



UNIVERSIDAD DE CHILE
FACULTAD DE CIENCIAS FÍSICAS Y MATEMÁTICAS
DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA ELÉCTRICA

DISEÑO, FABRICACIÓN Y ANÁLISIS DE UNA MANO ROBÓTICA SUBACTUADA
UTILIZANDO ACTUADORES DE CUERDA TRENZADA

TESIS PARA OPTAR AL GRADO DE MAGISTER EN CIENCIAS DE LA
INGENIERÍA, MENCIÓN ELÉCTRICA

MEMORIA PARA OPTAR AL TÍTULO DE INGENIERO CIVIL ELÉCTRICO

GONZALO RAÚL OLAVE WOLFF

PROFESOR GUÍA:
JAVIER RUIZ-DEL-SOLAR SAN MARTÍN

MIEMBROS DE LA COMISIÓN:
MARCOS ORCHARD CONCHA
RUBÉN FERNANDEZ URRUTIA

SANTIAGO DE CHILE
2022

RESUMEN DE LA TESIS PARA OPTAR AL
GRADO DE: MAGÍSTER EN CIENCIAS DE LA
INGENIERÍA, MENCIÓN ELÉCTRICA
MEMORIA PARA OPTAR AL TÍTULO DE:
INGENIERO CIVIL ELÉCTRICO
POR: GONZALO RAÚL OLAVE WOLFF
FECHA: 2022
PROF. GUÍA: JAVIER RUIZ-DEL-SOLAR SAN
MARTÍN

DISEÑO, FABRICACIÓN Y ANÁLISIS DE UNA MANO ROBÓTICA SUBACTUADA UTILIZANDO ACTUADORES DE CUERDA TRENZADA

Este trabajo presenta una mano robótica subactuada que utiliza actuadores de cuerda trenzada (TSA) para generar el movimiento de los dedos. Se plantea la hipótesis de que utilizar un control de tensión de los tendones permite el agarre seguro de diferentes objetos cotidianos.

Al analizar el comportamiento del TSA con control de posición del motor flexor, para diferentes cargas en la salida del sistema, se observa que, debido al comportamiento elástico del TSA, este esquema de control es inadecuado para el agarre, cuando se desconocen las características del objeto. Se estudia la fuerza de agarre de la mano utilizando un control de tensión de los tendones, de donde se desprenden las ventajas que posee este esquema de control en el agarre seguro de objetos, y en la interacción segura de la mano con el entorno.

Se evalúa el agarre seguro de objetos, y se valida la hipótesis para cierto tipo de objetos. Sin embargo, se observan limitaciones en el agarre de objetos muy grandes y pesados, u objetos muy pequeños que no logran ser afirmados por los dedos. Finalmente, en base a los resultados, se realizan propuestas de mejoras al diseño de la mano en pos de mejorar su desempeño.

A mi familia,
a nuestros antepasados que nos protegen
y a nuestras nuevas generaciones.

Agradecimientos

Este trabajo de tesis no lo hice solo. En estas líneas pretendo agradecer a todos los que me han acompañado de una u otra manera durante este tiempo.

En primer lugar a mi familia, a Elinett y David, pilares fundamentales de mi desarrollo, que me apoyan incondicionalmente. A mis hermanes Laura y Felipe, que me acompañan en todo lo que hago. A mis sobrines Anaclara y Fidel, que le dan alegría a mi vida. También a la familia extendida, que es muy grande y loca, muchas gracias por hacer de mi lo que soy. A mi compañera Camila y mis apasionados que me llenan de vida.

A mis compañeros y amigos del Laboratorio de Robótica: Matías M., Rodrigo, Luz, Matías P., Christopher, por los momentos, aprendizajes y enseñanzas que compartimos. A los equipos Homebreakers y Nao: Gio, Gustavo, Nico, Javier, Diego, David, Leo, Lukas, José, Lore, Wilma, José Miguel, Carlos, Leonardo, Kenzo, Nico y Gabriel, por toda la buena onda. A la generación dorada del laboratorio: Maco, Isao, Fernando, Daniel, Carlos, Pato y Paul por todas las enseñanzas. A todos ustedes por hacer de mi estadía en la universidad un lugar lleno de buena onda, experiencias y aprendizaje, y por haberme enseñado mucho más de lo que imaginé aprender cuando entré. A mi profesor guía Javier Ruiz del Solar, por las oportunidades y aprendizajes otorgados.

A mis amigas y compañeres de la comunidad del FabLab: Danisa, Vicho, Joakin, Joaquín, Ale, Meche, por darme un espacio para desarrollarme y para aportar desde mi experiencia. Gracias por eso y por todo lo que me han enseñado. A Rubén, Ulises y Francisco por la buena compañía y por sus aportes a la tesis.

A los amigos que la U me permitió conocer en diferentes momentos y lugares: Alex ♡, Javier, Andrés, Pichón, Fran, Caro, Rodrigo, Seba, Juampi, Pedro, Victor, Camilo, Ignacio, José, Daniel, y muchos más, con quienes he compartido grandes momentos de mi vida. Gracias totales.

Tabla de contenido

Índice de Tablas	VII
Índice de Ilustraciones	VIII
1. Introducción	1
1.1. Contexto y motivación	1
1.2. Hipótesis	3
1.3. Objetivos	3
1.4. Aportes del trabajo	3
1.5. Metodología	4
1.6. Estructura de la tesis	5
2. Antecedentes y estado del arte	6
2.1. La mano humana	6
2.1.1. Anatomía de la mano	7
2.1.2. Taxonomía de agarres	8
2.2. Manos robóticas antropomórficas	9
2.2.1. Sistemas completamente actuados y sobre actuados	11
2.2.2. Sistemas sub-actuados	13
2.3. Actuadores de rigidez variable	15
2.3.1. Actuación por cuerdas trenzadas	15
2.4. Manipulación de objetos	17
2.4.1. Fuerza de agarre y sensado	17
2.4.2. Evaluación de la manipulación en manos robóticas	18
3. Marco teórico	20
3.1. Actuación por cuerdas torcidas <i>TSA</i>	20
3.1.1. Modelo de cinemática y dinámica	21
3.2. Controladores PID	23
3.3. Motor BLDC	24
4. Diseño y control de la mano	26
4.1. Criterios de diseño	26

4.1.1.	Mano robótica	26
4.1.2.	Sistemas de actuación TSA	27
4.2.	Diseño mecánico	28
4.2.1.	Diseño de la Mano	28
4.2.1.1.	Diseño de los dedos	29
4.2.1.2.	Rango de movimiento	32
4.2.2.	Diseño del sistema de actuación TSA	35
4.2.2.1.	Estudio y selección de parámetros	35
4.2.2.2.	Dimensionamiento del motor	39
4.2.3.	Selección de componentes	42
4.2.3.1.	Motor	42
4.2.3.2.	Sensor de fuerza	42
4.2.4.	Estructura mecánica	43
4.2.4.1.	Soporte de motor y acople mecánico	43
4.2.4.2.	Soporte sensor de fuerza	44
4.2.4.3.	Antebrazo	45
4.2.5.	Fabricación	46
4.3.	Sistema de control de la mano	51
4.3.1.	Esquema general	51
4.3.2.	Control de un dedo	52
4.3.3.	Control de motores	52
4.3.3.1.	Control de posición	53
4.3.3.2.	Control de tensión	53
5.	Experimentos y análisis	55
5.1.	Análisis del sistema TSA	55
5.2.	Control de tensión y fuerza de agarre de la mano	58
5.3.	Validación de agarre seguro de la mano	62
5.3.1.	Configuración experimental	62
5.3.2.	Objetos	62
5.3.3.	Procedimiento y puntuación	65
5.3.4.	Resultados	66
5.3.5.	Análisis de resultados	68
5.4.	Pruebas de agarre de diferentes objetos cotidianos	70
5.5.	Compatibilidad con el robot Bender	76
5.5.1.	Integración de hardware	76
5.5.2.	Integración de software	77
6.	Conclusiones	78
6.1.	Conclusiones generales	78

6.2. Trabajo futuro	79
Bibliografía	81
Anexos	85
A. Placas electrónicas del sistema	86
A.1. Placa para el controlador de un dedo	86
A.2. Placa para el controlador de un motor	86
A.3. Placa amplificadora del sensor de fuerza	86
A.4. Placa de distribución de energía	88
B. Información técnica de componentes comerciales	90
B.1. Arduino Mega 2560 R3	90
B.2. Arduino Nano R3	91
C. Fabricación de fundas de silicona	92
D. Tabla de selección de arreglos ortogonales de Taguchi	95
E. Resumen extendido	95

Índice de Tablas

4.1. Resumen de decisiones tomadas para el diseño de la mano robótica.	27
4.2. Resumen de decisiones tomadas para el diseño de los TSA.	28
4.3. Largo de las falanges proximal, media y distal de los dedos humanos en mm. Adaptado de [1, tablas IV, VI y VIII]	29
4.4. Dimensiones en mm y grados de los parámetros presentados en la figura 4.5.	33
4.5. Distancias máximas de cuerda que deben ser tiradas para cerrar y abrir cada articulación de los dedos y distancia total para los tendones flexor y extensor.	35
4.6. Características de dos tipos de cuerdas de Dyneema de la marca Sufix encontradas en el mercado local.	36
4.7. Parámetros de diseño del actuador	39
4.8. Valores de los parámetros relevantes para el cálculo de la tensión del tendón.	45
4.9. Piezas impresas que componen la a mano y el sistema de actuación y los materiales con los que fueron fabricados.	47
5.10. Resumen de los factores relevantes para el experimento y sus niveles respectivos.	64
5.11. Arreglo ortogonal L9 de Taguchi y su correspondencia con los factores y niveles escogidos para analizar el agarre de la mano.	64
5.12. Lista de objetos seleccionados para hacer la prueba de agarre seguro y sus propiedades.	65
5.13. Resultados experimentales de la evaluación de agarre de la mano. Los objetos primero se intentaron agarrar con 10N de tensión del tendón flexor y luego con 25N de tensión. Los intentos pararon (-) si se logró el puntaje completo en las primeras dos pruebas.	66
5.14. SNR calculado para todos los experimentos según los resultados obtenidos.	67
5.15. SNR promedio para cada forma y factor, y rango R calculado por factor.	68
5.16. Objetos probados con tensión de 10N.	71
5.17. Masa aproximada de cada subsistema.	77
A.1. Especificaciones técnicas Arduino Mega 2560 R3.	90
A.2. Especificaciones técnicas Arduino Nano R3.	91
C.3. Tabla de selección de arreglos ortogonales de Taguchi	95

Índice de Ilustraciones

1.1.	Evolución de los brazos del robot Bender a lo largo de los años.	2
1.2.	Metodología para el desarrollo de la mano robótica.	4
2.1.	Ejemplos de utilización de la mano para: (a) lenguaje corporal, dar información o comunicar y (b) tomar herramientas primitivas como rocas y palos. Fuente [2].	6
2.2.	(a) Huesos y articulaciones de la mano. (b) Sección del dígito III desde el radio, pasando por los huesos de la mano, hasta la última falange. Fuente [3].	7
2.3.	(a) Oposición de yema, (b) Oposición de palma, (c) Oposición de lado. Adaptado de [3, p.2].	9
2.4.	(a) Pulgar Abducido, (b) Pulgar Aducido. Adaptado de [3, p.4].	9
2.5.	Taxonomía GRASP que incorpora 33 tipos de agarre estudiados y filtrados. Las columnas se dividen según agarres de potencia, intermedios y de precisión, tipo de oposición y cantidad de dedos virtuales. Las filas separan los agarres según la posición del pulgar, abducido o aducido. Fuente [4].	10
2.6.	(a) Barrett Hand de Barrett Technology, LLC, (b) Awiwi Hand del Instituto Aeroespacial Alemán, (c) iHY Hand de iRobot, Harvard y Yale, (d) RBO Hand de la Universidad Técnica de Berlin, (e) Kinova Hand de Kinova Robotics, (f) Shadow Dexterous Hand de Shadow Robot Company.	12
2.7.	Sistema de flexión y extensión de un dedo de la mano GRASPAR. Fuente: [5].	14
2.8.	Ejemplo de objetos del conjunto YCB: Alimentos en la esquina superior izquierda, herramientas en la esquina superior derecha, utensilios de cocina en la esquina inferior izquierda y objetos con diferentes forma en la esquina inferior derecha. Fuente: adaptado de [6].	19
3.1.	Esquema de funcionamiento del sistema TSA (fuente: adaptado de [7])	20
3.2.	Geometría de una cuerda desplegada (fuente: adaptado de [7])	21
3.3.	Control PID de una planta. Fuente: Ogata [8].	24
3.4.	Esquema de funcionamiento de un motor BLDC, junto a su patrón de 6 pasos para la conmutación.	25
4.1.	Imagen de la mano renderizada del software CAD con indicaciones.	29
4.2.	Esquema general del sistema de actuación para un dedo y de ruteo de tendones.	30
4.3.	Ilustración de la aducción (a) y abducción del pulgar en vista lateral (b) y frontal (c).	31
4.4.	Vista explosionada isométrica de un dedo índice con todos sus componentes	31

4.5. Parámetros relevantes que inciden en el comportamiento de los dedos (a) índice y medio y (b) pulgar.	32
4.6. Límites máximos de movimiento para apertura (a) y cierre (b) del dedo índice. . . .	34
4.7. Triángulo proyectado en una articulación para el calculo del segmento de cuerda necesario para cerrarla	35
4.8. Esquema del sistema de actuación diseñado para un tendón.	36
4.9. Comportamiento de $x(\alpha)$ para L, A y B fijos, y dos radios de cuerda.	37
4.10. Análisis de sensibilidad para B y L.	38
4.11. Comportamiento de $x(\alpha)$ con los parámetros de diseño escogidos.	39
4.12. Simplificación de fuerzas de contacto entre los dedos y el objeto agarrado. Las flechas negras representan las fuerzas ejercidas por la mano sobre el objeto en múltiples puntos de contacto. Las flechas verdes representan las fuerzas F_d ejercidas sobre el objeto en oposición entre el pulgar y el índice y medio. Las flechas rojas representan la fuerza F_t ejercida por el tendón. Las líneas magenta representan la distancia L entre la articulación MCP y la fuerza ejercida por los dedos, y las líneas azules representan la distancia R de la articulación MCP a la que se ejerce la fuerza del tendón.	40
4.13. Razón de reducción $RT(\alpha)$ del sistema TSA para los parámetros de diseño escogidos, y curva de torque requerido para el motor para $F_{pulgar} = 22N$	41
4.14. Componentes comerciales seleccionados para el sistema de actuación por cuerdas trenzadas: (a) Motor Maxon EC 20 Flat. y (b) Sensor de presión Flexiforce A101.	42
4.15. Soporte se actuadores TSA para un dedo.	43
4.16. Vista explosionada del soporte de motor móvil, utilizado para el TSA flector.	44
4.17. Diagrama de fuerzas en el soporte del sensor A101.	45
4.18. Renderizado del sistema completo con mano, actuadores TSA para cada dedo y antebrazo.	46
4.19. Fotografía del sistema armado con antebrazo, mano y sistemas de actuación para los tres dedos.	48
4.20. Fotografía del detalle de los dedos y sus fundas de silicona	49
4.21. Fotografía del detalle de las guías de los tendones entre los TSA y la mano.	50
4.22. Fotografía del detalle del sistema TSA extensor y flector del dedo índice.	50
4.23. Esquema general de conexiones de los circuitos para el control de la mano.	51
4.24. Esquema de control de un dedo de la mano.	52
4.25. Controlador de motor	53
4.26. Esquema del controlador de posición del motor.	53
4.27. Esquema del controlador de tensión del tendón.	54
5.1. Resultados de la prueba de control de posición del motor para diferentes cargas en el sistema TSA.	55

5.2.	Desplazamiento del destorcedor del sistema TSA diseñado para cargas de (a) 1N, (b) 2.5, (c) 5N y (d) 10N. A la izquierda del destorcedor desplazado se ubica el torcedor acoplado al motor y a la derecha las cargas.	57
5.3.	Fotografías del aparato impreso en 3D para medir la fuerza de agarre de la mano (a) y configuración espacial del experimento (b).	58
5.4.	Datos obtenidos para la prueba de agarre de la celda de carga con dos tensiones de referencia para los controladores de tensión de los dedos.	59
5.5.	Promedio y desviaciones estándar del control de tensión para los tres dedos en las dos pruebas de agarre.	60
5.6.	Fotografía de la mano sujetando una botella de agua de 1kg.	61
5.7.	Mano montada en la máquina Router CNC Shopbot 5-axis PRSAlpha. Arriba la mano en la posición inicial del agarre, abajo la mano rotada en 90 grados. La flecha verde representa el eje de rotación B de la máquina y la flecha azul representa la dirección de rotación.	63
5.8.	Objetos seleccionados para el experimento de manipulación. De arriba a la izquierda hacia abajo a la derecha: esfera de plumavit, lata de pintura en spray, rollo de cable, tarro de té en hoja, caja de boldo en bolsa, pomelo, plátano, bola de acero y bloque de acero.	65
5.11.	Comparación de SNR de los factores y niveles con el promedio.	68
5.9.	Objetos agarrados durante los experimentos: (a) plátano, (b) lata de pintura en spray, (c) bola de acero, (d) pomelo.	72
5.10.	Objetos agarrados durante los experimentos: (a) esfera de plumavit, (b) bloque de acero, (c) caja de boldo, (d) rollo de cable y tarro de té en hoja.	73
5.12.	Objetos agarrados durante la prueba. De arriba a la izquierda hacia la derecha abajo: cubo rubik, peluche pulpo, cámara, pollo, pinza, pelota de ping pong, peluche conejo, pelota de silicona, taladro destornillador, masking tape.	74
5.13.	Objetos agarrados durante la prueba. De arriba a la izquierda hacia la derecha abajo: juguete de perro, rollo de cuerda, guante, globo, pato grande, cola fría, libreta, destornillador, paquete de papas fritas.	75
5.14.	Diagrama de bloques de los subsistemas implementados, con énfasis en las distancias físicas que los separan: dT , dCm , dCc	76
6.1.	Esquemático de la placa fabricada para el control de un dedo	86
6.2.	Esquemático de la placa fabricada para el controlador de motores	87
6.3.	PCB para controlador de motor Maxon sola (a) y armada (b).	87
6.4.	PCB para acondicionamiento de dos sensores de fuerza A101, (a) diagrama esquemático y (b) y (c) fotografías de la placa armada.	88
6.5.	Esquemático de la placa fabricada para distribuir la energía de los motores, microcontroladores y amplificadores.	89

A.6. Arduino Mega 2560 R3.	90
A.7. Arduino Nano R3.	91
B.1. Materiales necesarios para la mezcla e inyección de la silicona en los moldes: contenedor para la mezcla, catalizador, silicona base, jeringa y paleta para mezclar. . . .	92
B.2. Moldes de los tres dedos preparados para verter la silicona.	93
B.3. Falanges de los dedos medio (arriba), índice (al medio) y pulgar (abajo) con las fundas de silicona luego de terminado el proceso.	94

Acrónimos

DIE Departamento de Ingeniería Eléctrica.

DoF Grados de libertad (Degree of Freedom).

TSA Actuación por cuerdas trenzadas o torcidas (*Twisted String Actuator*).

ROS Robot Operating System

PCB Tarjeta de circuito impreso (*Printed Circuit Board*).

BLDC Motor de corriente continua sin escobillas (*Brushless Direct Current*).

FP o **PP** Primera falange (*First Phalanx*) o falange proximal (*Proximal Phalanx*).

SP o **MP** Segunda falange (*Second Phalanx*) o falange media (*Medium Phalanx*).

TP o **DP** Tercera falange (*Third Phalanx*) o falange distal (*Distal Phalanx*).

MB Hueso metacarpiano (*Metacarpial Bone*).

DIP Interfalángica distal (*Distal interphalangeal*).

PIP Interfalángica proximal (*Proximal interphalangeal*).

MCP Interfalángica metacarpiana (*Metacarpophalangeal*).

PID Proporcional, Integral y Derivativo.

YCB Yale-CMU-Berkley

FDM Modelado por deposición fundida (*Fused Deposition Modeling*)

PLA Ácido Poliláctico (*Polylactic Acid*)

1 Introducción

1.1. Contexto y motivación

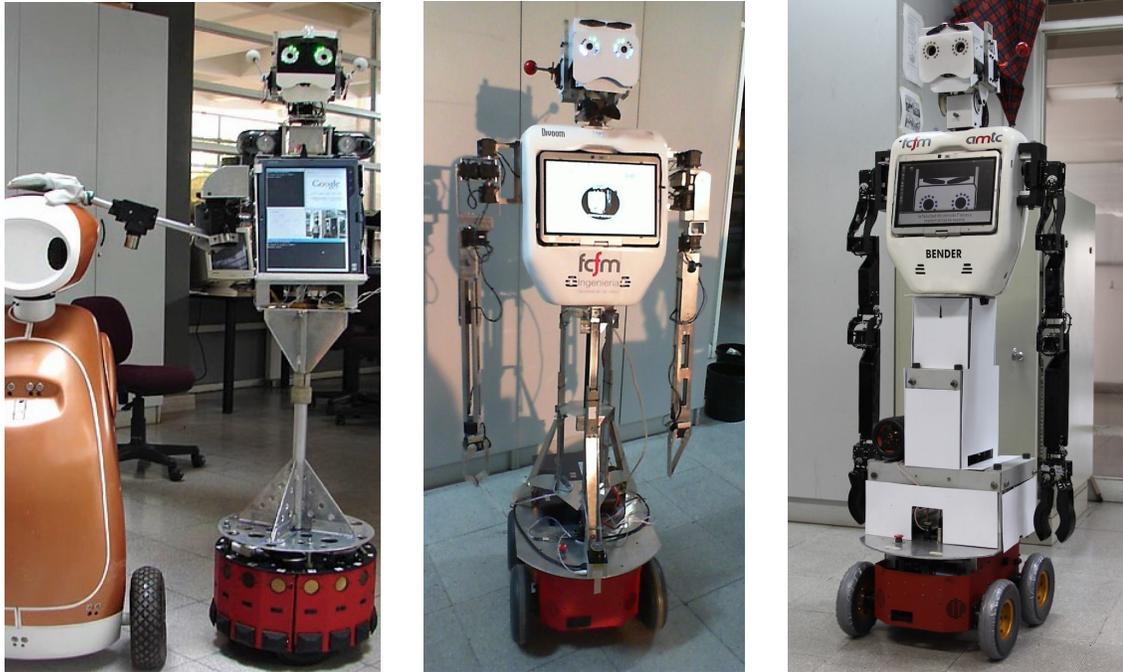
El año 2006 en el laboratorio de robótica del Departamento de Ingeniería Eléctrica (DIE) de la Universidad de Chile nace el robot de servicio Bender. El robot ha servido como plataforma de investigación y desarrollo en robótica, para estudiantes de pregrado y posgrado de la Universidad de Chile y otras universidades. Bender participa desde el año 2007 en la competencia internacional Robocup en la liga @Home, que busca desarrollar las competencias e interacciones que requerirán los robots sociales en el futuro.

La manipulación de objetos es, entre otras, una de las habilidades más importantes que se buscan desarrollar en la liga @Home, una tarea que implica reconocimiento de objetos, agarre y la interacción de estos con el entorno. Año a año aumenta la dificultad de las pruebas: cambiando la textura visual de los objetos (e.g. vasos de vidrio), cambiando la forma y tamaño de los objetos a manipular (e.g. frutas o lápices en vez de botellas), modificando las alturas donde se encuentran los objetos, cambiando las texturas y rigidez de estos (e.g. huevos, peluches, etc.). Con el fin de solucionar estas dificultades los equipos de la competencia necesitan desarrollar nuevos brazos manipuladores, y nuevas manos o *grippers* que permitan manipular objetos tal y como lo hacemos los humanos.

Es en este contexto en que el robot Bender ha evolucionado en sus componentes, tanto de software como de hardware. Bender ha tenido 3 tipos de brazos y manos diferentes en donde cada versión pretendía mejorar problemas de las versiones anteriores. En la figura 1.1 se pueden ver tres versiones de los brazos del robot.

Actualmente Bender tiene dos brazos antropomórficos con 6 grados de libertad (DoF por las siglas de *Degrees of Freedom*) cada uno. En el extremo de cada brazo tiene *manos*¹ conformados por dos motores Dynamixel RX-28, que se encargan de agarrar los objetos que el robot busca manipular. Debido a la forma de las *manos* y la configuración espacial de sus motores, Bender sólo puede agarrar objetos grandes, cilíndricos y de menos de 0.5Kg de peso por un tiempo acotado, lo

¹La palabra "manos" se pone en cursiva porque las pinzas del robot Bender entra en la categoría de manos robóticas, pero están lejos de parecerse a lo que la palabra "manos" significa.



(a) Robots Semmu y Bender, año 2008.

(b) Bender con brazos de aluminio, año 2011.

(c) Bender con brazos de fibra de carbono, año 2015.

Figura 1.1: Evolución de los brazos del robot Bender a lo largo de los años.

que limita mucho su habilidad para manipular.

En el laboratorio de robótica del DIE, como parte de una tesis de doctorado, el 2011 se diseñó un robot semi-pasivo que es capaz de caminar. El sistema de actuación que transmite la fuerza de los motores a las articulaciones del robot se denomina actuador por cuerdas trenzadas (*TSA* por la siglas de *Twisted String Actuators*). Este sistema de actuación tiene un comportamiento elástico característico, inherente a su configuración mecánica, que lo diferencia de los mecanismos de transmisión clásicos, tales como engranes o poleas. Estas características generan interés en su estudio e implementación en aplicaciones de robots de servicio, o en sistemas que interactúen con humanos, ya que pueden generar interacciones más seguras.

La motivación principal de este proyecto de tesis es la oportunidad de desarrollar un dispositivo de manipulación robótica utilizando el mecanismo de actuación por cuerdas trenzadas, que pueda servir como plataforma de aprendizaje, desarrollo e investigación en el campo de la manipulación de objetos. Este punto es en particular importante ya que no se han desarrollado otras manos robóticas con características similares en la Universidad de Chile. Además, significa un aporte al equipo UChile Homebreakers y al desarrollo del robot Bender, en pos de mejorar sus habilidades de manipulación. También podrá servir para otras investigaciones que se están realizando en el laboratorio de robótica del DIE, como la manipulación de ropa u otros objetos, relacionados con el quehacer de los robots de servicio.

1.2. Hipótesis

La hipótesis que se plantea en este proyecto es que usar un sistema de cuerdas trenzadas para la actuación de una mano robótica sub-actuada mediante tendones, con un lazo de control sobre la tensión de los tendones, permite el agarre seguro de distintos objetos cotidianos variables en forma, dimensiones, masa y rigidez.

1.3. Objetivos

El objetivo general de este proyecto es diseñar y fabricar una mano antropomórfica sub-actuada, que permita evaluar las capacidades de los sistemas de actuación TSA para el agarre seguro de objetos.

Para completar el objetivo general, se proponen los siguientes objetivos específicos:

- Diseñar y construir una mano robótica antropomórfica que utilice tendones para transmitir la fuerza por los dedos, y definir requerimientos para su correcto funcionamiento.
- Diseñar, construir y evaluar un sistema electromecánico de actuación por cuerdas trenzadas que permita el funcionamiento de la mano, según los requerimientos definidos.
- Diseñar y fabricar la electrónica necesaria para el control de las componentes electromecánicas.
- Implementar sistemas de control de bajo y alto nivel que permitan operar la mano.
- Evaluar cualitativa y cuantitativamente la capacidad de agarre de la mano para diferentes tipos de objetos cotidianos variables en forma, dimensiones, masa y rigidez.

1.4. Aportes del trabajo

Desarrollo de la primera mano robótica antropomórfica de código abierto de la Universidad de Chile, basada en el estado del arte, que habilita una plataforma de aprendizaje, desarrollo e investigación en el campo de la manipulación robótica.

En particular, generar una mejora en las capacidades de manipulación del robot Bender del laboratorio de robótica del DIE.

Todos los documentos y archivos generados tanto del diseño 3D como de las placas electrónicas y del software, se encuentran publicados en GitHub utilizando licencias abiertas, con la finalidad de ser un aporte al desarrollo de este tipo de dispositivos robóticos. El repositorio que resume toda

la documentación del proyecto se puede encontrar en el siguiente enlace: <https://github.com/growloff/robot-hand>.

1.5. Metodología

La metodología propuesta para el desarrollo de una mano robótica sub-actuada se puede ver en la Figura 1.2. Se realiza una revisión bibliográfica para obtener referentes de diseño. Se definen criterios de diseño y se diseñan y prototipan los diferentes subsistemas de la mano robótica. La fase de diseño culmina con el montaje final del sistema, se implementan los sistemas de control para el sistema completo y se realizan los experimentos que permiten validar el trabajo desarrollado.

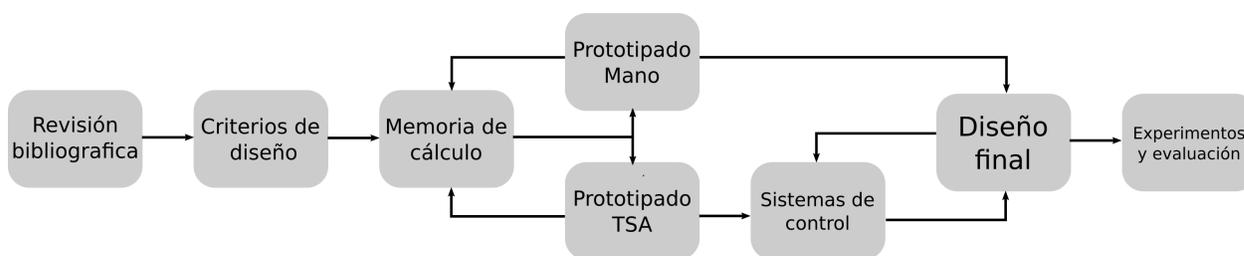


Figura 1.2: Metodología para el desarrollo de la mano robótica.

A continuación se detallan cada uno de las etapas de la metodología:

1. Se realiza una **revisión bibliográfica** del estado del arte en diseño y actuación de manos robóticas, sistemas de actuación por cuerdas trenzadas, y de las evaluaciones de desempeño de este tipo de sistemas, con la finalidad de obtener referentes para el diseño y fabricación de la mano robótica, y su análisis posterior.
2. Se analizan los **criterios de diseño** generales para los sub-componentes del sistema, en base a requerimientos de fabricación, de los actuadores de cuerdas trenzadas y de la aplicación que tendrá la mano robótica. En base a los criterios establecidos, se toman decisiones que guían el diseño de la mano y de los sistemas de actuación.
3. Se realiza el diseño teórico y **memoria de cálculo** de los sub-componentes del sistema que permiten generar prototipos preliminares para evaluar el correcto funcionamiento de las partes.
4. Se prototipa la mano robótica y un sistema TSA, para encontrar configuraciones que permitan desarrollar el objetivo del trabajo. Se itera con la memoria de cálculo cuando es necesario modificar los parámetros constructivos de los sistemas, según los resultados de los prototipos. Para prototipar el TSA se seleccionan los componentes comerciales y se fabrican las placas electrónicas.
5. Junto al prototipado del TSA, se implementan los sistemas y la electrónica de control de bajo nivel y se evalúa su funcionamiento.

6. Luego de probados los prototipos, se diseña y fabrica la mano completa y todos los sistemas de actuación en base a los aprendizajes de la etapa de prototipado. Con la mano y todos los TSA montados, se revisan los detalles del sistema de control de bajo nivel y se implementa el sistema de control de alto nivel que permite la operación de la mano completa.
7. Finalmente, se realizan experimentos que permitan evaluar el desempeño de la mano y se analizan los resultados obtenidos.

1.6. Estructura de la tesis

El presente documento está ordenado de la siguiente forma: el Capítulo 2 presenta una revisión bibliográfica de trabajos que analizan la anatomía y capacidades de las manos humanas, y del estado del arte en el desarrollo de manos robóticas y sistemas de actuación para ellas. En el Capítulo 3 se explicita la teoría detrás de algunos sistemas y métodos utilizados en el desarrollo del presente trabajo. En el Capítulo 4 se definen criterios de diseño y se describe el diseño mecánico de la mano, del sistema de actuación y de los sistemas de control utilizados para controlar la mano completa. El Capítulo 5 describen los experimentos realizados para evaluar los sistemas diseñados y se analizan los resultados con la finalidad de proponer mejoras de diseño. Además, se analiza el comportamiento de la mano en los agarres y su capacidad de agarrar diferentes tipos de objetos. Finalmente en el Capítulo 6 se presentan las conclusiones obtenidas de los resultados experimentales, para cerrar con propuestas para el trabajo futuro de este proyecto.

2 Antecedentes y estado del arte

2.1. La mano humana

Debido a sus características y múltiples funcionalidades, la mano humana ha sido objeto de estudios y análisis morfológicos, mecánicos y socio-culturales.

Características como el pulgar oponible, la gran cantidad de fuerza que pueden ejercer los dedos al cerrarse, o la facilidad con que la mano se adapta para tomar objetos de muchas formas diferentes son las que hacen a la mano humana una de las herramientas más importantes en el desarrollo del ser humano como tal [9]. Además, la mano humana es capaz de sostener y manipular otros objetos y herramientas creados por el hombre (ver Figura 2.1), lo que permite realizar tareas tan comunes como cepillarse los dientes o comer. También es utilizada para manifestaciones artísticas y creativas que diferencian significativamente al ser humano de otro tipo de animales [3]. Por otra parte, cumple un rol muy importante en el lenguaje corporal mediante gestos y movimientos que realizamos para comunicar algo, o para acompañar y dar énfasis a alguna idea expresada verbalmente.

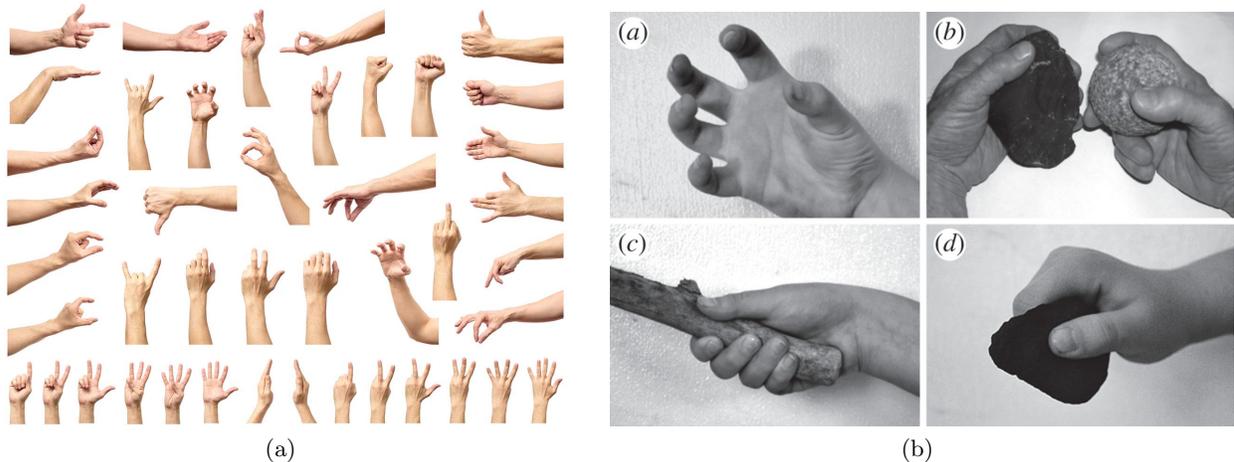


Figura 2.1: Ejemplos de utilización de la mano para: (a) lenguaje corporal, dar información o comunicar y (b) tomar herramientas primitivas como rocas y palos. Fuente [2].

2.1.1. Anatomía de la mano

La mano humana tiene cinco dedos que pueden ser clasificados en dos tipos según su anatomía: el pulgar y los dedos normales. Los cinco dedos se denominan dígitos, y se numeran del **I** (pulgares) al **V** (meñique).

Los dedos normales se componen de cuatro huesos: falange distal (DP), falange media (MP), falange proximal (PP) y el hueso metacarpiano (MB). La articulación interfalángica distal (DIP) conecta DP con MP, la articulación interfalángica proximal (PIP) conecta MP con PP y la articulación interfalángica metacarpiana (MCP) conecta PP con MB y posee dos grados de libertad (DoF por la sigla en inglés de *Degree of Freedom*²). En la figura 2.2b se puede ver la estructura del tercer dígito, en donde se aprecia el eje virtual de las articulaciones de las falanges ubicado en el centro de curvatura del extremo distal de la falange posterior a la articulación. En total los dedos normales poseen 4 articulaciones o grados de libertad, de las cuales tres son independientemente controladas y una (DIP) está acoplada mecánicamente a la anterior (PIP) y su movimiento depende de ella.

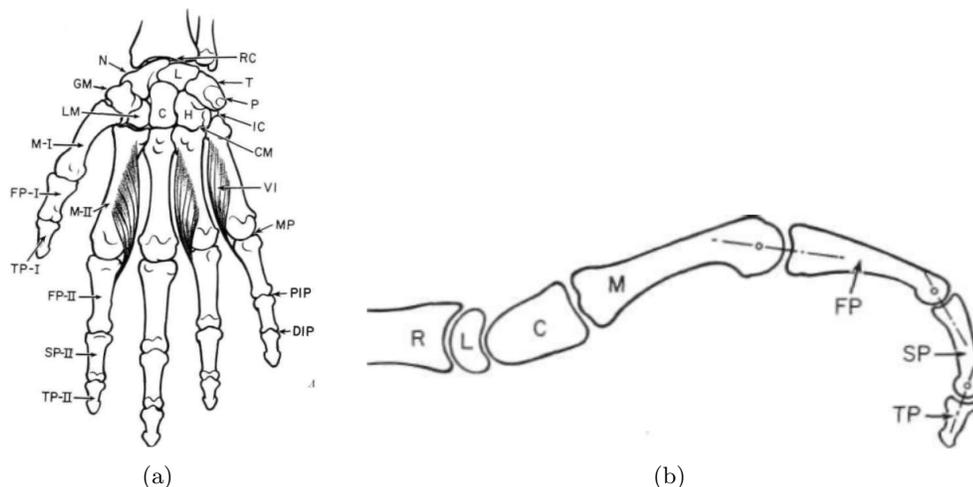


Figura 2.2: (a) Huesos y articulaciones de la mano. (b) Sección del dígito **III** desde el radio, pasando por los huesos de la mano, hasta la última falange. Fuente [3].

El pulgar esta compuesto por tres huesos: falange distal (DP), falange proximal (PP) y el hueso metacarpiano (MB). Las falanges DP y PP están unidas por el DIP, y la falange PP está unida al MB por la articulación MCP, que posee dos DoF. El MB a su vez esta unido a los huesos carpianos por la articulación trapezometacarpiana con dos DoF que generan la aducción y abducción del pulgar. En total el pulgar posee 5 DoF independientes.

Cada articulación de los dedos esta actuada de forma antagónica, es decir, posee un tendón flexor y un tendón extensor. Esto debido a que los músculos solo pueden generar fuerza al contraerse. Por

²Los grados de libertad representan la cantidad de parámetros que definen la posición y orientación de un cuerpo sólido en el espacio.

esto, y por las características no lineales en la elasticidad de los músculos y tendones, es que se puede controlar la rigidez de las articulaciones, contrayendo músculos agonistas y antagonistas al mismo tiempo [10]. Este aspecto de la mecánica de las manos será fundamental para explicar el diseño propuesto en esta tesis.

2.1.2. Taxonomía de agarres

Analizar la taxonomía de los tipos de agarre que tiene una mano artificial es una buena forma de entender sus capacidades, al compararla con los tipos de agarre que tiene una mano humana. Feix et al. [4] analizaron 22 estudios de taxonomía de agarres humano y se sintetizaron en una taxonomía llamada *The GRASP Taxonomy*. Los agarres fueron en un comienzo estudiados por Landsmeer et al. [11], donde se diferenciaron agarres de potencia y de precisión. Más adelante se agregaron los agarres intermedios para una diferenciación más fina. Las definiciones de estos y otros conceptos relevantes es dada a continuación:

Agarre / *Grasp* es una posición estática de la mano, en donde un objeto puede ser sujetado de manera segura, independiente de la orientación esta. E.g. un objeto posado sobre una mano estirada no es un agarre, ya que si cambia la orientación de la mano, el objeto puede caer y deja de estar agarrado.

Agarre de potencia / *Power Grip* se refiere a agarres rígidos entre la mano y el objeto. Todo movimiento del objeto agarrado se realiza moviendo el brazo. E.g. agarrar una raqueta de tenis o un objeto cilíndrico pesado.

Manipulación de precisión / *Precision Handling* es un agarre en donde el objeto puede ser manipulado solo con movimientos de los dedos, por ejemplo un lápiz o aguja.

Agarre intermedio / *Intermediate Grasp* es un agarre en donde se aprecian elementos del *power grip* y del *precision handling* en proporciones similares, por ejemplo al tomar palitos de sushi: un palito puede ser movido por un dedo para agarrar una pieza de sushi, pero el otro palito debe mantener una posición rígida con respecto a la mano para poder cumplir su función.

Dedo virtual / *Virtual Finger* se abrevia *VF* por sus siglas en inglés y se refiere al dedo o al conjunto de dedos que afirman el objeto en sentidos opuestos. Se llama dedo virtual ya que puede estar generado por uno o muchos dedos, así como también puede existir uno o más dedos virtuales en una acción, dependiendo del tipo de agarre.

Oposición / *Opposition* se refiere al lugar donde se apoya el objeto al momento de ser agarrado. Puede ser de tres tipos: *Pad opposition*, en donde se usan las yemas de los dedos como apoyo; *Palm opposition*, donde el apoyo es sobre la palma de la mano; *Side opposition*, donde el apoyo

es la cara lateral de algún dedo. Según el tipo de oposición, esa parte de la mano se cuenta como un dedo virtual, como se puede ver en la Figura 2.3.

En la taxonomía GRASP se clasificaron los tipos de agarre estudiados basándose en la interacción entre la mano y el objeto. Se descartaron algunos agarres que son redundantes o que no cumplen con la definición dada, y se discute el rol fundamental del dedo pulgar en gran parte de los agarres, debido a su oposición al resto de los dedos cuando está abducido (ver Fig. 2.4).

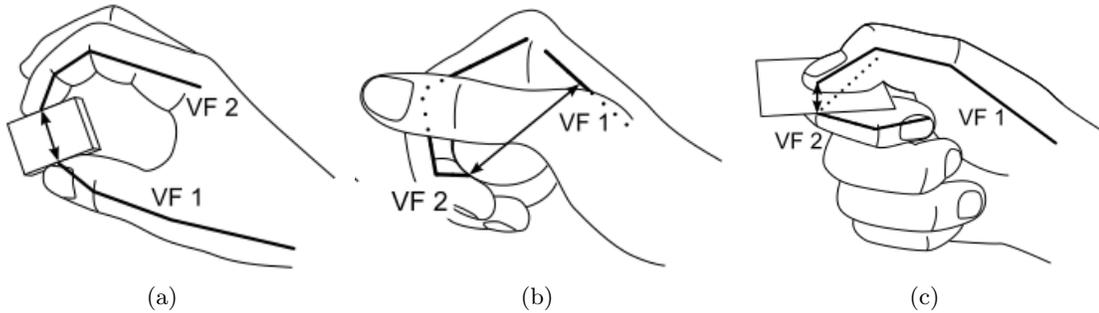


Figura 2.3: (a) Oposición de yema, (b) Oposición de palma, (c) Oposición de lado. Adaptado de [3, p.2].

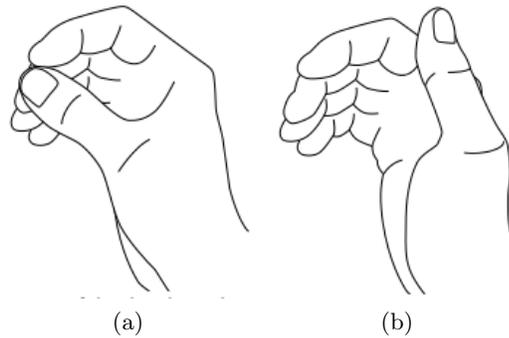


Figura 2.4: (a) Pulgar Abducido, (b) Pulgar Aducido. Adaptado de [3, p.4].

En la Figura 2.5 se puede ver la taxonomía GRASP. Se observa que de los 33 agarres de la taxonomía, aproximadamente un 75 % se pueden realizar sólo con los tres primeros dígitos: pulgar, índice y medio. Para el otro 25 % de los agarres estudiados, por definición se hace necesario utilizar al menos cuatro dedos. Este resultado en particular es muy importante en el desarrollo de este trabajo.

2.2. Manos robóticas antropomórficas

Las manos robóticas o *grippers* pueden ser clasificadas de muchas maneras diferentes dependiendo de su forma, sistema de actuación utilizado, cantidad de motores, grados de libertad (DoF),

		Potencia					Intermedio			Precisión						
		Palma		Yema			Lado			Yema			Lado			
Opp:	VF:	3-5	2-5	2	2-3	2-4	2-5	2	3	3-4	2	2-3	2-4	2-5	3	
Pulgar Abducido		1: Large Diameter 2: Small Diameter 3: Medium Wrap 10: Power Disk 11: Power Sphere	31: Ring	28: Sphere Finger 26: Sphere 4-Finger	18: Extension Type 26: Sphere 4-Finger	19: Distal Type	23: Adduction Grip			21: Tripod Variation	9: Palmar Pinch 24: Tip Pinch 33: Inferior Pincer	8: Prismatic 2 Finger 14: Tripod	7: Prismatic 3 Finger 27: Quadpod	6: Prismatic 4 Finger 12: Precision Disk 13: Precision Sphere	20: Writing Tripod	
	Pulgar Aducido	17: Index Finger Extension 4: Adducted Thumb 5: Light Tool 15: Fixed Hook 30: Palmar						16: Lateral 29: Stick 32: Ventral	25: Lateral Tripod						22: Parallel Extension	

Figura 2.5: Taxonomía GRASP que incorpora 33 tipos de agarre estudiados y filtrados. Las columnas se dividen según agarres de potencia, intermedios y de precisión, tipo de oposición y cantidad de dedos virtuales. Las filas separan los agarres según la posición del pulgar, abducido o aducido. Fuente [4].

entre otros. En este trabajo se analizarán las manos robóticas antropomórficas y posteriormente otras sub-classes.

Las manos robóticas antropomórficas buscan imitar la forma de la mano humana: una palma que sirve de apoyo, y cinco dedos con una, dos o más articulaciones que al cerrarse logran el agarre de un objeto. Existen también un tipo de manos llamadas antropomórficas, ya que que poseen dedos con falanges y articulaciones, pero su estructura no es completamente igual a las manos humanas: tienen menos dedos, dos pulgares, no tiene palma, etc.

Se clasificarán las manos antropomórficas en cuatro clases, según la cantidad actuadores y grados de libertad que posean: manos sub-actuadas, completamente actuadas, sobre-actuadas y manos blandas actuadas por sistemas neumáticos o hidráulicos.

2.2.1. Sistemas completamente actuados y sobre actuados

Los sistemas completamente actuados tienen esta clasificación debido a que poseen un (1) actuador por grado de libertad. Un ejemplo de una mano robótica completamente actuada es la desarrollada por Min et al. [12]. En esta mano se desarrolló un nudillo con una junta universal que permite generar dos grados de libertad en esa articulación. Cada DoF es actuado por un motor mediante cables paralelos que imitan el antagonismo de los músculos de la mano humana. Su diseño propuesto incorpora características similares a las humanas, como la adaptación del agarre debido a acoples semi rígidos entre las articulaciones de las falanges.

El 2006, Gustavo Chacon en su tesis de Magister [13], desarrolla una mano robótica que posee 15 grados de libertad controlados por 15 servomotores diferentes. Para controlar el movimiento de la mano robótica, desarrolla un guante con sensores de flexión en los dedos, de manera de poder medir los movimientos de la mano del usuario y luego convertir esas señales en señales de control para los DoF de los dedos. La mano robótica está fabricada en aluminio sólido y cada articulación de los dedos es movida por un tendón de nailon tirado por un servomotor. Su trabajo se centra en el sistema de control en lazo cerrado de la mano, basado en la estrategia de Superficies Deslizantes, que permite encontrar el valor de un parámetro clave en la convergencia y estabilidad del sistema.

Los sistemas sobre actuados tienen más de un actuador por grado de libertad. En este grupo tenemos por ejemplo la *DLR Hand* del Instituto de Robótica y Mecatrónica del Centro Aeroespacial Alemán (DLR) [14], que solo para la mano cuenta con 19 articulaciones, lo que significa 28 motores para los tendones (19 que flectan y 19 que extienden) y 28 motores para regular elasticidad en cada uno de los tendones (Figura 2.6b). Las ventajas que poseen este tipo de sistemas es la gran destreza que pueden lograr, al controlar independientemente casi todos los grados de libertad que posee una mano antropomórfica. Sin embargo, el sistema de control necesario para actuar la mano completa es muy complejo debido a la gran cantidad de motores que se deben controlar al mismo tiempo. Además, se necesita mucho espacio para albergar todos los componentes electrónicos y mecánicos. En el caso de sistemas actuados neumática o hidráulicamente es aún mayor el espacio necesario. A esto se agrega que el costo puede ser muy elevado, por lo que sólo las desarrollan algunos grandes centros de investigación.



Figura 2.6: (a) Barrett Hand de Barrett Technology, LLC, (b) Awiwi Hand del Instituto Aeroespacial Alemán, (c) iHY Hand de iRobot, Harvard y Yale, (d) RBO Hand de la Universidad Técnica de Berlin, (e) Kinova Hand de Kinova Robotics, (f) Shadow Dexterous Hand de Shadow Robot Company.

2.2.2. Sistemas sub-actuados

Los sistemas sub-actuados son aquellos que poseen menos actuadores que grados de libertad en las articulaciones. Esto implica que no todos los grados de libertad de la mano son controlables directamente. Para el funcionamiento de las manos se agregan elementos pasivos o mecanismos que apoyan el movimiento de las articulaciones no controladas. Un ejemplo claro de un sistema sub-actuado se puede ver en el trabajo de Gosselin et al. [15], en donde se diseñó una mano antropomórfica de 5 dedos, 15 grados de libertad y un solo actuador, obteniendo buenos resultados al tomar objetos grandes con todos los dedos, pero con complicaciones al tratar de ejecutar agarres de precisión del tipo pinza debido a su mismo sistema de actuación.

Belter et al. [16] revisaron seis manos prostéticas antropomórficas comerciales con la finalidad de comparar sus funcionalidades basándose principalmente en el diseño mecánico y en su desempeño en el agarre de objetos. También realizaron una comparación con manos prostéticas antropomórficas creadas en universidades y centros de investigación para darle más completitud al estudio. Todas las manos comerciales que se estudiaron tienen el sistema de actuación y electrónica dentro de los dedos o de la palma de la mano, lo que implica una limitación en el tamaño de los componentes que se pueden utilizar. Así también sólo son controladas por una o dos señales mioeléctricas, lo que obliga a la reducción de DoF que el usuario puede controlar. La mayoría de las manos utiliza motores de corriente continua, con reducción y husillos o tornillos sin fin, para generar el movimiento lineal necesario para mover los dedos, esto básicamente por la simplicidad del control y el poco espacio que ocupan. Cinco de las seis manos tienen sólo dos falanges por dedo, y sus articulaciones MCP y PIP acopladas mecánicamente. Las manos prostéticas analizadas no son muy sofisticadas mecánicamente y cumplen bien su función de imitar la mano humana en la forma. Sin embargo, no son capaces de generar la fuerza que realiza una mano humana debido a sus limitaciones mecánicas.

Deimel et al. [17] presentan una mano antropomórfica blanda, construida con silicona y actuada neumáticamente (Figura 2.6d). Esta mano es sub-actuada debido a que los DoF de sus dedos no están completamente definidos al estar hecha de un material blando. Una gran ventaja que tiene esta mano es su gran adaptabilidad a la forma de los objetos. Para evaluar su funcionalidad se intentó ejecutar los agarres de la Taxonomía GRASP [4], pudiendo realizar 31 de los 33 agarres ahí estudiados.

Una mano antropomórfica que no tiene 5 dedos se presenta en el trabajo de Odhner et al. [18]. La mano fue creada en conjunto entre iRobot, Harvard y Yale, la iHY Hand (Figura 2.6c). Posee tres dígitos: un pulgar con dos falanges y sus dos articulaciones actuadas, y dos dedos normales con dos articulaciones, dos falanges y un solo tendón flexor actuado. Estos dos dedos son capaces de ser aducidos y abducidos para aumentar su espacio de trabajo (como el pulgar humano) utilizando solo un actuador. Su diseño de tres dedos provee una plataforma mínima que puede cumplir tareas complejas de agarre y manipulación. La Barret Hand (Figura 2.6a) posee tres dedos actuados por

servo motores, que poseen un espacio de trabajo similar al de la iHY Hand, pudiendo abducir y aducir dos de sus tres dedos. Esta mano al ser un producto comercial posee una robustez y desempeño que esta muy probado y analizado. Ha sido utilizada, por ejemplo, para generar modelos de contacto entre las manos y los objetos [9], entre otros estudios que están más relacionados a los algoritmos desarrollados para manipulación, que al diseño mismo de la mano. La mano KG-3 de Kinova Robotics [19] es también una de las manos robóticas disponibles en el mercado. Posee tres dedos actuados con un motor DC cada uno y un husillo para generar un movimiento lineal. Los dedos poseen dos falanges y dos DoF cada uno. El acoplamiento mecánico de ambas falanges permite que los dedos se adapten a la forma del objeto manipulado.

Crisman et al. [5] desarrollaron una mano llamada GRASPAR, que posee tres dedos: un pulgar con dos falanges y dos articulaciones, y dos dígitos que poseen tres falanges y tres articulaciones. Cada dedo es actuado por un solo motor, mediante dos tendones fijos en la punta de la DP de cada dedo. El tendón esta ruteado por dentro del dedo con poleas para transmitir la fuerza y generar el movimiento rotacional de las falanges sin generar torsión en las articulaciones, como se aprecia en la Figura 2.7. Los tendones que extienden y flectan un dedo estan acoplados al mismo motor en sentido opuesto: cuando un tendón se tira, el otro se suelta en la misma proporción. Este mecanismo posee la ventaja de ser simple mecánicamente y adaptable a la forma de los objetos que se está tomando. La mano es capaz de tomar diferentes objetos cuando se encuentran dentro de su espacio de trabajo, pero tiene ciertas limitaciones como no poder controlar todos los DoF de los dedos para agarres más precisos.

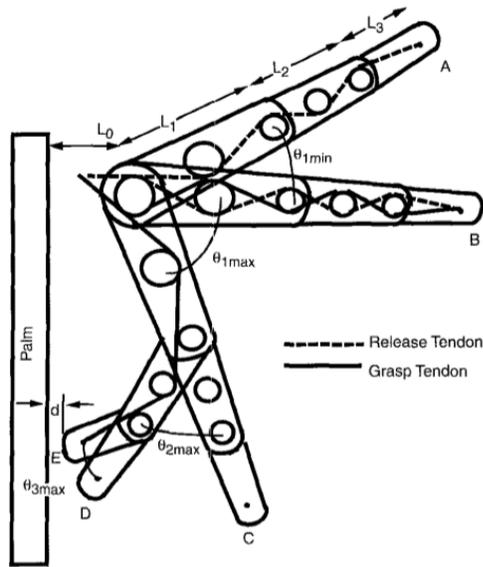


Figura 2.7: Sistema de flexión y extensión de un dedo de la mano GRASPAR. Fuente: [5].

2.3. Actuadores de rigidez variable

Los actuadores de rigidez variable son mecanismos que además de controlar la posición o fuerza que ejercen en un sistema, son capaces de controlar la rigidez de este, es decir, su capacidad de resistir una deformación ante una fuerza externa. Esta aproximación surge de la necesidad de una interacción segura entre humanos y robots. Los sistemas más comunes para entregar rigidez variable a una articulación se componen de dos motores en configuración antagonista, que mueven la articulación en conjunto unidos a ella por un elemento elástico [20]. Los elementos elásticos pueden ser pasivos, como un resorte o varios resortes en serie [21], o activos, utilizando uno o más actuadores que modifiquen el comportamiento lineal de los resortes [22] [23] o elementos elásticos utilizados.

El esquema agonista-antagonista del movimiento de las articulaciones en los animales, y sus propiedades como la rigidez variable, ha llevado a que el estudio de actuadores antagonistas sea muy interesante para investigadores que quieren replicar su comportamiento y aplicarlo en robótica. Un sistema ampliamente estudiado en los últimos años es el utilizar cuerdas torcidas sobre si mismas, o trenzadas, para convertir la fuerza rotacional en fuerza lineal, llamado **Actuación por cuerdas trenzadas** o *TSA* por sus siglas en inglés.

2.3.1. Actuación por cuerdas trenzadas

El uso de cuerdas para transmitir la fuerza en un mecanismo es una técnica muy antigua, que se ha desarrollado históricamente, por ejemplo, los sistemas de poleas. También se puede ver en ejemplos más modernos, como en los sistemas de frenos y cambios de una bicicleta cualquiera, o en los frenos de mano de algunos autos actuales.

En robótica se ha utilizado esta técnica por la ventaja que posee de separar el actuador de la articulación que se desea mover, como cuando un músculo del antebrazo tira un tendón que mueve una falange del dedo meñique. Por la simplicidad de control, y por la confiabilidad en el funcionamiento, este mecanismo generalmente se compone de una cuerda enrollada en el eje de un motor eléctrico DC, o servo motor. Sin embargo, últimamente se ha comenzado a utilizar en robótica el *TSA*, debido a sus características elásticas no lineales, y a su gran razón de reducción, también no lineal, que lo asemejan mucho a un sistema músculo-tendón [24].

El 2011, Godler et al. [25] desarrollaron un estudio cinemático y dinámico de un dedo actuado con un sistema TSA, donde detallaron aspectos técnicos de la construcción de sistema y de su desempeño dinámico. El 2012, Godler et al. [24] analizaron el comportamiento elástico de las cuerdas dentro del rango de operación del sistema y se concluye que posee una rigidez intrínseca, resultado de las características no lineales del TSA. Esta característica puede ser beneficiosa en interacciones de contacto, en donde la adaptación a perturbaciones externas al sistema es realizada pasivamente

por el mecanismo de actuación. Se analizaron además cuerdas de diferentes materiales disponibles en el mercado, concluyendo que uno de los mejores materiales disponibles son las cuerdas hechas de *ultra-high-molecular-weight-polyethylene* (UHMWPE), muy utilizadas en la industria, dispositivos médicos y en la pesca debido a su alta resistencia mecánica y a la gran cantidad de fuerza que soporta, mayor que una cuerda de acero de similares dimensiones, y con una fracción del peso. Más adelante, Sonoda y Godler presentan una mano actuada casi completamente por TSA [7]. Sus conclusiones son positivas para el sistema de actuación, es de bajo costo, liviano y puede ser de tamaño reducido, por lo que es posible hacer una mano con buenas prestaciones utilizando el sistema propuesto. Tavakoli et al. [26] presentaron otra mano actuada con TSA, esta vez, sólo utilizaron tres actuadores y un sistema de acoples mecánicos para actuar 10 DoF.

Palli, et al. [27] presentaron el desarrollo de la mano DEXMART, que utiliza cuatro tendones por dedo, dos para actuar la articulación MCP, uno para la PIP y uno para extender la mano completa. La articulación DIP está acoplada mecánicamente con la PIP mediante un tendón. Cada uno de los tendones esta actuado por un sistema de TSA independiente, que, más los 4 utilizados para actuar la muñeca, suman 24 actuadores ubicados todos en el antebrazo. En este trabajo se propone un sensor de fuerza que utiliza un receptor y un emisor infrarrojo montados sobre un material flexible y resistente. El sensor es utilizado para medir la tensión de los tendones y es ubicado cerca de donde se monta el motor del TSA.

Jeong et al. [28] desarrollaron una mano antropomórfica utilizando TSA, con un sensor de fuerza similar al desarrollado por Palli et al. pero de menor tamaño y ubicado en la punta de los dedos. Además, agregaron un mecanismo de transmisión variable (embriague) al sistema de cuerdas trenzadas para tener dos modos de movimiento en el dedo: velocidad y fuerza. Utilizando estos dos modos, la mano es capaz de realizar muchas tareas cotidianas, y por su peso total, se concluye que podría ser una muy buena prótesis. Más adelante, Jeong et al. [29] presentan mejoras al diseño del mecanismo de actuación TSA con transmisión variable, más compacto y simplificado, lo que permite el desarrollo de una mano antropomórfica compacta y efectiva. Sin embargo, concluyen que la discontinuidad inherente del cambio de transmisión mecánica entre los modos de velocidad y fuerza evita que la solución propuesta sea ideal para los sistemas robóticos del futuro.

Es importante destacar que en estos trabajos mencionados, exceptuando en desarrollado por Palli et al. [27], el sistema de actuación TSA solo se presenta en la flexión de los dedos. La extensión de los dedos en los otros tres trabajos se realiza con elementos elásticos pasivos. En todos los trabajos anteriores se concluye que el sistema TSA presenta muy buenas prestaciones al momento de ser aplicado en una mano robótica. Es relativamente barato, liviano, y debido a que sólo necesita un motor eléctrico para funcionar, su control no supone mayores desafíos.

También se han realizado otros modelos de TSA y se han ocupado en otro tipo de articulaciones. Popov et al. [30] modelaron el sistema TSA para n cuerdas, y desarrollaron una articulación que

imita un codo humano. En este caso, el sistema si posee un actuador protagonista y un antagonista, obteniendo buenos resultados en el control de posición del codo.

El 2011, Vallejos [20] propone en su tesis de doctorado una metodología de diseño de caminatas para robots semi-pasivos, y parte de los requerimientos del sistema es la libertad de poner los actuadores en cualquier parte del mecanismo. Cumpliendo con este requisito, para probar la metodología, se diseño un robot semi-pasivo que es capaz de caminar, utilizando articulaciones actuadas de forma antagónica con el mecanismo TSA. El 2016, Galilea [31] construye el robot entero y analiza las capacidades de los actuadores, articulaciones y de la caminata del robot, concluyendo que debido al rango dinámico de los actuadores el robot es capaz de operar a las frecuencias dentro del intervalo de caminata humano.

No solo se han desarrollado manos antropomórficas o articulaciones usando TSA. Schlesiger et al. [32] desarrollaron un robot para endoscopia que utiliza el sistema TSA para controlar el movimiento del robot y se propone un control de lazo cerrado del desplazamiento del tendón utilizando un sensor de posición óptico de bajo costo. Se discute sobre las propiedades elásticas que presenta el sistema TSA y cómo este es afectado por la carga en la salida del sistema. Concluyen que con un control de lazo cerrado se puede compensar el error de posición del tendón que agrega una carga desconocida debido a la elasticidad del sistema TSA. Tsabedze et al. [33] desarrollaron un guante asistivo robótico que funciona mediante un sistema de actuación por cuerdas trenzadas, y probaron su capacidad de manipulación de objetos utilizando una mano impresa en 3D (sin movimientos propios) y una mano humana sana. Concluyen que el guante genera suficiente fuerza, es compacto y de baja rigidez, que lo hacen potencialmente bueno para rehabilitación y aumentación de capacidades humanas.

2.4. Manipulación de objetos

2.4.1. Fuerza de agarre y sentido

Kim et al. [34] analizaron las fuerzas de agarre que realiza una mano humana, y cómo la mano controla el agarre en base al sentido de la fuerza de fricción entre el objeto y la piel, aumentando la fuerza cuando el objeto se desliza en la mano. Se menciona la importancia del roce estático en los agarres determinado por la superficie del objeto agarrado. Proponen un modelo de control de fuerza de agarre basado en el cambio de la fuerza de fricción de la mano y concluyen que para lograr agarres estables es necesario integrar sensores de fricción en las yemas de los dedos o un sensor de aceleración del desplazamiento del objeto similar a los de la piel humana.

Calderon et al. [35] desarrollaron un sensor blando que utiliza un circuito deformable mediante un conductor líquido (EGaIn) que permite medir deformación y presión simultáneamente. El sensor es utilizado en el lazo de control que permite el movimiento de un robot blando inspirado en un

gusano. Cho et al. [36] integraron sensores EGeIn en las yemas de los dedos de una mano robótica blanda para monitorear las fuerzas de agarre de la mano. El cambio de resistencia, debido a la presión aplicada, permite el reconocimiento de las condiciones del agarre y del peso del objeto agarrado.

2.4.2. Evaluación de la manipulación en manos robóticas

Con la finalidad de evaluar comparativamente las capacidades de manipulación de diferentes grippers robóticos, Calli et al. [6] desarrollaron el conjunto de objetos Yale-CMU-Berkley (YCB Object Set). El conjunto fue diseñado para cubrir diferentes aspectos del problema de manipulación: incluye objetos de uso cotidiano de diferentes tamaño, forma, textura, peso y rigidez, además de varios objetos utilizados ampliamente en pruebas de manipulación (ver Figura 2.8). La base de datos asociada al conjunto de objetos contiene modelos de los objetos en alta resolución obtenidos con sensores RGBD, propiedades físicas y modelos geométricos de los objetos para integrar de manera fácil en plataformas de software de planificación y manipulación.

También proponen protocolos de evaluación que ejemplifican como puede ser utilizado el conjunto de objetos para evaluar cuantitativamente diferentes enfoques de manipulación que incluyen planificación, aprendizaje, diseño mecánico y control, entre otros [37]. En particular, el *Gripper Assessment Protocol* define un procedimiento para evaluar la capacidad de una mano de agarrar de manera segura diferentes tipos de objetos. El *Gripper Assessment Benchmark* define una referencia para comparar los resultados de agarre en base a una tabla de puntajes. Este protocolo y *benchmark* serán tomados como referencia para diseñar los experimentos que permitirán evaluar el agarre de la mano diseñada.



Figura 2.8: Ejemplo de objetos del conjunto YCB: Alimentos en la esquina superior izquierda, herramientas en la esquina superior derecha, utensilios de cocina en la esquian inferior izquierda y objetos con diferentes forma en la esquina inferior derecha. Fuente: apdaptado de [6].

3 Marco teórico

3.1. Actuación por cuerdas torcidas TSA

Como fue mencionado en el Capítulo 2, el sistema de actuación por cuerdas trenzadas (TSA) ha sido muy utilizado últimamente en robots antropomórficos debido a sus características de alta transmisión mecánica y elasticidad intrínsecas, similares a las del sistema músculo-tendón que tenemos los humanos. En esta sección se detallan las ecuaciones que rigen el comportamiento del sistema para dos cuerdas torcidas.

En la Figura 3.1 se puede ver un esquema básico del TSA: dos cuerdas conectadas en un extremo a un motor, se tuercen sobre si mismas generando una fuerza lineal, paralela al eje de rotación, que desplaza hacia el motor el objeto conectado en el otro extremo.

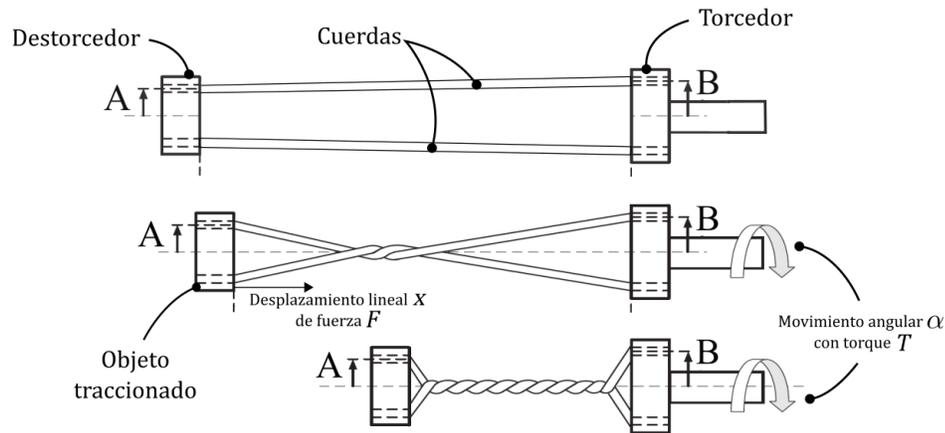


Figura 3.1: Esquema de funcionamiento del sistema TSA (fuente: adaptado de [7])

Se denomina *destorcedor* al objeto móvil que es traccionado por la cuerda trenzada, que asumimos es simétrico en un eje perpendicular al eje de rotación del motor y donde las dos cuerdas del sistema están fijas. Se denomina *torcedor* a la pieza donde esta fija la cuerda en el lado del motor, y que gira solidario al motor. A es la distancia entre el eje de rotación del motor y la cuerda fija en el destorcedor, B es la distancia entre el eje de rotación del motor y la cuerda fija en el torcedor.

3.1.1. Modelo de cinemática y dinámica

Si se analiza la geometría de una de las cuerdas del sistema desenrollada (ver Fig. 3.2), se pueden obtener las ecuaciones cinemáticas y dinámicas del comportamiento del actuador. α representa el ángulo de rotación del motor en radianes, L representa el largo inicial de la cuerda desenrollada, R es el radio de la cuerda, y β es el ángulo que forma la cuerda con el plano perpendicular al eje del motor, al enrollarse por acción del motor.

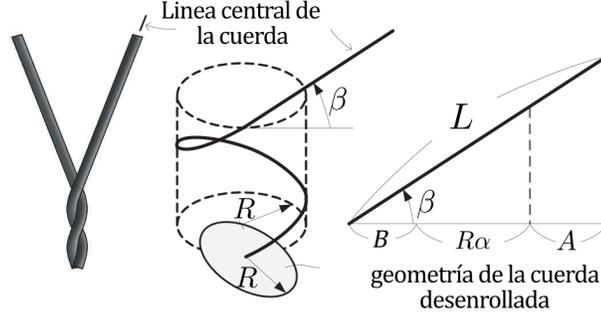


Figura 3.2: Geometría de una cuerda desplegada (fuente: adaptado de [7])

Siendo $\sqrt{L^2 - (A - B)^2}$ la distancia inicial entre el torcedor y el destorcedor, y $R\alpha$ el tramo de cuerda que se tuerce por acción de la rotación del motor, podemos obtener $x(\alpha)$ que representa la distancia paralela al eje del motor que se desplaza el objeto traccionado en función de α . A su vez, $\dot{x}(\alpha)$ representa la velocidad del objeto traccionado.

$$x(\alpha) = \sqrt{L^2 - (A - B)^2} - \sqrt{L^2 - (A + B + R\alpha)^2} \quad (3.1)$$

$$\dot{x}(\alpha) = \frac{R(A + B + R\alpha)}{\sqrt{L^2 - (A + B + R\alpha)^2}} \dot{\alpha} \quad (3.2)$$

Asumiendo un 100 % de eficiencia mecánica, de la ecuación de conservación de energía en un sistema de transmisión mecánico $T\dot{\alpha} = F\dot{x}$, en donde T es el torque de entrada del sistema, $\dot{\alpha}$ es la velocidad angular del motor, F es la fuerza en la salida del sistema y \dot{x} es la velocidad lineal en la salida, se obtiene la razón de transmisión RT del sistema mecánico que convierte un movimiento rotacional en uno lineal

$$RT = \frac{F}{T} = \frac{\dot{\alpha}}{\dot{x}(\alpha)} = \frac{\sqrt{L^2 - (A + B + R\alpha)^2}}{R(A + B + R\alpha)} \quad (3.3)$$

Cuando las cuerdas son torcidas de manera uniforme, existe un máximo de vueltas que puede dar el motor, luego de este límite las cuerdas comienzan a sobre-torcerse, o doble-torcerse sobre si mismas. En este momento la fuerza lineal generada no aumenta significativamente, aunque la

cuerda puede seguir torciéndose. El límite α_{max} está dado por la ecuación 3.4:

$$\alpha_{max} = \frac{\pi L - (A + B)\sqrt{\pi^2 + 4}}{R\sqrt{\pi^2 + 4}} \quad (3.4)$$

Alcanzando la máxima cantidad de vueltas que puede torcerse la cuerda, la distancia máxima x_{max} que se puede desplazar el objeto traccionado está dado por la ecuación 3.5:

$$x_{max} = x(\alpha_{max}) = \sqrt{L^2 - (A - B)^2} - \frac{2L}{\sqrt{\pi^2 + 4}} \quad (3.5)$$

De acuerdo con la definición de rigidez $\delta F/\delta x$, se puede obtener, de la ecuación (3.3), la rigidez cinemática del sistema de actuación por cuerdas trenzadas. Dado que el desplazamiento x no aparece explícitamente en (3.3), se usa la derivada indirecta

$$\frac{\delta F}{\delta x} = \frac{\delta F}{\delta \alpha} \frac{\delta \alpha}{\delta x} = \frac{\frac{\delta F}{\delta \alpha}}{\frac{\delta x}{\delta \alpha}}, \quad (3.6)$$

donde

$$\frac{\delta F}{\delta \alpha} = -\frac{L^2 T}{(A + B + R\alpha)^2 \sqrt{L^2 - (A + B + R\alpha)^2}}, \quad (3.7)$$

y de la ecuación (3.2)

$$\frac{\delta x}{\delta \alpha} = \frac{R(A + B + R\alpha)}{\sqrt{L^2 - (A + B + R\alpha)^2}}, \quad (3.8)$$

con lo que se obtiene

$$\frac{\delta F}{\delta x} = -\frac{L^2 T}{R(A + B + R\alpha)^3} \quad (3.9)$$

La ecuación (3.9) describe la relación derivativa entre el desplazamiento x y la fuerza F ejercida por la cuerda trenzada sobre el objeto traccionado, para un punto α del rango de operación del TSA, dado un torque T del motor. El signo negativo de la ecuación es resultado de que los vectores de desplazamiento y de fuerza tienen el mismo sentido, a diferencia de un resorte convencional, en donde el desplazamiento tiene sentido opuesto a la fuerza que ejerce el resorte.

Este comportamiento elástico es resultado directo de la razón de transmisión no-lineal del sistema TSA, y puede ser muy beneficioso para las aplicaciones en robótica blanda. En los sistemas de

transmisión mecánicas que tienen una razón de transmisión constante, el balance entre una fuerza externa y el torque generado en el motor, generalmente es realizado por la dinámica del sistema de control. En el caso del TSA, bajo una fuerza externa, el sistema puede balancearse pasivamente en otro punto de operación, incluso sin variar el torque realizado por el motor.

Esta característica del TSA puede ser especialmente útil en aplicaciones de contacto donde se requiera interacciones con humanos, donde la adaptación a fuerzas o perturbaciones externas es realizada pasivamente por el mecanismo, simplificando los requerimientos dinámicos de los sistemas de control.

3.2. Controladores PID

Para controlar el sistema mecánico recién descrito se utilizan principalmente motores eléctricos, además de sensores de posición para contar el número de vueltas. Esto permite construir un sistema de control para el ángulo α , el cual determina el punto de operación del actuador TSA.

El control PID es un esquema de control de sistemas muy utilizado en la industria debido a su confiabilidad para controlar sistemas y su simplicidad de construcción. Este esquema está diseñado para sistemas de lazo cerrado, donde existe una realimentación desde la planta controlada al controlador. En la figura 3.3 se puede ver un esquema básico de un controlador PID, la planta controlada y la realimentación de la salida del sistema hacia el controlador.

PID es un acrónimo de Proporcional, Integral y Derivativo. Este controlador posee tres parámetros que determinan su comportamiento:

- **Proporcional:** el término K_p aporta a la salida una señal proporcional al error entre la referencia y el valor actual del proceso. Un valor bajo en este parámetro puede generar error estacionario. Un valor alto de este parámetro entrega una rápida respuesta al sistema pero puede generar sobrepaso del valor de referencia e inestabilidad.
- **Integral:** este término K_i está relacionado con la suma del error de los estados anteriores. Aporta al sistema un nulo error de estado estacionario. Un valor muy grande de este parámetro genera sobrepaso y mayor tiempo de estabilización del sistema.
- **Derivativo:** este término K_d está relacionado con la tasa de cambio del error. Su principal aporte en el sistema es la disminución del sobrepaso cuando existen cambios muy repentinos en el estado del sistema o en la referencia.

Un método utilizado para la sintonización de los parámetros de control K_p , K_i y K_d es el llamado *método empírico* o de prueba y error, que consiste en experimentar con diferentes parámetros hasta

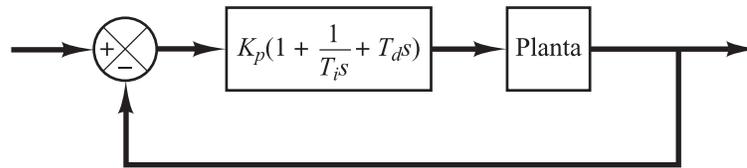


Figura 3.3: Control PID de una planta. Fuente: Ogata [8].

encontrar los que generen una buena respuesta al error de escalón. Para este método empírico, Lynch et al. [38] recomiendan seguir algunas reglas básicas:

- **Error de estado estacionario:** Si el error es muy grande, se recomienda aumentar el término K_p . Si aún persiste el error, se debe considerar agregar un K_i mayor que cero.
- **Sobrepaso y oscilación:** Si hay mucho sobrepaso y oscilación en el sistema, se puede aumentar el término K_d , o la razón K_d/K_p .
- **Tiempo de estabilización:** Si el sistema se demora mucho en estabilizarse, se puede probar aumentando simultáneamente K_p y K_d .

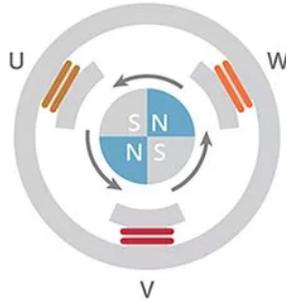
3.3. Motor BLDC

Un motor de corriente continua sin escobillas o BLDC (del inglés *Brushless Direct Current*) es un tipo de motor síncrono que a diferencia del motor de corriente continua (DC) común, conmuta de manera electrónica y no mecánica debido a que no posee escobillas, ya que las bobinas donde se produce el campo magnético están ubicadas en el estator del motor y los imanes permanentes están en el rotor. De esta forma, el motor BLDC es más eficiente, ya que no hay pérdidas de energía por roce y tiene mayor vida útil, ya que no hay carbones o escobillas que se desgasten con el funcionamiento, lo que es la principal fuente de fallas en los motores DC.

Como se mencionó, la conmutación para un motor BLDC se realiza de manera electrónica. En la figura 3.4b se muestra un esquema de conmutación, en sentido horario, para el motor BLDC mostrado en la figura 3.4a.

Cada una de las seis etapas de conmutación representa un estado del motor, es decir, una posición del rotor con respecto al estator. Si se encuentra en el estado 1, se levanta la bobina **U** y se baja la bobina **V**. La bobina **W** en este caso se deja flotante. Al repetirse este paso, para todos los 6 estados del rotor, se completa una rotación mecánica del motor. De la corriente que se le entregue a cada bobina en cada paso, y de la frecuencia de la conmutación, dependen el torque y velocidad del rotor.

Para realizar la conmutación, es necesario conocer la posición actual del rotor. El sensado de la



(a) Diagrama de un motor BLDC con tres fases y dos pares de polos. U , V y W son tres bobinas desfasadas en 120 físicamente. Fuente [39]

	U	V	W
1	HIGH	LOW	-
2	HIGH	-	LOW
3	-	HIGH	LOW
4	LOW	HIGH	-
5	LOW	-	HIGH
6	-	LOW	HIGH

(b) Seis etapas de conmutación para un motor BLDC de tres fases.

Figura 3.4: Esquema de funcionamiento de un motor BLDC, junto a su patrón de 6 pasos para la conmutación.

posición del rotor con respecto al estator se realiza de dos formas comúnmente: utilizando sensores de efecto Hall para conocer la posición actual del motor, o sensando la fuerza electromotriz *Back EMF* generada en la bobina que no esta encendida.

Ambos métodos para obtener la posición del rotor tienen sus complicaciones, sin embargo, muchos fabricantes de motores BLDC están incluyendo los sensores de efecto hall en los estatores, cuyas señales se alimentan a los controladores para realizar la conmutación del motor, y además, permiten la lectura de la posición relativa del motor, su dirección y velocidad de giro.

4 Diseño y control de la mano

En este capítulo se plantean criterios para el diseño de la mano y los TSA. Se presenta el diseño de la mano y del sistema de actuación por cuerdas trenzadas, y se describen los sistemas implementados para controlar la mano robótica.

4.1. Criterios de diseño

4.1.1. Mano robótica

Se quiere diseñar una mano robótica antropomórfica, es decir, que sea similar a una mano humana en forma o capacidades. Además, la mano y los sistemas de actuación TSA deberán ser livianos, para evitar sobrecargar los motores del brazo del robot.

La mano tiene que ser capaz de agarrar de manera segura, diferentes tipos de objetos variados en forma, dimensiones, peso y rigidez. Además, y no obstante, se espera que la mano robótica pueda agarrar, sin deslizamiento, una botella de tamaño regular, de 1Kg de masa.

Analizando la taxonomía de Feix [4], aproximadamente 75% de los agarres ahí categorizados se pueden realizar solo con el pulgar, índice y medio. En base a esto se decidió diseñar la mano antropomórfica con tres dedos en vez de cinco, ya que los dedos anular y meñique no aumentan significativamente las funcionalidades de la mano, aumentan el peso y además complican el diseño, fabricación, y el control de ésta.

Según Kim [34], el coeficiente de roce estático entre la superficie del objeto y la mano humana es clave en realización de un agarre, y si es bajo, la fuerza de agarre debe aumentar para evitar el deslizamiento del objeto entre los dedos. Por lo tanto, la superficie de la mano deberá tener un coeficiente de roce alto, que permita un agarre seguro.

El sistema propuesto será fabricado utilizando tecnologías de fabricación digital, en particular impresión 3D por deposición fundida (FDM por las siglas en inglés de *Fused Deposition Modeling*), debido a su bajo costo y por que es un proceso de manufactura relativamente rápido, que

permite iterar configuraciones mecánicas y prototipos en poco tiempo, a pesar de la complejidad de las piezas diseñadas. Además, tiene la ventaja de que se pueden imprimir piezas con densidad variable. Dependiendo de la funcionalidad de cada pieza del sistema, se utilizarán diferentes tipos de plásticos que permitan el correcto funcionamiento de las partes, en particular, ácido poliláctico (PLA) y PETG. El plástico impreso en impresoras FDM es rígido y tiene un acabado superficial con rugosidades más o menos finas dependiendo de la resolución de la impresión y del tamaño de la boquilla utilizada. Sin embargo, esas rugosidades no generan mayor roce al contacto con otras superficies. Para lograr un agarre seguro, es necesario agregar a cada falange de los dedos y a la palma, fundas de silicona que aumenten el coeficiente de roce estático entre la mano y el objeto, tal como lo hace la piel humana.

En la tabla 4.1 se resumen las decisiones tomadas en base a los requerimientos de diseño de la mano.

Forma de la mano	Tres dedos: pulgar, índice y medio, con dimensiones de una mano humana.
Capacidad de agarre	La mano debe agarrar una botella regular de 1Kg de masa como máximo.
Manufactura	La mano será impresa en 3D, en PLA o PETG, dependiendo de la funcionalidad de la pieza.
Superficie de contacto	Se agregarán fundas de silicona para aumentar el coeficiente de roce en el agarre.

Tabla 4.1: Resumen de decisiones tomadas para el diseño de la mano robótica.

4.1.2. Sistemas de actuación TSA

Para hacer un control del movimiento de cierre y apertura de los dedos se tiene que tener un tendón agonista, que al tirarse flexa o cierra el dedo, y un tendón antagonista que al tirarse extiende o abre el dedo [10]. En base a esto se propone utilizar dos actuadores TSA por dedo, uno para el tendón extensor y uno para el tendón flexor. Estos actuadores TSA deben ser capaces de abrir y cerrar completamente los dedos de la mano.

Al necesitar dos sistemas de actuación TSA por dedo, se necesitarán seis TSA para mover la mano completa. Estos deben caber en un espacio reducido y deben pesar lo menos posible. Además, para realizar un control de la tensión del tendón que flexa el dedo, es necesario agregar un sensor que permita medir la tensión en alguna parte del sistema mecánico.

Para la realización del sistema de actuación se estudió y utilizo de referencia el modelo TSA desarrollado por Godler et al. [24], que requiere que el destorcedor de la cuerda sea el objeto móvil donde se ejerce la fuerza lineal del actuador.

Con tal de no ejercer una carga en el eje del motor, es necesario agregar un rodamiento al sistema que soporte la carga del TSA. Además, por las imperfecciones que puedan existir en la fabricación de las piezas, el eje del motor con el eje del rodamiento podrían quedar desalineados, por lo que es necesario agregar un acoplamiento del tipo cardan o flexible, que permita transmitir la fuerza de torsión del motor hacia la cuerda.

En base a los requerimientos definidos anteriormente, en la Tabla 4.2 se resumen las decisiones tomadas que guiarán el diseño de los TSA.

Cantidad de actuadores	Se utilizarán dos TSA por dedo, uno para la flexión y otro para la extensión. Seis TSA en total.
Rango de movimiento	Los TSA deben cerrar y abrir completamente los dedos.
Modelo de actuador	Desarrollado por Godler et. al, requiere que el destorcedor sea móvil.
Desacople mecánico	Se utilizará un acople tipo cardán para transmitir la fuerza del motor a las cuerdas trenzadas.

Tabla 4.2: Resumen de decisiones tomadas para el diseño de los TSA.

4.2. Diseño mecánico

4.2.1. Diseño de la Mano

La mano está compuesta por la palma y los dedos. La palma esta compuesta de tres piezas: palma base, nudillos y pivote MB. Los nudillos y el pivote MB están fijos en la palma base. La palma base sirve como soporte para los tres dedos además de funcionar como un dedo virtual o VF, que genera la oposición a los dedos en algunos agarres. Los nudillos soportan los dedos índice y medio y generan la articulación MCP en cada uno de ellos. El pivote MB soporta el dedo pulgar y genera la articulación MCP de este dedo. En la figura 4.1 se puede ver el diseño de la mano con sus diferentes componentes.

Al ser los dedos actuados mediante tendones, se puede separar el sistema de actuación de los dedos utilizando fundas guía para transmitir la fuerza y el movimiento desde el sistema TSA hasta los dedos, tal como funciona un freno mecánico de una bicicleta, que utiliza una funda que guía la piola desde la manilla de freno hasta las herraduras que se aprietan contra la llanta de la bicicleta para frenar.

Las fundas que guían los tendones de los dedos índice y medio pasan por dentro de la palma como se muestra en la Figura 4.1b, en donde la línea roja representa el tubo guía del tendón extensor y la línea azul representa el tubo del tendón flexor. Las guías de los tendones del pulgar pasan por el agujero del centro de la palma como se ilustra en la figura 4.1d, donde las líneas de color rojo y azul representan los tubos guías de los tendones extensor y flexor, respectivamente.

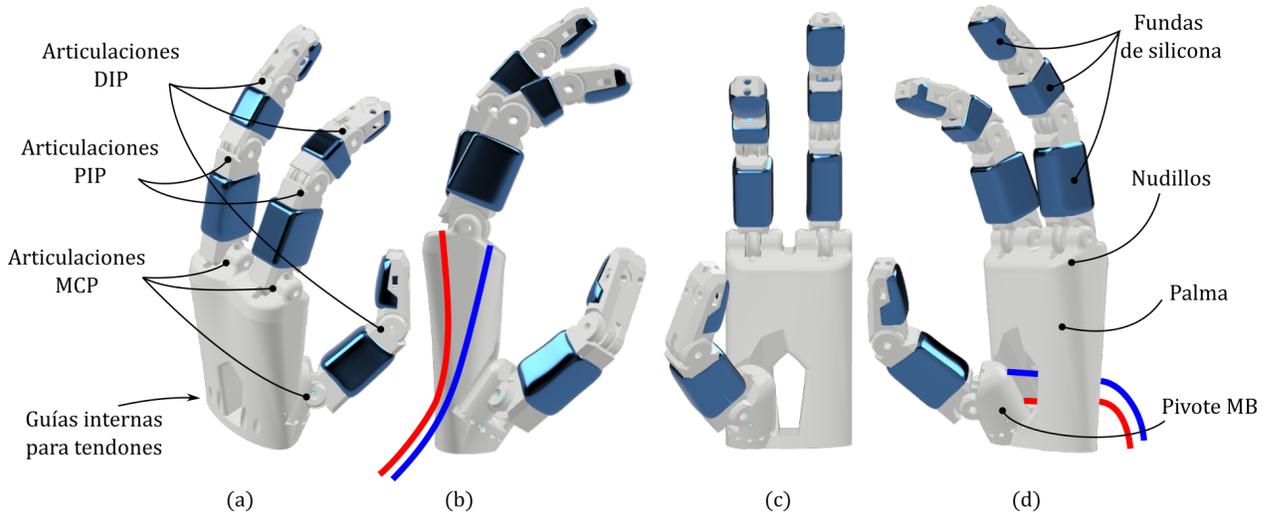


Figura 4.1: Imagen de la mano renderizada del software CAD con indicaciones.

Las guías de los tendones desde el sistema de actuación TSA hacia las articulaciones MCP de los dedos son un tubo de teflón de 3 mm de diámetro exterior y 1.5 mm de diámetro interior. Fue escogido este material por el bajo roce que genera en contacto con el tendón, necesario para no disminuir significativamente la fuerza que se transmite desde el sistema de actuación hacia el dedo. El roce entre el tendón y el tubo guía será mayor mientras más largo sea el tubo, por lo que la distancia entre la mano y los TSA debe ser pequeña.

4.2.1.1. Diseño de los dedos

Para que la mano tenga las dimensiones de una mano humana, se tomó como referencia el trabajo realizado en 2012 por Binignat et al [1], en donde se estudian aspectos biométricos de la mano de individuos chilenos, en particular, las dimensiones de las manos, dedos y falanges. En la Tabla 4.3 se muestran el largo de las falanges de los dedos de la mano izquierda de hombres chilenos entre 24 y 29 años, nacidos en la VII región del Maule.

Dígito	FP	FM	FD
I Pulgar	42±7	-	34±5
II Índice	51±13	31±7	25±4
III Medio	55±14	36±8	27±4
IV Anular	45±12	32±7	23±2
V Meñique	37±10	23±3	20±2

Tabla 4.3: Largo de las falanges proximal, media y distal de los dedos humanos en mm. Adaptado de [1, tablas IV, VI y VIII] .

De Klopsteg et al. [3] se sabe que el centro de giro de las articulaciones *MCP*, *PIP* y *DIP* es virtual y se encuentra en el centro de curvatura del extremo distal del *MB*, *PP* y *MP*, respectivamente, como se muestra en la figura 2.2b, esto sirvió como inspiración para diseñar el acople de las

articulaciones y dimensionar las falanges adecuadamente.

Los dedos índice y medio tienen tres falanges: proximal *PP*, media *MP* y distal *DP*, y tres articulaciones que imitan las humanas: interfalángica mecatarpeana *MCP*, interfalángica proximal *PIP* y la interfalángica distal *DIP*. Para abrir el dedo se utiliza un tendón que pasa por el interior de cada una de las falanges del dedo, por la parte de atrás de estas. Para cerrar el dedo se utiliza otro tendón que pasa por el interior de las falanges, por la parte de adelante de cada una de estas. En la Figura 4.2 se muestra el camino que siguen los tendones en un dedo, el tendón de color azul es el que flexiona (cierra) y el rojo es el que extiende (abre) el dedo. El dedo índice y medio son iguales en casi todas sus dimensiones, exceptuando el largo de cada falange.

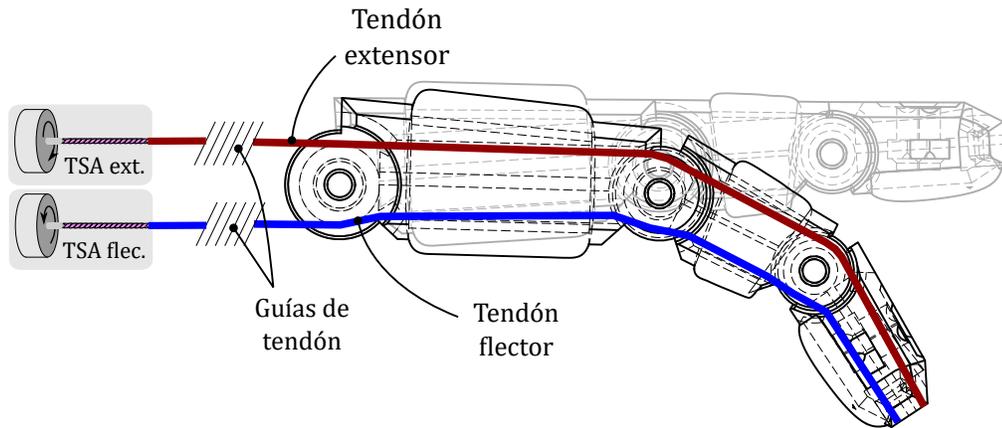


Figura 4.2: Esquema general del sistema de actuación para un dedo y de ruteo de tendones.

En el caso del pulgar, este cuenta con dos falanges: la falange proximal *PP* y la falange distal *DP*; y dos articulaciones: *MCP* y *DIP*. El pulgar humano posee dos DoF en la articulación *MCP*, sin embargo, en este trabajo sólo se agregará el DoF que gira en el plano paralelo a la articulación *DIP* del mismo dedo. El pivote MB puede ser rotado para generar aducción y abducción del pulgar como se puede ver en la Figura 4.3 pero es un DoF que no está actuado. El ruteo de los tendones en el pulgar se realiza de la misma forma que en los dedos índice y medio: el tendón que flexiona el dedo para por la parte de adelante y el que extiende pasa por la parte de atrás del dedo.

Para disminuir al máximo el roce en el tendón al pasar por dentro de las falanges se agregaron tubos de teflón. Las falanges están unidas por ejes de acero plata de 3 mm de diámetro acopladas mediante un rodamiento radial. Para tensionar los tendones en el armado y evitar que deslicen por la fuerza del actuador, son apretados por un perno, una golilla y una tuerca insertada dentro de la falange distal. Los componentes mencionados se pueden ver en la Figura 4.4.

El tubo de teflón que disminuye el roce del tendón flexor dentro de las falanges funciona también como un freno pasivo de las articulaciones superiores de los tres dedos. Para el dedo pulgar, el tubo que está en la falange proximal, al hacer contacto con la falange distal genera roce que permite que al tirarse el tendón se cierre primero la articulación *MCP* y luego la articulación *DIP*. Para el

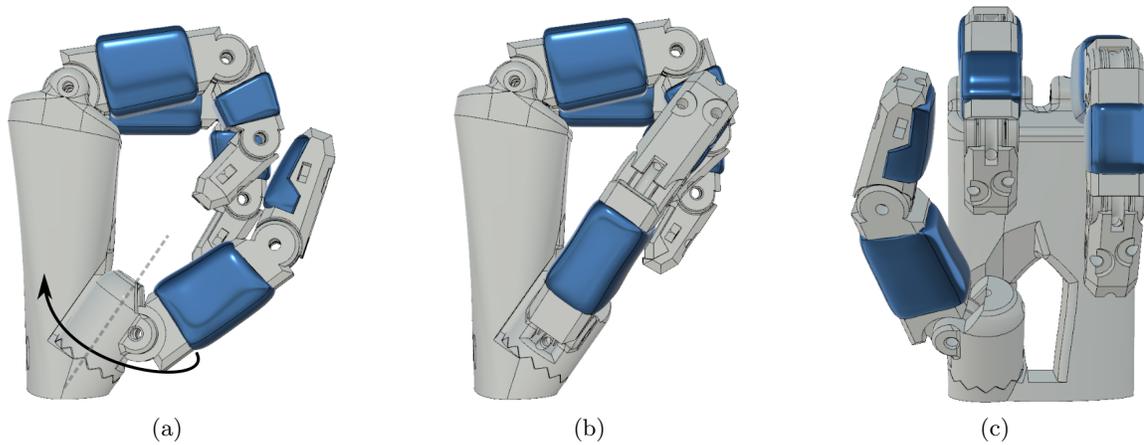


Figura 4.3: Ilustración de la aducción (a) y abducción del pulgar en vista lateral (b) y frontal (c).

caso de los dedos índice y medio, el tubo de teflón de la falange proximal frena la articulación PIP y el tubo de la falange media frena la articulación DIP.

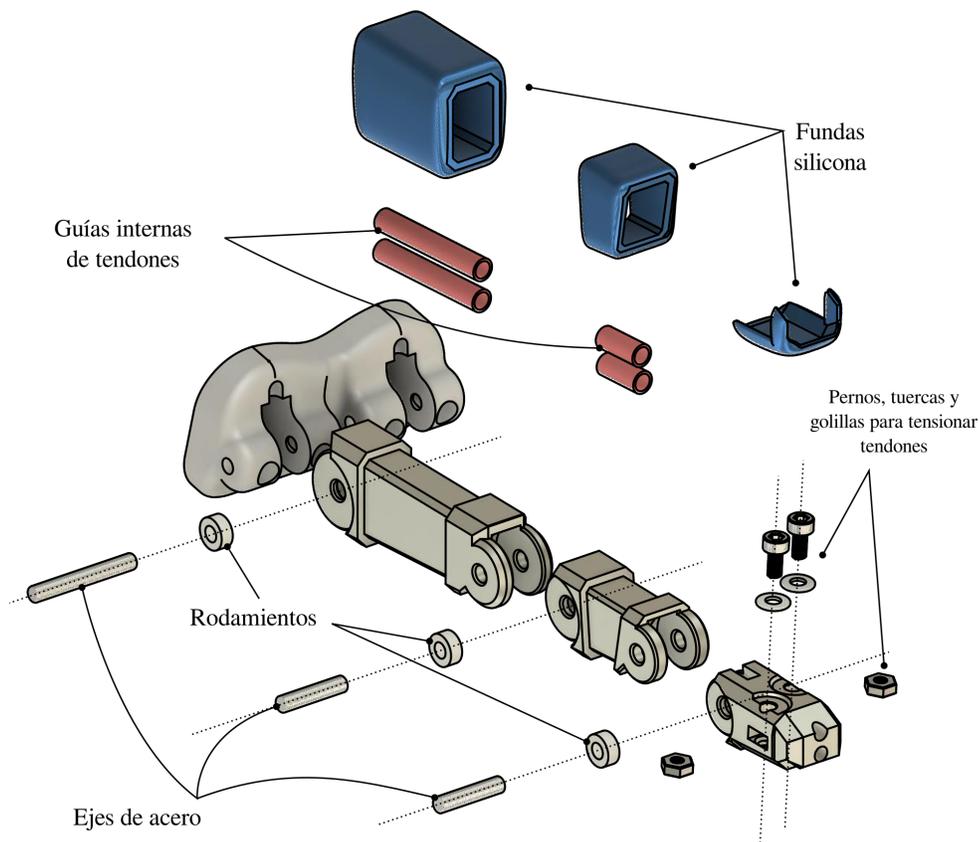
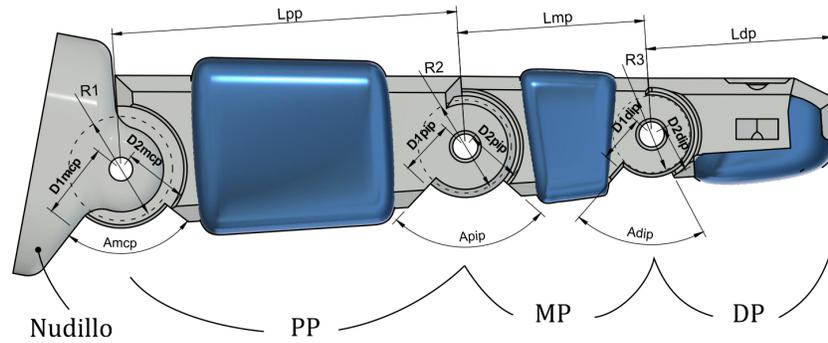


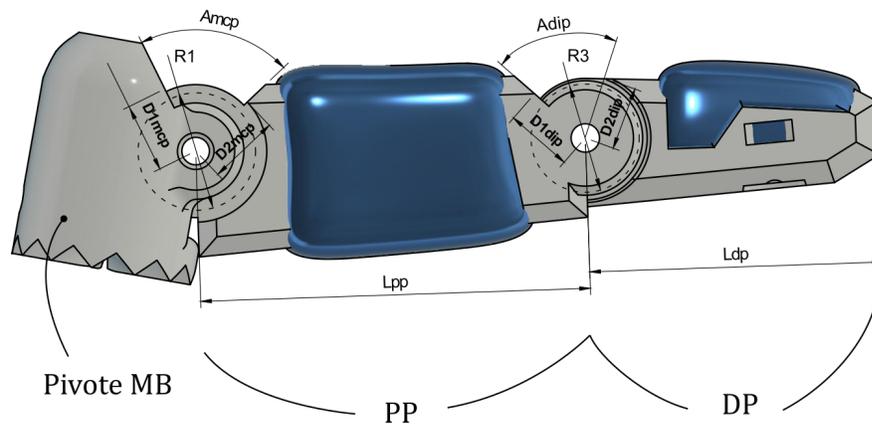
Figura 4.4: Vista explosionada isométrica de un dedo índice con todos sus componentes .

Las dimensiones constructivas de los dedos que tienen incidencia en la cinemática de estos se pueden ver en la Figura 4.5. L_{pp} , L_{mp} y L_{dp} son los largos de las falanges proximal, media y distal, respectivamente. R_1 , R_2 y R_3 son los radios de las poleas en las articulaciones MCP, PIP y DIP,

respectivamente. A_{mcp} , A_{pip} y A_{dip} son los ángulos máximos que rotan las articulaciones MCP, PIP y DIP, respectivamente. Las distancias $D1_{mcp}$ y $D2_{mcp}$ son las distancias entre el pivote de la articulación MCP y los lugares por donde *aparece* el tendón desde la pieza anterior (nudillo) y donde *desaparece* en la pieza posterior (falange PP), respectivamente. $D1_{pip}$ y $D2_{pip}$ son equivalentes para la articulación PIP y $D1_{dip}$ y $D2_{dip}$ para la articulación DIP.



(a) Nominación de parámetros constructivos relevantes de los dedos índice y medio



(b) Nominación de parámetros constructivos relevantes del pulgar

Figura 4.5: Parámetros relevantes que inciden en el comportamiento de los dedos (a) índice y medio y (b) pulgar.

En la Tabla 4.4 se muestran las dimensiones en milímetros y grados para las distancias y ángulos, respectivamente, para cada uno de los parámetros constructivos de los dedos presentados en la Figura 4.5.

4.2.1.2. Rango de movimiento

Es importante analizar la cinemática de los dedos para asegurar que el sistema de actuación pueda actuar los dedos en su rango completo de movimiento.

Para realizar completamente el movimiento de extensión o apertura del dedo, el tendón extensor debe ser tirado una distancia fija dL_E , que es igual a la suma de la cuerda de cada arco que se

Parámetro	Índice	Medio	Pulgar
L_{pp}	42.5	46	42.5
L_{mp}	23	28	-
L_{dp}	23	25	32
R_1	7.5	7.5	7.5
R_2	6.5	6.5	-
R_3	4.5	4.5	6.5
A_{mcp}	90°	90°	75°
A_{pip}	90°	90°	-
A_{dip}	70°	70°	60°
$D1_{mcp}$	9.3	9.3	9.5
$D2_{mcp}$	7.75	7.75	7.75
$D1_{pip}$	6.75	6.75	-
$D2_{pip}$	6.75	6.75	-
$D1_{dip}$	5.75	5.75	7.9
$D2_{dip}$	5.75	5.75	6.75

Tabla 4.4: Dimensiones en mm y grados de los parámetros presentados en la figura 4.5.

genera en las poleas que guían el tendón extensor en cada articulación, determinado por el ángulo máximo de cada articulación del dedo y por el radio de la polea. En la Figura 4.6b se puede ver un dedo índice cerrado completamente y los arcos que se forman en cada polea de cada articulación marcados con color amarillo.

El largo máximo de un tendón extensor se puede obtener con la Ecuación 4.10

$$dL_E = dL_{mcp}^{AE} + dL_{pip}^{AE} + dL_{dip}^{AE} \quad (4.10)$$

donde

$$dL_{mcp}^{AE} = R_1 A_{mcp}$$

$$dL_{pip}^{AE} = R_2 A_{pip}$$

$$dL_{dip}^{AE} = R_3 A_{dip}$$

Para realizar completamente el movimiento de cierre del dedo, el tendón flexor debe ser jalado una distancia fija dL_F que es igual a la suma de los segmentos de cuerda necesaria para cerrar cada articulación del dedo, que se pueden ver en la figura 4.6a marcados con color verde. El tendón que flexa las articulaciones no rodea completamente la polea de la articulación, por lo que la cuerda necesaria para cerrar cada articulación no puede ser obtenida mediante el radio de la polea. Para este cálculo se necesitan las distancias $D1_{mcp,pip,dip}$ y $D2_{mcp,pip,dip}$ que se muestran en la figura 4.5.

Para obtener los segmentos de cuerda de cada articulación se puede utilizar el triángulo que se

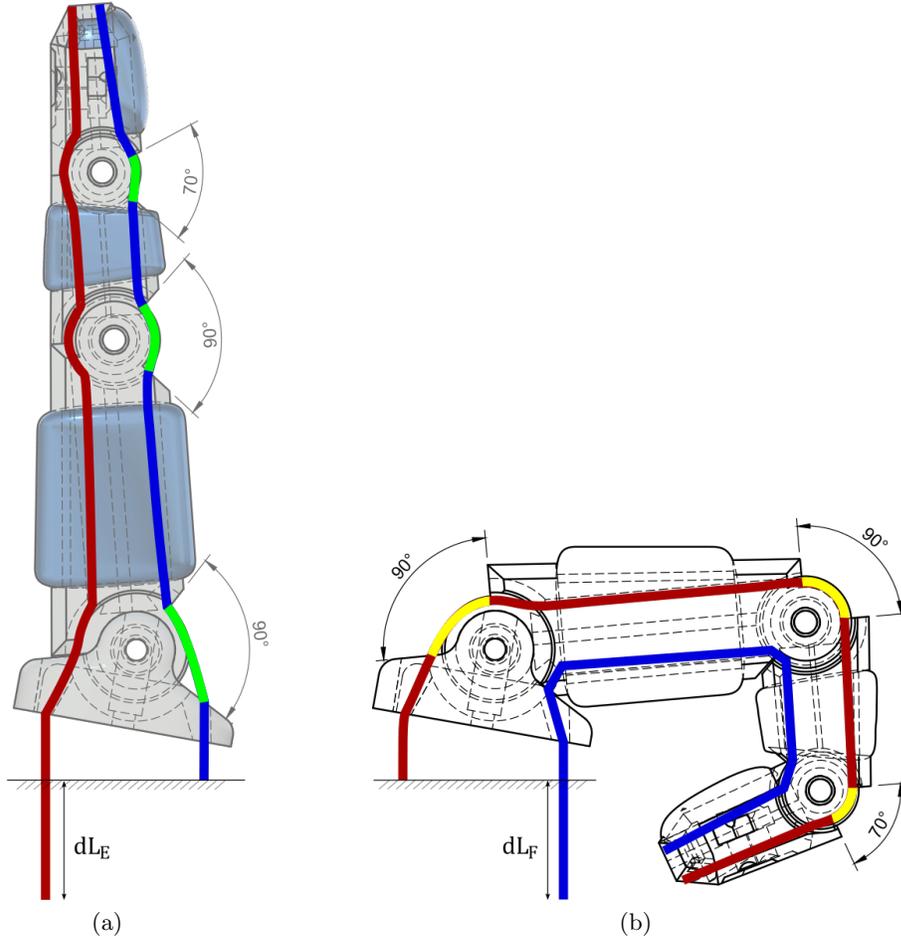


Figura 4.6: Límites máximos de movimiento para apertura (a) y cierre (b) del dedo índice.

forma entre el segmento de cuerda de cada articulación y las dos distancias D_1 y D_2 , en donde entra y sale el tendón de las falanges anterior y posterior de cada articulación, como se muestra en la figura 4.7. Cuando el ángulo máximo de apertura de la articulación θ es un ángulo recto, la distancia dL_A se puede obtener utilizando el teorema de Pitágoras. Sin embargo, cuando el ángulo es menor a 90° , se puede derivar la ecuación 4.11

$$dL_A = \sqrt{D_1^2 + (D_2 \cos(90 - \theta))^2} - D_2 \sin(90 - \theta) \quad (4.11)$$

El largo máximo de un tendón flexor se puede obtener con la ecuación 4.12

$$dL_F = dL_{mcp}^{AF} + dL_{pip}^{AF} + dL_{dip}^{AF} \quad (4.12)$$

donde

$$dL_{mcp}^{AF} = \sqrt{(D1_{mcp})^2 + (D2_{mcp} \cos(90 - A_{mcp}))^2} - D2_{mcp} \sin(90 - A_{mcp})$$

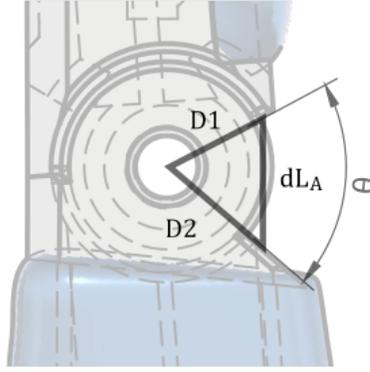


Figura 4.7: Triángulo proyectado en una articulación para el calculo del segmento de cuerda necesario para cerrarla .

$$dL_{pip}^{AF} = \sqrt{(D1_{pip})^2 + (D2_{pip} \cos(90 - A_{pip}))^2} - D2_{pip} \sin(90 - A_{pip})$$

$$dL_{dip}^{AF} = \sqrt{(D1_{dip})^2 + (D2_{dip} \cos(90 - A_{dip}))^2} - D2_{dip} \sin(90 - A_{dip})$$

Se puede así finalmente obtener los segmentos de cuerda para mover todas las articulaciones en sus rangos máximos, presentadas en la tabla 4.5.

Dedo	Articulación	dL^{AF} [mm]	dL_F [mm]	dL^{AE} [mm]	dL_E [mm]
Pulgar	<i>MCP</i>	9.8	16.6	9.2	16.6
	<i>DIP</i>	6.8		7.4	
Índice	<i>MCP</i>	12.1	27.5	11.8	27.5
	<i>PIP</i>	9.5		10.2	
	<i>DIP</i>	5.9		5.5	
Medio	<i>MCP</i>	12.1	27.5	11.8	27.5
	<i>PIP</i>	9.5		10.2	
	<i>DIP</i>	5.9		5.5	

Tabla 4.5: Distancias máximas de cuerda que deben ser tiradas para cerrar y abrir cada articulación de los dedos y distancia total para los tendones flexor y extensor.

4.2.2. Diseño del sistema de actuación *TSA*

En la Figura 4.8 se muestra un esquema del actuador diseñado, donde se ven los componentes principales del sistema. Al acortarse la cuerda una distancia $x(\alpha)$, donde α es cantidad de vueltas del motor, se genera una fuerza lineal en el tendón que transmite al dedo para generar su movimiento.

4.2.2.1. Estudio y selección de parámetros

Para determinar las dimensiones del sistema de actuación primero es necesario analizar los parámetros constructivos que lo caracterizan.

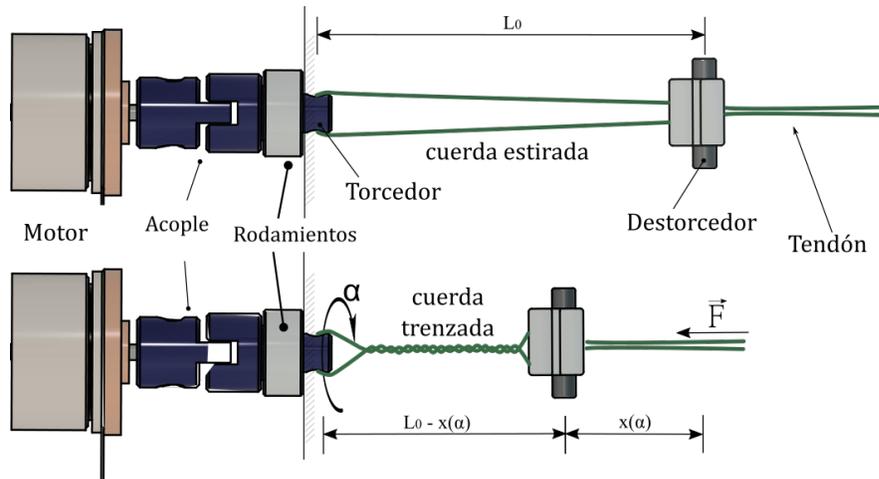


Figura 4.8: Esquema del sistema de actuación diseñado para un tendón.

Como se revisó en la sección 3.1, los parámetros del diseño que tienen incidencia en el comportamiento del sistema de actuación son:

- L : el largo inicial de la cuerda no torcida (estirada).
- A : la distancia media entre las dos cuerdas conectadas al destorcedor y al objeto traccionado.
- B : la distancia media entre las cuerdas conectadas al torcedor acoplado al motor.
- R : el radio de la cuerda torcida (trenzada).

Según Godler et al. [24], un tipo de cuerda que tiene buen desempeño en sistemas TSA son las fabricadas con el material Dyneema. En el mercado local las cuerdas de este material son de la marca Suffix que son generalmente utilizadas en pesca. En la Tabla 4.6 se resumen las características de dos modelos de cuerda que podrían servir para el sistema de actuación. Ambas cuerdas son muy similares en sus características y sobre-dimensionadas en la tensión máxima que soportan.

Modelo	\varnothing sección transversal [mm]	tensión máxima [Kg]
GYRO	0.35	18.4
Herculine	0.38	22.7

Tabla 4.6: Características de dos tipos de cuerdas de Dyneema de la marca Suffix encontradas en el mercado local.

En la Figura 4.9 se muestra el comportamiento de la variable $x(\alpha)$, según la expresión 3.1, para ambas cuerdas, con $L = 40$ mm y $A = B = 1$ mm. Se puede ver que la diferencia principal entre ambos modelos es que al usar una cuerda más delgada el desplazamiento llega a su límite teórico con más vueltas del motor. El tener un rango mayor de movimiento para el motor podría otorgar un

mejor control de la posición de los dedos, por lo que se decide utilizar la cuerda con radio $R = 0.35/2$ mm.

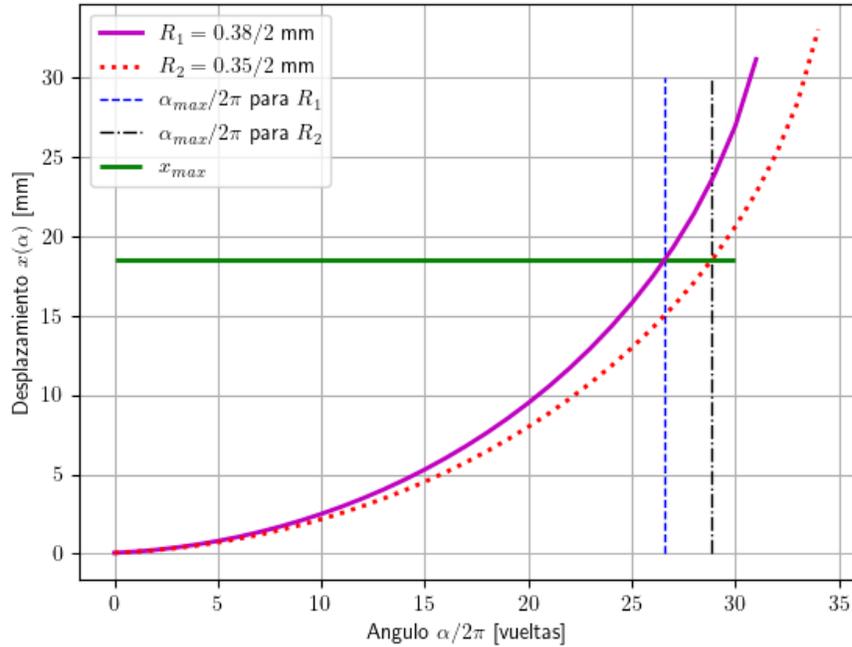


Figura 4.9: Comportamiento de $x(\alpha)$ para L , A y B fijos, y dos radios de cuerda.

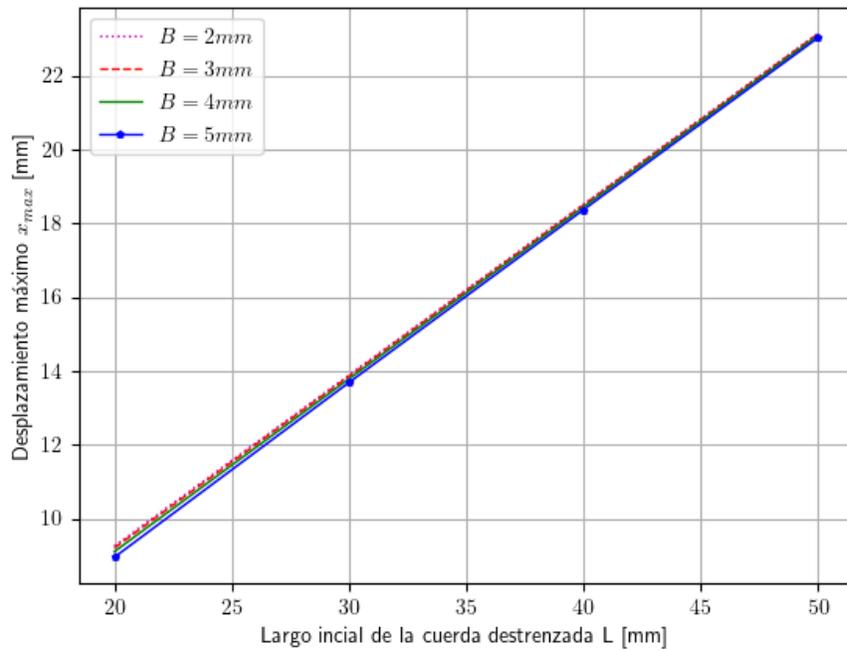
Un requisito que debe cumplir el sistema de actuación en cuanto a su rango de movimiento es que debe ser capaz de jalar o desplazar un tramo de cuerda suficiente, para que se cierren y abran los dedos completamente. Según la tabla 4.5, la máxima distancia que debe desplazarse un tendón es 27.5 mm, desplazamiento necesario para abrir o cerrar completamente los dedos índice y medio.

Usando la ecuación (3.5) se analizó el límite máximo teórico de desplazamiento x_{max} que permite el sistema TSA presentado en la sección 3.1. El destorcedor es un eje de acero de 3 mm, por lo que el parámetro A se fija en 1.5 mm. Por las dimensiones del rodamiento que soporta el torcedor (5 mm de diámetro interno), la dimensión máxima de B puede ser 5 mm.

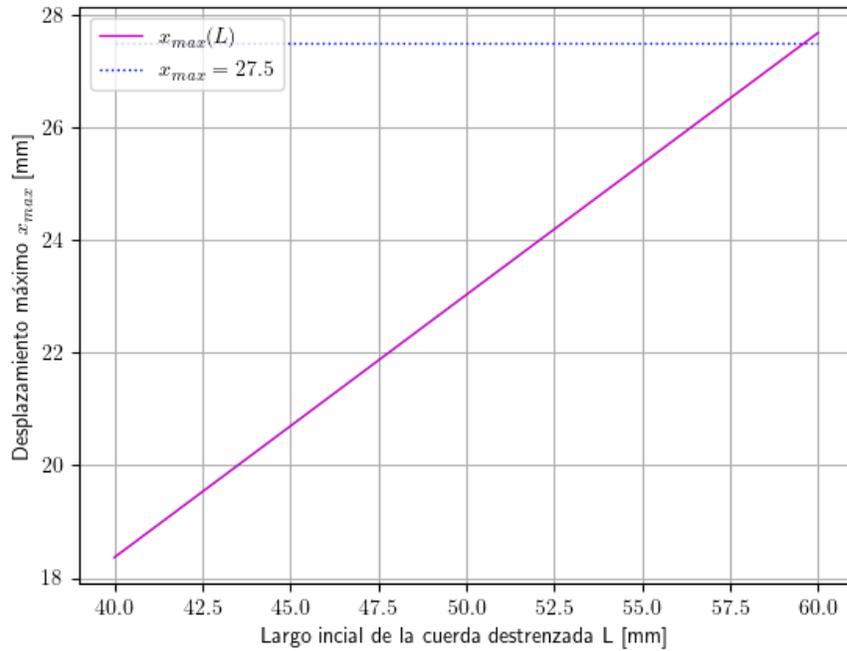
Se realizó un análisis de sensibilidad para entender como depende x_{max} de los parámetros B y L con $A = 1.5$ mm. x_{max} no depende de R por lo que no se agregó en este análisis.

Se puede ver en la Figura 4.10a que x_{max} no varía mucho para diferentes valores de B , pero sí se observa que depende mucho de L . Se escogió fijar el parámetro B en 5 mm y aumentar el rango de L para encontrar el valor adecuado para el actuador. En la figura 4.10b se puede ver un rango más extenso de x_{max} y donde se interseca la recta $x_{max} = 27.5$ mm, aproximadamente en $L = 59$ mm.

Finalmente, los valores escogidos para el sistema de actuación se resumen en la Tabla 4.7. Para



(a) x_{max} en función de L y diferentes valores de B



(b) x_{max} en función de L

Figura 4.10: Análisis de sensibilidad para B y L .

estos valores, en teoría, el motor tiene que dar aproximadamente 41 vueltas para cerrar o abrir el dedo índice y medio completamente, como se puede ver en la Figura 4.11.

Parámetro	Valor [mm]
L	59
A	1.5
B	2.5
R	0.175

Tabla 4.7: Parámetros de diseño del actuador

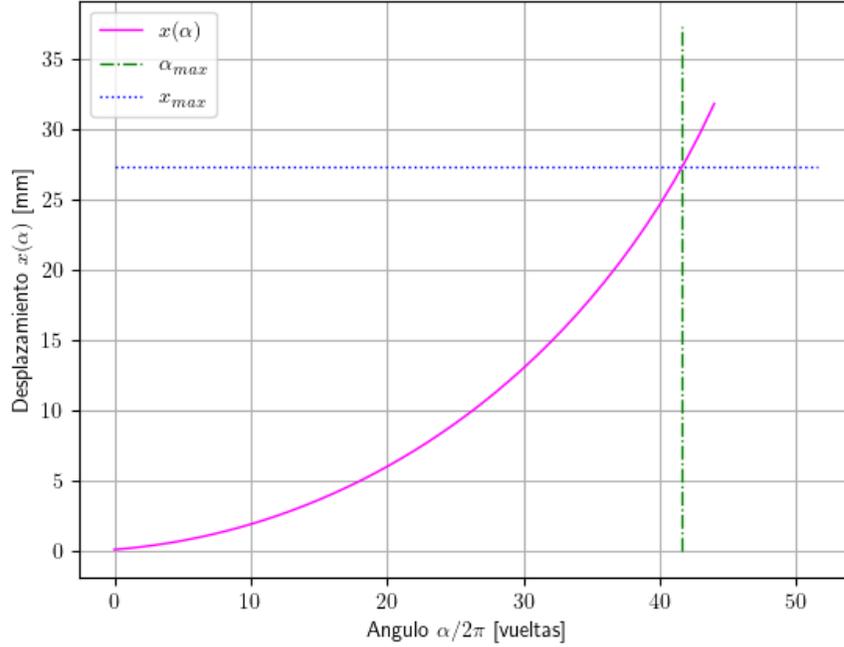


Figura 4.11: Comportamiento de $x(\alpha)$ con los parámetros de diseño escogidos.

4.2.2.2. Dimensionamiento del motor

Para encontrar un motor adecuado que permita realizar la fuerza necesaria de agarre se deben analizar las fuerzas que interactúan en la acción de la mano agarrando un objeto. Al tener varias falanges las fuerzas son ejercidas en múltiples puntos de contacto. Si se asume un agarre estático en donde el objeto y los dedos no se mueven, la suma total de las fuerzas es igual a cero. Se puede simplificar el agarre de la mano como tres puntos de contacto con fricción, entre el objeto agarrado y los dedos, y se puede suponer un contacto en donde la fuerza del pulgar es opuesta a la de los dedos índice y medio. En la Figura 4.12 se ilustran los múltiples puntos de contacto de la mano con el objeto y la simplificación de las fuerzas ejercidas F_d a una distancia L de la articulación MCP.

Para que no haya deslizamiento en el agarre, se debe cumplir la siguiente desigualdad

$$\frac{F_{\parallel}}{F_{\perp}} \geq \mu_e \quad (4.13)$$

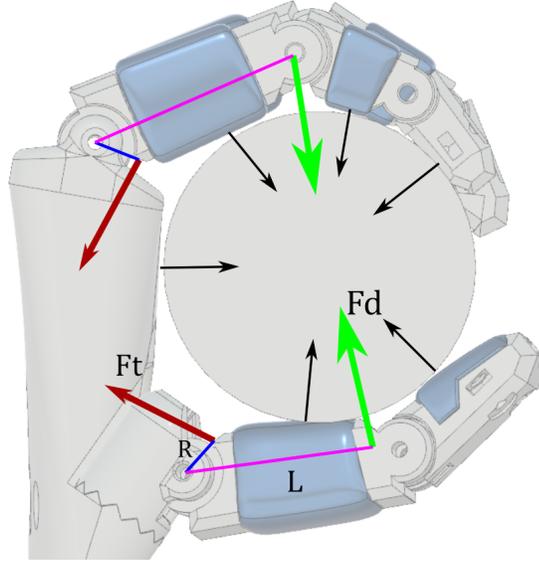


Figura 4.12: Simplificación de fuerzas de contacto entre los dedos y el objeto agarrado. Las flechas negras representan las fuerzas ejercidas por la mano sobre el objeto en múltiples puntos de contacto. Las flechas verdes representan las fuerzas F_d ejercidas sobre el objeto en oposición entre el pulgar y el índice y medio. Las flechas rojas representan la fuerza F_t ejercida por el tendón. Las líneas magenta representan la distancia L entre la articulación MCP y la fuerza ejercida por los dedos, y las líneas azules representan la distancia R de la articulación MCP a la que se ejerce la fuerza del tendón.

Con F_{\parallel} la fuerza paralela al plano de contacto del agarre, es decir, el peso del objeto agarrado, F_{\perp} la fuerza perpendicular al plano de contacto, que es la suma de las fuerzas ejercidas por los dedos en los múltiples puntos de contacto de cada dedo, y μ_e el coeficiente de roce estático del contacto. El deslizamiento ocurre cuando $F_{\parallel}/F_{\perp} = \mu_e$.

Como máximo, se busca que la mano agarre un objeto cilíndrico de 1Kg, de la ecuación 4.13 se puede encontrar la fuerza mínima que tiene que realizar cada dedo sobre la botella para realizar un agarre estático seguro, con $M = 1\text{Kg}$ la masa del objeto, g la aceleración de gravedad y $\mu_e \approx 1.0$ que es el coeficiente de roce estático de la silicona en contacto seco con una superficie de plástico. Se agrega además un factor de seguridad de $f_s = 1.5$.

$$F_{min} = \frac{Mg}{\mu_e} f_s \quad (4.14)$$

Según la ecuación 4.14 la fuerza mínima de agarre de los tres dedos debe ser 14.7N. Se asume que la fuerza del pulgar es igual a las fuerzas que realizan el índice y el medio $F_{pulgar} = F_{indice} = F_{medio} = F_{min}/3 = 4.9\text{N}$. Siguiendo el análisis para el dedo pulgar, el momento angular que realiza el tendón sobre la articulación MCP debe ser igual al que realiza el dedo sobre el objeto (en el punto medio del dedo pulgar, vector verde en la Figura 4.12), esto es:

$$F_{tendon} \times R = L \times F_{pulgar} \implies F_{tendon} = \frac{L \times F_{pulgar}}{R} \quad (4.15)$$

Con $L = 42.5\text{mm}$, $R = 9.5\text{mm}$, la tensión mínima que tiene que ejercer el tendón del pulgar para mantener el agarre sin deslizamiento es de $F_{pulgar} = 22\text{N}$. Ahora, si asumimos que la fuerza del tendón se transmite completamente desde el sistema de actuación hacia los dedos, del modelo del sistema TSA, según la ecuación (3.3), se sabe que el torque del motor se relaciona con la fuerza del tendón de la siguiente forma

$$T = F \frac{R(A + B + R\alpha)}{\sqrt{L^2 - (A + B + R\alpha)^2}} \quad (4.16)$$

lo que nos permite encontrar el torque mínimo que tiene que realizar el motor T_{min} en el rango de operación del sistema. En la Figura 4.13 se puede ver la razón de reducción del sistema para todo el rango de operación y el torque mínimo que tiene que realizar el motor para mantener una fuerza, en la salida del TSA, de 22N . El punto donde el motor tiene que realizar más torque para mantener la fuerza es al final del rango de operación, debido a la razón de transmisión decreciente del TSA. Para α_{max} , el torque requerido del motor es:

$$T_{min} = \frac{F_{pulgar}}{RT(\alpha_{max})} = 5.7[\text{mNm}] \quad (4.17)$$

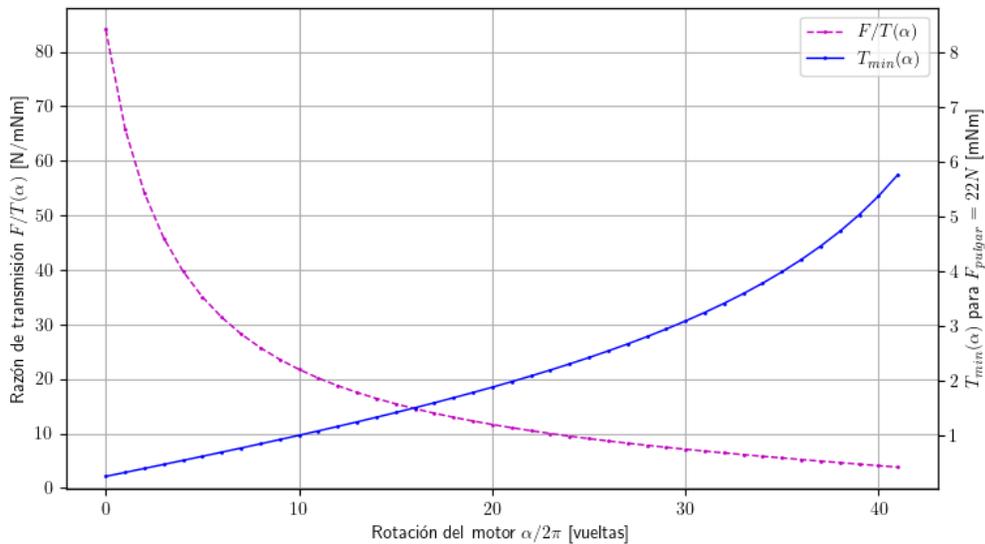


Figura 4.13: Razón de reducción $RT(\alpha)$ del sistema TSA para los parámetros de diseño escogidos, y curva de torque requerido para el motor para $F_{pulgar} = 22\text{N}$.

4.2.3. Selección de componentes

4.2.3.1. Motor

En base al análisis realizado en la Sección 4.2.2.2 se decidió utilizar motores **Maxon EC 20 Flat** de 24v [40]. Es un motor pequeño de 20 mm de diámetro por 14 mm de alto, y puede realizar un torque continuo de 7.74 mNm y un torque máximo de 19.9 mNm. Posee sensores de efecto Hall equipaciados 120° en su estator, que permiten medir la posición, velocidad y dirección del motor sin necesidad de un encoder externo.

Al ser un motor BLDC de tres fases y cuatro pares de polos, en una vuelta mecánica (360°) del motor, cada sensor de efecto Hall puede medir cuatro flancos de subida y cuatro de bajada. En la Figura 4.14a se puede ver una imagen del motor seleccionado.

4.2.3.2. Sensor de fuerza

El sensor que se escogió para medir la tensión del tendón flector es un **FlexiForce A101** de la empresa Tekscan [41]. Es el sensor más pequeño de la línea FlexiForce: posee un área de sensado de 3.8 mm de diámetro y un espesor de 0.2 mm, el resto de sus dimensiones se pueden ver en la Figura 4.14b. Es un sensor de fuerza resistivo que puede medir hasta 44 N, aproximadamente 4.5 kg de fuerza, suficiente para medir la fuerza que se espera generar con el sistema TSA propuesto.

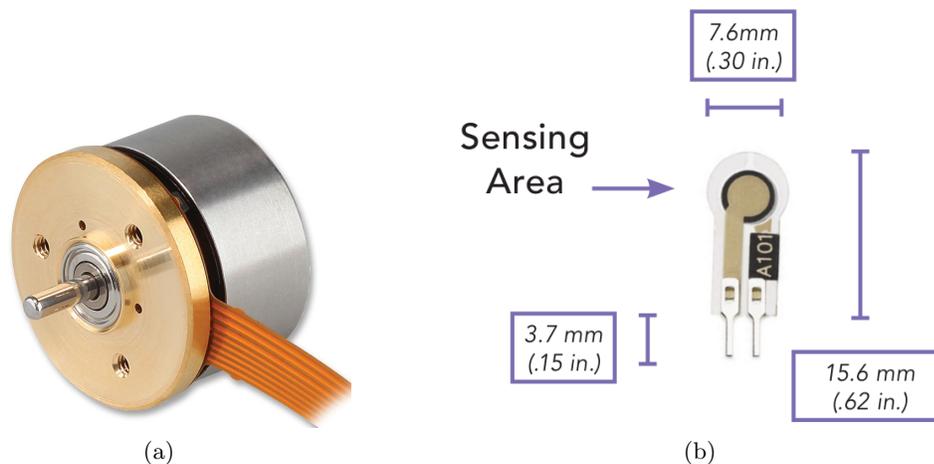


Figura 4.14: Componentes comerciales seleccionados para el sistema de actuación por cuerdas trenzadas: (a) Motor Maxon EC 20 Flat. y (b) Sensor de presión Flexiforce A101.

4.2.4. Estructura mecánica

Tomando en cuenta los requerimientos del TSA y los valores de los parámetros L , A y B , se diseñó la estructura mecánica que soporta los actuadores TSA para un dedo, que se puede ver en la Figura 4.15

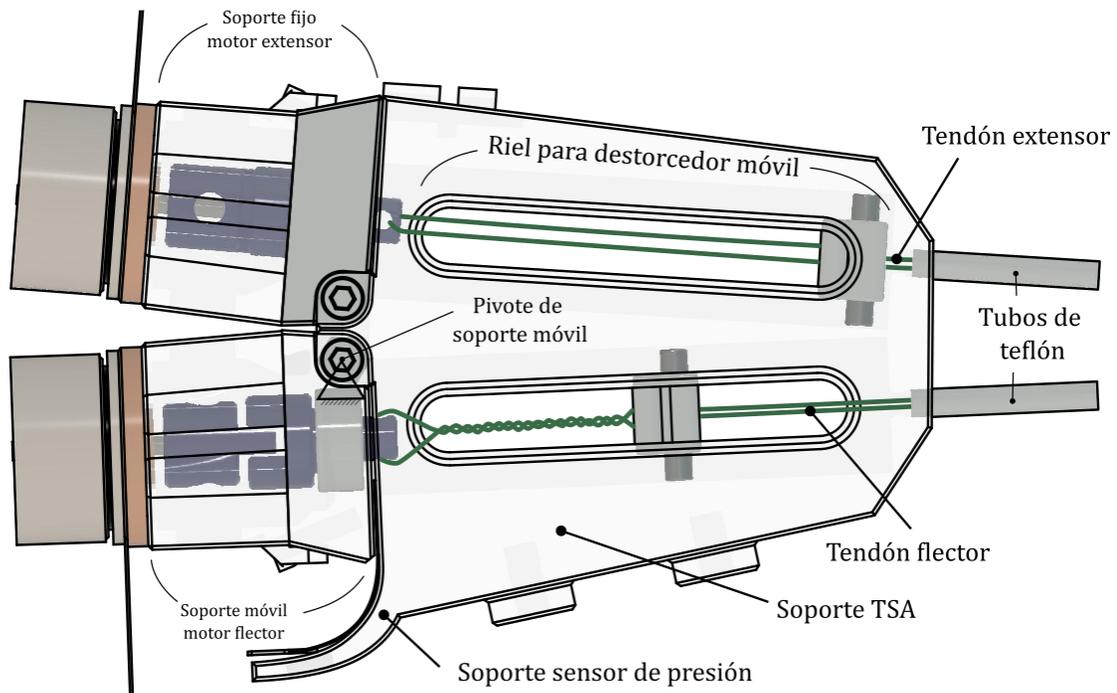


Figura 4.15: Soporte se actuadores TSA para un dedo.

La pieza principal del sistema es la denominada *Soporte TSA* que contiene los rieles para que el destorcedor se pueda deslizar al ser tirado por el motor y el soporte para el sensor de fuerza A101. Esta pieza también soporta (mediante pernos) las estructuras diseñadas para acoplar mecánicamente el motor con el torcedor de ambos TSA.

Para el TSA del tendón extensor, el soporte del motor está fijo a la pieza *Soporte TSA*. En el caso del soporte de motor del tendón flexor, este pivotea en un punto para permitir que la cuerda torcida tire el soporte, presionando el sensor de fuerza para obtener entonces la tensión del tendón.

4.2.4.1. Soporte de motor y acople mecánico

Este conjunto de piezas se encarga de soportar el motor y las piezas que forman el acople mecánico entre el motor y el torcedor. El acople mecánico sirve para transmitir la torsión del motor al torcedor cuando sus ejes de rotación no son perfectamente colineales por efecto de desperfectos de la fabricación. Se utilizó un rodamiento para soportar el torcedor y la carga que se genera en este al torcerse la cuerda. (ver Fig. 4.16)

La pieza que soporta todo el mecanismo (*Soporte rodamiento* en la Figura 4.16) es distinta en cada uno de los TSA, ya que para el extensor esta pieza debe quedar fija al Soporte TSA, y para el flector, esta pieza debe pivotear y presionar el sensor de fuerza que se ubica precisamente donde está el *Disco de presión*.

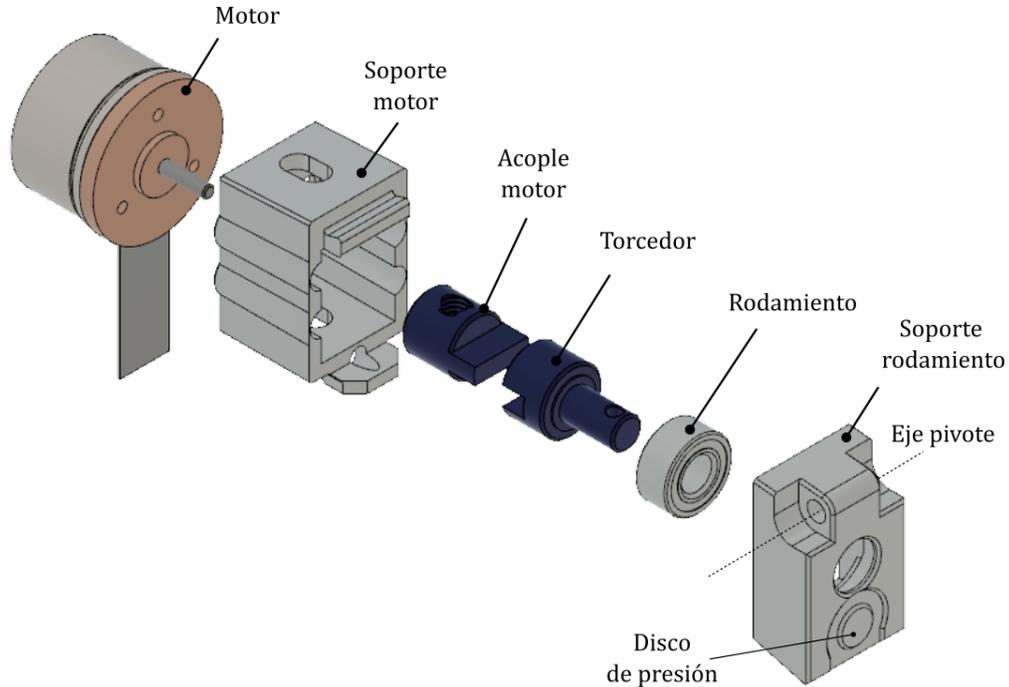


Figura 4.16: Vista explosionada del soporte de motor móvil, utilizado para el TSA flector.

4.2.4.2. Soporte sensor de fuerza

El sensor de fuerza tiene un área de sensado que corresponde a un círculo de 3.8mm. Se soporta en la pieza Soporte TSA con adhesivo doble faz y una amarra plástica que evite que las torsiones del cable del sensor lo muevan de su posición.

Como se mencionó anteriormente, el sensor de fuerza es presionado con una fuerza F_s por el disco de presión del soporte móvil, a una distancia D_s del pivote del soporte. La fuerza que realiza la cuerda trenzada T (equivalente a la tensión del tendón) sobre el soporte móvil es realizada en el eje de rotación del motor, a una distancia d_e del pivote. El pivote se encuentra desplazado del plano donde se soporta el sensor una distancia dp , como se puede ver en la Figura 4.17.

Se puede asumir que el sistema está en equilibrio cuando el soporte móvil está en contacto con el sensor de fuerza, esto quiere decir que la suma de las fuerzas ejercidas es igual a cero

$$\sum \vec{\tau} = D_s F_s \cos(\alpha) - d_e T \cos(\beta) = 0$$

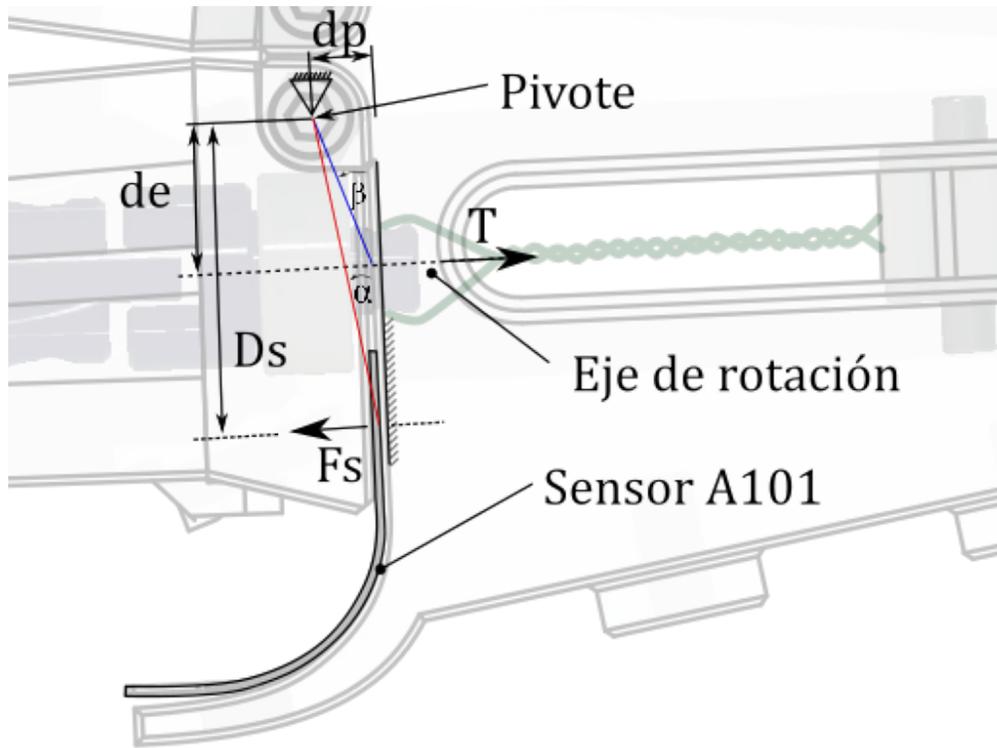


Figura 4.17: Diagrama de fuerzas en el soporte del sensor A101.

Lo que nos permite obtener la relación entre la fuerza medida por el sensor F_s y la tensión de la cuerda T representada por la Ecuación 4.18.

$$T = \frac{F_s D_s \cos(\alpha)}{d_e \cos(\beta)} \quad (4.18)$$

con $\alpha = \arctan(d_p/D_s)$ y $\beta = \arctan(d_p/d_e)$. En la Tabla 4.8 se resumen los valores de los parámetros relevantes para la obtención de la tensión en cada dedo.

Parámetro	Valor
D_s	16.7mm
d_e	8.5mm
d_p	3 mm
α	10.2°
β	19.4°

Tabla 4.8: Valores de los parámetros relevantes para el cálculo de la tensión del tendón.

4.2.4.3. Antebrazo

Para soportar la mano y los sistemas de actuación TSA para cada dedo, se diseñó un antebrazo que se puede ver en la Figura 4.18

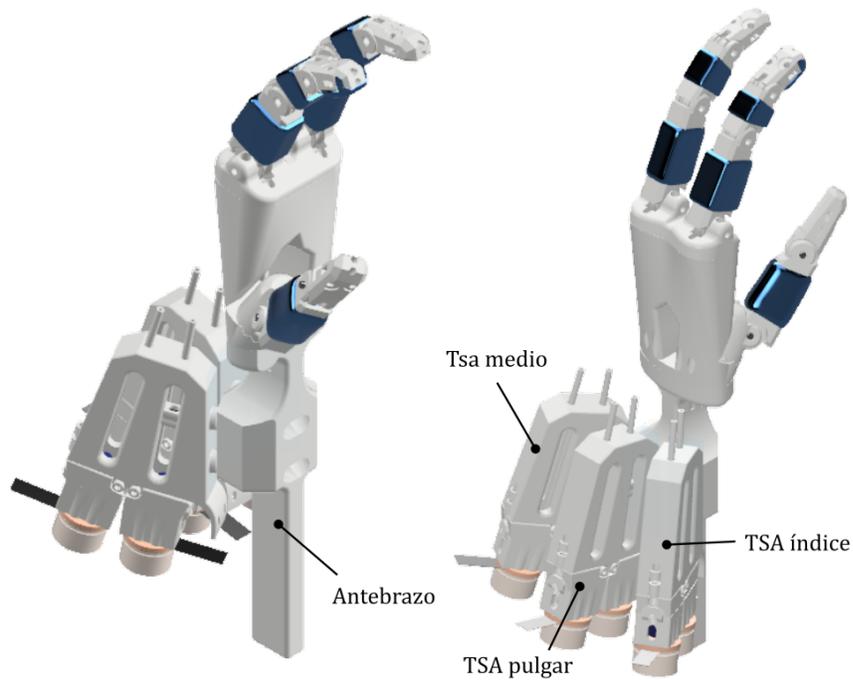


Figura 4.18: Renderizado del sistema completo con mano, actuadores TSA para cada dedo y antebrazo.

4.2.5. Fabricación

Para la fabricación de la mano se utilizó principalmente ácido poliláctico (PLA por las siglas del inglés *Polylactic Acid*), ya que es un termoplástico fácil de imprimir en 3D pero tiene las desventajas de que se ablanda y deforma a bajas temperaturas (entre 60 y 80°C) y por su alta rigidez se quiebra fácil ante esfuerzos mecánicos. Para las piezas mecánicas que requiere soportar altos esfuerzos y mayor temperatura, para soportar los motores por ejemplo, se utilizó un filamento de PETG.

En la Tabla 4.9 se resumen las piezas impresas en 3D que componen el sistema completo y el material con el cual fueron impresas.

#	Nombre pieza	Material
1	PP índice	PLA
2	MP índice	PLA
3	DP índice	PLA
4	PP medio	PLA
5	MP medio	PLA
6	DP medio	PLA
7	PP pulgar	PLA
8	DP pulgar	PLA
9	Nudillos	PLA
10	Pivote MB	PLA
11	Palma	PLA
12	Antebrazo	PETG
13	Soporte TSA	PLA
14	Soporte rodamiento	PLA
15	Torcedor	PETG
16	Acople motor	PETG
17	Soporte motor	PETG

Tabla 4.9: Piezas impresas que componen la a mano y el sistema de actuación y los materiales con los que fueron fabricados.

Las fundas de silicona fueron fabricadas por moldeo utilizando una silicona *Elite Double 22 Fast* de la marca Zhermack, principalmente usadas en duplicación de piezas dentales. Para más información del proceso de fabricación de las fundas de silicona referirse al Anexo C.

En las figuras 4.19 4.20 4.21 y 4.22 se pueden ver fotografías de la mano armada y algunos detalles de distintas partes del sistema.



Figura 4.19: Fotografía del sistema armado con antebrazo, mano y sistemas de actuación para los tres dedos.



Figura 4.20: Fotografía del detalle de los dedos y sus fundas de silicona



Figura 4.21: Fotografía del detalle de las guías de los tendones entre los TSA y la mano.



Figura 4.22: Fotografía del detalle del sistema TSA extensor y flexor del dedo índice.

4.3. Sistema de control de la mano

En esta sección se presentará el sistema de control propuesto para la mano completa, para un dedo, y para cada motor por separado.

4.3.1. Esquema general

En la Figura 4.23 se muestra un esquema general de los componentes principales del sistema eléctrico y conexiones de la mano. El flujo de datos en el sistema es el siguiente: un programa escrito en Python que maneja las funcionalidades de alto nivel de la mano envía ordenes mediante un bus serial USB al microcontrolador principal o *maestro*. El controlador principal distribuye las ordenes de control a cada uno de los dedos *esclavos* mediante un bus SPI. Cada dedo posee un microcontrolador que realiza las operaciones necesarias para controlar posición y tensión del dedo.

Para el controlador principal se escogió un Arduino Mega 2560 R3, basado en el microcontrolador ATmega2560 y para cada controlador de los dedos se escogió un microcontrolador Arduino Nano R3, basado en el microcontrolador ATmega328p. Más información sobre los microcontroladores se puede encontrar en el Anexo B. La información de las placas electrónicas diseñadas para el controlador de motores, amplificación de los sensores de fuerza, distribución de energía y control de los dedos, se pueden ver en el Anexo A.

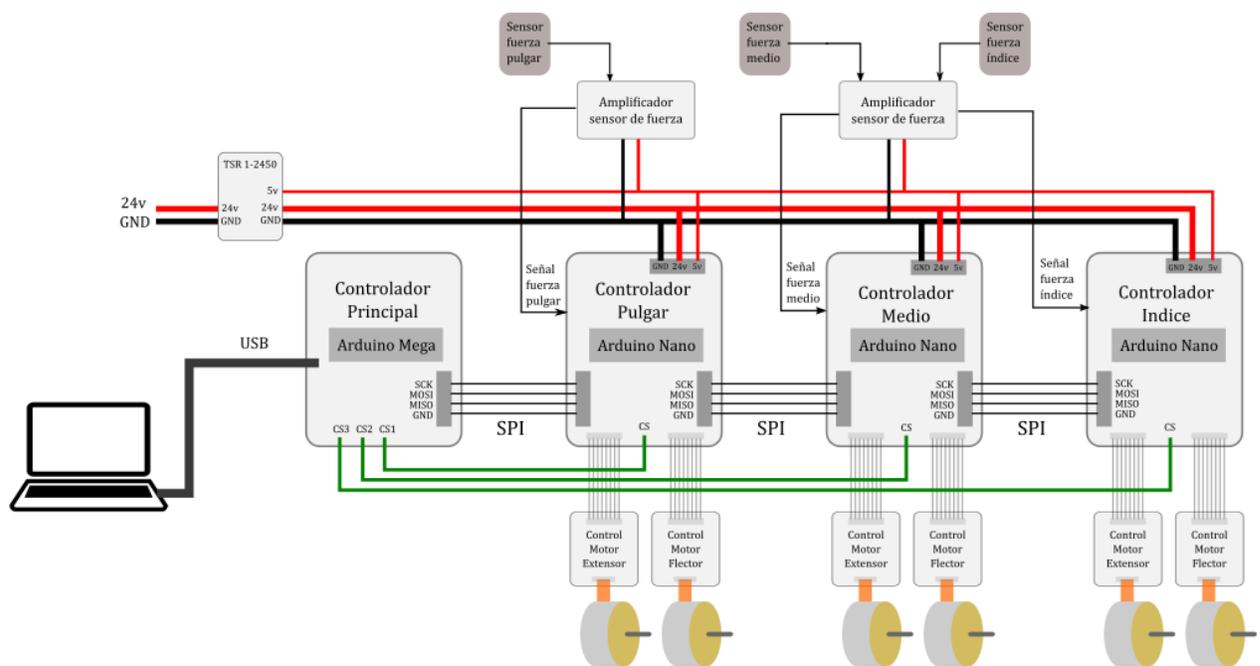


Figura 4.23: Esquema general de conexiones de los circuitos para el control de la mano.

4.3.2. Control de un dedo

El esquema general del funcionamiento de un dedo se muestra en la Figura 4.24. El controlador del dedo es el que se encarga de controlar la posición de ambos motores, y usando la realimentación del sensor de fuerza, realizar un control de tensión para el tendón flexor.

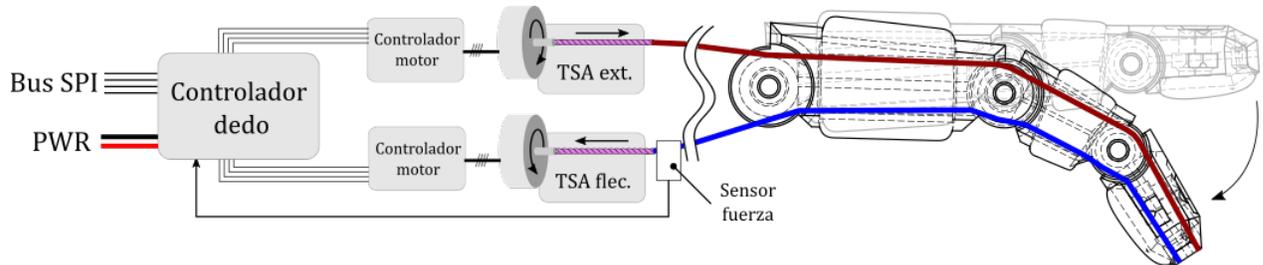


Figura 4.24: Esquema de control de un dedo de la mano.

Cada dedo posee un tendón extensor T_E y un tendón flexor T_F , controlados por un motor extensor M_E y un motor flexor M_F , respectivamente. Para controlar cada dedo se definen 4 acciones de alto nivel: relajar, abrir, cerrar, apretar.

- **Relajar:** para relajar el dedo ambos motores $M_{E,F}$ se mueven con control de posición a la posición inicial (referencia de posición $P_E = 0$) dejando las cuerdas completamente desenrolladas.
- **Abrir:** al M_F se mantiene relajado y el M_E se mueve a la posición que abre completamente el dedo (referencia de posición $P_E = Max_E$).
- **Cerrar:** desde la posición abierta del dedo el M_F es controlado con tensión con una referencia baja para darle cierta rigidez al dedo. El M_E luego, es controlado con control de posición y al moverse desde la posición máxima de apertura a una menor, libera la tensión del T_F , lo que hace que el M_F se mueva hasta una posición que controle la tensión y tire el tendón, generando el movimiento del dedo. De esta manera, la referencia de posición del M_E controla la posición del dedo y la referencia de tensión del M_F controla la rigidez del dedo.
- **Apretar:** luego de que los dedos se cierran sobre el objeto, la referencia de posición del M_E se hace cero, lo que permite que toda la fuerza del tendón T_F se transmita al agarre y no a mantener la rigidez del dedo en oposición al tendón extensor.

4.3.3. Control de motores

Para controlar el motor se seleccionó un módulo **Maxon 1-Q-EC Amplifier DEC Module 24/2**. Es un módulo controlador digital de 1 cuadrante para motores BLDC de hasta 48 W de potencia.

Posee control de velocidad configurable en lazo cerrado o abierto, controlado por una entrada de voltaje análogo, o por una señal PWM. Permite apagar o encender la salida del controlador (EN) y cambiar la dirección del motor (DIR) mediante señales digitales. Además posee funciones que protegen el motor de sobre voltaje, sobre corriente y sobrecarga térmica.

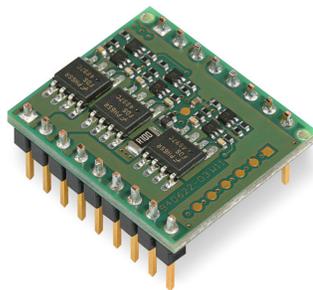


Figura 4.25: Controlador de motor

4.3.3.1. Control de posición

Para el control de la posición de los motores se implementó un controlador proporcional-integral que funciona a 1kHz, un esquema del controlador implementado se puede ver en la Figura 4.26.

La posición del motor P_z se obtiene utilizando un encoder de cuadratura, que cuenta las vueltas del motor y la dirección de rotación leyendo el estado de dos de los sensores de efecto Hall.

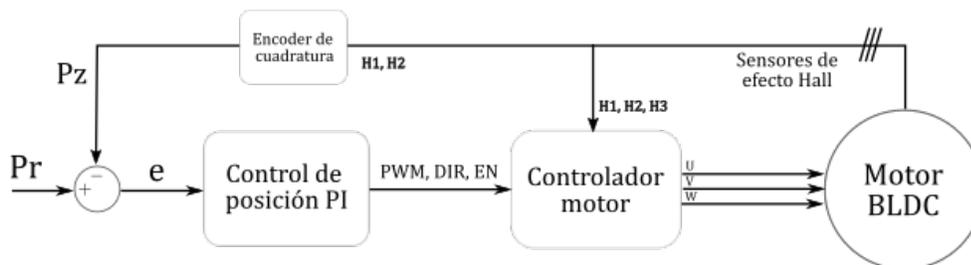


Figura 4.26: Esquema del controlador de posición del motor.

4.3.3.2. Control de tensión

Para el control de tensión del tendón se implementó un controlador proporcional-integral que funciona a 100Hz. En la Figura 4.27 se puede ver un esquema del controlador implementado.

La referencia de tensión T_r es convertida a unidades de voltaje antes de ser alimentada al controlador. La tensión del tendón V_z es obtenida usando el sensor de fuerza FlexiForce A101 presentado en la sección 4.2.3.2. La señal del sensor es amplificada y acotada entre 0v y 5v para estar dentro del rango de lectura del microcontrolador que realiza el control.

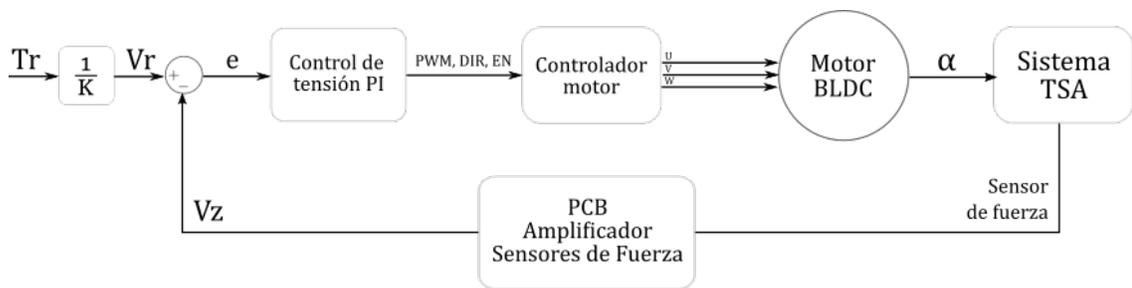


Figura 4.27: Esquema del controlador de tensión del tendón.

5 Experimentos y análisis

5.1. Análisis del sistema TSA

Para analizar el funcionamiento del sistema de actuación TSA se realizaron pruebas de control de posición del motor para diferentes cargas en el sistema. Las cargas utilizadas fueron masas de 100g, 250g, 500g, y 1000g colgadas de la salida del sistema de actuación (cargas de 1N, 2.5N, 5N y 10N).

Para cada carga se le dieron diferentes referencias de posición al motor: 0, 4, 13, 25, 30 y 40 vueltas. Durante todas las pruebas, los coeficientes del controlador PI de posición no variaron. El comportamiento del desplazamiento x del destorcedor en función de las vueltas del motor efectivas (no referencias) se pueden ver en la figura 5.1 y fotografías del movimiento del destorcedor se puede ver en la figura 5.2 para las 4 cargas probadas.

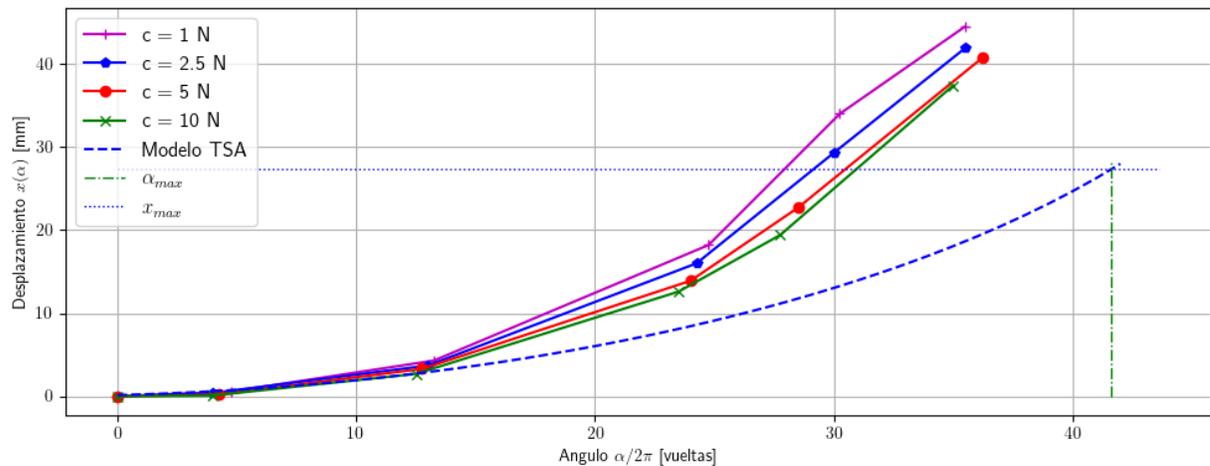


Figura 5.1: Resultados de la prueba de control de posición del motor para diferentes cargas en el sistema TSA.

En la sección 4.2.2 se analiza el comportamiento del sistema de actuación y se encuentran los parámetros de diseño del sistema que teóricamente permiten el movimiento de los dedos en su rango completo (abierto-cerrado). En general el sistema se comporta de manera similar al modelo teórico al comienzo del rango de movimiento. Para todas las cargas, hasta una referencia de 13 vueltas, el

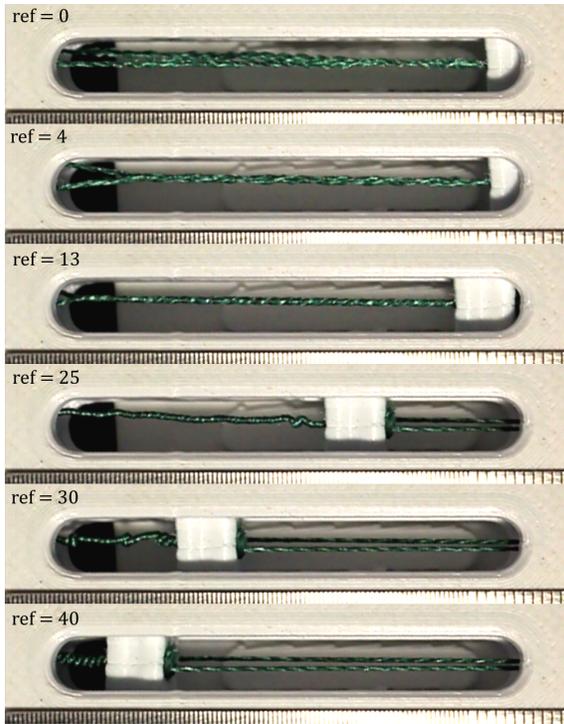
error con respecto al modelo se mantiene relativamente bajo. Para el siguiente punto de operación (referencia de posición del motor = 25 vueltas) se pueden ver errores mayores entre las curvas para todas las pruebas realizadas y el modelo. Se observa también que para todas las cargas, el desplazamiento requerido para cerrar completamente los dedos (27.5mm) se alcanza antes de las 41 vueltas que se calcularon teóricamente.

Para la carga de 1N (Fig 5.2a) el motor alcanza la referencia de posición para todos los puntos de operación probados a excepción del último, lo cual se puede explicar por la extrema sobre torcedura de la cuerda, que opone resistencia al giro del motor. Se observa también que la cuerda está torcida sobre si misma para una referencia de ángulo del motor de 25 vueltas.

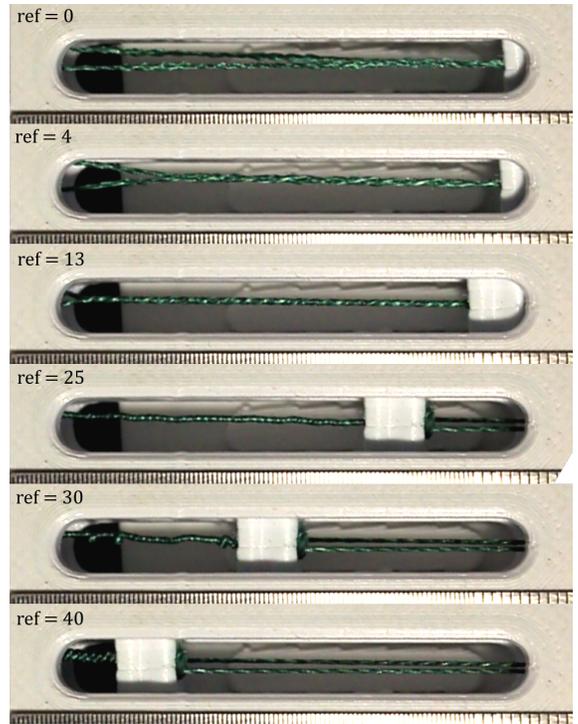
Se observa que al aumentar la carga el comportamiento del sistema se acerca más al modelo, debido a que la tensión en la cuerda hace que el sobre torcimiento ocurra en puntos de operación (vueltas del motor) más cercanos al límite teórico calculado. Esto se puede ver claramente al comparar el torcimiento que ocurre en las cuerdas, para las diferentes cargas, para la referencia de 30 vueltas (Fig. 5.2). También se observa que, para las dos cargas mayores, mientras más vueltas da el motor, mayor es el error estacionario del controlador de posición. Esto se puede corregir modificando los coeficientes del controlador PI, sin embargo, debido al comportamiento no lineal de la cinemática y dinámica del sistema, el nuevo conjunto de coeficientes podría no controlar correctamente la posición para otros puntos de operación o para otras variaciones en la carga aplicada en la salida del sistema.

El modelo cinemático del actuador no toma en cuenta la carga del sistema, ni los efectos que pueda tener el roce de la cuerda al torcerse sobre sí misma. Además, asume que la cuerda es completamente rígida. Sin embargo, la cuerda torcida tiene una elasticidad variable, que aumenta a medida que aumentan las vueltas del motor [7]. Estas diferencias entre el modelo y el comportamiento real, no-ideal del sistema, puede generar problemas si se requiere controlar con precisión el desplazamiento x de la cuerda tensada. Una posible solución a este problema es utilizar un controlador de posición sobre el componente desplazado (destorcedor), como es planteado y demostrado en Schlesiger et al. [32].

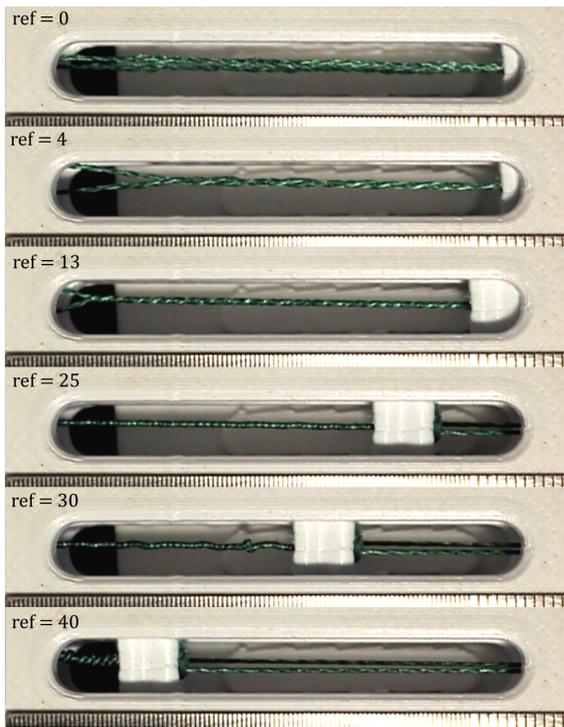
Si no se conocen de antemano las características del objeto que se quiere manipular, realizar un control de posición sobre el motor que tira el tendón flexor, o sobre el desplazamiento del tendón (que implican un desplazamiento del dedo), puede no ser una buena estrategia de manipulación: podría no generarse un agarre seguro del objeto, en caso que el objeto sea pequeño y se entregue una referencia de posición que no cierre los dedos completamente, o se podría sobrecargar el sistema, en caso que el objeto sea grande y la referencia de posición entregada genere un cierre de la mano muy apretado.



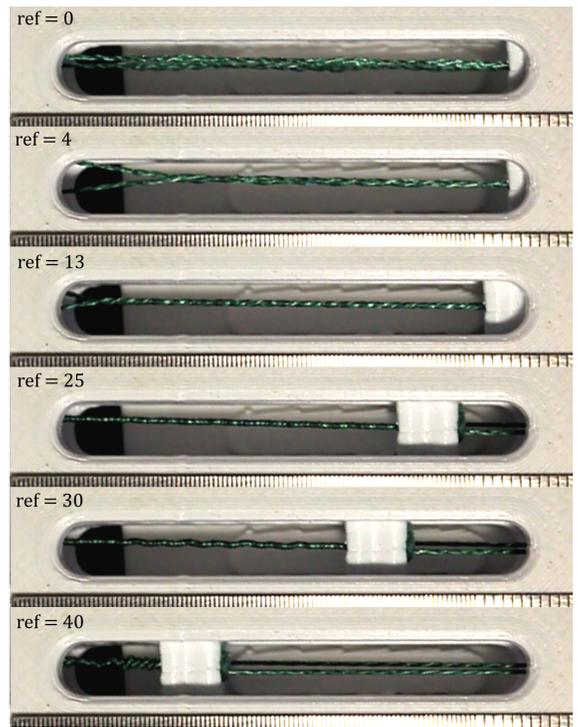
(a) $C = 1\text{N}$



(b) $C = 2.5\text{N}$



(c) $C = 5\text{N}$

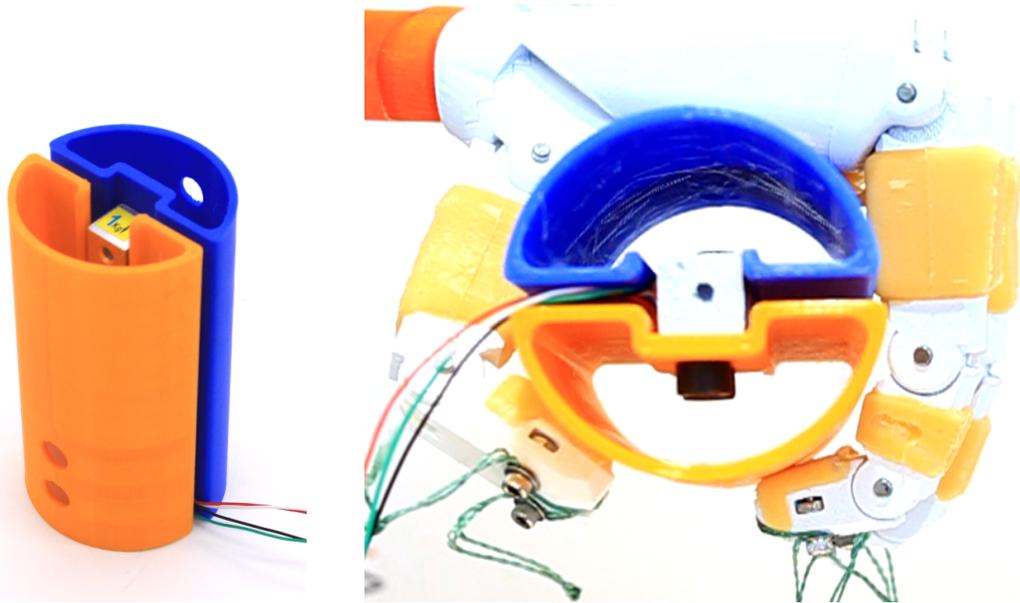


(d) $C = 10\text{N}$

Figura 5.2: Desplazamiento del destorcedor del sistema TSA diseñado para cargas de (a) 1N, (b) 2.5, (c) 5N y (d) 10N. A la izquierda del destorcedor desplazado se ubica el torcedor acoplado al motor y a la derecha las cargas.

5.2. Control de tensión y fuerza de agarre de la mano

Para evaluar en funcionamiento de los controladores de tensión de los dedos y la fuerza de agarre de la mano se construyó un aparato cilíndrico dividido por la mitad que contiene una celda de carga de 1kg entre las dos partes, como se aprecia en la figura 5.3. El objeto se orientó dentro de la mano de manera que esta pueda realizar un agarre de potencia (agarre número 3 de la Figura 2.5), con la palma como oposición, perpendicular al eje donde se acciona la celda de carga, como se puede ver en la Figura 5.3b



(a) Aparato utilizado para evaluar la fuerza de agarre de la mano.

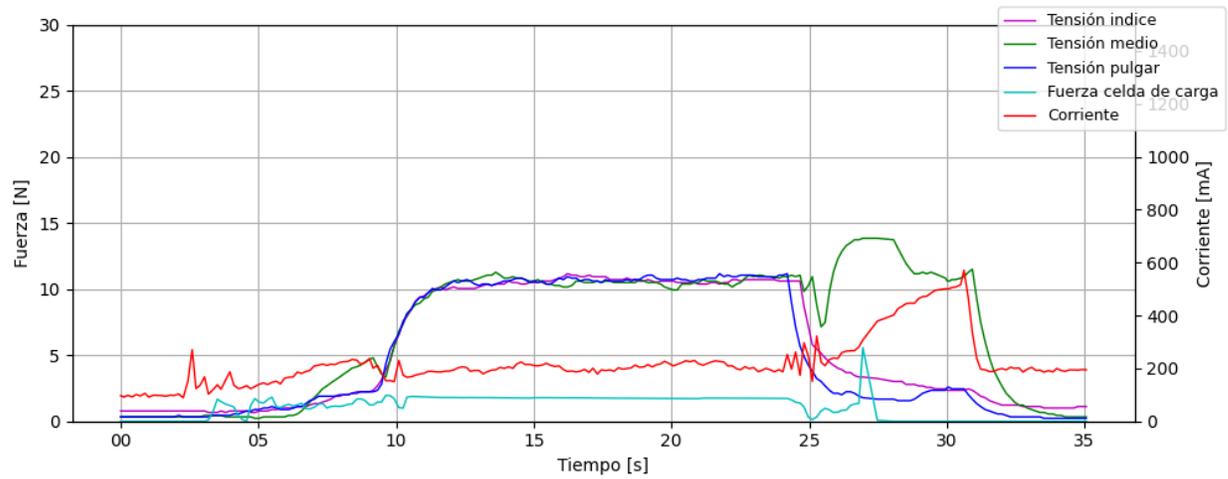
(b) Posicionamiento del aparato dentro de la mano para medir la fuerza de agarre.

Figura 5.3: Fotografías del aparato impreso en 3D para medir la fuerza de agarre de la mano (a) y configuración espacial del experimento (b).

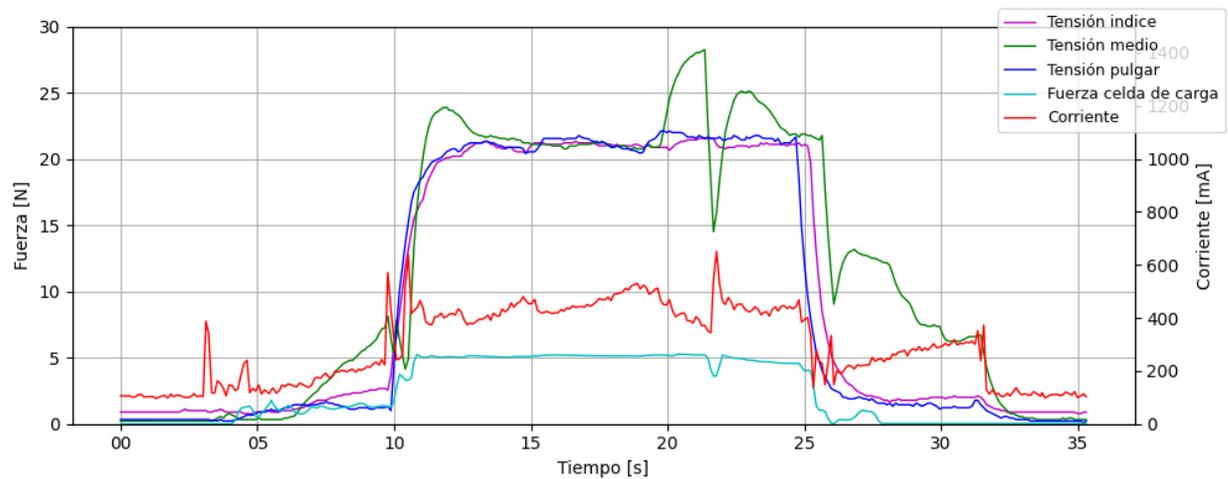
Se probó el agarre del objeto con dos referencias de tensión del controlador de tensión del tendón flexor: $T_1 = 10\text{N}$ y $T_2 = 20\text{N}$. Esta tensión de referencia se configuró para cada uno de los dedos de la mano.

Se obtuvieron para cada agarre las lecturas de los sensores de tensión de cada dedo, la fuerza medida en la celda de carga y la corriente medida en la fuente de poder, para el agarre de baja tensión (Fig. 5.4a) y el agarre de alta tensión (Fig. 5.4b). En la Figura 5.5, se puede ver el promedio y la desviación estándar de tensión de ambos agarres para los tres dedos. Estos valores fueron calculado para un período donde la tensión de los dedos se mantuvo dentro de un rango estable.

Se puede apreciar de los gráficos que los motores flexores mantienen la tensión de cada tendón con un pequeño offset. Si se analiza el promedio de tensión durante el agarre para todos los dedos (Fig. 5.5), se puede ver que el error del controlador de tensión aumenta aproximadamente al doble



(a) T1 = 10N



(b) T2 = 20N

Figura 5.4: Datos obtenidos para la prueba de agarre de la celda de carga con dos tensiones de referencia para los controladores de tensión de los dedos.

cuando aumenta al doble la referencia de tensión, por lo que el error puede deberse a la calibración del sensor, que resulta en una pendiente K que relaciona el voltaje leído con la fuerza ejercida sobre el sensor $F = KV$. Esto no supone un problema para el control de tensión, ya que en el microcontrolador donde se implementa, los cálculos son realizados en unidades de niveles de voltaje, no de fuerza. Como se mencionó en la sección 4.3.3.2, la referencia de tensión es transformada a niveles de voltaje antes de ser alimentada al controlador de tensión, y para los gráficos la tensión es obtenida multiplicando el voltaje de los sensores por la pendiente K .

Para la primera referencia de tensión T1, el promedio de fuerza ejercida en la celda de carga es aproximadamente 1.8N y la corriente es 0.2A. Para la segunda prueba la fuerza en la celda de carga llega hasta los 5.1N en promedio y la corriente aumenta a un valor cercano a 0.45A. Este resultado permite visualizar una relación existente entre la tensión en los tendones y la fuerza ejercida por la

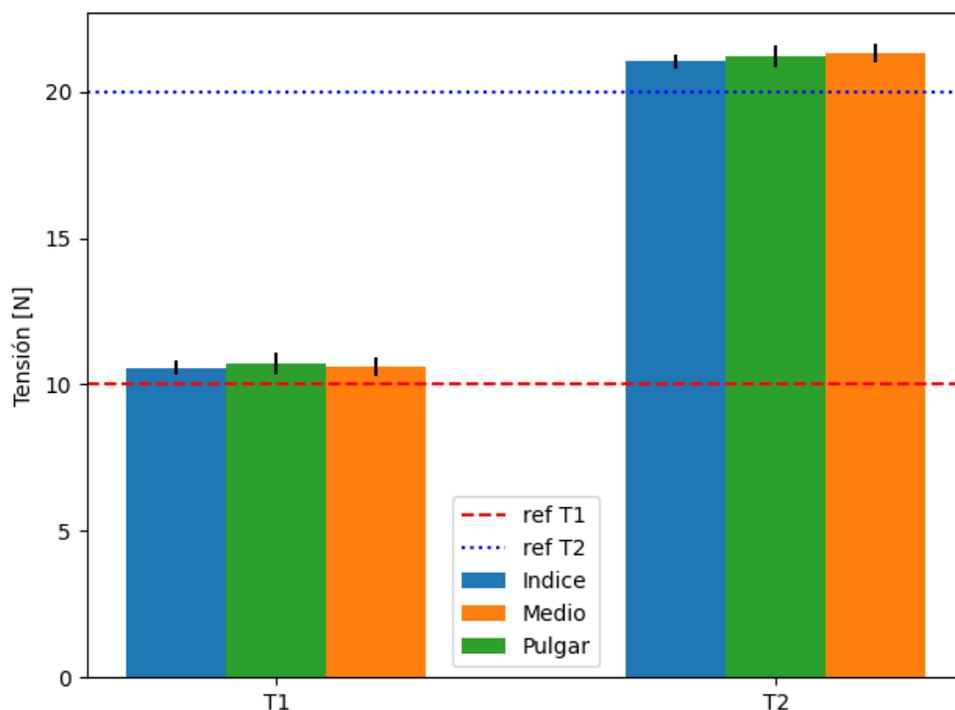


Figura 5.5: Promedio y desviaciones estándar del control de tensión para los tres dedos en las dos pruebas de agarre.

mano en el agarre: al duplicar la tensión de los tendones se puede duplicar la fuerza de agarre de la mano. La tensión máxima que pueden leer los sensores de fuerza es de aproximadamente de 28.5N, por lo que es posible que la mano pueda generar una fuerza de agarre mayor.

También se observa en la Figura 5.4 que con la corriente ocurre algo similar, al aumentar al doble la tensión de los dedos, la corriente también aumenta aproximadamente al doble. Sin embargo, esto ocurre solo por que al comparar agarres de un mismo objeto, los TSA de cada dedo se encuentran en el mismo punto de operación (mismo α). La razón de transmisión del sistema disminuye al aumentar las vueltas del motor, es decir, mientras más torcida esta la cuerda, el torque necesario para mantener una tensión en la salida del sistema es mayor que cuando la cuerda esta destorcida. Entonces, dependiendo del tamaño del objeto y del tipo de agarre que realice la mano, la corriente consumida puede variar, por lo que la relación entre la fuerza ejercida por la mano sobre el objeto y la corriente no es constante. Para visualizar esto, se comparó la corriente para dos agarres de objetos de diferente tamaño con la misma tensión $T = 25\text{N}$, una pelota de plumavit de 15cm de diámetro (mano abierta) y una bola de acero de 3.8cm de diámetro (mano cerrada), siendo la corriente promedio en el primer agarre de 0.4A y en el segundo de 1.1A.

El utilizar un control de tensión en los tendones permite mantener la fuerza del agarre constante independientemente de las características del objeto. También puede generar interacciones más seguras tanto para el robot como para el entorno. Por ejemplo, si una fuerza externa genera alguna

torsión o movimiento en el objeto, los dedos se abrirán para compensar el aumento de tensión generado en los tendones. Además, el utilizar un control de tensión simplifica el control de la mano robótica, ya que permite obviar el comportamiento elástico del TSA que varía en función de la cantidad de vueltas del motor.

Finalmente, se probó el agarre con una botella de agua de 1kg dándole a cada dedo una tensión de referencia de 25N. La mano pudo sostener la botella satisfactoriamente durante 15 segundos, consumiendo una corriente promedio de 0.6A durante el agarre (Fig. 5.6).

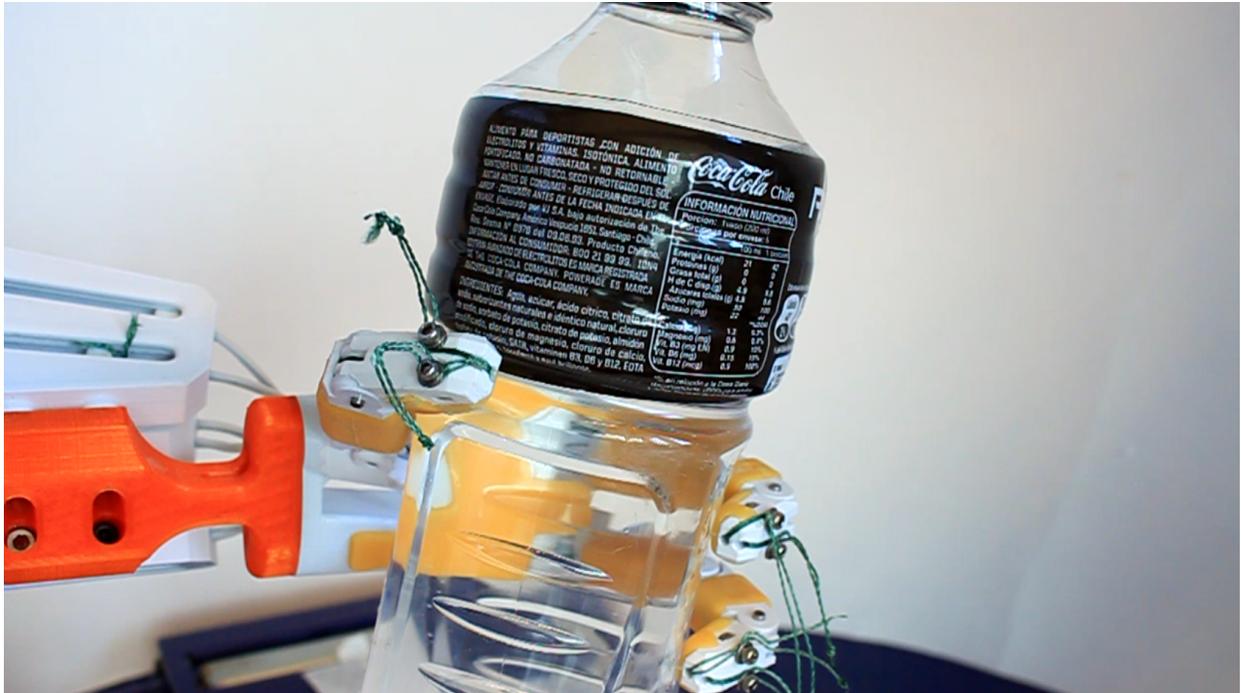


Figura 5.6: Fotografía de la mano sujetando una botella de agua de 1kg.

5.3. Validación de agarre seguro de la mano

Como se mencionó en la sección 2.1.2, el agarre se define como una posición estática de la mano en donde un objeto puede ser sujetado de manera segura (sin caer), independiente de la orientación de esta. Para evaluar la capacidad de agarre seguro de la mano, el experimento realizado consistió principalmente en que la mano agarra un objeto durante un tiempo determinado, luego cambia su orientación esperando que el objeto se mantenga sujetado. Finalmente se otorga un puntaje para cada etapa de la prueba con la finalidad de analizar el desempeño de la mano en el agarre.

5.3.1. Configuración experimental

La mano fue montada en una máquina CNC de 5 ejes Shopbot PRSAlpha para realizar el cambio de orientación de la mano de manera controlable y repetible. La máquina tiene 3 grados de libertad cartesianos XYZ como es común en máquinas CNC, y adicionalmente 2 grados de libertad rotacionales, A y B, correspondientes a yaw y pitch, respectivamente.

Para montar adecuadamente la mano en el eje B de la máquina, se diseñó una pieza que soporta, desde el extremo inferior del antebrazo, la mano y los sistemas de actuación para cada dedo. La pieza soporta también las seis placas de los controladores de los motores y las dos placas que amplifican la señal de los sensores de fuerza. En la Figura 5.7 se muestra el montaje del sistema en el eje de rotación B de la máquina.

El controlador principal y los controladores de los dedos se fijaron en una plancha de madera que fue ubicada debajo del antebrazo. El sistema se conecta con los microcontroladores de los dedos con cables de un largo adecuado que permiten la rotación de la mano sin generar tensiones indeseadas durante la ejecución de las pruebas.

5.3.2. Objetos

Se seleccionaron una serie de objetos en base a sus características de forma, tamaño y peso. El espectro de objetos que se pueden seleccionar para hacer pruebas de agarre considerando estos tres factores es muy grande, ya que pueden combinarse de muchas formas diferentes en distintos objetos, por ende la cantidad de experimentos necesarios para evaluar estos tres factores también puede llegar a ser muy grande.

Para acotar el número de experimentos a realizar y poder obtener resultados significativos que permitan generar un análisis de la capacidad de agarre de la mano se utilizó el método de Taguchi para diseño de experimentos. El método de Taguchi es utilizado para determinar la configuración de

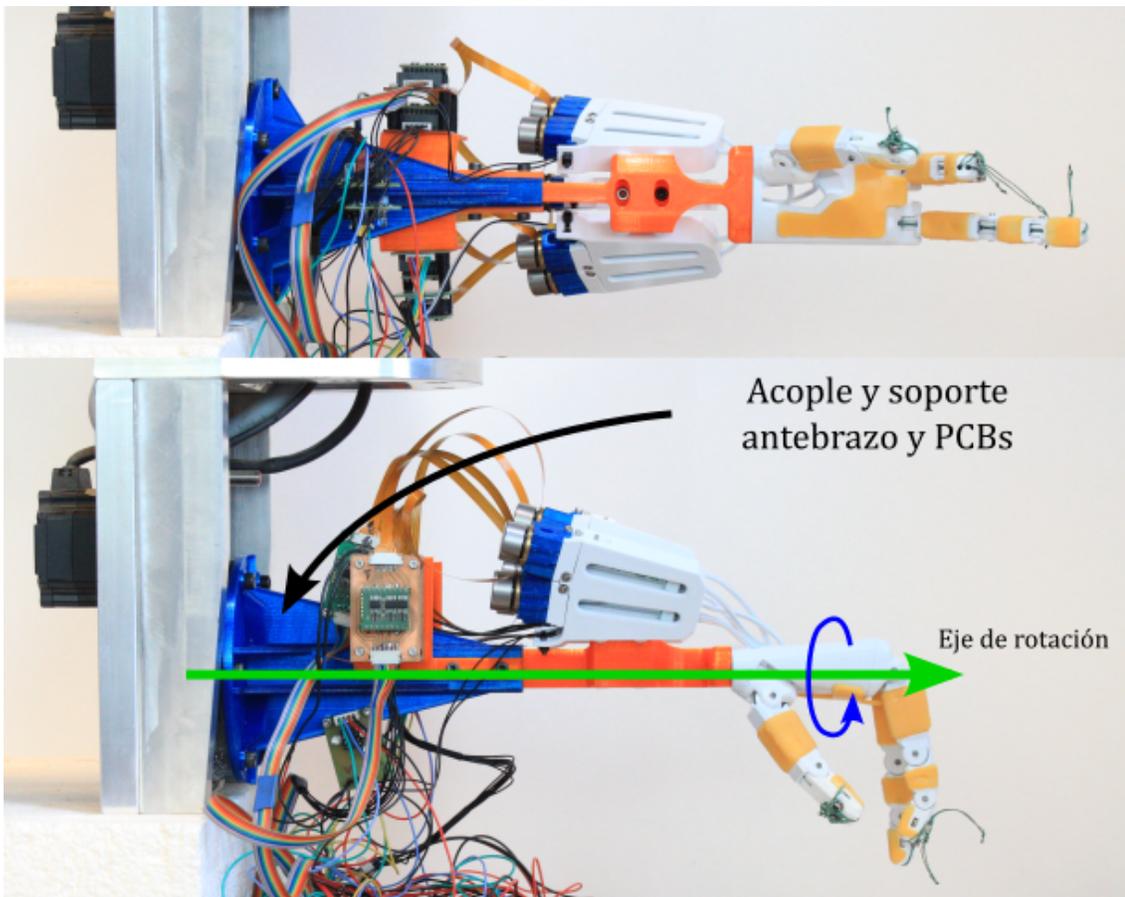


Figura 5.7: Mano montada en la máquina Router CNC Shopbot 5-axis PRSAlpha. Arriba la mano en la posición inicial del agarre, abajo la mano rotada en 90 grados. La flecha verde representa el eje de rotación B de la máquina y la flecha azul representa la dirección de rotación.

los parámetros de diseño de un producto o proceso que generan los mejores niveles de una medida de desempeño con una mínima variabilidad frente a factores no controlables (Kumar et al. 2012 [42]). En este caso, la medida de desempeño es la capacidad de agarre de la mano, y los factores de ruido que pueden generar variabilidad en el resultado son las características de los objetos, que pueden ser controlables durante el experimento pero no durante el proceso de diseño de la mano, ni durante el uso de esta en una situación no controlada.

Los factores de ruido del experimento son la forma, el tamaño y el peso de los objetos. Una vez definidos los factores se dividieron en tres niveles cada uno: el factor de forma se dividió en cilindro, esfera y paralelepípedo. El factor de tamaño se dividió en pequeño ($\leq 50\text{mm}$), tamaño medio (entre 50mm y 90mm) y grande ($\geq 90\text{mm}$) en una o dos de las dimensiones del objeto. El factor de peso se dividió en liviano ($\leq 200\text{g}$), peso medio (entre 200g y 600g) y pesado ($\geq 600\text{g}$). En la Tabla 5.10 se resumen los factores y niveles definidos.

Al definir tres niveles y tres factores por nivel se seleccionó un arreglo ortogonal L9 en base a la tabla de selección de OA de Taguchi (ver Anexo D). En la Tabla 5.11 se puede ver la definición

Factor Nivel	Forma (A)	Tamaño (B)	Peso (C)
1	Cilindro	Pequeño: ≤ 50 mm	Liviano: ≤ 200 g
2	Esfera	Tamaño medio: 50mm - 90mm	Peso medio: 200g - 600g
3	Paralelepípedo	Grande: ≥ 90 mm	Pesado: ≥ 600 g

Tabla 5.10: Resumen de los factores relevantes para el experimento y sus niveles respectivos.

de un OA L9, la combinación de los niveles por factor para cada experimento a realizar y su correspondencia con los factores y niveles definidos en la Tabla 5.10

Experimento	Factores			Factores objetos		
	A	B	C	Forma	Tamaño	Peso
1	1	1	1	Cilíndro	Pequeño	Liviano
2	1	2	2	Cilíndro	Tamaño medio	Peso medio
3	1	3	3	Cilíndro	Grande	Pesado
4	2	1	2	Esfera	Pequeño	Peso medio
5	2	2	2	Esfera	Tamaño medio	Peso medio
6	2	3	1	Esfera	Grande	Liviano
7	3	1	3	Paralelepípedo	Pequeño	Pesado
8	3	2	1	Paralelepípedo	Tamaño medio	Liviano
9	3	3	2	Paralelepípedo	Grande	Peso medio

Tabla 5.11: Arreglo ortogonal L9 de Taguchi y su correspondencia con los factores y niveles escogidos para analizar el agarre de la mano.

En base al resultado presentado en la Tabla 5.11, se seleccionaron los objetos para realizar los experimentos de agarre de la mano. Una lista de los objetos seleccionados y sus propiedades se puede ver en la Tabla 5.12. En la figura 5.8 se puede ver una fotografía de los objetos seleccionados para la prueba.

Se intentó seleccionar objetos que estuvieran dentro del conjunto de objetos YCB (*Yale-CMU-Berkley* [37]). Esto se logró parcialmente debido a que algunas combinaciones de factores y niveles se encontraron parcialmente en el conjunto y otras combinaciones no tuvieron ninguna correspondencia con objetos del conjunto. Los objetos que se encontraron dentro del conjunto YCB son: (1) plátano y (5) pomelo. Aquellos que son similares en algún factor a objetos que se encuentran dentro del conjunto YCB son: (2) lata de pintura en spray, (6) esfera de plumavit, (8) caja de boldo en bolsa, (9) caja de té en hoja.

Aquellos objetos que fueron difíciles de seleccionar fueron los de dimensión pequeño, de peso medio (4) o pesado (7). Estos tuvieron que ser objetos de acero para cumplir con la combinación de factores. Por otro lado, el objeto “cilindro grande pesado” (3), se evitó que fuera un objeto con centro de masa variable, respetando las restricciones de tamaño y peso.

ID	Objeto	Peso [g]	Dimensiones [mm]
1	Plátano	179	35 × 180
2	Lata de pintura en spray	422	66 × 200
3	Rollo de cable 100mt 24AWG	719	103 × 85
4	Bola de acero 1 1/2 pulgada	226	38.1
5	Pomelo	268	83
6	Esfera de plumavit	32	150
7	Bloque acero	829	37×31×100
8	Caja de boldo en bolsa	36	70×75×110
9	Tarro de té en hoja	419	95×95×140

Tabla 5.12: Lista de objetos seleccionados para hacer la prueba de agarre seguro y sus propiedades.



Figura 5.8: Objetos seleccionados para el experimento de manipulación. De arriba a la izquierda hacia abajo a la derecha: esfera de plumavit, lata de pintura en spray, rollo de cable, tarro de té en hoja, caja de boldo en bolsa, pomelo, plátano, bola de acero y bloque de acero.

5.3.3. Procedimiento y puntuación

El procedimiento para realizar los experimentos se basó en el *YCB Gripper Assessment Protocol and Benchmark* (Calli et al. 2015 [37]), modificado para los propósitos y alcances de este trabajo de tesis.

El procedimiento para el agarre en cada intento es el siguiente: primero la mano debe abrir los dedos, luego se posiciona el objeto dentro del rango de agarre de la mano, orientado de forma que los dedos se cierren sobre los lados de menor dimensión del objeto, se espera a que la mano cierre los dedos y sujete el objeto, 5 segundos después se rota la mano en 90 grados y se mantiene en esta posición por 3 segundos más.

Primero se realizan 2 intentos de agarre por objeto, con control de tensión en los tendones flectores de los dedos con una referencia de 10N. Si el objeto pasa ambos intentos, es decir, obtiene el puntaje completo, entonces no se sigue probando el agarre de ese objeto ya que se logra un agarre seguro. Si el objeto no obtiene el puntaje completo en los dos primeros intentos, se realizan dos más con referencia de tensión de 25N.

A cada intento de agarre de la mano se otorga un puntaje entre 0 y 4. Si el objeto se cae dentro de los primeros 5 segundos tiene cero puntos. Si el objeto es tomado por la mano durante los primeros 5 segundos pero tiene un movimiento perceptible se le otorga 1 punto. Si el objeto es sujetado sin movimiento visible por 5 segundos se le otorgan dos puntos. Si al rotar la mano el objeto se cae no tiene más puntaje y la prueba se acaba. Si al rotar la mano el objeto se mantiene dentro de esta pero con un movimiento perceptible, se le otorga un punto más (totalizando 3 puntos). Si al rotar la mano el objeto se mantiene sujetado por los siguientes 3 segundos significa que es un agarre seguro y se le otorgan 4 puntos al intento.

5.3.4. Resultados

Los puntajes otorgados a cada intento de agarre se pueden ver en la Tabla 5.13. Fotografías de los agarres satisfactorios de la mano se pueden ver en las Figuras 5.9 y 5.10.

ID exp.	Objetos	Tensión 1 = 10N		Tensión 2 = 25N	
		Intento 1	Intento 2	Intento 3	Intento 4
1	Plátano	4	4	-	-
2	Lata de pintura en spray	1	2	4	4
3	Rollo de cable 100mt	1	1	1	1
4	Bola de acero	1	2	4	4
5	Pomelo	2	4	4	4
6	Esfera de plumavit	4	2	4	4
7	Bloque acero	3	0	3	4
8	Caja de boldo en bolsa	4	4	-	-
9	Tarro de té en hoja	0	0	1	0

Tabla 5.13: Resultados experimentales de la evaluación de agarre de la mano. Los objetos primero se intentaron agarrar con 10N de tensión del tendón flexor y luego con 25N de tensión. Los intentos pararon (-) si se logró el puntaje completo en las primeras dos pruebas.

En el método de diseño de experimentos de Taguchi la razón señal-ruido (SNR) es una medida de

robustez utilizada para identificar los factores de diseño que reducen la variabilidad de un producto o proceso al minimizar los efectos de los factores que no se pueden controlar. La SNR muestra como la respuesta del experimento varía relativa al valor objetivo frente a la variación de los diferentes factores de ruido. Como se mencionó anteriormente, la medida de desempeño del experimento es la capacidad de agarre de la mano, que se busca maximizar. En este caso la SNR para cada experimento se define según la ecuación 5.19 [43].

$$SNR_i = -10 \log \left[\frac{1}{N_i} \sum_{u=1}^{N_i} \frac{1}{y_u^2} \right] \quad (5.19)$$

donde i es el número del objeto, u es el número del intento y N_i es la cantidad de intentos por objeto i . Es importante mencionar acá que la SNR no se puede calcular para resultados que son iguales a cero, por lo que se aplicó una transformación a la tabla de resultados (+1 a toda la tabla) que permite la obtención de la SNR para el análisis. El SNR calculado para cada experimento se puede ver en la Tabla 5.14.

ID exp.	Forma	Tamaño	Peso	SNR
1	Cilíndro	Pequeño	Liviano	13.98
2	Cilíndro	Tamaño medio	Peso medio	9.58
3	Cilíndro	Grande	Pesado	6.02
4	Esfera	Pequeño	Peso medio	9.58
5	Esfera	Tamaño medio	Peso medio	12.38
6	Esfera	Grande	Liviano	12.38
7	Paralelepípedo	Pequeño	Pesado	5.36
8	Paralelepípedo	Tamaño medio	Liviano	13.98
9	Paralelepípedo	Grande	Peso medio	0.90

Tabla 5.14: SNR calculado para todos los experimentos según los resultados obtenidos.

Luego de obtener el valor de SNR para cada experimento se obtiene el SNR promedio por nivel para los tres factores y se calcula el rango R que se define como

$$R_F = \max SNR_F - \min SNR_F \quad (5.20)$$

donde $\max SNR_F$ y $\min SNR_F$ son el máximo y el mínimo SNR promedio por factor, respectivamente. En la Tabla 5.15 se pueden ver los SNR promedio calculado y el rango R calculado por factor.

Nivel	Forma	Tamaño	Peso
1	9.86	9.64	13.45
2	11.45	11.98	8.11
3	6.75	6.43	5.69
R	4.7	5.54	7.76

Tabla 5.15: SNR promedio para cada forma y factor, y rango R calculado por factor.

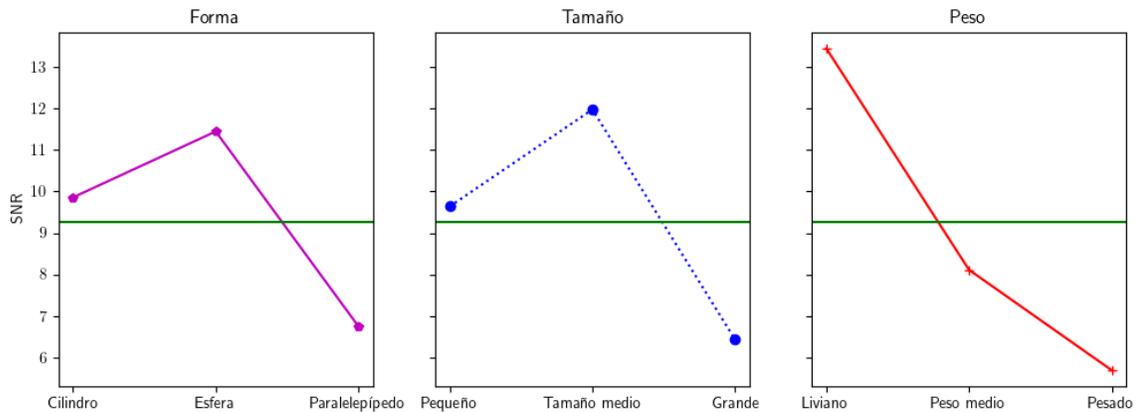


Figura 5.11: Comparación de SNR de los factores y niveles con el promedio.

5.3.5. Análisis de resultados

En general los resultados del experimento son buenos (ver Tabla 5.13) para objetos que varían sus características dentro de los factores y rangos definidos. Los agarres de la Taxonomía GRASP (ver Figura 2.5) identificados para cada objeto son indicados entre paréntesis para cada objeto mencionado a continuación.

Haciendo un análisis general de los resultados expuestos se puede decir que la mano puede realizar un agarre seguro de objetos livianos independientemente de los otros factores, como en el caso del plátano (2), la esfera de plumavit (1) o la caja de boldo (14), que aumentar tensión de los tendones mejora la capacidad de agarre, como se aprecia para el caso de la lata de pintura en spray (3), el pomelo (11), el bloque de acero (2) o la bola de acero (2), y que para objetos grandes pesados o de peso medio la mano no tiene buen desempeño, como el tarro de té en hoja (14) o el rollo de cable (14).

Con respecto al método de Taguchi utilizado, se puede decir que al utilizar el OA L9 se pudo reducir la cantidad de experimentos a 1/3 de los necesarios para probar todas las combinaciones de tres factores y tres niveles por factor (3^3). Con respecto a la SNR calculada, valores altos de SNR permiten identificar configuraciones de factores de control (parámetros de diseño) que minimizan los efectos de los factores de ruido. En este análisis los factores de control son fijos, definidos en el

diseño o las estrategias de control de la mano y no tuvieron variación al realizar los experimentos, por lo que el análisis se centrará en los factores de ruido

Al obtener las SNR promedio para cada factor y nivel, se puede obtener el Rango. A mayor rango, mayor es el efecto que tiene ese factor de ruido en el desempeño. Se puede observar en la Tabla 5.15 que el peso es el factor que mayor variabilidad genera en el desempeño de la mano. En segundo lugar afecta el tamaño del objeto, y la forma es la que menos afecta a la variabilidad en el desempeño de la mano. Si se comparan los valores SNR de cada factor y nivel con el promedio de ellos (Figura 5.11), se puede observar que la mano tiene mejor desempeño para objetos livianos, de forma esférica o cilíndrica y de tamaño pequeño o medio. Por el contrario, la mano tiene peor desempeño con objetos pesados o de peso medio, en forma de paralelepípedos y de tamaño grande.

Para el caso de los objetos grandes no livianos, para los intentos con baja tensión se explica el bajo desempeño por que el objeto simplemente resbala de los dedos al no tener suficiente fuerza en el agarre, y para los intentos con alta tensión se puede deber al nulo control que se tiene sobre cada articulación de los dedos, lo que hace que la fuerza normal de los dedos sobre el objeto no se distribuya homogéneamente en todas las falanges. En el caso del tarro de té en hoja, debido a sus grandes dimensiones, al cerrarse los dedos sobre este, la fuerza normal solo la realizan las falanges distales de cada dedo y al tener poca superficie de contacto el tarro resbala y se cae en casi todos los intentos. Para el caso del rollo de cable la situación es similar, la mano es capaz de sujetarlo solo con las falanges distales, el rollo resbala entre los dedos y queda afirmado del borde que sobresale del carrete, y al cambiar la orientación de la mano, los dedos no son capaces de soportar el peso y el objeto resbala.

En el caso de los objetos pesados o de peso medio que tienen tamaño pequeño, la mano tiene un mejor desempeño debido a que es capaz de cerrar los dedos completamente sobre los objetos, generando múltiples puntos de contacto en el agarre que facilitan la operación. Con baja tensión los objetos resbalan y se caen con el cambio de orientación, pero con mayor tensión la mano es capaz de mantenerlos sujetos sin problemas.

En el caso de los objetos livianos se explica el buen desempeño del agarre por las fundas de silicona de las falanges, que tienen el roce suficiente para mantener los objetos bien sujetos con tensión baja en los tendones independientemente del tamaño, del tipo de agarre (incluso solo con las falanges distales) o de la orientación de la mano. El único intento donde la mano no pudo agarrar un objeto liviano fue en el segundo intento de la esfera de plumavit. Al hacer el agarre, el control de tensión del dedo índice se desestabilizó y el dedo se cerró, botando la esfera de la mano.

Si bien no se analizaron directamente factores de diseño de la mano que puedan tener mayor o menor impacto en el desempeño de esta, del análisis realizado en base a la SNR y de los agarres realizados, se pueden identificar los factores de ruido que más afectan al desempeño y proponer

mejoras en el diseño que se enfoquen en robustecer la mano en esos aspectos, evitando gastar tiempo y recursos en tratar de mejorar otros aspectos que no son tan relevantes en el desempeño. Por ejemplo, de la observación de los agarres realizados, se puede decir que el no tener control sobre las articulaciones de los dedos, y por ende sobre como la fuerza de los tendones se distribuye en las diferentes falanges, afecta en particular al momento de tomar objetos grandes y pesados. Una propuesta de mejora en ese aspecto es diseñar dedos que se adapten mejor a tamaños mayores de objetos, o que permitan controlar la forma en que las fuerzas se distribuyen en los puntos de apoyo durante el agarre del objeto.

Otro factor de diseño que puede ser mejorado, que afecta directamente a la fuerza de agarre y por ende al desempeño de la mano al momento de agarrar objetos más pesados, es la razón de transmisión del sistema de actuación, que depende principalmente del radio de la cuerda trenzada. Al disminuir el radio de la cuerda a la mitad, la razón de transmisión aumenta cuatro veces. Esto quiere decir que para el mismo torque, la fuerza generada en la salida del sistema es cuatro veces mayor. Al disminuir el radio de la cuerda disminuye también la capacidad de carga de esta, por lo que es importante evaluar si una cuerda más delgada puede soportar las cargas a las que esta expuesto el sistema de actuación.

Los sensores de fuerza fueron calibrados para medir en un rango entre 0 y 15N aproximadamente, menos de la mitad del rango completo del sensor. Calibrar el sensor en un rango mayor de operación permitiría controlar una mayor fuerza en los tendones y por ende una mayor fuerza de agarre de la mano.

5.4. Pruebas de agarre de diferentes objetos cotidianos

Con la finalidad de probar más extensamente el funcionamiento de la mano para otros tipos de objetos cotidianos, con diferentes formas y rigidez, se probaron los objetos de la Tabla 5.16 con una referencia de tensión de 10N. En esta prueba no se cambió la orientación de la mano. De la lista de objetos probados, aparecen en el conjunto de objetos YCB: martillo, pinza, llave francesa, destornillador, taladro destornillador.

En las Figuras 5.12 y 5.13 se puede ver fotografías de los objetos que fueron satisfactoriamente tomados por la mano durante 15 segundos. Los tipos de agarre identificados en los objetos se pueden ver en la última columna de la tabla 5.16.

Los objetos que no pasaron esta prueba fueron el martillo, el pato chico, la llave francesa, el pegamento stickfix y el lápiz. Esto principalmente por que al cerrarse completamente la mano, queda un espacio entre los dedos y la palma. Cuando los objetos son más pequeños que ese espacio, la mano no es capaz de afirmarlos y se caen. El tamaño mínimo (diámetro) que tiene que tener un

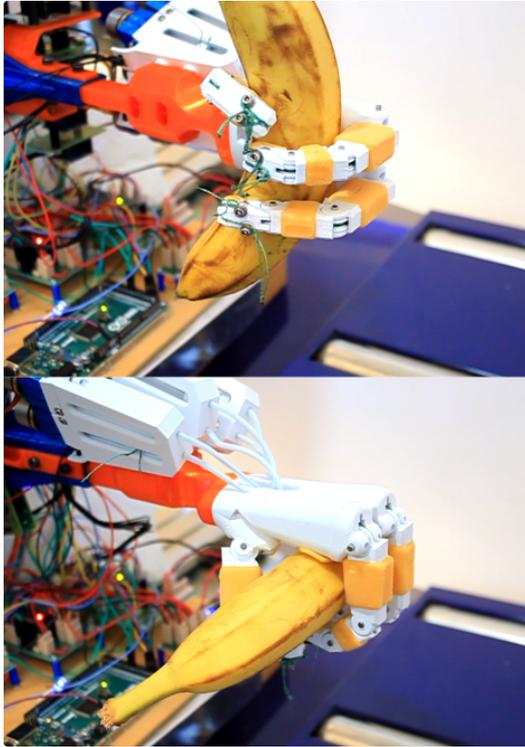
Id. exp	Objeto	¿Es tomado?	Tipo de agarre
1	Cubo rubik	si	28
2	Martillo	no	-
3	Peluche conejo	si	28
4	Peluche pulpo	si	1
5	Pollo	si	3
6	Cámara	si	3
7	Pinzas	si	3
8	Pelota ping pong	si	2
9	Pelota silicona	si	11
10	Taladro destornillador	si	3
11	Masking tape	si	12
12	Juguete de perro	si	10
13	Guante	si	2
14	Pato chico	no	-
15	Pato grande	si	3
16	Libreta	si	10
17	Paquete de papas fritas	si	28
18	Destornillador	si	2
19	Llave francesa	no	-
20	Globo	si	1
21	Rollo de cuerda	si	12
22	Pegamento stickfix	no	-
23	Cola fría	si	10
24	Lápiz	no	-

Tabla 5.16: Objetos probados con tensión de 10N.

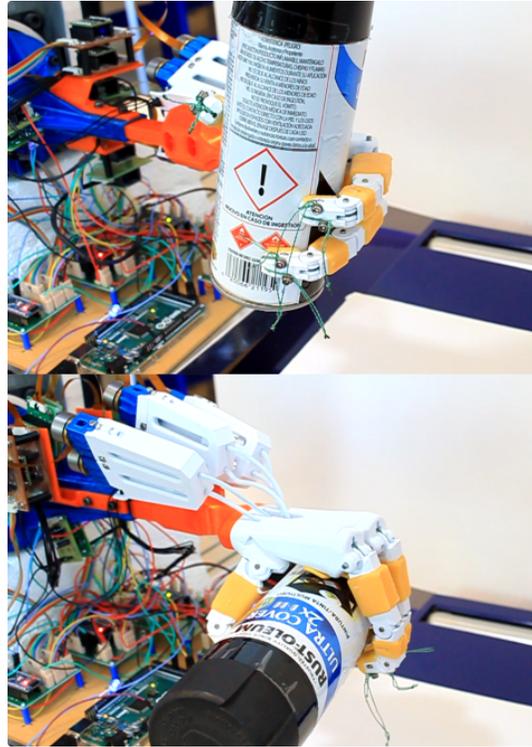
objeto para ser tomado con un agarre cilíndrico es de aproximadamente 24mm.

La mano no tiene la capacidad de realizar agarres de precisión (o pinza), que implican la manipulación de los objetos sólo utilizando los dedos. Esto principalmente por no tener control sobre el movimiento de cada falange. Una propuesta de mejora en este aspecto, es el desarrollo de dedos que tengan menos grados de libertad no controlados, ya sea agregando tendones controlados en cada una de las falanges, o por acoplamiento mecánico entre ellas. Esto permitiría desarrollar modelos cinemáticos precisos que permitan controlar la posición de los dedos en el espacio para cada agarre.

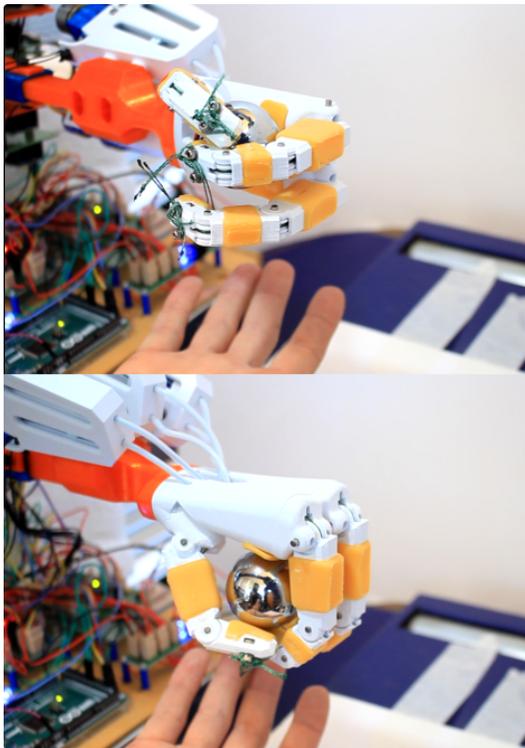
Una observación importante que se puede hacer de los resultados de este experimento, es la capacidad que tiene la mano de adaptarse a la forma de los objetos, esto debido a la forma en que se guía el tendón por dentro del dedo, y a que cada dedo controla la tensión de forma independiente, por lo mismo, cada dedo se cierra sobre el objeto dependiendo de la forma de este, y de la orientación de este con respecto a la mano.



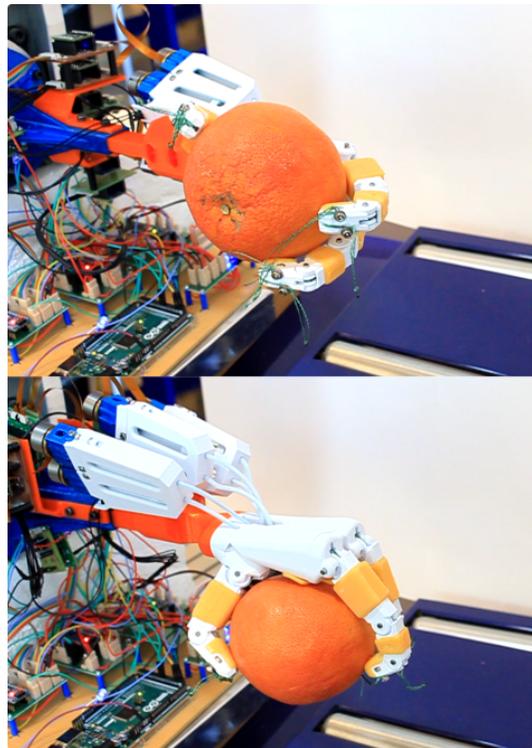
(a) Objeto 1: Plátano.



(b) Objeto 2: Lata de pintura en spray.

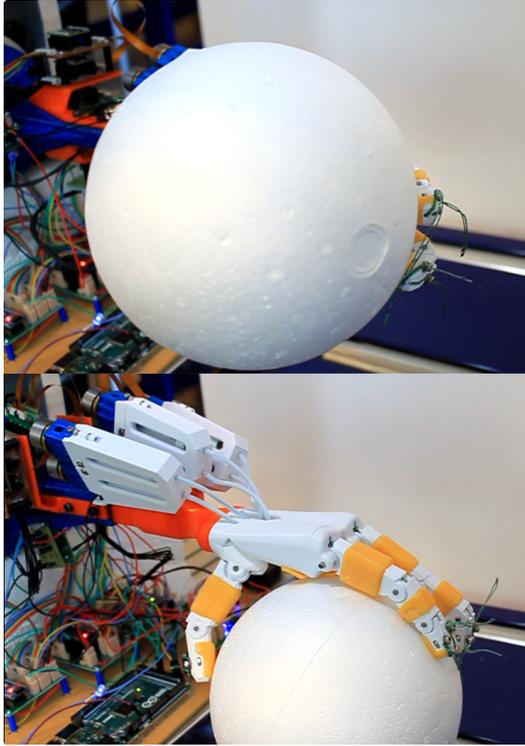


(c) Objeto 4: Bola de acero.

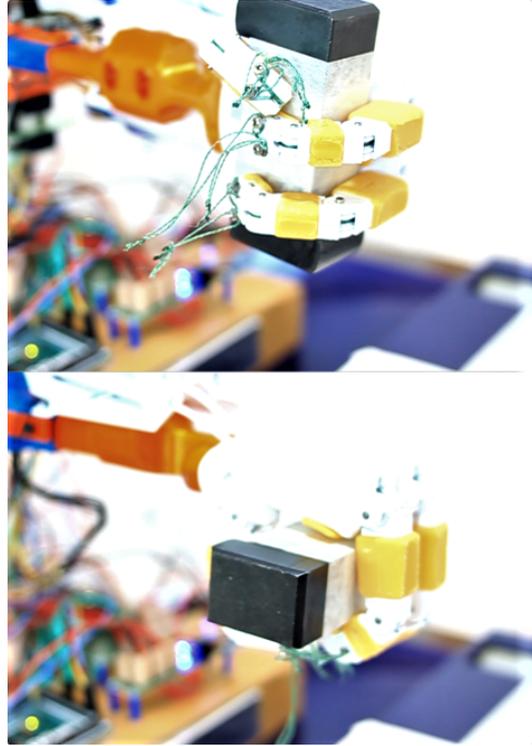


(d) Objeto 5: Pomelo.

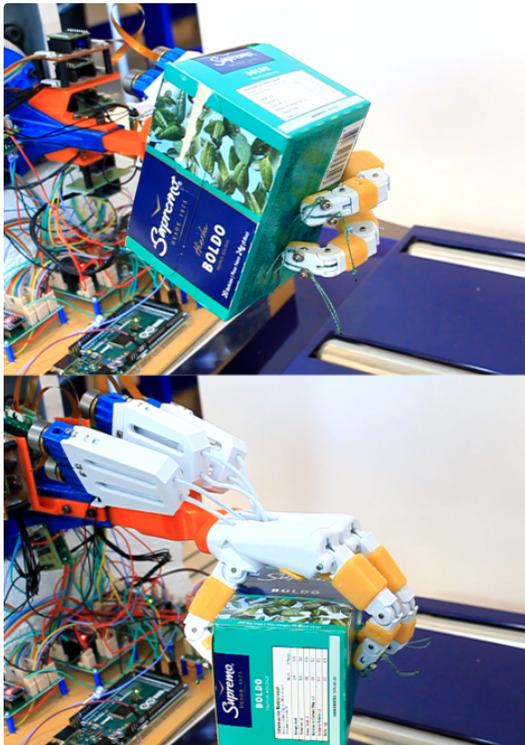
Figura 5.9: Objetos agarrados durante los experimentos: (a) plátano, (b) lata de pintura en spray, (c) bola de acero, (d) pomelo.



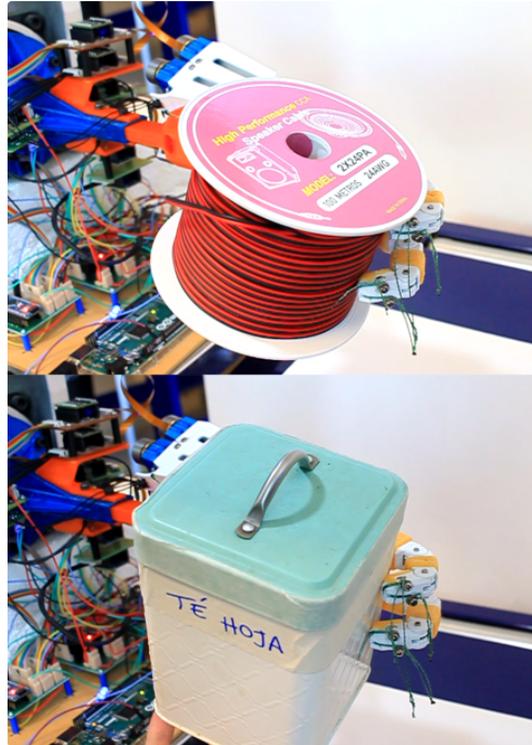
(a) Objeto 6: Esfera de plumavit.



(b) Objeto 7: Bloque de acero.



(c) Objeto 8: Caja de boldo en bolsa.



(d) Objetos 3 y 9: Rollo de cable y tarro de té en hoja.

Figura 5.10: Objetos agarrados durante los experimentos: (a) esfera de plumavit, (b) bloque de acero, (c) caja de boldo, (d) rollo de cable y tarro de té en hoja.

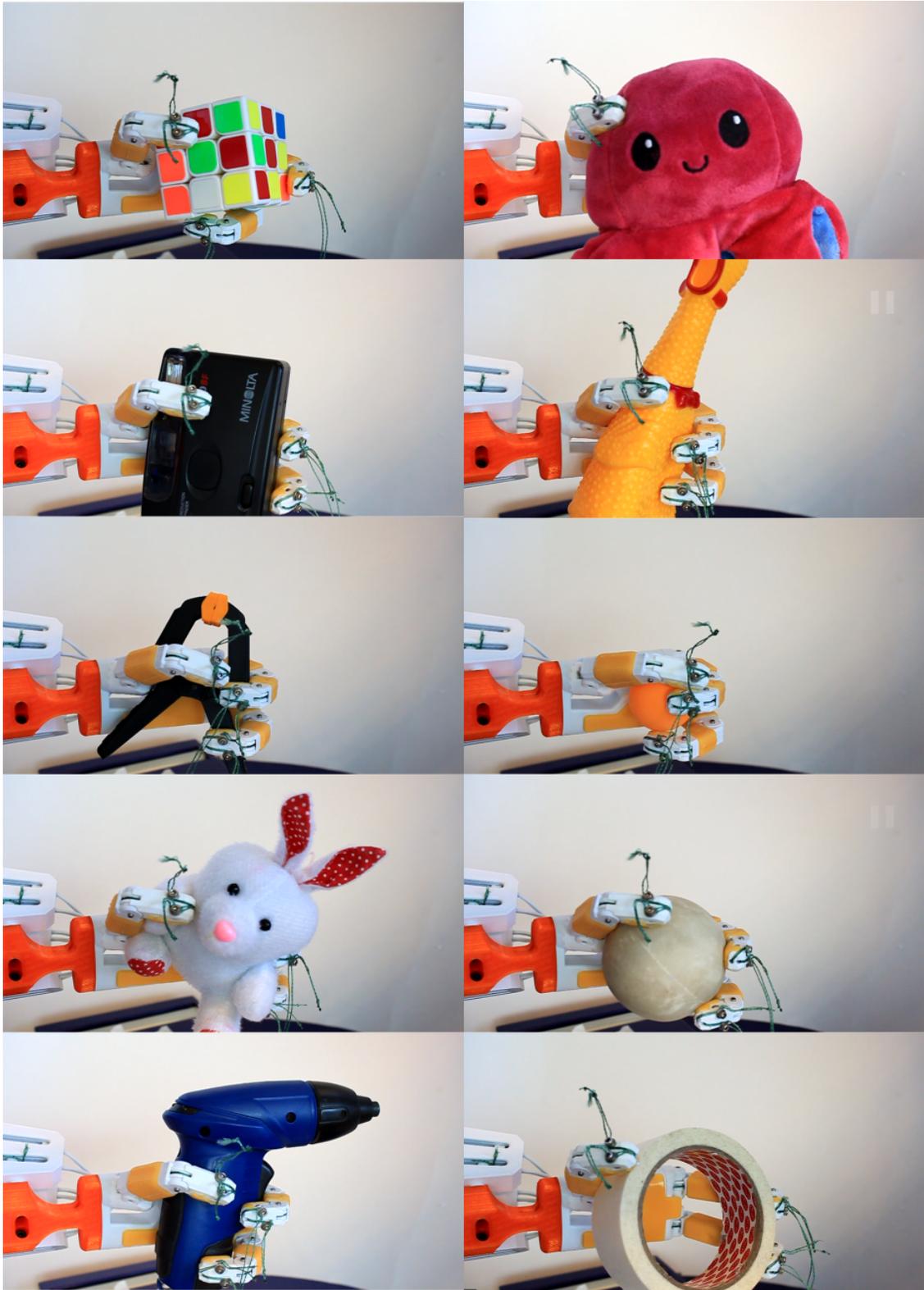


Figura 5.12: Objetos agarrados durante la prueba. De arriba a la izquierda hacia la derecha abajo: cubo rubik, peluche pulpo, cámara, pollo, pinza, pelota de ping pong, peluche conejo, pelota de silicona, taladro destornillador, masking tape.

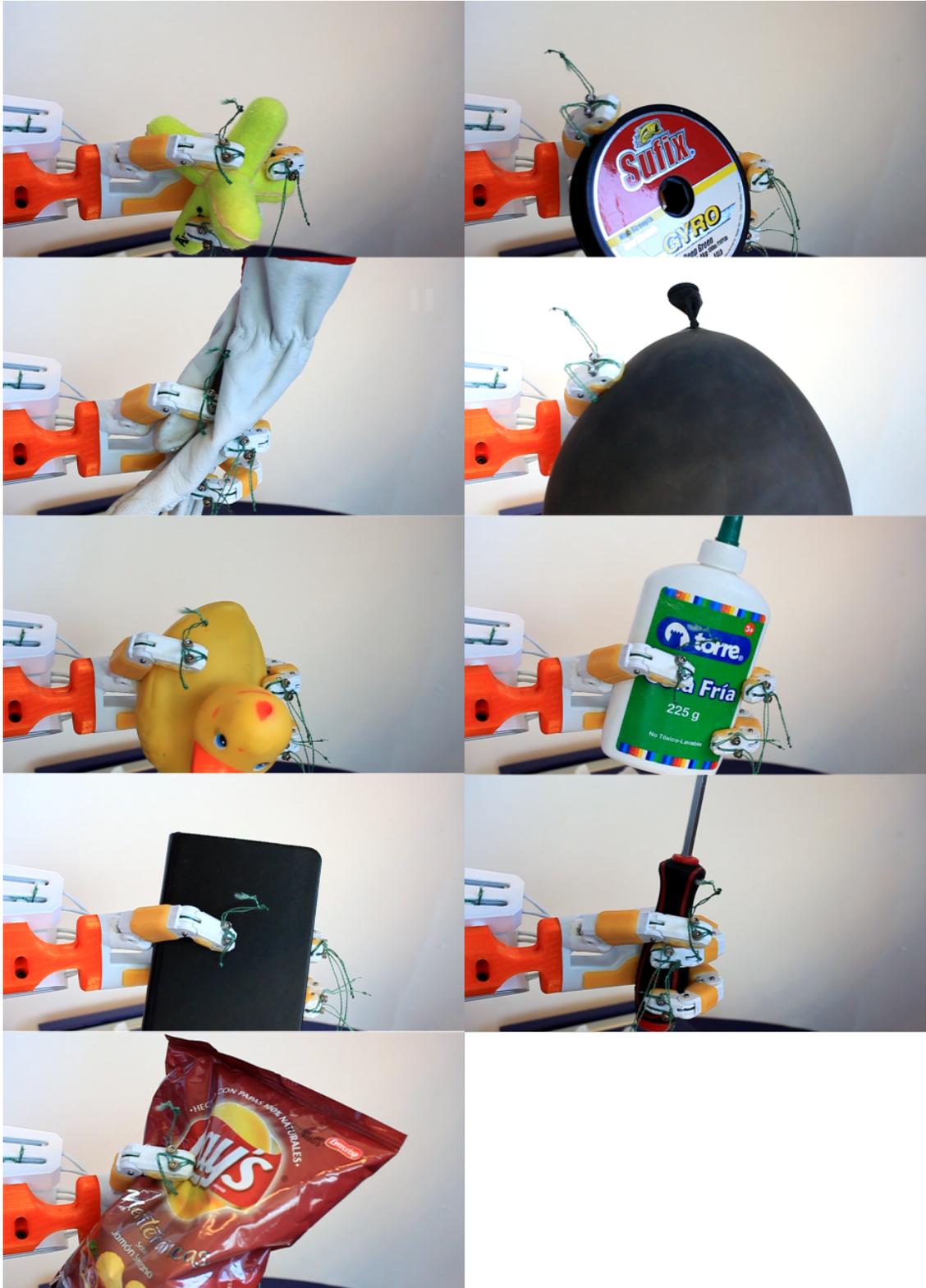


Figura 5.13: Objetos agarrados durante la prueba. De arriba a la izquierda hacia la derecha abajo: juguete de perro, rollo de cuerda, guante, globo, pato grande, cola fría, libreta, destornillador, paquete de papas fritas.

5.5. Compatibilidad con el robot Bender

La mano robótica fue ideada para mejorar las capacidades de manipulación del robot Bender del DIE de la Universidad de Chile. Para integrar la mano al robot, es necesario que sea compatible tanto a nivel de hardware como de software. En esta sección se analiza la compatibilidad del sistema desarrollado con el robot en estos dos aspectos.

5.5.1. Integración de hardware

En cuanto a hardware, el sistema desarrollado contempla cuatro subsistemas: la mano robótica (4), los sistemas de actuación TSA de cada dedo (3), las placas electrónicas de los controladores de los motores y los amplificadores de los sensores de fuerza (2), y la electrónica de control de bajo nivel y de distribución de energía (1). En la Figura 5.14 se puede ver un diagrama de los subsistemas y como interactúan entre sí.

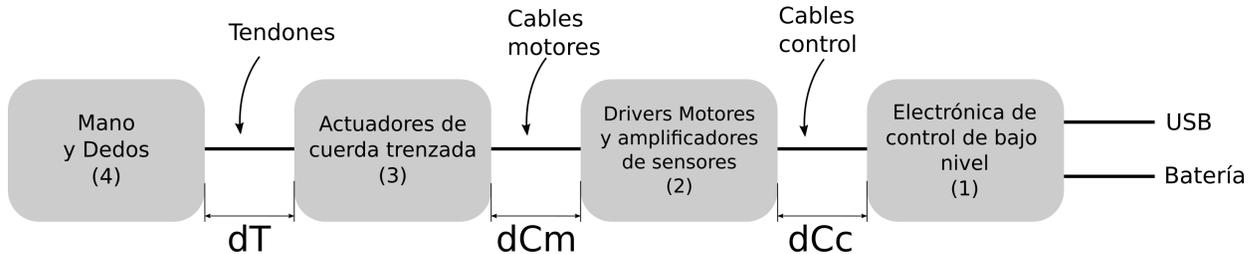


Figura 5.14: Diagrama de bloques de los subsistemas implementados, con énfasis en las distancias físicas que los separan: dT , dCm , dCc .

Para integrar los cuatro subsistemas en el robot Bender, es importante analizar de que forma interactúan entre sí, la distancia física que los separan, el peso de cada uno de ellos y qué limitaciones son importantes de tomar en cuenta a la hora de definir criterios para su integración:

- Entre (4) y (3) hay una distancia dT , que es la distancia que recorren los tendones por dentro del tubo que los guía. Si bien el utilizar tendones para transmitir la fuerza entre los actuadores y los dedos permite desacoplar los sistemas y separarlos físicamente, existe una pérdida de tensión asociada al roce entre el tendón y el tubo guía, y depende principalmente de la distancia dT . Si dT es muy grande, la fuerza que se transmite a los dedos puede ser insuficiente al momento de agarrar objetos.
- Entre (3) y (2) hay una distancia dCm . Esta distancia está limitada por el largo de los cables integrados en los motores (180mm), que pueden ser alargados mediante una placa electrónica dedicada, por lo que no supone un desafío mayor para la integración.
- Entre (2) y (1) existe una distancia dCc , que es el largo de los cables que conectan ambos

subsistemas. Se recomienda que el largo de estos cables al menos permita integrar el subsistema (1) fuera del brazo del robot para evitar agregar una carga extra al motor que levanta el brazo.

El subsistema (1) distribuye la energía y las señales de control al resto de los subsistemas. Los motores son de 24v, por lo que todo el sistema puede ser alimentado por una batería LiPo de 6 celdas, que tiene un voltaje nominal de 22.2v.

Las masas de cada subsistema son importantes, ya que dependiendo del lugar del brazo donde se ubiquen, pueden cargar en mayor o menor medida los motores que mueven los brazos. En la Tabla 5.17 se detalla el peso aproximado de cada subsistema.

Subsistema	Masa aproximada [gr]
(1)	240
(2)	100
(3)	260
(4)	110

Tabla 5.17: Masa aproximada de cada subsistema.

5.5.2. Integración de software

El sistema de control de alto nivel de la mano está escrito en Python: una clase 'Mano' hereda funcionalidades de la clase 'ManoSerial' y contiene a tres objetos de clase 'Dedo': índice, pulgar y medio. 'ManoSerial' implementa la comunicación serial con el Arduino Mega y en 'Dedo' se definen los métodos de control de alto nivel de cada dedo: abrir, cerrar, apretar y relajar, entre otros.

En el robot Bender, los comportamientos y sistemas de control de alto nivel están implementados usando el *middleware* ROS (*Robot Operating System*). ROS implementa un sistema de transmisión de mensajes entre nodos, donde cada nodo puede recibir y/o enviar mensajes, y ejecutar acciones (por ejemplo mover un motor, o leer datos de un sensor), según cual sea su utilidad dentro del sistema. Los nodos pueden ser programados en C++ o Python, y la comunicación entre nodos es transparente al lenguaje de programación utilizado en su implementación. Dependiendo de la aplicación, algunos nodos del sistema de Bender están escritos en C++, y otros en Python.

Para que el control de alto nivel de la mano pueda ser integrada a ROS, es necesario implementar un nodo que contenga un objeto de clase 'Mano', y un *rospy.Subscriber* que pueda recibir mensajes desde otros nodos del sistema, que permitan comandar la mano utilizando los métodos implementados en la clase 'Mano', para realizar los agarres, por ejemplo: `Mano.abrir()`, `Mano.cerrar()`, `Mano.apretar()` entre otros.

6 Conclusiones

6.1. Conclusiones generales

En este trabajo de tesis se diseñó y fabricó, utilizando tecnologías de fabricación digital de bajo costo, una mano robótica antropomórfica subactuada, que utiliza un sistema de actuación de cuerdas trenzadas. Se implementó el sistema de control que permite su funcionamiento y se evaluó cualitativa y cuantitativamente su desempeño para agarrar de manera segura objetos con diferentes características de forma, tamaño y peso. Además se mostró su capacidad de tomar objetos cotidianos de diferente forma, tamaño y rigidez.

La mano tuvo un desempeño adecuado al agarrar objetos livianos, de peso medio y de tamaño medio, y tuvo un desempeño deficiente en el agarre de objetos pesados y grandes, así como también para objetos muy pequeños. Del análisis de los resultados se proponen ideas que podrían mejorar el desempeño en los aspectos donde la mano no funcionó bien. El tamaño mínimo de objetos que la mano puede manipular es de 24mm debido a límites del diseño de los dedos, y no puede realizar agarres de precisión, entre ellos la pinza.

Se implementó un controlador de posición para los motores y un controlador de tensión de los tendones de los dedos. El controlador de posición permite abrir los dedos al tirar el tendón extensor, y permite cerrar los dedos sobre los objetos de manera controlada. El control de tensión permite que cada dedo ejerza una fuerza de agarre sobre el objeto, independiente de la posición final de los dedos con respecto a este. Los dedos se adaptan a la forma de los objetos, sin disminuir la fuerza del agarre, lo que entrega versatilidad y robustez a la variación de las características de los objetos agarrados, dentro de un rango limitado. Mientras más puntos de contacto tenga la mano con el objeto en el agarre, mejor se distribuye la fuerza y se genera un agarre más seguro.

En las pruebas de agarre de la mano, se identificaron 8 tipos de agarres diferentes definidos en la taxonomía GRASP: (1) diámetro grande, (2) diámetro pequeño, (3) envoltura media, (10) disco de potencia, (11) esfera de potencia, (12) disco de precisión, (14) trípode y (28) esfera de dedos.

Con respecto al diseño y la fabricación de la mano, al ser diseñada para ser impresa en 3D, las posibilidades de mejoras son muy grandes, y el costo en tiempo y dinero de probar nuevos diseños

es bajo, comparado con otros métodos de fabricación. Este punto es en particular importante si se toma en cuenta que la mano está pensada para ser una plataforma de aprendizaje y desarrollo en el campo de la manipulación robótica.

Actualmente la mayoría de las piezas de la mano están impresas en PLA, debido a que es un material de bajo costo y fácil de imprimir en la mayoría de las impresoras 3D disponibles en el mercado. En general el PLA no tiene buenas propiedades mecánicas en comparación a otros materiales como el ABS, Policarbonato o PETG, y se recomienda para la realización de prototipos estéticos y modelos conceptuales más que para prototipos funcionales. Sin embargo, se probó el funcionamiento de la mano y no hubo mayores problemas con las piezas impresas en PLA, pero es posible que en el futuro puedan fallar, quebrarse o deformarse, y si se quiere desarrollar un prototipo funcional duradero y resistente es recomendable utilizar otros materiales como los ya mencionados.

6.2. Trabajo futuro

Con respecto a la dinámica y el control del sistema, es necesario realizar un estudio más detallado del comportamiento elástico y dinámico del sistema de actuación y de la configuración espacial de los dedos, que permitan realizar un mejor control de la mano dada la configuración de tendones agonista-antagonista propuesta.

La integración de sensores blandos basados en EGaIn [36] [35] en las yemas de los dedos y la palma, podría mejorar las capacidades de manipulación de la mano, al otorgar realimentación del estado de los agarres y la fuerza realizada por los dedos sobre el objeto. Un desafío importante de este desarrollo es la fabricación de los sensores blandos, que actualmente se realiza de manera casera, debido a la complejidad del proceso de fabricación, que involucra una alta destreza manual.

La mano desarrollada posee una articulación no actuada en el pulgar (pivote MB) que permite generar la aducción o abducción de este. Actuar esta articulación podría significar una mejora importante en el desempeño de la mano para agarrar objetos de manera precisa, tal como lo hacemos los humanos.

Como se mencionó en el análisis de los resultados, reducir los grados de libertad no controlados de los dedos podría generar mejoras significativas en el desempeño, ya que permitiría controlar de mejor manera el movimiento de los dedos y la distribución de fuerzas entre el objeto y la mano, lo que permitiría el agarre seguro de objetos más pesados, o de gran tamaño.

Para integrar el sistema en el robot Bender, es necesario realizar una reducción en el tamaño y peso del sistema para no generar cargas innecesarias en los brazos del robot. La electrónica del control junto a los sistemas de actuación podrían ser integrados en un antebrazo compacto, que junto a la mano puedan ser montados tanto en el robot Bender como en otra plataforma de manipulación

robótica. También sería necesario integrar el software de control de alto nivel de la mano en el *middleware* ROS para poder ser controlado por el sistema de control de alto nivel de Bender.

Bibliografía

- [1] O. Binvignat, A. Almagia, P. Lizana, and E. Olave, “Aspectos biométricos de la mano de individuos chilenos,” International Journal of Morphology, vol. 30, pp. 599–606, 06 2012.
- [2] M. W. Marzke, “Tool making, hand morphology and fossil hominins,” Philosophical Transactions of the Royal Society B: Biological Sciences, vol. 368, no. 1630, 2013.
- [3] P. E. Klopsteg, R. H. Alldredge, H. D. Eberhart, R. R. Mcmath, C. L. Mitchell, C. L. Taylor, T. C. Thompson, P. D. Wilson, R. S. Allen, and V. T. Inman, Artificial Limbs, 1955, vol. 2.
- [4] T. Feix, J. Romero, H. B. Schmiedmayer, A. M. Dollar, and D. Kragic, “The GRASP Taxonomy of Human Grasp Types,” IEEE Transactions on Human-Machine Systems, vol. 46, no. 1, pp. 66–77, 2016.
- [5] J. D. Crisman, C. Kanojia, and I. Zeid, “Graspar: A flexible, easily controllable robotic hand,” IEEE Robotics and Automation Magazine, vol. 3, no. 2, pp. 32–38, jun 1996.
- [6] B. Calli, A. Singh, A. Walsman, S. Srinivasa, P. Abbeel, and A. M. Dollar, “The ycb object and model set: Towards common benchmarks for manipulation research,” in 2015 International Conference on Advanced Robotics (ICAR), 2015, pp. 510–517.
- [7] T. Sonoda and I. Godler, “Multi-fingered robotic hand employing strings transmission named “Twist Drive”,” in Intelligent Robots and Systems (IROS), 2010 IEEE/RSJ International Conference on. IEEE, 2010, pp. 2733–2738.
- [8] K. Ogata, Ingeniería de control moderna. Pearson Educación, 2003.
- [9] M. R. Hasan, R. Vepa, H. Shaheed, and H. Huijberts, “Modelling and control of the barrett hand for grasping,” in 2013 UKSim 15th International Conference on Computer Modelling and Simulation, 2013, pp. 230–235.
- [10] M. Grebenstein, A. Albu-Schäffer, T. Bahls, M. Chalon, O. Eiberger, W. Friedl, R. Gruber, S. Haddadin, U. Hagn, R. Haslinger, H. Höppner, S. Jörg, M. Nickl, A. Nothhelfer, F. Petit, J. Reill, N. Seitz, T. Wimböck, S. Wolf, T. Wüsthoff, and G. Hirzinger, “The DLR hand arm system,” in IEEE International Conference on Robotics and Automation, 2011, pp. 3175–3182.

- [11] J. M. F. Landsmeer, “Power Grip and Precision Handling,” Annals of the Rheumatic Diseases, vol. 21, no. 2, pp. 164–170, 1962.
- [12] S. Min and S. Yi, “Development of cable-driven anthropomorphic robot hand,” IEEE Robotics and Automation Letters, vol. 6, no. 2, pp. 1176–1183, 2021.
- [13] G. Chacon Rojas, “Control real y simulado de una mano robótica utilizando referencias generadas por una interfaz mano-guante,” Tesis de Magíster, 2006.
- [14] M. Grebenstein, Approaching Human Performance: The Functionality-Driven Awiwi Robot Hand. Springer, 2014.
- [15] C. Gosselin, F. Pelletier, and T. Laliberte, “An anthropomorphic underactuated robotic hand with 15 dofs and a single actuator,” in IEEE International Conference on Robotics and Automation, 2008. ICRA 2008., jun 2008, pp. 749 – 754.
- [16] J. T. Belter and A. M. Dollar, “Novel differential mechanism enabling two dof from a single actuator: Application to a prosthetic hand,” in IEEE International Conference on Rehabilitation Robotics, 2013.
- [17] R. Deimel and O. Brock, “A novel type of compliant and underactuated robotic hand for dexterous grasping,” The International Journal of Robotics Research, vol. 35, no. 1-3, 2016.
- [18] L. U. Odhner, L. P. Jentoft, M. R. Claffee, N. Corson, Y. Tenzer, R. R. Ma, M. Buehler, R. Kohout, R. D. Howe, and A. M. Dollar, “A compliant, underactuated hand for robust manipulation,” The International Journal of Robotics Research, vol. 33, no. 5, pp. 736–752, 2014.
- [19] Kinova Robotics, “Kinova Gripper KG-3,” <http://www.kinovarobotics.com/innovation-robotics/products/grippers/>, 2017, revisado: 2017-12-13.
- [20] P. A. Vallejos Sanchez, “Metodología de Diseño de Robots Semi-Pasivos,” Tesis de Doctorado, Universidad de Chile, 2011.
- [21] G. Pratt and M. Williamson, “Series elastic actuators,” in Proceedings 1995 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems. Human Robot Interaction and Cooperative Robots, vol. 1, 1995, pp. 399–406.
- [22] G. Tonietti, R. Schiavi, and A. Bicchi, “Design and control of a variable stiffness actuator for safe and fast physical human/robot interaction,” in Proceedings - IEEE International Conference on Robotics and Automation, 2005, pp. 526–531.
- [23] M. Grebenstein and P. Van Der Smagt, “Antagonism for a Highly Anthropomorphic Hand–Arm System,” Advanced Robotics, vol. 22, pp. 39–55, 2008.

- [24] I. Godler, T. Sonoda, and K. Sakurai, “Modeling and Evaluation of a Twist Drive Actuator for Soft Robotics,” Advanced Robotics, vol. 26, no. 7, pp. 765–783, 2012.
- [25] I. Godler and T. Sonoda, “Performance evaluation of twisted strings driven robotic finger,” URAI 2011 - 2011 8th International Conference on Ubiquitous Robots and Ambient Intelligence, pp. 542–547, 2011.
- [26] M. Tavakoli, R. Batista, and L. Sgrigna, “The UC SoftHand: Light Weight Adaptive Bionic Hand with a Compact Twisted String Actuation System,” Actuators, vol. 5, dec 2015.
- [27] G. Palli, C. Melchiorri, G. Vassura, U. Scarcia, L. Moriello, G. Berselli, A. Cavallo, G. De Maria, C. Natale, S. Pirozzi, C. May, F. Ficuciello, and B. Siciliano, “The DEXMART hand: Mechatronic design and experimental evaluation of synergy-based control for human-like grasping,” The International Journal of Robotics Research, vol. 33, no. 5, pp. 799–824, 2014.
- [28] S. H. Jeong, K.-S. Kim, and S. Kim, “Designing anthropomorphic robot hand with active dual-mode twisted string actuation mechanism and tiny tension sensors,” IEEE Robotics and Automation Letters, vol. 2, no. 3, pp. 1571–1578, 2017.
- [29] S. Jeong, Y. Lee, and K.-S. Kim, “Applications: Twisted string actuation-based compact automatic transmission,” in 2021 IEEE International Conference on Robotics and Automation (ICRA), 2021, pp. 10 870–10 876.
- [30] D. Popov and I. Gaponov, “Bidirectional elbow exoskeleton based on twisted-string actuators,” 2013 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems, pp. 5853–5858, 2013.
- [31] R. I. Galilea Kleinstaubler, “Construcción de un robot bípedo semi-pasivo,” Memoria de Ingeniería Eléctrica, Universidad de Chile, 2016.
- [32] D. Schlesiger, G. A. Giacoppo, M. B. Schäfer, and P. P. Pott, “Twisted string actuation with position feedback for robotic endoscopy,” Current Directions in Biomedical Engineering, vol. 7, no. 2, pp. 343–346, 2021.
- [33] T. Tsabedze, E. Hartman, E. Abrego, C. Brennan, and J. Zhang, “Tsa-brag: A twisted string actuator-powered biomimetic robotic assistive glove,” in 2020 International Symposium on Medical Robotics (ISMR), 11 2020, pp. 159–165.
- [34] I. Kim and H. Inooka, “Determination of grasp forces for robot hands based on human capabilities,” Control Engineering Practice, vol. 2, no. 3, pp. 415–420, 1994.
- [35] A. A. Calderón, J. C. Ugalde, L. Chang, J. C. agal, and N. O. Pérez-Arancibia, “An earthworm-inspired soft robot with perceptive artificial skin,” Bioinspiration & Biomimetics, vol. 14, no. 5, aug 2019.

- [36] G.-S. Cho and Y.-J. Park, "Soft gripper with egain soft sensor for detecting grasp status," Applied Sciences, vol. 11, no. 15, 2021.
- [37] B. Calli, A. Walsman, A. Singh, S. Srinivasa, P. Abbeel, and A. M. Dollar, "Benchmarking in manipulation research: Using the yale-CMU-berkeley object and model set," IEEE Robotics & Automation Magazine, vol. 22, no. 3, pp. 36–52, sep 2015.
- [38] K. M. Lynch, N. Marchuk, and M. L. Elwin, Embedded Computing and Mechatronics with the PIC32 Microcontroller, 2015.
- [39] J. Kelly, "What is the most effective way to commutate a bldc motor?" 2017, revisado: 2017-12-20. [Online]. Available: <https://www.digikey.com/en/articles/techzone/2017/feb/what-is-the-most-effective-way-to-commutate-a-bldc-motor>
- [40] Maxon, "Ec 20 flat Ø20mm 5 watt," 2021. [Online]. Available: https://www.maxongroup.com/medias/sys_master/root/8882562269214/EN-21-288.pdf
- [41] T. Inc., "Flexiforce™ a101 sensor," 2021. [Online]. Available: <https://www.tekscan.com/products-solutions/force-sensors/a101>
- [42] S. K. Karna and Dr. Rajeshwar Sahai, "An Overview on Taguchi Method," International Journal of Engineering and Mathematical Sciences, vol. 1, pp. 11–18, 2012.
- [43] S. Fraley, M. Oom, B. Terrien, and J. Zalewski, "Design of Experiments via Taguchi Methods - Orthogonal Arrays," <https://eng.libretexts.org/@go/page/22674>, dec 2021, online, Revisado: 2022-01-23.

Anexos

A. Placas electrónicas del sistema

A.1. Placa para el controlador de un dedo

Para cada dedo se fabricó una placa que permite conectar el Arduino Nano con el bus SPI, la alimentación de energía, los controladores de los motores y la señal del sensor de fuerza instalado en cada dedo. En la Figura 6.1 se puede ver un diagrama esquemático del circuito fabricado.

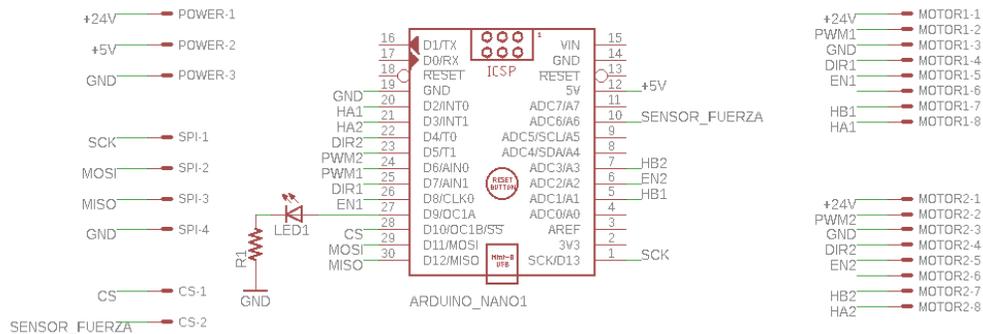


Figura 6.1: Esquemático de la placa fabricada para el control de un dedo

A.2. Placa para el controlador de un motor

Se diseñó una PCB para montar el controlador de motores Maxon. Esta placa recibe como entrada las señales de control desde el microcontrolador (PWM, EN, DIR) además de la alimentación de los motores. Envía las señales de los sensores de efecto Hall (H1, H2) como salidas para el microcontrolador, para poder realizar el control de posición del motor. En la Figura 6.2 se puede ver un esquemático de la PCB diseñada y en la Figura 6.3 se pueden ver fotografías de la PCB fabricada y armada.

La PCB fue diseñada en el software Eagle y los archivos fuente se encuentran publicados en el repositorio público de GitHub: <https://github.com/growloff/maxon-bldc-breakout>.

A.3. Placa amplificadora del sensor de fuerza

Se diseñó una PCB que permite amplificar y acondicionar dos sensores de fuerza *FlexiForce* A101. Se utilizó un circuito integrado MCP602 que contiene dos amplificadores operacionales. La configuración de los amplificadores es de un amplificador inversor, por lo que es necesario que el voltaje de entrada V_T sea un voltaje negativo para que la salida sea positiva. Se utilizó el convertidor de voltaje LMC7660 para generar un voltaje negativo. En la Figura 6.4a se puede ver el diagrama esquemático de la PCB fabricada y en las Figuras 6.4b y 6.4b dos vistas de la PCB armada.

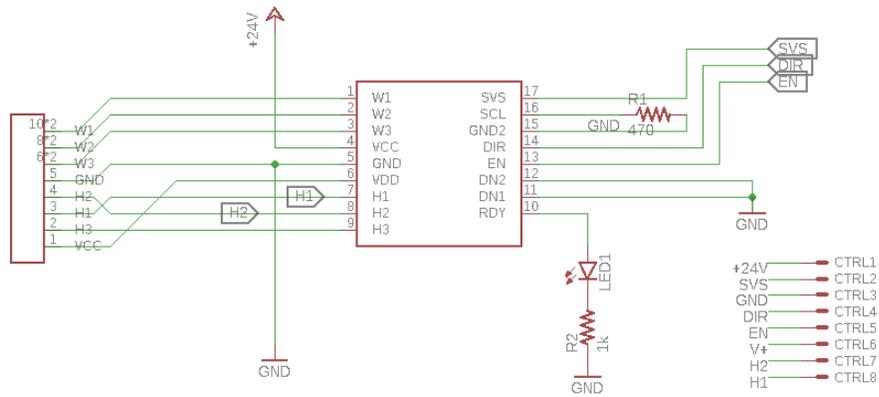
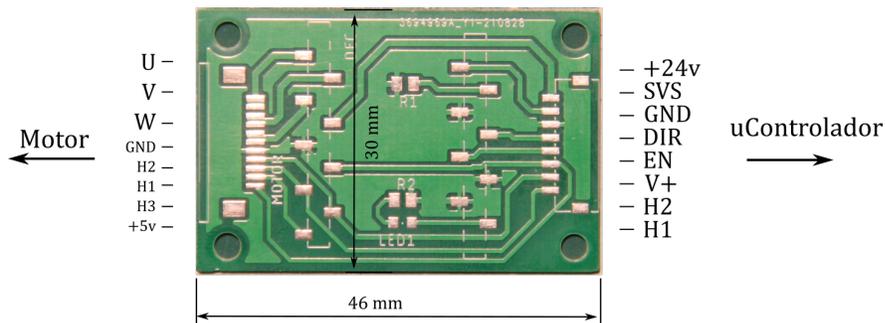
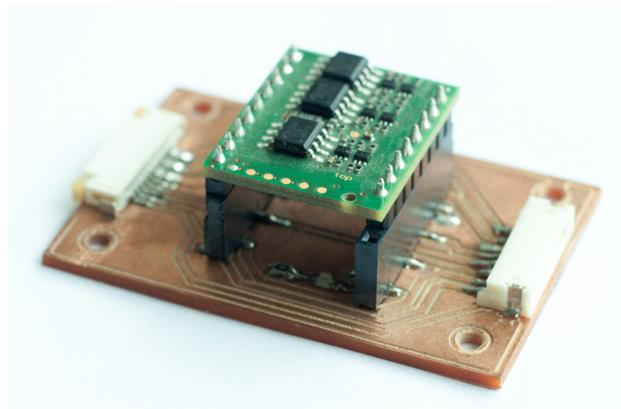


Figura 6.2: Esquemático de la placa fabricada para el controlador de motores



(a) PCB para el controlador de motores Maxon sin armar con dimensiones y entradas/salidas.



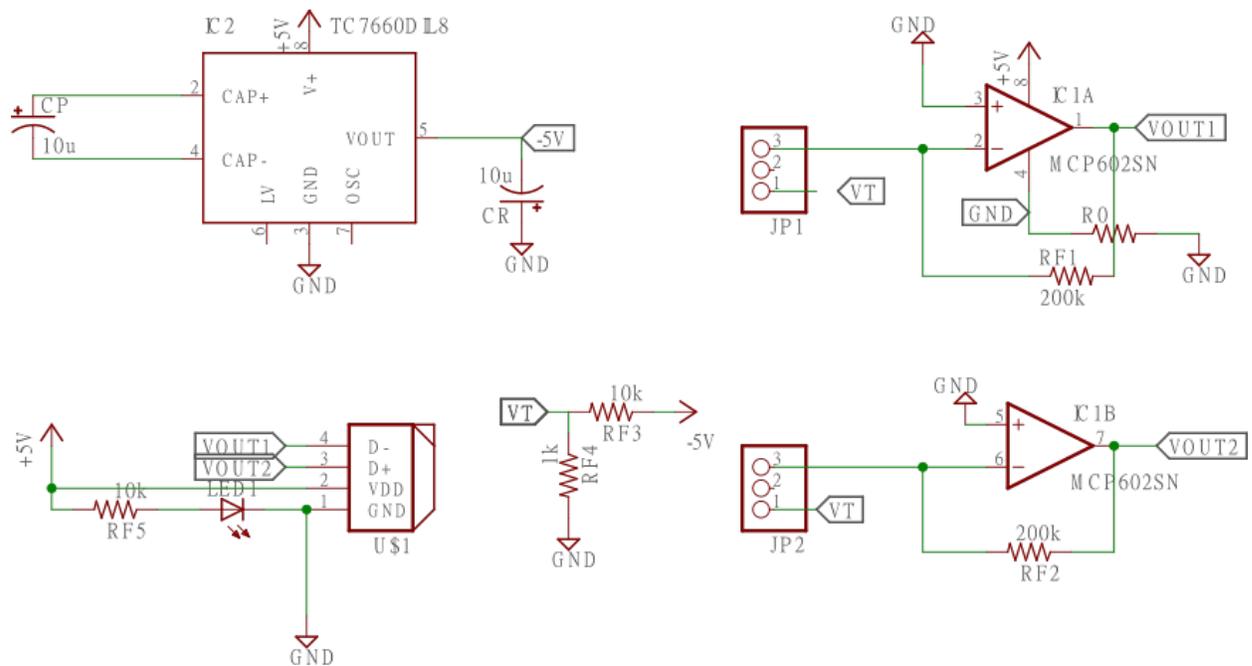
(b) PCB armada con el controlador montado.

Figura 6.3: PCB para controlador de motor Maxon sola (a) y armada (b).

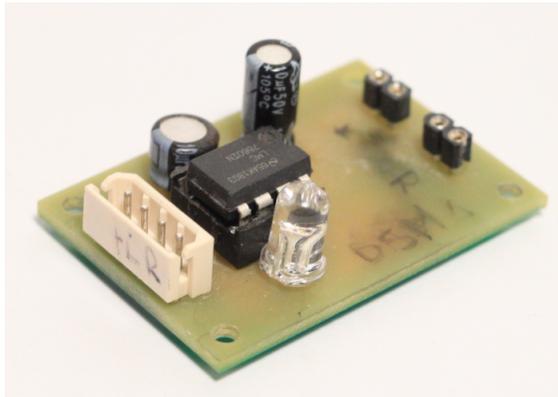
Los valores de VT y RF de cada amplificador condicionan la sensibilidad y la ganancia de estos. Estos valores fueron calibrados para medir una fuerza máxima de aproximadamente 15N, utilizando masas de prueba para relacionar el voltaje de salida del amplificador con la fuerza medida por el sensor. De la ecuación 4.18, se obtiene que la fuerza máxima que se puede medir en los tendones de la cuerda es de 28N.

La PCB fue diseñada en el software Eagle y los archivos fuente se encuentran publicados en el

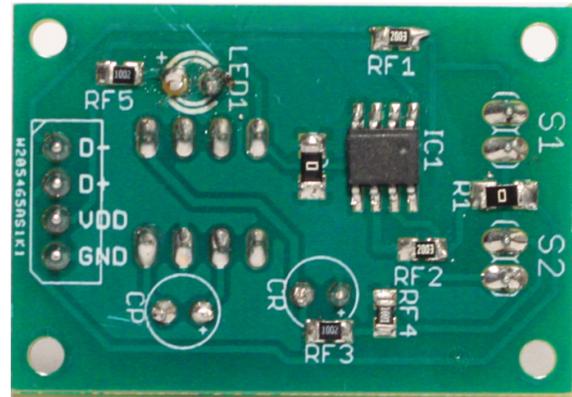
repositorio público de GitHub <https://github.com/growloff/dual-a101-amplifier>.



(a) Esquemático de la PCB para acondicionamiento del sensor de fuerza.



(b) Vista superior.



(c) Vista inferior.

Figura 6.4: PCB para acondicionamiento de dos sensores de fuerza A101, (a) diagrama esquemático y (b) y (c) fotografías de la placa armada.

A.4. Placa de distribución de energía

Se fabricó un circuito de distribución de energía que distribuye los 24V de alimentación para los motores y los 5V de alimentación para los microcontroladores y amplificadores de sensores. Se utilizó una fuente DC-DC de 5V fija TSR 1-2450 para bajar el voltaje de 24V a 5V.

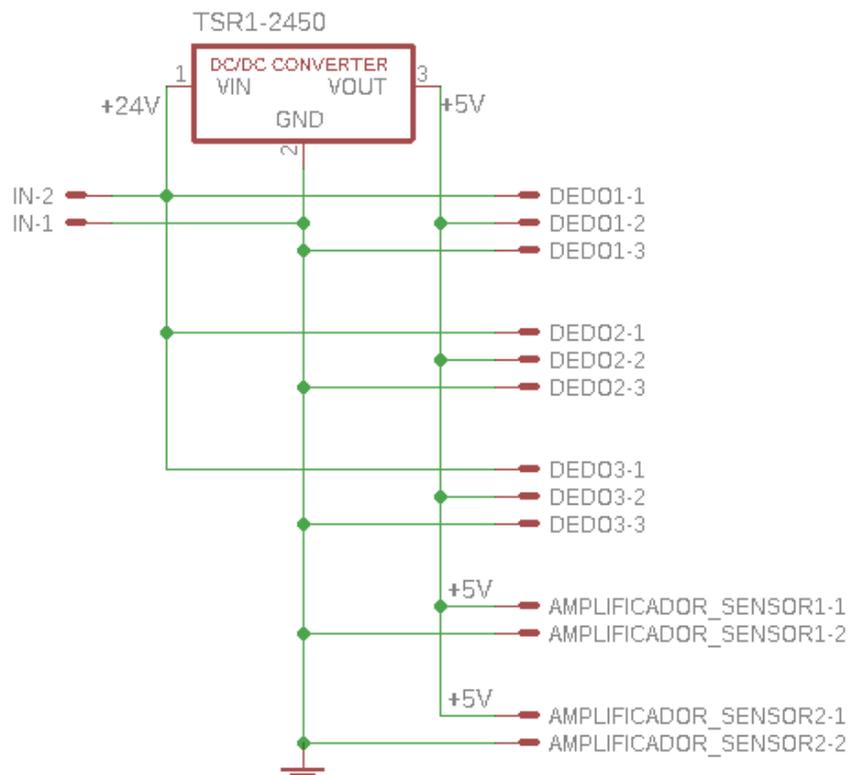


Figura 6.5: Esquemático de la placa fabricada para distribuir la energía de los motores, microcontroladores y amplificadores.

B. Información técnica de componentes comerciales

B.1. Arduino Mega 2560 R3

El Arduino Mega 2560 es una placa de desarrollo de electrónica basada en el microcontrolador ATmega2560. Tiene 54 pines de entrada/salida (I/O) digital, de los cuales 15 se pueden usar como salidas PWM, 16 entradas analógicas, 4 puertos UART de implementados en hardware, entre otros. En la Tabla A.1 se pueden ver algunas especificaciones técnicas de la placa. En la Figura A.6 se puede ver una imagen del Arduino Mega.

Microcontrolador	ATmega2560
Arquitectura	AVR
Voltaje de operación	5 V
Memoria flash	256 KB de los cuales 8 KB son usados por el bootloader
SRAM	8 KB
Velocidad del reloj	16 MHz
Pines de entrada analógica	16
EEPROM	4 KB
Corriente DC por pin I/O	40 mA
Voltaje de entrada	7-12V
Pines digitales I/O	54 (15 de los cuales son PWM)
Salidas PWM	6
Consumo de corriente	19 mA
Pines de interrupción externa	6 (2, 3, 18, 19, 20, 21)
Comunicación	4 UART, 1 SPI, 1 I2C

Tabla A.1: Especificaciones técnicas Arduino Mega 2560 R3.

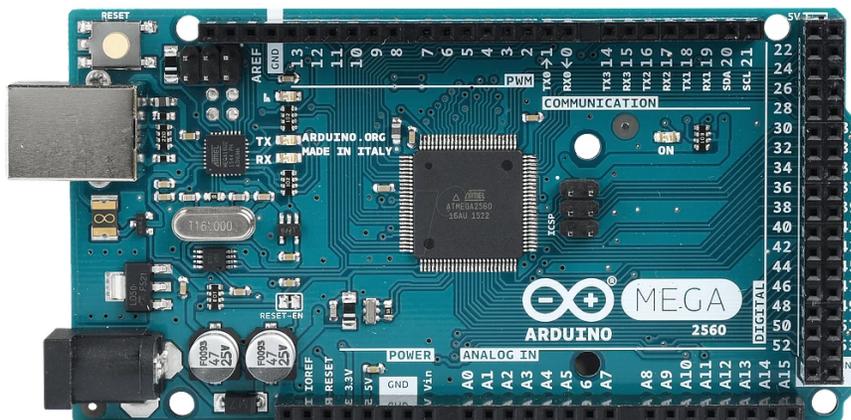


Figura A.6: Arduino Mega 2560 R3.

B.2. Arduino Nano R3

El Arduino Nano R3 es una placa de desarrollo de electrónica basada en el microcontrolador ATmega328. A diferencia de otras placas de Arduino no posee un jack de alimentación externa y el puerto de programación es un Mini-B USB. Su tamaño y configuración de pines es amigable con el formato de las tarjetas de prototipado rápido (protoboard) lo que lo hace especial para prototipar proyectos electrónicos, además de poder ser integrado en dispositivos semi-finales debido a su pequeño factor de forma. En la tabla A.2 se pueden ver algunas especificaciones técnicas de la placa. En la Figura A.7 se puede ver una imagen del Arduino Nano.

Microcontrolador	ATmega328
Arquitectura	AVR
Voltaje de operación	5 V
Memoria flash	32 KB de los cuales 2 KB son usados por el bootloader
SRAM	2 KB
Velocidad del reloj	16 MHz
Pines de entrada analógica	8
EEPROM	1 KB
Corriente DC por pin I/O	40 mA
Voltaje de entrada	7-12V
Pines digitales I/O	22 (6 de los cuales son PWM)
Salidas PWM	6
Consumo de corriente	19 mA
Pines de interrupción	2 (2, 3)
Comunicación	1 SPI, 1 UART, 1 I2C

Tabla A.2: Especificaciones técnicas Arduino Nano R3.

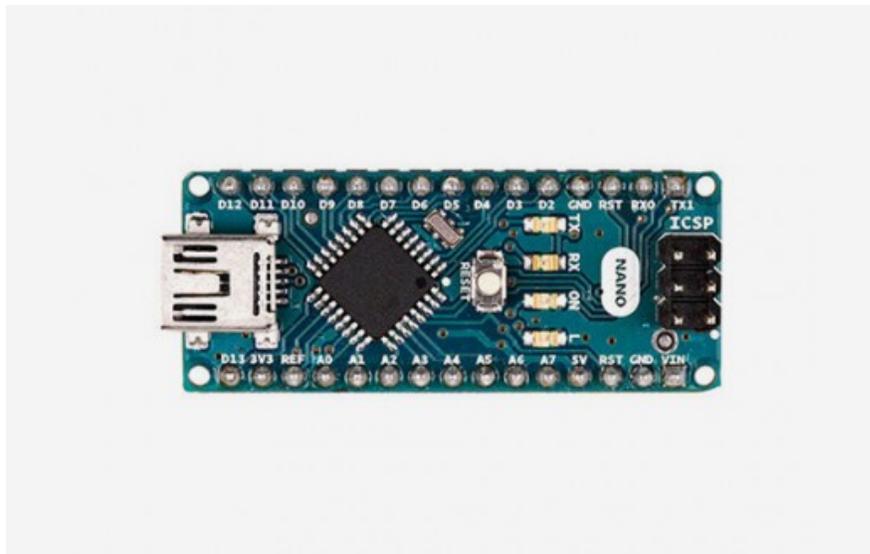


Figura A.7: Arduino Nano R3.

C. Fabricación de fundas de silicona

Las fundas de silicona de los dedos buscan simular las yemas o pulpejos de cada una de las falanges y de la palma con la finalidad de aumentar el roce entre la mano y los objetos agarrados. Se escogió la silicona de marca *Zhermack Elite Double 22 Fast A*, que tiene una dureza o *shore 22* en la escala A de medición de dureza.

La silicona *Elite Double 22 Fast* necesita una base y un catalizador, en proporción 1:1, para comenzar su proceso de endurecimiento. Este ocurre 5 minutos luego de mezcladas las dos partes por lo que el proceso de mezcla y vertido de la silicona en los moldes debe ser rápido para tener buenos resultados. En la Figura B.1 se pueden ver los materiales necesarios para la mezcla e inyección de la silicona en los moldes. Debido a la alta viscosidad de la silicona en estado líquido, es posible que queden burbujas de aire al momento de ser vertida en el molde, lo que se quiere evitar para que el molde quede completamente lleno de silicona y con la dureza necesaria para la aplicación. Para eliminar las burbujas de los moldes estos se deben ingresar en una cámara de vacío antes que la silicona termine su fase de endurecimiento. En la Figura B.2 se pueden ver los moldes dentro de la cámara de vacío, listos para recibir la mezcla de silicona con el catalizador.

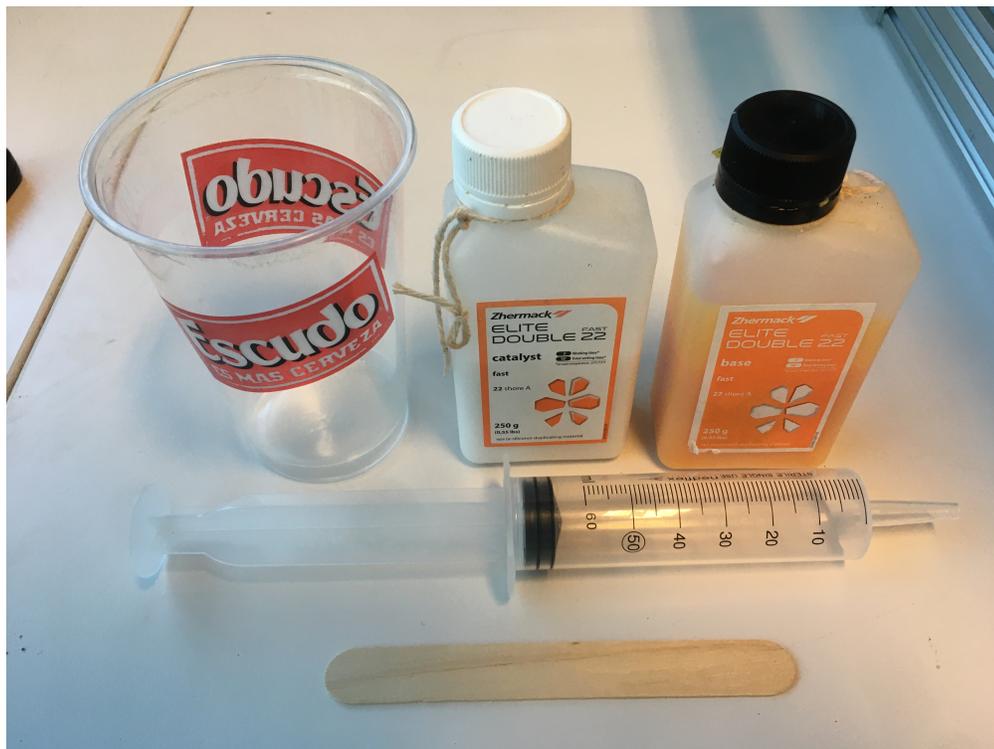


Figura B.1: Materiales necesarios para la mezcla e inyección de la silicona en los moldes: contenedor para la mezcla, catalizador, silicona base, jeringa y paleta para mezclar.

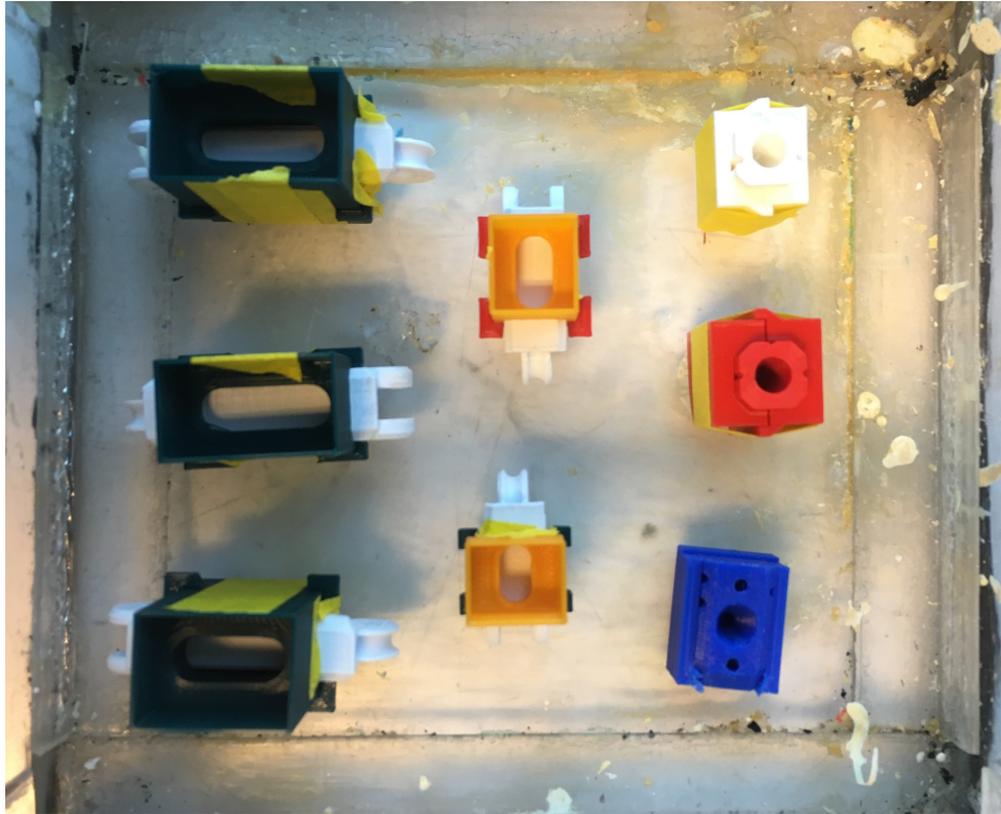


Figura B.2: Moldes de los tres dedos preparados para verter la silicona.

Para fabricar las fundas de siliconas se utilizan dos procesos de moldeo: por inserción para las yemas de las falanges proximal y media, y por vaciado para las yemas de las falanges distales y para el pulpejo de la palma. El moldeo por inserción consiste en verter la silicona dentro de un molde que contiene suspendidas las falanges de modo que la silicona se solidifique en el molde alrededor de estas. El moldeo por vaciado consiste en verter la silicona dentro de un molde expulsivo, que permite luego retirar la pieza de silicona que se pega en la pieza final que la soporta (falanges distales y palma en este caso). En la Figura B.3 se puede ver el resultado de las falanges con las fundas de silicona fabricadas.

Los moldes para fabricar los moldes de silicona de los tres dedos y de la palma se pueden encontrar en la siguiente carpeta del repositorio de la mano: <https://github.com/growolff/robot-hand/tree/main/files/3mf/silicon-moulds>.



Figura B.3: Falanges de los dedos medio (arriba), índice (al medio) y pulgar (abajo) con las funda de silicona luego de terminado el proceso.

D. Tabla de selección de arreglos ortogonales de Taguchi

Numbers of Parameters (P)	Number of levels			
	2	3	4	5
2	L4	L9	L16	L25
3	L4	L9	L16	L25
4	L8	L9	L16	L25
5	L8	L18	L16	L25
6	L8	L18	L32	L25
7	L8	L18	L32	L50
8	L12	L18	L32	L50
9	L12	L18	L32	L50
10	L12	L27	L32	L50
11	L12	L27		L50
12	L16	L27		L50
13	L16	L27		
14	L16	L36		
15	L16	L36		
16	L32	L36		
17	L32	L36		
18	L32	L36		
19	L32	L36		
20	L32	L36		
21	L32	L36		
22	L32	L36		
23	L32	L36		
24	L32			
25	L32			
26	L32			
27	L32			
28	L32			
29	L32			
30	L32			
31	L32			

Tabla C.3: Tabla de selección de arreglos ortogonales de Taguchi

E. Resumen extendido

El sistema de actuación por cuerdas trenzadas (TSA), que transforma el movimiento rotacional de un motor en una fuerza de tracción lineal, ha demostrado tener buenos resultados en sistemas robóticos debido a su razón de reducción mayor y menor peso, con respecto a otras transmisiones mecánicas. Sus características elásticas intrínsecas lo hacen seguro para aplicaciones que requieran interacciones entre humanos y robots.

Este trabajo presenta una mano robótica subactuada que utiliza actuadores de cuerda trenzada (TSA) para generar el movimiento de los dedos. Se plantea la hipótesis de que utilizar un control de tensión de los tendones permite el agarre seguro de diferentes objetos cotidianos.

Al analizar el comportamiento del TSA con control de posición del motor flexor para diferentes cargas en la salida del sistema, se observa que, debido al comportamiento elástico del TSA, este esquema de control no es adecuado cuando se desconoce el tamaño del objeto. Se estudia la fuerza de agarre de la mano utilizando un control de tensión de los tendones, de donde se desprenden las ventajas que posee este esquema de control en el agarre de objetos.

Se evalúa el agarre seguro de objetos de diferentes características, y de los resultados se valida la hipótesis para cierto tipo de objetos. Sin embargo, se observan limitaciones en el agarre de objetos muy grandes y pesados, u objetos muy pequeños que no logran ser afirmados por los dedos. Finalmente, en base a los resultados obtenidos, se realizan propuestas de mejoras al diseño de la mano en pos de aumentar su desempeño.

