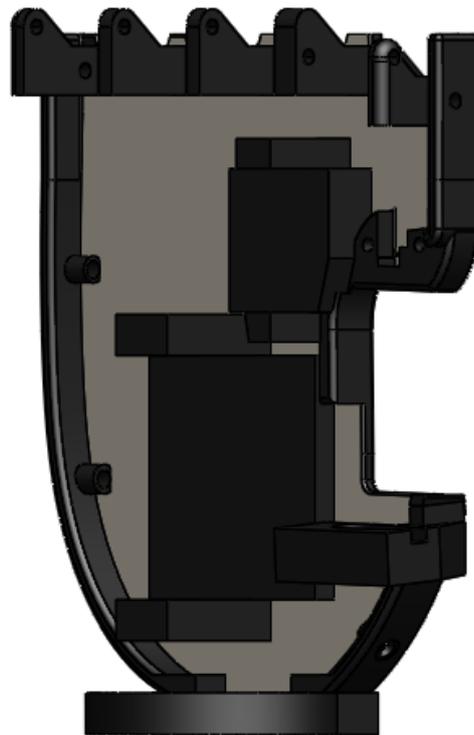


Figura 3. 13 Diseño de la palma inferior

Luego de haber realizado varios diseños y modificaciones en el CAD se logró conseguir un prototipo de prótesis teóricamente capaz de realizar un agarre cilíndrico con un diámetro máximo de 62,7mm y agarres de pinza como se indica en la figura 3.14.

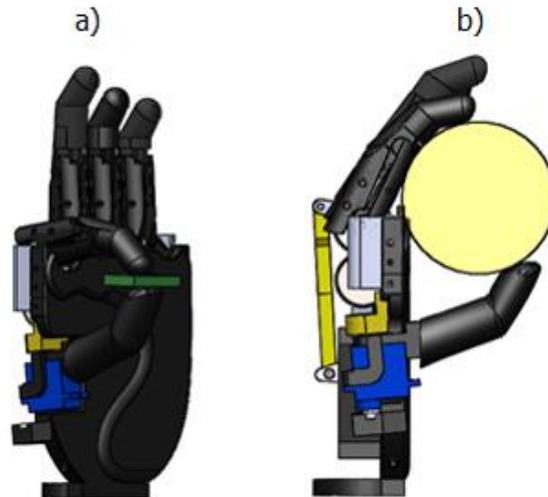


Figura 3. 14 Agarres que realiza el prototipo: a) agarre de pinza, b) cilíndrico.

3.9 Análisis estático

Se analiza el sistema de manera estática, ya que al agarrar el prototipo un objeto, el sistema de control hace que los actuadores se mantengan energizados manteniendo el torque aplicado al momento de la sujeción, por lo que se considera como una estructura; debido a que la masa de los eslabones que componen los mecanismos de los dedos es considerablemente reducida para éste proyecto se decide no aplicar la segunda ley de Newton $F=m \cdot a$, ya que se asume la masa como despreciable.

3.9.1 Cálculo de las fuerzas normales.

En la figura 3.15 se observa el esquema de la vista superior del agarre cilíndrico de un objeto de vidrio de 63,7mm de diámetro y 500 g, siendo éstos los parámetros máximos de diámetro y masa; así como los ángulos formados en los puntos de contacto de los dedos índice y pulgar con dicho objeto con respecto al centro.

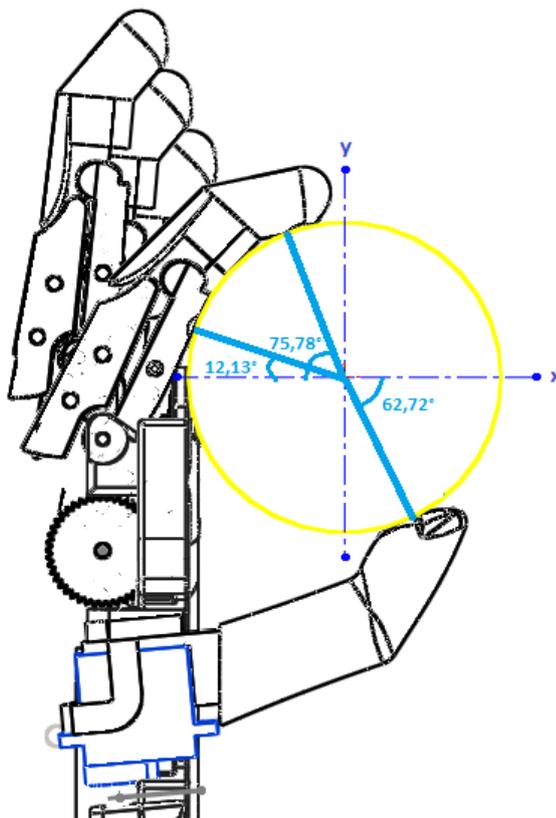


Figura 3. 15 Puntos de contacto de los dedos al agarrar un objeto cilíndrico.

Las fuerzas que interactúan en los puntos de contacto de los dedos índice y pulgar se muestran en el diagrama de la figura 3.16.

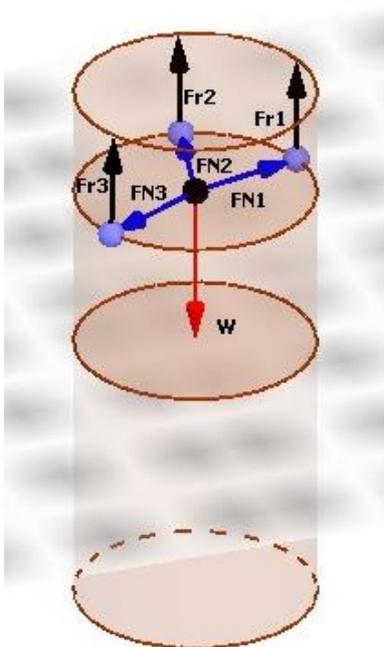


Figura 3. 16 Diagrama de las fuerzas aplicadas a los puntos de contacto.

La fuerza de rozamiento se opone a la caída del cuerpo que levantará el prototipo; en este caso se usa el coeficiente de rozamiento de silicona – vidrio, el cual es 0,3. Para la sumatoria de las fuerzas de rozamiento Fr , es necesario determinar el peso del objeto, el cual es calculable mediante la Ecuación 3.1.

Ecuación 3. 1 Fórmula para el cálculo del peso (Norton, 2008)

$$\begin{aligned}
 W &= m * g \\
 W &= 500g * 9,8 \frac{m}{s^2} \\
 W &= 4,9N \\
 \sum F_z &= 0 \\
 Fr_1 + Fr_2 + Fr_3 - W &= 0 \\
 \sum F_y &= 0 \\
 -Fr_1 \cos 75.78^\circ - Fr_2 \cos 12.13^\circ + Fr_3 \cos 62.72^\circ &= 0 \\
 \sum F_x &= 0 \\
 Fr_1 \sin 78.78^\circ + Fr_2 \sin 12.13^\circ - Fr_3 \sin 62.72^\circ &= 0 \\
 Fr_1 = 1,99N \quad Fr_2 = 0.58N \quad Fr_3 = 2.31N
 \end{aligned}$$

Ecuación 3. 2 Fórmula para el cálculo de la fuerza de rozamiento (Schaum, 2010)

$$\begin{aligned}
 FN_1 &= \frac{Fr_1}{0.3} & FN_2 &= \frac{Fr_2}{0.3} & FN_3 &= \frac{Fr_3}{0.3} \\
 FN_1 &= 6.66 N & FN_2 &= 1.95 N & FN_3 &= 7.72 N
 \end{aligned}$$

3.9.2 Cálculo del torque del motor para el dedo índice

En la figura 3.18 se muestra el diagrama de cuerpo libre DCL del mecanismo de 4 barras para flexo-extensión de los dedos ubicado en la falange proximal, como se muestra en la figura 3.17. Se aplica la fuerza normal FN_1 en el eslabón que conforma la falange distal para encontrar el momento M_{CD} en el eslabón 2.

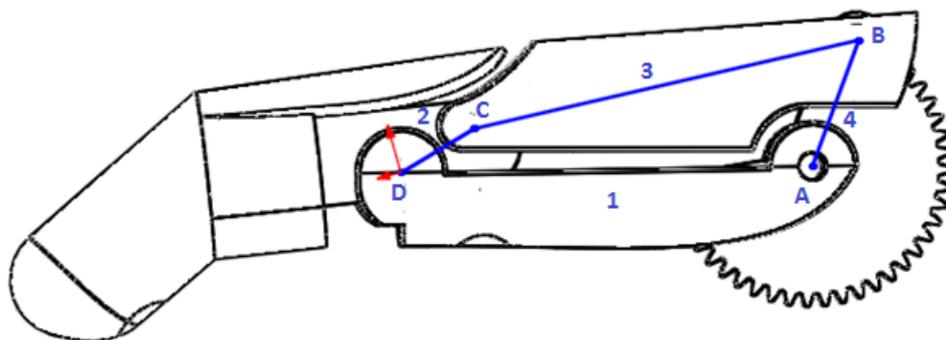


Figura 3. 17 Diagrama de cuerpo libre para el mecanismo de 4 barras de los dedos.

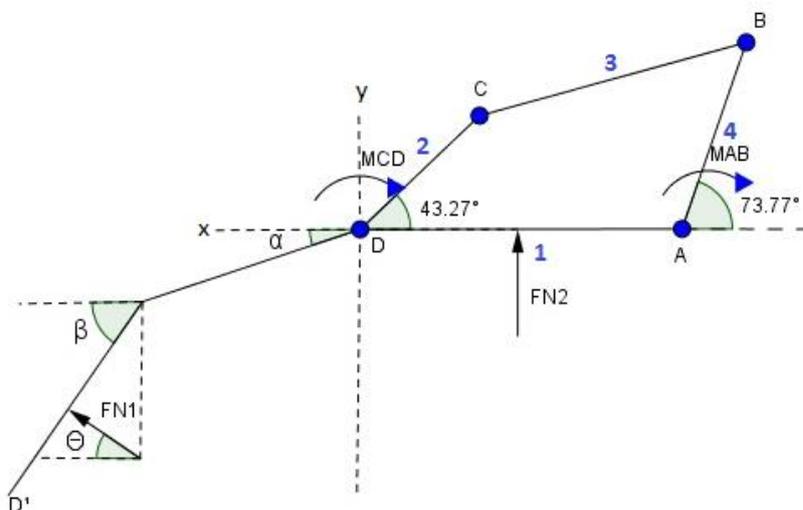


Figura 3. 18 Diagrama de cuerpo libre para el mecanismo de 4 barras de los dedos.

El momento M_{CD} , del eslabón 2 se usa para determinar el momento M_{AB} en el eslabón 4, el cual se conecta directamente a la transmisión del dedo índice para determinar el torque del motor.

$$\sum M_{CD} = 0$$

$$F_{CD} = 6,66[N](-\cos \theta + \sin \theta)$$

$$F_{CD} = 6,66[N](-\cos 35,93^\circ i + \sin 35,93^\circ j)$$

$$F_{CD} = -5,4 i [N] + 3,1 j [N]$$

$$\overline{CD} = -(17,14 \cos \alpha + 11,63 \cos \beta) - (17,14 \sin \alpha + 11,63 \sin \beta)$$

$$\overline{CD} = -(17,14 \cos 19,54^\circ i + 11,63 \cos 54,07^\circ i) - (17,14 \sin 19,54^\circ j + 11,63 \sin 54,07^\circ j)$$

$$\overline{CD} = -23i - 15,15j$$

Ecuación 3. 3. Fórmula para el cálculo del momento (Norton, 2008)

$$\overline{M}_{CD} = \overline{CD} \times F$$

$$\overline{M}_{CD} = \begin{bmatrix} \vec{i} & \vec{j} \\ -23 & -15,15 \\ -5,4 & 3,1 \end{bmatrix}$$

$$M_{CD} = 0,15 [Nm]$$

En las figuras 3.17, 3.18, 3.19, 3.20 se muestran los DCL para el cálculo de las reacciones.

- **Eslabón 1**

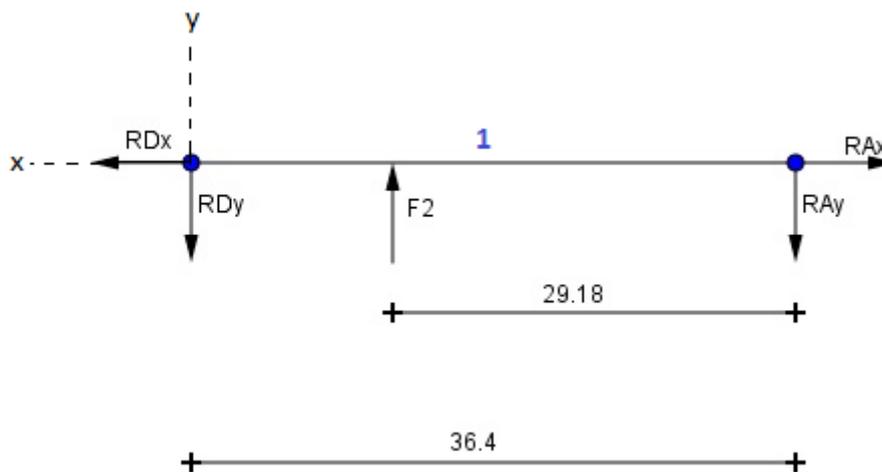


Figura 3. 19 Diagrama de cuerpo libre del eslabón 1.

$$\sum F_x = 0$$

$$-R_{DX} + R_{AX} = 0$$

$$R_{AX} = -29,57 N$$

$$\sum M_{AB} = 0$$

$$R_{DY}(36,4mm) - 1,95N(29,18mm) = 0$$

$$R_{DY} = 1,56N$$

$$\sum F_y = 0$$

$$-R_{DY} - R_{AY} + 1,95N = 0$$

$$R_{AY} = 0,39N$$

- **Eslabón 3**

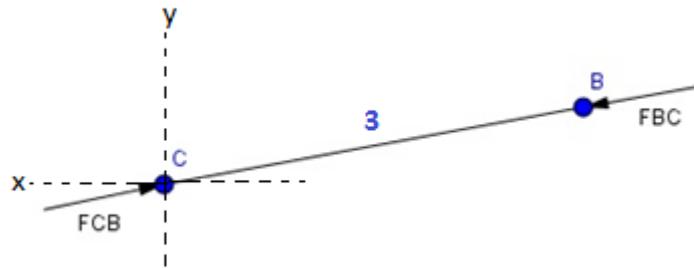


Figura 3. 20 Diagrama de cuerpo libre del eslabón 3.

$$\sum F_x = 0$$

$$R_{BX} = R_{cX} = -29,57N$$

$$R_{By} = R_{cy} = 0,39N$$

- **Eslabón 2**

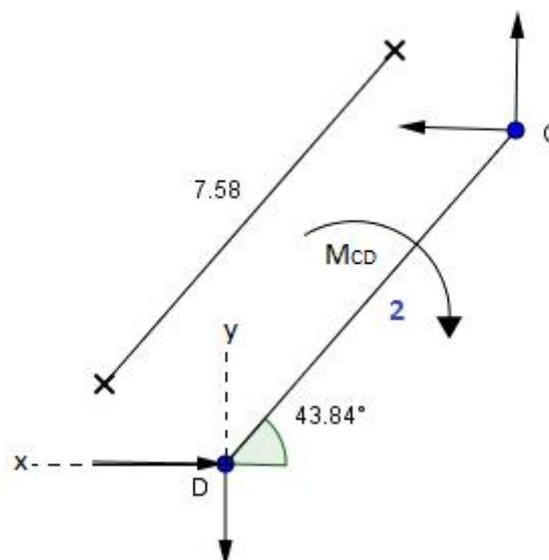


Figura 3. 21 Diagrama de cuerpo libre del eslabón 2.

$$\sum F_x = 0$$

$$-F_{CBX} - R_{DX} = 0$$

$$R_{DX} = -29,57$$

$$\sum F_y = 0$$

$$-F_{CBY} + R_{DY} = 0$$

$$R_{DY} = -0,39N$$

$$\sum MD = 0$$

$$\overline{R_{CD}} \times \overline{R_{Cx}} = -153,11\vec{k}$$

$$\overline{R_{CD}} = 7,58(\cos 43,87^\circ i + \sin 43,87^\circ j)$$

$$\overline{R_{CD}} = (5.46i + 5.25j)$$

$$\begin{bmatrix} i & j \\ 5.46 & 5.25 \\ -R_{Cx} & R_{Cy} \end{bmatrix} = -153.11\vec{k}$$

$$(5.46)(0.39) + R_{Cx}(5.25) = -153.11$$

$$R_{Cx} = -29.57N$$

$$\sum Fx = 0$$

$$R_{DX} = R_{Cx} = -14.57N$$

- **Eslabón 4**

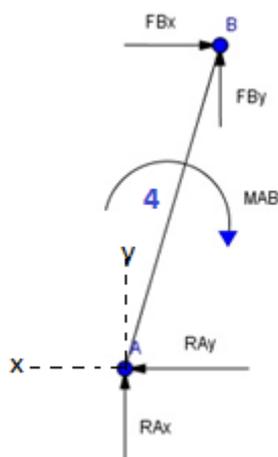


Figura 3. 22 Diagrama de cuerpo libre del eslabón 4.

$$\sum M_{AB} = 0$$

$$\vec{M}_{AB} - R_{AB} \times R_B = 0$$

$$\vec{M}_{AB} = \begin{bmatrix} i & j \\ 12 \cos 73,77^\circ & 12 \sin 73,77^\circ \\ -29.37 & 0.39 \end{bmatrix}$$

$$\vec{M}_{AB} = 0,342 [N.m]$$

$$\sum F_x = 0$$

$$R_{AX} = R_{BX} = -14.57N$$

$$\sum F_y = 0$$

$$R_{AY} = R_{BY} = 0.39N$$

Relación de Engranés

Para la transmisión de potencia del actuador del dedo índice hacia el mecanismo de flexo – extensión se usa una cadena de engranes rectos (figura 3.23).

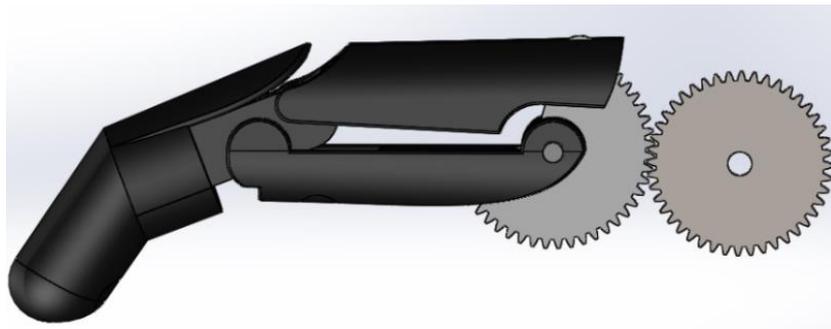


Figura 3. 23 Diagrama de cuerpo libre del eslabón 4.

Para el cálculo de la relación de transmisión de la cadena de engranes mencionada, se usa la ecuación 3.3.

Ecuación 3. 4 Fórmula para el cálculo de la relación de engranes

$$i = \frac{z_{ent}}{z_{sal}}$$

$$i = \frac{48}{52}$$

$$i = 0,92$$

En la figura 3.24 se observa el actuador para el dedo índice y la ubicación en el prototipo, siendo el torque requerido el siguiente:

$$T_{motor} = i * \vec{M}_{AB}$$

$$T_{motor} = 0,92 * 0,342[Nm]$$

$$T_{motor} = 0,31[Nm]$$

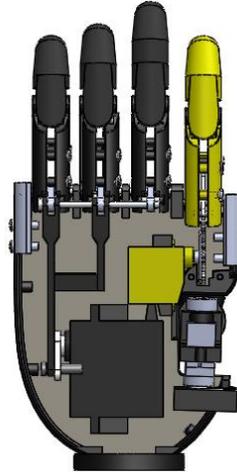


Figura 3. 24 Actuador para el dedo índice

Se selecciona un motor DC marca Pololu con las características de la tabla 3.14, principalmente porque el torque es el necesario y las dimensiones de dicho actuador son reducidas.

Tabla 3. 14 Datos del motor Pololu

Datos técnicos	
Torque aproximado	0,49 N·m
Voltaje nominal	12 V
Corriente en voltaje nominal	800 mA
Velocidad sin carga	100 RPM
Tipo de motor	Motor brushes de alta potencia
Caja de cambios	298:1

3.9.3 Cálculo del torque del motor para la transmisión en los dedos: medio, anular y meñique

Se considera el valor obtenido de torque de 0,31 N·m para el dedo índice y se multiplica este valor por tres, para hallar el torque requerido para la transmisión de potencia de los

dedos: medio, anular y meñique, obteniendo 0,93 N·m como mínimo. La figura 3.25 muestra la ubicación del actuador.

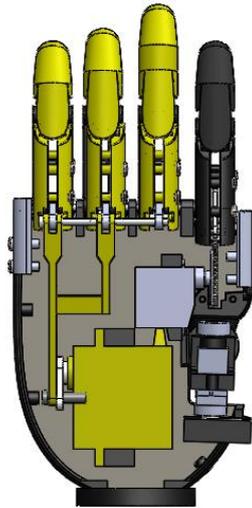


Figura 3. 25 Actuador para el mecanismo de los tres dedos.

En la tabla 3.15 se muestran los datos del servomotor de la serie Mg996r.

Tabla 3. 15 Datos del servomotor

Datos técnicos	
Torque	0,92 – 1,08N·m
Voltaje nominal	4,8 – 7,2V
Dimensiones	40,7x19,7x42,9mm
Tipo de motor	Servomotor

3.10 Método de elementos finitos

El desarrollo CAD/CAE permite tener una visión completa del prototipo en estudio, por lo que se hace uso de herramientas para determinar los desplazamientos y factor de seguridad. Este estudio utiliza la teoría de falla mediante esfuerzos combinados de von Mises, que es apropiada para materiales dúctiles; el elemento falla si el esfuerzo supera el límite elástico del material, lo cual se puede comprobar con el factor de seguridad, que debe ser mayor a 2.

3.10.1 Condiciones de borde dedo índice.

Las fuerzas aplicadas en el modelo geométrico: $F1$ y $F2$; son las fuerzas normales al dedo generadas por el agarre cilíndrico como se indica en la Figura 2.26.

$$F1 = 0,66 \text{ N}, F2 = 1,95 \text{ N}$$

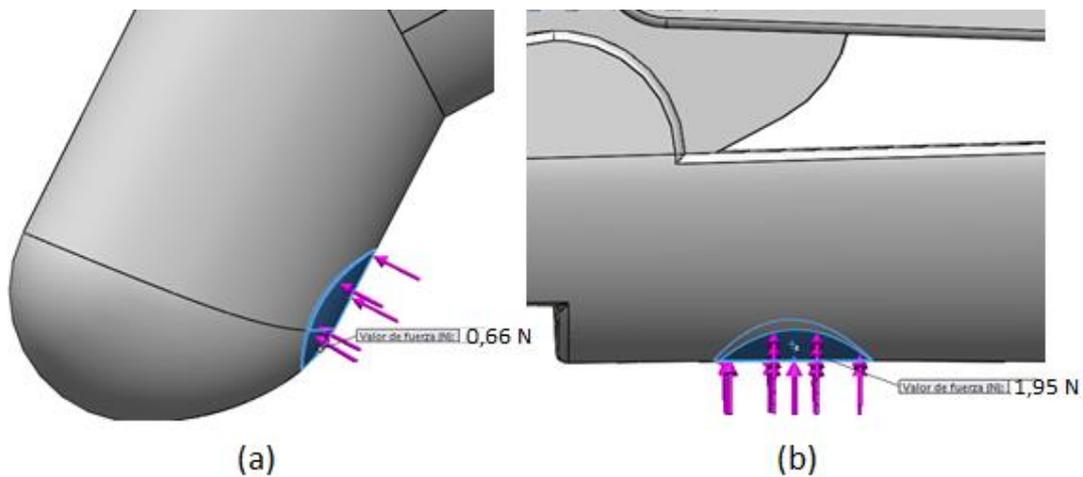


Figura 3. 26 Fuerzas aplicadas en el dedo índice: (a) Dirección y zona de aplicación de la $F1$, (b) Dirección y zona de aplicación de la $F2$

Para la simulación se realiza un empotramiento en los cilindros donde van los pasadores del engrane, que es la parte que bloquea el movimiento de todo el mecanismo de la falange proximal, como se observa en la figura 3.27.

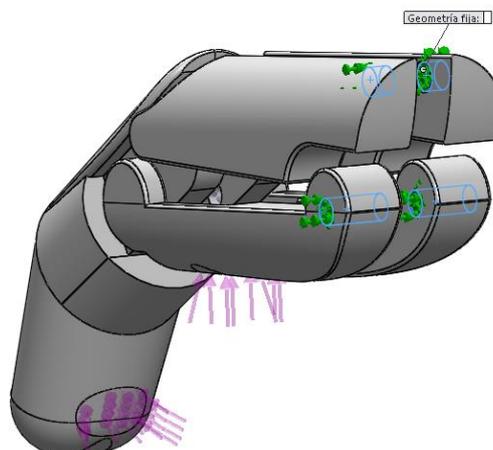


Figura 3. 27 Geometría fija aplicada en los pasadores del dedo índice.

3.10.2 Análisis de elementos finitos del dedo índice.

Una vez establecidas las condiciones de contorno, se procede a la simulación para determinar los esfuerzos que se generan en el momento del agarre en las diferentes partes constitutivas.

Así, en la figura 3.28 se puede observar que en la unión de la falange media con la falange proximal, se obtuvo un esfuerzo máximo de 4,1 MPa, lo cual es de esperarse debido a las condiciones de trabajo, ya que es el punto en el cual el elemento está sometido a mayor esfuerzo por flexión.

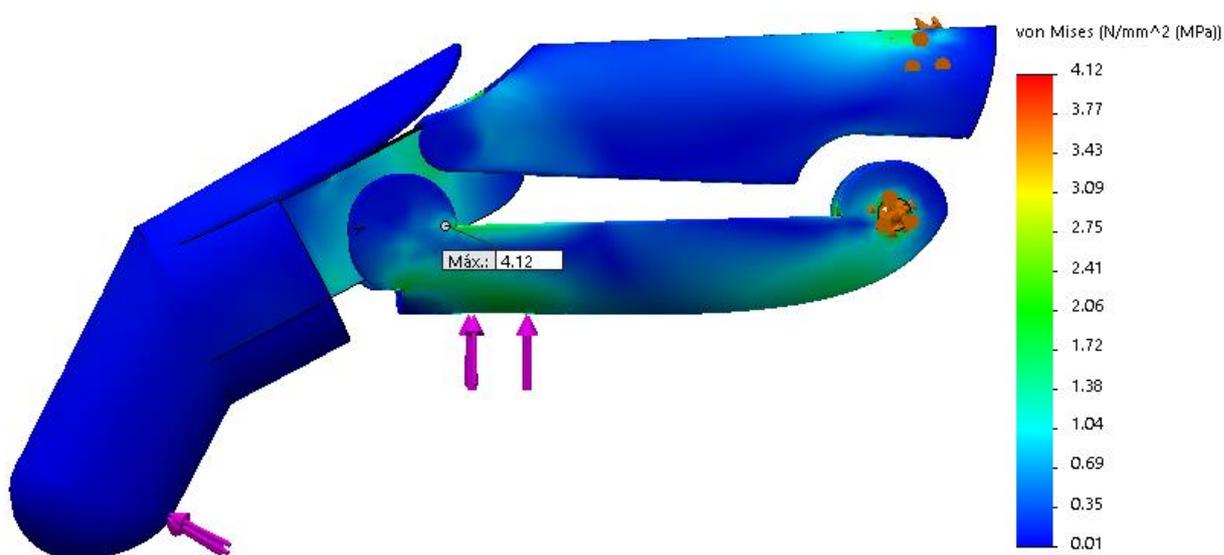


Figura 3. 28 Esfuerzo de von Mises en el dedo índice.

En la Figura 3.29 se presentan los resultados de la simulación para el factor de seguridad, obteniéndose un valor mínimo de 5,8 en la falange proximal inferior. Por lo tanto, se tiene un sobredimensionamiento debido a su antropomorfía y al proceso de manufactura que se empleó.

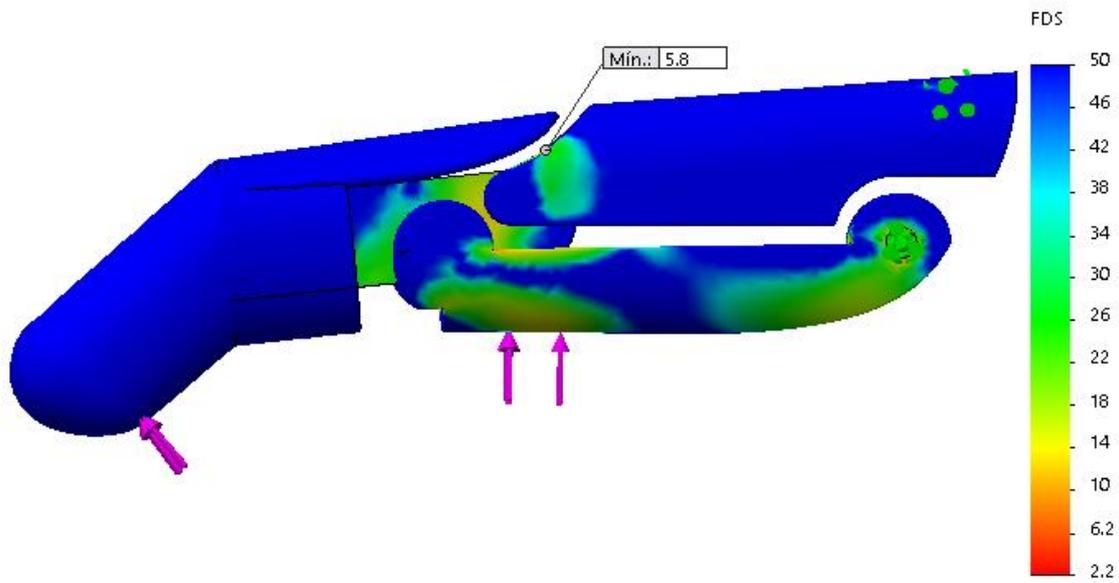


Figura 3. 29 Factor de seguridad del dedo índice.

En la Figura 3.30 se presenta los desplazamientos obtenidos en el momento del agarre, siendo máximo de 0,44 mm en la parte final de la falange distal, el cual es admisible en éste proyecto.

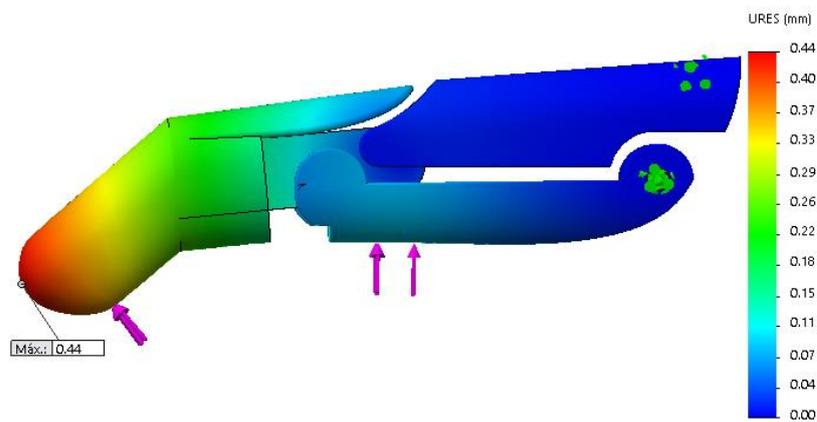


Figura 3. 30 Desplazamientos en el dedo índice

3.10.3 Condiciones de borde del dedo pulgar.

Se analizó el dedo pulgar (Figura 3.31) colocando una fuerza normal FN3 ejercida al hacer contacto con un objeto cilíndrico de 63,7mm de diámetro y 500 g de masa, calculada previamente.

$$F_3=7,72\text{N}$$

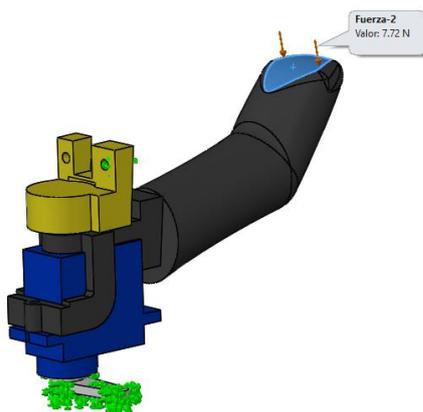


Figura 3. 31 F3 colocada en el extremo del pulgar

Se fijó los agujeros del soporte que contiene el rodamiento, que es donde van los pernos hacia la palma inferior, al igual que el acople del microservomotor, donde gira el pulgar (Figura 3.32), el cual se acopla a la palma inferior.

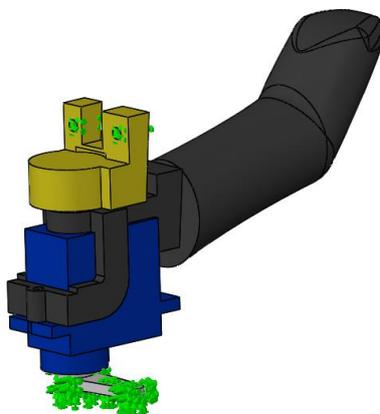


Figura 3. 32 Geometría fija en el acople del motor y pernos de la base del dedo pulgar.

3.10.4 Análisis de elementos finitos del dedo pulgar.

A través de la simulación se obtuvo un esfuerzo máximo de von Mises de 4,54 MPa, que es menor que el límite elástico que soporta el Acrilonitrilo Butadieno Estireno (ABS) que es de 31 MPa, como se muestra en la figura 3.33.

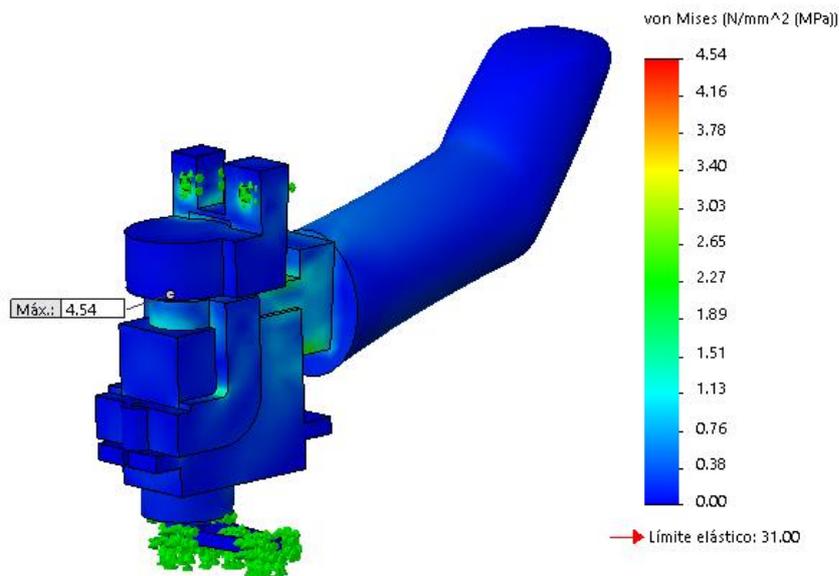


Figura 3. 33 Esfuerzo de von Mises en el dedo pulgar.

Se obtuvo un factor de seguridad mínimo de 6,83 (Figura 3.34) en la unión del pulgar con el acople del rodamiento, existiendo un sobredimensionamiento en su diseño, sin embargo es necesario debido a su antropomorfía.

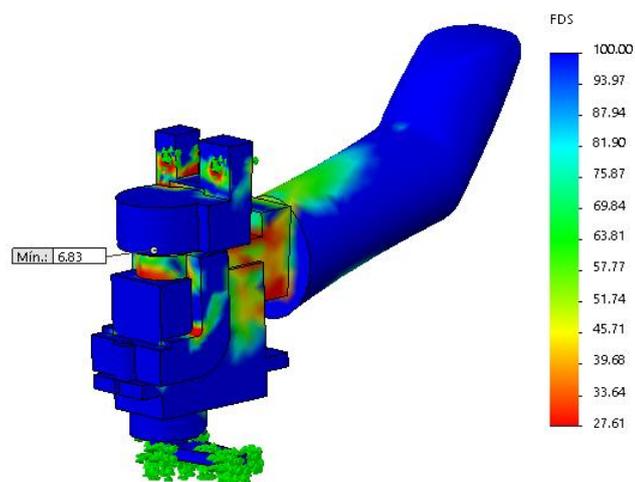


Figura 3. 34 Factor de seguridad del dedo pulgar

Se determinó un desplazamiento de 0,26 mm en la punta del dedo, donde se aplica la fuerza, como se muestra en la figura 3.35.

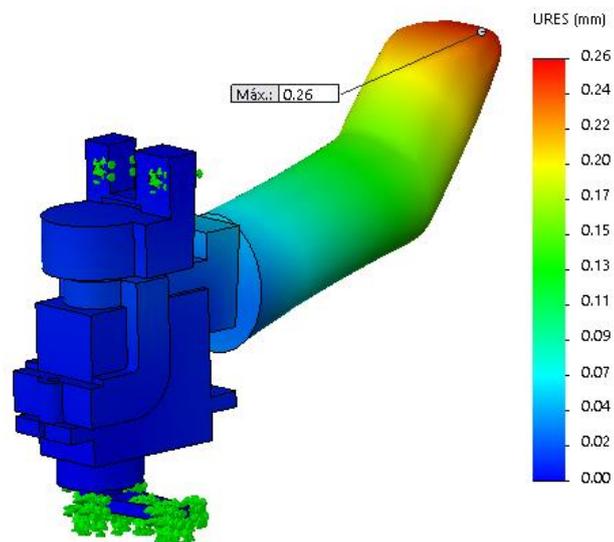


Figura 3. 35 Desplazamiento máximo del dedo pulgar

3.10.5 Condiciones de borde para la barra doble

A continuación se establecen las condiciones de borde para la barra del mecanismo accionamiento de los dedos medio, anular y meñique que se muestra en la figura 3.36.

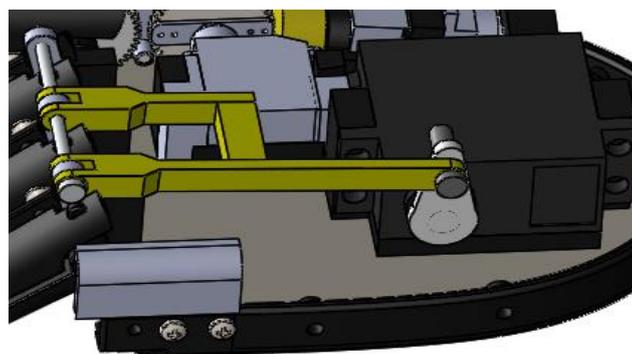


Figura 3. 36 Transmisión de potencia del servomotor a los dedos: medio, anular y meñique.

Inicialmente se calcula la fuerza F del motor a partir de su torque M , y la distancia d del acople del servomotor, dado por las especificaciones del fabricante (Figura 3.37).

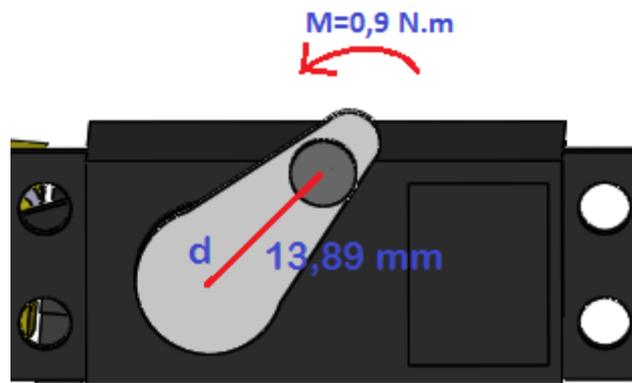


Figura 3. 37 Fuerza del servomotor

$$M = F * d$$

$$F = \frac{M}{d}$$

$$F = \frac{0,9 \text{ N.m}}{0,01389 \text{ m}}$$

$$F = 64,79 \text{ N}$$

Por lo tanto la fuerza F que ingresa a la barra es de $64,79 \text{ N}$ cuando el momento es máximo, es decir, que el acople del motor se encuentra a 90 grados como se indica en la figura 3.38, esto ocurre cuando la barra doble se ha desfasado $2,65$ grados con respecto a la horizontal.

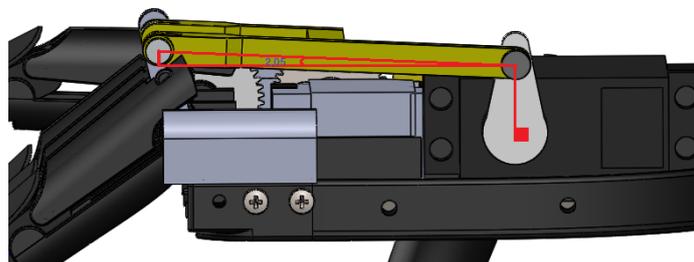


Figura 3. 38 Ángulo de desfase de la barra doble

Por lo tanto, la fuerza del motor (F_{motor}) necesaria para su accionamiento se determina por:

$$F_{motor} = \frac{F}{\cos 2,65}$$

$$F_{motor} = \frac{64,8N}{\cos 2,65}$$

$$F_{motor} = 64,86N$$

La fuerza obtenida a partir del par del motor con respecto a la inclinación de la barra doble se aplica en la cara interna del orificio que conecta a la barra doble con el servomotor y se colocan sujeciones avanzadas para caras cilíndricas donde va el pasador para los dedos como se muestra en la figura 3.39.

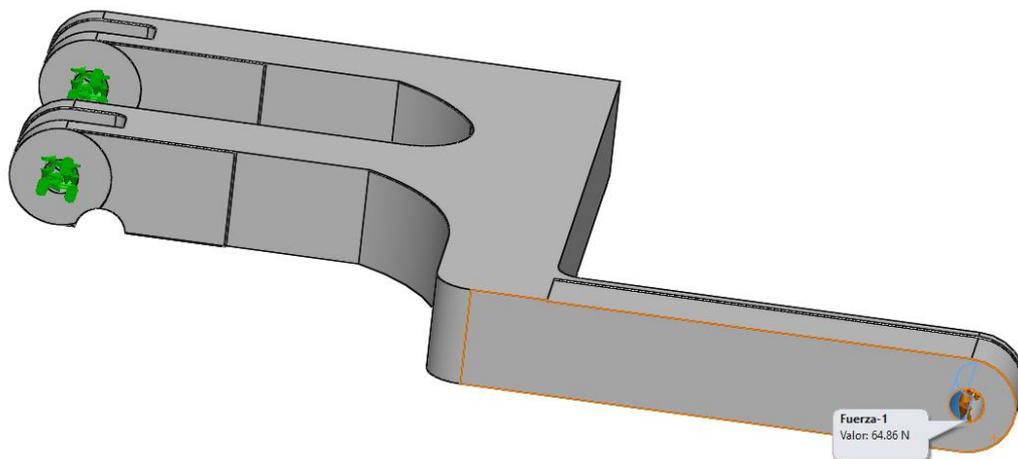


Figura 3. 39 Aplicación de la fuerza en la barra doble

3.10.6 Análisis de elementos finitos de la barra doble

El esfuerzo de von Mises máximo que se obtuvo es de 10,76 MPa, en la parte del pasador que une la barra a los dedos, como se muestra en la figura 3.40.

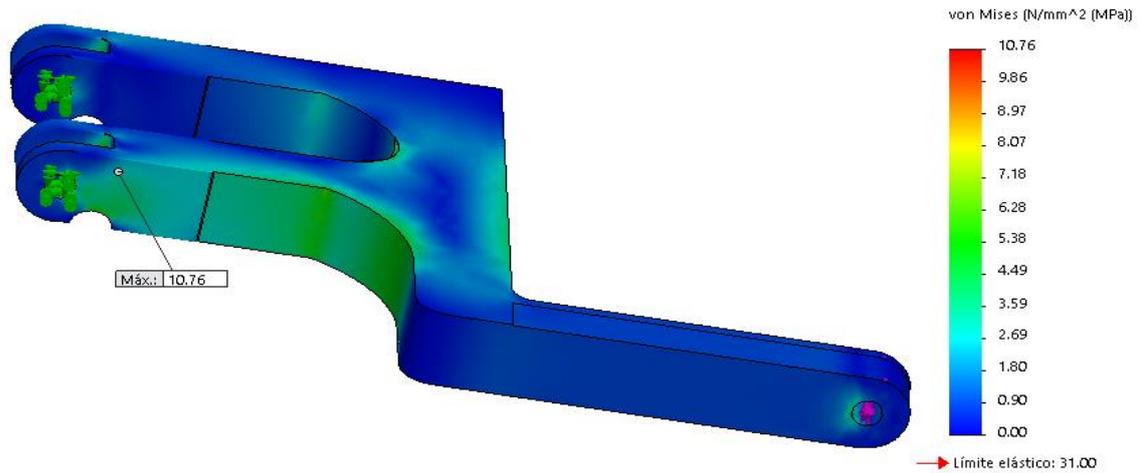


Figura 3. 40 Esfuerzo de von Mises en la barra doble

En la figura 3.41 se muestra el factor de seguridad mínimo obtenido de 2,88; el cual es aceptable para el prototipo.

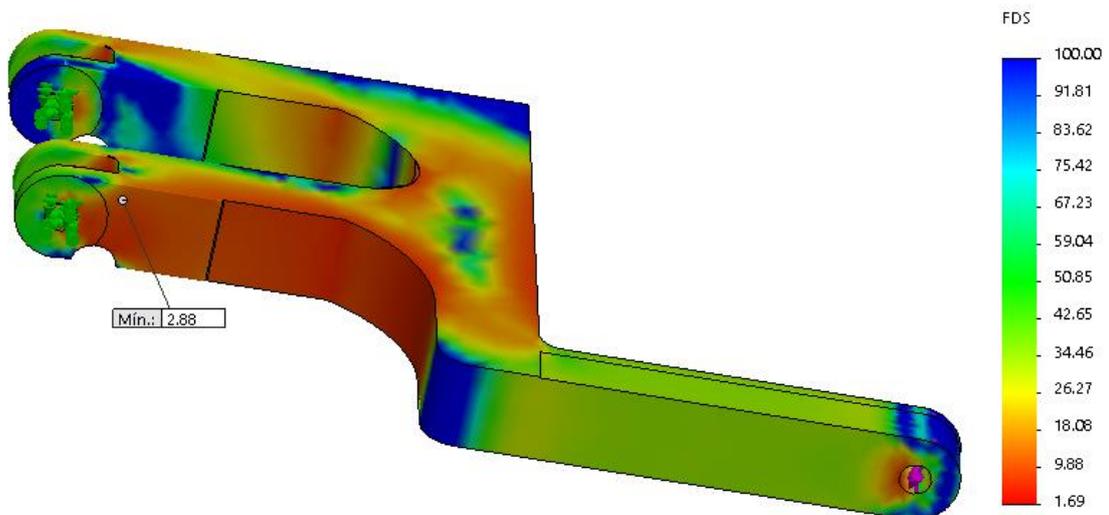


Figura 3. 41 Factor de seguridad en la barra doble.

En la figura 3.42 se muestra el desplazamiento máximo obtenido de 0,68mm, en la parte de unión de la barra doble al servomotor, que es donde se aplica el torque del motor directamente.

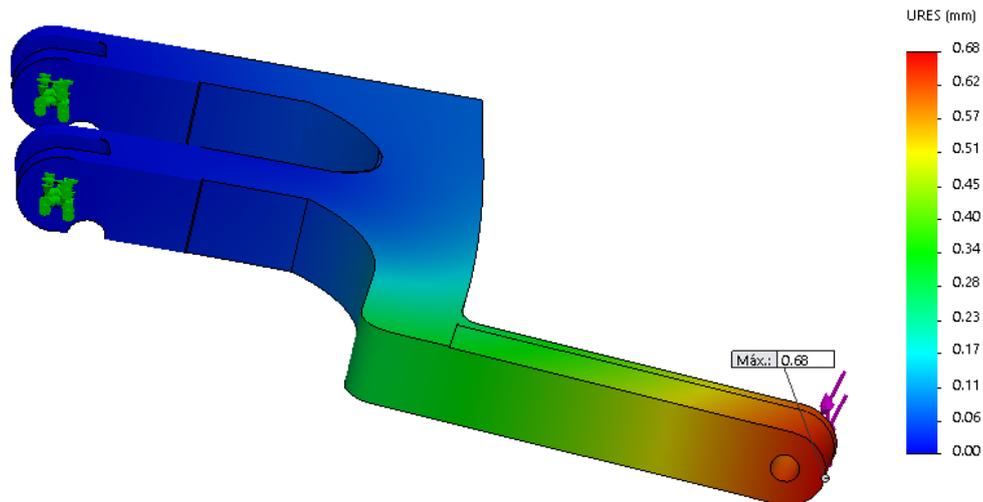


Figura 3. 42 Desplazamiento máximo en la barra doble

3.10.7 Condiciones de borde para la palma

Se sujeta la base que se une al antebrazo y la palma con geometría fija como se muestra en la Figura 3.43.

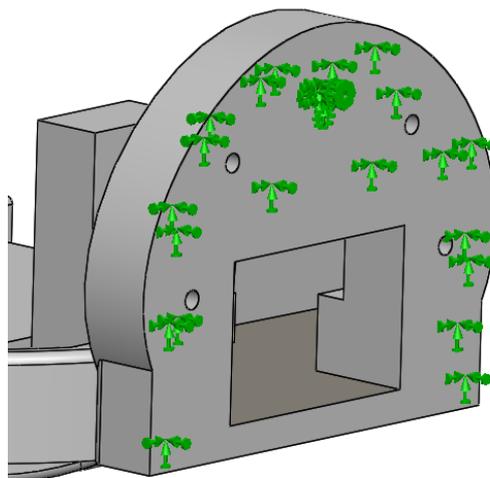


Figura 3. 43 Geometría fija en la base

Se coloca las fuerzas calculadas para los soportes de los dedos en la palma y las fuerzas correspondientes en la base del pulgar como se indica en la figura 3.42.

$$F_1=14,78 \text{ N}, F_2=32,4 \text{ N}, F_3=1,18 \text{ N}, F_4=1,8 \text{ N}$$

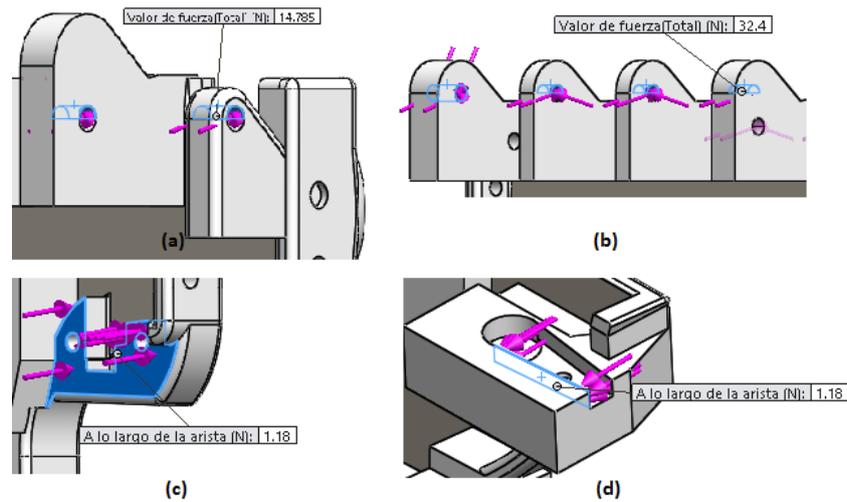


Figura 3. 44 Colocación de las fuerzas en la palma: (a) Fuerza F1, (b) Fuerza F2, (c) Fuerza F3, (d) Fuerza F4.

3.10.8 Análisis de elementos finitos de la palma

EL esfuerzo de von Mises obtenido es de 4,29 MPa; es tolerable ya que está por debajo del límite elástico del material como se indica en la figura 3.45.

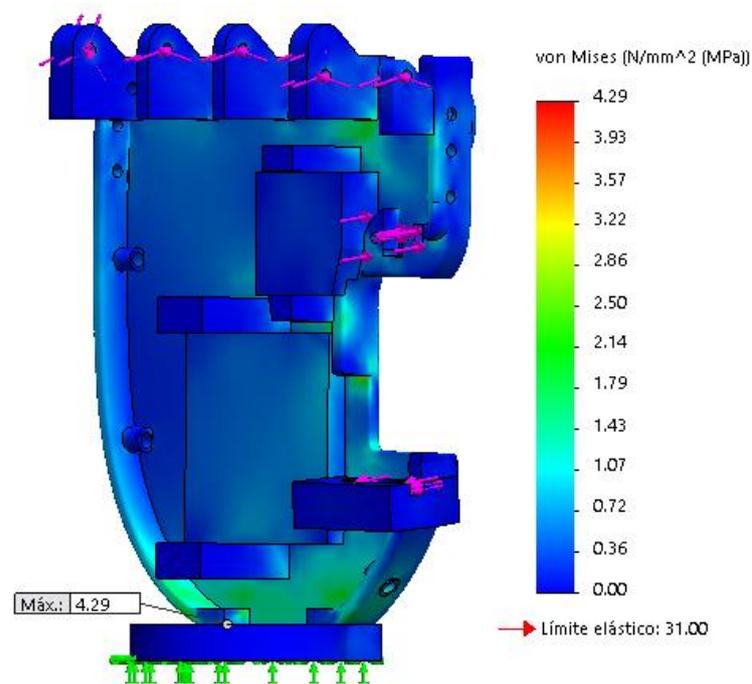


Figura 3. 45 Esfuerzo de von Mises en la palma.

El factor de seguridad mínimo establecido en la palma es de 7,23, ubicado en el soporte del dedo índice, como se indica en la figura 3.46.

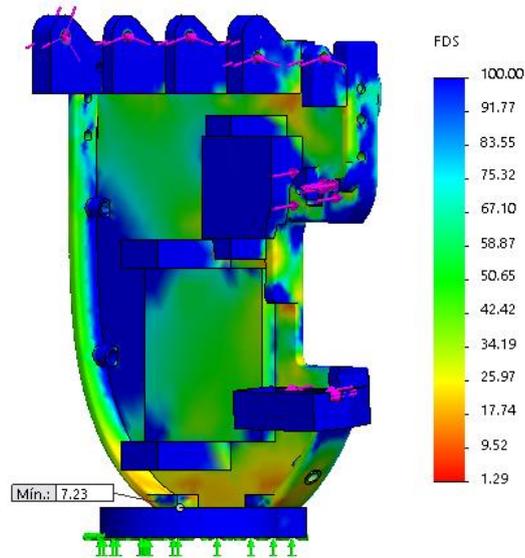


Figura 3. 46 Factor de seguridad en la palma.

El desplazamiento máximo que se obtuvo en la palma fue de 1,19 mm, en el acople del pasador para el dedo índice, como se indica en la figura 3.47.

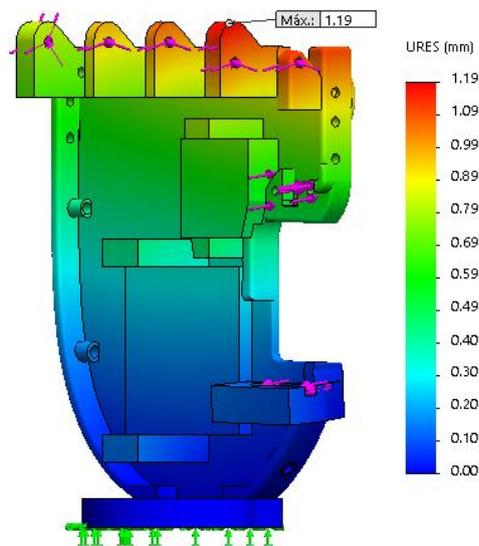
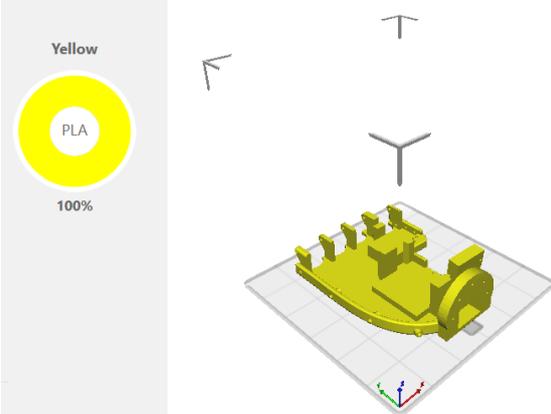
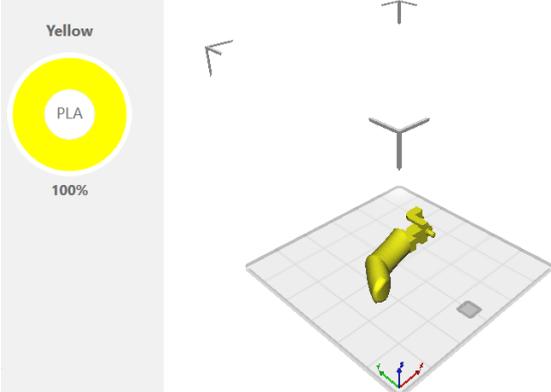
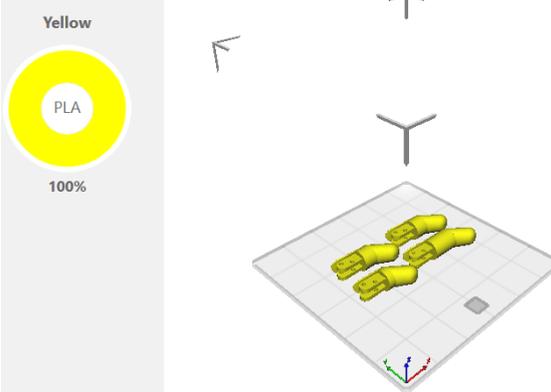


Figura 3. 47 Desplazamiento en la palma.

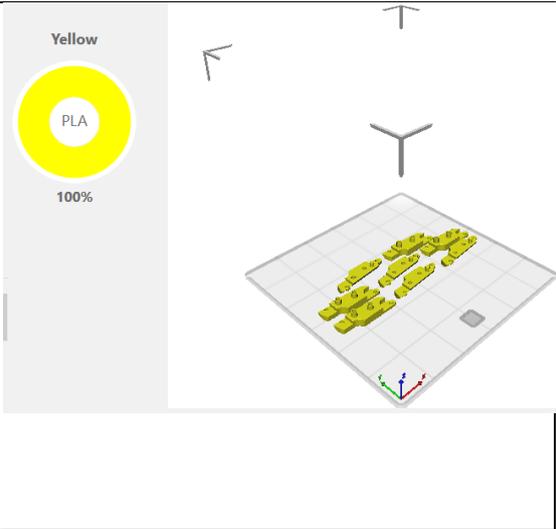
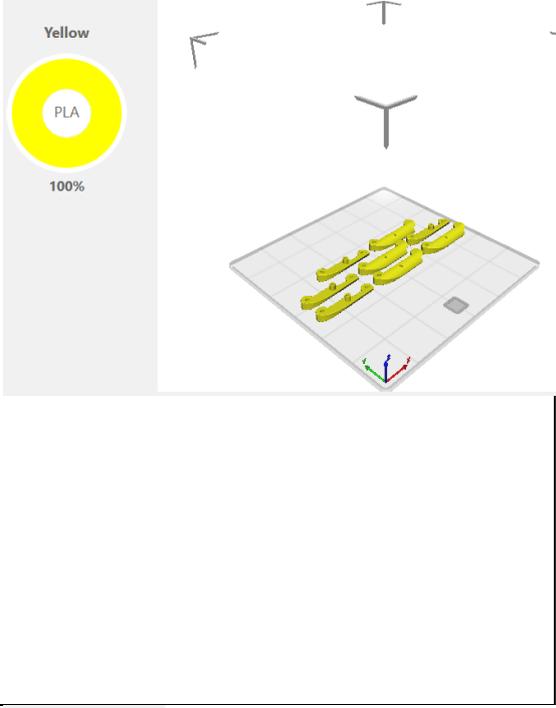
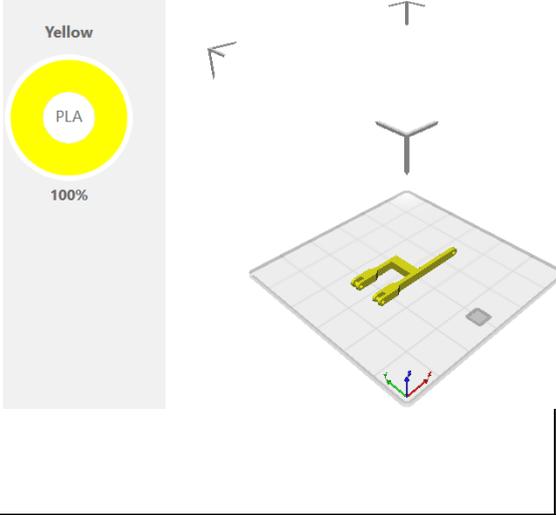
3.11 Manufactura

La construcción del prototipo se realiza mediante impresión tridimensional en material ABS, con un tiempo estimado de 32h08 de la mano completa; sin contar el antebrazo, que añade aproximadamente 28 horas más. En la tabla 3.16 se muestran los tiempos de impresión y los parámetros de configuración de cada pieza.

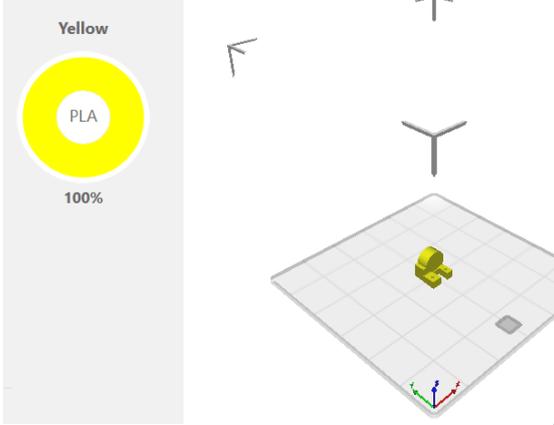
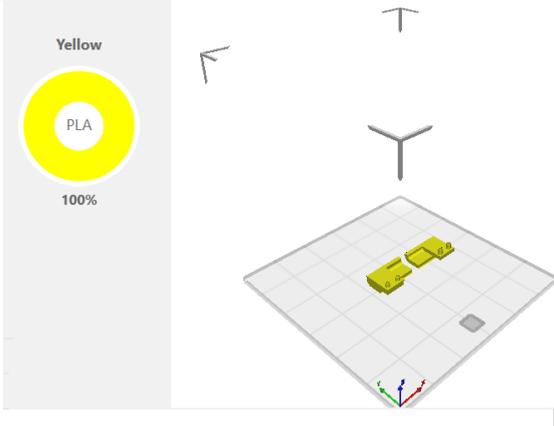
Tabla 3. 16 Manufactura de Piezas

TIEMPO DE IMPRESION	PARÁMETROS	CROQUIS DE LA POSICIÓN DE IMPRESIÓN
<p>Palma Inferior</p> <p>14h22m</p>	<p>-Resolución: 70 microns</p> <p>-Densidad: Strong</p> <p>-Patrón de relleno: Cross</p>	
<p>Pulgar</p> <p>5 horas</p>	<p>-Resolución: 70 microns</p> <p>-Densidad: Strong</p> <p>-Patrón de relleno: Cross</p>	
<p>Distales</p> <p>4h25m</p>	<p>-Resolución: 70 microns</p> <p>-Densidad: Strong</p> <p>-Patrón de relleno: Cross</p>	

Continuación: Tabla 3.10 Manufactura de Piezas

<p>Proximales superiores</p> <p>3h36m</p>	<p>-Resolución: 70 microns</p> <p>-Densidad: Strong</p> <p>-Patrón de relleno: Cross</p>	 <p>The image shows a 3D printing software interface. On the left, a vertical panel displays 'Yellow' at the top, a yellow circular icon with 'PLA' in the center, and '100%' below it. To the right, a 3D preview shows a yellow printed part on a grid. The part consists of several parallel, slightly curved bars. A coordinate system with red, green, and blue axes is visible at the bottom right of the grid. Navigation arrows are present at the top and left of the preview area.</p>
<p>Proximales Inferiores</p> <p>3h17</p>	<p>-Resolución: 70 microns</p> <p>-Densidad: Strong</p> <p>-Patrón de relleno: Cross</p>	 <p>The image shows a 3D printing software interface. On the left, a vertical panel displays 'Yellow' at the top, a yellow circular icon with 'PLA' in the center, and '100%' below it. To the right, a 3D preview shows a yellow printed part on a grid. The part consists of several parallel, slightly curved bars. A coordinate system with red, green, and blue axes is visible at the bottom right of the grid. Navigation arrows are present at the top and left of the preview area.</p>
<p>Barra Doble de Transmisión</p> <p>1h28m</p>	<p>-Resolución: 70 microns</p> <p>-Densidad: Strong</p> <p>-Patrón de relleno: Cross</p>	 <p>The image shows a 3D printing software interface. On the left, a vertical panel displays 'Yellow' at the top, a yellow circular icon with 'PLA' in the center, and '100%' below it. To the right, a 3D preview shows a yellow printed part on a grid. The part is a single, double-bar structure. A coordinate system with red, green, and blue axes is visible at the bottom right of the grid. Navigation arrows are present at the top and left of the preview area.</p>

Continuación: Tabla 3.10 Manufactura de Piezas

<p>Soporte para Rodamiento</p> <p>0h41m</p>	<p>-Resolución: 70 microns</p> <p>-Densidad: Strong</p> <p>-Patrón de relleno: Cross</p>	 <p>The image shows a 3D printing software interface. On the left, a vertical panel displays 'Yellow' and 'PLA' with a '100%' completion indicator. To the right, a 3D preview shows a yellow, cross-hatched support structure on a grid. A coordinate system with red, green, and blue axes is visible at the bottom right of the grid.</p>
<p>Tapas Externas</p> <p>0h56m</p>	<p>-Resolución: 70 microns</p> <p>-Densidad: Strong</p> <p>-Patrón de relleno: Cross</p>	 <p>The image shows a 3D printing software interface. On the left, a vertical panel displays 'Yellow' and 'PLA' with a '100%' completion indicator. To the right, a 3D preview shows two yellow, cross-hatched cap-like parts on a grid. A coordinate system with red, green, and blue axes is visible at the bottom right of the grid.</p>

Finalmente se logra conseguir la manufactura y ensamblaje del prototipo diseñado como se indica en la figura 3.47.



Figura 3. 48 Prototipo de prótesis obtenido

3.12 Costos de diseño y fabricación del prototipo de prótesis de mano.

3.12.1 Costos directos de fabricación.

Los costos que intervienen directamente en el proceso de fabricación del prototipo de prótesis de mano, se muestran en la tabla 3.17.

Tabla 3. 17 Costos directos de fabricación

DETALLE	COSTOS
Actuadores	200 \$
Material de Impresión	150 \$
Engranajes	20 \$
Silicona Dragon Skin30	60 \$
Materiales Varios	30 \$
TOTAL	460 \$

3.12.2 Costos indirectos de fabricación.

Los costos que no intervienen directamente en el proceso de fabricación del dispositivo se muestran en la tabla 3.18.

Tabla 3. 18 Costos indirectos de fabricación del prototipo.

DETALLE	COSTOS
---------	--------

Material de Oficina	40 \$
Internet	20 \$
Transporte	40 \$
TOTAL	100 \$

1.1.1 Costo total de diseño y manufactura del prototipo.

La suma de los costos directos e indirectos se detalla a continuación en la tabla 3.19.

Tabla 3. 19 Costo total del prototipo.

DETALLE	COSTOS
Costos Directos	460 \$
Costos Indirectos	100 \$
TOTAL	560 \$

3.14 Validación del prototipo

3.14.1 Pruebas de agarre de precisión.

Se realizaron las pruebas en cuanto al agarre de precisión, con algunos objetos pequeños (Figura 3.49), a los cuales se aplicó la fuerza necesaria para sujetarlos sin romperlos.

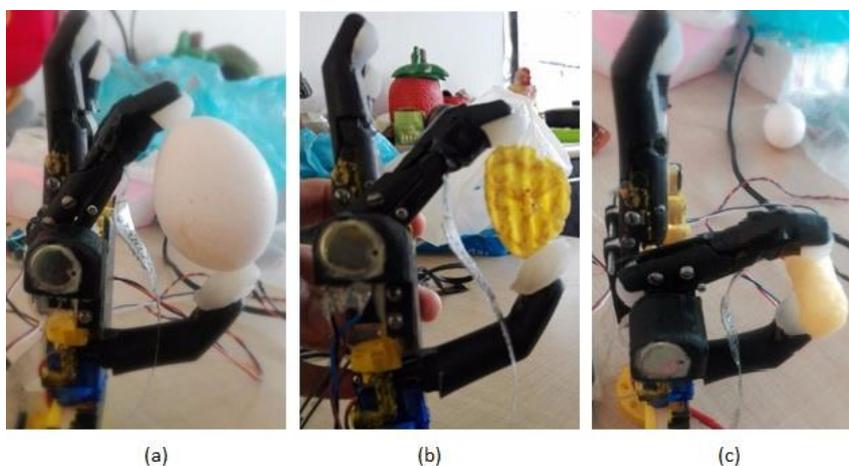


Figura 3. 49 Pruebas de precisión en sujeción de objetos en agarre de pinza: (a) Huevo, (b) Chifle, (c) Fritura

3.14.2 Pruebas de agarre de fuerza.

Se realizaron pruebas de fuerza en el agarre cilíndrico con una masa de máximo 300 g y diámetros de aproximadamente 50 mm (Figura 3.49). Considerando que teóricamente el prototipo puede realizar agarres de hasta 62,7 mm de diámetro y 500 g de masa se deduce que se obtuvo 79,7% respecto al diámetro teórico planteado y 60% en cuanto a masa teórica planteada en éste proyecto.

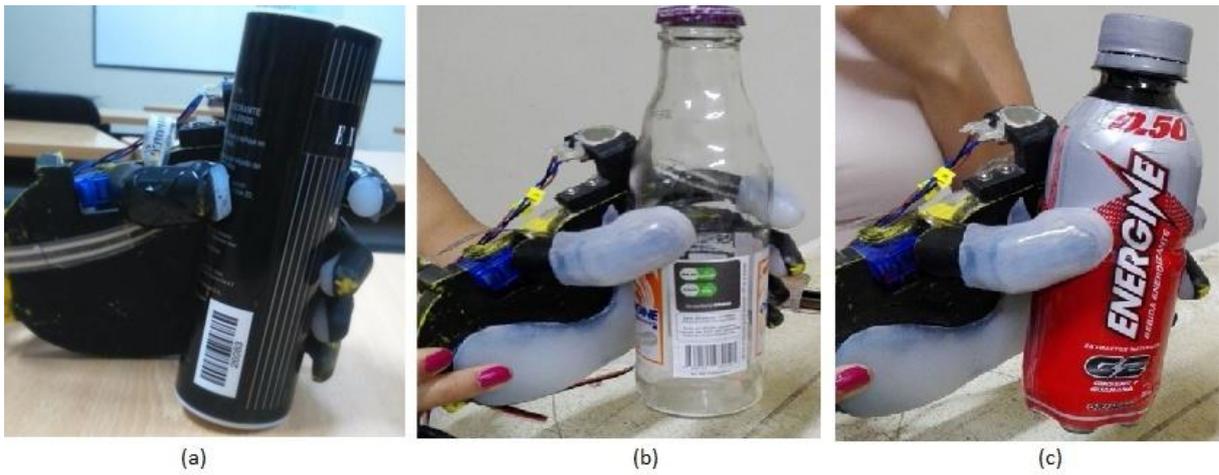


Figura 3. 50 Pruebas de sujeción de objetos en agarre cilíndrico: (a) botella plástico, (b) botella vidrio, (c) botella plástico de 300 g de masa.

CAPÍTULO IV

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

4.1 Conclusiones

El estudio bibliográfico permitió determinar los requerimientos de diseño tales como: ángulos de flexión, tipos de movimiento y agarres para establecer los aspectos técnicos necesarios como: material, mecanismos y actuadores.

Se realizó el diseño mecánico del prototipo de prótesis de mano con características geométricas aproximadas a la mano del sujeto de estudio, que cumple con los requerimientos de diseño y las funcionalidades propuestas.

Se estableció el diseño de las falanges proximales mediante el uso de mecanismos de cuatro barras para constituir el movimiento de flexo - extensión de los dedos: índice, medio, anular y meñique; consiguiendo un movimiento activo total de 195° , que constituye un 95,12% del MAT de la fisiología de la mano humana.

El material utilizado para la construcción de éste prototipo fue ABS, mediante impresión tridimensional, permitiendo conseguir un prototipo con la resistencia mecánica propuesta en el diseño y adicionalmente proporcionó facilidad de manufactura.

El esfuerzo de von Mises en los elementos analizados es menor al límite elástico del material, el factor de seguridad es mayor a 2,2, y los desplazamientos son menores a 2 mm según los requerimientos de diseño planteados.

Realizados tipos de agarres los cuales son: cilíndrico con una sujeción aproximada de objetos de 50 mm de diámetro y 300 g de masa y pinza manipulando objetos pequeños con precisión.

4.2 Recomendaciones

Mejorar la apariencia estética del prototipo mediante el recubrimiento del prototipo a manera de guante, para que asemeje la apariencia de la piel humana.

Incrementar el realismo del dorso, escaneando la mano del sujeto de estudio, para constituir rasgos más antropomórficos en la apariencia.

Se recomienda utilizar actuadores lineales en lugar de servomotores y motores DC para la activación de los mecanismos de cuatro barras de los dedos, de ésta manera se optimiza el espacio evitando implementar mecanismos de accionamiento en la palma.

Para trabajos futuros se recomienda implementar un mecanismo para flexo - extensión del dedo pulgar con la finalidad de incrementar la funcionalidad del prototipo.

REFERENCIAS

- Aguilar L., (2012). *Optimización de la Geometría de una Prótesis de Miembro Superior*.
- Alopezro. (2010). Engranajes Cónicos. 1.
- Arzola N., & Loaiza, J. L. (2011). *Evolución y tendencias en el desarrollo de prótesis de mano*. Dyna, 78(169), A p191.
- Boedo, M. E. D., Russi, L., Santilli, E. D., & Tocalini, P. (2012). *La historia de Hugh Herr y sus prótesis biónicas*. 1.
- Brito, J., Quinde, M., Cusco, D., & Calle, J. (2013). *Estudio del estado del arte de las prótesis de mano*. Ingenius. pp 9.
- Bueno, D. (2013). *Sistemas Automatizados: Motor eléctrico brushless: Funcionamiento y características*. pp 12.
- CEJAROSU. (2006). *Maquinas y Mecanismos, Parte III: Mecanismos para Trasmisión de Movimientos*. pp 107, 13.
- Ciccarese, F. (2014). *YouBionic, la mano protésica impresa en 3D. La extremidad biónica promete ser accesible para pacientes con amputaciones*. pp 1.
- Cobo, R. (2010). *Servomotores, El ABC de la Automatización*.
- CONADIS. (2015). Registro Nacional de Discapacidades 3-7.
- Cribella, F. (2008). *La enigmática momia agonizante*. 1.
- Derique V., (2015). Related Textbooks: Size 29. Skeleton System. pag 24.
- García, E. (2015). *Los dedos de la mano*. Colegio Interamericano de Radiología, Ortopedia y Traumatología. p. 1-2.
- González, J., Murillo, P. R., Luna, I. F., & Mendoza, A. J. (2005). *Robótica y prótesis inteligentes*. Revista Digital Universitaria. pp 8-15.
- Hernando L., Herrera J., (2006) *Diseño De Un Sistema Articulado Emulando El Movimiento De Una Mano*. Centro Nacional De Investigación Y Desarrollo Tecnológico. CENIDET. pp (2)6-8
- Huraroto. (2014). *Semiología de antebrazo, muñeca y mano*. Anatomía Mecánica rango de movilidad articular examen.
- Leff, E. (2005). *La geopolítica de la biodiversidad y el desarrollo sustentable*. Revista del Observatorio Social de América Latina. pp 17.
- López L. A. A., (2015). *Biomecánica y patrones funcionales de la mano*. pp14.
- Massó, M. (2011). *Disseny d'un sistema de detecció de vehicles lents*. 1-6.
- Menninghaus, W. (2007). *Topografías de la modernidad: el pensamiento*. pp 33.
- Mora, J. F., de Caminos, C. d. I., & y Puertos, C. (2008). *Máquinas eléctricas*: McGraw-Hill.
- Myszka, D.H. (2012), *Máquinas y Mecanismos*. Pearson
- Norton, R.L. (2010), *Diseño de Máquinas*. Pearson
- Pérez M., (2011). *Análisis Cinemático e Implementación de una Mano Robótica Servo-Articulada Aplicable como Prótesis*. Instituto Politécnico Nacional. Sección de Estudio de Posgrado e Investigación. Escuela de Ingeniería Mecánica y Eléctrica.
- Pinto Linares, H. A. (2007). *Diseño óptimo de mecanismos de cuatro barras para generación de movimiento con restricciones de montaje y ángulo de transmisión*. Universidad Nacional de Colombia-Sede Manizales.
- Quinayás-Burgos, C. A., Muñoz-Añasco, M., Vivas-Albán, Ó. A., & Gaviria-López, C. A. (2010). *Diseño Y Construcción De La Prótesis Robótica De Mano UC-1*. Ingeniería y Universidad, 14(2), 223-237.
- Sánchez Calderón, D. H. (2017). *Consideraciones Anatómicas En El Diseño De Una Mano Artificial*. Universidad Militar Nueva Granada.
- Skinner, B. F. (1975). *Contingências do reforço*. São Paulo: Abril Cultural. (Original publicado em 1963).

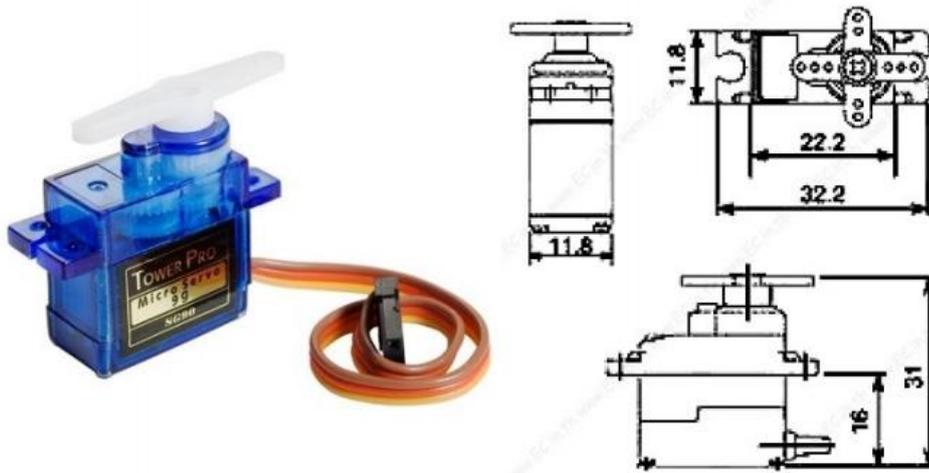
- Sospedra, M., Bruno, R., Sabater, L., Tolosa, E., Ferrer-Francesch, X., Coll, J., . . . Pujol-Borrell, R. (2004). *Diseño mecánico de prótesis de mano multidedo antropomórfica infractuada*. Journal of neuroimmunology. pp 147-159.
- ThrustTube, C. (2015). *Motores lineales tubulares de alta precisión*. 1, 1.
- UPCommons. (2015). *Estudio de la implantación de una unidad productiva dedicada a la fabricación de conjuntos soldados de aluminio*. pp 3.
- Valenzuela C., (2012). *Nuestro cuerpo. Miembro Superior: Huesos de la mano*. pp 2.
- Vargas Pérez, J. L., Yunga Patiño, L. F., Cajamarca Guambaña, L. F., & Matute Salinas, J. L. (2015). *Diseño, construcción e implementación de prótesis biomecánica de mano derecha (segunda fase)*.
- Vargas, J. A. G., & Wilches, D. P. (2014). *Modelado del comportamiento mecánico de unión socket–muñón en amputados de miembro inferior*. Elementos, 4(4), pp77-85.

ANEXOS

ANEXO 1

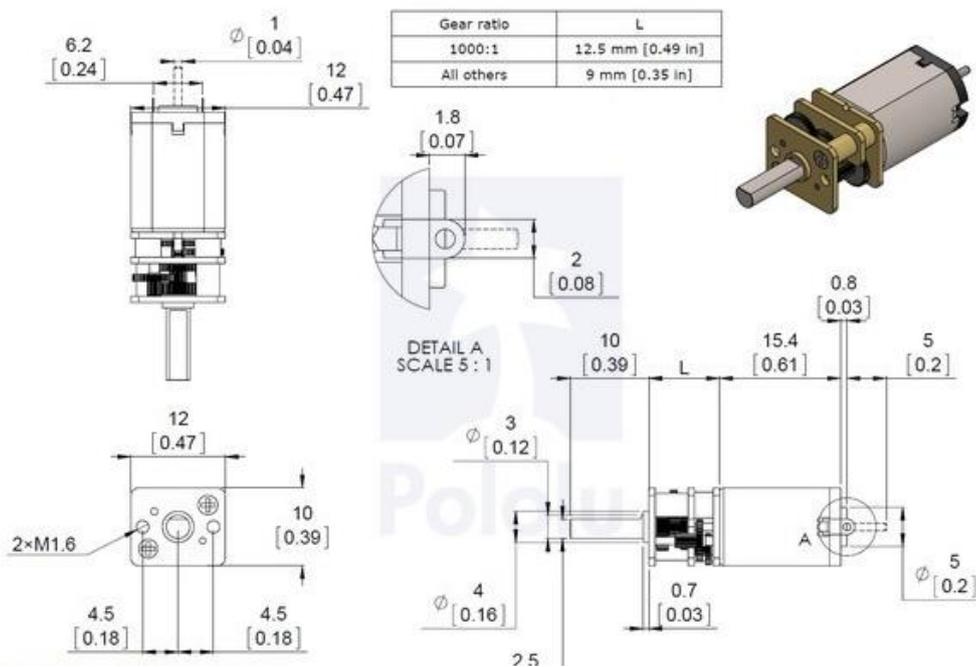
Servomotor dedo pulgar

SG90 9 g Micro Servo



ANEXO 2

Servomotor dedo índice: Digital 7.4v 3.6kg Metal Gear Micro Servo D0474HT-HV



ANEXO 3

PLANOS