



**CONSIDERACIONES ANATÓMICAS EN EL DISEÑO
DE UNA MANO ARTIFICIAL**

Autor:

DANIEL HUMBERTO SÁNCHEZ CALDERÓN

UNIVERSIDAD MILITAR NUEVA GRANADA

FACULTAD DE INGENIERÍA

INGENIERÍA MECATRÓNICA

BOGOTÁ D.C

2016



**CONSIDERACIONES ANATÓMICAS EN EL DISEÑO
DE UNA MANO ARTIFICIAL**

Autor:

DANIEL HUMBERTO SÁNCHEZ CALDERÓN

TRABAJO DE GRADO

Director:

I.E OSCAR FERNANDO AVILÉS SÁNCHEZ PhD

UNIVERSIDAD MILITAR NUEVA GRANADA

FACULTAD DE INGENIERÍA

INGENIERÍA MECATRÓNICA

BOGOTÁ D.C

2016

NOTA DE ACEPTACIÓN

Firma del Presidente del Jurado

Firma del Jurado

Firma del Jurado

Bogotá D.C Junio de 2016

DEDICATORIA

Quiero dedicar este triunfo a mis padres

Martha Lucia Calderón y Humberto Sánchez

por ser mi ejemplo a seguir, por guiarme en el camino correcto y por motivarme y apoyarme en todos mis sueños y metas. Con sus mayores esfuerzos me brindaron la oportunidad de formarme profesionalmente y por enseñarme a no desistir y seguir adelante.

A mi abuelo, Oscar Calderón

Por brindarme un apoyo incondicional, un segundo hogar y sin olvidar, la paciencia más grande del mundo por aguantarme todos estos años. Por ser mi motivación y la persona que me ha acompañado en mi crecimiento.

A mi hermana, Natalia Sánchez

Aunque la distancia nos separa, siempre has sido una inspiración y un modelo a seguir. Una persona a la cual admiro y llevo en mi corazón.

A mis amig@s, por su apoyo incondicional en nuestra formación profesional, por darme la fortaleza de seguir adelante, por estar a mi lado en los momentos difíciles y por todos los momentos inolvidables que se vivieron durante la carrera.

AGRADECIMIENTOS

Mis más sinceros agradecimientos, a mi director,

Oscar Fernando Avilés Sánchez.

Por la orientación y experiencia que me brindo para la realización de esta tesis, por su apoyo y amistad que me permitieron crecer como persona y como profesional.

Finalmente, a los docentes del departamento de Ingeniería Mecatrónica por brindarnos sus conocimientos y experiencias que me ayudaron en mi crecimiento profesional.

TABLA DE CONTENIDO

RESUMEN	ix
ABSTRACT.....	13
1 INTRODUCCIÓN.....	14
1.1 Objetivos	15
1.1.1 Objetivo General.....	15
1.1.2 Objetivo Específico.....	15
1.2 Justificación	16
1.3 Antecedentes	16
1.3.1 UTAH/M.I.T. Dexterous Hand.....	19
1.3.2 UB Hand 3	20
1.3.3 Twendy-One Hand.....	20
1.3.3 FluidHand - Forschungszentrum Karlsruhe	21
2 ANÁLISIS MANO HUMANA	23
2.1 Anatomía Mano Humana	23
2.1.1 Estructura Ósea de la Mano Humana.....	23
2.1.2 Medidas Mano Humana	25
2.1.3 Tipos de Articulaciones de la Mano Humana	26
2.1.4 Articulaciones de los Dedos.....	27
2.1.5 Ligamentos, Tendones y Músculos.....	30
2.1.5.2 Capuchón extensor.....	32
2.2 Taxonomía de Agarres	33
2.2.1 Articulaciones y Rangos de la Mano Humana	35
3 CINEMÁTICA DEDO ANTROPOMÓRFICO	37
3.1 Cinemática Directa.....	37
3.1.1 Cálculo Cinemática Directa	38
3.2 Cinemática Inversa.....	42
3.2.1 Cálculo Cinemática Inversa	43
3.3 Modelado Dinámico.....	45
4 DISEÑO HUESOS DE LA MANO HUMANA.....	47
4.1 Diseño Huesos de la Mano Humana en MAYA	47
4.2 Movimiento de la Mano Humana en SOLIDWORKS	48

4.3 Construcción Mano Artificial MATLAB	50
5 DISEÑO DEDO ANTROPOMÓRFICO.....	52
5.1 Diseño Dedo Antropomórfico en Solidworks.....	52
5.2 Construcción Dedo Antropomórfico en MATLAB	53
6 MATERIALES, ANÁLISIS Y CONSTRUCCIÓN	55
6.1 Material Dedo Antropomórfico	55
6.2 Tendones Dedo Antropomórfico	57
6.3 Cartílago Dedo Antropomórfico	58
6.3.1 Ensayo de tracción	59
6.3.2 Cálculo de Elasticidad.....	62
6.3.3 Conclusión	63
6.4 Diseño Base de Motores	64
6.4.1 Selección de Motores	64
6.5 Diseño Circuito	67
6.5.1 Selección de Tarjeta Programable.....	68
7 DISEÑO INTERFAZ GRÁFICA MANO ARTIFICIAL	69
7.1 Panel de Introducción	69
7.2 Panel de Cinemática Directa.....	70
7.3 Panel de Taxonomía de Agarres	71
7.4 Panel Simulación 3 grados de libertad.....	72
8 SINERGÍA ELEMENTOS ELÉCTRICOS, MECÁNICOS Y DE SISTEMAS.....	73
8.1 Prototipo Final	73
8.2 Cinemática Directa.....	74
8.2.1 Respuesta Mano Artificial y Dedo Antropomórfico	75
8.3 Taxonomía de Agarres.....	77
8.3.1 Respuesta Mano Artificial	78
8.3.2 Comparación Mano Artificial y Mano Humana	79
8.3.2 Respuesta dedo virtual y dedo antropomórfico.....	80
9 CONCLUSIONES Y TRABAJOS FUTUROS.....	82
9.1 Conclusiones	82
9.2 Trabajos Futuros	83
Bibliografía.....	Error! Bookmark not defined.
ANEXO A.....	88

ANEXO B.....	94
ANEXO C.....	97

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 "Diseño y Construcción de una mano robot de cuatro dedos"	16
Figura 2 Interfaz General Matlab.....	17
Figura 3 Mano Virtual	18
Figura 4 Diseño Mecánico	18
Figura 5 UTAH/M.I.T Dexterous Hand [6]	19
Figura 6 UB Hand 3 [7]	20
Figura 7 Twendy-One Hand [8].....	21
Figura 8 FluidHand [9]	22
Figura 9 Arcos de la mano [11]	24
Figura 10 Ligamentos dorsales. Las flechas enfatizan la dirección de los ligamentos [13].	24
Figura 11 Nomenclatura huesos mano humana [14].....	25
Figura 12 Nomenclatura articulaciones de la mano [18]	27
Figura 13 Ligamentos metacarpofalángicos [20].....	28
Figura 14 Ligamentos interfalángicos [20].....	28
Figura 15 A: Interfalángicas B: Metacarpofalángicas [21]	29
Figura 16 Músculos anteriores y exteriores de la mano humana [24]	30
Figura 17 Músculos de la Mano [24].....	31
Figura 18 Tendón sinovial [26].....	31
Figura 19 Tendones Flexores y extensores en los dedos [20].....	32
Figura 20 Flexión capuchón extensor [27]	33
Figura 21 Taxonomía de agarres descrita por Cutkosky [25]	34
Figura 22 Ejemplo taxonomía.....	35
Figura 23 Rangos del movimiento de los dedos [21].....	36
Figura 24 Asignación de parámetros DH [30]	37
Figura 25 Grados de libertad dedo antropomórfico	38
Figura 26 Representación geométrica de un dedo 3GDL [26]	39
Figura 27 Gráfica de puntos alcanzables por el dedo humano.....	42
Figura 28 Representación dedo antropomórfico	43
Figura 29 Cinemática Inversa dedo antropomórfico.....	43
Figura 30 Movimiento completo de la flexión del dedo [24]	45
Figura 31 Mano Artificial en Maya	47
Figura 32 Mano Artificial en Maya	48
Figura 33 Mano virtual Solidworks	49
Figura 34 Mano virtual con Movimiento en Solidworks	49
Figura 35 Esquema Simulación dinámica en simulink	50
Figura 36 Mano Artificial con control de movimiento en Matlab	51
Figura 37 Prototipo dedo antropomórfico.....	52
Figura 38 Prototipo dedo antropomórfico.....	53
Figura 39 Prototipo dedo antropomórfico en Matlab.....	53
Figura 40 Prototipo dedo antropomórfico en Matlab.....	54
Figura 41 Impresión 3D dedo antropomórfico	56

Figura 42 Curva representativa de esfuerzo/deformación de los tendones [38]. A: se puede observar una curva representativa de carga-elongación de la estructura del hueso y ligamento. B: se puede observar una curva representativa de esfuerzo-tensión que representa las propiedades mecánicas del ligamento o tendón.....	57
Figura 43 Polímero obtenido con silicona fría y maizena.....	58
Figura 44 Ensayo de tracción [41]	59
Figura 45 Máquina prueba de tracción	60
Figura 46 Muestra del polímero en el ensayo de tracción	60
Figura 47 Elongación del polímero con dos muestras diferentes.....	61
Figura 48 Curva representativa de esfuerzo/deformación del polímero	61
Figura 49 Vista interna al finalizar el ensayo de tracción del polímero.....	62
Figura 50 Motoreductor de 12V [44].....	65
Figura 51 Servomotor [45].....	65
Figura 52 Base Motores	66
Figura 53 Base Motores	66
Figura 54 Adaptador de 12V-3A [46].....	67
Figura 55 Regulador de 12V a 5V-3A [47]	67
Figura 56 Arduino [49]	68
Figura 57 Panel de introducción	69
Figura 58 Panel de cinemática directa	70
Figura 59 Visualización panel Taxonomía	71
Figura 60 Panel de comprobación de los 3 grados de libertad del dedo antropomórfico	72
Figura 61 Prototipo Final	73
Figura 62 Prototipo Final	74
Figura 63 Visualización funcionamiento panel cinemática directa	75
Figura 64 Visualización funcionamiento panel cinemática directa	76
Figura 65 Gráfica de puntos alcanzables por el dedo antropomórfico.....	76
Figura 66 Comparación dedo humano y dedo antropomórfico	77
Figura 67 Ejemplo panel de taxonomía	78
Figura 68 Ejemplo panel de taxonomía	78
Figura 69 Diagrama de flujo etapas de la validación del dedo virtual y el dedo antropomórfico	80
Figura 70 Sincronización dedo virtual y dedo antropomórfico.....	81
Figura 71 Sincronización dedo virtual y dedo antropomórfico.....	81

LISTA DE TABLAS

Tabla 1 Longitudes de falanges y metacarpianos	26
Tabla 2 Medidas Dedo antropomórfico	26
Tabla 3 Rango de las Articulaciones [28].....	35
Tabla 4 Rango de la Abducción y Aducción [28].....	36

RESUMEN

La mano humana se ha usado como un modelo insustituible para el desarrollo de diferentes manos robóticas, debido a su impresionante complejidad y versatilidad en la manipulación de objetos y ajustes posicionales de acuerdo a la ejecución de patrones funcionales. Las manos antropomórficas han sido ampliamente investigadas por su similitud inherente a la mano humana y, potencialmente, puede traer una gran variedad de beneficios a los campos de prótesis de mano, robots humanoides, robots médicos y exploración espacial.

Este trabajo de grado está enmarcado en la línea de investigación de protocolos de diseño de prótesis, para diseñar e implementar un dedo antropomórfico de tres grados de libertad. El diseño integrara consideraciones anatómicas, las cuales se emularan con materiales alternativos que cumplan las características biológicas de la mano. Modelado de manera que se inspira en la anatomía natural de la mano, con el fin de realizar los diferentes agarres de la mano.

A partir de esto, se logró diseñar una mano virtual que emule la taxonomía de agarres y un dedo antropomórfico de tres grados de libertad. Se realizaron los cálculos pertinentes de la cinemática directa, inversa y dinámica con el fin de conocer el rango de acción y puntos del efector final y obtener un sistema de control del dedo antropomórfico.

El diseño del dedo antropomórfico con materiales alternativos espera crear una nueva visión en la construcción de estos y enmarcar un nuevo panorama en futuras investigaciones. Para el desarrollo de este trabajo se utilizaron herramientas virtuales de simulación para comprobar la aproximación del dedo antropomórfico a un dedo humano respecto a sus movimientos.

ABSTRACT

The human hand has been used as an irreplaceable model for the development of different robotic hands, because of its impressive complexity and versatility in handling objects and positional adjustments according to the execution of functional patterns. Anthropomorphic hands have been widely investigated for their inherent similarity to the human hand and potentially can bring a variety of benefits to the fields of prosthetic hand, humanoid robots, medical robots and space exploration.

This degree work is framed in the research protocol prosthetic design, to design and implement an anthropomorphic finger that has three degrees of freedom. The design integrates anatomical considerations, which are emulated with alternative materials that meet the biological characteristics of the hand. Modeled so it can be inspired by the natural anatomy of the hand, in order to perform the different hand grips.

From this, it was possible to design a virtual hand that emulates the taxonomy grips of an anthropomorphic finger and the three degrees of freedom. The relevant calculations of direct kinematics, inverse and dynamics in order to know the range of action and points of the end effector and obtain a control for the anthropomorphic finger.

The design of using alternative materials for the anthropomorphic finger hopes to create a new vision in building new models and frame a new panorama in future research. For the development of this work virtual simulation tools were used to test the anthropomorphic approach of a human finger about the range of movements.

1 INTRODUCCIÓN

En la actualidad es numerosa la población que sufre de amputación de la mano así sea por razones médicas, de nacimiento o accidentes. Los avances de la robótica nos permiten analizar y construir prototipos que se asemejan a la anatomía de una mano humana.

El diseño de una mano antropomórfica tiene su cierto grado de complejidad y depende de las tareas que se quiere lograr. El principal objetivo de una mano antropomórfica es que realice las tareas comunes de una persona, lo cual incluye los diferentes tipos de agarre que se pueden realizar con la mano.

El estudio para realizar una mano antropomórfica incluye los ligamentos, tendones, músculos y estructura ósea para poder emular una mano humano. Ya se conoce la complejidad de la mano humano, sin embargo, para poder brindar una ayuda a aquellas personas que han sufrido un accidente o por razones médicas carecen de una mano se debe comenzar por un estudio detallado de la mano.

Las investigaciones relacionadas con las manos antropomórficas, se han realizado en varias partes del mundo con el propósito de brindar una herramienta que emule el comportamiento de la mano humana. Las manos antropomórficas por su similitud a la mano humana, puede brindar un gran potencial en los campos de prótesis, medicina y exploración espacial. [1]

El punto de inicio de esta investigación fue enfocarse en la población que sufre de amputación de la mano y carece de los medios económicos de acceder a una mano antropomórfica. Con el fin de diseñar un prototipo que emule el dedo humano, con materiales accesibles a cualquier población y visualmente agradable al usuario.

Se tiene en cuenta la complejidad de los dedos las cuales incluye la forma irregular de los huesos que determinan los grados de libertad, las propiedades del cartílago que cubre los extremos de los huesos en las articulaciones y la interacción de los tendones con la topología de los huesos el cual determina el movimiento del dedo.

Actualmente, las investigaciones de incorporar una mano antropomórfico con las características mencionadas siguen en desarrollo, por su complejidad no se ha diseñado una mano robótica que sea anatómicamente correcta. Con el desarrollo de esta tesis, se busca diseñar una mano artificial que emule la taxonomía humana y acercarse a un diseño que emule el comportamiento de un dedo humano.

1.1 Objetivos

1.1.1 Objetivo General

Diseñar e implementar una mano robótica de 3 grados de libertad, el diseño de esta mano integrara consideraciones anatómicas, las cuales se espera emular con sistemas artificiales. Modelado de manera que se inspira en la anatomía natural, con el fin de realizar los diferentes agarres de la mano.

1.1.2 Objetivo Específico

- Realizar el modelado cinemático directo e inverso de una mano biológica con el fin de obtener parámetros de diseño que permitan proponer un mecanismo artificial que emule los movimientos naturales.
- Realizar el modelado dinámico de la mano con tres grados de libertad con el fin de obtener las torques necesarios para realizar el movimiento de cada dedo articulado.
- Desarrollar un ambiente de simulación de la mano con tres grados de libertad con sus respectivos agarres de la mano humana con el fin de observar los diferentes movimientos en tiempo real con el modelo físico.
- Programar matrices de agarre respecto a la taxonomía de Cutkosky con el fin de realizar el control específico de cada movimiento en el modelo físico.
- Validar mediante la construcción de un dedo de tres grados de libertad que emule los agarres de Cutkosky y los comportamientos de los tendones y músculos con el fin de comprobar el ambiente virtual con el modelo físico.

1.2 Justificación

En Colombia la situación de las personas amputadas secundarias al conflicto que producen víctimas civiles y militares refleja una situación grave de derechos humanos. Según la Organización Mundial de la Salud OMS, en su publicación “Guía de práctica clínica para el diagnóstico y tratamiento preoperatorio, intraoperatorio y postoperatorio de la persona amputada, la prescripción de la prótesis y la rehabilitación integral” [2], las principales causas de una amputación son las traumáticas ocasionadas por accidentes de tránsito, violencia común, accidentes laborales, enfrentamientos armados, minas antipersonas, congelación y quemaduras.

Este trabajo de grado está enmarcado en la línea de investigación de diseño para prótesis, para diseñar e implementar una mano antropomórfica de tres grados de libertad en un entorno virtual que permita realizar los diversos agarres de una mano humana en las tareas cotidianas.

1.3 Antecedentes

En la Universidad Militar Nueva Granada se han realizado tres tesis relacionadas a la propuesta de grado presente. En el 2006 con el título “Diseño y construcción de una mano robot de cuatro dedos”, los Ingenieros Julián Rondón y Gustavo Ocampo desarrollaron una mano robot con 12 grados de libertad la cual es utilizada en el área de manipulación de objetos. Funciona mediante un sistema de poleas, las cuales son actuados por servomotores permitiendo de que cada dedo posea 3 grados de libertad, de los cuales son utilizados 2 grados de libertad para las acciones de flexión/extensión y el otro grado de libertad para la abducción. [3]

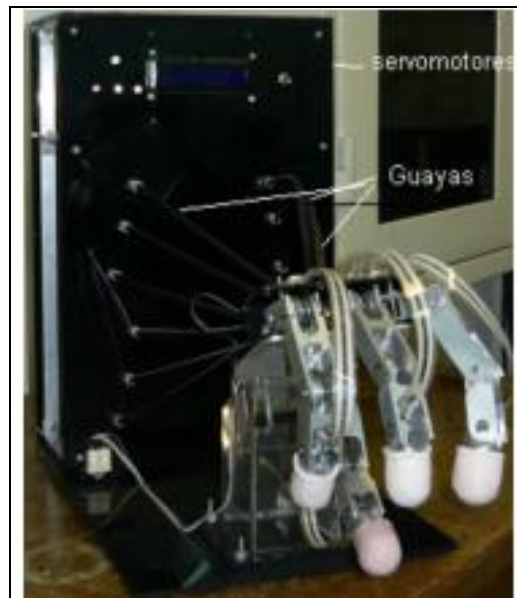


Figura 1 "Diseño y Construcción de una mano robot de cuatro dedos"

Sin embargo, en el año 2013 el Ingeniero Eduardo Enrique Oliveros Acosta con la tesis de “Reconstrucción puesta en funcionamiento y mejora de mano robot de cuatro dedos que imite los modelos prensiles humanos”. Retomo la tesis del 2006 con el fin de realizar una reingeniería en el proyecto, mostrando un sistema mecánico virtual, interfaz de comunicación y visualización de movimiento dentro del entorno virtual [3].



Figura 2 Interfaz General Matlab

En el 2010, se realizó una tesis orientada a la electromiografía y aplicaciones dentro del campo de la bioingeniería. Los Ingenieros Camilo Andrés Riaño Ríos y Virgilio Eduardo Quintero Machado diseñaron el control de una mano virtual usando señales electromiográficas, el cual por medio de un brazalete les permite obtener el control de dicha mano virtual [4].



Figura 3 Mano Virtual

En el 2012 con la colaboración de la Universidad Estatal de Campinas (Brasil), se realizó el diseño de un prototipo de dedo robótico antropomórfico, con el fin de ser usado posteriormente en la inserción de una mano Biomecatrónica. El diseño presenta una nueva alternativa de bajo costo que permite el control y actuación de dicho dedo reduciendo el número de grados de libertad. Con el título “Diseño e implementación de mecanismo de prensión para mano robot antropomórfica”, fue realizada por los ingenieros Vladimir Pizarro de la Hoz y Giovanni Alberto Rincón Sánchez [5].

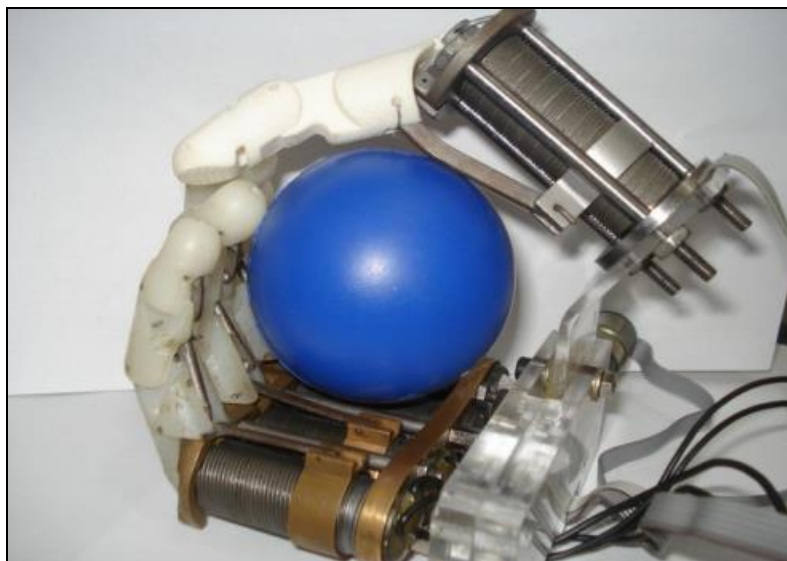


Figura 4 Diseño Mecánico

En las últimas décadas, una gran variedad de manos antropomórficas se han desarrollado. A continuación se mostrara una visión general de las manos robóticas más importantes para el desarrollo de esta tesis.

1.3.1 UTAH/M.I.T. Dexterous Hand

La mano UTAH/M.I.T fue desarrollada como una herramienta de investigación en 1983, es una mano antropomórfica y fue diseñada para tener la estática y dinámica de una mano humana. Tiene 16 grados de libertad y tres dedos con 4 grados de libertad en cada uno, además de eso el pulgar posee 4 grados de libertad. Cada dedo posee una articulación proximal lo cual les permite movimiento de abducción y aducción. Después de la articulación proximal le sigue tres ejes paralelos que le permiten a la mano antropomórfica realizar movimientos de flexión y extensión.

La primera versión de la mano UTAH/M.I.T tenía un driver y 36 actuadores eléctricos organizados en forma antagónica. La transmisión era realizada por medio de cadenas y no por tendones. Esta configuración no posee los elementos elásticos para almacenar energía, pero aseguraba la tensión adecuadamente usando sensores y un sistema de control. La versión más reciente de esta mano antropomórfica posee actuadores neumáticos y su configuración inicial sigue siendo la misma.



Figura 5 UTAH/M.I.T Dexterous Hand [6]

1.3.2 UB Hand 3

Una variedad de manos antropomórficas han sido desarrolladas por la Universidad de Bologna con el fin de mejorar los agarres de dichas manos y perfeccionar el movimiento del pulgar. El diseño se enfoca en la reducción de la complejidad pero al mismo tiempo obtener mejores resultados de agarre. A diferencia de la mayoría de las manos diseñadas esta posee articulaciones con tendones.

Posee un movimiento lineal el cual es realizado por unos drivers que controlan los tendones de la mano. Dependiendo de la configuración, la mano puede trabajar con drivers antagonistas o por medio del accionamiento de tendones en cada articulación. El dedo índice es el único dedo que está totalmente actuado, con un total de 15 grados de libertad el cual cada dedo puede variar en su configuración.



Figura 6 UB Hand 3 [7]

1.3.3 Twendy-One Hand

Twendy-One es un robot humanoide desarrollado en la Universidad de Waseda, es una mano robótica a escala con diseños biomecánicos. Todos los drivers están integrados dentro de la mano y posee actuadores elásticos.

La mano posee 16 articulaciones y 13 drivers. Los dedos del Twendy-One tienen la misma longitud y tres grados de libertad. La unión entre el PIP y MC le permite realizar movimientos de abducción y aducción, lo cual están alineados al dedo índice. La mano está equipada con sensores táctiles que están localizados a lo largo de la palma y en la superficie de las falanges distales. La superficie de la mano fue recubierta por una capa de silicona que mejora el agarre de objetos manteniendo una fricción alta entre los materiales.

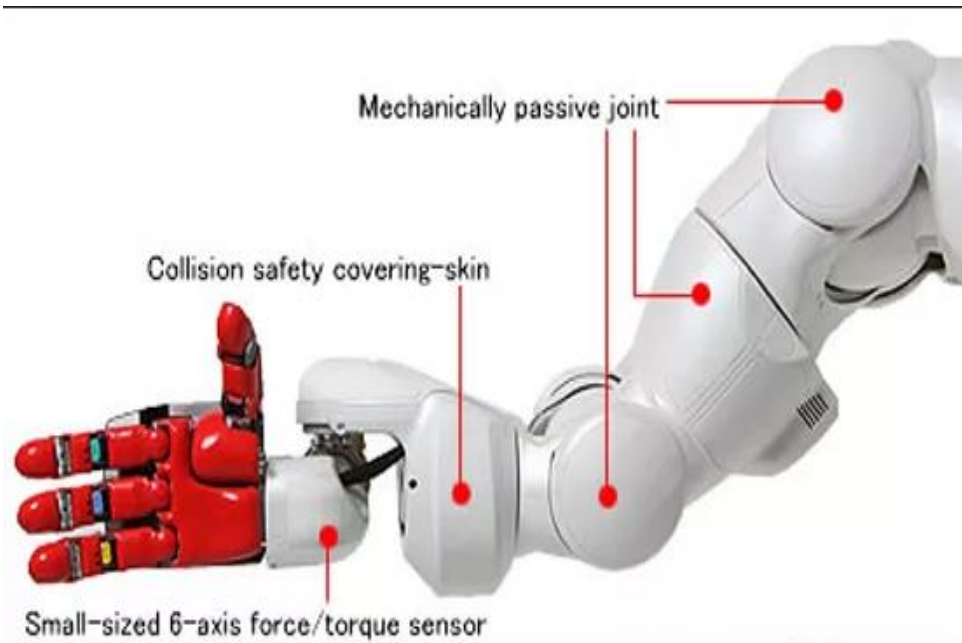


Figura 7 Twendy-One Hand [8]

1.3.3 FluidHand - Forschungszentrum Karlsruhe

La mano robótica FluidHand - Forschungszentrum Karlsruhe se caracteriza por tener una apariencia similar a una mano humana en consideraciones de tamaño y bajo peso. El bajo peso de esta mano antropomórfica se debe a que cada dedo pesa menos de 20g en la primera versión desarrollada. La primera versión fue desarrollada con la intención de servir como prótesis. Tiene 18 articulaciones y 13 actuadores, lo que le permite un movimiento más natural en una prótesis con menos grados de libertad.

La extensión de los dedos es proporcionada por una serie de resortes localizados en las articulaciones. El pulgar posee tres grados de libertad, la base a la cual está conectada tiene 2 grados de libertad. Su enfoque principal es el agarre de objetos diseñados para el ser humano especialmente en lugares como el hogar de la persona. Sus actuadores trabajan con fluido lo que le permite a esta mano antropomórfica alcanzar movimientos similares al del ser humano.



Figura 8 FluidHand [9]

2 ANÁLISIS MANO HUMANA

La anterior sección se mencionó diferentes diseños de manos robóticas y su evolución. Podemos observar como la mano humana puede superar los diseños robóticos por su alta complejidad y elaboración en su estructura biológica. Lo cual se hace fundamental el análisis detallado de la mano humana para elaborar una mano antropomórfica que pueda asimilarse a su comportamiento.

En esta sección se presenta la anatomía humana y su análisis detallado en su funcionamiento que hace posible los movimientos de la mano. Se comienza esta sección por la estructura ósea y sus ligamentos. Posteriormente, se hablara sobre las articulaciones de la mano, los dedos y el pulgar para llegar a los tendones. En la sección de tendones se realizara un análisis detallado, en su estructura, y funcionamiento, ya que ahí se encuentra la clave del movimiento en las manos humanas.

Se finalizara esta sección explicando la taxonomía de cutkosky, loas articulaciones involucradas en cada de sus movimientos y limitaciones que tiene la mano humana.

2.1 Anatomía Mano Humana

La anatomía es el resultado para entender las capacidades de movimiento de la mano humana. Lo cual nos implica, que el análisis de la anatomía nos brinda un entendimiento del principio de funcionamiento que una mano robótica debe tener. Con este acercamiento, las ventajas que tiene una mano humana sobre una mano robótica se pueden combinar con beneficio de la tecnología.

La idea no es copiar el sistema biológico de la mano humana, sino que entender su comportamiento para poder llegar a una solución que pueda emular estas características. Por lo cual es sección se enfoca en explicar en detalle la anatomía de los dedos y resaltar las partes más importantes en su correcto funcionamiento.

2.1.1 Estructura Ósea de la Mano Humana

El sistema óseo de la mano constituye una estructura, que debido a su arquitectura forma una serie de ejes (transverso–longitudinal) que favorecerá su plan funcional, estos ejes, tanto el longitudinal como los dos transversales, son esenciales para la prensión y adaptabilidad de la mano [10]. Existen dos arcos en la mano, uno que corresponde a las articulaciones metacarpofalángicas y otro longitudinal (ver figura 9). Su principal función es favorecer la presión de la mano.

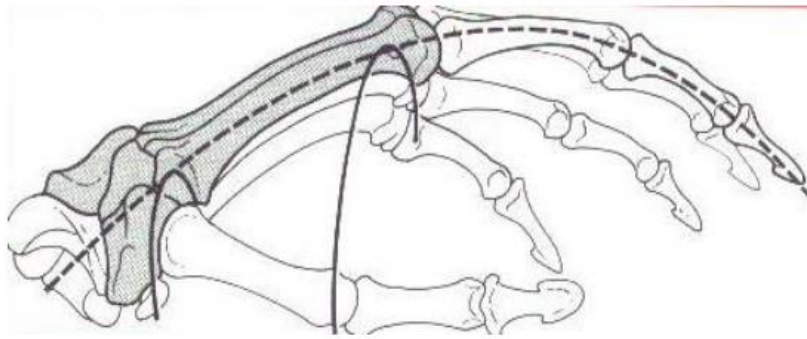


Figura 9 Arcos de la mano [11]

La mano humana está compuesta por 27 huesos divididos en tres grupos principales [12].

- Huesos de la muñeca
- Huesos de la palma
- Huesos digitales o falanges

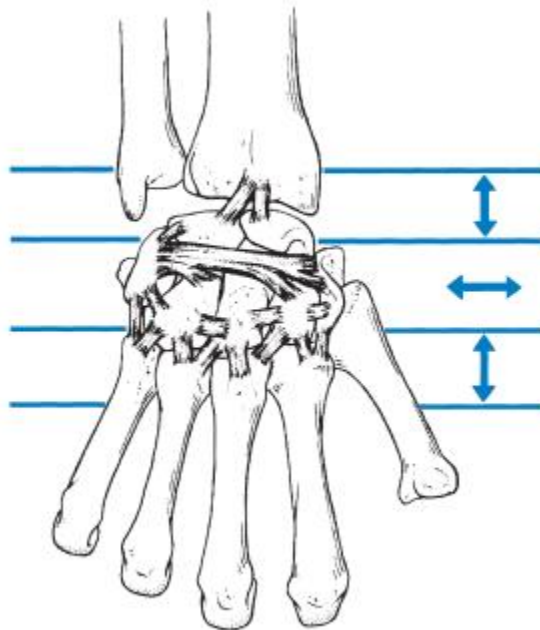


Figura 10 Ligamentos dorsales. Las flechas enfatizan la dirección de los ligamentos [13].

La palma está basada en los huesos de la muñeca, es la encargada de darle movimiento a la muñeca [13]. Posee unos ligamentos dorsales que le permiten tener 3 grados de libertad (ver figura 10). Pero nos vamos a enfocar en los 4 dedos de la mano (Meñique, Anular, Corazón, Índice) y el pulgar. El término de dedo no aplica para el pulgar en esta tesis porque posee características

biológicas que lo diferencian de los otros dedos, mientras que los 4 dedos poseen la misma configuración.

Esta tesis va enfocada en dos partes que componen la mano humana, el metacarpo y las falanges. El metacarpo constituye el esqueleto de la región palmar y consta de cinco huesos, denominados metacarpianos. Los huesos metacarpianos se articulan con la muñeca para formar cinco carpometacarpianos de las articulaciones. El primer metacarpiano se ha fijado en un ángulo de 90 grados respecto a los otros cuatro metacarpianos, con el fin de entrar en contacto con cada uno de los dedos. Esta configuración del pulgar permite pellizcar, agarrar y manipular objetos [19].

Las falanges se conectan con los metacarpianos, que son esenciales para la presión, articulación y tacto del dedo. Las falanges se dividen en tres partes que se denominan falange, falangina y falangeta (primera, segunda y tercera falange o proximal, media y distal) [10]. El pulgar solo consta de dos falanges, por lo cual no se toma en cuenta como un dedo en esta tesis.

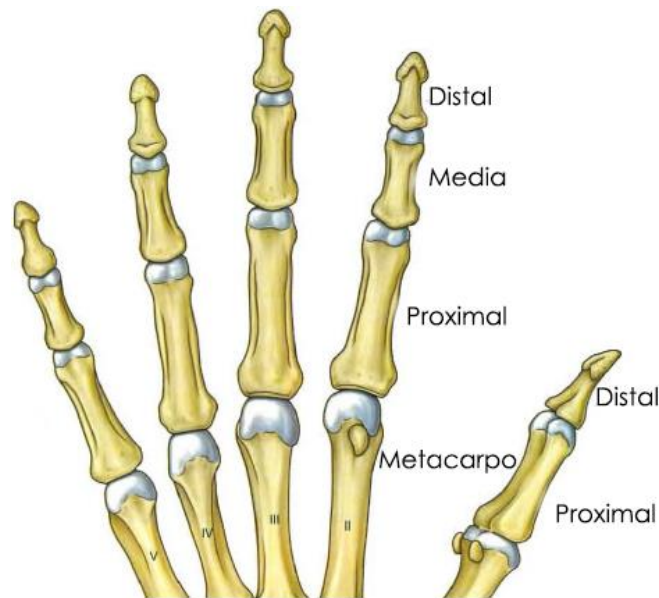


Figura 11 Nomenclatura huesos mano humana [14]

2.1.2 Medidas Mano Humana

Los huesos de la mano humana no son de una medida constante en todos los seres humanos por diferentes factores como el género, genes y edad, la anatomía de la mano humana puede variar. Sin embargo, se han realizado una serie de estudios que determinan un promedio de las longitudes de estos huesos. Cada dedo presenta unas dimensiones diferentes, por lo cual no se puede generalizar una medida para todos los dedos.

Dedo	Falange Distal (mm)	Falange Media (mm)	Falange Proximal (mm)	Metacarpo (mm)
Pulgar	21.67 ± 1.60	-	31.57 ± 3.13	46.22 ± 3.94
Índice	15.82 ± 2.26	22.38 ± 2.51	39.78 ± 4.94	68.12 ± 6.27
Corazón	17.40 ± 1.85	26.33 ± 3.00	44.63 ± 3.81	64.60 ± 5.38
Angular	17.30 ± 2.22	25.65 ± 3.29	41.37 ± 3.87	58.00 ± 5.06
Meñique	15.96 ± 2.45	18.11 ± 2.54	32.74 ± 2.77	53.69 ± 4.36

Tabla 1 Longitudes de falanges y metacarpianos

La longitud de los dedos se midió entre la articulación metacarpofalángica, por su cara dorsal, hasta el extremo distal de los dedos; la longitud de la zona correspondiente a las falanges se midieron por la cara dorsal de la mano; la de la falange proximal se registró entre la articulación metacarpofalángica y la interfalángica proximal; la de la falange media, entre la articulación interfalángica proximal y la distal, y, la de la falange distal entre la articulación interfalángica distal y el extremo de los dedos [15].

Para el diseño del dedo antropomórfico se tomaron las siguientes medidas de acuerdo a la aproximación de las longitudes estipuladas en la tabla 1.

Hueso	Longitud (mm)
Metacarpo	73.2
Falange proximal	45.7
Falange media	32.1
Falange distal	17.7

Tabla 2 Medidas Dedo antropomórfico

2.1.3 Tipos de Articulaciones de la Mano Humana

Entendiendo las articulaciones de la mano nos permite diseñar un modelo apropiado para un dedo antropomórfico. El análisis de las articulaciones nos entrega información clave para descubrir y entender sus funciones, y lograr un movimiento natural que emule las características biológicas del dedo humano.

Las articulaciones de la mano y la muñeca tienen el nombre de los huesos que se conectan. Cada dedo tiene dos articulaciones interfalángica, distal y proximal. El pulgar tiene sólo una articulación interfalángica. Entre las falanges proximales y metacarpianas están los nudillos o articulaciones metacarpofalángicas [16].

El pulgar está caracterizado por tres articulaciones (Interfalángica IP, Metacarpofalángica MCP y trapeziometacarpal TMC), dos falanges (primera falange y segunda falange) y metacarpianos. Los

otros dedos están constituidos por diferentes articulaciones (Interfalángicas distales DIP, Interfalángica proximal PIP y Metacarpofalángica MCP), tres falanges (Falange distal, media y proximal) y metacarpianos [17].

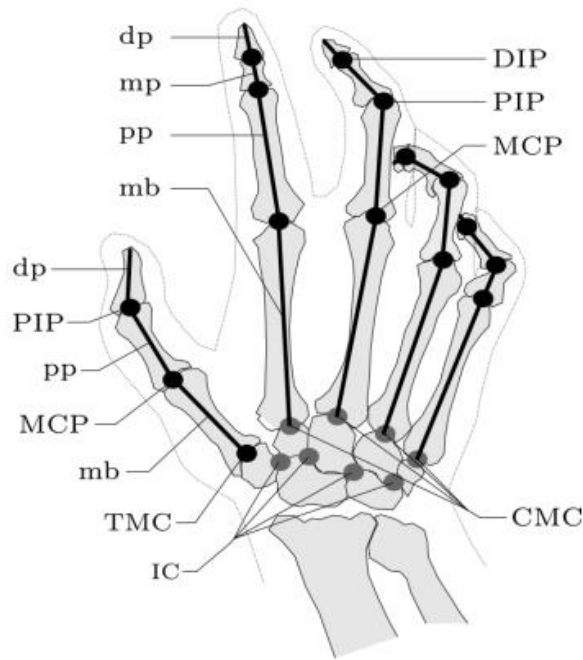


Figura 12 Nomenclatura articulaciones de la mano [18]

2.1.4 Articulaciones de los Dedos

Las articulaciones metacarpo-falángicas que se encuentran en los nudillos son la cabeza de los metacarpianos (epífisis inferior) y la cavidad glenoidea de las falanges (epífisis superior). Se debe tener en cuenta que los ligamentos que refuerzan estas articulaciones son de dos tipos: los colaterales y el ligamento transversal del metacarpo [19].

Tienen como función de reforzar la cara palmar a excepción del pulgar. Estas articulaciones metacarpo-falángicas realizan movimientos en el eje transversal, de flexión (80-90°), de extensión (30-40°), y en el eje sagital, de separación: 60° y aproximación (0°) [19].

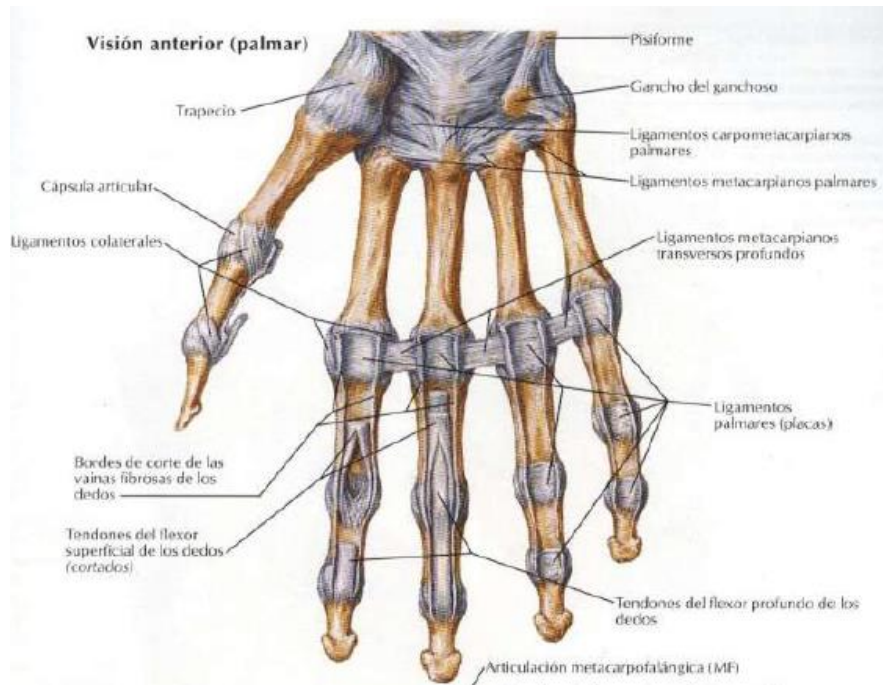


Figura 13 Ligamentos metacarpofalángicos [20]

Las articulaciones interfalángicas son de tipo troclear, se refiere a una articulación en forma de polea que permite que un hueso adyacente pueda girar en el mismo plano. Están localizadas cuatro en los dedos (índice, corazón, anular y meñique) y sólo una en el pulgar. Sus movimientos articulares son flexión (80-90°) y extensión (0°) [19].

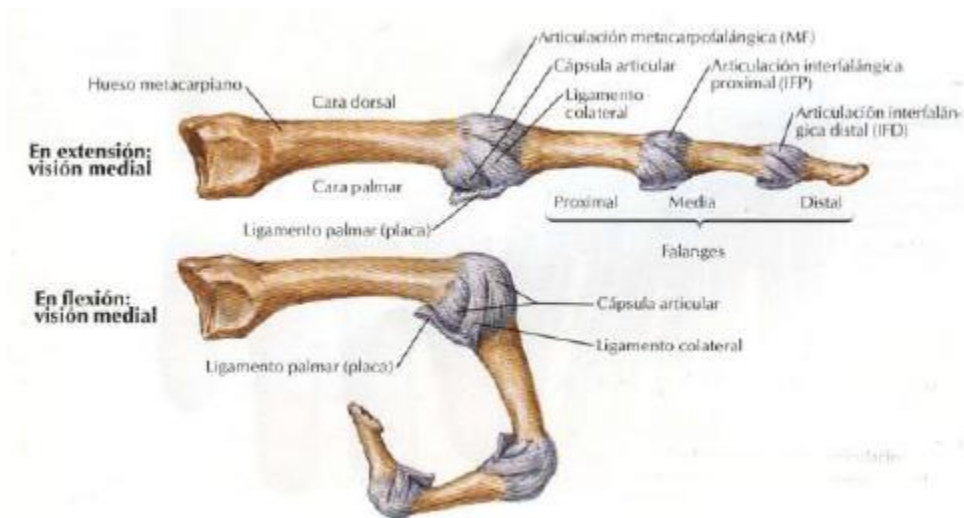


Figura 14 Ligamentos interfalángicos [20]

La superficie articular de la extremidad inferior de las falanges que está por encima de la interlínea articular tiene forma de polea. La tróclea es más ancha por delante que por detrás estando además más extendida por la cara palmar que por la dorsal. Permiten flexionar y extender los dedos aunque pasivamente pueden llevar a cabo desplazamientos laterales muy limitados [21].

Como las articulaciones son de tipo troclear se pueden catalogar en grados de libertad. Donde las articulaciones de un grado de libertad son las Interfalángicas distales DIP, Interfalángica proximal PIP y la interfalángica IP que es la del pulgar. Las articulaciones de dos grados de libertad son las de Metacarpofalángica MCP correspondientes a los dedos y el pulgar.

Los 4 dedos poseen dos tipos de articulaciones mientras que el pulgar posee tres tipos de articulaciones. Sin embargo, nos vamos a enfocar en las dos articulaciones de los dedos.

- La Metacarpofalángica MCP: La cabeza de la falange es convexa en todas las direcciones. La base de la falange es cóncava en todas las direcciones. El enclavamiento forma una articulación esférica con tres grados de libertad. El grado de libertad corresponden a la los movimientos de flexión/ extensión, abducción/aducción y la rotación del dedo [21].
- Interfalángicas distales DIP e Interfalángica proximal PIP: La cabeza tiene forma de una polea, mientras que la base está hueca con dos cavidades separadas por un pico. Debido a la inserción de dos formas, la articulación es de un grado de libertad tipo cilíndrico, el eje de rotación de los cuales es perpendicular al plano formado por la falange. El grado de libertad corresponde a la flexión/extensión de la falange [21].

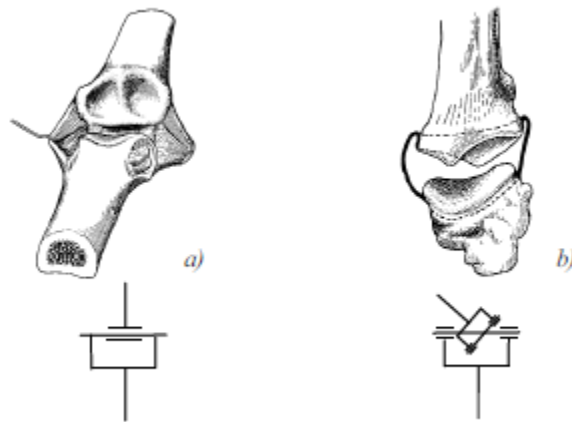


Figura 15 A: Interfalángicas B: Metacarpofalángicas [21]

2.1.5 Ligamentos, Tendones y Músculos

El sistema muscular es el conjunto de más de 600 músculos que existen en el cuerpo humano, la función de la mayoría de los músculos es producir movimientos de las partes del cuerpo. El sistema muscular crea un equilibrio al estabilizar la posición del cuerpo, producir movimiento, regular el volumen de los órganos, movilizar sustancias dentro del cuerpo y producir calor [22].

Los músculos son tejidos blandos que permiten el movimiento de los huesos y de las articulaciones. De variadas formas y tamaños, representan casi la mitad del peso del cuerpo humano. Los músculos se dividen en tres grandes grupos que son los músculos estriados o esqueléticos, músculos lisos y músculos cardiacos [23].

Los músculos también se pueden clasificar según su movimiento. En la mano se puede encontrar los flexores que se utilizan para la flexión, los extensores que se utilizan para las extensiones y abductores que son utilizados para la separación o abducción.

Los músculos extrínsecos se clasifican funcional y estructuralmente en dos grupos de músculos, los anteriores y los posteriores (ver figura 16). Los músculos anteriores son flexores de dedos y la mano y los músculos posteriores son extensores. Los flexores principales de las falanges y de la mano son el flexor profundo digitorum (FPD) y el flexor superficial digitorum (FSD). El FDP se utiliza para doblar los dedos sin carga, mientras que el FSP se utiliza cuando se requiere de fuerza adicional, por ejemplo, una contracción voluntaria máxima [21].

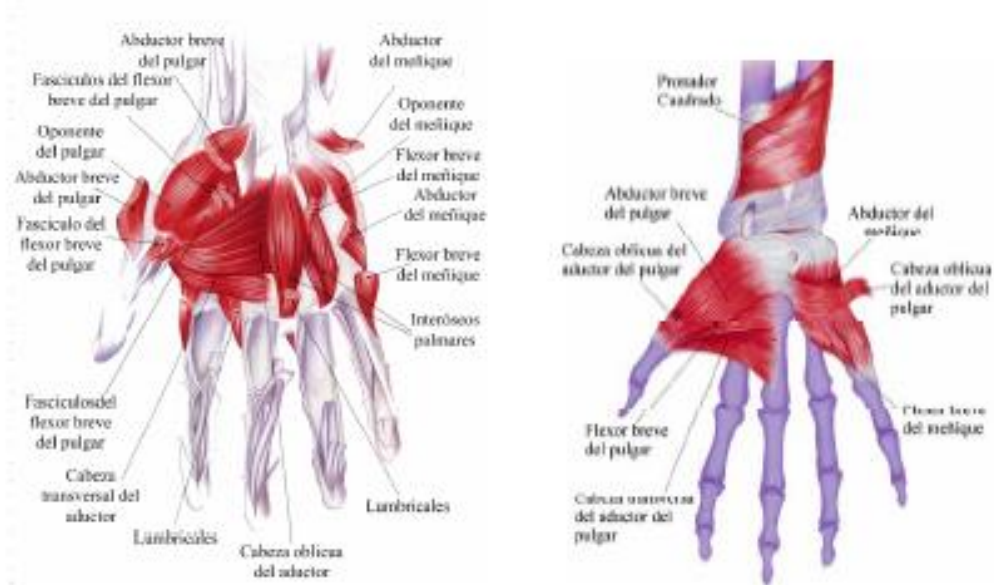


Figura 16 Músculos anteriores y exteriores de la mano humana [24]

En la mano se presentan tres grupos de músculos que son los músculos intrínsecos, músculos de la región también llamados eminencia tenar y músculos de la región hipotenar también llamado eminencia hipotenar [25].

- Intrínsecos: tenar(flexión del pulgar y abducción/aducción)
- Hipotenar: flexión del dedo meñique y aducción
- Media palmar: flexión de las uniones MPC y abducción/aducción

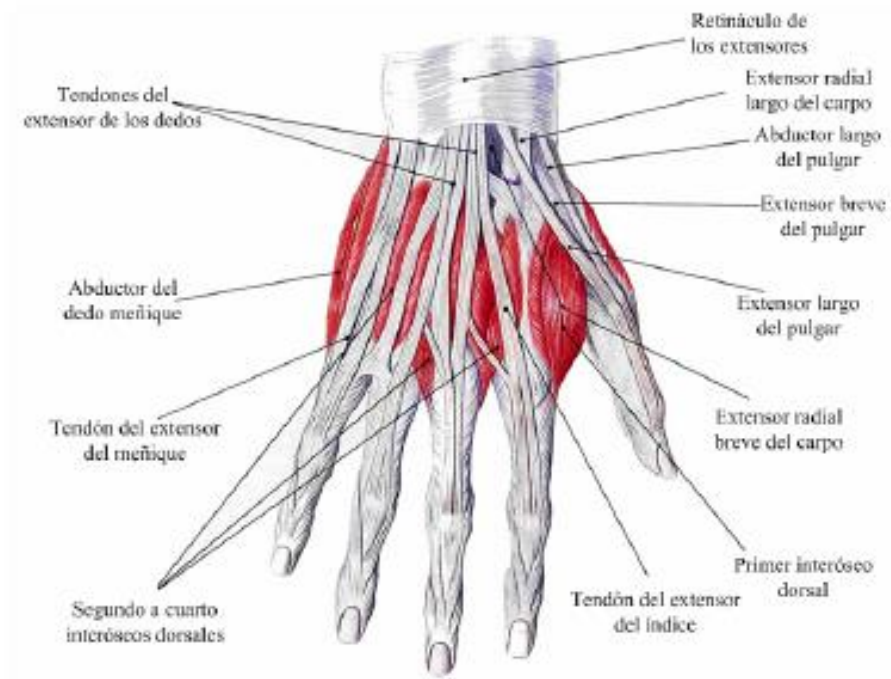


Figura 17 Músculos de la Mano [24]

El tendón sinovial envuelve los dedos para proporcionar baja fricción en el deslizamiento de los tendones, dentro de las envolturas y nutrientes del tendón, el cual puede sr modelado como un sistema de poleas.

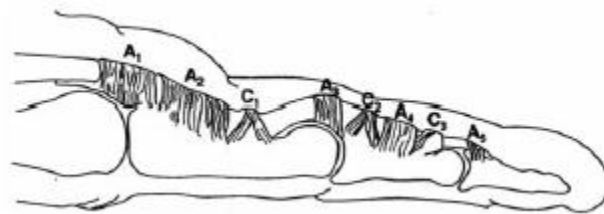


Figura 18 Tendón sinovial [26]

2.1.5.2 Capuchón extensor

Los tendones del extensor de los dedos y del extensor largo del pulgar pasan por la cara dorsal de los dedos y se expanden por las falanges proximales para formar un complejo capuchón extensor. Los tendones del extensor del dedo meñique, del extensor del índice y del extensor corto del pulgar se unen a estos capuchones. Cada uno de los capuchones tiene una forma triangular y cuenta con un vértice insertado en la falange distal, una zona central insertada en la falange media y la base triangular envuelve la articulación metacarpofalángica en los dedos índice, medio, anular y meñique [27].

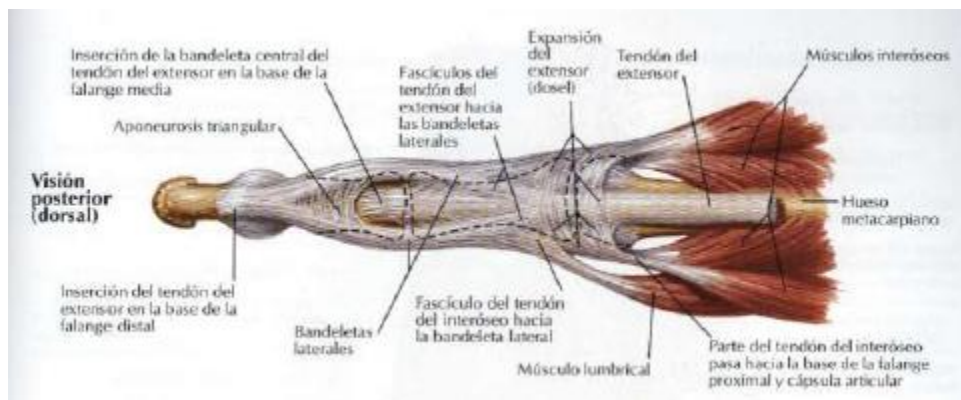


Figura 19 Tendones Flexores y extensores en los dedos [20]

En los dedos índice, corazón, anular y meñique, los músculos lumbricales, interóseos y el abductor del dedo meñique se insertan al capuchón extensor. La fuerza de los músculos intrínsecos de la mano se transmite al capuchón extensor en la zona distal de la articulación metacarpofalángica, por lo que estos músculos se flexionan en esta articulación [23].

Esta capacidad de flexionar las articulaciones metacarpofalángicas, al mismo tiempo que se extienden las interfalángicas, se debe enteramente a la acuña de los músculos intrínsecos de la mano. Logrando que la articulación llegue a 90 grados.



Figura 20 Flexión capuchón extensor [27]

Se debe tener en cuenta la posición exacta de colocar estos ligamentos en el lugar adecuado. Si no se colocan en el lugar adecuado, cualquier movimiento de tensión puede generar el quiebre del dedo antropomórfico o hasta un movimiento inadecuado.

2.2 Taxonomía de Agarres

En el estudio de la manipulación y agarres se puede encontrar dos acercamientos diferentes, uno enfocado en un estudio empírico del ser humano y el otro acercamiento es uno que se asemeja de forma analítica basada en modelos físicos de procesos de manipulación. En esta sección se realizara una revisión detallada de la taxonomía y la predicción del tipo de agarre a escoger. Esta sección nos muestra como la geometría de un objeto y la tarea a realizar nos hace escoger un agarre en particular.

Como se había mencionado antes existen dos métodos para el estudio de la taxonomía, una empírica y otra analítica. El método empírico, es el acercamiento del estudio por medio de animales y humanos, el cual el único dato que se debe tener en cuenta es la experiencia. Con el fin de diseñar un sistema que se asemeje a un sistema biológico

En el método analítico se realizan modelados en términos de la fuerza y movimiento requerido usando las leyes de la física. El problema está en el proceso de tomar la decisión de qué tipo de agarre usar es demasiado complicado y para simplificarlo se requiere métodos avanzados. Sin embargo, la idea no es escoger el mejor método sino combinarlos para obtener el mejor resultado.

El estudio de los agarres de la mano ha sido considerado en el área de interés para las cirugías, diseño de prótesis y para cuantificar la extensión de la discapacidad en personas con defectos congénitos o lesiones. Como resultado, se han generado una seria de escritos médicos relacionados a las capacidades o formas de agarres de la mano humana. La mayoría de estos escritos se refiere a seis agarres definidos por Schlesinger [1919] y resumido por Taylor y Scharz [1955] como cilíndricas, punta del dedo, gancho, palmar, esférica y lateral [25].

Se debe notar que la evolución de la mano humana como un órgano es usada como sensación y comunicación y también como manipulación. Cutkosky en su taxonomía de agarres realiza una clasificación, distinguiendo principalmente agarres de precisión, que requieren principalmente destreza y sensibilidad, y los agarres fuertes, que requieren seguridad y estabilidad. El diferente tipo de agarre dependiendo el objeto se va diferenciando el número de dedos implicados o la disposición y número de dedos implicados en el agarre (ver figura 21).

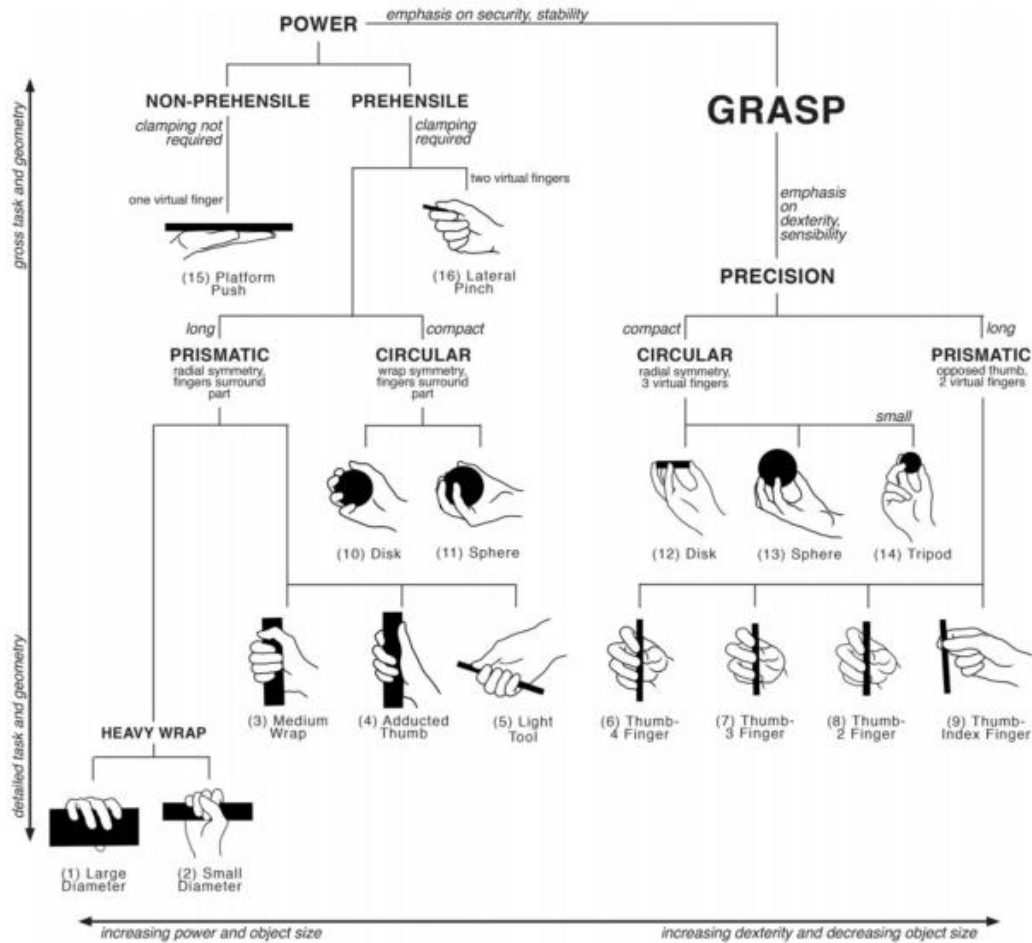


Figura 21 Taxonomía de agarres descrita por Cutkosky [25]

Para estudiar cual agarre se debe escoger se construyó la taxonomía de agarres. La taxonomía es un arreglo sistemático del espacio de los agarres humanos, y la organización de la taxonomía revela uno de los factores influenciados por la decisión del agarre. El agarre puede ser continuo de acuerdo con el tamaño del objeto y la fuerza requerida (ver figura 22). La taxonomía nos muestra cuales son los requerimientos de la tarea dada, tal como fuerza y movimiento, y combinado con la geometría del objeto se puede escoger un tipo de agarre.



Figura 22 Ejemplo taxonomía

Sin embargo, para llevar a la práctica los diferentes tipos de agarres se debe conocer lo que es la cinemática directa e inversa con el fin de implementar la taxonomía de agarres descrita por Cutkosky en una mano robótica o prótesis.

2.2.1 Articulaciones y Rangos de la Mano Humana

La mano humana tiene numerosos movimientos en los cuales intervienen las articulaciones falángicas entre ellas y su sinergia con los metacarpos. En la sección anterior se mencionaron los tipos de movimientos que tiene el dedo, los cuales son flexión, extensión, abducción y aducción. Para cada falange hay un límite en su movimiento, ese límite nos determinará el punto crítico del dedo antropomórfico.

Articulación	DOF	Ángulo de flexión	Ángulo de extensión
DIP	1	90°	5°
PIP	1	100°	0°
MCP	2	90°	30° - 40°

Tabla 3 Rango de las Articulaciones [28]

Se puede observar como en la metacarpofalángica el total de movimiento es de 120° a 135° y está dividida en 90° para la flexión y entre 30° a 45° para la extensión. En la interfalángica proximal hay un arco de 100° asociados únicamente para la flexión, no existe extensión en esta articulación.

Para la interfalángica distal hay un arco de movimiento total de 90° a 100° dividido en 90° para la flexión y entre 0° a 10° para la extensión.

Articulación	Abducción	Aducción
MCP	20°	0°

Tabla 4 Rango de la Abducción y Aducción [28]

La abducción y aducción se refiere al movimiento en el cual los dedos se juntan y se separan entre sí, en la abducción deben separarse 20° entre si y en la aducción se juntan por lo cual hay 0° . Sin embargo, depende del dedo puede moverse unos ángulos más que los demás.

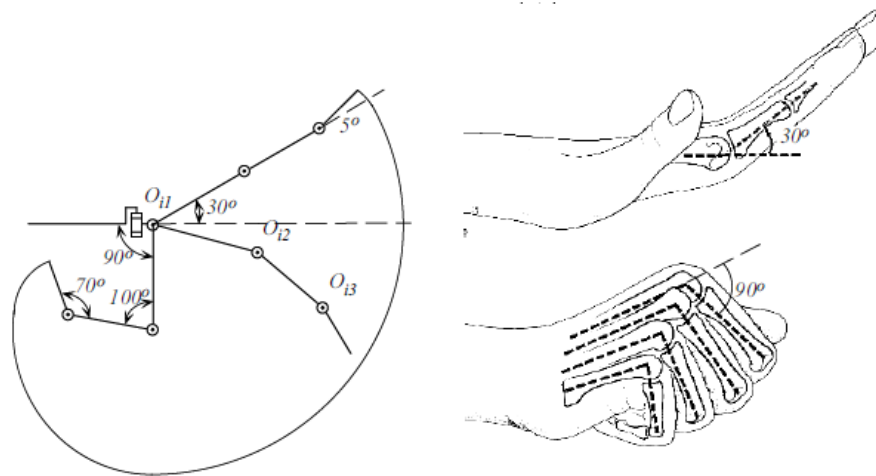


Figura 23 Rangos del movimiento de los dedos [21]

3 CINEMÁTICA DEDO ANTROPOMÓRFICO

Teniendo en cuenta las características biológicas de la mano humana se parte por realizar los cálculos pertinentes de la cinemática del dedo antropomórfico. La cinemática estudia los movimientos de los cuerpos independientes de las causas que lo producen [29]. En esta sección se enfocara en calcular la cinemática directa, inversa y el modelado dinámico del dedo antropomórfico.

3.1 Cinemática Directa

La cinemática directa de un robot manipulador describe la relación entre el movimiento de las articulaciones del manipulador y el movimiento resultante del cuerpo rígido el cual forma el robot. Un manipulador está compuesto por vínculos seriales que están entrelazado por medio de una articulación prismática o rotacional que viene desde la base hasta el efector final del manipulador.

Calcular la posición y orientación del efector final en términos de las variables de las articulaciones se llama cinemática directa [30]. Con el fin de tener cinemática directa para un mecanismo robótico de una manera sistemática, se debe utilizar un adecuado modelo cinemático. Denavit Hartenberg es un método que usa cuatro parámetros y es el más común para describir la cinemática de un manipulador.

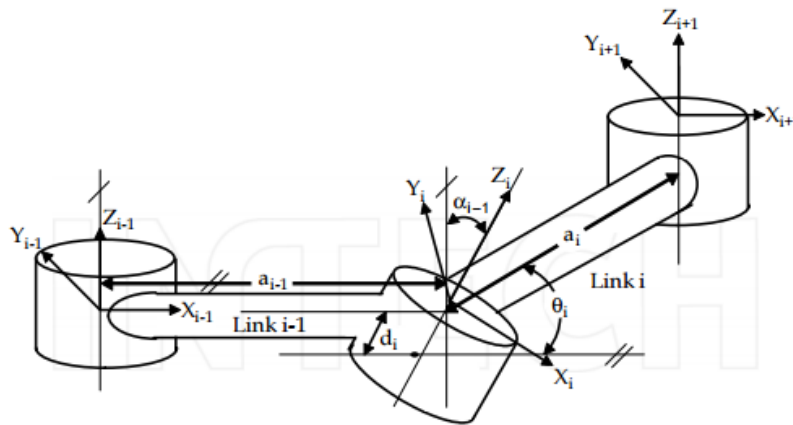


Figura 24 Asignación de parámetros DH [30]

3.1.1 Cálculo Cinemática Directa

En resumidas Denavit-Hartenberg propusieron un método sistemático para describir y representar la geometría espacial de los elementos de una cadena cinemática. El proceso consiste en fijar un sistema de coordenadas a cada enlace, de acuerdo a un conjunto de normas que fueron mencionadas anteriormente. Luego de identificar los parámetros geométricos del sistema fijo se obtiene una matriz de transformación homogénea. El producto de todas las matrices de transformación generara la matriz de transformación homogénea que relaciona el sistema con un sistema de referencia fijo arbitrariamente escogido.

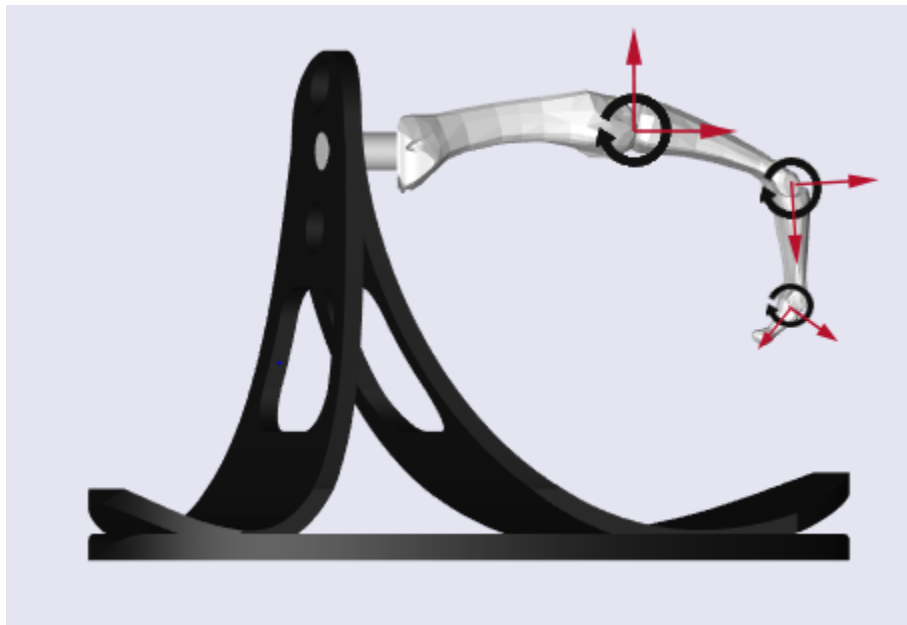


Figura 25 Grados de libertad dedo antropomórfico

Sin embargo, como el dedo antropomórfico diseñado se mueve en dos ejes. Se re configura el diseño para realizar un cálculo directo usando matrices rotacionales y obtener la cinemática directa sin necesidad de usar el método de Denavit-Hartenberg.

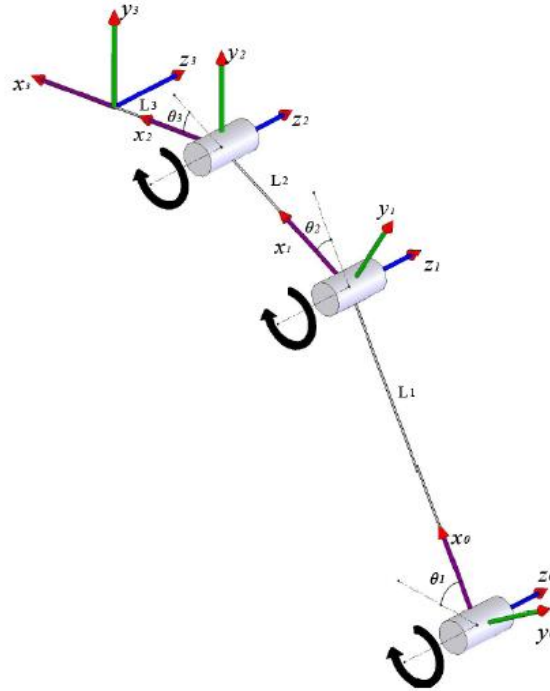


Figura 26 Representación geométrica de un dedo 3GDL [26]

Para calcular la cinemática directa del dedo antropomórfico se utiliza el siguiente método. Donde nos basamos en la vista que depende la articulación siguiente respecto a la actual.

$$T_{0h} = T_{01} + T_{12} + T_{23} + T_{3h}$$

Donde:

θ_i = ángulo entre ejes

T_i = Matriz Rotacional

L_i = Longitud de cada hueso

T_{0h} = Posición dedo antropomorfo

$$T_{01} = \begin{bmatrix} \cos\theta_1 & -\sin\theta_1 & 0 & 0 \\ \sin\theta_1 & \cos\theta_1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 1 \end{bmatrix}$$

$$T_{12} = \begin{bmatrix} \cos\theta_2 & -\sin\theta_2 & 0 & L_1 \\ \sin\theta_2 & \cos\theta_2 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

$$T_{23} = \begin{bmatrix} \cos\theta_3 & -\sin\theta_3 & 0 & L_2 \\ \sin\theta_3 & \cos\theta_3 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

$$T_{3h} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & L_3 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

Teniendo las matrices de cada articulación el siguiente paso es multiplicarlas todas para obtener la matriz general que nos indican la posición final en la que está el dedo antropomórfico. La última matriz generada es diferente a las demás porque es constante mientras que las anteriores matrices dependen de las articulaciones.

$$T_{0h} = \begin{bmatrix} \cos\theta_1 & -\sin\theta_1 & 0 & 0 \\ \sin\theta_1 & \cos\theta_1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 1 \end{bmatrix} * \begin{bmatrix} \cos\theta_2 & -\sin\theta_2 & 0 & L_1 \\ \sin\theta_2 & \cos\theta_2 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} * \begin{bmatrix} \cos\theta_3 & -\sin\theta_3 & 0 & L_2 \\ \sin\theta_3 & \cos\theta_3 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} * \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & L_3 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

Donde:

$$c_1 = \cos\theta_1$$

$$s_1 = \sin\theta_1$$

$$c_2 = \cos\theta_2$$

$$s_2 = \sin\theta_2$$

$$c_3 = \cos\theta_3$$

$$s_3 = \sin\theta_3$$

$$T_{0h} = \begin{bmatrix} n_x & o_x & a_x & p_x \\ n_y & o_y & a_y & p_y \\ n_z & o_z & a_z & p_z \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

Los términos que se obtienen son:

$$n_x = c_1 * (c_2 * c_3 - s_2 * s_3) - c_2 * s_1 * s_3 - c_3 * s_1 * s_2$$

$$n_y = c_1 * (c_2 * s_3 + s_2 * c_3) + c_2 * s_1 * c_3 - s_3 * s_1 * s_2$$

$$n_z = 0$$

$$o_x = c_1 * (c_2 * s_3 - s_2 * c_3) - c_2 * s_1 * c_3 - s_3 * s_1 * s_2$$

$$o_y = c_1 * (c_2 * c_3 - s_2 * s_3) - c_2 * s_1 * s_3 - c_3 * s_1 * s_2$$

$$o_z = 0$$

$$a_x = 0$$

$$a_y = 0$$

$$a_z = 1$$

$$p_x = c_1 * (c_2 * (c_3 * l_3 + l_2) + l_1 - l_3 * s_2 * s_3) - (c_2 * l_3 * s_3 + (c_3 * l_3 + l_2) * s_2) * s_1$$

$$p_y = c_1 * (c_2 * l_3 * s_3 + c_3 * s_2 + l_2 * s_2) + (c_2 * (c_3 * l_3 + l_2) + l_1 - l_3 * s_3 * s_2) * s_1$$

$$p_z = 0$$

Estas ecuaciones dan el valor de la posición de los dedos de la mano (p_x, p_y, p_z) en función de las coordenadas articulares.

Con los datos obtenidos de la solución del problema de cinemática directa, se encontraron los puntos que puede alcanzar la yema del dedo realizando los movimientos de flexión y extensión. Se tuvo en cuenta la Tabla 3 que nos indica el rango de movimiento de cada hueso y se puede observar el alcance del dedo como se muestra en la figura 31.

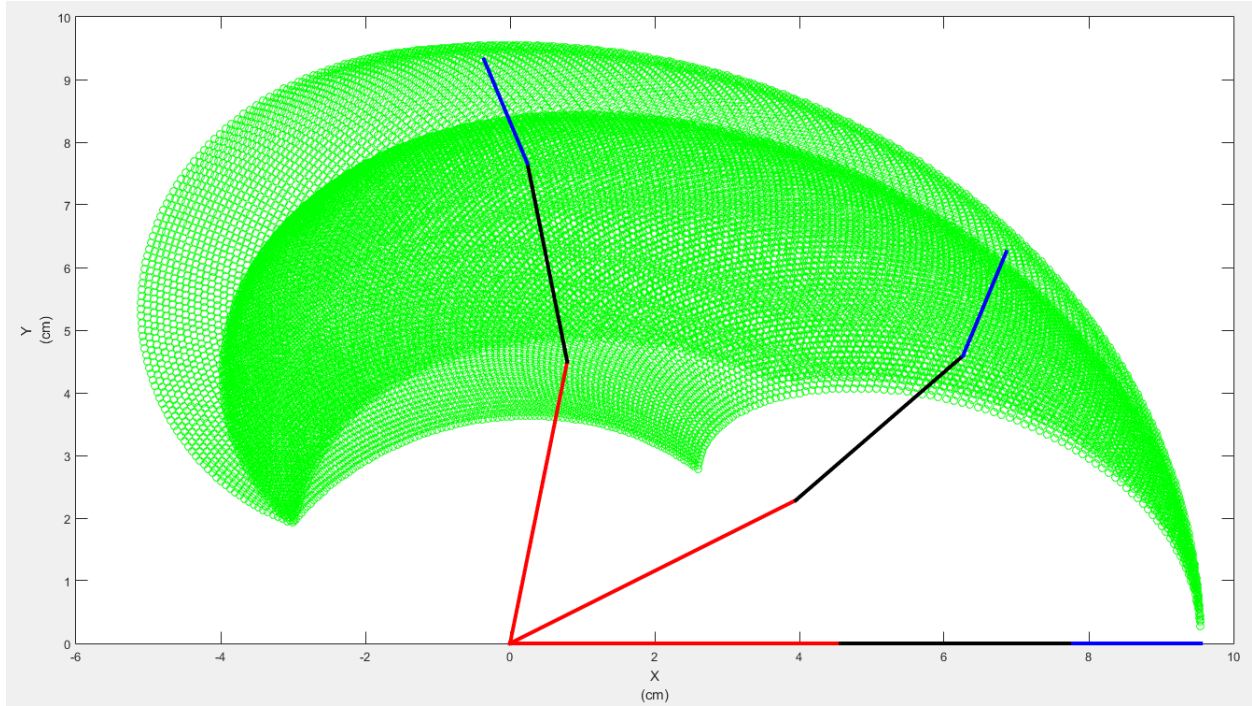


Figura 27 Gráfica de puntos alcanzables por el dedo humano

3.2 Cinemática Inversa

En la cinemática inversa el objetivo del problema es encontrar los valores que debe adoptar las articulaciones para que su efector final se posicione en la localización específica. El dedo antropomórfico se compone de 3 eslabones conectados por articulaciones de revolución.

El método más común para resolver la cinemática inversa, es el método geométrico. De acuerdo a la posición final encontrar los ángulos por medio de relaciones trigonométricas. Se puede realizar para un manipulador que trabaja en dos dimensiones tal como se puede para manipuladores que trabajan en tres dimensiones.

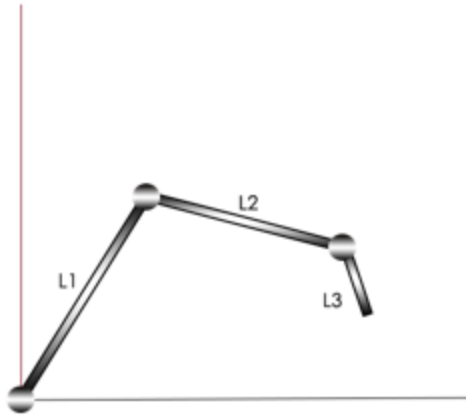


Figura 28 Representación dedo antropomórfico

Las soluciones del método geométrico están representadas de acuerdo a las limitaciones del manipulador, y su solución cambio respecto al ángulo y si se encuentra codo arriba o codo abajo. Sin embargo, como el dedo antropomórfico presenta 3 grados de libertad de tipo rotacional y por sus características biológicas solo se puede resolver el método geométrico para codo arriba.

3.2.1 Cálculo Cinemática Inversa

El dedo antropomórfico tiene tres grados de libertad, al resolver la cinemática inversa tenemos 5 variables conocidas y 8 incógnitas con 3 ecuaciones. La alternativa que se presenta en esta tesis es que se conoce los grados de acción de θ_3 . Si el valor de θ_3 tiene un rango de acción de $-10 < \theta_3 < 90$ se puede escoger un ángulo constante con el fin de determinar los ángulos de la falange proximal y falange media.

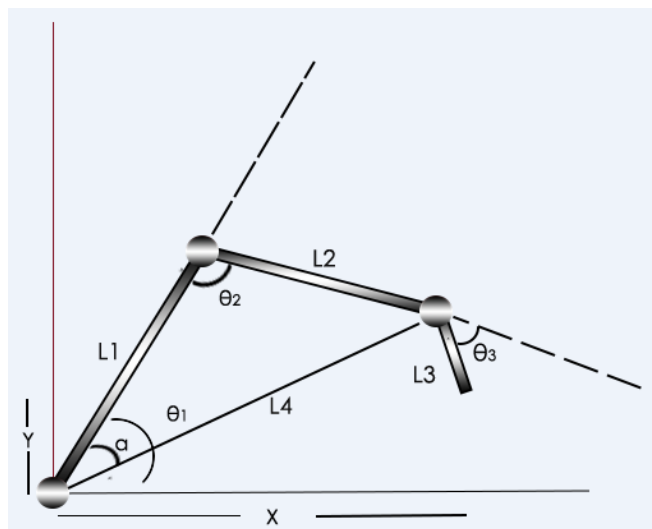


Figura 29 Cinemática Inversa dedo antropomórfico

Conociendo el valor de θ_3 , se puede calcular las coordenadas que corresponden al extremo final de la falange media (W_x, W_y). Para determinar las coordenadas del extremo final de la falange media se debe simplificar la falange distal y encontrar sus vectores correspondientes.

Donde:

$L_3 =$ Longitud falange distal

$L_2 =$ Longitud falange media

$L_1 =$ Longitud falange proximal

$$W_r = L_3 \sin \theta_3$$

$$W_d = L_3 \cos \theta_3$$

$$W_x = X - W_d$$

$$W_y = Y - W_r$$

Teniendo las coordenadas (W_x, W_y) el sistema de tres grados de libertad se convierte en un sistema de dos grados de libertad de sistema con codo arriba. Aplicando el teorema de cosenos al triángulo formado por L_1, L_2 y L_4 . Despejando el teorema de cosenos se puede obtener el resultado de θ_2 .

$$L_4 = \sqrt{W_x^2 + W_y^2}$$

$$L_1^2 + L_2^2 - 2L_1L_2\cos\theta_2 = W_x^2 + W_y^2$$

$$\theta_2 = \cos^{-1}\left(\frac{L_1^2 + L_2^2 - W_x^2 - W_y^2}{2L_1L_2}\right)$$

Para obtener el resultado de θ_1 , se aplica el teorema de coseno respecto al ángulo α . Donde se puede simplificar los cálculos al relacionar θ_1 con α .

$$L_1^2 + W_x^2 + W_y^2 - 2L_1\left(\sqrt{W_x^2 + W_y^2}\right)\cos\alpha = L_2^2$$

$$\alpha = \cos^{-1}\left(\frac{L_1^2 + W_x^2 + W_y^2 - L_2^2}{2L_1\left(\sqrt{W_x^2 + W_y^2}\right)}\right)$$

$$\tan(\theta_1 - \alpha) = \frac{W_y}{W_x}$$

$$\theta_1 = \tan^{-1}\left(\frac{W_y}{W_x}\right) + \alpha$$

3.3 Modelado Dinámico

Existen numerosos modelos musculares que se han establecido en un intento de obtener una relación entre sus diferentes características funcionales. El modelo de P. Nelson utiliza tres razones empíricas y una relación de fuerza y frecuencia. Se reveló que en el momento de la contracción del músculo existen 2 términos en la fuerza total ejercida por el músculo [21].

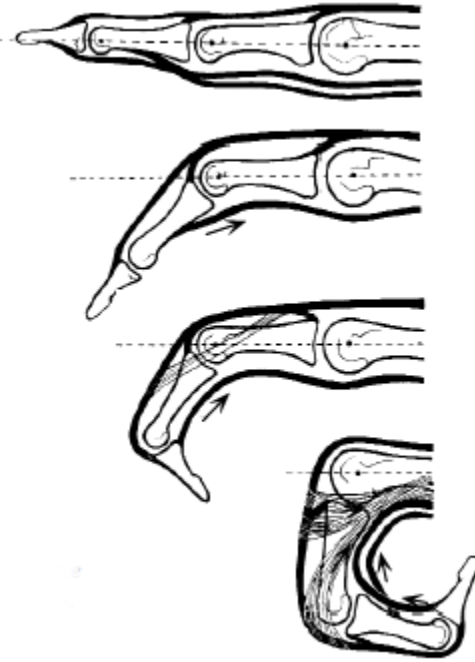


Figura 30 Movimiento completo de la flexión del dedo [24]

- La fuerza F_1 se representa como la rigidez del músculo, en donde el músculo no está excitado.
- La fuerza F_2 representa la fuerza contráctil debido a la acción de los sarcómeros que componen la unidad funcional del músculo cuando se excita.

Donde:

F_0 = Fuerza máxima ejercida por el músculo

L = Longitud del músculo

L_0 = Longitud del músculo relajado

$$F_1 = F_0 e^{\left[9 * \left(\frac{L}{L_0} - 1.554\right)\right]}$$

$$F_2 = F_0 e^{\left[9 * \left(\frac{\frac{L}{L_0} - 1.07}{0.404}\right)\right]^2}$$

Conocimiento de la elongación del músculo para las diferentes posiciones de la mano usando la siguiente ecuación $\delta x = L - L_0$. Permite estimar el par necesario del motor a nivel de cada articulación durante el agarre de objetos. Sin embargo, no se consideran los modelos dinámicos en el dedo antropomórfico porque el toque necesario para mover una articulación un grado es mínimo. El torque de los motores esta sobredimensionados por lo cual no es necesario calcular el torque necesario.

4 DISEÑO HUESOS DE LA MANO HUMANA

El diseño de los huesos de la mano virtual es de vital importancia para el correcto funcionamiento del dedo antropomórfico. Teniendo en cuenta las características biológicas de los huesos mencionadas anteriormente se puede diseñar un modelo que se asemeje a la mano humana. En esta sección se compone de tres partes, se dividen en la construcción de la mano virtual, incorporación de relaciones mecánicas y control dinámico de la mano virtual. Unificando todas estas etapas se obtendrá una mano virtual con 15 grados de libertad con propiedades de movimiento que emulan el comportamiento de la mano humana.

4.1 Diseño Huesos de la Mano Humana en MAYA

Autodesk Maya es una industria de aplicaciones de software 3D desarrollada por Autodesk que permite a profesionales que trabajan en el campo del cine, televisión, programas, efectos visuales y video juegos crear una animación 3D de alta resolución. Maya es usado por profesionales en una diversidad de industrias el cual tiene librerías orientadas a software CAD 3D, impresiones 3D, ingeniería civil, construcción, dibujo, manufactura, modelado, video juegos y mucho más [31].

La ventaja que tiene Maya es que es un software de modelado 3D que permite efectos visuales orientados a artistas, modelados y animadores a imaginar y diseñar publicidad, juegos y contenido de películas a alta resolución. Se utilizó maya porque los huesos humanos no tienen una forma uniforme que se puede modelar con facilidad en Solidworks. Como su geometría es abstracta, maya le permite al usuario realizar modelos con geometría abstracta que se asemeje a un hueso humano.

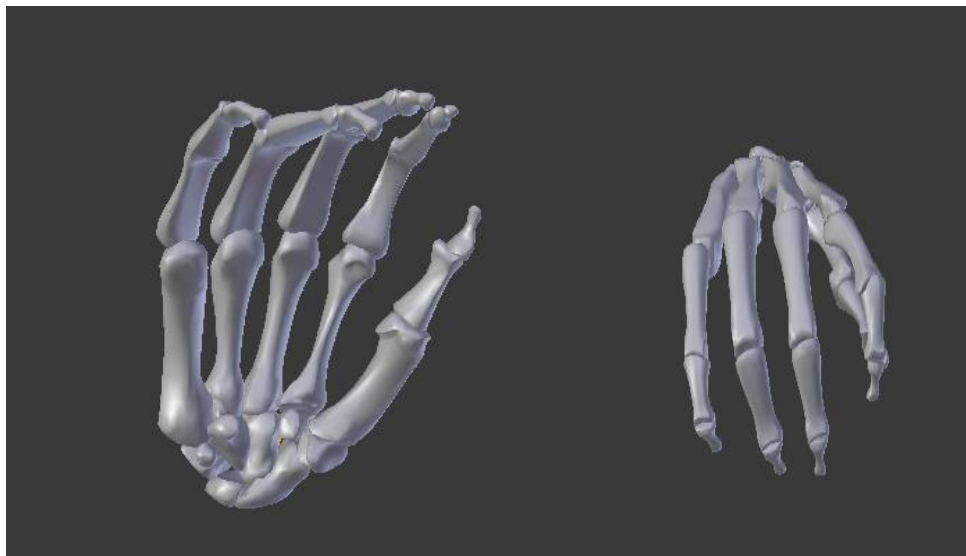


Figura 31 Mano Artificial en Maya



Figura 32 Mano Artificial en Maya

4.2 Movimiento de la Mano Humana en SOLIDWORKS

Solidworks 3D CAD es un software de diseño que proporciona una funcionalidad en el diseño; el cual tiene tres productos para escoger. El Solidworks Premium que permite elaborar soluciones en 3D basadas en el análisis de movimiento, ingeniería inversa y acabado superficial. Solidworks profesional ayuda en la productividad del diseño brindando una serie de librerías que se enfocan al costo de diseño, importar archivos CAD y renders foto realísticos. Solidworks Standars permite el acceso a la creación de superficies complejas el cual incluye Solidworks 3D CAD, 2D drawing, animación y diseño de manufactura [32].

Es una herramienta de alto nivel con un nivel a precisión muy alto, en donde se puede trabajar con tolerancias mínimas. Se pueden crear piezas con facilidad y ensamblarlas con el beneficio de darle movimiento y crear análisis a partir del ensamble generado. Sin embargo, es un software enfocado al diseño mecánico por lo cual no se podía crear los huesos virtuales de la mano en este software. Solidworks no permite crear figuras abstractas que se salgan del diseño convencional mecánico.

Aun así teniendo esa desventaja, se aprovechó Solidworks para enfocarse en el movimiento de la mano. Con Solidworks se pueden crear relaciones entre los objetos y diseñar modelos móviles que se pueden importar a Matlab con el fin de generar un control de este objeto virtual.

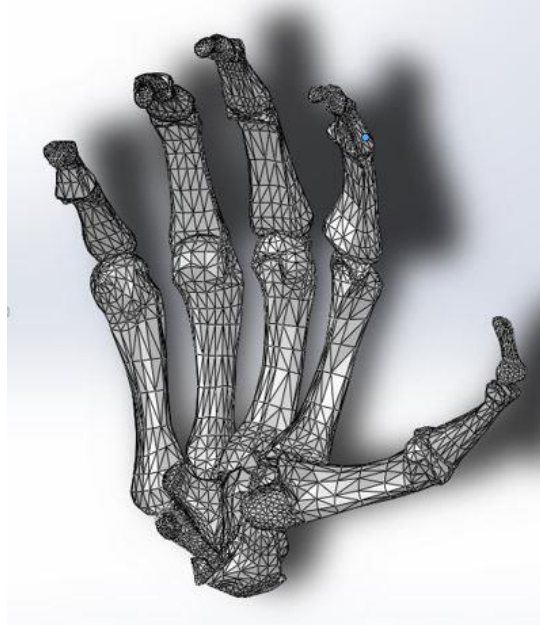


Figura 33 Mano virtual Solidworks

Al importar la mano virtual que fue diseñada en Maya, se debe importar en formato obj. Dentro de Solidworks se hizo el tratamiento pertinente para convertir el objeto en una pieza sólida. Convertido en una pieza se puede modificar para crear las relaciones necesarias y obtener movimiento en la mano (ver figura 34).



Figura 34 Mano virtual con Movimiento en Solidworks

Como se puede observar en la figura 34, la mano virtual ya tiene relaciones mecánicas que le permiten moverse en sus articulaciones. La mano virtual diseñada en Solidworks tiene 15 grados de libertad, tres grados de libertad en cada dedo y son articulaciones de tipo rotacional. Se hicieron una serie de pruebas para verificar que el ángulo de flexión sea el adecuado para emular una mano humana.

Teniendo la mano virtual con relaciones mecánicas, se prosigue por exportar la mano en un archivo compatible en Matlab. Instalando un plugin de SimMechanics, Solidworks automáticamente convierte la mano virtual en un formato compatible con Matlab manteniendo las relaciones incorporadas con el fin de realizar el control adecuado dentro de Matlab.

4.3 Construcción Mano Artificial MATLAB

Matlab es un entorno de cálculo técnico de altas prestaciones para cálculo numérico y visualización. Integra análisis numérico, cálculo matricial, procesamiento de señales, simulación de sistemas dinámicos, identificación de programas, diseño de sistemas de control, redes neuronales y otros [33].

La plataforma de Matlab esta optimizada para resolver problemas científicos e ingenieriles. El lenguaje de Matlab es reconocido como una expresión matemática computacional. Desarrollado con visualización en tiempo real, se puede obtener información de fácil acceso de los datos.

Matlab tiene aplicaciones infinitas pero su enfoca principal en esta tesis es la simulación de sistemas dinámicos. Al convertir la mano virtual en un formato compatible para Matlab, nos genera automáticamente una red de conexiones dentro de Simulink que representan las relaciones de movimiento de la mano virtual (ver figura 35).

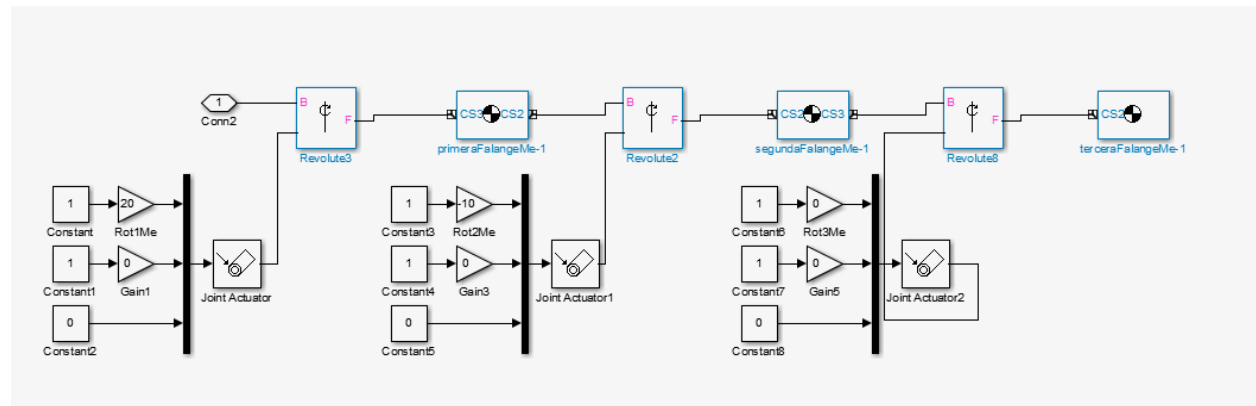


Figura 35 Esquema Simulación dinámica en simulink

Con la nueva representación de la mano virtual en Simulink se le pueden incorporar características mecánicas a cada una de los huesos. Como podemos observar en la figura 35, Matlab nos genera unos bloques de rotación. Dentro de estos bloques se configura la cantidad de actuadores que estarán en esta articulación. Se coloca un bloque que se llama Joint Actuator que es el encargado

de recibir parámetros como fuerza, torque, posición angular, velocidad y aceleración. Para este diseño se le están ingresando parámetros de velocidad angular, posición angular y aceleración angular que son controlados dentro de la interfaz.

Teniendo todos los bloques configurados y los parámetros angulares enlazados con el sistema de control se obtiene un control de la mano virtual y su visualización (ver figura 36).

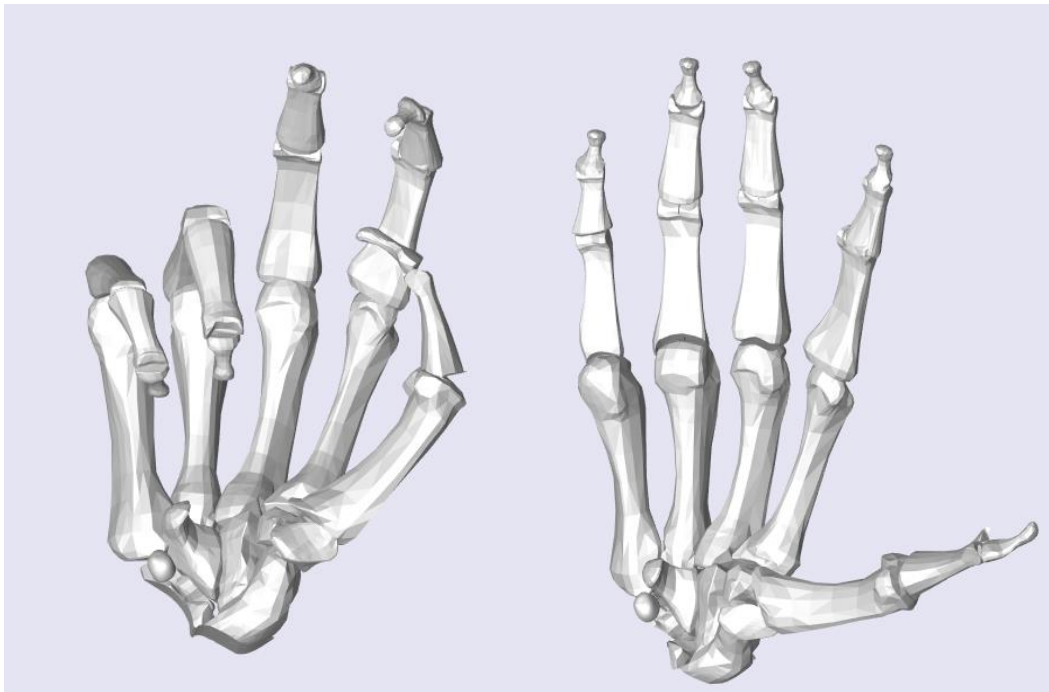


Figura 36 Mano Artificial con control de movimiento en Matlab

5 DISEÑO DEDO ANTROPOMÓRFICO

El diseño del dedo antropomórfico depende directamente de la adecuada elaboración de la mano virtual. Es la base para obtener un dedo antropomórfico que emule un dedo humano. Se debe tener en cuenta las características biológicas para su diseño y lograr un comportamiento natural en sus movimientos. En esta sección se enfocara en el diseño CAD del dedo antropomórfico y su validación dentro de Matlab con propiedades dinámicas.

5.1 Diseño Dedo Antropomórfico en Solidworks

Teniendo la mano virtual ya diseñada en solidworks con sus relaciones de movimiento se prosigue por escoger cual dedo usar. Para el diseño del dedo antropomórfico se escogió el dedo corazón por lo que es el más largo y se puede visualizar con facilidad su movimiento. Para las dimensiones del dedo antropomórfico se escogieron unas dimensiones estándar para su elaboración (ver tabla 2). Con el fin de tener las mismas dimensiones del dedo virtual y el dedo antropomórfico.

Se debe tener en cuenta que el diseño del dedo antropomórfico debe tener una base que soporte la estructura y una serie de canales donde los tendones serán ubicados. Los canales están diseñados en los puntos estratégicos en donde están localizados los tendones de la mano humana con el fin de obtener resultados similares a una mano humana.

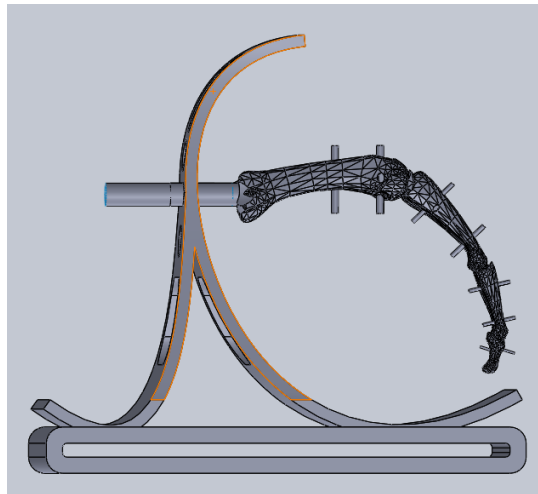


Figura 37 Prototipo dedo antropomórfico

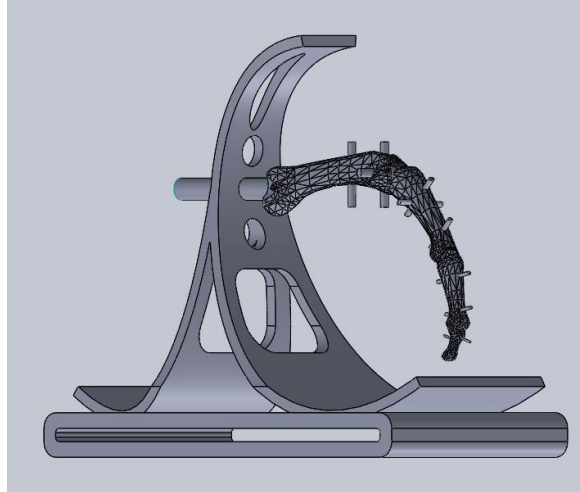


Figura 38 Prototipo dedo antropomórfico

La base se diseñó con el enfoque de sostener el dedo antropomórfico pero al mismo tiempo resaltar un diseño diferente que permite visualizar los rangos de movimiento del dedo antropomórfico. Para los canales en los que pasaran los tendones del dedo antropomórfico, se diseñaron 22 canales situados en puntos estratégicos que fueron tomados como referencia de las características biológicas de la mano humana.

5.2 Construcción Dedo Antropomórfico en MATLAB

Usando la herramienta de SimMechanics mencionada anteriormente, se puede exportar el modelo diseñado con las relaciones de movimiento y realizar un sistema de control dentro de Matlab. Dentro de Matlab se configuran los bloques para habilitar los actuadores tomar como entrada parámetros de posición angular, velocidad angular y aceleración angular.



Figura 39 Prototipo dedo antropomórfico en Matlab

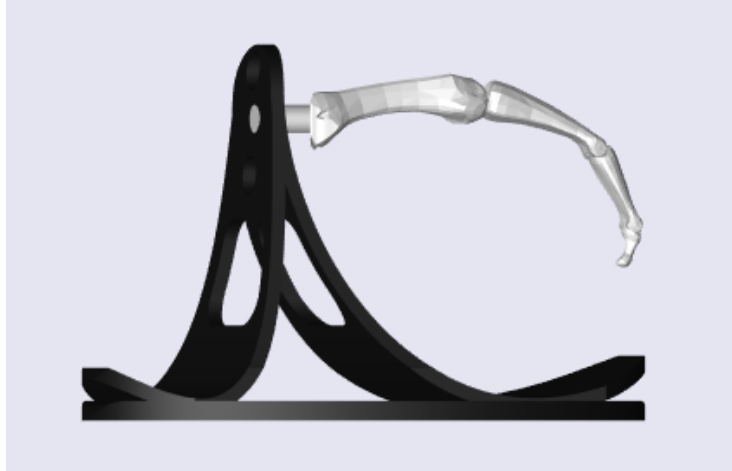


Figura 40 Prototipo dedo antropomórfico en Matlab

Se puede observar como el los parámetros configurados en Matlab fueron los correspondientes para obtener movimiento del dedo antropomórfico virtual. Teniendo el dedo virtual se prosigue por diseñar el dedo antropomórfico físico, que es el que va a emular los comportamientos del dedo antropomórfico virtual.

6 MATERIALES, ANÁLISIS Y CONSTRUCCIÓN

El principal enfoque de esta tesis es diseñar un dedo antropomórfico de bajo costo que emule los comportamientos de un dedo humano. Esta sección se enfoca en el análisis, selección e implementación de materiales de construcción para obtener un dedo antropomórfico funcional de bajo costo. Se enfoca en materiales que pueden reemplazar las prótesis tradicionales y romper el paradigma de hombre maquina con el fin de obtener un dedo antropomórfico que se asemeje a la textura y estructura de un dedo humano.

6.1 Material Dedo Antropomórfico

Al haber diseñado un dedo antropomórfico virtual se puede observar como esta presenta geometría abstracta, difícil de moldear y de construir. Por lo que se tomó la decisión de usar una impresora 3D por su facilidad de crear diseños abstractos, a gran velocidad y bajo costo.

Una impresora 3D es un dispositivo capaz de generar un objeto sólido tridimensional mediante la adición de material. Los métodos de producción tradicionales son sustractivos, es decir, generan formas a partir de la eliminación de exceso de material. Las impresoras 3D se basan en modelos 3D para definir que se va a imprimir. Un modelo es la representación digital de un objeto en formato CAD [34].

Las ventajas que tiene la impresión es la versatilidad, flexibilidad, prototipado rápido, reducción de costos y personalización. Para la impresión del dedo antropomórfico se escogió el ABS con una densidad del 90%.

El ABS pertenece a la familia de los termoplásticos. Se le llama plástico de ingeniería, debido a que es un plástico cuya elaboración y procesamiento es más complejo que los plásticos comunes [35]. El ABS está compuesto por tres monómeros diferentes que se son acrilonitrilo, butadieno y estireno el cual forman la palabra ABS.

Los materiales de ABS tienen importantes propiedades en ingeniería, como buena resistencia mecánica y al impacto combinado con facilidad para el procesado. Cada monómero le entrega una propiedad única al ABS (ver tabla 5).

Monómero	Propiedades
Acrilonitrilo	<ul style="list-style-type: none"> • Resistencia térmica • Resistencia química • Resistencia a la fatiga • Dureza y rigidez
Butadieno	<ul style="list-style-type: none"> • Ductilidad a baja temperatura • Resistencia al impacto • Resistencia a la fusión
Estireno	<ul style="list-style-type: none"> • Facilidad de procesado • Brillo • Dureza y rigidez

Tabla 5 Propiedades del ABS [35]



Figura 41 Impresión 3D dedo antropomórfico

Tal como se había descrito una impresión 3D no tiene restricciones para sus impresiones. Se puede observar que toma la geometría abstracta de los huesos y la convierte en un producto real. El costo es bajo y de alta velocidad lo cual es conveniente para el diseño del dedo antropomórfico (ver figura 41).

6.2 Tendones Dedo Antropomórfico

Como se había mencionado antes, el tendón es una parte del músculo estriado de consistencia fuerte y constituida por fibras de tejido conectivo. Tiene la función de insertar el músculo en el hueso y transmitirles la fuerza de contracción necesaria para producir un movimiento. Los tendones sirven para mover el hueso y su principal característica es su resistencia a la tensión y elasticidad.

El comportamiento biomecánico de tendones es viscoelástico, o velocidad dependiente, de tal manera que estas estructuras muestran un incremento en la fuerza y la rigidez con una frecuencia creciente de carga [36].

Un efecto adicional de la dependencia de la velocidad es la lenta deformación, o creep que ocurre cuando tendones y ligamentos son sometidas a cargas constantes sobre un periodo extendido de tiempo y la relajación del estrés [37].

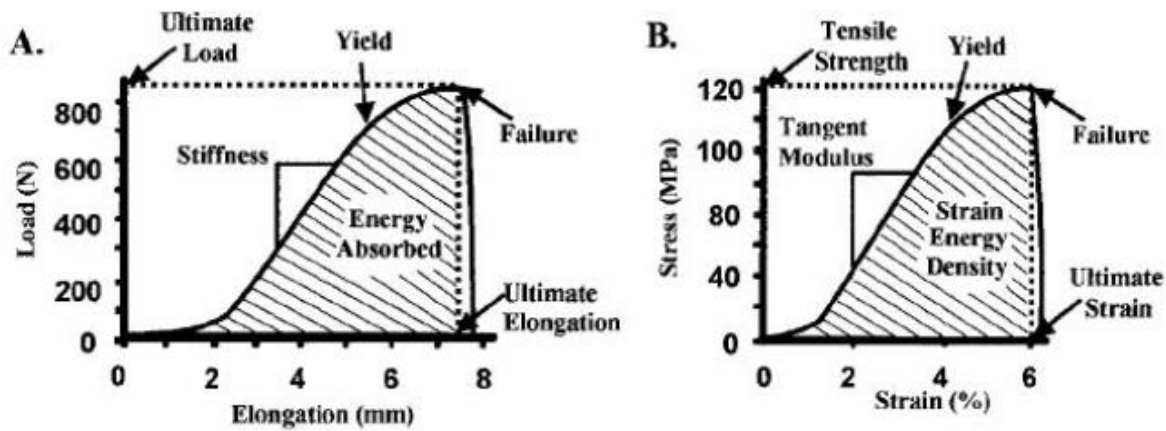


Figura 42 Curva representativa de esfuerzo/deformación de los tendones [38]. A: se puede observar una curva representativa de carga-elongación de la estructura del hueso y ligamento. B: se puede observar una curva representativa de esfuerzo-tensión que representa las propiedades mecánicas del ligamento o tendón.

El material que se usó para reemplazar los tendones es el nylon. El nylon es un polímero artificial que pertenece al grupo de las poliamidas. Se genera por policondensación de un diácido con una diamina [35]. El nylon es una fibra textil elástica y resistente. Las propiedades del nylon ofrecen un amplio rango de posibilidades de utilización en la industria. Sus características principales son las siguientes:

- Alta resistencia mecánica, rigidez, dureza y tenacidad
- Buena resistencia a la fatiga
- Alto poder amortiguador

- Buenas propiedades de deslizamiento
- Resistencia sobresaliente al desgaste

6.3 Cartílago Dedo Antropomórfico

En todas las articulaciones hay cartílago. Es un tejido conjuntivo, compuesto, como el tejido óseo y el tejido muscular, por fibras muy resistentes, pero que también son elásticas y flexibles. El cartílago forma una capa muy fina que recubre los extremos de los huesos en las articulaciones. Su misión es que cuando el músculo mueve los huesos, éstos se deslicen con suavidad [39]. Si los huesos no estuvieran recubiertos por el cartílago, se desgastarían debido al roce continuo.

Lo que se decidió hacer fue diseñar un polímero que tuviera las características de elasticidad, flexibilidad y resistente a la tensión. Por lo cual se escogieron los siguientes ingredientes:

- Silicona fría
- Maizena

La silicona es un polímero sintético que está compuesta por una combinación química de silicio-oxígeno [40]. El adhesivo que tiene la silicona fría al reaccionar con la maizena se obtiene un polímero viscoso o elástico dependiendo de las concentraciones suministradas. Se agregó 40% de silicona fría a un contenedor con 60% de maizena y el resultado fue un polímero elásticas, fácil de manipular (se puede moldear a cualquier forma) y resistente a la tensión.



Figura 43 Polímero obtenido con silicona fría y maizena

6.3.1 Ensayo de tracción

Antes de usar el polímero obtenido en el dedo antropomórfico se realizarán unas pruebas de obtener las características de este material y determinar si es funcional para la aplicación que se requiere. Se somete el polímero formado a un ensayo de tracción, el cual nos ofrece información acerca del material. Un ensayo de tracción es el método utilizado para determinar la resistencia a la tracción, la resistencia a la ruptura y la resistencia a la conformación de una muestra [41].

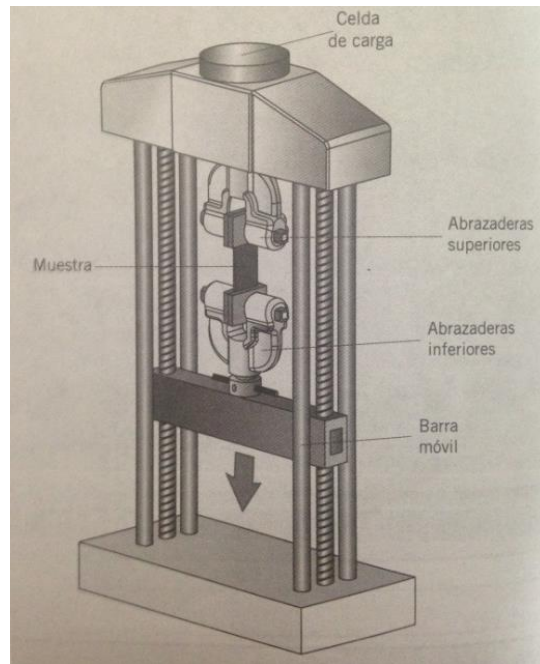


Figura 44 Ensayo de tracción [41]

El material de muestra se asegura entre un par de abrazaderas. La abrazadera superior está sujeta a una barra fija y a una celda de carga. La abrazadera inferior está sujeta a una barra móvil que lentamente empuja el material hacia abajo. La celda de carga registra la fuerza y el extensómetro registra el alargamiento de la muestra.

Para someter el material a al ensayo de tracción se diseñó el polímero formado con forma cilíndrica. El método que se tomó para realizar el ensayo de tracción parte con remover material de la muestra con el fin de diseñar un cuello en donde va a fallar el material (ver figura 46). Teniendo la muestra con las características necesarias, se debe medir el diámetro exterior del material y el diámetro del cuello. Para comenzar la prueba se necesita calcular el área transversal del material.

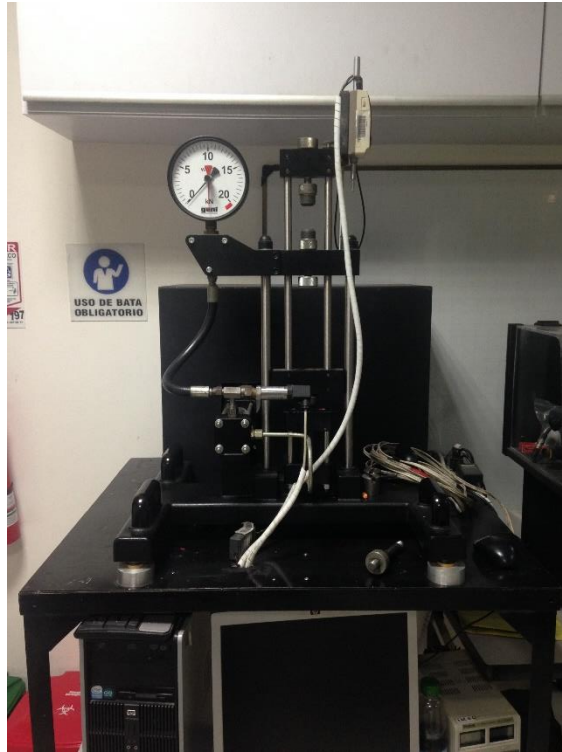


Figura 45 Máquina prueba de tracción



Figura 46 Muestra del polímero en el ensayo de tracción

Al iniciar el ensayo de tracción se puede observar como el material presenta propiedades formidables de elasticidad. La ventaja de la máquina utilizada es que se detiene justo antes de que el material falle. Sin embargo, a simple vista se puede ver la elongación del material y su resistencia a la tensión (ver figura 47).

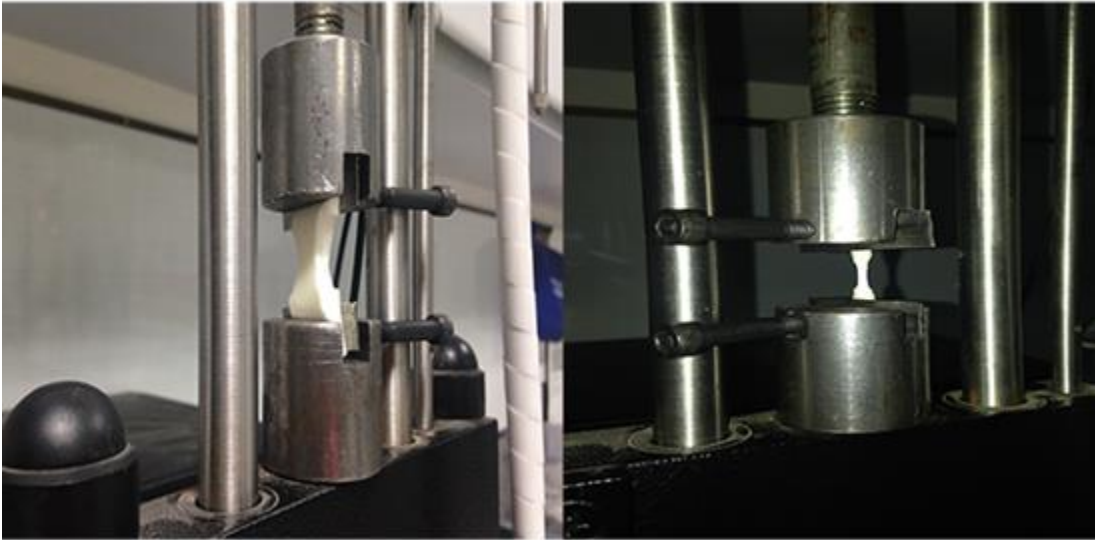


Figura 47 Elongación del polímero con dos muestras diferentes.

Al finalizar la prueba la máquina de tracción nos entrega el esfuerzo en Kpascales y una gráfica del comportamiento del material durante la prueba de tracción. Con los datos entregados se obtuvo lo siguiente:

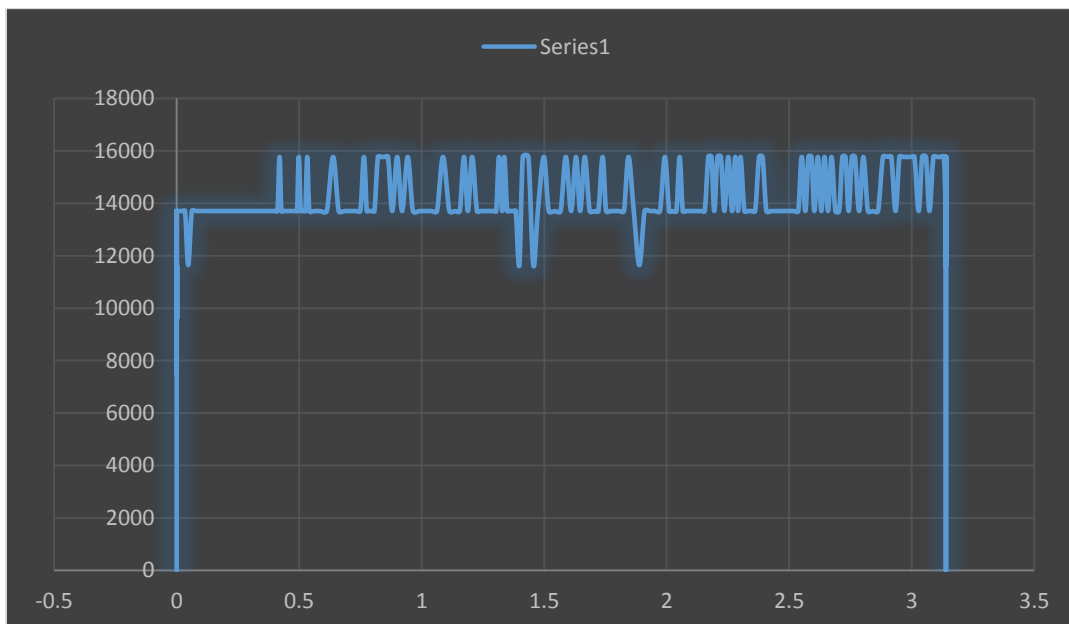


Figura 48 Curva representativa de esfuerzo/deformación del polímero

La grafica nos entrega datos del esfuerzo y deformación del material los cuales son utilizados mas adelante para calcular la elasticidad del material. Se puede observar el comportamiento característico de un polímero en el material ya que se muestra como al aplicarle una fuerza este intenta contraerse.

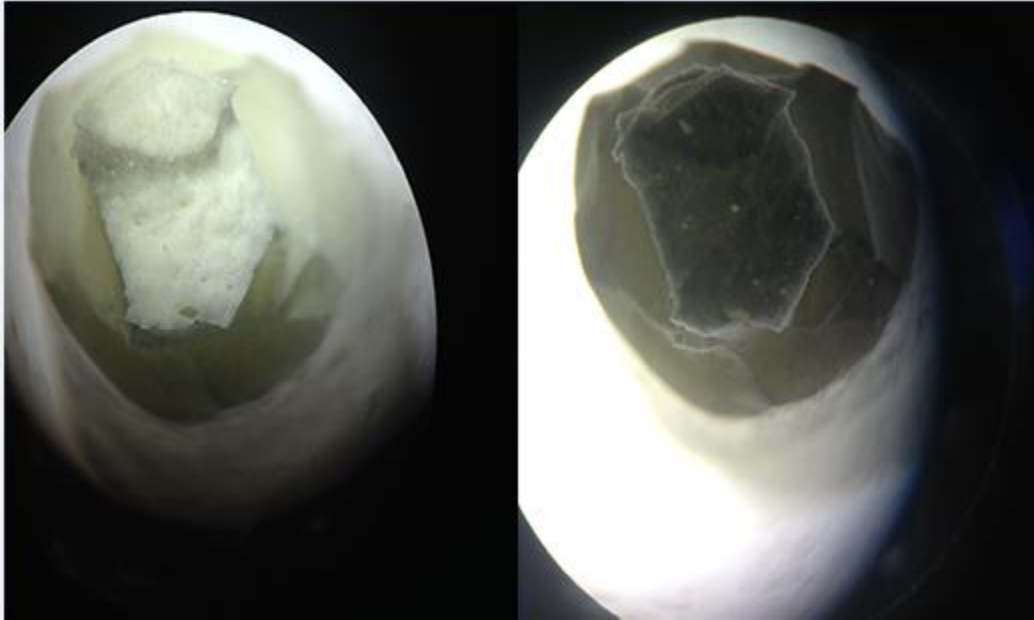


Figura 49 Vista interna al finalizar el ensayo de tracción del polímero

6.3.2 Cálculo de Elasticidad

Se define el esfuerzo σ como el cociente entre la tensión aplicada y el área de la sección transversal sobre la que se aplica. La deformación ε producida dependerá de la tensión por unidad de área transversal sobre la que se aplica la fuerza [42].

Donde:

$\sigma = \text{Esfuerzo}$

$F = \text{Fuerza}$

$A_t = \text{Area transversal}$

$\varepsilon = \text{Deformación}$

$l_f = \text{Longitud final}$

$l_i = \text{Longitud inicial}$

$$\sigma = \frac{F}{A_t} \qquad \varepsilon = \frac{l_f - l_i}{l_i}$$

La deformación inicial de la mayoría de los sólidos es elásticas. Eso quiere decir que la deformación es reversible al dejar de aplicar la tensión, lo cual recupera su forma inicial. En la mayoría de los casos, la relación tensión-deformación en el régimen elástico es lineal [42].

La Ley de Hooke relaciona la deformación ε de una barra sometida a esfuerzo axial, con la tensión normal generada por dicho esfuerzo σ , mediante la constante E que se denomina módulo de elasticidad lineal o módulo de Young [41].

Donde:

$\sigma = \text{Esfuerzo}$

$\varepsilon = \text{Deformación}$

$E = \text{Módulo de elasticidad lineal o módulo de young}$

$$\sigma = E * \varepsilon$$

$$E = \frac{\sigma}{\varepsilon}$$

$\sigma = 2771.59 \text{ Kpascales}$

$\varepsilon = 1.27059 \text{ cm}$

$$E = \frac{2771.59 \text{ Kpa}}{0.0127059} = 2.18235 \times 10^8 \text{ Pa}$$

6.3.3 Conclusión

El Polímero diseñado con maizena y silicona fibra presenta propiedades formidables de elasticidad que se necesitan para dedo antropomórfico. Presenta una zona elástica amplia, por lo que está en el rango superior del caucho y barras siliconas. Lo cual es un dato perfecto por lo que no se requiere un material que se expanda como el caucho pero tampoco un material lo suficientemente rígido para evitar el movimiento del dedo antropomórfico.

La ventaja que posee este polímero es que la superficie es lisa lo cual emula una de las características del cartílago que es reducir la fricción entre los huesos. Es un material de bajo costo que se puede fabricar en cualquier lugar, y son componentes que se pueden encontrar con facilidad. La ventaja que tiene este polímero es su habilidad de poderse moldear a cualquier superficie y con

cualquier forma. En el momento de realizar la aleación de los componentes toma un tiempo hasta que es sólido lo cual es una ventaja para darle la forma adecuada que uno desea.

Como el polímero tiene cualidades de adhesivo, con la realización de pruebas se comprobó que en el momento que el polímero presente una fractura se puede adherir nuevo material y la fractura queda restaurada con el nuevo material adherido. Lo cual sobresale el material en el dedo antropomórfico por lo que el desgaste del material se va a desgastar y simplemente se puede realizar una nueva mezcla y adherírsele a las partes que se están gastando creando un nuevo material sobre el antiguo y proporcionar una nueva vida útil del polímero.

6.4 Diseño Base de Motores

Los actuadores del dedo antropomórfico deben tener una base sólida de fácil acceso que les permita realizar el movimiento necesario y que pueda facilitar el acceso a dicha plataforma para cualquier falla o mantenimiento necesario que necesite el prototipo. Debe ser lo suficientemente rígida pero liviana en su diseño pero con un costo bajo para su elaboración.

El material usado para la base de los motores es el acrílico. El Plexiglass es un tipo de lámina acrílica clara. El nombre científico es poli (metacrilato de metilo), a veces abreviado como PMMA y clasificado como un termoplástico transparente [43]. Las principales características por las cuales se escogió el acrílico fueron las siguientes:

- Resistencia al desgaste
- Resistencia a la corrosión
- Facilidad de manipulación y creación de piezas abstractas
- Liviano
- Facilidad de ensamblar sin la necesidad de componentes extras como tornillos, tuercas, entre otros. Solo se requiere un ácido especial para unir las piezas

6.4.1 Selección de Motores

Para la selección de los motores se tuvo en cuenta el fácil control y alto torque con bajo voltaje. Se tuvieron en cuenta dos tipos de motores, un servomotor y un motor DC de 12v con caja reductora. Para escoger se realizaran unas comparaciones y determinar cuál era el más viable para dicha aplicación con menor costo y mejores resultados.

Si se selecciona un motor DC de 12v se puede asegurar un torque elevado lo cual es un beneficio en el dedo antropomórfico de poder realizar los movimientos requeridos. Requiere una

alimentación de 12V y un control para determinar el desplazamiento exacto del motor. Realizar un control de posición se requiere componentes extras incluyendo un inversor de giro para el motor lo cual eleva el costo del prototipo. El tamaño es reducido y pueden acoplarse a cualquier superficie.



Figura 50 Motoreductor de 12V [44]

Los servomotores que traen un torque elevado son de un precio elevado. Sin embargo, su control no requiere componentes extras y trae la facilidad e programar los ángulos necesarios para el movimiento del dedo antropomórfico. Su alimentación es de 5v y están diseñados para acoplarse a cualquier superficie y microcontrolador. El tamaño es mayor que los motores DC pero no requieren de diseñar acoples mecánicos para integrarlos a la base.



Figura 51 Servomotor [45]

Se escogió los servomotores por su facilidad de programación, no requiere de componentes extras para su control y se puede adecuar a cualquier plataforma con facilidad. Se les puede acoplar cualquier superficie a su eje mientras que los motores DC requieren diseñar acoples mecánicos.

El diseño de la base fue realizado en SolidWorks, integrando el dedo antropomórfico y el circuito eléctrico con el fin de tener todos los componentes en una sola plataforma.

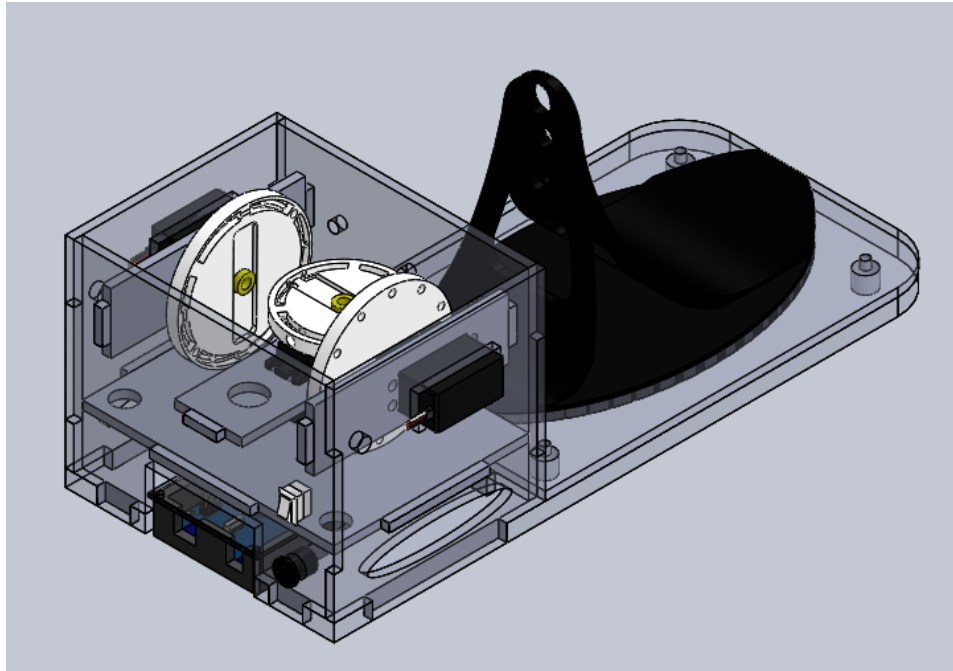


Figura 52 Base Motores

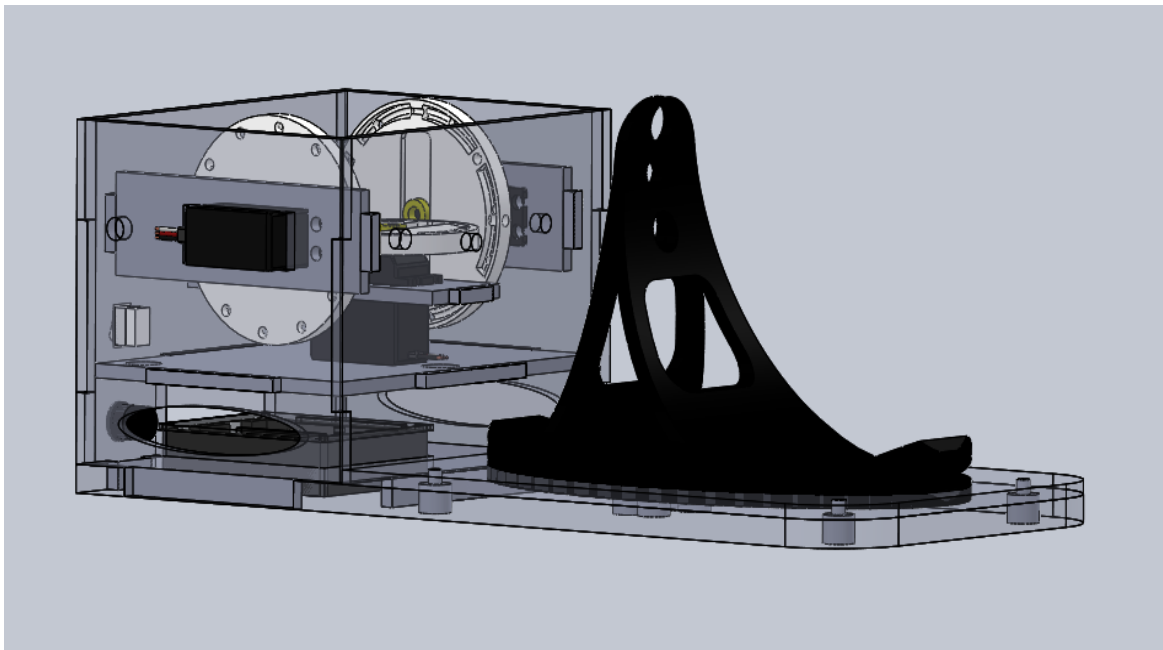


Figura 53 Base Motores

6.5 Diseño Circuito

Para el diseño del circuito de dedo antropomórfico se debe tener una alimentación de 5V y mínimo 1A para los servomotores. Se tienen 3 servomotores en el prototipo, cada uno controla un grado de libertad. Como los servomotores no requieren de componentes extras para el control el circuito se basa en el control de mantener 5V y un amperaje para la carga que piden los servomotores.

Se compró un regulador que suministra 12V y 3A (ver figura 54). Los 12V pasan por regulador de 5V-3A el cual mantiene la corriente de entrada. Para lograr 5V-3A constantes se compró un regular de 12V a 5V de 3A que se pueden encontrar como repuestos de carro (ver figura 55). Se tomó esa decisión porque la mayoría de reguladores que están en el mercado son de 5V-1A y no mantienen una corriente suficiente para el suministro de los motores.



Figura 54 Adaptador de 12V-3A [46]



Figura 55 Regulador de 12V a 5V-3A [47]

Teniendo un voltaje constante, se realiza una placa que suministra el voltaje y la corriente a los tres servomotores y se conecta con la tarjeta programable.

6.5.1 Selección de Tarjeta Programable

Para la tarjeta programable se escogió la tarjeta arduino. Arduino es una plataforma de electrónica abierta que sirve para la creación de prototipos basados en software y hardware flexibles y fáciles de usar. Se creó para artistas, diseñadores, aficionados y cualquier interesado en crear entornos y objetos interactivos. Arduino ofrece un entorno de desarrollo integrado con funciones preestablecidas que reducen la lógica a lectura de entradas, control de tiempos y salidas de una manera semántica e intuitivo [48].

Arduino tiene la ventaja que no necesita ningún tipo de tarjeta de programación como pasa con los microcontroladores sino que la misma placa se conecta vía serial a la computadora usando un cable USB y se pueden cargar los programas totalmente en vivo, sin riesgo de dañar la tarjeta debido a su protección adicional [48].



Figura 56 Arduino [49]

Otra ventaja que tiene arduino es la fácil comunicación que tiene con plataformas como Matlab. Tras el crecimiento del producto durante los años, Matlab creó una librería que facilita la comunicación entre arduino y Matlab. Permitiendo que Matlab use todos los comandos preinstalados dentro de arduino directamente desde la plataforma de Matlab.

7 DISEÑO INTERFAZ GRÁFICA MANO ARTIFICIAL

En el diseño de la interfaz gráfica o GUI (Graphic User Interface o Interfaz Gráfica de Usuario). Conjunto de formas y métodos que posibilitan la interacción de un sistema con los usuarios utilizando formas gráficas e imágenes. Con formas gráficas se refiere a botones, íconos, ventanas, fuentes, etc. los cuales representan funciones, acciones e información [50].

Para el desarrollo de la interfaz gráfica se realizó directamente en Matlab, ya que la simulación dinámica de la mano virtual y dedo antropomórfico están dentro de Simulink. Se realiza una comunicación entre la interfaz gráfica enviando los comandos del controlador a la simulación dinámica obteniendo una respuesta en tiempo real.

7.1 Panel de Introducción

Se puede observar en el panel de introducción el nombre de la tesis, el desarrollarlo, el código pertinente a la identificación en la universidad y el director de tesis. Tiene un único botón que tiene un hipervínculo a un segundo panel.

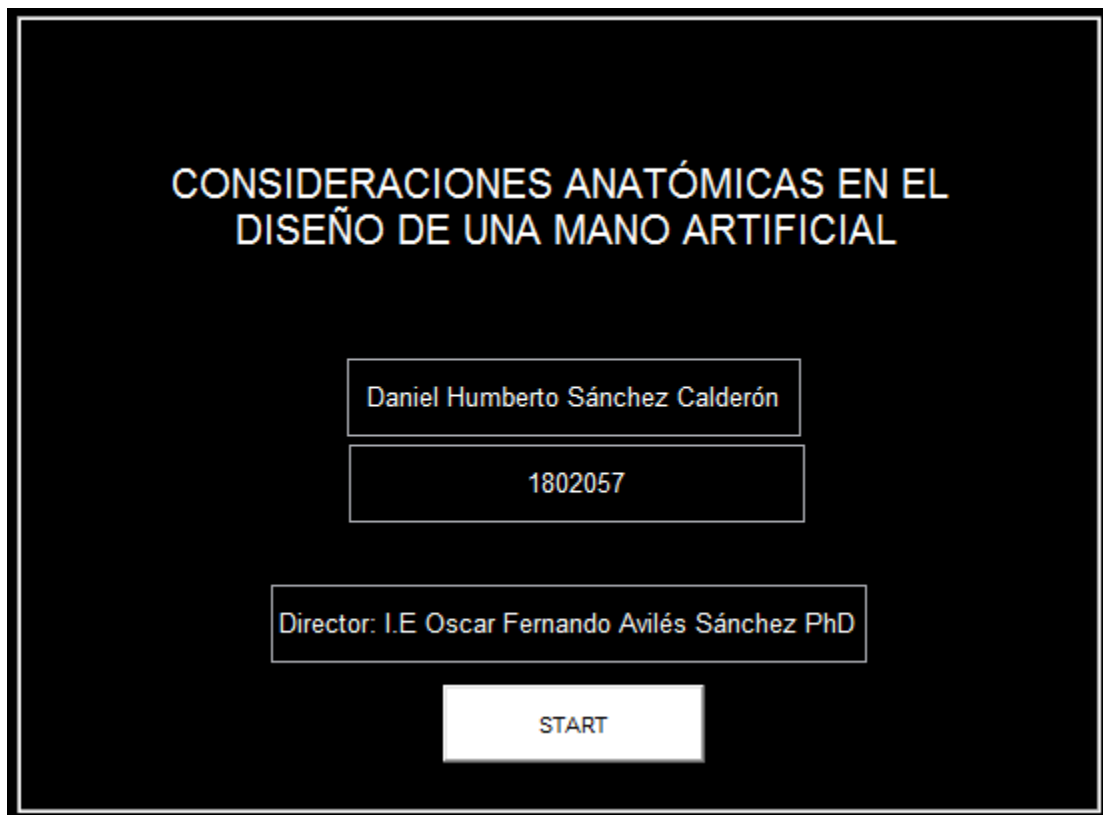


Figura 57 Panel de introducción

7.2 Panel de Cinemática Directa

Al presionar el botón nos lleva al panel principal que es donde se encuentra el control de la cinemática directa de la mano virtual y del dedo antropomórfico virtual. Cada sección tiene unos sliders para desplazar cada hueso a la posición deseada. Tiene un visualizador de ángulos que le permite al usuario ver el ángulo en el que está el hueso.



Figura 58 Panel de cinemática directa

En la parte superior se pueden observar tres botones, el botón de “taxonomía” nos lleva al panel de los agarres de Cutkosky mientras que el botón de “3GDL” nos lleva al panel donde se puede

comprobar la emulación del movimiento del dedo virtual con el dedo antropomórfico. Al presionar el botón de “ejecutar”, se abrirán los entornos virtuales del dedo antropomórfico y de la mano virtual para poder visualizar sus movimientos.

7.3 Panel de Taxonomía de Agarres

Al ejecutar el botón de taxonomía en cualquier panel será direccionado a este panel. Este panel se enfoca en realizar los agarres descritos por cutkosky. El usuario debe presionar primer el botón de “Cargar CI” el cual carga las condiciones iniciales, eliminado cualquier movimiento ya hecho previamente en los diferentes paneles. Después de haber presionado el botón “Cargar CI”, el usuario está libre de presionar cualquier botón, debe tener en cuenta que esta sección está dividida en dos, la primera parte muestra los agarres de potencia mientras que la segunda sección muestra los agarres de precisión.

Este panel controla los movimientos dinámicos de la mano virtual, donde el usuario podrá ver en tiempo real como la mano virtual se desplaza entre los diferentes agarres realizando el movimiento necesario para hacer dicha acción.

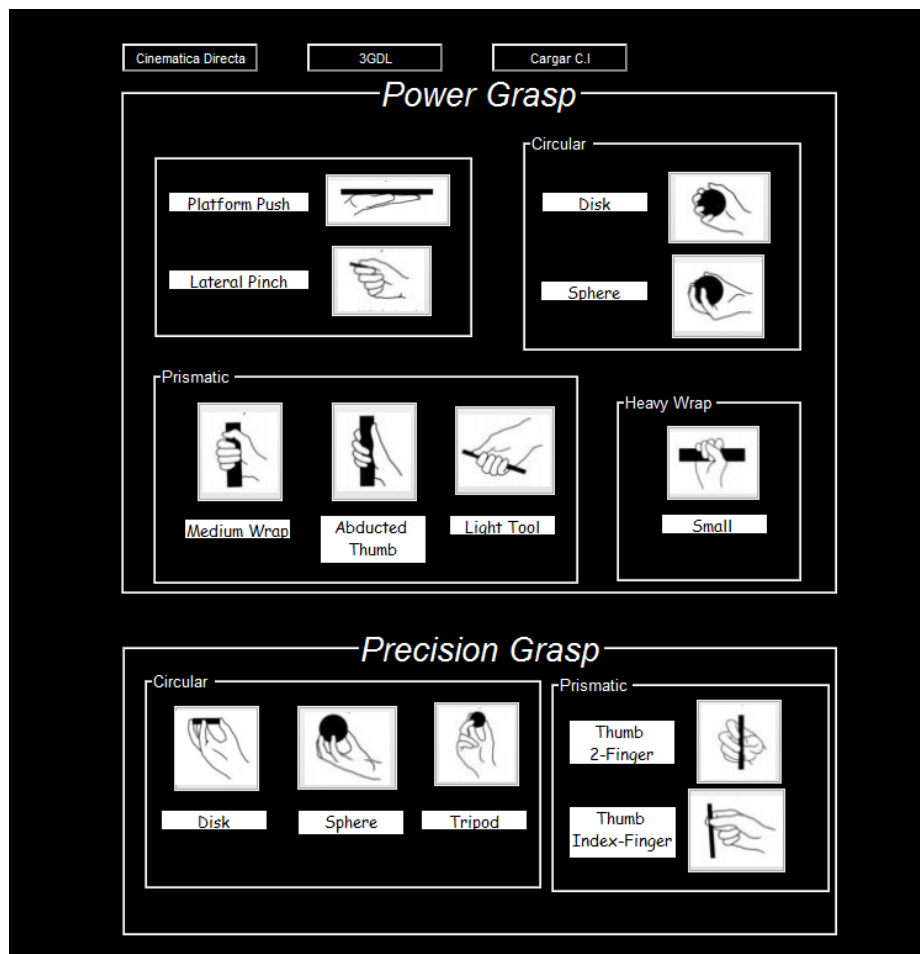


Figura 59 Visualización panel Taxonomía

7.4 Panel Simulación 3 grados de libertad

El panel de simulación de los 3 grados de libertad del dedo virtual y el dedo antropomórfico es el panel más pequeño pero el más importante. En este panel se realiza la comprobación del movimiento del dedo antropomórfico respecto al dedo virtual. Se programó para que el dedo virtual realizara los grados de libertad que debe realizar el dedo antropomórfico, con la sinergia de los componentes mecánicos y eléctricos, el dedo antropomórfico debe emular los comportamientos del dedo virtual.

Para realizar esta acción el usuario debe presionar el botón de “Cargar C.I” donde se cargan las condiciones iniciales del dedo virtual, que son las posiciones estándar de un dedo humano y eliminando el historial. Después debe presionar el botón de “Simulación” donde se abrirá el mundo virtual del dedo virtual y se realizara la conexión al dedo antropomórfico. Cuando están conectados se empiezan a mover en sincronía mostrando los grados de libertad que tiene el dedo antropomórfico.

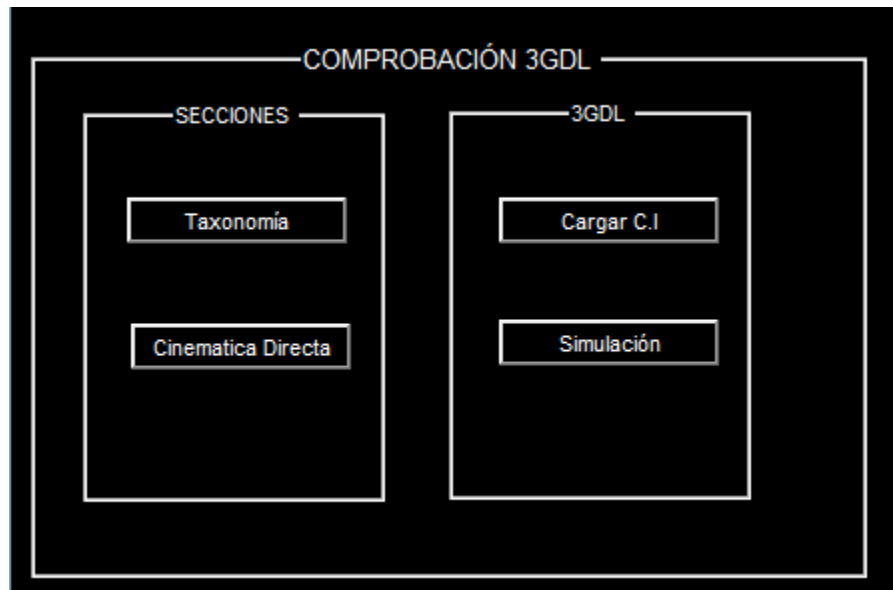


Figura 60 Panel de comprobación de los 3 grados de libertad del dedo antropomórfico

8 SINERGÍA ELEMENTOS ELÉCTRICOS, MECÁNICOS Y DE SISTEMAS

Teniendo todos los componentes listos, se prosigue por unificar cada elemento y realizar la sinergia entre los elementos eléctricos, mecánicos y sistemas. En esta sección se enfocara en el prototipo final de la integración de los elementos que simulan las diferentes partes del dedo. La respuesta de la mano virtual y el dedo virtual con la cinemática directa, la taxonomía de ctukosky comprobada en los agarres de potencia y los agarres de precisión con su comparación con una mano real. Finalizando esta sección se mostrara la comprobación de los tres grados de libertad que posee el dedo antropomórfico con la sincronización de sus movimientos con el dedo virtual.

8.1 Prototipo Final



Figura 61 Prototipo Final

Se puede observar como el ensamble final corresponde al diseño realizado. El cartílago diseñado con la mezcla de maizena y silicona fría se adhirió al dedo antropomórfico sin problema. Presenta las características de flexibilidad, alta resistencia a la tensión, evitar fricción y se dejó moldear con el fin de que asimilara un cartílago real (ver figura 62).

El dedo antropomórfico siempre está en una posición inicial que es la posición de relajación de un dedo humano. La representación de los tendones esta hecho por medio de nylon de alta resistencia para pesca (ver figura 62). Durante las pruebas ha cumplido con las características de resistencia a la fricción, un desplazamiento elástico mínimo y deformación casi nula para la vista.

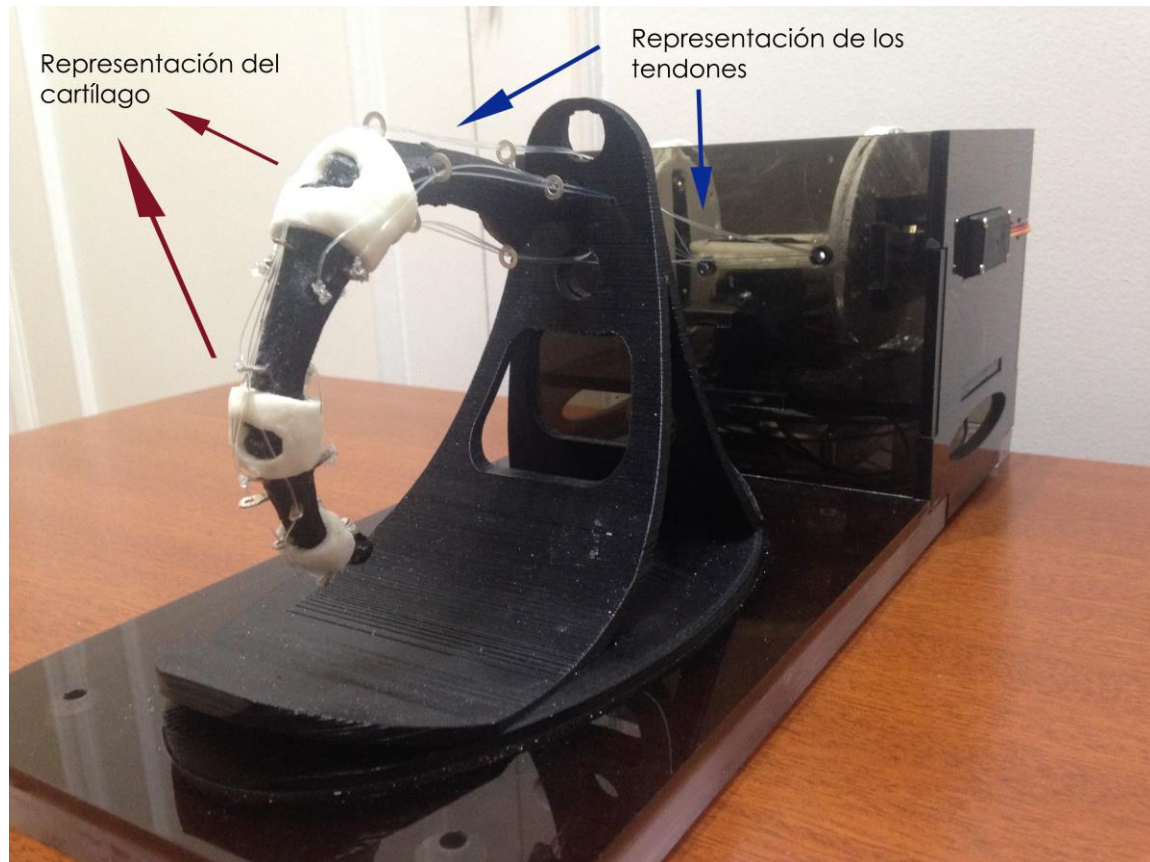


Figura 62 Prototipo Final

8.2 Cinemática Directa

La cinemática directa consiste en encontrar el valor de la posición final del robot manipulador, esta solución es una función de los valores articulares, es decir, el valor traslacional o rotativo de las articulaciones [51]. Se programó la cinemática directa dentro de Matlab con el fin de comunicar la interfaz gráfica con Simulink.

Al ejecutar la interfaz y estar en el segundo panel, el usuario debe presionar el botón de “ejecutar” donde aparecerán dos ventanas que contienen la mano virtual y el dedo antropomórfico virtual. Una vez estén los mundos virtuales cargados en el software, el usuario debe tener en cuenta que este panel consiste en dos secciones. La primera sección corresponde a la cinemática directa de la mano virtual que posee 9 grados de libertad, se puede encontrar unos slider que mueven cada hueso y se puede visualizar el ángulo ingresado. La segunda sección corresponde a la cinemática directa

del dedo antropomórfico que posee tres grados de libertad y también presenta unos sliders con unos indicadores que muestran el ángulo de cada hueso.

8.2.1 Respuesta Mano Artificial y Dedo Antropomórfico

Como se puede observar la cinemática directa funciona para los 9 grados de libertad de la mano virtual y para los 3 grados de libertad del dedo antropomórfico virtual (ver figura 63-64). Al ejecutar el slider de cada sección inmediatamente activa una función interna donde están programados los parámetros de la cinemática directa y enviar los datos a los bloques de los actuadores en Simulink. El diseño realizado permite proponer un mecanismo artificial que emule los movimientos naturales y está programado con los límites biológicos que tiene una mano humana.

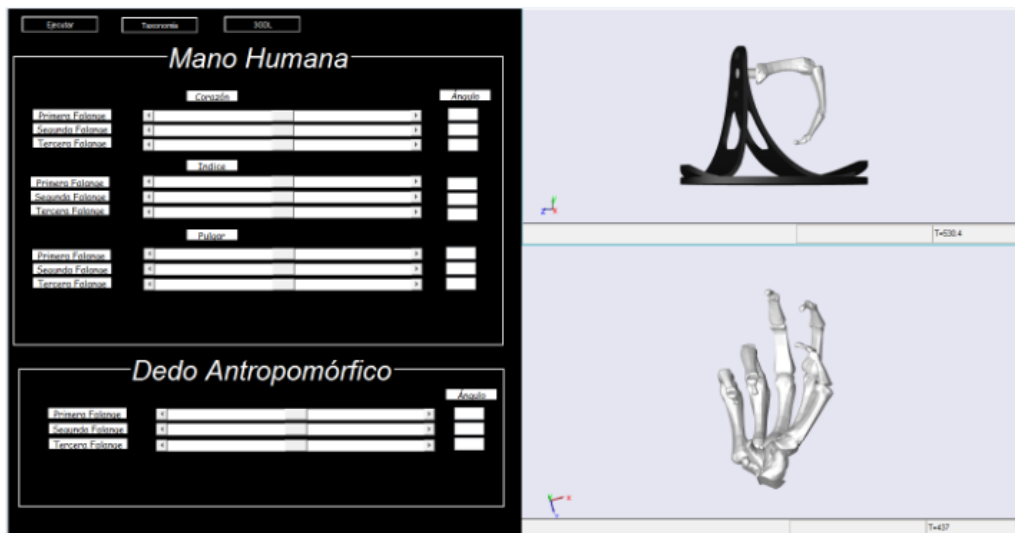


Figura 63 Visualización funcionamiento panel cinemática directa

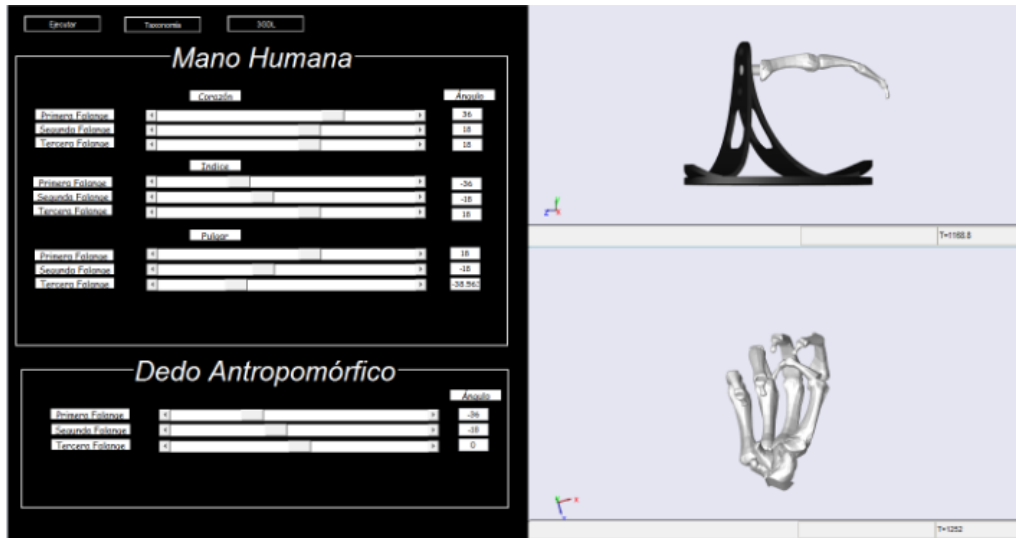


Figura 64 Visualización funcionamiento panel cinemática directa

Anteriormente en la cinemática directa se había realizado una gráfica que muestra el rango de extensión/flexión del dedo (ver figura 27). Se realizó el mismo análisis con la única diferencia que se realizaron los cálculos con los límites del dedo antropomórfico. Se puede observar el rango de acción que tiene el dedo antropomórfico en centímetros (ver figura 65).

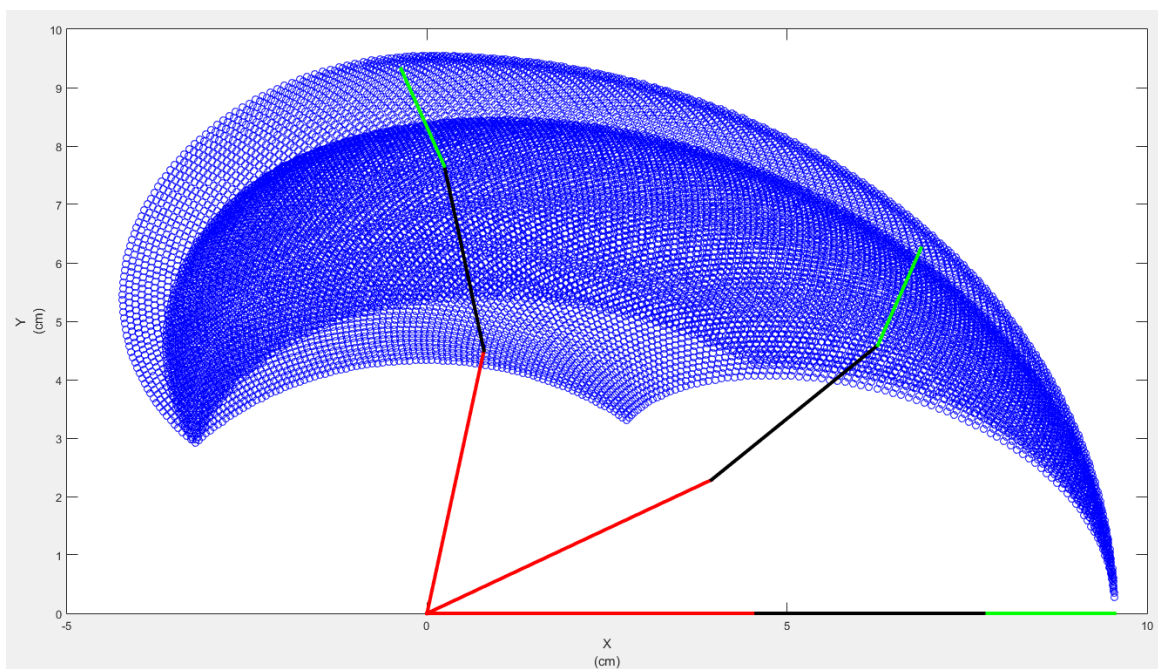


Figura 65 Gráfica de puntos alcanzables por el dedo antropomórfico

Teniendo el rango de flexión y extensión de un dedo humano y del dedo antropomórfico se puede realizar una comparación para calcular el margen de error del dedo antropomórfico. Con el fin de

determinar qué tan exacto es el rango del dedo antropomórfico se puede observar (ver figura 66) sobreponiendo la respuesta del dedo antropomórfico sobre el dedo humano.

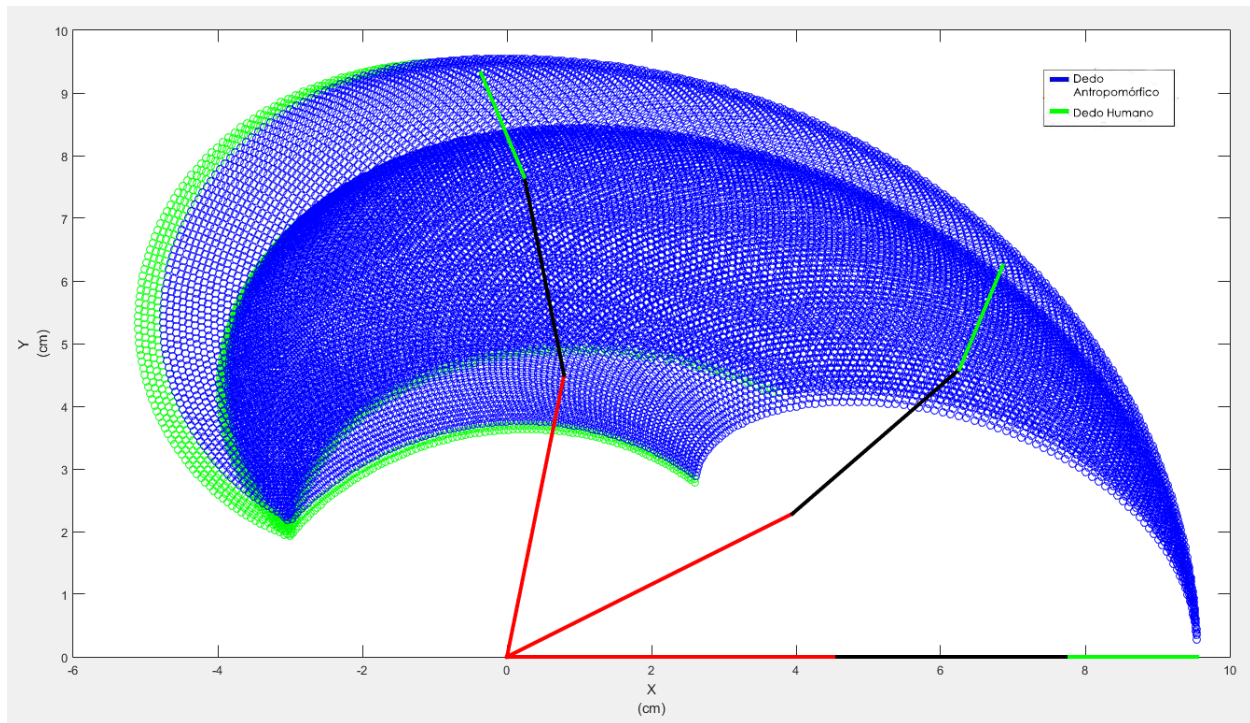


Figura 66 Comparación dedo humano y dedo antropomórfico

Como se puede observar en la figura 66 el dedo antropomórfico no llega al límite de la flexión. Sin embargo, su rango no es limitado ya que puede alcanzar las diferentes posiciones tal como lo hace el dedo humano. El porcentaje de error obtenido es de un 9%.

8.3 Taxonomía de Agarres

Una de las formas primarias que tiene un robot en interactuar con los objetos de su entorno es agarrándolos, tanto si el robot es teleoperado como si dispone de un cierto grado de autonomía [52]. De acuerdo a la acción y el objeto que se va a agarrar existe una configuración predeterminada que determina el tipo de agarre que usar. En esta sección se enfoca en la respuesta de la mano virtual respecto a los tipos de agarres propuestos por cutkosky, con movimiento en tiempo real se verificara su comportamiento natural respecto a una mano humana. Se comparara la mano virtual con una mano humana y se realizara el análisis pertinente de las pruebas realizadas para determinar si la mano virtual emula una mano humana.

8.3.1 Respuesta Mano Artificial

Dentro de Matlab se programó una función de tic toc el cual determina el tiempo transcurrido entre la transición de una agarre a otro. El tiempo promedio obtenido es de 12.15s para transcurrir de un tipo de agarre a otro. La velocidad de la mano artificial se puede aumentar dentro del código pero se prefiero dejarla en un lapso de tiempo razonable para poder observar el cambio de articulaciones que debe hacer la mano humana para realizar cada tipo de agarre.

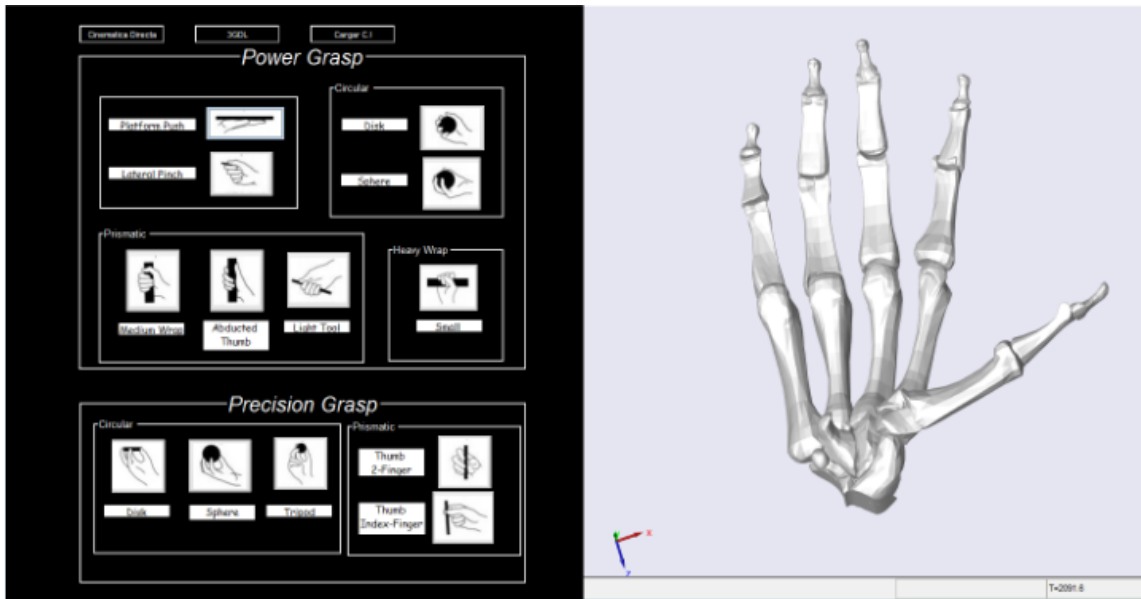


Figura 67 Ejemplo panel de taxonomía

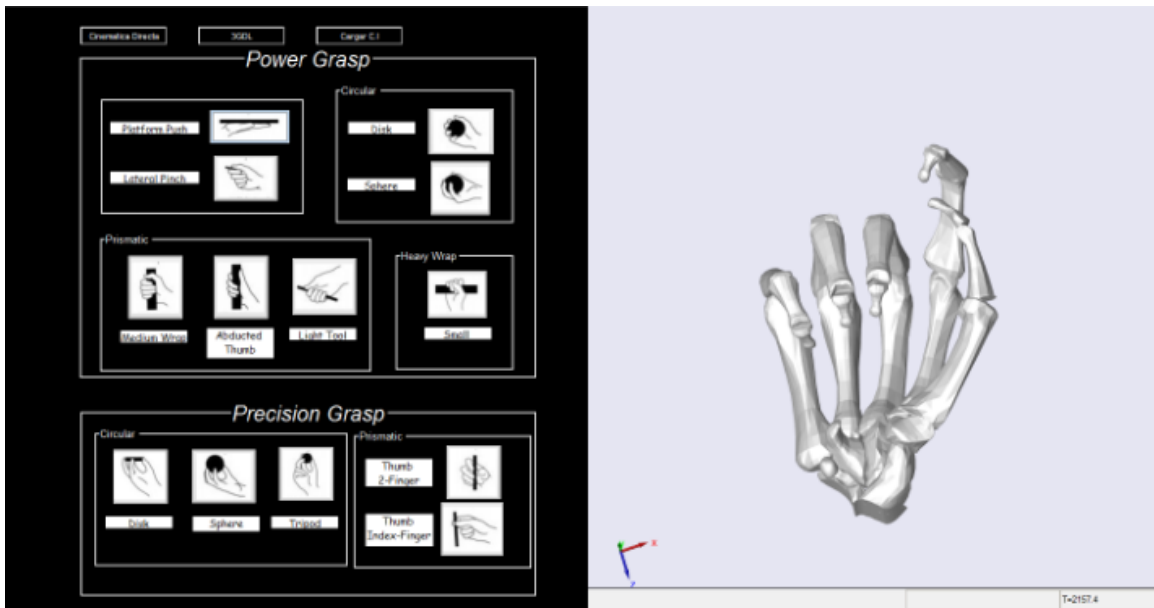


Figura 68 Ejemplo panel de taxonomía

8.3.2 Comparación Mano Artificial y Mano Humana

Para verificar el movimiento de la mano virtual se decidió compararla con una mano humana. Los movimientos que debe realizar la mano humana para cumplir una tarea específica las realiza la mano virtual. Se decidió verificar los agarres de potencia (ver figura 71) y los agarres de precisión (ver figura 72), donde se puede observar como la mano artificial emula una mano humana cumpliendo con los movimiento naturales de la anatomía humana.

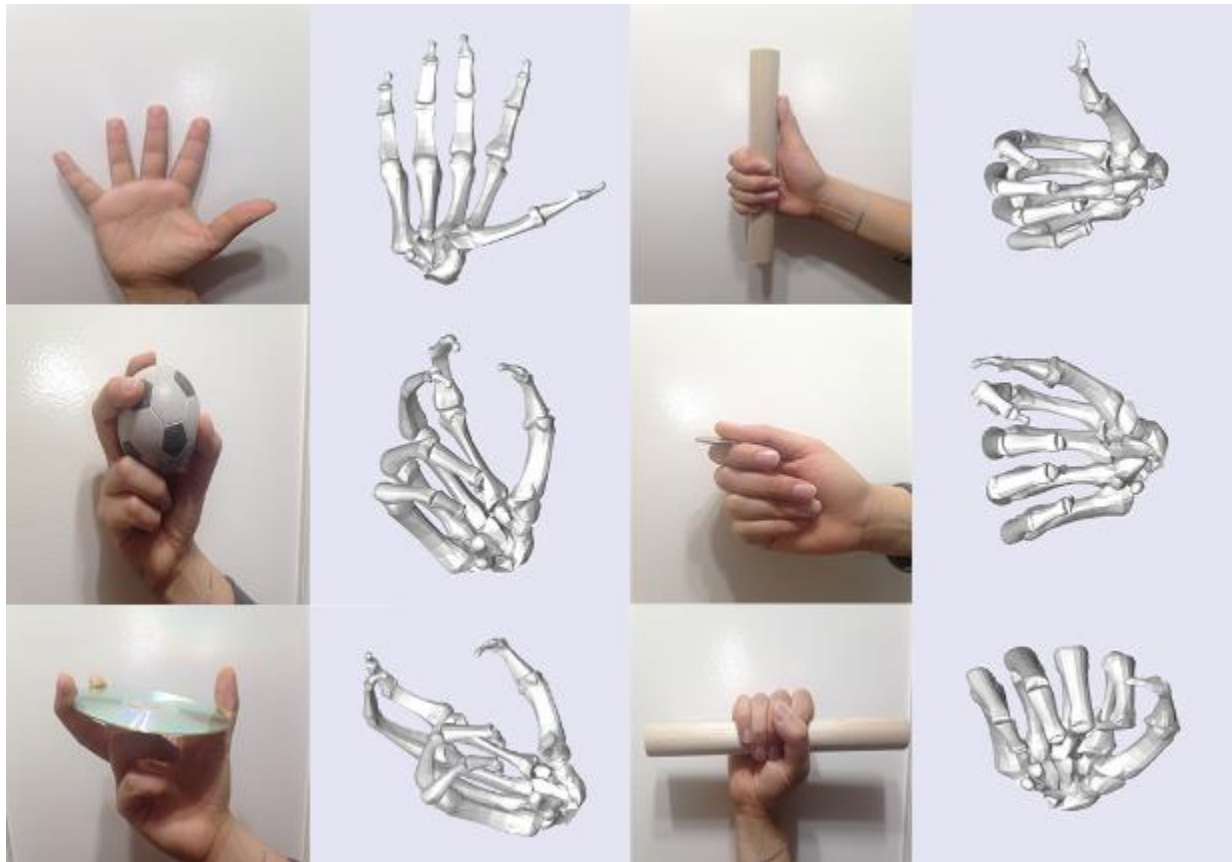


Figura 71 Resultados agarre de potencia

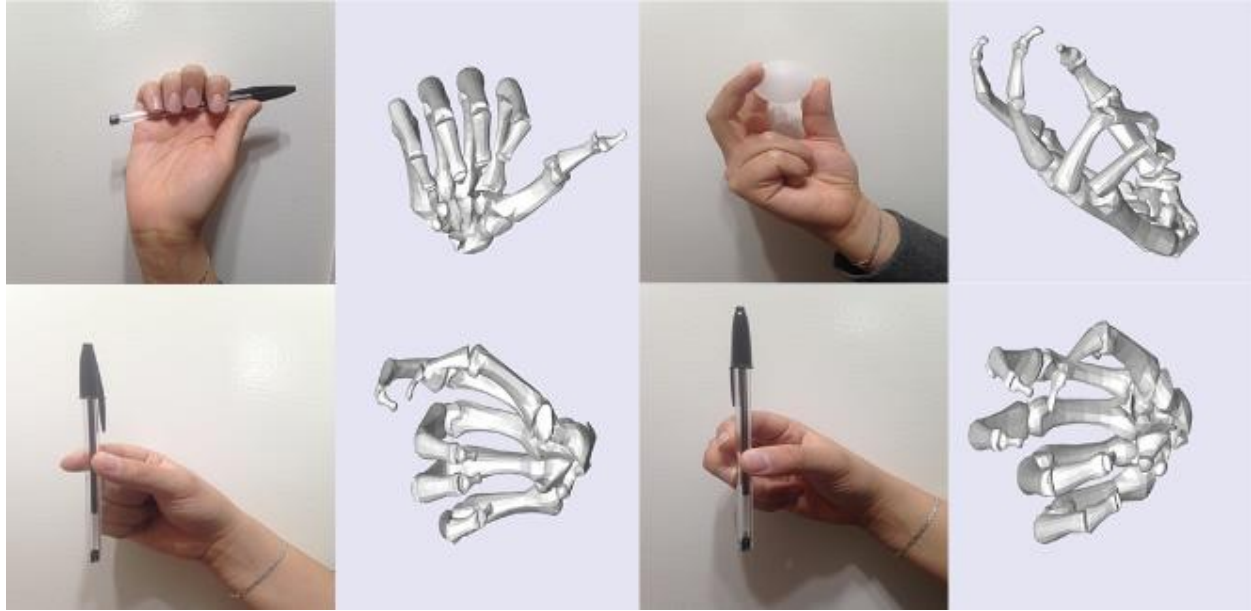


Figura 72 Resultados agarre de precisión

8.3.2 Respuesta dedo virtual y dedo antropomórfico

Para validar los tres grados de libertad del dedo antropomórfico se realizó un programa que sincronizara los movimientos del dedo virtual con el dedo antropomórfico con el fin de observar su comportamiento y verificar su similitud. Usando el programa de Matlab, el cual es el responsable de enviar los comandos a los dos dedos. Matlab envía un comando del ángulo deseado por medio de comunicación serial a la tarjeta de arduino el cual enviara el comando a los motores y se realiza el movimiento en el dedo antropomórfico y al mismo tiempo enviara el mismo ángulo al dedo virtual.

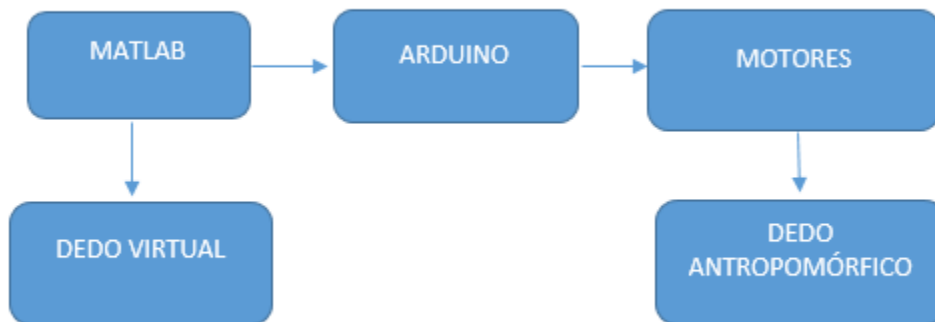


Figura 69 Diagrama de flujo etapas de la validación del dedo virtual y el dedo antropomórfico

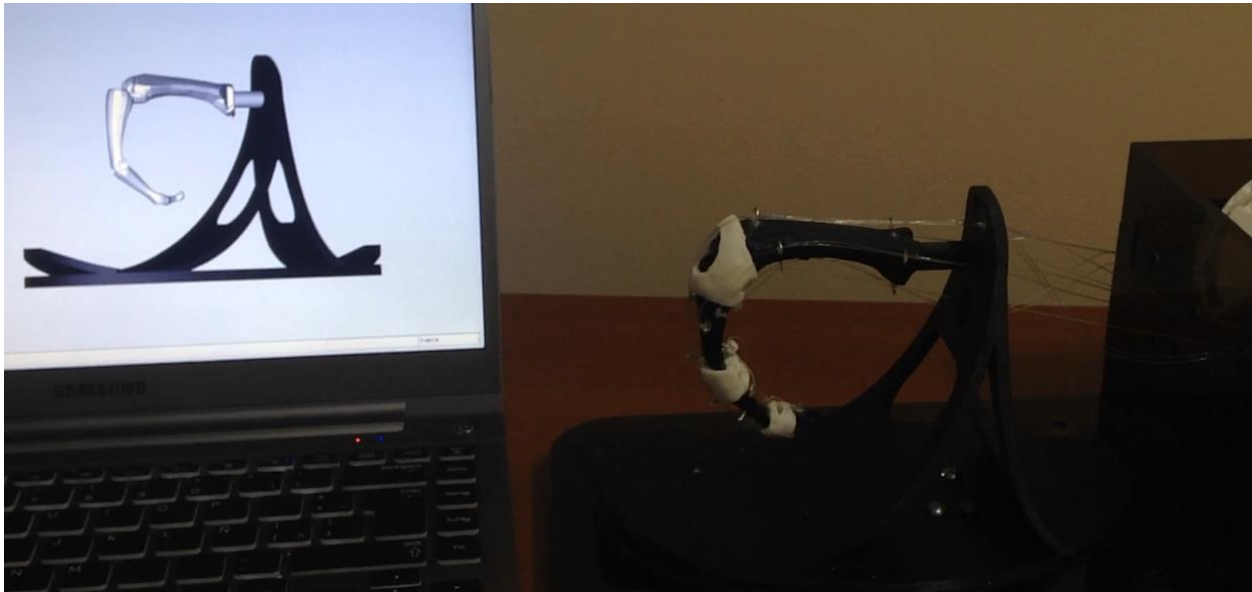


Figura 70 Sincronización dedo virtual y dedo antropomórfico



Figura 71 Sincronización dedo virtual y dedo antropomórfico

Se puede observar como la sincronización entre el dedo virtual y el dedo antropomórfico fue un éxito. Los dos dedos responden al mismo tiempo de respuesta y llegan al mismo ángulo predefinido por Matlab (ver figuras 70-71).

9 CONCLUSIONES Y TRABAJOS FUTUROS

9.1 Conclusiones

- El material más común para usar prótesis son los componentes metálicos, aunque hoy en día se está escogiendo un nuevo camino de realizar prótesis con material termoplástico. Los materiales alternativos presentados en este trabajo de grado resultaron cumpliendo las expectativas del diseño y emular las características biológicas de cada una de sus partes.
- El cartílago formado con silicona fría y maizena resulto emular las características del cartílago humano y sus principales funciones de reducir la fricción entre articulaciones y unificar las falanges. Resulto ser un polímero que se puede fabricar con gran facilidad, se realizaron los estudios pertinentes para hallar el módulo de Young y determinar que es un material ni lo suficientemente flexible para deformar la estructura o lo suficientemente rígido para impedir el movimiento de las articulaciones. Es un material que tiene un ciclo de vida, pero una de sus ventajas es que al incorporarle nuevo material sigue teniendo las propiedades de adhesivo y puede sellar las fracturas que tenga presente alargando su ciclo de vida sin necesidad de desamblar el dedo antropomórfico.
- Al desarrollar la impresión 3D con ABS resulto de gran conveniencia por lo que el diseño original presenta geometría abstracta. A parte de eso, resulto con presentar características de alta resistencia mecánica, dureza, tenacidad y buenas propiedades de deslizamiento que mejoraron el dedo antropomórfico con una alternativa de bajo costo que emula los huesos humanos.
- Se realizó una mano virtual exitosa que emula los movimientos de una mano humana que puede realizar los diferentes agarres propuesto por cutkosky. Con velocidad de respuesta variable, dependiendo si el usuario quiere analizar los movimientos de la mano virtual o tener una mano con tiempo de respuesta igual a la mano humana. La mano virtual resulto con 15 grados de libertad, emulando los dedos satisfactoriamente para los movimientos de flexión y extensión.
- Se construyó satisfactoriamente un dedo antropomórfico de 3 grados de libertad que emule el movimiento de un dedo humano. Se observó mediante los cálculos de cinemática directa que el dedo antropomórfico tiene una limitación del 9% para alcanzar todo el rango de movimiento que tiene un dedo humano. Para ser un prototipo se alcanzó una aproximación del 91% lo cual indica que el dedo antropomórfico con bases de la anatomía humana puede alcanzar a emular un dedo humano y realizar movimientos naturales.
- Se desarrolló una interfaz que incorpora la cinemática directa, taxonomía de la mano y comprobación de los tres grado de libertad del dedo antropomórfico respecto al dedo virtual.

- Se diseñó un sistema portátil del prototipo donde lo único que se necesita para realizar pruebas es una toma de corriente y un cable de datos. Toda la electrónica y mecánica son elementos estáticos que no requieren de cambio o modificaciones, se aseguró obtener un prototipo que no requiera de revisión constante.
- El estudio de la cinemática en los dedos del humano es muy útil para obtener un sistema básico de prótesis por lo que la masa de las falanges es bastante baja y el modelo dinámico no es necesario. El problema se enfoca en escoger los actuadores correctos que puedan desplazarse en grados y realizar el diseño de las falanges y articulaciones lo más cercano anatómicamente a una mano humana.
- El dedo antropomórfico cumplió con las expectativas del trabajo de grado de diseñar y construir un prototipo de tres grados de libertad que emule los movimientos del dedo humano teniendo en cuenta materiales alternativos enfocados a la anatomía humana.

9.2 Trabajos Futuros

El dedo antropomórfico diseñado en este trabajo de grado cumplió con emular los movimientos del dedo humano usando materiales alternativos que cumplen con el funcionamiento de la anatomía humana de cada una de sus respectivas partes. Queda un amplio campo para mejorar el dedo antropomórfico desde la parte del diseño de mejorar su estructura anatómica especialmente en la parte de los tendones. Teniendo el estudio de la anatomía humana se puede mejorar sus características y re diseñar la red de tendones del dedo antropomórfico implementando la red que se encuentra en la capa exterior, diseñarla dentro del hueso con el fin de reducir fricción y tamaño del dedo antropomórfico.

Al comprobar que el dedo antropomórfico puede emular los movimientos de la mano humana, se puede replicar el diseño y crear una mano antropomórfica y validar sus movimientos con la interfaz ya creada de la taxonomía de la mano. Esto con el propósito de tener un mano antropomórfica y expandir su campo de acción en la industria de las prótesis, robots humanoides, robots médicos y robots para exploración espacial.

El diseño del dedo antropomórfico emulo los tres grados de libertad que tiene un dedo humano con los movimientos de flexión, extensión, abducción y aducción. Se puede expandir esta investigación al realizar el estudio pertinente del pulgar, por lo que presente características diferentes a los dedos humanos y de esta manera conectar el dedo antropomórfico con un dedo antropomórfico del pulgar.

Bibliografía

- [1] V. K. Y. M. a. E. T. Zhe Xu, "Design of an Anthropomorphic Robotic Finger".
- [2] M. d. S. y. P. S. –. Colciencias. [En línea]. Available: http://gpc.minsalud.gov.co/guias/Documents/Amputacion/GPCAmputacion_Socializacion_08052015.pdf.
- [3] E. E. O. ACOSTA, «Reconstrucción puesta en funcionamiento y mejora de mano robot de cuatro dedos que imite los modelos prensiles humanos.» 2012.
- [4] C. A. R. R. y. V. E. Q. MACHADO, «Control de una mano virtual usando señales electromiográficas.» 2010.
- [5] V. P. D. L. H. y. G. A. R. SÁNCHEZ, «Diseño e implementación de mecanismo de presión para mano robot antropomórfica.» 2012.
- [6] S. Jacobsen, E. iversen, D. knutti, R. johnson y K. Biggers, «Design of the Utah/M.I.T. Dextrous Hand».
- [7] P. T. a. G. V. F. Lotti y G. P. a. C. M. L. Biagiotti, «Development of UB Hand 3: Early Results».
- [8] A. S. S. F. S. S. y. S. S. Takashi SATO, «Compliance and Learning for Robust In-Hand Manipulation of Variously Sized and Shaped Objects».
- [9] I. Gaiser, C. Pylatiuk, S. Schulz y T. Werner, «The fluidhand III: A multifunctional prosthetic hand».
- [10] P. G. QUIÑONEZ, «Cirugía de la Mano.» 2005.
- [11] D. H. F.-S. Díaz, «Fracturas de los metacarpianos».
- [12] P. A. P. R. L.-F. P. N. I. Q. R. C. P. C. S. L. M. C. S. TRINIDAD RIOS, «Anatomía de la Muñeca y Mano: ATLAS RADIOLÓGICO.» 2012.
- [13] L. OMBREGT, «Applied anatomy of the wrist, thumb.» 2013.
- [14] D. A. S. LIZARRAGA, «My Anatomy.» [En línea]. Available: <http://www.myanatomy.tuars.com/articulaciones.html>.
- [15] P. D. O. B. Gutiérrez, «Biometric Aspects of the Hand.» 2012.
- [16] «Articulaciones de la Mano.» [En línea]. Available: <http://fisiostar.com/anatomia/articulaciones-de-la-mano>.
- [17] F. A. M. M. A. E. A. S. B. A. M. D. CHEN CHEN F., «Human Hand: Kinematics, Statics and Dynamics.» Oregon, 2011.

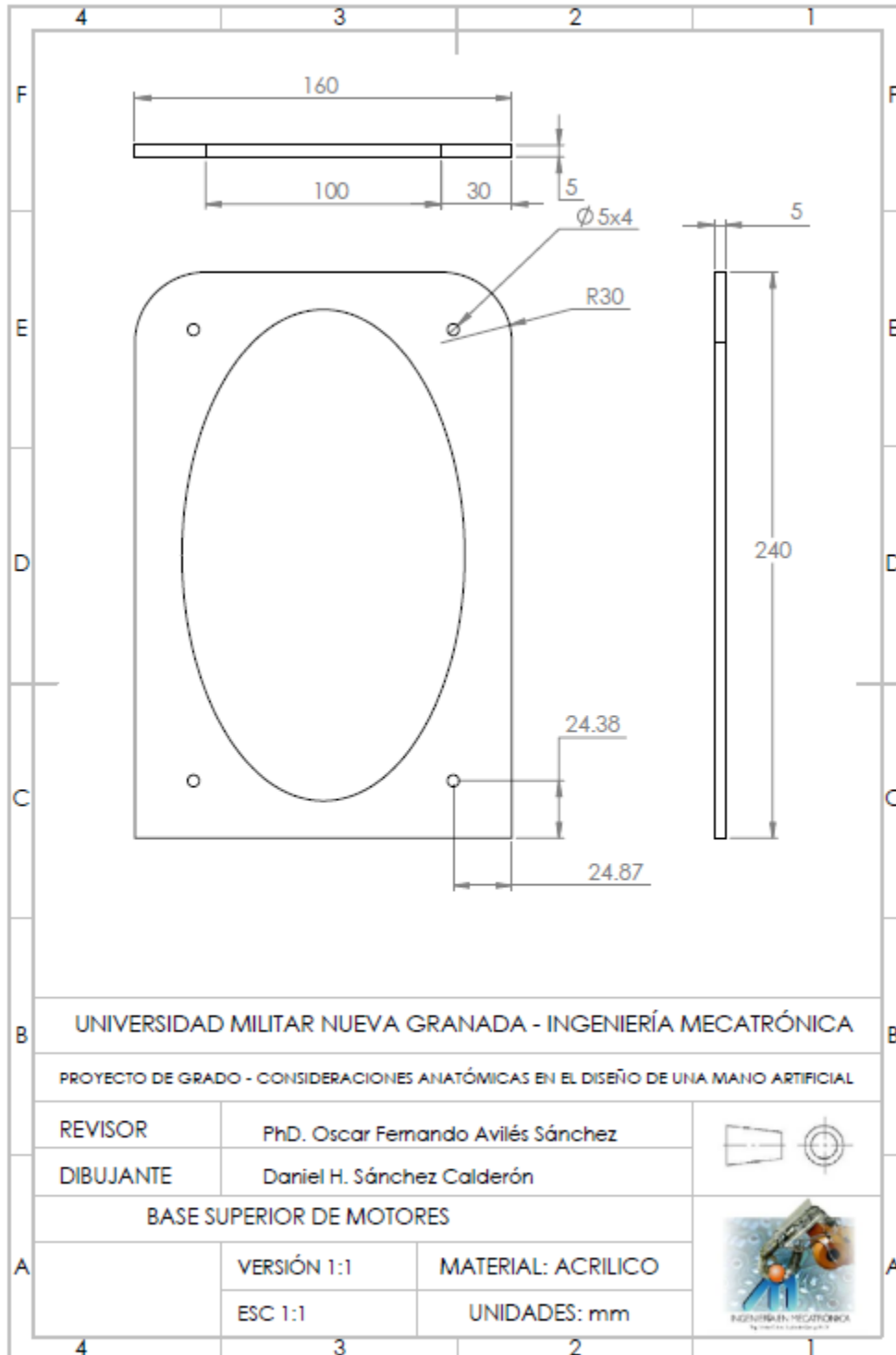
- [18] S. M. I. L. M. S. M. I. Domenico Prattichizzo, «Digital Handwriting with a Finger or a Stylus: a Biomechanical Comparison».
- [19] «Anatomía, salud y divulgación al alcance de tu mano,» [En línea]. Available: <http://fisioactividad.blogspot.com.co/2013/01/complejo-articular-de-la-muneca-y-mano.html>.
- [20] M. FRANK H. NETTER, Atlas de Anatomía Humana Netter.
- [21] Apostila, «Biomechanical modeling of the human hand».
- [22] «Sistema Muscular,» [En línea]. Available: <http://www.uv.mx/personal/cblazquez/files/2012/01/sistema-muscular.pdf>.
- [23] «Musuclos del Cuerpo,» [En línea]. Available: <http://tusintoma.com/musculos-del-cuerpo/>.
- [24] V. S. Rafeal Kelly, «Control de movimiento de Robots Manipuladores,» 2003.
- [25] M. C. a. R. HOWE, «Human Grasp Choise and Robotic Gras Analysis,» 1990.
- [26] H. C. LAJUD y J. G. H. PÉREZ, «DISEÑO DE UN SISTEMA ARTICULADO EMULANDO EL MOVIMIENTO DE UNA MANO,» 2006.
- [27] «Extremidad Superior Antomía de la mano,» [En línea]. Available: <https://www.scribd.com/doc/35695943/Extremidad-Superior-Anatomia-de-la-mano>.
- [28] C. A. Q. Burgos, «Diseño y contrucción de una protesis robotica de mano funcinal adaptada y varios agarres,» 2010.
- [29] A. A., «A guide to introductory physics teaching,» 1984.
- [30] R. M. Murray, «A Mathematical Introduction to Robotic Manipulation».
- [31] Autodesk, «Autodesk Maya,» [En línea]. Available: <http://www.autodesk.com/>.
- [32] SolidWorks, «SolidWorks,» [En línea]. Available: <http://www.solidworks.com/>.
- [33] MathWorks, «Matlab,» [En línea]. Available: <http://www.mathworks.com/products/matlab/>.
- [34] 3. i. 3d, «3dimpresoras3d,» [En línea]. Available: <http://www.3dimpresoras3d.com/que-es-una-impresora-3d/>.
- [35] Mariano, «Tecnología de los plásticos,» [En línea]. Available: <http://tecnologiadelosplasticos.blogspot.com.co/2011/06/abs.html>.
- [36] J. W. Strickland, «Development of Flexor Tendon Surgery: Twenty-Five Years of Progress».
- [37] D. P. P. Sepúlveda, «Biomecánica de tendones y ligamentos».
- [38] S. L.-Y. Woo, T. Q. Lee, S. D. Abramowitch y T. W. Gilbert, «Structure and function of the ligaments and tendons».

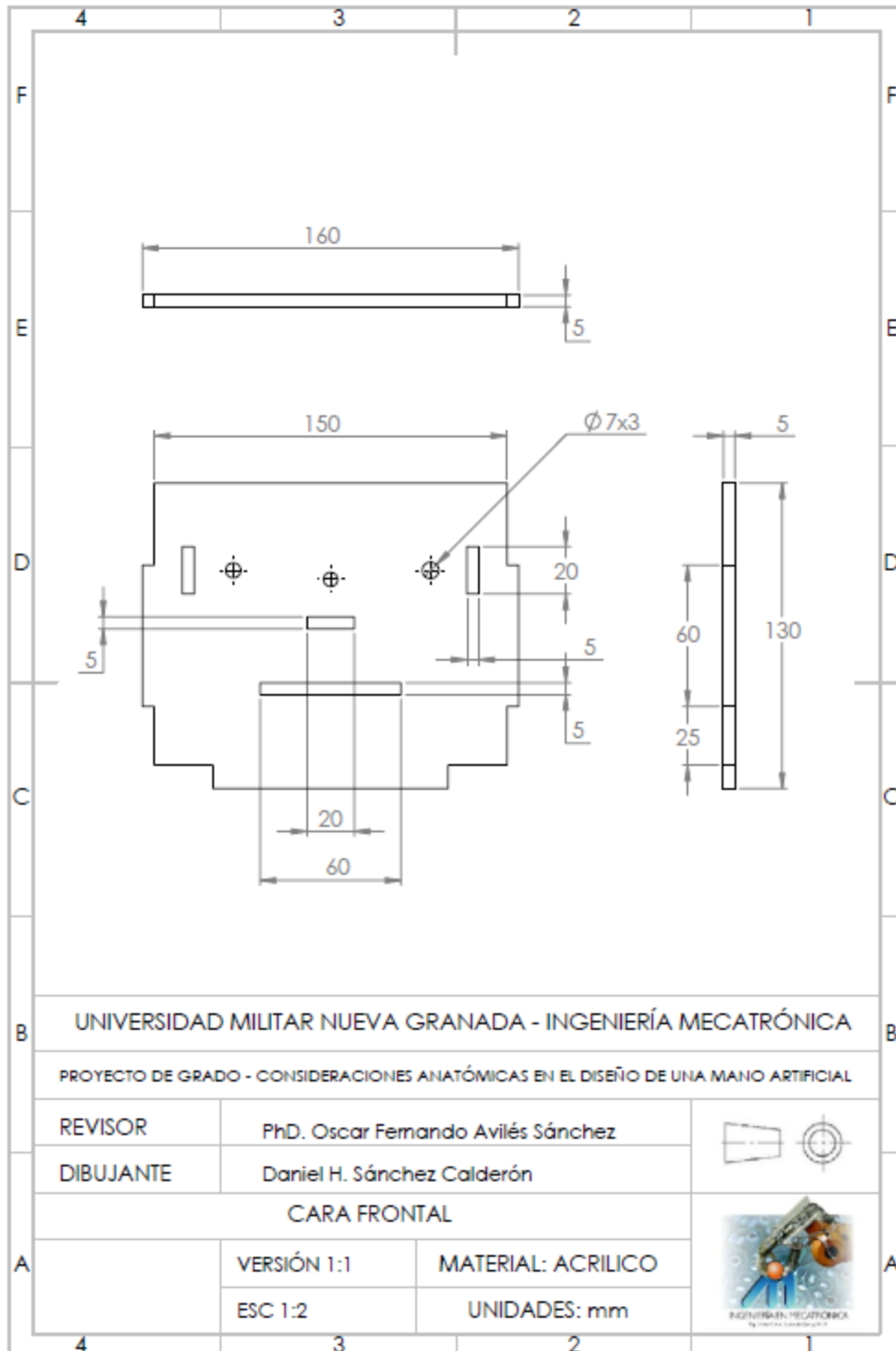
- [39] «Antomía de cuerpo humano,» [En línea]. Available: <http://anatomia-cuerpo-humano.blogspot.com.co/2011/11/el-cartilago.html>.
- [40] R. SRL, «Silicona».
- [41] J. Newel, Ciencia de Materiales.
- [42] H. D. Moore y D. R. Kibbey, Materiales y procesos de fabricación.
- [43] Paolini, «Manual uso del acrílico,» [En línea]. Available: http://www.paolini-sa.com/pdfs/manual_de_usopaolini.pdf.
- [44] BricoGeek, «BricoGeek,» [En línea]. Available: <http://tienda.bricogeek.com/motores/114-motor-micro-metal-dc-con-reductora-30-1.html>.
- [45] HETP, «HETP,» [En línea]. Available: <https://hetpro-store.com/servomotor-towerpro-sg-5010/>.
- [46] mercadolibre, «mercadolibre,» [En línea]. Available: https://http2.mlstatic.com/camaras-vigilancia-seguridad-hogar-S_282911-MLV20661213895_042016-Y.jpg.
- [47] AliExpress, «AliExpress,» [En línea]. Available: http://es.aliexpress.com/store/product/15W-DC-12V-to-5V-3A-Power-Adapter-Converter-Voltage-Regulator-Dual-USB-Output/136394_1947256799.html.
- [48] D. C. T. I. G. M. y. D. M. Massimo Banzi, «Arduino,» [En línea]. Available: <http://www.modulo0tutoriales.com/10-razones-para-usar-arduino/>.
- [49] ebay, «ebay,» [En línea]. Available: <http://www.ebay.com/itm/New-Uno-R3-Case-Enclosure-Transparent-Acrylic-Box-Compatible-with-Arduino-UNO-R3-/151227106869>.
- [50] Alegsa, «Alegsa,» [En línea]. Available: <http://www.alegsa.com.ar/Dic/gui.php>.
- [51] J. L. Ramíraz y A. R. Fonseca, «Modelamiento matemático de la cinemática directa e inversa de un robot manipulador de tres grados de libertad,» 2012.
- [52] A. M. M. Moreno, «Procedimientos de obtención de configuraciones de agarre en manipulación robótica,» 2013.
- [53] L. Biagiotti, «Development and Control of Innovative Robotic Hands: the UB Hand 3 Project».
- [54] R. S. Fearing, «Simplified Grasping and Manipulation with dextrous Robot Hand».
- [55] F. Ficuciello, «Modelling and Control for Soft Finger Manipulation and Human-Robot Interaction».
- [56] J. P. Gazeau, P. U. F. Lab. de Mecanique des Solides, S. Zehloul, M. Arsicault y J. P. Lallemand, «The LMS hand: force and position controls in the aim of the fine manipulation of objects,» 1998.
- [57] N. J. S. Center y L. Martin, «Design of the NASA Robonaut Hand,» 1999.

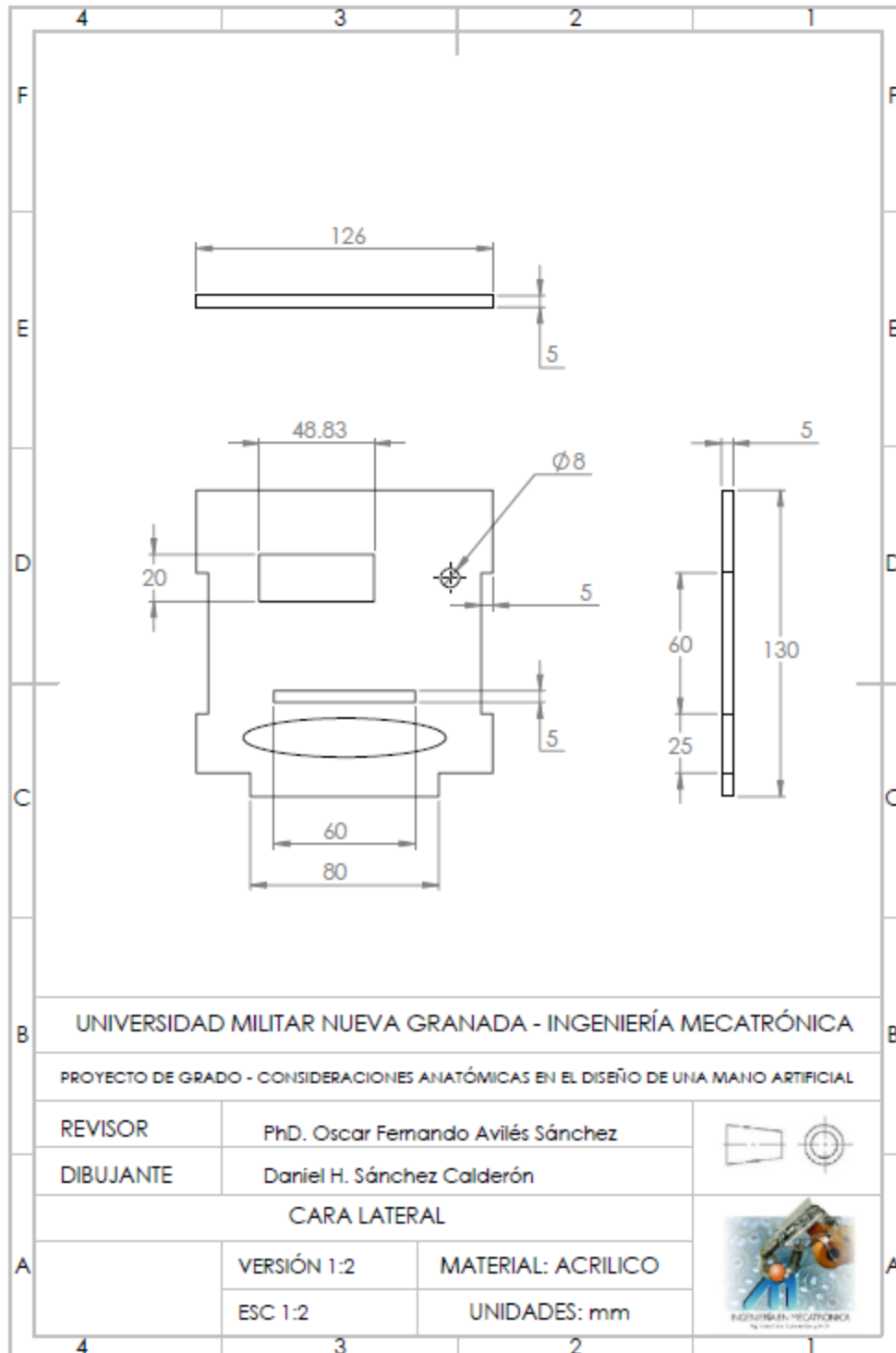
[58] S. R. Company, «Shadow Dextrous Hand Research Systems,» 2013.

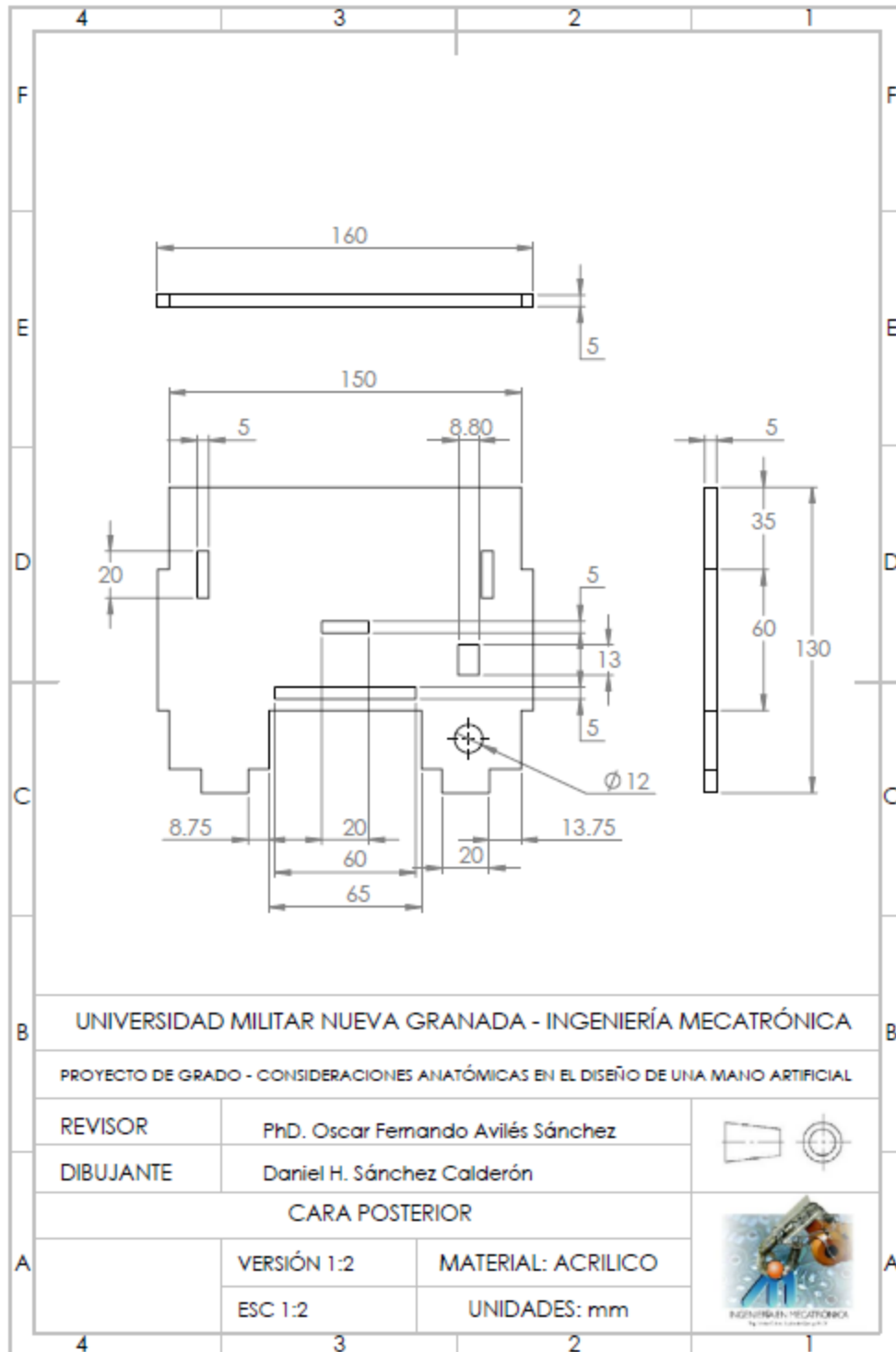
ANEXO A

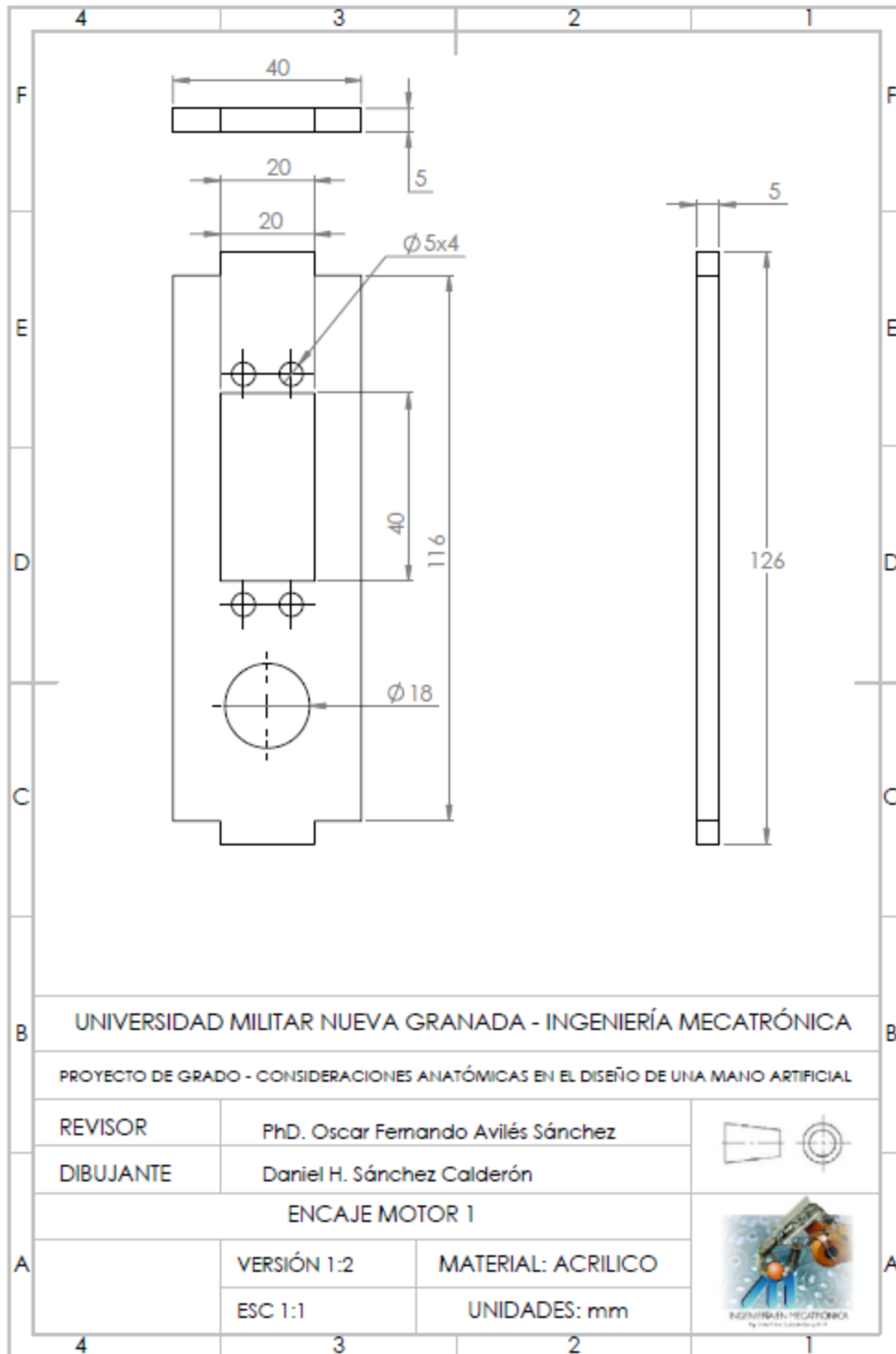
Planos piezas soporte de motores y dedo antropomórfico.

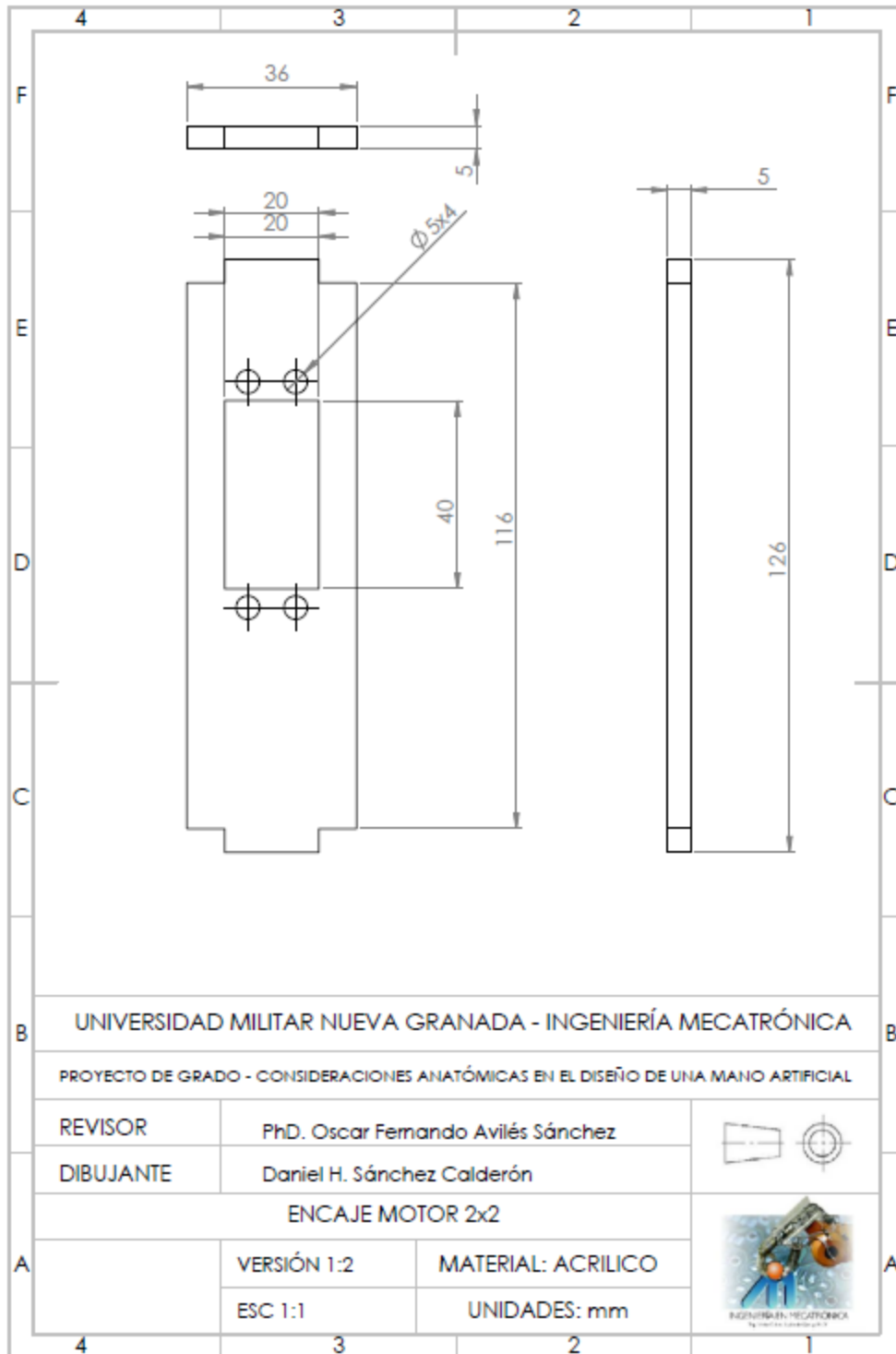












ANEXO B

Código en Matlab para determinar el rango de movimiento del dedo humano y dedo antropomórfico.

```
L1 = 4.57;
L2 = 3.21;
L3 = 1.77;
tetha1 = 0;
tetha2 = 0;
tetha3 = 0;

for n = 1: 360

    for n = 1:360

        if tetha3 > 0 && tetha3 < 13*pi/18
            if tetha2 > 0 && tetha2 < 5*pi/9
                if tetha1 > -10 && tetha1 < 5*pi/9

px =
cos(tetha1) * (L1*cos(tetha2)+L2*cos(tetha2+tetha3)+L3*cos(tetha1+tetha2+tetha3
));

py =
sin(tetha1) * (L1*cos(tetha2)+L2*cos(tetha2+tetha3)+L3*cos(tetha1+teth
a2+tetha3));

pz = L1*sin(tetha1)+L2*sin(tetha2+tetha3)+L3*sin(tetha1+tetha2+tetha3);

scatter3(px,py,pz)
hold on
end

end

end

tetha3 = tetha3 + pi/180;
tetha2 = tetha2 + pi/180;

end
tetha1 = tetha1 + pi/180;
tetha3=0;
tetha2=0;

end

for n = 1: 360

    for n = 1:360
```

```

        if tetha3 > 0 && tetha3 < 13*pi/18
            if tetha2 > 0 && tetha2 < 5*pi/9
                if tetha1 > -10 && tetha1 < 5*pi/9
px =
cos(tetha1)*(L1*cos(tetha2)+L2*cos(tetha2+tetha3)+L3*cos(tetha1+tetha2+tetha3
));

py =
sin(tetha1)*(tetha1)*(L1*cos(tetha2)+L2*cos(tetha2+tetha3)+L3*cos(tetha1+teth
a2+tetha3));

pz = L1*sin(tetha1)+L2*sin(tetha2+tetha3)+L3*sin(tetha1+tetha2+tetha3);

scatter3(px,py,pz)
hold on
        end

    end

    end

tetha1 = tetha1 + pi/180;
tetha2 = tetha2 + pi/180;

    end
    tetha3 = tetha3 + pi/180;
    tetha1=0;
    tetha2=0;

end

for n = 1: 360

    for n = 1:360

        if tetha3 > 0 && tetha3 < 13*pi/18
            if tetha2 > 0 && tetha2 < 5*pi/9
                if tetha1 > -10 && tetha1 < 5*pi/9
px =
cos(tetha1)*(L1*cos(tetha2)+L2*cos(tetha2+tetha3)+L3*cos(tetha1+tetha2+tetha3
));

py =
sin(tetha1)*(tetha1)*(L1*cos(tetha2)+L2*cos(tetha2+tetha3)+L3*cos(tetha1+teth
a2+tetha3));

pz = L1*sin(tetha1)+L2*sin(tetha2+tetha3)+L3*sin(tetha1+tetha2+tetha3);

scatter3(px,py,pz)
hold on
        end
    end
end

```

```
end
```

```
end
```

```
tetha3 = tetha3 + pi/180;  
tetha1 = tetha1 + pi/180;
```

```
end
```

```
tetha2 = tetha2 + pi/180;  
tetha3=0;  
tetha1=0;
```

```
end
```


ANEXO C

Código en Matlab para la cinemática directa de la taxonomía de agarres.

```
global co1 co2 co3 in1 in2 in3 pu1 pu2 pu3
global me1 me2 me3 an1 an2 an3
global ANco1 ANco2 ANco3 ANin1 ANin2 ANin3 ANpu1 ANpu2 ANpu3
global ANme1 ANme2 ANme3 ANan1 ANan2 ANan3
global tiempo
tiempo = 0.2;

global protetha1 protetha2 protetha3
global a

co1 = 48;
co2 = 49;
co3 = 36;

in1 = -11;
in2 = -11;
in3 = -15;

pu1 = 2;
pu2 = 10;
pu3 = 2;

me1 = 21;
me2 = -11;
me3 = 0;

an1 = 0;
an2 = 21;
an3 = 0;

pause(0.1)

% Cargar programa Simulink con modelo CAD hecho en SolidWorks
uiopen('Mano_Final.slx',1) % Abrir archivo Simulink de
symmechanics

pause(tiempo)

for n = 1:180
    %-----MEÑIQUE-PRIMERA-FALANGE-----%
    if me1 ~= ANme1
        if me1 > ANme1
            ANme1 = ANme1 + 1;
        end
    end
end
```

```

        set_param('Mano_Final/Meñique/Rot1Me', 'Gain', num2str(ANme1))    %
Primera Falange meñique

    end
    if me1 < ANme1
        ANme1 = ANme1 - 1;
        set_param('Mano_Final/Meñique/Rot1Me', 'Gain', num2str(ANme1))    %
Primera Falange meñique

    end

end

%-----ANULAR-PRIMERA-FALANGE-----%
if an1 ~= ANan1
    if an1 > ANan1
        ANan1 = ANan1 + 1;
        set_param('Mano_Final/Anular/Rot1An', 'Gain', num2str(ANan1))    %
Primera Falange anular

    end
    if an1 < ANan1
        ANan1 = ANan1 - 1;
        set_param('Mano_Final/Anular/Rot1An', 'Gain', num2str(ANan1))    %
Primera Falange anular

    end

end

%-----INDICE-PRIMERA-FALANGE-----%
if in1 ~= ANin1
    if in1 > ANin1
        ANin1 = ANin1 + 1;
        set_param('Mano_Final/Indice/Rot1In', 'Gain', num2str(ANin1))    %
Primera Falange indice

    end
    if in1 < ANin1
        ANin1 = ANin1 - 1;
        set_param('Mano_Final/Indice/Rot1In', 'Gain', num2str(ANin1))    %
Primera Falange indice

    end

end

%-----PULGAR-PRIMERA-FALANGE-----%
if pu1 ~= ANpu1
    if pu1 > ANpu1
        ANpu1 = ANpu1 + 1;
        set_param('Mano_Final/Pulgar/Rot1pul', 'Gain', num2str(ANpu1))    %
Primera Falange pulgar

```

```

end
if pul < ANpul
    ANpul = ANpul - 1;
    set_param('Mano_Final/Pulgar/Rot1pul','Gain',num2str(ANpul)) %
Primera Falange pulgar

end

end

%-----CORAZON-PRIMERA-FALANGE-----%
if col ~= ANcol
    if col > ANcol
        ANcol = ANcol + 1;
        set_param('Mano_Final/Corazon/Rot1Co','Gain',num2str(ANcol)) %
Primera Falange corazon

end
if col < ANcol
    ANcol = ANcol - 1;
    set_param('Mano_Final/Corazon/Rot1Co','Gain',num2str(ANcol)) %
Primera Falange corazon

end

end

%-----MEÑIQUE-SEGUNDA-FALANGE-----%
if me2 ~= ANme2
    if me2 > ANme2
        ANme2 = ANme2 + 1;
        set_param('Mano_Final/Meñique/Rot2Me','Gain',num2str(ANme2)) %
Segunda Falange meñique

end
if me2 < ANme2
    ANme2 = ANme2 - 1;
    set_param('Mano_Final/Meñique/Rot2Me','Gain',num2str(ANme2)) %
Segunda Falange meñique

end

end

%-----ANULAR-SEGUNDA-FALANGE-----%
if an2 ~= ANan2
    if an2 > ANan2
        ANan2 = ANan2 + 1;
        set_param('Mano_Final/Anular/Rot2An','Gain',num2str(ANan2)) %
Segunda Falange anular

end

```

```

        if an2 < ANan2
            ANan2 = ANan2 - 1;
            set_param('Mano_Final/Anular/Rot2An','Gain',num2str(ANan2))    %
Segunda Falange anular

        end

    end

end
%-----INDICE-SEGUNDA-FALANGE-----%
if in2 ~= ANin2
    if in2 > ANin2
        ANin2 = ANin2 + 1;
        set_param('Mano_Final/Indice/Rot2In','Gain',num2str(ANin2))    %
Segunda Falange indice

    end

    if in2 < ANin2
        ANin2 = ANin2 - 1;
        set_param('Mano_Final/Indice/Rot2In','Gain',num2str(ANin2))    %
Segunda Falange indice

    end

end

end
%-----PULGAR-SEGUNDA-FALANGE-----%
if pu2 ~= ANpu2
    if pu2 > ANpu2
        ANpu2 = ANpu2 + 1;
        set_param('Mano_Final/Pulgar/Rot2pul','Gain',num2str(ANpu2))    %
Segunda Falange pulgar

    end

    if pu2 < ANpu2
        ANpu2 = ANpu2 - 1;
        set_param('Mano_Final/Pulgar/Rot2pul','Gain',num2str(ANpu2))    %
Segunda Falange pulgar

    end

end

end
%-----CORAZON-SEGUNDA-FALANGE-----%
if co2 ~= ANco2
    if co2 > ANco2
        ANco2 = ANco2 + 1;
        set_param('Mano_Final/Corazon/Rot2Co','Gain',num2str(ANco2))    %
Segunda Falange corazon

    end

    if co2 < ANco2
        ANco2 = ANco2 - 1;
    end
end

```

```

        set_param('Mano_Final/Corazon/Rot2Co','Gain',num2str(ANco2)) %
Segunda Falange corazon

    end

end

%-----MEÑIQUE-TERCERA-FALANGE-----%
if me3 ~= ANme3
    if me3 > ANme3
        ANme3 = ANme3 + 1;
        set_param('Mano_Final/Meñique/Rot3Me','Gain',num2str(ANme3)) %
Tercera Falange meñique

    end
    if me3 < ANme3
        ANme3 = ANme3 - 1;
        set_param('Mano_Final/Meñique/Rot3Me','Gain',num2str(ANme3)) %
Tercera Falange meñique

    end

end

%-----ANULAR-TERCERA-FALANGE-----%
if an3 ~= ANan3
    if an3 > ANan3
        ANan3 = ANan3 + 1;
        set_param('Mano_Final/Anular/Rot3An','Gain',num2str(ANan3)) %
Tercera Falange anular

    end
    if an3 < ANan3
        ANan3 = ANan3 - 1;
        set_param('Mano_Final/Anular/Rot3An','Gain',num2str(ANan3)) %
Tercera Falange anular

    end

end

%-----INDICE-TERCERA-FALANGE-----%
if in3 ~= ANin3
    if in3 > ANin3
        ANin3 = ANin3 + 1;
        set_param('Mano_Final/Indice/Rot3In','Gain',num2str(ANin3)) %
Tercera Falange indice

    end
    if in3 < ANin3
        ANin3 = ANin3 - 1;

```

```

        set_param('Mano_Final/Indice/Rot3In', 'Gain', num2str(ANin3))    %
Tercera Falange indice

    end

end

%-----PULGAR-TERCERA-FALANGE-----%
if pu3 ~= ANpu3
    if pu3 > ANpu3
        ANpu3 = ANpu3 + 1;
        set_param('Mano_Final/Pulgar/Rot3pul', 'Gain', num2str(ANpu3))    %
Tercera Falange pulgar

    end

    if pu3 < ANpu3
        ANpu3 = ANpu3 - 1;
        set_param('Mano_Final/Pulgar/Rot3pul', 'Gain', num2str(ANpu3))    %
Tercera Falange pulgar

    end

end

%-----CORAZON-TERCERA-FALANGE-----%
if co3 ~= ANco3
    if co3 > ANco3
        ANco3 = ANco3 + 1;
        set_param('Mano_Final/Corazon/Rot3Co', 'Gain', num2str(ANco3))    %
Tercera Falange corazon

    end

    if co3 < ANco3
        ANco3 = ANco3 - 1;
        set_param('Mano_Final/Corazon/Rot3Co', 'Gain', num2str(ANco3))    %
Tercera Falange corazon

    end

end

end

set_param(bdroot, 'SimulationCommand', 'start')    % Ejecuta simulación de
Simulink
set_param(bdroot, 'SimulationCommand', 'continue')    % Ejecuta simulación de
Simulink
pause(0.1)
set_param(bdroot, 'SimulationCommand', 'pause')    % Ejecuta simulación de
Simulink
end

```