	MACROPROCESO DE APOYO	CÓDIGO: AAAR113
	PROCESO GESTIÓN APOYO ACADÉMICO	VERSIÓN: 3
	DESCRIPCIÓN, AUTORIZACIÓN Y LICENCIA DEL REPOSITORIO INSTITUCIONAL	VIGENCIA: 2017-11-16
		PAGINA: 1 de 7

21.1

FECHA	Lunes, 14 de diciembre de 2020
--------------	--------------------------------

Señores
UNIVERSIDAD DE CUNDINAMARCA
 BIBLIOTECA
 Fusagasugá

UNIDAD REGIONAL	Sede Fusagasugá
TIPO DE DOCUMENTO	Trabajo De Grado
FACULTAD	Ingeniería
NIVEL ACADÉMICO DE FORMACIÓN O PROCESO	Pregrado
PROGRAMA ACADÉMICO	Ingeniería Electrónica

El autor(es):

APELLIDOS COMPLETOS	NOMBRES COMPLETOS	No. DOCUMENTO DE IDENTIFICACIÓN
SÁENZ SÁNCHEZ	JEISON HERNÁN	1.106.899.307

Director(es) y/o asesor(es) del documento:

APELLIDOS COMPLETOS	NOMBRES COMPLETOS
GUERRERO GUERRERO	ANDRÉS FELIPE

Diagonal 18 No. 20-29 Fusagasugá – Cundinamarca
 Teléfono (091) 8281483 Línea Gratuita 018000976000
 www.ucundinamarca.edu.co E-mail: info@ucundinamarca.edu.co
 NIT: 890.680.062-2

*Documento controlado por el Sistema de Gestión de la Calidad
 Asegúrese que corresponde a la última versión consultando el Portal Institucional*



MACROPROCESO DE APOYO	CÓDIGO: AAAr113
PROCESO GESTIÓN APOYO ACADÉMICO	VERSIÓN: 3
DESCRIPCIÓN, AUTORIZACIÓN Y LICENCIA DEL REPOSITORIO INSTITUCIONAL	VIGENCIA: 2017-11-16
	PAGINA: 2 de 7

TÍTULO DEL DOCUMENTO

DESARROLLO DE UNA HERRAMIENTA DE CONTROL PARA MANIPULACIÓN DE OBJETOS POR MEDIO DE UNA MANO ROBÓTICA ANTROPOMORFA

SUBTÍTULO

(Aplica solo para Tesis, Artículos Científicos, Disertaciones, Objetos Virtuales de Aprendizaje)

TRABAJO PARA OPTAR AL TÍTULO DE:

Aplica para Tesis/Trabajo de Grado/Pasantía

Ingeniero Electrónico

AÑO DE EDICIÓN DEL DOCUMENTO

09/12/2020

NÚMERO DE PÁGINAS

65

DESCRIPTORES O PALABRAS CLAVES EN ESPAÑOL E INGLÉS (Usar 6 descriptores o palabras claves)

ESPAÑOL	INGLÉS
1. Agarrar objetos	Grab objects
2. Modelado 3D	3D modeling
3. Diseño antropomorfo	Anthropomorphic design
4. Mano robótica	Robotic hand
5. Guante sensorial	Sensory glove
6. Control PID	PID control

Diagonal 18 No. 20-29 Fusagasugá – Cundinamarca
Teléfono (091) 8281483 Línea Gratuita 018000976000
www.ucundinamarca.edu.co E-mail: info@ucundinamarca.edu.co
NIT: 890.680.062-2

*Documento controlado por el Sistema de Gestión de la Calidad
Asegúrese que corresponde a la última versión consultando el Portal Institucional*



MACROPROCESO DE APOYO	CÓDIGO: AAAr113
PROCESO GESTIÓN APOYO ACADÉMICO	VERSIÓN: 3
DESCRIPCIÓN, AUTORIZACIÓN Y LICENCIA DEL REPOSITORIO INSTITUCIONAL	VIGENCIA: 2017-11-16
	PAGINA: 3 de 7

RESUMEN DEL CONTENIDO EN ESPAÑOL E INGLÉS

(Máximo 250 palabras – 1530 caracteres, aplica para resumen en español):

El objetivo de este estudio es desarrollar un sistema de control económico para un manipulador robótico antropomorfo, el cual podrá ser operado por una persona y así evitar el contacto con sustancias peligrosas que puedan afectar la salud. En el presente trabajo se desarrolla, un sistema de control para un manipulador robótico por medio de un guante sensorial. Este proyecto se lleva a cabo en tres fases, primero se lleva a cabo el proceso de diseño, construcción de la piezas y ensamble de la mano robótica antropomorfa, luego se lleva a cabo el diseño y construcción del guante sensorial y su circuito de acondicionamiento, por último, se identifica el modelo matemático del sistema y se desarrolla el algoritmo de control, para realizar distintas pruebas de agarre.

Por medio del control realizado con el guante sensorial desarrollado, el prototipo de mano robótica es capaz de realizar agarres de presión y precisión, con objetos cuyas dimensiones se encuentran entre 1 cm a 8 cm y cuyo peso no exceda los 400 gr. Los dedos pulgar, índice, medio, anular y meñique presentan un tiempo de retardo promedio de 0.56 s, 0.53 s, 0.57 s, 0.41 s y 0.48 s respectivamente.

The objective of this study is to develop an economic control system for an anthropomorphic robotic manipulator, which can be operated by a person and thus avoid contact with dangerous substances that may affect health. In the present work, a control system for a robotic manipulator developed using a sensory glove. This project carried out in three phases, first, the process of design, construction of the parts, and assembly of the anthropomorphic robotic hand is carried out, then it is carried out by the design and construction of the sensory glove and its conditioning circuit, finally, the mathematical model of the system identified and the control algorithm developed to carry out different grip tests.

Through the control carried out with the sensory glove developed, the robotic hand prototype is capable of making pressure and precision grips with objects whose dimensions are between 1 cm to 8 cm and whose weight doesn't exceed 400 gr. The thumb, index, middle, ring, and little fingers have an average delay time of 0.56 s, 0.53 s, 0.57 s, 0.41 s, and 0.48 s respectively.



MACROPROCESO DE APOYO	CÓDIGO: AAAr113
PROCESO GESTIÓN APOYO ACADÉMICO	VERSIÓN: 3
DESCRIPCIÓN, AUTORIZACIÓN Y LICENCIA DEL REPOSITORIO INSTITUCIONAL	VIGENCIA: 2017-11-16
	PAGINA: 4 de 7

AUTORIZACION DE PUBLICACIÓN

Por medio del presente escrito autorizo (Autorizamos) a la Universidad de Cundinamarca para que, en desarrollo de la presente licencia de uso parcial, pueda ejercer sobre mí (nuestra) obra las atribuciones que se indican a continuación, teniendo en cuenta que, en cualquier caso, la finalidad perseguida será facilitar, difundir y promover el aprendizaje, la enseñanza y la investigación.

En consecuencia, las atribuciones de usos temporales y parciales que por virtud de la presente licencia se autoriza a la Universidad de Cundinamarca, a los usuarios de la Biblioteca de la Universidad; así como a los usuarios de las redes, bases de datos y demás sitios web con los que la Universidad tenga perfeccionado una alianza, son:

Marque con una "X":

AUTORIZO (AUTORIZAMOS)	SI	NO
La reproducción por cualquier formato conocido o por conocer.	X	
La comunicación pública por cualquier procedimiento o medio físico o electrónico, así como su puesta a disposición en Internet.	X	
La inclusión en bases de datos y en sitios web sean éstos onerosos o gratuitos, existiendo con ellos previa alianza perfeccionada con la Universidad de Cundinamarca para efectos de satisfacer los fines previstos. En este evento, tales sitios y sus usuarios tendrán las mismas facultades que las aquí concedidas con las mismas limitaciones y condiciones.	X	
La inclusión en el Repositorio Institucional.	X	

De acuerdo con la naturaleza del uso concedido, la presente licencia parcial se otorga a título gratuito por el máximo tiempo legal colombiano, con el propósito de que en dicho lapso mi (nuestra) obra sea explotada en las condiciones aquí estipuladas y para los fines indicados, respetando siempre la titularidad de los derechos patrimoniales y morales correspondientes, de acuerdo con los usos honrados, de manera proporcional y justificada a la finalidad perseguida, sin ánimo de lucro ni de comercialización.

Para el caso de las Tesis, Trabajo de Grado o Pasantía, de manera complementaria, garantizo(garantizamos) en mi(nuestra) calidad de estudiante(s) y por ende autor(es) exclusivo(s), que la Tesis, Trabajo de Grado o Pasantía en cuestión, es producto de mi(nuestra) plena autoría, de mi(nuestro) esfuerzo personal intelectual, como consecuencia de mi(nuestra) creación original particular y, por tanto, soy(somos) el(los) único(s) titular(es) de la misma. Además, aseguro



MACROPROCESO DE APOYO	CÓDIGO: AAAr113
PROCESO GESTIÓN APOYO ACADÉMICO	VERSIÓN: 3
DESCRIPCIÓN, AUTORIZACIÓN Y LICENCIA DEL REPOSITORIO INSTITUCIONAL	VIGENCIA: 2017-11-16
	PAGINA: 5 de 7

(aseguramos) que no contiene citas, ni transcripciones de otras obras protegidas, por fuera de los límites autorizados por la ley, según los usos honrados, y en proporción a los fines previstos; ni tampoco contempla declaraciones difamatorias contra terceros; respetando el derecho a la imagen, intimidad, buen nombre y demás derechos constitucionales. Adicionalmente, manifiesto (manifestamos) que no se incluyeron expresiones contrarias al orden público ni a las buenas costumbres. En consecuencia, la responsabilidad directa en la elaboración, presentación, investigación y, en general, contenidos de la Tesis o Trabajo de Grado es de mí (nuestra) competencia exclusiva, eximiendo de toda responsabilidad a la Universidad de Cundinamarca por tales aspectos.

Sin perjuicio de los usos y atribuciones otorgadas en virtud de este documento, continuaré (continuaremos) conservando los correspondientes derechos patrimoniales sin modificación o restricción alguna, puesto que, de acuerdo con la legislación colombiana aplicable, el presente es un acuerdo jurídico que en ningún caso conlleva la enajenación de los derechos patrimoniales derivados del régimen del Derecho de Autor.

De conformidad con lo establecido en el artículo 30 de la Ley 23 de 1982 y el artículo 11 de la Decisión Andina 351 de 1993, “*Los derechos morales sobre el trabajo son propiedad de los autores*”, los cuales son irrenunciables, imprescriptibles, inembargables e inalienables. En consecuencia, la Universidad de Cundinamarca está en la obligación de RESPETARLOS Y HACERLOS RESPETAR, para lo cual tomará las medidas correspondientes para garantizar su observancia.

NOTA: (Para Tesis, Trabajo de Grado o Pasantía):

Información Confidencial:

Esta Tesis, Trabajo de Grado o Pasantía, contiene información privilegiada, estratégica, secreta, confidencial y demás similar, o hace parte de la investigación que se adelanta y cuyos resultados finales no se han publicado. **SI ___ NO X.**

En caso afirmativo expresamente indicaré (indicaremos), en carta adjunta tal situación con el fin de que se mantenga la restricción de acceso.



MACROPROCESO DE APOYO	CÓDIGO: AAAr113
PROCESO GESTIÓN APOYO ACADÉMICO	VERSIÓN: 3
DESCRIPCIÓN, AUTORIZACIÓN Y LICENCIA DEL REPOSITORIO INSTITUCIONAL	VIGENCIA: 2017-11-16
	PAGINA: 6 de 7

LICENCIA DE PUBLICACIÓN

Como titular(es) del derecho de autor, confiero(erimos) a la Universidad de Cundinamarca una licencia no exclusiva, limitada y gratuita sobre la obra que se integrará en el Repositorio Institucional, que se ajusta a las siguientes características:

- a) Estará vigente a partir de la fecha de inclusión en el repositorio, por un plazo de 5 años, que serán prorrogables indefinidamente por el tiempo que dure el derecho patrimonial del autor. El autor podrá dar por terminada la licencia solicitándolo a la Universidad por escrito. (Para el caso de los Recursos Educativos Digitales, la Licencia de Publicación será permanente).
- b) Autoriza a la Universidad de Cundinamarca a publicar la obra en formato y/o soporte digital, conociendo que, dado que se publica en Internet, por este hecho circula con un alcance mundial.
- c) Los titulares aceptan que la autorización se hace a título gratuito, por lo tanto, renuncian a recibir beneficio alguno por la publicación, distribución, comunicación pública y cualquier otro uso que se haga en los términos de la presente licencia y de la licencia de uso con que se publica.
- d) El(Los) Autor(es), garantizo(amos) que el documento en cuestión, es producto de mi(nuestra) plena autoría, de mi(nuestro) esfuerzo personal intelectual, como consecuencia de mi (nuestra) creación original particular y, por tanto, soy(somos) el(los) único(s) titular(es) de la misma. Además, aseguro(aseguramos) que no contiene citas, ni transcripciones de otras obras protegidas, por fuera de los límites autorizados por la ley, según los usos honrados, y en proporción a los fines previstos; ni tampoco contempla declaraciones difamatorias contra terceros; respetando el derecho a la imagen, intimidad, buen nombre y demás derechos constitucionales. Adicionalmente, manifiesto (manifestamos) que no se incluyeron expresiones contrarias al orden público ni a las buenas costumbres. En consecuencia, la responsabilidad directa en la elaboración, presentación, investigación y, en general, contenidos es de mí (nuestro) competencia exclusiva, eximiendo de toda responsabilidad a la Universidad de Cundinamarca por tales aspectos.
- e) En todo caso la Universidad de Cundinamarca se compromete a indicar siempre la autoría incluyendo el nombre del autor y la fecha de publicación.
- f) Los titulares autorizan a la Universidad para incluir la obra en los índices y buscadores que estimen necesarios para promover su difusión.
- g) Los titulares aceptan que la Universidad de Cundinamarca pueda convertir el documento a cualquier medio o formato para propósitos de preservación digital.



MACROPROCESO DE APOYO	CÓDIGO: AAAR113
PROCESO GESTIÓN APOYO ACADÉMICO	VERSIÓN: 3
DESCRIPCIÓN, AUTORIZACIÓN Y LICENCIA DEL REPOSITORIO INSTITUCIONAL	VIGENCIA: 2017-11-16
	PAGINA: 7 de 7

h) Los titulares autorizan que la obra sea puesta a disposición del público en los términos autorizados en los literales anteriores bajo los límites definidos por la universidad en el “Manual del Repositorio Institucional AAAM003”

i) Para el caso de los Recursos Educativos Digitales producidos por la Oficina de Educación Virtual, sus contenidos de publicación se rigen bajo la Licencia Creative Commons: Atribución- No comercial- Compartir Igual.



j) Para el caso de los Artículos Científicos y Revistas, sus contenidos se rigen bajo la Licencia Creative Commons Atribución- No comercial- Sin derivar.



Nota:

Si el documento se basa en un trabajo que ha sido patrocinado o apoyado por una entidad, con excepción de Universidad de Cundinamarca, los autores garantizan que se ha cumplido con los derechos y obligaciones requeridos por el respectivo contrato o acuerdo.

La obra que se integrará en el Repositorio Institucional, está en el(los) siguiente(s) archivo(s).

Nombre completo del Archivo Incluida su Extensión (Ej. PerezJuan2017.pdf)	Tipo de documento (ej. Texto, imagen, video, etc.)
1. Desarrollo de una herramienta de control para manipulación de objetos por medio de una mano robótica antropomorfa.pdf	Texto

En constancia de lo anterior, Firmo (amos) el presente documento:

APELLIDOS Y NOMBRES COMPLETOS	FIRMA (autógrafo)
SÁENZ SÁNCHEZ JEISON HERNÁN	<i>Jeison H. Saenz S.</i>

21.1.-40

Desarrollo de una herramienta de control para manipulación de objetos por medio de una mano robótica antropomorfa

Jeison Hernán Sáenz Sánchez

Universidad de Cundinamarca

Ingeniería Electrónica

Facultad de Ingeniería

Fusagasugá, Colombia

2020

Desarrollo de una herramienta de control para manipulación de objetos por medio de una mano robótica antropomorfa

Trabajo de grado presentado como requisito parcial para optar por el título de ingeniero electrónico

Jeison Hernán Sáenz Sánchez

Director:

Dr. Ing. Andrés Felipe Guerrero Guerrero

Línea de investigación:

Diseño e instrumentación y control

Universidad de Cundinamarca

Ingeniería Electrónica

Facultad de Ingeniería

Fusagasugá, Colombia

2020

Agradecimientos

En primer lugar, quiero agradecer a Dios por guiarme y darme fuerza en este camino, por darme una familia amorosa e incondicional y por poner en mi camino personas que me ayudan a superarme y salir adelante.

A mi madre y a mi padre que siempre me han apoyado en este largo camino, con sus consejos y desvelos para que pueda ser alguien mejor. Gracias por ser los mejores padres, amorosos, trabajadores y capaces de dar todo para que a mi hermano y a mí no nos falte nada.

A mi hermano Miguel Ángel gracias por ser el mejor hermano, por apoyarme y aconsejarme este proyecto. A Diana Gómez, gracias por sus consejos y gran ayuda, que aportaron mucho en el desarrollo de este proyecto. Al ingeniero Felipe Guerrero, gracias por guiarme y aconsejarme en cada una de las etapas del proyecto.

Sin la ayuda de ustedes el desarrollo de este proyecto no hubiera sido posible.

Resumen

Algunos procesos industriales y químicos, como el manejo de materiales tóxicos o sustancias químicas representan un riesgo para la salud de los trabajadores, ocasionando un aumento en las enfermedades y accidentes laborales. De acuerdo con el Consejo Colombiano de Seguridad [1], en Colombia se producen anualmente más de 600.000 accidentes laborales, para los años 2016, 2017 y 2018 se presentaron 98.970 casos de intoxicación por sustancias químicas [2]. En el primer semestre del año 2020 se registraron 211.055 accidentes (AT), 6.074 enfermedades (EL) y 198 muertes laborales [3].

El objetivo de este estudio es desarrollar un sistema de control económico para un manipulador robótico antropomorfo, el cual podrá ser operado por una persona y así evitar el contacto con sustancias peligrosas que puedan afectar la salud. En el presente trabajo se desarrolla, un sistema de control para un manipulador robótico por medio de un guante sensorial. Este proyecto se lleva a cabo en tres fases, primero se lleva a cabo el proceso de diseño, construcción de la piezas y ensamble de la mano robótica antropomorfa, luego se lleva a cabo el diseño y construcción del guante sensorial y su circuito de acondicionamiento, por último, se identifica el modelo matemático del sistema y se desarrolla el algoritmo de control, para realizar distintas pruebas de agarre.

Por medio del control realizado con el guante sensorial desarrollado, el prototipo de mano robótica es capaz de realizar agarres de presión y precisión, con objetos cuyas dimensiones se encuentran entre 1 cm a 8 cm y cuyo peso no exceda los 400 gr. Los dedos pulgar, índice, medio, anular y meñique presentan un tiempo de retardo promedio de 0.56 s, 0.53 s, 0.57 s, 0.41 s y 0.48 s respectivamente.

Abstract

Some industrial and chemical processes, such as the handling of toxic materials or chemical substances, represent a risk to the health of workers, causing an increase in occupational diseases and accidents. According to the Colombian Safety Council [1], in Colombia, more than 600,000 work accidents occur annually, for the years 2016, 2017, and 2018 there were 98,970 cases of intoxication by chemical substances [2]. In the first semester of 2020, 211,055 accidents (AT), 6,074 illnesses (EL), and 198 occupational deaths were registered [3].

The objective of this study is to develop an economic control system for an anthropomorphic robotic manipulator, which can be operated by a person and thus avoid contact with dangerous substances that may affect health. In the present work, a control system for a robotic manipulator developed using a sensory glove. This project carried out in three phases, first, the process of design, construction of the parts, and assembly of the anthropomorphic robotic hand is carried out, then it is carried out by the design and construction of the sensory glove and its conditioning circuit, finally, the mathematical model of the system identified and the control algorithm developed to carry out different grip tests.

Through the control carried out with the sensory glove developed, the robotic hand prototype is capable of making pressure and precision grips with objects whose dimensions are between 1 cm to 8 cm and whose weight doesn't exceed 400 gr. The thumb, index, middle, ring, and little fingers have an average delay time of 0.56 s, 0.53 s, 0.57 s, 0.41 s, and 0.48 s respectively.

Índice de contenido

1. Capítulo I: Introducción	10
1.1 Planteamiento del problema.....	10
1.2 Objetivos	11
1.2.1 General.....	11
1.2.2 Específicos.....	11
1.3 Justificación.....	12
2. Capítulo II: Marco referencial	13
2.1 La mano humana	13
2.1.1 Huesos.....	13
2.1.2 Tendones	15
2.1.3 Músculos	15
2.1.4 Movimientos	18
2.2 Estado del arte	20
3. Capítulo III: Diseño y construcción de una mano robótica antropomórfica y un guante sensorial	29
3.1 Parámetros de diseño	29
3.2 Materiales.....	29
3.3 Modelado 3D de la mano antropomórfica en SolidWorks.....	30
3.3.1 Diseño de la mano robótica en SolidWorks	30
3.3.2 Ensamble de las piezas.....	34
3.4 Construcción del guante sensorial	38
3.4.1 Construcción de los sensores de flexión	38
3.4.2 Circuito de acondicionamiento.....	41
3.5 Conexión del sistema	45
4. Capítulo IV: Desarrollo del algoritmo de control para la mano robótica	47
4.1 Identificación del sistema	47
4.2 Diseño del control PID.....	50
4.3 Desarrollo del algoritmo	53
5. Capítulo V: Funcionamiento y desempeño en las pruebas de agarre	55
5.1 Pruebas de agarre.....	55
6. Capítulo VI: Conclusiones y trabajos futuros	60
6.1 Conclusiones.....	60
6.2 Trabajos futuros	61
Bibliografía	62

Índice de figuras

Figura 1. Huesos de la mano derecha.....	14
Figura 2. Capuchón extensor del dedo medio de la mano izquierda	15
Figura 3. Músculos intrínsecos de la mano.....	17
Figura 4. Movimientos de la mano en la muñeca.....	18
Figura 5. Movimientos del pulgar.....	19
Figura 6. Movimientos de los dedos en las articulaciones.....	19
Figura 7. Posiciones funcionales de la mano.....	20
Figura 8. Clasificación del estado del arte.....	21
Figura 9. Programa de reconocimiento de señas y acción de la mano robótica....	22
Figura 10. Pruebas de presión con el exoesqueleto	22
Figura 11. Tipos de agarres de la prótesis.....	23
Figura 12. Mano ROBIOSS.....	23
Figura 13. Prótesis de mano controlada por EMG y ITCS.....	24
Figura 14. Mano exoesquelética ajustable.....	24
Figura 15. Prototipo de mano robótica de la Universidad Distrital Francisco José de Caldas.....	25
Figura 16. Prototipo SAFE Glove.....	25
Figura 17. Sexto dedo robótico.....	26
Figura 18. Mano BCL-1.....	26
Figura 19. Mano robótica.....	27
Figura 20. Mano BCL-26.....	27
Figura 21. Brazo y mano robótica controlados por guante háptico.....	28
Figura 22. Medidas de las falanges distales en SolidWorks.....	31
Figura 23. Ductos para los hilos de nailon en las falanges distales.....	31
Figura 24. Medidas de las falanges medias en SolidWorks.....	31
Figura 25. Ductos para los hilos de nailon en las falanges medias.....	32
Figura 26. Medidas de las falanges proximales en SolidWorks.....	32
Figura 27. Ductos para los hilos de nailon en las falanges proximales.....	32
Figura 28. Medidas de los carpometacarpianos en SolidWorks.....	33
Figura 29. Ductos para los hilos de nailon en los carpometacarpianos.....	33
Figura 30. Dimensiones y vista interna del antebrazo.....	34
Figura 31. Ensamble en SolidWorks de la mano.....	34
Figura 32. Diseño de polea doble para servomotor en SolidWorks.....	34
Figura 33. Piezas de la mano robótica en PLA.....	35
Figura 34. Poleas dobles en PLA.....	35
Figura 35. Tendones en nailon para las falanges distales.....	36
Figura 36. Ensamble entre las falanges distales y medias.....	36
Figura 37. Ensamble entre las falanges medias y proximales.....	36
Figura 38. Ensamble entre las falanges proximales y los metacarpianos.....	37

Figura 39. Estructura ensamblada de la mano robótica.....	37
Figura 40. Ensamble y acondicionamiento de la mano robótica y los servomotores.	38
Figura 41. Mano robótica antropomórfica.	38
Figura 42. Esquema para la construcción del sensor de flexión.....	39
Figura 43. Construcción de los sensores.....	40
Figura 44. Acople de los sensores al guante.....	40
Figura 45. Circuito de acondicionamiento.....	42
Figura 46. Parámetros de la recta.....	43
Figura 47. Diseño de circuito impreso.....	45
Figura 48. Desarrollo de circuito impreso.	45
Figura 49. Diagrama de conexiones.	46
Figura 50. Diagrama de flujo para la obtención de datos.....	47
Figura 51. Ingreso de datos en system identification.	48
Figura 52. Modelos matemáticos calculados.	49
Figura 53. Modelo matemático escogido.	50
Figura 54. Sistema de control PID con lazo cerrado.....	50
Figura 55. Sistema controlado y deseado.....	52
Figura 56. Ensamble de la mano robótica en CoppeliaSim.	53
Figura 57. Función de inicialización en CoppeliaSim.....	54
Figura 58. Diagrama de flujo del algoritmo para el control de una mano robótica.	54
Figura 59. Flexión de los dedos.....	55
Figura 60. Objetos utilizados en la prueba de agarre.	56
Figura 61. Agarre de objetos.	57
Figura 62. Agarre con peso maximo.....	58
Figura 63. Respuesta por dedo del prototipo de mano antropomorfa.....	59

Índice de tablas

Tabla 1. Promedio de medidas del estudio biométrico del grupo masculino.	29
Tabla 2. Medidas de velostat escogidas.	39
Tabla 3. Valores de resistencia medida en los sensores.	41
Tabla 4. Condensadores y frecuencias calculadas.	42
Tabla 5. Valores de las resistencias en el Span y cero.	44
Tabla 6. Precios de los materiales.	46
Tabla 7. Dimensiones de los objetos a agarrar.	56

Capítulo I: Introducción

A lo largo de los últimos años, se ha presentado un incremento en el desarrollo de tecnologías para mejorar la ejecución y calidad de procesos de investigación, industriales o médicos. La robótica es una de las tecnologías con más avances, que se centra en la investigación y desarrollo de sistemas mecánicos llamados robots, estos se pueden definir como manipuladores reprogramables, diseñados para mover materiales o herramientas a través de movimientos programados [4].

De acuerdo al Consejo Colombiano de seguridad [1], en Colombia se producen anualmente más de 600.000 accidentes y enfermedades laborales, cifras que se pueden reducir mediante el uso de robots en ambientes peligrosos. Los robots pueden ser diseñados para ser controlados por un operador, y así, mantener una distancia segura respecto a la fuente de riesgo [4].

En este documento, se muestra el desarrollo e implementación de un prototipo de mano robótica. El diseño se lleva a cabo en el software SolidWorks, con las dimensiones promedio obtenidas del estudio biométrico realizado por Binignat et al. [5], se realiza la impresión 3D de las piezas y se ensambla la estructura del prototipo. Los sensores se construyen con velostat (material resistivo capaz de variar su resistencia) y se adhieren a los dedos del guante, finalizando la construcción del guante sensorial. Se realiza un circuito de acondicionamiento para el guante sensorial y la tarjeta de adquisición de datos, el cual consta de un divisor de tensión, seguidor de tensión y un span y cero. Mediante el software MATLAB se determina el modelo matemático del sistema y se desarrolla el algoritmo de control para prototipo de mano robótica, finalizando, con las pruebas de agarre de diferentes objetos y formas geométricas.

1.1 Planteamiento del problema

Según el informe realizado por el Consejo Colombiano de Seguridad [3], de acuerdo a las cifras para el primer semestre del año 2020, 211.055 trabajadores sufrieron un accidente laboral, 99.945 menos que en el año 2019. Entre las cifras, el sector de agricultura, ganadería y silvicultura ocupó el primer puesto de accidentalidad en el país, seguido del sector de minas y canteras, industria manufacturera y el sector eléctrico, gas y agua. Los departamentos con mayor incidencia de accidentes son Magdalena, Meta, Antioquia, Risaralda y Cundinamarca. Para los años 2016, 2017 y 2018 se registró un total 98.970 casos de intoxicación por sustancias químicas, siendo el 2017 el de mayor número con 39.709 casos, y en menor proporción el año 2018 con 23.258 [2].

El manejo de sustancias químicas representa un riesgo para la salud, debido a que puede generar intoxicaciones y pérdidas humanas, por fallos en los procesos o errores humanos. Una solución a esta problemática consiste en el uso de robots especializados para determinadas actividades, situación que incrementa los costos en las empresas [6] [7]. Adicionalmente, algunas actividades que parecen sencillas para el ser humano pueden requerir de una gran destreza por parte del robot al manipular objetos, debido a que, los robots industriales tienen pocos dedos y articulaciones [8].

En el ámbito académico se han desarrollado múltiples tipos de controladores y diferentes diseños de manipuladores robóticos, desde manipuladores con pocos actuadores hasta diseños antropomorfos. Debido a la complejidad y alto costo que representan la mayoría de estas soluciones, actualmente permanecen en etapa de prototipo [8].

Con lo anterior, este trabajo surge del siguiente interrogante:

¿Cómo controlar a bajo costo un manipulador robótico antropomorfo, en tareas de manipulación de objetos en ambientes peligrosos?

1.2 Objetivos

1.2.1 General.

Desarrollar una herramienta que permita controlar un prototipo de una mano robótica antropomórfica, enfocada al agarre de objetos.

1.2.2 Específicos.

- Diseñar un prototipo de una mano robótica antropomórfica y un guante sensorial para procesos de agarre.
- Desarrollar un algoritmo de control con seguimiento de referencia del guante sensorial, para la manipulación de objetos mediante mano robótica.
- Realizar pruebas del funcionamiento y desempeño del guante sensorial en tareas de agarre, con el prototipo de mano robótica.

1.3 Justificación

Simular la destreza de la mano humana en las manos robóticas, facilita el desarrollo de actividades en el campo de manipulación y exploración a larga distancia, por temas de seguridad o condiciones de inaccesibilidad [9]. Existe una gran variedad de objetos para interactuar con las manos y realizar diferentes actividades, de manera más cómoda, eficiente y con mayor seguridad [10].

Las actividades de manipulación en los sistemas de producción han aumentado, requiriendo en gran medida el uso de manipuladores robóticos, los cuales se han convertido en dispositivos de mucha relevancia en la industria. Sin embargo, los manipuladores están hechos para realizar tareas específicas, por lo que ha sido importante diseñar manipuladores robóticos con la capacidad de imitar la mano humana [11]. La precisión en el agarre de un manipulador robótico puede verse afectada al interactuar con objetos de diferentes dimensiones, lo que se puede mejorar al simular los movimientos de la mano humana [12].

Mejorar el proceso de agarre en una mano robótica permite resistir perturbaciones aleatorias que pueden surgir mientras se manipula un objeto, esto hace que el objeto manipulado se mantenga estable, lo cual permite regular la fuerza aplicada en el agarre/sujeción [11]. Mejorar la interacción de robots con objetos diseñados para ser usados por la mano humana, acerca a la máquina a resolver dificultades en cuanto a la manipulación de objetos usando estrategias humanas, obteniendo mejores resultados [13].

En la actualidad (año 2020), las empresas se han visto afectadas por la pandemia del COVID-19, debido a que han tenido que disminuir sus empleados, y con esto la producción. Para evitar contaminar los productos con el virus, se promueve el cumplimiento de las medidas de seguridad, el uso maquinaria en la manipulación de los productos y el teletrabajo para los empleados. La solución implementada en este trabajo contribuye a la interacción en procesos productivos cumpliendo con las normas de distanciamiento social y evitando el contacto directo con los productos.

Este tipo de trabajos promueven el desarrollo de estrategias para mejorar el rendimiento en aplicaciones de investigación que adecuan robots para la manipulación de objetos en ambientes peligrosos. Con este trabajo se aportará en el desarrollo de herramientas de bajo costo y con capacidad de agarrar objetos. Al reducir costos, se impactará positivamente en la población de bajos recursos económicos que requiera la herramienta.

Capítulo II: Marco referencial

En este capítulo se relacionarán los conceptos y aspectos teóricos más relevante en la estructura de la mano humana, los cuales se tienen en cuenta a la hora de desarrollar una mano robótica antropomorfa. También se hace una breve descripción, sobre los trabajos realizados sobre el control y desarrollo de manos robóticas.

1.4 La mano humana

El miembro superior es la parte del cuerpo humano dedicada a la interacción con el ambiente y manipulación de elementos, se divide en cuatro segmentos; hombro (miembro proximal), brazo, antebrazo y mano (miembro distal) [14]. La mano funciona como herramienta mecánica al agarrar objetos mediante la flexión de los dedos por la acción de tendones, adicionalmente, la mano funciona como herramienta sensitiva gracias a que cuenta con receptores sensibles al tacto, dolor y temperatura [15]. La estructura de la mano está formada por los huesos y los movimientos son ejecutados por la acción de los tendones y los músculos, características que permiten el desarrollo de actividades cotidianas como alimentarse, jugar o trabajar.

1.4.1 Huesos.

La mano se divide en la muñeca (carpo), palma y dorso (metacarpo), y en los dedos (falanges), siendo estos el pulgar, índice, medio, anular y meñique. Los huesos del carpo son ocho, los metacarpianos son cinco y se tienen catorce falanges, dando un total de veintisiete huesos divididos en las tres secciones de la mano. Los ocho huesos del carpo se encuentran unidos entre sí por ligamentos y articulaciones, formando las filas proximal y distal, dando al carpo una forma cóncava en la cara palmar [14] [15] [16] [17].

La fila proximal del carpo (Figura 1) se compone del hueso escafoides, que tiene una forma de barca y se articula con el radio, semilunar, grande, trapecio y el trapezoide. El hueso semilunar, cuenta con una forma de medialuna y se articula con el radio, escafoides, piramidal, grande y con el ganchoso. El hueso piramidal, tiene una forma de pirámide y se articula con el semilunar y el ganchoso. El hueso pisiforme, tiene una forma de guisante y se articula solamente con el hueso piramidal [14] [15] [16] [17].

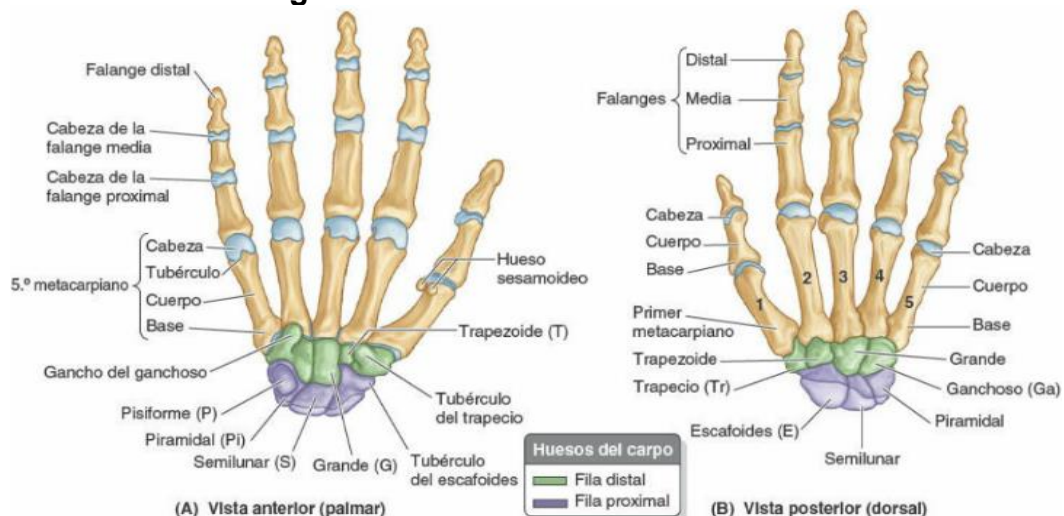
La fila distal del carpo se articula con la proximal y los huesos metacarpianos (Figura 1), se compone del trapecio, con una forma irregular de cuatro lados y se articula con el metacarpiano del pulgar, escafoides y el trapezoide. El hueso trapezoide, con forma de cuatro lados (dos paralelos) y se articula con el metacarpiano del índice,

trapezio, grande y escafoides. El grande, es el hueso más grande del carpo con una forma de tapón de champaña y se articula con el tercer metacarpiano, trapezoide, escafoides, semilunar y el ganchoso. Finalmente, el ganchoso, el cual tiene un gancho que sobresale del hueso y está articulado con el semilunar, piramidal, grande y los metacarpianos del anular y el meñique [14] [15] [16] [17].

El metacarpo está formado por cinco huesos largos, llamados metacarpianos, que se encuentran en la región media de la mano, articulados con el carpo y la falange proximal de cada dedo, desde su base y cabeza (nudillo) respectivamente (Figura 1). Los ocho huesos del carpo y los metacarpianos, exceptuando el metacarpiano del pulgar, actúan como unidad debido a que se articulan entre sí y estas articulaciones tienen movimientos limitados. La articulación entre el metacarpiano del pulgar y el carpo permite que tenga movimientos independientes al de las otras articulaciones carpometacarpianas, y a su vez obtener el movimiento de oposición característico del pulgar [14] [15] [16] [17].

El dedo índice, medio, anular y meñique se dividen en las filas proximal, media y distal (en el caso del pulgar solo la fila proximal y distal). Las falanges proximal y media tienen una forma similar a los metacarpianos, pero con menor longitud (Figura 1). La fila proximal representa las cinco falanges proximales de los dedos, estas se articulan con los metacarpianos desde su base y con las falanges medias (la distal en el caso del pulgar) desde la cabeza. Las cuatro falanges medias se ubican en la fila media, son un poco más grandes que las falanges distales y más pequeñas que las proximales, se articulan con las falanges proximales y distales. La fila distal contiene a las cinco falanges distales, las cuales son más pequeñas que las otras falanges, es articulada desde su base a la cabeza de la falange media y su cabeza es aplanada y angosta [14] [15] [16] [17].

Figura 1. Huesos de la mano derecha.

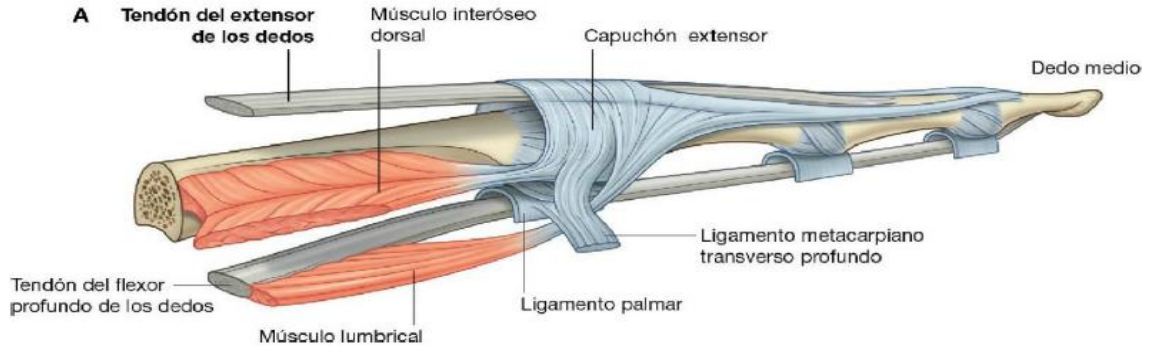


Fuente: Anatomía con orientación clínica, 8ª edición.

1.4.2 Tendones

Los tendones de los músculos flexores y extensores de los dedos, llegan a la mano a través del túnel del carpo y atraviesan la palma, entrando en las vainas fibrosas (sinoviales) y el capuchón extensor formado músculos (Figura 2 y Figura 3a). Las vainas fibrosas reducen el rozamiento de los tendones, cuando se deslizan adelante y atrás al flexionar los dedos, y evitan que se arqueen los tendones [15] [17].

Figura 2. Capuchón extensor del dedo medio de la mano izquierda



Fuente: Gray anatomía para estudiantes, 3ª edición.

1.4.3 Músculos

Los diecinueve músculos de la mano se distribuyen en tenares, hipotenares e intermedios. La mano cuenta con cuatro músculos de la eminencia tenar ubicados en la región lateral de la palma y la base del pulgar, tienen como objetivo realizar movimientos delicados y la oposición del pulgar [14] [15], estos músculos son:

- **Abductor corto del pulgar:** está ubicado sobre el oponente del pulgar (Figura 3a), se origina de los tubérculos del escafoides y trapecio (huesos del carpo) y se inserta en la base de la falange proximal del pulgar. Se encarga de abducir el dedo en la articulación metacarpofalángica y colabora en la primera fase de oposición del [14] [15] [16].
- **Aductor del pulgar:** es un músculo grande con forma triangular y sus dos cabezas se encuentran separadas por la arteria radial (Figura 3a), la cabeza oblicua de este músculo se conecta a los huesos grande, trapezoide y a las bases de los metacarpianos en los dedos índice y medio. La cabeza transversa se ubica en la superficie del metacarpiano del dedo medio, se encarga de acercar el pulgar al metacarpiano del índice [14] [15] [16].
- **Flexor corto del pulgar:** este músculo se origina en el tubérculo del trapecio y el trapezoide, por último, se inserta en la base de la falange proximal del pulgar (Figura 3a). Se encarga de flexionar la articulación metacarpofalángica del pulgar y contribuye al movimiento de oposición del pulgar [14] [15] [16].

- **Oponente del pulgar:** se origina en el tubérculo del trapecio y se inserta en la superficie palmar del metacarpiano (Figura 3a), es el encargado de realizar el movimiento de oposición del pulgar o flexión del metacarpiano. Además de la oposición del pulgar, rota el metacarpiano de tal manera que sitúa la yema del pulgar en frente de los demás dedos de la mano [14] [15] [16].

La eminencia hipotenar se ubica en el lado medial de la mano, en la base del meñique, se conforma de tres músculos que se encargan de realizar los movimientos del dedo meñique. Los músculos de la eminencia hipotenar se asemejan a lo de la eminencia tenar por sus nombres, organización y funcionamiento [14] [15]. estos músculos son:

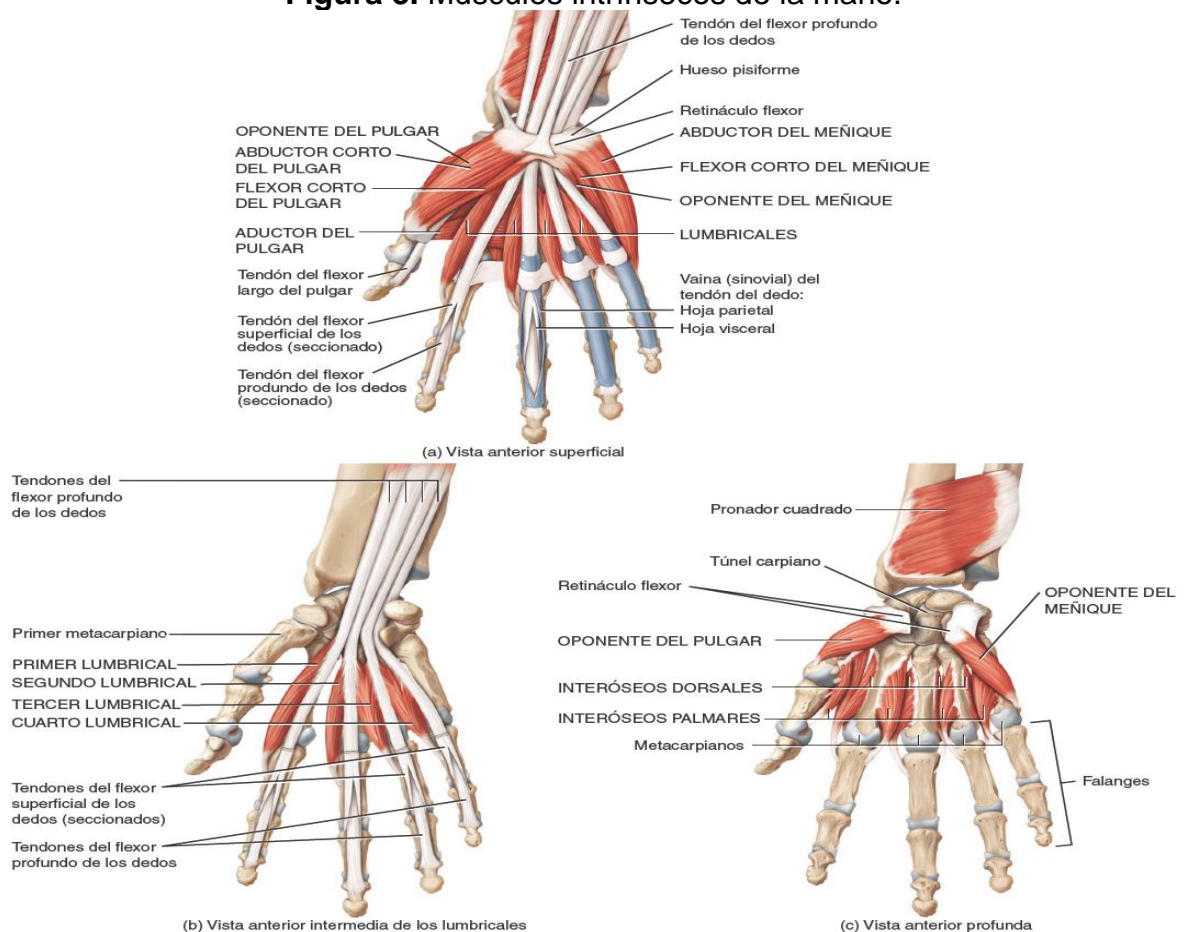
- **Abductor del meñique:** es el músculo más superficial de los tres y tiene una corta y ancha, se origina de pisiforme y del tendón flexor cubital del carpo, y también, se inserta en la base de la falange proximal del dedo meñique (Figura 3a). Se encarga de abducir el dedo meñique y contribuye a la flexión de la falange proximal, representando un papel importante al sujetar objetos con los dedos separados [14] [15] [16].
- **Flexor corto del meñique:** este músculo se sitúa en la parte lateral del abductor del meñique, se origina en el gancho del ganchoso y se inserta en la base de la falange proximal, cercano al abductor (Figura 3a). Este músculo flexiona la falange proximal desde la articulación metacarpofalángica [14] [15] [16].
- **Oponente del meñique:** se encuentra debajo de los otros dos músculos, este músculo se origina en el gancho del ganchoso y se inserta en la superficie palmar en el metacarpiano del meñique (Figura 3a). El oponente del meñique se encarga de mover el metacarpiano y rotarlo en oposición al pulgar, de la misma manera que el oponente del pulgar, actúa en la articulación carpometacarpiana, pero con un movimiento más sutil [14] [15] [16].
- **Palmar corto:** es un músculo cutáneo pequeño, ubicado en el tejido subcutáneo de la eminencia hipotenar, este musculo se origina en la aponeurosis palmar y se inserta en la piel del borde medial de la mano. El palmar corto es capaz de aumentar la profundidad en la cavidad de la palma, arrugando la piel de la eminencia hipotenar [14] [15] [16].

La celda palmar cuenta con once músculos, que se dividen en lumbricales, interóseos palmares e interóseos dorsales. Los cuatro músculos lumbricales (Figura 3b) se encargan de flexionar las articulaciones metacarpofalángicas y extender las articulaciones interfalángicas de los dedos índice, medio, anular y meñique. Dos de

los lumbricales son unipeniformes y los otros bipeniformes, los primeros se originan en los tendones flexores profundos de los dedos índice y medio, también en los tendones flexores profundos de los últimos cuatro dedos [14] [15] [16].

Los músculos interóseos son siete y están divididos en cuatro dorsales y tres palmares (Figura 3c). Los músculos interóseos dorsales, se encuentran en las caras laterales de los metacarpianos en los dedos índice (1), medio (2) y anular (1), insertados en la base de la falange proximal y en el capuchón extensor de los dedos. Estos músculos pueden realizar los movimientos de flexión y extensión de los dedos y los puede abducir en las articulaciones metacarpofalángicas. Los músculos interóseos palmares se originan en la superficie medial (para el metacarpiano del índice) y superficie lateral (para los dedos anular y meñique), se insertan en el capuchón extensor de los dedos en donde se ubican. Estos músculos se encargan de aducir el dedo índice, anular y meñique desde las articulaciones metacarpofalángicas, también pueden realizar movimientos de flexión y extensión de estos dedos [14] [15].

Figura 3. Músculos intrínsecos de la mano.



Fuente: Principios de anatomía y fisiología, 13ª edición.

1.4.4 Movimientos

La mano puede realizar una variedad de movimientos en la muñeca, sobre el antebrazo, y los dedos. Los movimientos de la muñeca (Figura 4) son flexión y extensión, estos movimientos consisten en dirigir la palma de la mano a la cara anterior (flexión) o posterior (extensión) del antebrazo. El rango de flexión máxima y extensión máxima puede alcanzar los 180°. La abducción y aducción, son los movimientos en los cuales se inclina la mano a la cara lateral o la medial del antebrazo respectivamente. Por último, la circunducción, este movimiento es el resultado de la combinación de los anteriores cuatro movimientos [16].

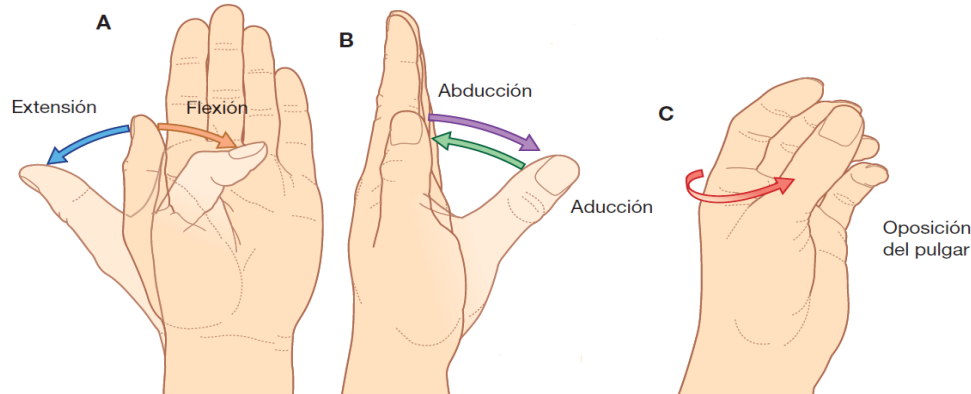


Fuente: Gray anatomía para estudiantes, 3ª edición.

El pulgar es capaz de realizar movimientos complejos gracias a su estructura (Figura 5), mientras que los últimos cuatro dedos presentan movimientos idénticos. Los movimientos de abducción y aducción del pulgar, consisten en acercar o alejar lateralmente dicho dedo del eje central de la palma. La flexión y extensión acercan o alejan la yema del dedo a la palma de la mano, mediante movimientos en la articulación metacarpofalángica e interfalángica. La oposición del pulgar, que es el movimiento más importante del dedo, consiste en ubicarlo enfrente (90°) a los demás dedos [15] [17].

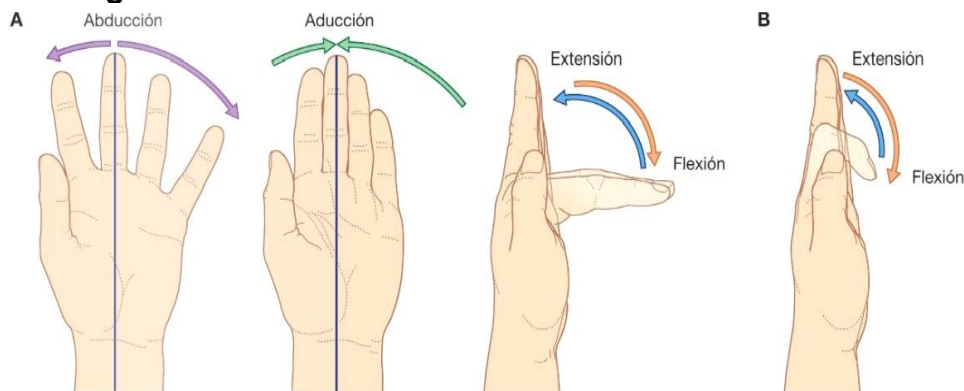
Los movimientos del pulgar y de la mano (abducción, aducción, flexión, extensión y circunducción), aumentan la eficiencia y destreza de acciones como el movimiento libre, manipulación de precisión y variación de la fuerza de presión. Los últimos cuatro dedos (Figura 6) presentan los mismos movimientos que el pulgar, exceptuando la oposición [15] [17].

Figura 5. Movimientos del pulgar.



Fuente: Gray anatomía para estudiantes, 3ª edición.

Figura 6. Movimientos de los dedos en las articulaciones.



Fuente: Gray anatomía para estudiantes, 3ª edición.

La combinación de los movimientos de la mano puede representarse en movimientos libre y de manipulación, el agarre palmar o presión con fuerza (Figura 7A) se conforma de la acción potente de los músculos flexores de los dedos, músculos de la celda palmar y los extensores del carpo. La presión en gancho (Figura 7B) compromete los músculos flexores de los dedos, pero con poca energía. La presión de precisión (Figura 7C y D) se usa en la manipulación de objetos pequeños, actúan los músculos flexores y extensores, que mantienen firme los dedos. Los abductores, aductores y los músculos de la celda palmar realizan los movimientos finos. La pinza (Figura 7E) es un movimiento que compromete a los dedos pulgar e índice, en algunos casos también el dedo medio, y a los músculos de estos dedos [14].

Figura 7. Posiciones funcionales de la mano.

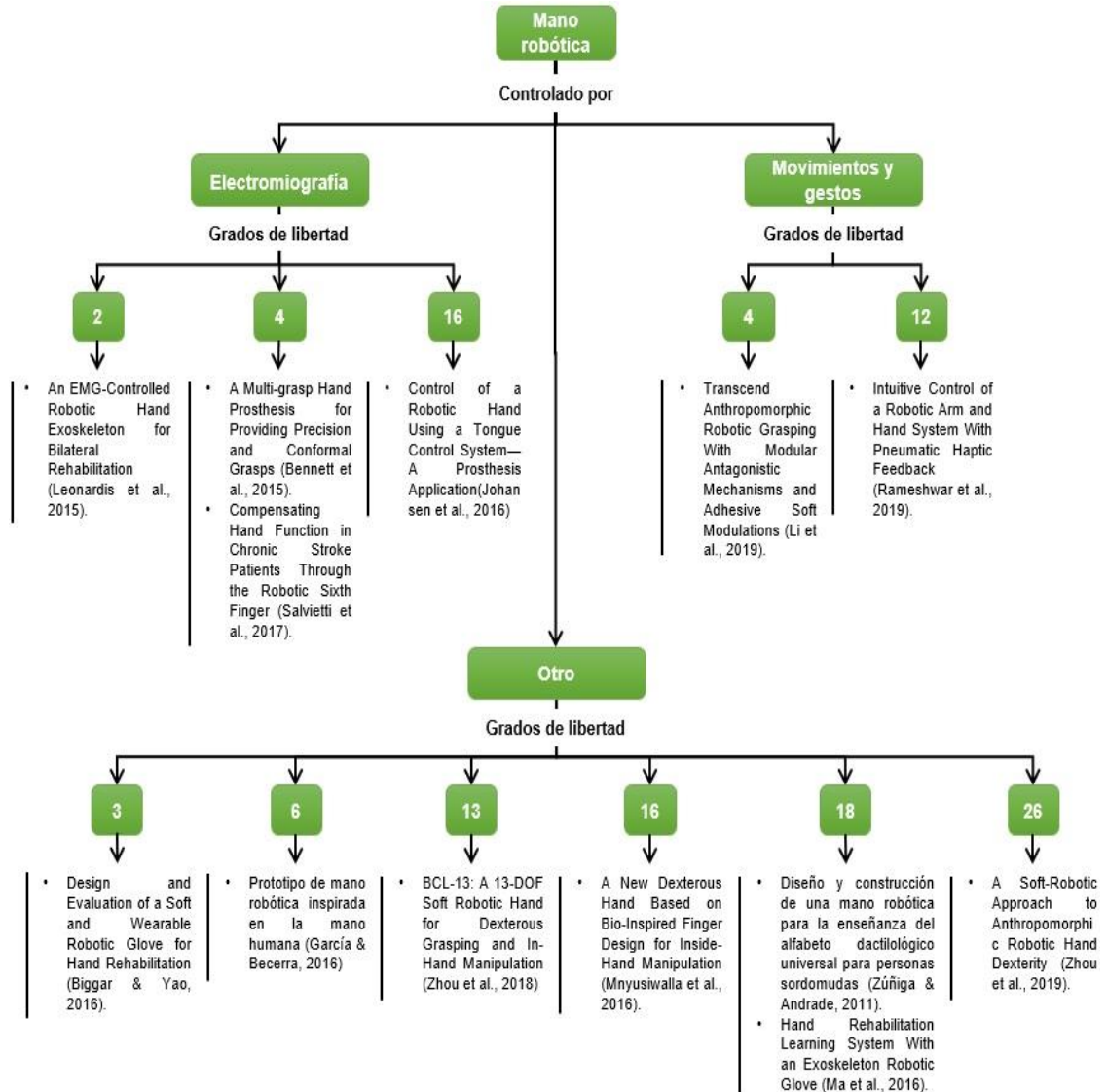


Fuente: Anatomía con orientación clínica, 8ª edición.

1.5 Estado del arte

La mano humana es una herramienta idónea para realizar innumerables acciones, cuenta con una riqueza funcional debido a la abundancia en las posiciones, movimientos y acciones, la mano también es un receptor sensorial extremadamente sensible y preciso para la retroalimentación de sus acciones [18]. En la mano, el dedo pulgar es el componente más importante, la pérdida de este puede reducir la funcionalidad de la mano en un 40% [19]. Muchos autores han desarrollado herramientas que tratan de emular los movimientos de la mano humana, en este sentido se pueden encontrar diferentes enfoques. En la Figura 8, se pueden observar 13 artículos sobre el desarrollo de manos robóticas, clasificados por el tipo de control y los grados de libertad que tienen.

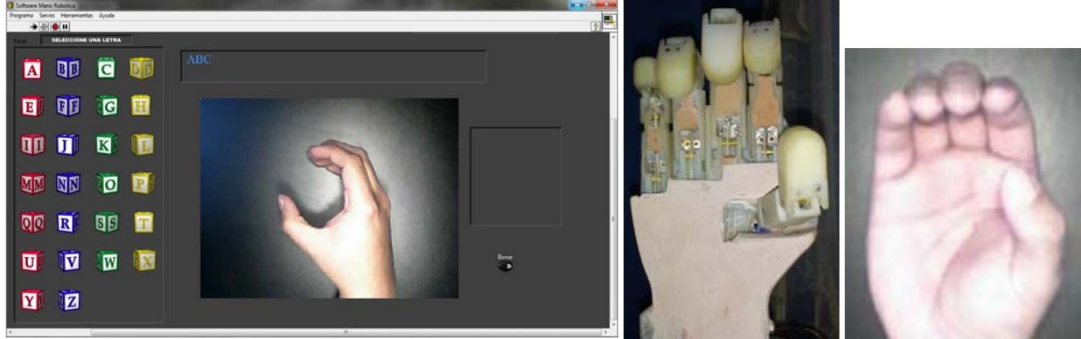
Figura 8. Clasificación del estado del arte.



Fuente: Autor.

En los últimos años se han desarrollado manos robóticas, las cuales tienen usos como prótesis, manipulación de objetos a distancia y aprendizaje del alfabeto dactilológico. Zúñiga & Andrade [20] desarrollaron un prototipo de mano robótica antropomórfica con un programa realizado en LabVIEW (Figura 9), en el cual se incluyeron imágenes de cada una de las letras del abecedario. La función del prototipo de mano es representar el abecedario dactilológico. Las piezas de la mano robótica fueron elaboradas de grilon, utilizaron un microcontrolador PIC 18F4550 y dieciocho servomotores que unen las piezas de la mano haciendo las veces de tendones, el prototipo representa los movimientos de las falanges, abducción y aducción de la mano [20].

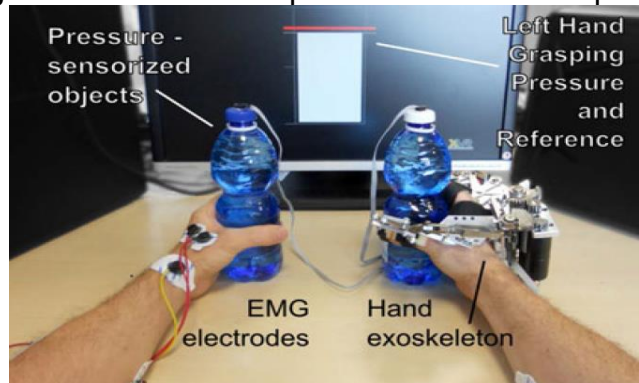
Figura 9. Programa de reconocimiento de señas y acción de la mano robótica.



Fuente: Diseño y construcción de una mano robótica para la enseñanza del alfabeto dactilológico universal para personas sordomudas.

Leonardis et al. [21] desarrollaron un sistema de entrenamiento bilateral asistido por robot (Figura 10), para la rehabilitación de la mano debido al deterioro motor causado por un accidente cerebrovascular. Este sistema hace uso de un exoesqueleto el cual guía la mano afectada de acuerdo con la presión ejercida y los movimientos musculares obtenidos por electromiografía en la mano no afectada. El exoesqueleto robótico puede adaptarse al tamaño de la mano del paciente, siendo diseñado para el agarre de objetos cilíndricos y cuenta con 2 motores que representan 2 DOF, uno para el movimiento del dedo pulgar y el segundo para los dedos índice, medio, anular y meñique [21].

Figura 10. Pruebas de presión con el exoesqueleto .



Fuente: An EMG-controlled robotic hand exoskeleton for bilateral rehabilitation.

Bennett, Dalley, Truex, & Goldfarb [22] presentan en su estudio el diseño de una mano protésica antropomórfica accionada por cuatro motores que otorgan 4 DOF (Figura 11). El objetivo de esta implementación es proporcionar una funcionalidad mejorada a personas con extremidad superior amputada. La prótesis tiene un peso de 546 g y una dimensión de 20cm de la palma a la punta del dedo medio y un ancho de 8.9 cm. Para los movimientos de oposición/reposición y flexión/extensión del dedo pulgar se usan dos motores, en el caso de flexión/extensión en el dedo índice y el grupo de dedos medio, anular y meñique se usan dos motores [22].

Figura 11. Tipos de agarres de la prótesis.



Fuente: A multi-grasp hand prosthesis for providing precision and conformal grasps.

Mnyusiwalla et al. [8] se centran en el desarrollo de una mano robótica antropomórfica, tiene como objetivo replicar la interacción de agarre en la mano humana con el medio ambiente en robots industriales (Figura 12). La mano robótica tiene 4 dedos que son accionados por 4 actuadores, cada uno, que generan 16 DOF. El diseño de los dedos fue propuesto por el equipo ROBIOS del Instituto Pprime [8].

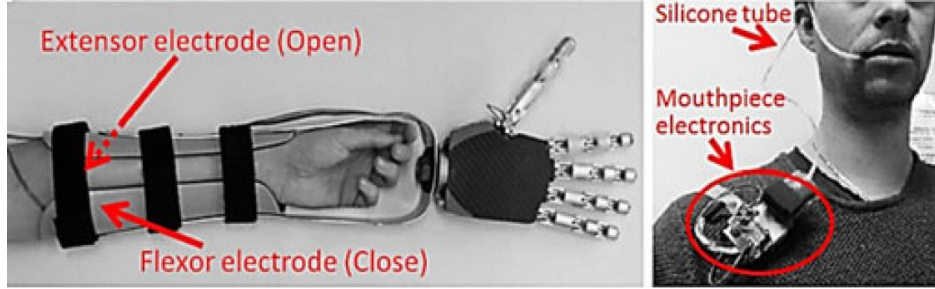
Figura 12. Mano ROBIOS.



Fuente: A new dexterous hand based on bio-inspired finger design for inside-hand manipulation.

Johansen, Cipriani, Popovic & Struijk [23] presentan en su estudio un esquema de control dual-modal de una prótesis de mano, combina electromiografía (EMG) estándar y un sistema inductivo de control de lengua (ITCS) ubicado en el paladar superior (Figura 13), el ITCS funciona como un teclado inalámbrico desde el cual se darán órdenes a la prótesis. El rendimiento del control ITCS se compara con el EMG, dando como resultado una reducción del 35.4% en el tiempo de activación, esto indica que el sistema ITCS puede permitir una activación más rápida para movimientos específicos [23].

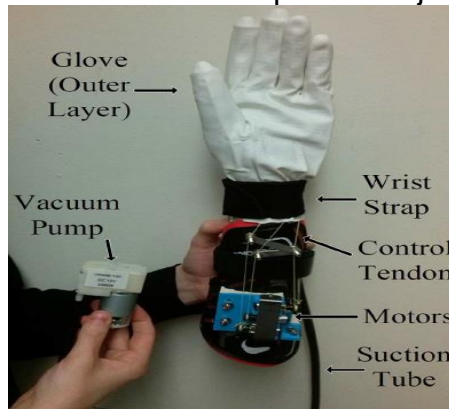
Figura 13. Prótesis de mano controlada por EMG y ITCS.



Fuente: Control of a robotic hand using a tongue control system a prosthesis application.

Biggar & Yao [24] desarrollaron un diseño de mano exoesquelética ligera, con forma de guante portátil, para realizar ejercicios de flexión y extensión de los dedos que contribuyan a la rehabilitación de personas con accidente cerebrovascular (Figura 14). Tiene tres actuadores para el movimiento de los dedos pulgar, índice y medio, debido a que estos predominan en las actividades de agarre. Para ajustar el guante a la mano afectada hace uso de una bomba de aire pequeña [24].

Figura 14. Mano exoesquelética ajustable.



Fuente: Design and evaluation of a soft and wearable robotic glove for hand rehabilitation.

García & Becerra [25] presentan el desarrollo de una mano robótica, la cual puede replicar algunas características funcionales de la mano humana (Figura 15). Este prototipo se compone de 6 servomotores que se conectan a los dedos y la muñeca por medio de hilos de nailon, simulando el funcionamiento de los tendones, para representar el movimiento y otro servomotor para el movimiento de flexión y extensión de la mano. Las medidas del diseño corresponden a estándares similares de la mano humana en un hombre de 25 años. Como resultado obtuvieron un diseño estético, construido con materiales ligeros [25].

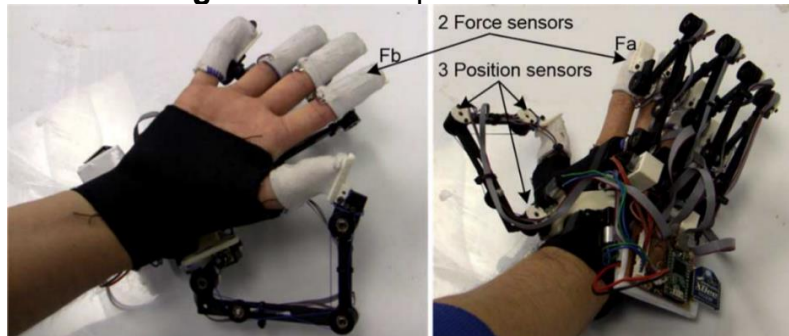
Figura 15. Prototipo de mano robótica de la Universidad Distrital Francisco José de Caldas.



Fuente: Prototipo de mano robótica inspirada en la mano humana.

Ma, Ben-Tzvi, & Danoff [26] desarrollaron un guante robótico de exoesqueleto (Figura 16), el cual puede aprender algunos los movimientos y la fuerza ejercida al agarrar un objeto. Los movimientos aprendidos se pueden reproducir en la mano de una persona en rehabilitación por un accidente cerebrovascular. El guante cuenta con motores que se encargan de controlar los movimientos de los dedos, cada dedo cuenta con sensores de posición y de fuerza para determinar la posición del dedo y medir las fuerzas que ejerce el mecanismo y de agarre. El dispositivo tiene un peso de 430 g [26].

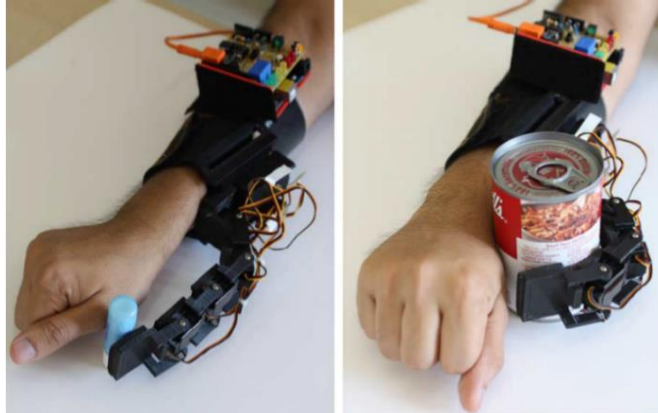
Figura 16. Prototipo SAFE Glove.



Fuente: Hand rehabilitation learning system with an exoskeleton robotic glove.

Salviotti et al. [27] propusieron un prototipo de dedo robótico como posible solución al agarre de objetos en personas con accidente cerebrovascular crónico. Este prototipo cumple la función de un sexto dedo que actúa como una pinza junto con la mano parética (Figura 17), mejorando las capacidades funcionales de la mano en el paciente. La estructura del prototipo de dedo robótico se imprimió en impresora 3D. Esta se compone de 4 servomotores HS-53 para las articulaciones y 4 sensores de fuerza, los movimientos de dedo son controlados por una señal de electromiografía generada por el usuario [27].

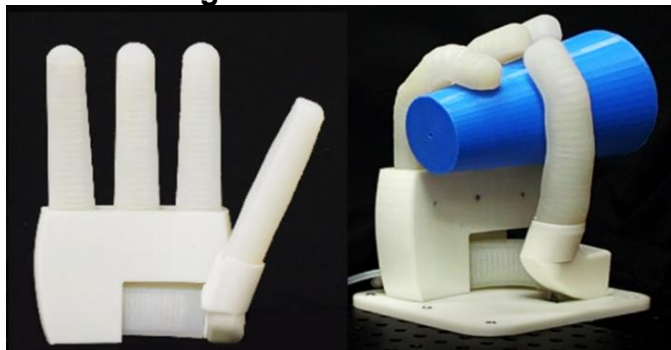
Figura 17. Sexto dedo robótico.



Fuente: Compensating hand function in chronic stroke patients through the robotic sixth finger.

Zhou, Yi, Chen, Liu, & Wang [28] desarrollaron una mano robótica antropomórfica llamada BCL-13 (Figura 18), con capacidad de agarrar y manipular objetos, BCL-13 cuenta con 4 dedos y 13 articulaciones independientes, obteniendo un área de trabajo similar al de la mano humana. Las falanges de la mano BCL-13 están hechas en material de silicona y las articulaciones son accionadas por actuadores neumáticos, tiene un peso total de 1,27 kg [28].

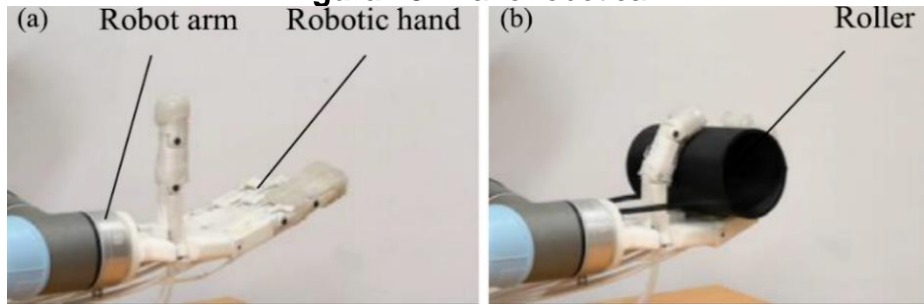
Figura 18. Mano BCL-1.



Fuente: BCL-13: a 13-DOF soft robotic hand for dexterous grasping and in-hand manipulation.

Li, Gu, Xiao, Zhu, & Ren [29] desarrolló una mano robótica antropomórfica con capacidad de manipular objetos (Figura 19), está construida con la combinación de estructuras blandas y rígidas para mejorar la estabilidad del agarre. La mano robótica tiene cinco dedos y un total de 12 DOF, los movimientos de las articulaciones son accionados por servomotores que cumplen la función de tendones, el material de los dedos y la palma de ácido poliláctico y la piel es de silicona [29].

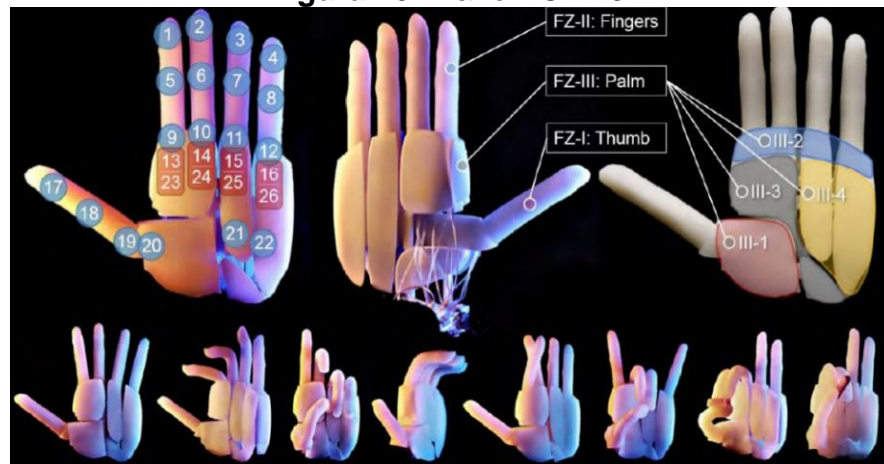
Figura 19. Mano robótica.



Fuente: Transcend Anthropomorphic Robotic Grasping With Modular Antagonistic Mechanisms and Adhesive Soft Modulations.

Zhou et al. [9] proponen el desarrollo de una mano robótica llamada BCL-26, cuenta con 26 DOF independientes y accionamiento neumático (Figura 20), para la manipulación de objetos. La mano robótica puede manipular objetos esféricos de 16cm de diámetro como máximo y una carga máxima de 2 kg [9].

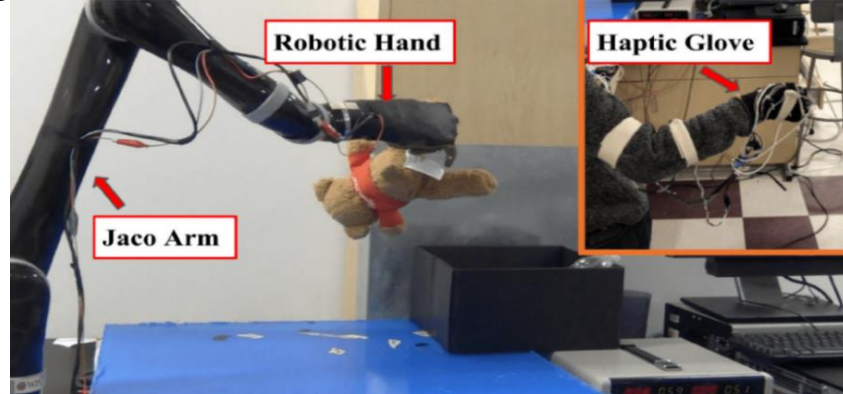
Figura 20. Mano BCL-26.



Fuente: A Soft-Robotic Approach to Anthropomorphic Robotic Hand Dexterity.

Rameshwar, Li, Votta, & Onal [30] desarrollaron un sistema de tele-operación para el control del brazo robótico comercial Kinova Jaco y una mano robótica antropomórfica impresa en 3D, a través de un guante que detecta los movimientos en la mano de un usuario (Figura 21). El guante cuenta con actuadores neumáticos que se activan de acuerdo con la presión medida desde la mano robótica, dando una sensación de agarre al usuario [30].

Figura 21. Brazo y mano robótica controlados por guante háptico.



Fuente: Intuitive control of a robotic arm and hand system with pneumatic haptic feedback.

En conclusión, en los últimos años ha incrementado el desarrollo de nuevas tecnologías para la construcción de manos robóticas, utilizadas como herramientas de rehabilitación o sustituir al ser humano en procesos industriales de alto riesgo. El control por electromiografía es uno de los más utilizados para los diseños de manos robóticas, pero no presentan exactitud al flexionar los dedos en un ángulo específico. Por el contrario, el uso de guantes sensoriales permite obtener el ángulo de flexión y como resultado tener un mejor agarre.

Capítulo III: Diseño y construcción de una mano robótica antropomórfica y un guante sensorial

1.6 Parámetros de diseño

El primer paso consiste en establecer las dimensiones de las diferentes partes de la mano que se construirá. Para esta actividad se tiene en cuenta la información reportada por Binvignat et al. [5], esta información surge de un estudio biométrico de 1196 manos, en el cual se tiene en cuenta las dimensiones de la mano y las falanges de los dedos. En la Tabla 1 se observan las longitudes promedio del estudio biométrico en el grupo masculino, que servirán para el diseño de la mano robótica, y el guante sensorial será diseñado para una mano de talla M (número 8).

Tabla 1. Promedio de medidas del estudio biométrico del grupo masculino.

Elemento	Medidas (mm)	
Pulgar	Falange distal:	32.25
	Falange proximal:	40.4
Índice	Falange distal:	24.45
	Falange media:	30.95
	Falange proximal:	48.95
Medio	Falange distal:	26.1
	Falange media:	35.35
	Falange proximal:	53.35
Anular	Falange distal:	22.86
	Falange media:	29.45
	Falange proximal:	46.15
Meñique	Falange distal:	19.82
	Falange media:	21.73
	Falange proximal:	34.36
Mano	Longitud de la mano:	185.25
	Ancho de la mano:	90.9
	Longitud de la palma:	105.7

Fuente: aspectos biométricos de la mano de individuos Chilenos.

1.7 Materiales

Para seleccionar los materiales de construcción se tuvieron en cuenta características como:

- Bajo costo

- Fácil acceso
- Facilidad de implementación
- Ligero

A continuación, se relacionan los materiales seleccionados:

- **Velostat:** Es un material conductor sensible a la presión, por lo que cambia su resistencia. La tela conductora funciona igual que el velostat, pero no se escoge debido a que esta tiende a arrugarse, lo cual hace que oscile el valor de resistencia entre medidas y el sensor sea más inestable.
- **Cinta de cobre y acetato.**
- **Arduino mega 2560 R3 compatible.**
- **Micro servomotor SG90 9G.**
- **Guante de caucho talla M.**
- **Resistencias, condensadores, TL084, cable dupont y baquela doble cara.**

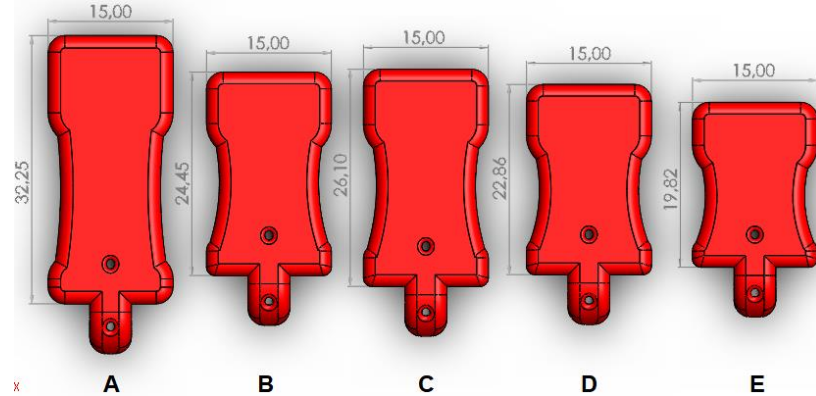
1.8 Modelado 3D de la mano antropomórfica en SolidWorks

Para el diseño de los huesos de la mano se usa el software SolidWorks, con la ventaja de poder exportar el modelo a un archivo compatible con impresoras 3D, facilitando la construcción de la mano robótica.

1.8.1 Diseño de la mano robótica en SolidWorks

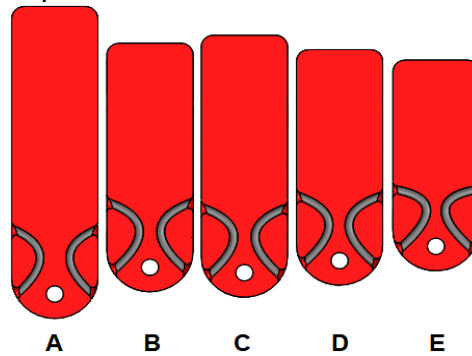
El modelado 3D consiste en el uso de un software para generar estructuras o modelos sólidos, a partir de estos modelos es posible evaluar el desempeño del prototipo final y realizar ajustes en caso de ser necesario. La Figura 22 muestra la longitud y el ancho (en mm) de las falanges distales del dedo pulgar (A), índice (B), medio (C), anular (D) y meñique (E). En la Figura 23 se pueden observar los ductos que atraviesan las falanges, a través de los cuales se sujetarán los hilos de nailon que generan los movimientos de flexión y extensión de la falange distal.

Figura 22. Medidas de las falanges distales en SolidWorks.



Fuente: Autor.

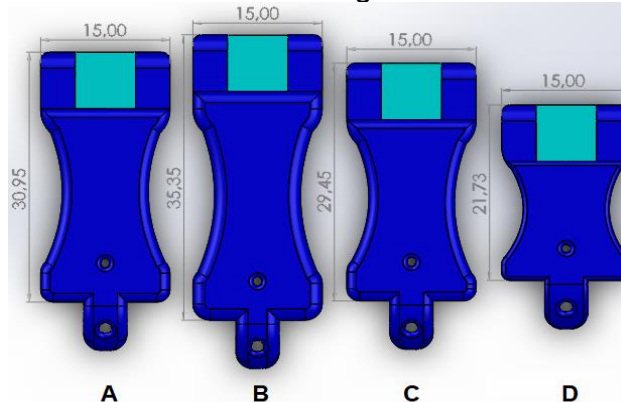
Figura 23. Ductos para los hilos de nailon en las falanges distales.



Fuente: Autor.

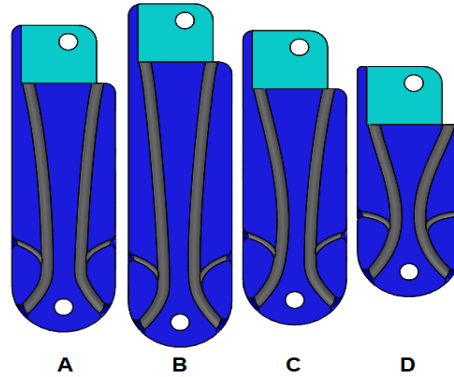
En la Figura 24 se pueden observar la longitud, y el ancho en milímetros de las falanges medias del dedo índice (A), medio (B), anular (C) y meñique (D). Estas medidas corresponden con las definidas en la Tabla 1. En la Figura 25 se observan los ductos que atraviesan las falanges, a través de los cuales se sujetarán los hilos de nailon que generan los movimientos de flexión y extensión de la falange distal.

Figura 24. Medidas de las falanges medias en SolidWorks.



Fuente: Autor.

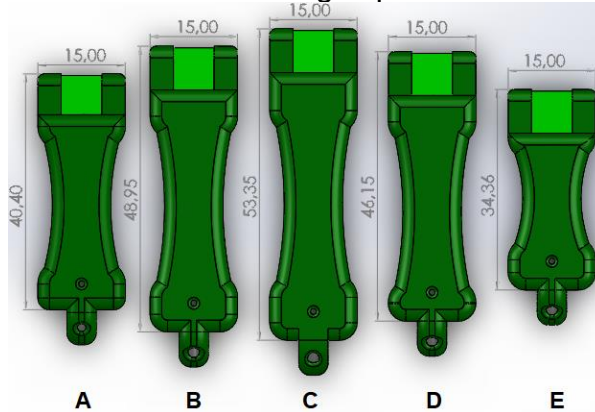
Figura 25. Ductos para los hilos de nailon en las falanges medias.



Fuente: Autor.

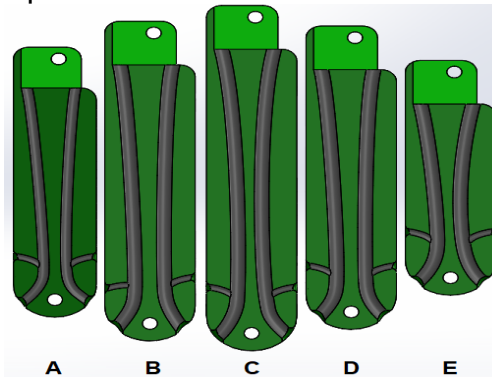
La Figura 26 muestra la longitud, de acuerdo con la Tabla 1, y el ancho en milímetros de las falanges proximales del dedo pulgar (A), índice (B), medio (C), anular (D) y meñique (E). En la Figura 27 se pueden observar los ductos que conducirán los hilos de nailon encargados de realizar los movimientos de flexión y extensión de la falange proximal, media y distal.

Figura 26. Medidas de las falanges proximales en SolidWorks.



Fuente: Autor.

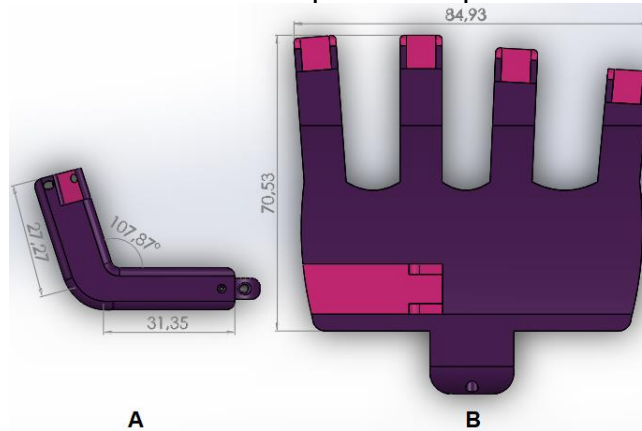
Figura 27. Ductos para los hilos de nailon en las falanges proximales.



Fuente: Autor.

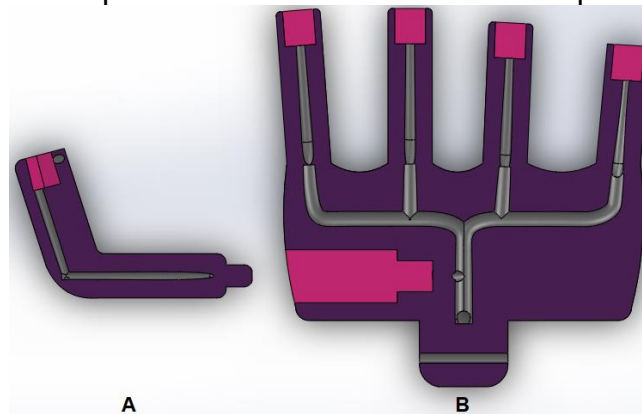
La Figura 28 muestra las dimensiones del metacarpiano del pulgar (A) y de la pieza que conforma la unión de los demás metacarpianos con el carpo, estas medidas están en milímetros. En la Figura 29 se pueden observar los ductos que conducirán los hilos de nailon encargados de realizar los movimientos de flexión y extensión para las falanges.

Figura 28. Medidas de los carpometacarpianos en SolidWorks.



Fuente: Autor.

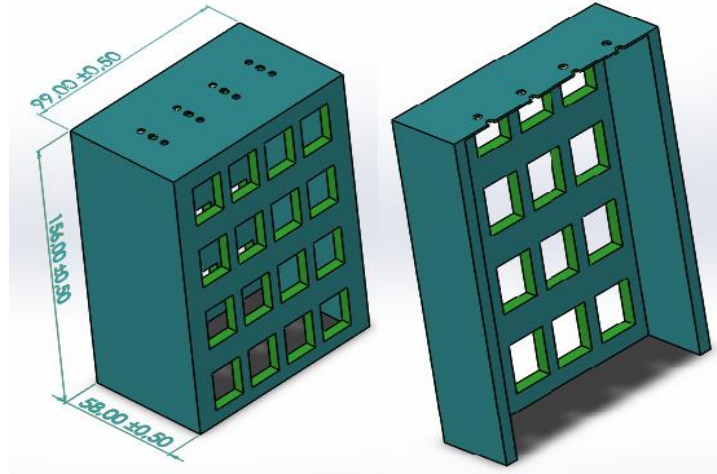
Figura 29. Ductos para los hilos de nailon en los carpometacarpianos.



Fuente: Autor.

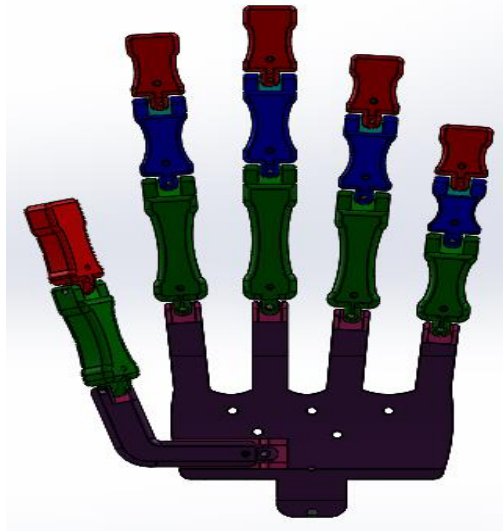
El antebrazo (Figura 30), es la pieza que contendrá a los actuadores de las falanges y sostendrá la estructura de la mano antropomórfica, finalmente, en la Figura 31 se puede ver la estructura ensamblada de la mano. En la Figura 32 se observa el diseño en SolidWorks de la polea, que se encargará del funcionamiento del tendón doble. De acuerdo al sentido de giro del servomotor se genera la flexión o extensión de la falange, encargándose de recoger un determinado hilo de nailon.

Figura 30. Dimensiones y vista interna del antebrazo.



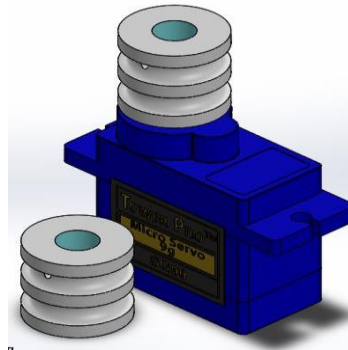
Fuente: Autor.

Figura 31. Ensamble en SolidWorks de la mano.



Fuente: Autor.

Figura 32. Diseño de polea doble para servomotor en SolidWorks.



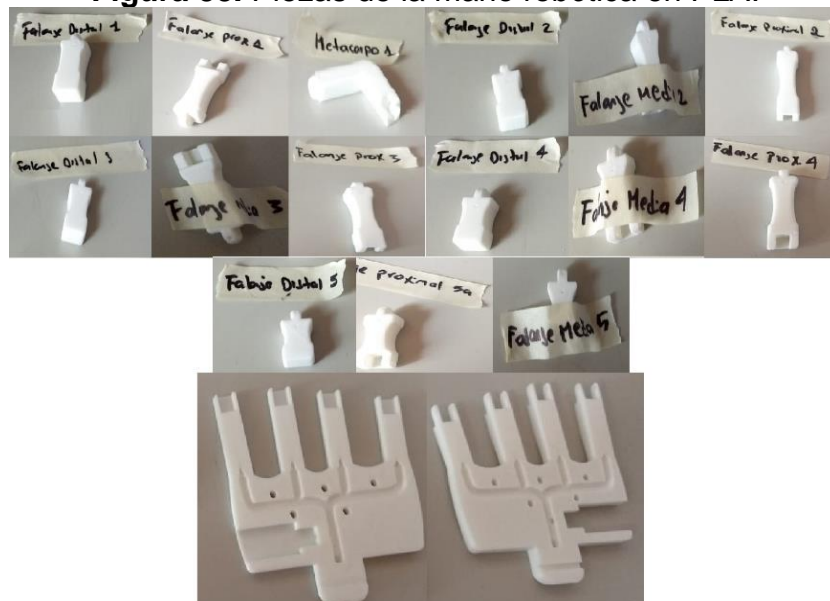
Fuente: Autor.

1.8.2 Ensamble de las piezas

Las piezas de la mano robótica antropomórfica diseñadas en SolidWorks, son impresas en PLA (Acido Poliláctico). El PLA es un material derivado del almidón de maíz, su temperatura de fusión es de 180 °C y cuenta con una diversa gama de colores. La impresión en PLA presenta alta resistencia a deformación y cuenta con una gran dureza, lo que lo hace adecuado para los productos que requieran dureza y no se encuentren expuestos a temperaturas altas [31].

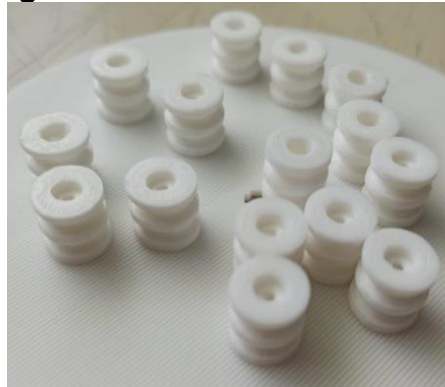
En la Figura 33 se pueden observar las piezas de la mano robótica impresas en 3D, la figura se compone de las falanges (distal, media y proximal) de los dedos, los carpos y metacarpianos. En la Figura 34 se observan las poleas que se unirán al eje de los servomotores.

Figura 33. Piezas de la mano robótica en PLA.



Fuente: Autor.

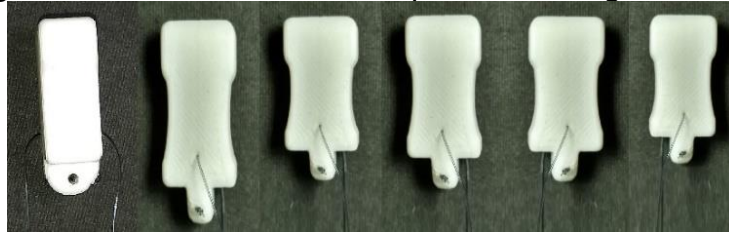
Figura 34. Poleas dobles en PLA.



Fuente: Autor.

Las piezas de la mano robótica cuentan con un ducto en la cara palmar y dorsal, por donde pasarán los hilos de nailon que actuarán como tendones de flexión y extensión de las falanges. Para las falanges distales, se introduce un hilo de nailon de 50 cm por cada ducto (Figura 35) y se hace un nudo en uno de sus extremos, para sujetar la falange distal al servomotor.

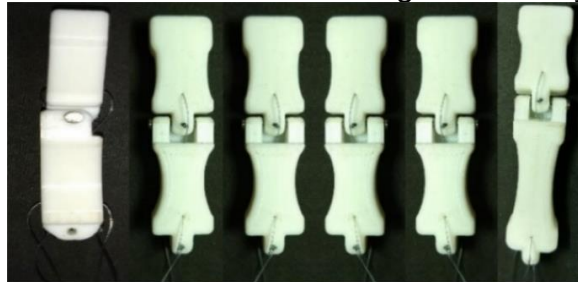
Figura 35. Tendones en nailon para las falanges distales.



Fuente: Autor.

Las falanges medias y proximales también cuentan con un ducto en su cara palmar y dorsal, por el cual se introducirán hilos de nailon de 50 cm que tendrán un nudo en la punta que se encuentra dentro de la muesca de las falanges. Para ensamblar las falanges distal y media (Figura 36), se introdujeron los hilos de nailon de la falange distal por los ductos correspondientes que atraviesan la falange media. Al ensamblar las falanges medias con las proximales (Figura 37), se repite el procedimiento anterior, los hilos de las falanges distal y media se introducen por los ductos correspondientes que atraviesan las falanges proximales.

Figura 36. Ensamble entre las falanges distales y medias.



Fuente: Autor.

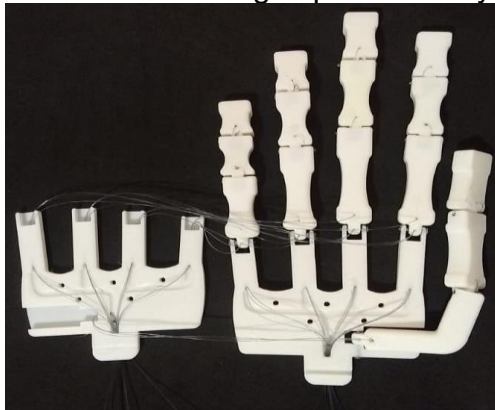
Figura 37. Ensamble entre las falanges medias y proximales.



Fuente: Autor.

Los hilos de nailon de las falanges se introducen en los ductos correspondientes de la pieza carpometacarpiana (Figura 38), una vez organizados los hilos se deben ajustar las falanges con un cilindro de 2 mm de diámetro y 11 mm de longitud. Las piezas carpometacarpianas se ajustan con cinco tornillos de 3 mm de diámetro y 10 mm de longitud. En la Figura 39 se observa la estructura de la mano robótica ensamblada.

Figura 38. Ensamble entre las falanges proximales y los metacarpianos.



Fuente: Autor.

Figura 39. Estructura ensamblada de la mano robótica.



Fuente: Autor.

Los servomotores que controlarán la mano robótica se ubicarán en la pieza llamada antebrazo (Figura 40). La polea doble cuenta con un orificio de 1 mm de diámetro en cada canal, por el cual se introducen los hilos de flexión y extensión de la falange que se desea controlar. Los hilos de nailon se ajustan a la polea, de tal manera que al girar en un sentido se flexione o extienda la falange sin generar tensión al hilo de movimiento contrario. Al realizar el montaje de la estructura se finaliza el ensamble de la mano robótica antropomórfica, como se observa en la Figura 41.

Figura 40. Ensamble y acondicionamiento de la mano robótica y los servomotores.



Fuente: Autor.

Figura 41. Mano robótica antropomórfica.



Fuente: Autor.

1.9 Construcción del guante sensorial

Para construcción de un guante sensorial ligero, es adecuado el uso de sensores de flexión, en el mercado estos sensores tienen un costo elevado por lo que se decide usar variantes como el velostat. Este es un material muy conocido en el mercado por sus características en la construcción de sensores resistivos de presión y flexión, además de su bajo costo.

1.9.1 Construcción de los sensores de flexión

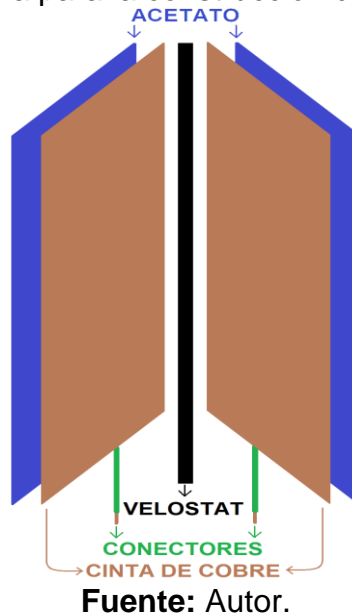
En la construcción de los sensores se tienen en cuenta las longitudes de cada dedo, las cuales determinan la longitud del velostat para cada sensor, como se evidencia en la Tabla 2. Por cada medida establecida, se recorta 1 lámina de velostat y un par de cintas de cobre (Figura 43 A) de tal manera que se realice la construcción del sensor de acuerdo al esquema de la Figura 42.

Tabla 2. Medidas de velostat escogidas.

	Medida L*A
Pulgar	7 cm * 1 cm
Índice	12 cm * 1 cm
Medio	13 cm * 1 cm
Anular	12 cm * 1 cm
Meñique	10 cm * 1 cm

Fuente: Autor.

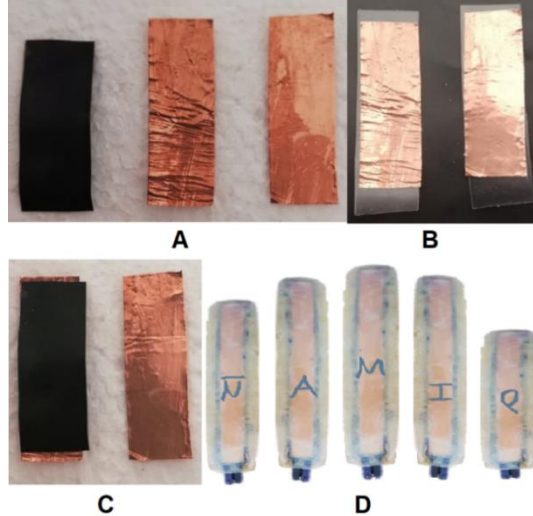
Figura 42. Esquema para la construcción del sensor de flexión.



Fuente: Autor.

Para construir los sensores se cortan las cinco láminas de velostat, acetato y cinta de cobre. Las láminas de acetato tienen una longitud de 1 cm más que el velostat y 1.8 cm de ancho, la cinta de cobre tiene 1 cm menos de longitud que el velostat, con 0.7 cm de ancho. Las cintas de cobre se adhieren a las láminas de acetato (Figura 43 B) y se sueldan los conectores, el ensamble de los sensores se realiza de acuerdo a la Figura 42. Inicialmente se ubica el velostat en la mitad de las cintas de cobre adheridas en el acetato y se sella con pegante sintético a base de caucho. Este procedimiento se repite para los cinco sensores como se observa en la Figura 43 D.

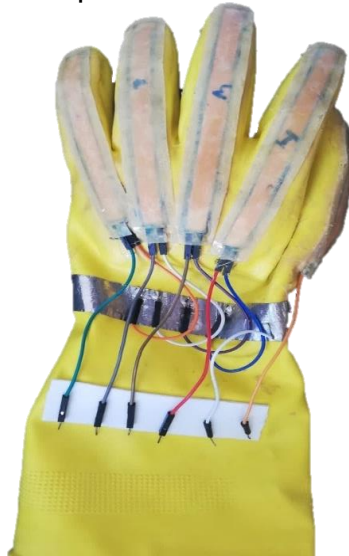
Figura 43. Construcción de los sensores.



Fuente: Autor.

En el guante se identifican la posición de los dedos, en las cuales se ubican los sensores, de forma que estos queden centrados en las articulaciones al realizar los movimientos. Los sensores son fijados al guante con el pegante sintético a base de caucho como se observa en la Figura 44.

Figura 44. Acople de los sensores al guante.



Fuente: Autor.

Para identificar el rango de resistencia en el cual trabajan los sensores construidos, se coloca el guante en la mano izquierda y se generan movimientos de flexión y extensión. Los datos de la Tabla 3, hacen referencia a las resistencias máximas, mínimas y tiempos de retardo al realizar movimientos de flexión y extensión en cada sensor.

Los sensores tienen un valor resistivo superior a los 50 k Ω cuando se encuentran totalmente flexionados, este disminuye a un valor resistivo que oscila entre 6 k Ω y 5 k Ω al aplicar un grado mínimo de flexión sobre los sensores. Cuando los sensores se flexionan completamente, el valor resistivo mínimo oscila entre 1 k Ω y 900 Ω . Los retardos anteriormente mencionados, fueron obtenidos a partir del tiempo que tarda cada sensor para estabilizarse en un valor resistivo ideal al rango de trabajo, realizando movimientos de flexión y extensión en los dedos.

Tabla 3. Valores de resistencia medida en los sensores.

	Resistencia extendido	Resistencia flexionado	Retardo al flexionar	Retardo al extender
Pulgar	5 k Ω	1 k Ω	0.21 s	0.27 s
Índice	5 k Ω	1 k Ω	0.23 s	0.26 s
Medio	5 k Ω	1 k Ω	0.26 s	0.22 s
Anular	5 k Ω	1 k Ω	0.24 s	0.25 s
Meñique	5 k Ω	1 k Ω	0.22 s	0.27 s

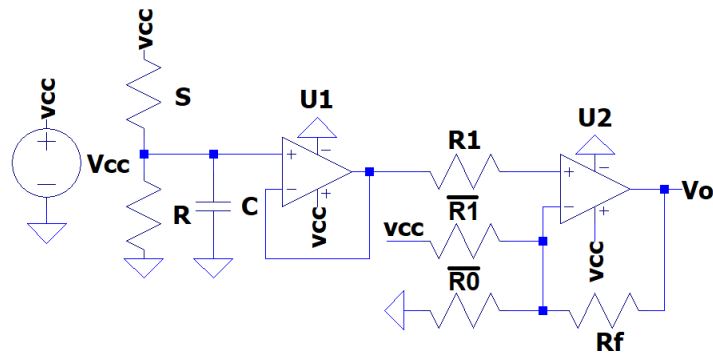
Fuente: Autor.

1.9.2 Circuito de acondicionamiento

El circuito para el acople de los sensores (Figura 45) consiste inicialmente de un divisor de tensión, conformado por el sensor (S) y un resistor (R) con valor comercial cercano al valor máximo de resistencia del sensor. Se ubica un condensador (C), en paralelo con la resistencia comercial de tal manera que funcione como filtro pasa bajas, eliminando las frecuencias altas y amortiguando la variación generada por el sensor. Se hace uso de un seguidor de tensión para acoplar las impedancias del divisor de tensión y un circuito span y cero, este último se diseña para garantizar que la señal que ingresará a la tarjeta de adquisición (V_o) se encuentre entre 0V y 5 V.

Sin el uso del circuito span y cero, la salida del divisor de tensión se encuentra entre 2.6 V y 4.4 V, dependiendo de la variación en la resistencia del sensor (valor máximo a mínimo). El circuito integrado que se utilizará, para construir el seguidor tensión y el span y cero, es el TL084 que cuenta con 4 amplificadores operacionales y tiene un ancho de banda de 3 MHz, dando una óptima respuesta a altas frecuencias.

Figura 45. Circuito de acondicionamiento.



Fuente: Autor.

La Ecuación (1) corresponde al cálculo del condensador que actuará como filtro pasa bajas en el divisor de tensión, al remplazar los valores es posible calcular los condensadores correspondientes a cada sensor como se muestra en la Tabla 4. Para hallar la frecuencia del filtro pasa-bajas se utiliza la Ecuación (2) que tiene como variables, la resistencia del divisor y el condensador.

$$\tau = 5 * R * C \rightarrow C = \frac{\tau}{5 * R} \quad (1)$$

τ = retardo del sensor (S).

R = valor de resistencia del divisor de tensión (Ω).

C = valor de condensador (F).

$$f = \frac{1}{2\pi * R * C} \quad (2)$$

f = frecuencia en (Hz).

Tabla 4. Condensadores y frecuencias calculadas.

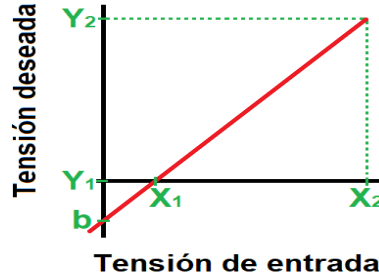
	Resistencia del divisor	Condensador calculado	Condensador comercial	Frecuencia
Pulgar	5.1 k Ω	9.4 μ F	10 uF	3.12 Hz
Índice	5.1 k Ω	9.6 μ F	10 uF	3.12 Hz
Medio	5.1 k Ω	9.4 μ F	10 uF	3.12 Hz
Anular	5.1 k Ω	9.6 μ F	10 uF	3.12 Hz
Meñique	5.1 k Ω	9.6 μ F	10 uF	3.12 Hz

Fuente: Autor.

Para el diseño del circuito span y cero se desarrolla el siguiente procedimiento:

Teniendo en cuenta los valores de tensión en la entrada y los deseados en salida, se traza una recta (como se observa en la Figura 46).

Figura 46. Parámetros de la recta.



Fuente: Autor.

$$m = \frac{\Delta y}{\Delta x} \quad (3)$$

m = pendiente de la recta.

Δy = rango de tensión deseado en la salida del span y cero (V).

Δx = rango de tensión obtenido en la entrada del span y cero (V).

$$b = y_1 - mx_1 \quad (4)$$

b = coeficiente de posición (punto de corte con el eje y).

y_1 = nivel de tensión de salida mínimo.

x_1 = nivel de tensión de entrada mínimo.

A partir de (3) y (4) se conforma la ecuación de la recta (Ecuación 5), finalmente, esta ecuación es normalizada con el valor de tensión de alimentación. La ecuación de recta resultante para el diseño del span y cero se muestra en (7).

$$y = mx + b \rightarrow V_o = mV_i + b \quad (5)$$

V_o = tensión de salida

V_i = tensión de entrada

$$V_b = 5 V \quad (6)$$

V_b = tensión de alimentación

$$V_o = mV_i + \frac{b}{5V}V_b \quad (7)$$

$$\begin{matrix} \downarrow & \downarrow \\ a_1 & b_1 \end{matrix}$$

Para implementar la solución a la ecuación de recta obtenida se utiliza el procedimiento propuesto en [32].

$$A = \sum_{i=1}^m a_i = a_1 ; B = \sum_{j=1}^n b_j = b_1 \quad (8)$$

$$A_T = A - B - 1 \quad (9)$$

$$A_T > 0 \rightarrow R_0 = \infty ; A_T < 0 \rightarrow \overline{R_0} = \infty \quad (10)$$

$$k = \sup \{A, (B + 1), |A_T|\} \quad (11)$$

De la ecuación (12) a la (14) se hallan los valores de las resistencias del span y cero, se selecciona $Z_i = 3k\Omega$. En la Tabla 5, se encuentran los valores de las resistencias del span y cero calculados para todos los sensores.

$$R_f \geq kZ_i \quad (12)$$

$$\overline{R_0} = \frac{R_f}{A_T} ; R_0 = \frac{R_f}{-A_T} \quad (13)$$

$$\overline{R_1} = \frac{R_f}{b_1} ; R_1 = \frac{R_f}{a_1} \quad (14)$$

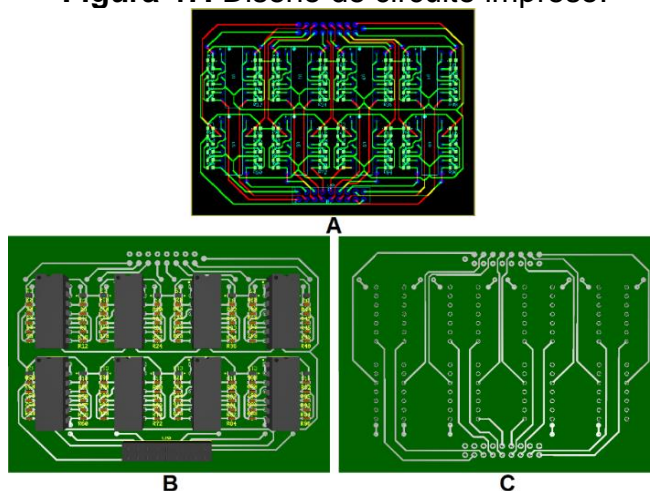
Tabla 5. Valores de las resistencias en el Span y cero.

	R_F	R_0	$\overline{R_0}$	$\overline{R_1}$	R_1
Pulgar	6.9 k Ω → 7.5 kΩ	∞	49.62 k Ω → 51 kΩ	5.9k Ω → 7.5 kΩ	3 k Ω → 3 kΩ
Índice	6.9 k Ω → 7.5 kΩ	∞	49.62 k Ω → 51 kΩ	5.9k Ω → 7.5 kΩ	3 k Ω → 3 kΩ
Medio	6.9 k Ω → 7.5 kΩ	∞	49.62 k Ω → 51 kΩ	5.9k Ω → 7.5 kΩ	3 k Ω → 3 kΩ
Anular	6.9 k Ω → 7.5 kΩ	∞	49.62 k Ω → 51 kΩ	5.9k Ω → 7.5 kΩ	3 k Ω → 3 kΩ
Meñique	6.9 k Ω → 7.5 kΩ	∞	49.62 k Ω → 51 kΩ	5.9k Ω → 7.5 kΩ	3 k Ω → 3 kΩ

Fuente: Autor.

Para el desarrollo del circuito impreso de acondicionamiento para los sensores se utiliza el software Multisim [33]. En la Figura 47 A se muestra el diseño del circuito conformado por dos capas, también se puede observar una visualización 3D de las dos caras del circuito (Figura 47 B y Figura 47 C).

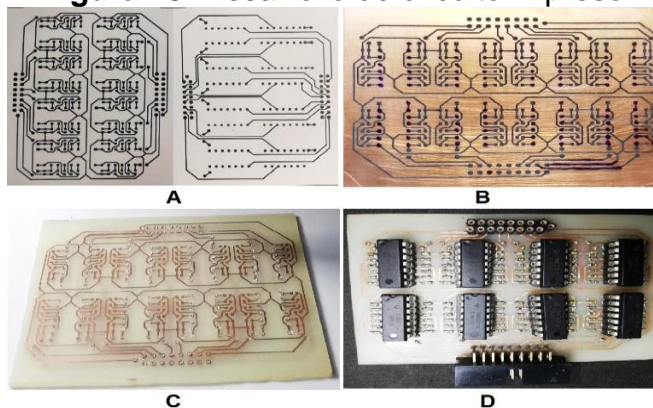
Figura 47. Diseño de circuito impreso.



Fuente: Autor.

El diseño del circuito anteriormente mencionado se imprime en papel termotransferible y se transfieren en las caras de la baquela (Figura 48 A y Figura 48 B). Posteriormente la baquela se sumerge en ácido férrico, para eliminar el exceso de cobre como se puede observar en la Figura 48 C. Una vez realizadas las perforaciones correspondientes en la baquela, se sueldan los componentes (Figura 48 D), los condensadores y las resistencias tienen un encapsulado SMD 0603.

Figura 48. Desarrollo de circuito impreso.

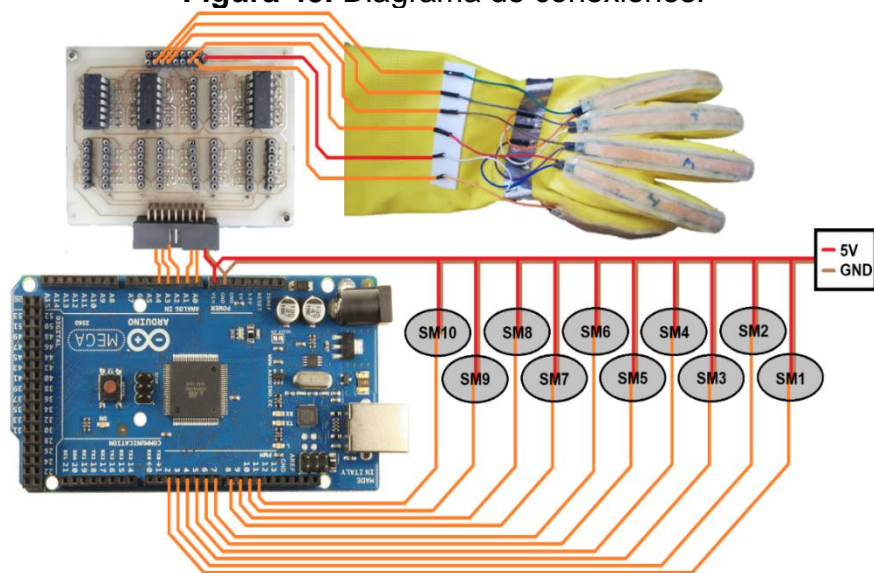


Fuente: Autor.

1.10 Conexión del sistema

En la Figura 49 se puede observar el diagrama de conexiones del guante sensorial, el circuito de acondicionamiento, la tarjeta de adquisición de datos y los servomotores. Los sensores del guante se conectan a la entrada del circuito de acondicionamiento y las salidas se conectan a las entradas análogas del Arduino, por otro lado, se usan los pines digitales del 2 al 11 para controlar la posición de los servomotores.

Figura 49. Diagrama de conexiones.



Fuente: Autor.

Como se puede evidencia en la Tabla 6, el costo para para el desarrollo de la mano robótica es de \$330.700, lo cual es económico en relación a los manipuladores comercial. De igual manera, el costo para desarrollar el guante sensorial es bajo, sien un total de \$82.400.

Tabla 6. Precios de los materiales.

Elemento	Material	Precio
Mano robótica	Impresión 3D de las piezas de la mano y las poleas	\$ 250.000
	10 servomotores SG90	\$ 76.200
	Nailon (90 m)	\$ 4.500
Guante sensorial	Guantes de látex	\$ 3.500
	Lamina de velostat (28*28 cm)	\$ 23.800
	Cinta de cobre (25 m)	\$ 31.200
	Lamina de acetato (22*28 cm)	\$ 500
	Paquete de 40 cables dupont macho-macho (30 cm)	\$ 9.100
	Baquela doble cara (20*30 cm)	\$ 18.100
	Componentes electrónicos	\$ 20.000
Control	Arduino Mega	\$ 43.600
		Total
		\$ 480.500

Fuente: Autor.

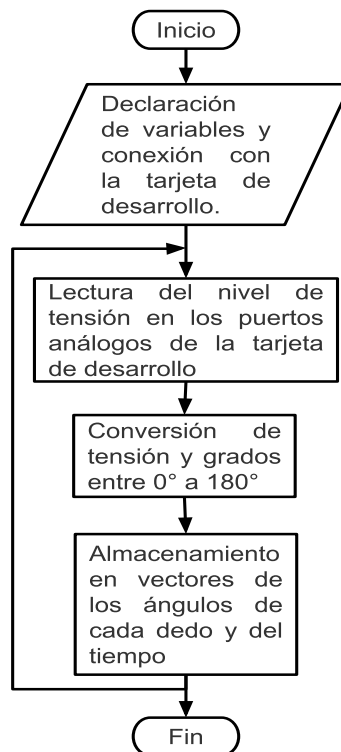
Capítulo IV: Desarrollo del algoritmo de control para la mano robótica

1.11 Identificación del sistema

Para diseñar el control PID se debe conocer la respuesta del sistema ante una entrada, de tal manera que se obtenga la función de transferencia que representa dicho sistema. La función de transferencia se calculará con la herramienta de MATLAB system identification, con la cual se puede construir el modelo matemático del sistema a partir de señales de entrada y salida [34].

Se realiza un programa en MATLAB (Figura 50), para obtener la tensión en los dedos del guante (señal de entrada) y el ángulo de respuesta en los servomotores (señal de salida) al realizar movimientos. Los datos anteriormente mencionados, se almacenan en dos vectores para ser exportados a system identification, por otro lado, el tiempo de muestreo se calcula con el promedio de retardo entre lecturas dando como resultado 0.0724 s.

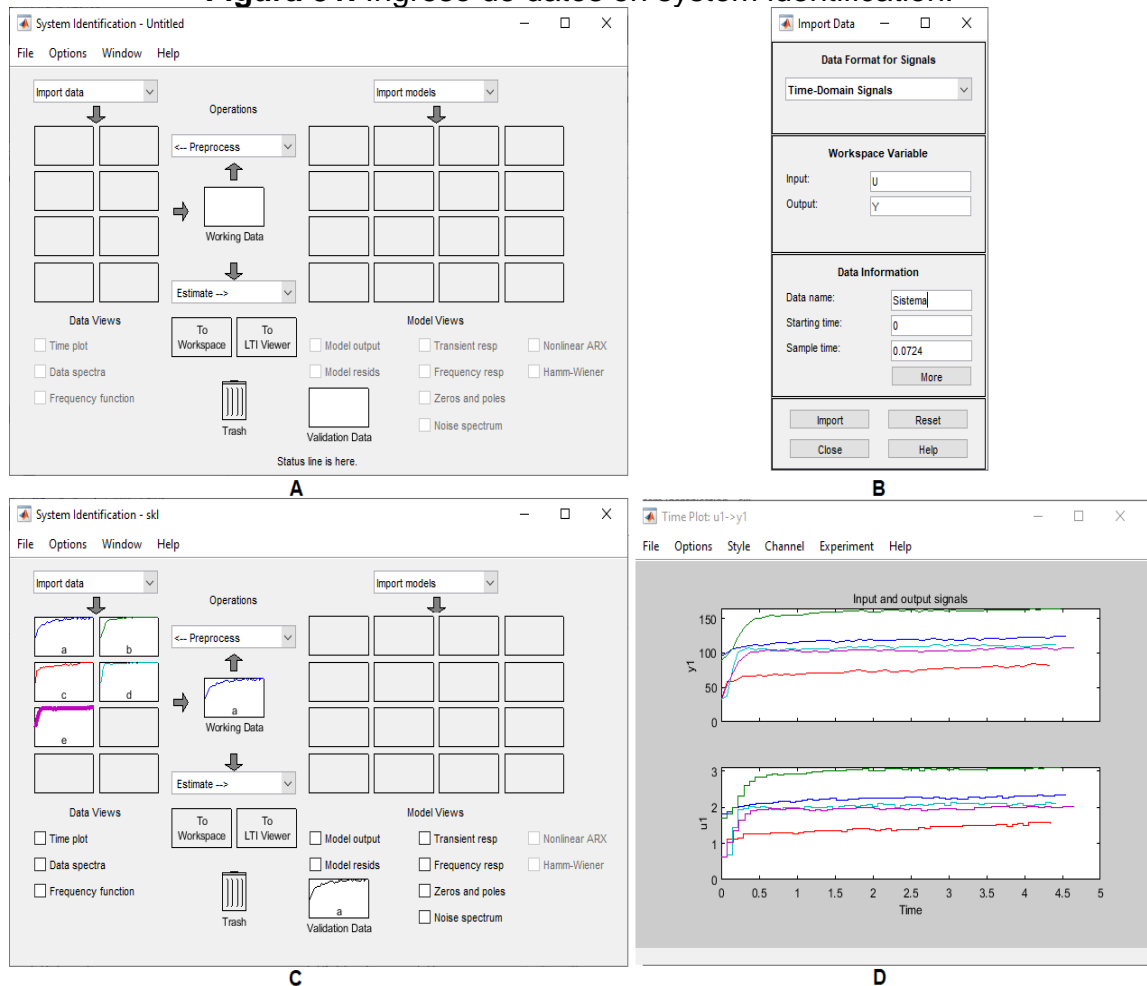
Figura 50. Diagrama de flujo para la obtención de datos.



Fuente: Autor.

En la ventana Command Window de MATLAB se ingresa el comando `systemIdentification`, con el cual se abrirá la ventana de la Figura 51 A. Para ingresar los datos de entrada, salida y tiempo de muestreo, se selecciona la opción `Time domain data` (Figura 51 B) ubicada en el menú desplegable `Import data`, este procedimiento se repite para los 5 dedos. En la Figura 51 D, se muestran las gráficas de las señales en las entradas (U) y salidas (Y).

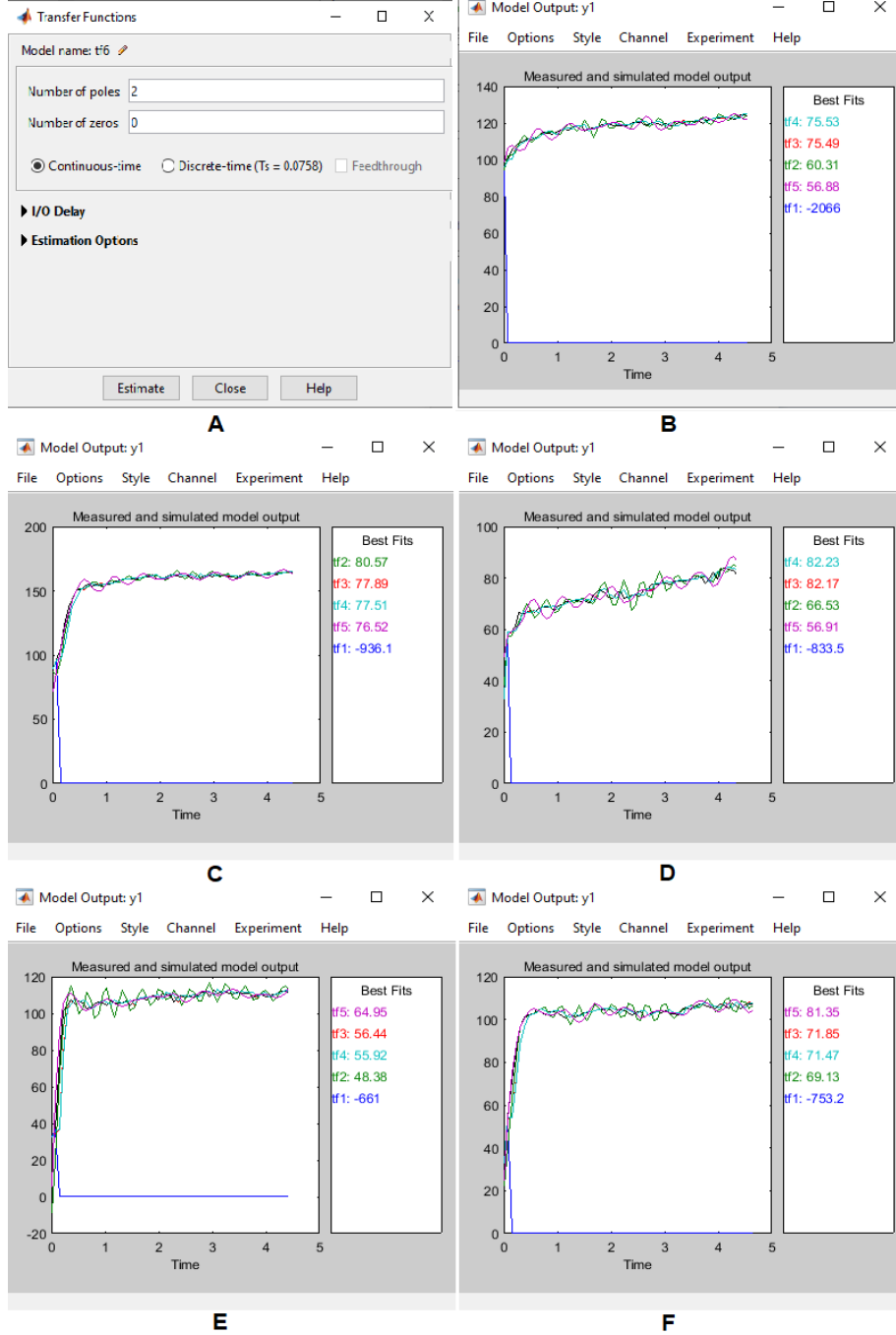
Figura 51. Ingreso de datos en system identification.



Fuente: Autor.

Para calcular el modelo matemático, se debe ubicar el modelo ingresado en los campos de `Working data` y `Validation data` (Figura 51 C). A continuación, se selecciona la opción `Transfer Function Models`, ubicada en el menú desplegable `Estimate`, que abrirá la ventana de la Figura 52 A, en la cual se ingresa el número de polos y ceros deseados. En la Figura 52, se muestra el porcentaje de similitud de los modelos matemáticos calculados para los cinco dedos en el pulgar (Figura 52 B), índice (Figura 52 C), medio (Figura 52 D), anular (Figura 52 E) y meñique (Figura 52 F).

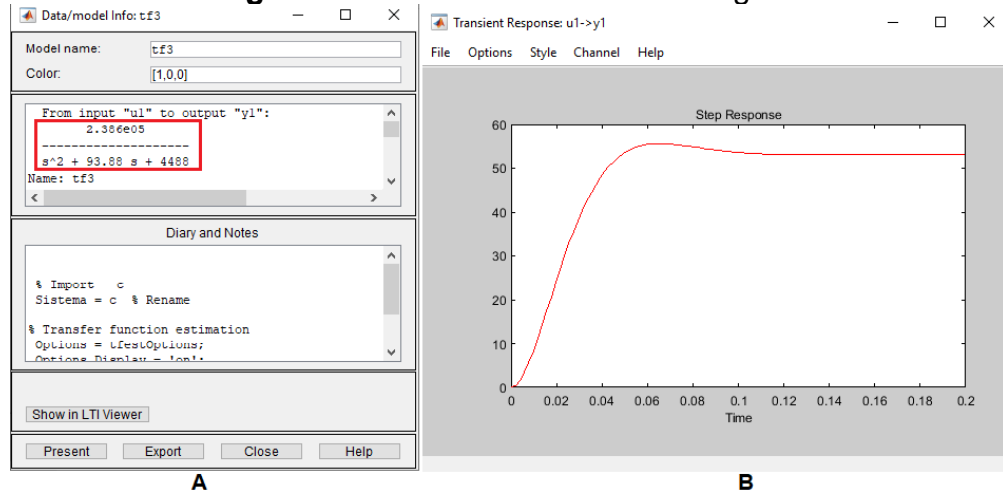
Figura 52. Modelos matemáticos calculados.



Fuente: Autor.

El modelo matemático con más similitud en los dedos es tf3 (Figura 53 A), por lo tanto, se escoge esta función de transferencia (Ecuación 15) para representar a cada dedo. La respuesta a una entrada escalón (Figura 53 B) del sistema tiene un sobre impulso de 4.5% y un tiempo de establecimiento de 0.1 s.

Figura 53. Modelo matemático escogido.



Fuente: Autor.

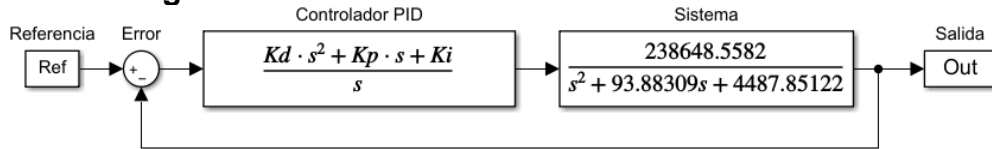
$$G(s) = \frac{238648.5582}{s^2 + 93.88309s + 4487.85122} \quad (15)$$

$G(s)$ = modelo matemático del sistema.

1.12 Diseño del control PID

El controlador PID se diseña con el método de asignación de polos, el cual consiste en hallar un modelo matemático, que represente el comportamiento deseado en el sistema. El diagrama de bloques en la Figura 54, representa la respuesta del sistema con control PID, este se reduce mediante el álgebra de bloques a la Ecuación (17).

Figura 54. Sistema de control PID con lazo cerrado.



Fuente: Autor.

$$G_{LC(s)} = \frac{C(s)G(s)}{1+C(s)G(s)} \quad (16)$$

$C(s)$ = modelo matemático del controlador.

$$G_{LC(s)} = \frac{238648.5582K_d s^2 + 238648.5582K_p s + 238648.5582K_i}{s^3 + (93.88309 + 238648.5582K_d)s^2 + (4487.85122 + 238648.5582K_p)s + 238648.5582K_i} \quad (17)$$

k_p = constante proporcional.

k_i = constante integral.

k_d = constante derivativa.

La función de transferencia deseada de la Ecuación (21), se calculó con un sobre impulso (M_p) de 1% y un tiempo de establecimiento (t_s) de 0.1 s, reemplazando estos valores en las ecuaciones (18), (19) y (20). Para hallar finalmente las constantes del controlador PID se deben igualar los denominadores de $G_{d(s)}$ y $G_{LC(s)}$, sin embargo, el orden de la ecuación característica de $G_{LC(s)}$ es superior al orden de $G_{d(s)}$. Se debe añadir a $G_{d(s)}$ un polo (polo remanente), por lo menos, diez veces mayor que la parte real del polo dominante para no afectar la respuesta del sistema, como se puede ver en la Ecuación (22).

$$\xi = \sqrt{\frac{\ln(M_p)^2}{\ln(M_p)^2 + \pi^2}} \quad (18)$$

$$\omega_n = \frac{4}{\xi t_s} \quad (19)$$

$$G_{d(s)} = \frac{\omega_n^2}{s^2 + 2\xi\omega_n s + \omega_n^2} \quad (20)$$

$G_{d(s)}$ = modelo matemático deseado.

$$G_{d(s)} = \frac{2345}{s^2 + 80s + 2345} \quad (21)$$

$$G_{d(s)} = \frac{2345}{s^2 + 80s + 2345} * \frac{400}{s + 400} = \frac{938000}{s^3 + 480s^2 + 34345s + 938000} \quad (22)$$

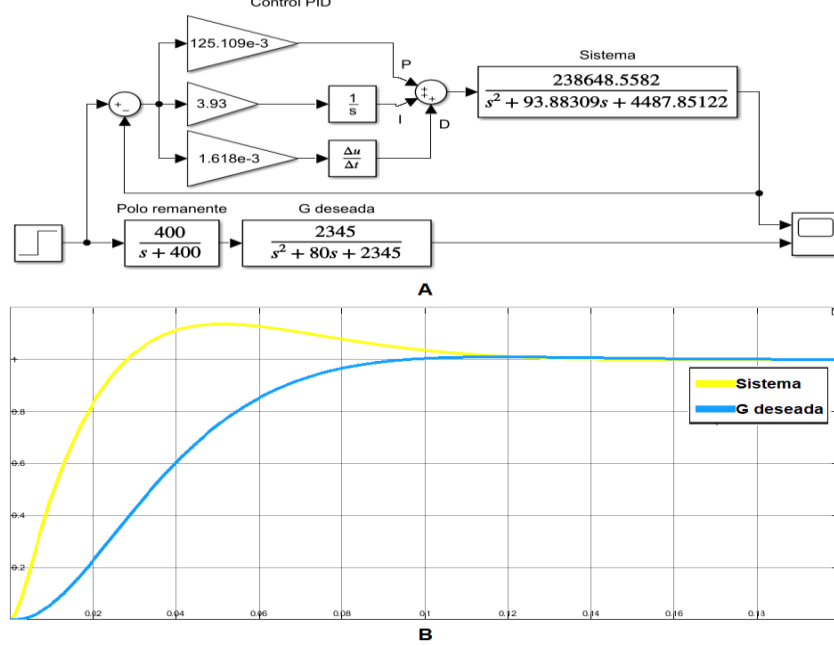
Una vez añadido el polo en $G_{d(s)}$ se obtiene el mismo orden que $G_{PID(s)}$ y se igualan los denominadores de las dos funciones, las constantes k_d , k_p y k_i son despejadas en las ecuaciones (23), (24) y (25) respectivamente. Mediante el uso de Simulink, se construyen los diagramas del sistema controlado y el deseado (Figura 55 A), además, se muestra las respuestas a una entrada escalón en la Figura 55 B.

$$k_d = \frac{418 - 93.88309}{238648.5582} = 1.618 * 10^{-3} \quad (23)$$

$$k_p = \frac{34345 - 4487.85122}{238648.5582} = 125.109 * 10^{-3} \quad (24)$$

$$k_i = \frac{938000}{238648.5582} = 3.93 \quad (25)$$

Figura 55. Sistema controlado y deseado.



Fuente: Autor.

Mediante la transformación bilineal y la transformada z inversa se halla el modelo matemático de la Ecuación (34), el cual representa el control PID en tiempo discreto aplicado al sistema. Esta ecuación se aplicará en el algoritmo de la tarjeta de desarrollo Arduino para calcular la acción de control, y así, realizar los movimientos de la mano robótica de acuerdo al nivel de tensión en los sensores.

$$s = \left(\frac{2(1-z^{-1})}{T(1+z^{-1})} \right) \quad (26)$$

$$\frac{k_d s^2 + k_p s + k_i}{s} = k_d s + k_p + \frac{k_i}{s} \quad (27)$$

$$k_p = \frac{U(z)}{E(z)} \rightarrow U(z) = k_p E(z) \quad (28)$$

$$u_{(k)} = k_p e_{(k)} \quad (29)$$

$$\frac{k_i T(1+z^{-1})}{2(1-z^{-1})} = \frac{U(z)}{E(z)} \rightarrow 2U(z) - 2z^{-1}U(z) = k_i T E(z) + k_i T z^{-1} E(z) \quad (30)$$

$$u_{(k)} = \frac{k_i T}{2} (e_{(k)} + e_{(k-1)}) + u_{(k-1)} \quad (31)$$

$$\frac{k_d 2(1-z^{-1})}{T(1+z^{-1})} = \frac{U(z)}{E(z)} \rightarrow U(z) + z^{-1}U(z) = \frac{2k_d E(z)}{T} - \frac{2k_d z^{-1} E(z)}{T} \quad (32)$$

$$u_{(k)} = \frac{2k_d}{T} (e_{(k)} - e_{(k-1)}) - u_{(k-1)} \quad (33)$$

$$u_{(k)} = k_p e_{(k)} + \frac{k_i T}{2} (e_{(k)} + e_{(k-1)}) + u_{(k-1)} + \frac{2k_d}{T} (e_{(k)} - e_{(k-1)}) - u_{(k-1)} \quad (34)$$

$u_{(k)}$ = acción de control, muestra actual.

$u_{(k-1)}$ = acción de control, muestra anterior.

$e_{(k)}$ = error, muestra actual.

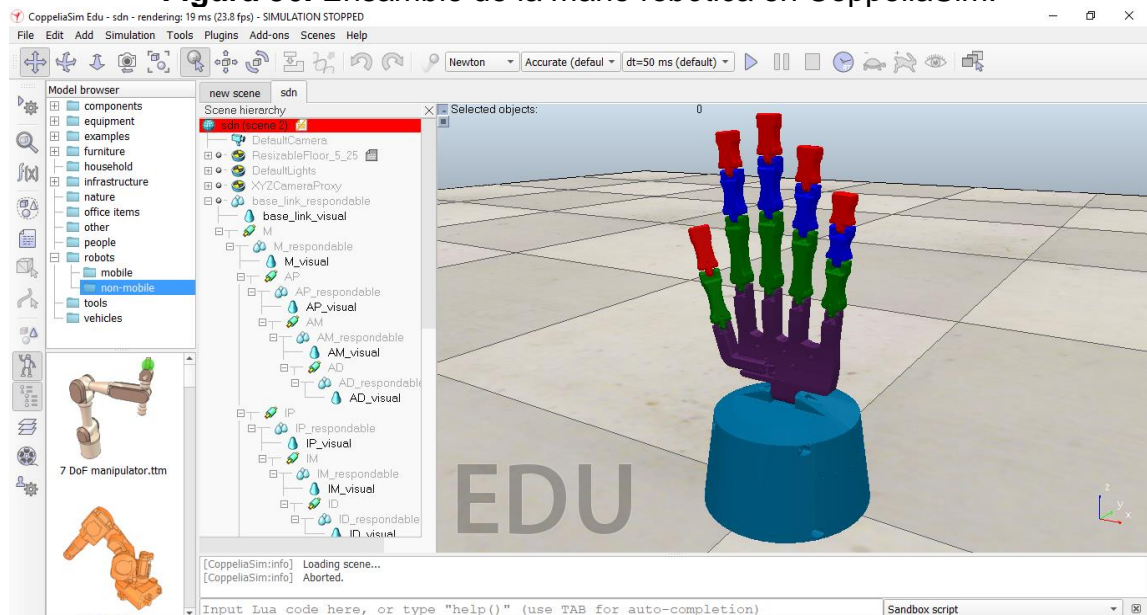
$e_{(k-1)}$ = error, muestra anterior.

T = periodo de muestro.

1.13 Desarrollo del algoritmo

El diagrama de flujo en la Figura 58, describe el algoritmo desarrollado en MATLAB para controlar por medio de un guante sensorial, el prototipo de mano robótica antropomorfa y los movimientos en una simulación de la mano diseñada. Inicialmente, se debe exportar el ensamble de la mano robótica en SolidWorks como un archivo URDF. El software usado para abrir y simular el archivo es CoppeliaSim (Figura 56), este es un entorno de desarrollo integrado en el cual se pueden realizar diferentes tipos de control y simulaciones en robótica [35].

Figura 56. Ensamble de la mano robótica en CoppeliaSim.



Fuente: Autor.

Para permitir la comunicación entre MATLAB y CoppeliaSim por medio del puerto 19999, se debe añadir el comando `simRemoteApi.start(19999)` en la función `sysCall_init()`, ubicada en el Main script (Figura 57). Para hacer efectiva la comunicación se debe iniciar primero la simulación en CoppeliaSim y después el algoritmo en MATLAB.

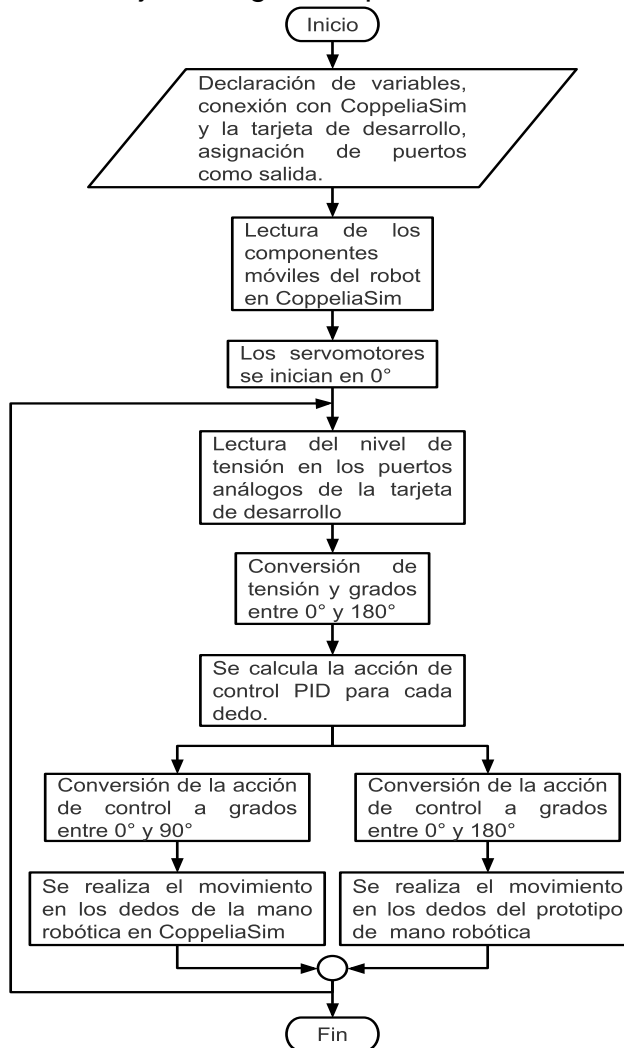
Figura 57. Función de inicialización en CoppeliaSim.

```
10 function sysCall_init()  
11     simRemoteApi.start(19999)  
12     sim.handleSimulationStart()  
13     sim.openModule(sim.handle_all)  
14     sim.handleGraph(sim.handle_all_except_explicit,0)  
15 end  
16
```

Fuente: Autor.

El algoritmo comienza con la inicialización de las variables de control y la comunicación con CoppeliaSim y Arduino, después, se leen los niveles de tensión en los sensores del guante y se determina el ángulo de referencia para los servomotores. Finalmente se calcula el ángulo de desplazamiento de los servomotores y las falanges en la simulación de CoppeliaSim, de acuerdo a la acción de control.

Figura 58. Diagrama de flujo del algoritmo para el control de una mano robótica.



Fuente: Autor.

Capítulo V: Funcionamiento y desempeño en las pruebas de agarre

1.14 Pruebas de agarre

Inicial mente se realizan las pruebas de control en los movimientos independientes del pulgar (Figura 59 A), índice (Figura 59 B), medio (Figura 59 C), anular (Figura 59 D) y meñique (Figura 59 E). También, la combinación de movimientos en los dedos anular y meñique (Figura 59 F), índice y medio (Figura 59 G), pulgar y meñique (Figura 59 H), y finalmente los últimos cuatro dedos excepto el pulgar (Figura 59 I). Como se puede observar en la Figura 59, los dedos de la mano robótica en la simulación de CoppeliaSim se mueven al igual que los del prototipo, de acuerdo con los movimientos realizados por el guante sensorial.

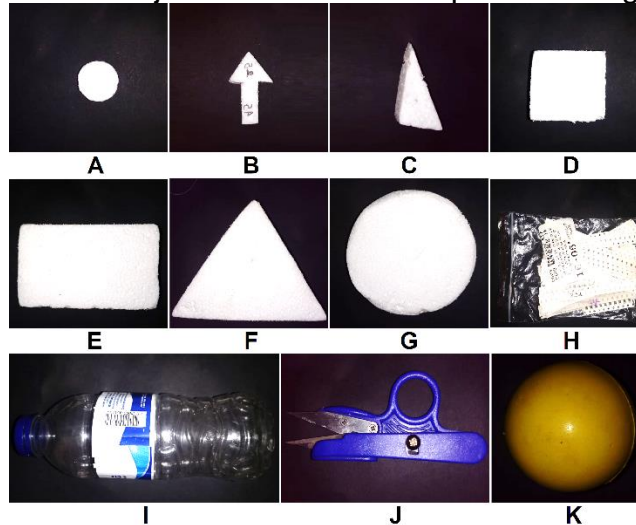
Figura 59. Flexión de los dedos.



Fuente: Autor.

Para realizar las pruebas de control en el prototipo de mano robótica antropomorfa, se usaron algunos objetos cotidianos y diferentes piezas (Figura 60) hechas con recortes de poliestireno expandido de diferentes formas. Las dimensiones de los objetos se muestran en la Tabla 7.

Figura 60. Objetos utilizados en la prueba de agarre.



Fuente: Autor.

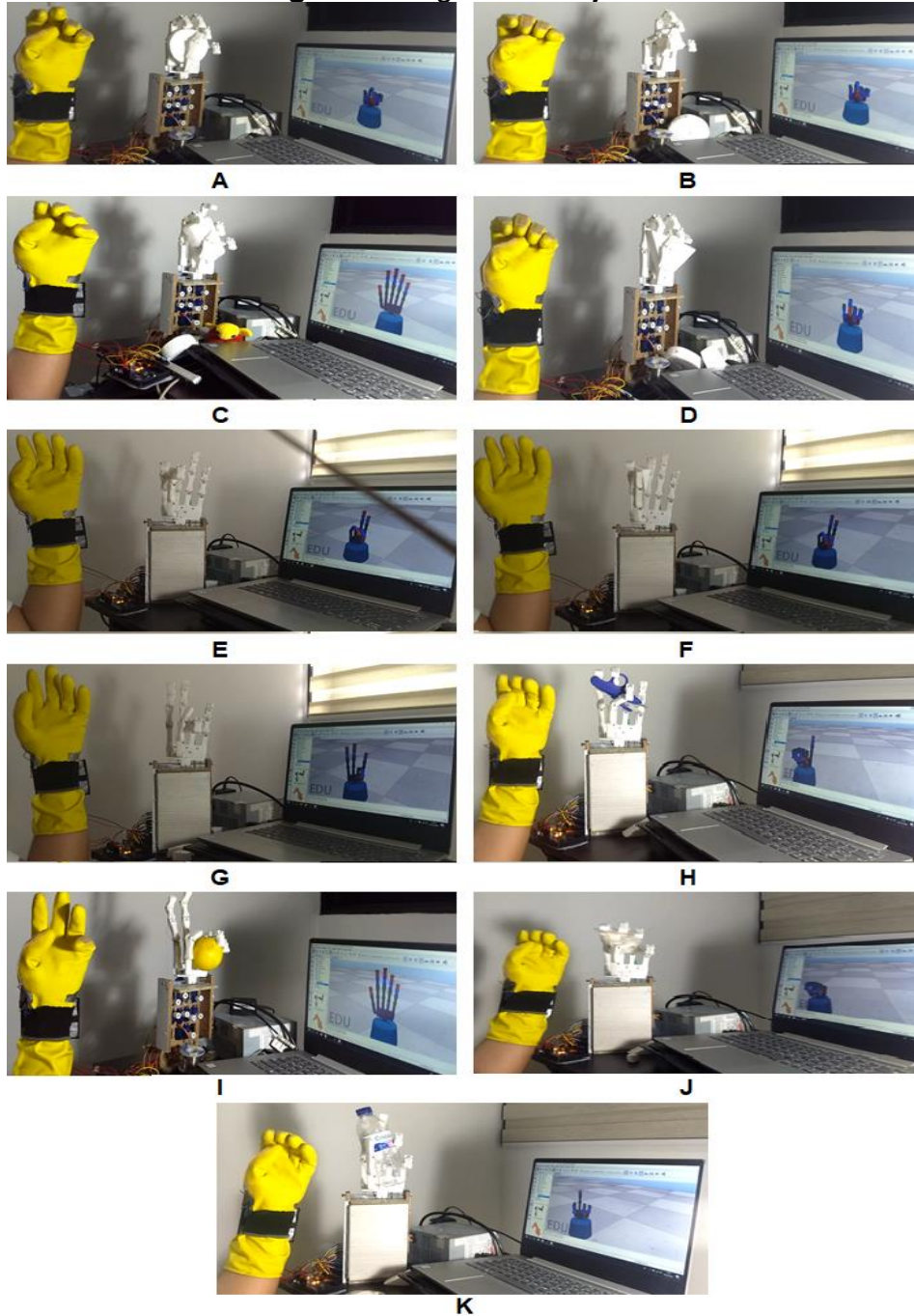
Tabla 7. Dimensiones de los objetos a agarrar.

Objeto	Medidas (mm)
Cilindro A (Figura 60 A)	Diámetro: 25; Altura: 10
Flecha (Figura 60 B)	Largo: 45; Ancho: 25; Alto: 10
Prisma triangular A (Figura 60 C)	Largo: 45; Ancho: 25; Alto: 10
Cubo (Figura 60 D)	Largo: 35; Ancho: 35; Alto: 35
Prisma rectangular (Figura 60 E)	Largo: 90; Ancho: 50; Alto: 30
Prisma triangular B (Figura 60 F)	Largo: 110; Ancho: 75; Alto: 30
Cilindro B (Figura 60 G)	Diámetro: 80; Altura: 20
Tijeras (Figura 60 J)	Largo: 120; Ancho: 45; Alto: 15
Bolsa con componentes electrónicos (Figura 60 H)	Largo: 100; Ancho: 60; Alto: 10
Botella plástica (Figura 60 I)	Diámetro: 55; Alto: 150
Esfera (Figura 60 K)	Diámetro: 80

Fuente: Autor.

Los objetos son ubicados en frente del prototipo de mano robótica antropomorfa, la cual se cierra o abre para agarrar o soltar el objeto, de acuerdo con el movimiento realizado por el operador. En la Figura 61, se pueden observar los agarres de precisión (Figura 61 E, Figura 61 F y Figura 61 G) y presión realizados por la mano robótica.

Figura 61. Agarre de objetos.

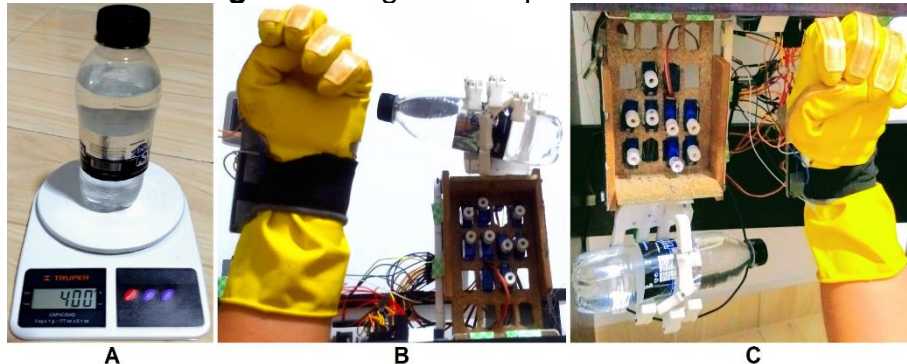


Fuente: Autor.

El funcionamiento del dedo pulgar en el prototipo robótico, al igual que el de la mano humana, es fundamental debido a que este presiona los objetos hacia los dedos o la palma. Los agarres de precisión se realizan con el dedo pulgar y el dedo índice o medio, igualmente, para el agarre de presión se utiliza el pulgar y los otros cuatro dedos.

Para determinar el peso máximo que puede soportar la mano robótica, sin verse afectado el agarre de objetos, se realizan dos pruebas con una botella de plástico que se llenara con agua para variar su peso. En la primera prueba (Figura 62 B) se agarra la botella con la mano robótica y se varía el peso, hasta que la botella se deslice. Para la segunda prueba (Figura 62 C), se ubica el prototipo de mano robótica con una orientación vertical hacia abajo y se repite el procedimiento de agarre anterior, hasta que el objeto no pueda ser soportado por el prototipo.

Figura 62. Agarre con peso maximo.

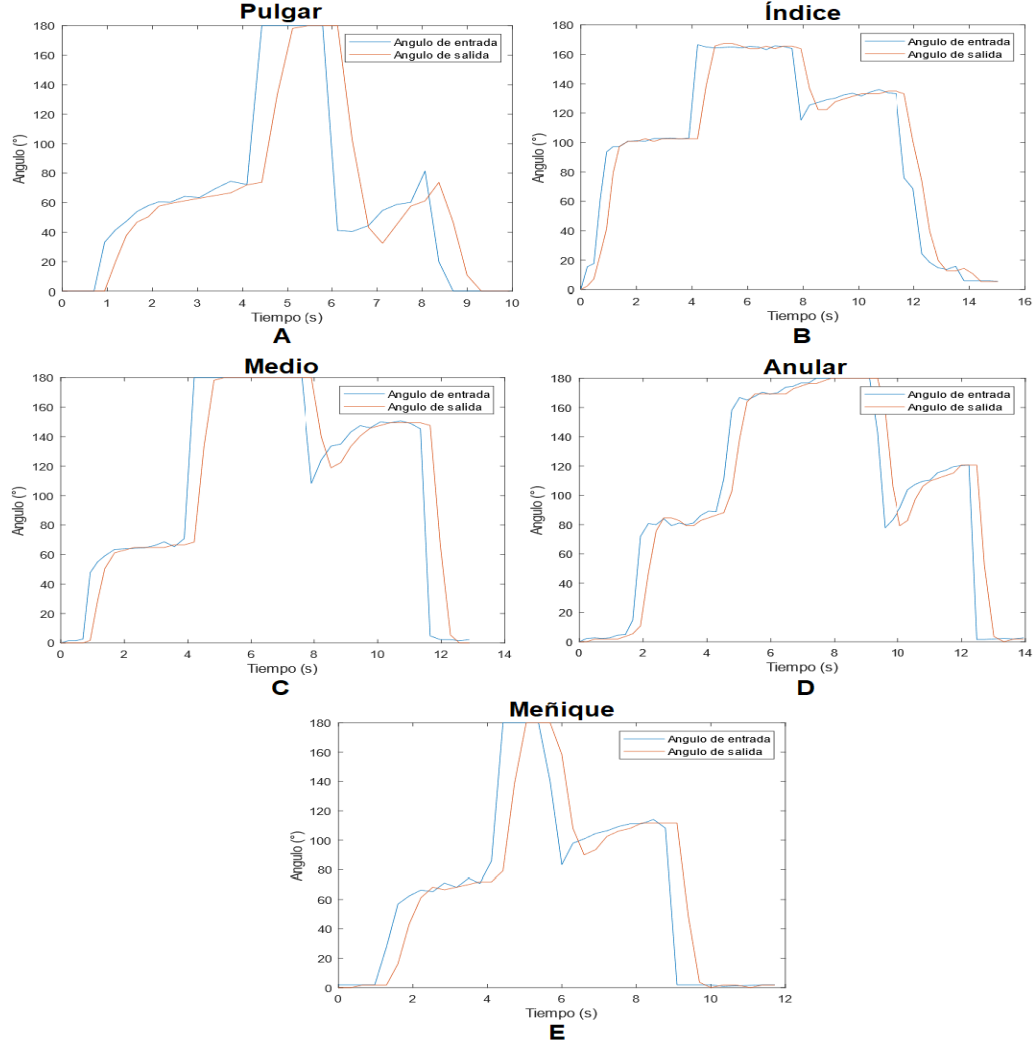


Fuente: Autor.

Mediante el control del prototipo de mano robótica, se pueden sujetar objetos con una longitud mínima de 1 cm, como en la Figura 61 E y la Figura 61 F. También, se pueden agarrar objetos con una longitud máxima de 8 cm, como en la Figura 61 I y un peso máximo de 400 gr.

La Figura 63 muestra la variación en los ángulos de referencia (entrada) y de respuesta en los servomotores (salida) para cada dedo, donde se puede observar un tiempo de retardo en la respuesta del sistema. El dedo pulgar tiene un retardo de respuesta promedio de 0.56 s, el retardo promedio en del dedo índice es de 0.53 s. Para el dedo medio, se presentó un retardo de 0.57 s, el dedo anular tiene un retardo de 0.41 s y en el dedo meñique el retardo promedio es de 0.48 s.

Figura 63. Respuesta por dedo del prototipo de mano antropomorfa.



Fuente: Autor.

El controlador PID aplicado ayuda a que el comportamiento del sistema sea estable, impidiendo que las pequeñas variaciones detectadas por los sensores afecten los procesos de agarre, por medio de movimientos repentinos en los dedos. Por otra parte, los retardos en los dedos son lo suficientemente bajos para no afectar con el desarrollo en los procesos de manipulación de objetos.

Capítulo VI: Conclusiones y trabajos futuros

1.15 Conclusiones

Mediante el uso del software de diseño asistido por computadora y las impresoras 3D, una mano robótica antropomorfa ha sido desarrollada. El sistema fue analizado e identificado utilizando el software MATLAB, el controlador fue desarrollado en tarjeta Arduino. La comunicación e interacción con el usuario fue realizada mediante tarjeta de desarrollo Arduino, el software académico CoppeliaSim y MATLAB. El sistema final obtenido ofrece una solución para el desarrollo de actividades de alto riesgo en la industria, con bajo costo y materiales de construcción asequibles en el mercado local

Para este trabajo se analizaron tres materiales para la implementación de los sensores de movimiento. Los sensores flex, la tela conductora y el velostat tienen un comportamiento similar, estos cambian de resistencia de acuerdo con el grado de flexión o cantidad de presión que reciban. Para la construcción de los sensores se escoge el velostat, debido a que, el sensor flex es costoso y la tela conductora, a pesar de ser económica, cuenta con un valor resistivo oscilatorio haciendo el sensor inestable.

Para alcanzar un buen desempeño de los sensores, se debe asegurar un sellamiento fuerte y un contacto homogéneo del velostat con las láminas de acetato, de lo contrario, al flexionar los dedos, la presión sobre el velostat puede variar. Si esto sucede, el sensor cambiará su rango resistivo, haciendo que cambie el nivel de tensión con el cual se diseñó el circuito span y cero.

El guante sensorial se construyó con un guante de látex debido a que, al flexionar y extender los dedos, el material retorna a su forma original, a diferencia del guante de tela, que tiende a deformarse en las articulaciones y con esto hace inestable el sensor.

El prototipo de mano robótica diseñado puede agarrar objetos con una longitud mínima de 1 cm y máxima de 8 cm por medio de agarres de precisión y de presión, además puede agarrar objetos con un peso máximo de 400 gr. También, cuenta con un tiempo de respuesta rápido, haciéndolo idóneo para el uso en procesos de manipulación de objetos o sustancias en ambientes peligrosos.

Al aplicar el control PID se reducen las oscilaciones en los sensores, generadas por la vibración y los movimientos que no se relacionan a los dedos en la mano. La reducción de estas vibraciones hace que el prototipo de mano robótica sea estable, mejorando el funcionamiento.

1.16 Trabajos futuros

Para mejorar el agarre del prototipo de mano robótica antropomorfa diseñado, se puede usar goma de silicona, con este material es posible cubrir las zonas que tienen mayor contacto con los objetos, dando como ventaja el aumento en la capacidad de agarre de objetos con formas irregulares y superficies lisas. El prototipo se podrá conectar con un brazo robótico articulado para realizar las tareas de desplazamiento de objetos y sustancias, que son comunes en los procesos industriales.

A partir de ajustes en los módulos de programación del sistema desarrollado en este trabajo, será posible implementar diferentes estrategias de control. Lo anterior permitirá el desarrollo de nuevos aportes en el área, utilizando el prototipo como una herramienta académica y de investigación.

Mediante el uso de sensores de fuerza, se puede dar mayor seguridad sobre la capacidad de agarre, al detectar perturbaciones por el deslizamiento del objeto agarrado. También, se pueden añadir un sistema neumático al guante, para darle una sensación de agarre al operador.

Bibliografía

- [1] «Consejo Colombiano de Seguridad,» 26 Junio 2019. [En línea]. Available: <https://ccs.org.co/reduccion-de-accidentes-laborales-y-transformacion-productiva-de-cara-a-la-proteccion-social-de-los-trabajadores-los-retos-del-52-congreso-de-seguridad-salud-y-ambiente-2019/>. [Último acceso: 10 Octubre 2020].
- [2] «Instituto Nacional de Salud,» 14 Enero 2020. [En línea]. Available: <https://www.ins.gov.co/buscador-eventos/Lineamientos/PRO%20Intoxicaciones.pdf#search=pro%20intoxicacion>. [Último acceso: 10 Octubre 2020].
- [3] «Consejo Colombiano de Seguridad,» 2020. [En línea]. Available: <https://ccs.org.co/observatorio/atel-colombia-1er-semester-2020/>. [Último acceso: 10 Octubre 2020].
- [4] F. Reyes Cortés, *Robótica: control de robots manipuladores*, Primera edición ed., Alfaomega, 2011.
- [5] O. Binivignat, A. Almagià, P. Lizana y E. Olave, «Aspectos Biométricos de la Mano de Individuos Chilenos,» *Int. J. Morphol*, 2012.
- [6] D.-H. Lee, J.-H. Park, S.-W. Park, M.-H. Baeg y J.-H. Bae, «KITECH-Hand: A Highly Dexterous and Modularized Robotic Hand,» *IEEE*, 2017.
- [7] N. L. Quiroga Pérez y E. Calla Durandal, «Sistema de control de mano robótica replicadora de movimientos para manipular sustancias químicas,» *ACTA NOVA*, 2019.
- [8] H. Mnyusiwalla, P. Vulliez, J. P. Gazeau y S. Zeghloul, «A New Dexterous Hand Based on Bio-Inspired Finger Design for Inside-Hand Manipulation,» *IEEE*, 2016.
- [9] J. Zhou, X. Chen, U. Chang, J.-T. Lu, C. C. Yau Leung, Y. Chen, Y. Hu y Z. Wang, «A Soft-Robotic Approach to Anthropomorphic Robotic Hand Dexterity,» *IEEE*, 2019.
- [10] A. Saudabayev y H. A. Varol, «Sensors for Robotic Hands: A Survey of State of the Art,» *IEEE*, 2015.

- [11] M.-B. Huang y H.-P. Huang, «Innovative Human-Like Dual Robotic Hand Mechatronic Design and Its Chess-Playing Experiment,» *IEEE*, 2019.
- [12] S. Mahboubi, S. Davis y S. Nefti-Meziani, «Variable Stiffness Robotic Hand for Stable Grasp and Flexible Handling,» *IEEE*, 2018.
- [13] C. D. Santina, V. Arapi, G. Averta, F. Damiani, G. Fiore, A. Settimi, M. G. Catalano, D. Bacciu, A. Bicchi y M. Bianchi, «Learning From Humans How to Grasp: A Data-Driven Architecture for Autonomous Grasping With Anthropomorphic Soft Hands,» *IEEE*, 2019.
- [14] K. L. Moore, A. F. Dalley y A. M. Agur, *MOORE Anatomía con orientación clínica*, 8ª ed., Lippincott Williams & Wilkins, 2018.
- [15] R. L. Drake, A. Wayne Vogl y A. W. M. Mitchell, *GRAY ANATOMÍA PARA ESTUDIANTES*, 3ª ed., ELSEVIER, 2015.
- [16] M. Latarjet y A. Ruiz Liard, *Anatomía Humana*, 4ª ed., EDITORIAL MÉDICA PANAMERICANA, 2005.
- [17] G. J. Tortora y B. Derrickson, *Principios de Anatomía y Fisiología*, 13ª ed., EDITORIAL MÉDICA PANAMERICANA, 2013.
- [18] C. A. Silva Castellanos, J. E. Muñoz Riaños, D. A. Garzón Alvarado, N. S. Landínez Parra y O. Silva Caicedo, «Diseño mecánico y cosmético de una prótesis parcial de mano,» *Revista Cubana de Investigaciones Biomédicas*, 2011.
- [19] J. Loaiza y N. Arzola, «Evolución y tendencias en el desarrollo de prótesis de mano,» *DYNA*, 2011.
- [20] D. A. Zúñiga Tenesaca y D. M. Andrade Zeas, «Diseño y construcción de una mano robótica para la enseñanza del alfabeto dactilológico universal para personas sordomudas,» *INGENIUS*, 2011.
- [21] D. Leonardis, M. Barsotti, C. Loconsole, M. Solazzi, M. Troncossi, C. Mazzotti, V. Parenti Castelli, C. Procopio, G. Lamola, C. Chisari, M. Bergamasco y A. Frisoli, «An EMG-Controlled Robotic Hand Exoskeleton for Bilateral Rehabilitation,» *IEEE*, 2015.
- [22] D. Bennett, S. Dalley, D. Truex y M. Goldfarb, «A Multi-grasp Hand Prosthesis for Providing Precision and Conformal Grasps,» *IEEE*, 2015.

- [23] D. Johansen, C. Cipriani, D. Popovic y L. Struijk, «Control of a Robotic Hand Using a Tongue Control System—A Prosthesis Application,» *IEEE*, 2016.
- [24] S. Biggar y W. Yao, «Design and Evaluation of a Soft and Wearable Robotic Glove for Hand Rehabilitation,» *IEEE*, 2016.
- [25] A. García y A. Becerra, «Prototipo de mano robótica inspirada en la mano humana,» *Revista Tekhnê*, 2016.
- [26] Z. Ma, P. Ben-Tzvi y J. Danoff, «Hand Rehabilitation Learning System With an Exoskeleton Robotic Glove,» *IEEE*, 2016.
- [27] G. Salvietti, I. Hussain, D. Cioncoloni, S. Taddei, S. Rossi y D. Prattichizzo, «Compensating Hand Function in Chronic Stroke Patients Through the Robotic Sixth Finger,» 2017.
- [28] J. Zhou, J. Yi, X. Chen, Z. Liu y Z. Wang, «BCL-13: A 13-DOF Soft Robotic Hand for Dexterous Grasping and In-Hand Manipulation,» *IEEE*, 2018.
- [29] C. Li, X. Gu, X. Xiao, G. Zhu y H. Ren, «Transcend Anthropomorphic Robotic Grasping With Modular Antagonistic Mechanisms and Adhesive Soft Modulations,» *IEEE*, 2019.
- [30] R. Rameshwar, S. Li, A. M. Votta y C. D. Onal, «Intuitive Control of a Robotic Arm and Hand System With Pneumatic Haptic Feedback,» *IEEE*, 2019.
- [31] F. Bordignon, A. A. Iglesias y Á. Hahn, DISEÑO E IMPRESIÓN DE OBJETOS 3D, Primera ed., Ciudad Autónoma de Buenos Aires: UNIPE: Editorial Universitaria, 2018.
- [32] L. E. Avendaño, Sistemas Electrónicos Analógicos: Un Enfoque Matricial, Segunda ed., Pereira: Universidad Tecnológica de Pereira, 2007.
- [33] «National Instruments,» 2020. [En línea]. Available: <https://www.ni.com/es-co/support/downloads/software-products/download.multisim.html#312060>. [Último acceso: 20 Septiembre 2020].
- [34] «MathWorks,» 2020. [En línea]. Available: <https://la.mathworks.com/help/ident/gs/about-system-identification.html#:~:text=System%20identification%20is%20a%20methodology,in%20time%20or%20frequency%20domain..> [Último acceso: 20 Agosto 2020].

[35] «CoppeliaSim,» 2020. [En línea]. Available: <https://coppeliarobotics.com/>.
[Último acceso: 5 Octubre 2020].