



UNIVERSIDAD CATÓLICA DEL NORTE
FACULTAD DE INGENIERÍA Y CIENCIAS GEOLÓGICAS
DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA DE SISTEMAS Y COMPUTACIÓN
MAGÍSTER EN INGENIERÍA INFORMÁTICA

Diseño, caracterización y fabricación de una pinza robótica interconectable modular con robótica blanda

Proyecto de Grado

CAROLINA SILVA PLATA

Profesor Guía:

Dr. José Gallardo Arancibia

Profesor Externo:

Dr. Juan Cristóbal Zagal Montealegre

Antofagasta, Chile

Índice general

Índice general	1
Agradecimientos	6
Resumen	7
1. Introducción	8
2. Marco Referencial	10
2.1. Objetivos	10
2.1.1. Objetivo General	10
2.1.2. Objetivos específicos	10
2.2. Metodología	11
3. Estado de Arte	13
3.1. Robótica Blanda	14
3.2. Material Blando	17

3.3. Estructuras del Actuador Blando	20
3.3.1. Actuadores	20
3.4. Pinzas robóticas	23
3.4.1. Inspiración en la manipulación	23
3.4.2. Pinzas robóticas con estructura rígida	24
3.4.3. Pinzas robóticas universales	25
3.4.4. Pinzas robóticas con estructura blanda	26
3.5. Inconveniencias de la Robótica Blanda	33
3.6. Creciente investigación científica de la Robótica Blanda	39
4. Diseño y Fabricación de dedos blandos	42
4.1. Interfaz Modular Interconectable (MII)	42
4.2. Diseño de los Dedos blandos	45
4.2.1. Dedos Blandos	47
4.3. Fabricación de los dedos blandos	53
4.3.1. Material	53
4.3.2. Proceso de Fabricación	54
5. Pinza robótica interconectable	60
5.1. Primera Sección: Base	61
5.2. Segunda Sección: Palma	64

5.2.1. Primera Estructura	69
5.2.2. Segunda Estructura	71
5.2.3. Tercera Estructura	73
5.3. Tipos de Agarres	76
6. Circuito de Control	78
6.1. Circuito de control	78
6.2. Circuito de sensado	82
7. Experimentación y Resultados	84
7.1. Deformación de los dedos blandos	84
7.2. Capacidad de presión de los dedos blandos	86
7.3. Objetos de Prueba	87
7.4. Evaluación de agarre con diversas configuraciones de la pinza robótica	89
8. Conclusiones	102
8.0.1. Trabajos Futuros	103

Dedicado a mis papás: Nano y Ofelia

Agradecimientos

Al profesor Juan Cristóbal Zagal por darme la oportunidad de desarrollar el proyecto en el laboratorio de Robótica de la Universidad de Chile, por sus correcciones, sugerencias y apoyo para lograr el funcionamiento del mismo. Al profesor José Gallardo por apoyarme desde un inicio en esta etapa de estudio de forma acogedora, y confiando siempre en mis habilidades.

A mis papás por su inmenso apoyo, a mi papá que validó mi avance a lo largo del desarrollo del proyecto y su entusiasmo que me acompañaba a continuar con el estudio de este tema y a mi mamá por su apoyo emocional que fueron muy necesarios para mi estadía fuera de mi hogar.

A Abraham por impulsarme a seguir con el avance y ser parte de mi día a día en la construcción de nuevos sueños.

A mis compañeros de laboratorio, Harold, Edgardo, Carola por sus comentarios y sugerencias que me ayudaron en el desarrollo de la tesis.

Resumen

La robótica clásica ha generado grandes avances en la industria a partir de la definición de espacios y objetos estructurados. Sin embargo, un nuevo enfoque en el área de la tecnología ha tomado fuerza para proponer diseños flexibles, adaptables, suaves y seguros, que proveen aplicaciones donde la robótica clásica no ha logrado desenvolverse totalmente bien.

La manipulación de objetos con formas, tamaños y texturas variadas ha planteado un desafío en la ingeniería. Por ello, desde hace muchos años atrás se intentó replicar el diseño de la mano humana pero su compleja estructura mecánica y sensorial dio lugar al planteamiento de soluciones alternativas. Entre estas se encuentran las pinzas universales; pinzas robóticas con dos, tres o cuatro dedos mecánicos con un sistema subactuado o hiperredundante; y actualmente pinzas robóticas con dedos blandos que por su deformabilidad y suave textura ofrecen una manipulación adaptable.

La robótica blanda proporciona flexibilidad a la experimentación de nuevos diseños y morfologías de los cuerpos blandos para incrementar su rendimiento en diversas aplicaciones. En este proyecto se presenta el diseño, caracterización y fabricación de una pinza modular reconfigurable e interconectable con 3 distintos diseños de dedos blandos y un dedo híbrido pasivo para lograr el agarre de objetos irregulares.

1

Introducción

La robótica ha alcanzado a la fecha elevados estándares de automatización, velocidad y precisión en la ejecución de diferentes tareas, unas rutinarias y otras complejas. Regularmente se caracteriza por poseer una estructura física relativamente rígida, una programación específica, un diseño de control matemático concreto y un conjunto de componentes específicos.

En estos últimos años, sin embargo, la observación cuidadosa de la inteligencia corporal de los seres vivos (animales y plantas) ha derivado en el desarrollo y experimentación de un tipo de robótica basado en una estructura blanda, unas formas no convencionales y un uso de material blando con propiedades de flexibilidad, resistencia, maleabilidad y no agresiva, capaces de adaptarse a un entorno particular y efectuar eficazmente una tarea.

Esta corriente se ha denominado *soft robotics* o *robótica blanda* y ha sido gratamente aceptada por los ingenieros en robótica por sus amplias posibilidades de aplicación en tareas como las que requieran una interacción humano-robot y/o donde se requiera adaptabilidad y más tolerancia a los entornos de trabajo, a diferencia de lo que la robótica clásica puede brindar.

A la fecha se ha registrado un número creciente de artículos científicos relacionados a este enfoque y ha estimulado no sólo a ingenieros en robótica, sino también

a científicos de materiales, biomecánicos, químicos y otros a desarrollar estructuras robóticas con actuaciones no convencionales, así como enfrentar el reto de cubrir las demandas de diseño matemático, mecánico, químico, físico y otros. Las aplicaciones que han sido expuestas en estas investigaciones científicas tomaron direcciones en el ámbito industrial, de exploración, médico y de interacción, llegando a proponer, de esa forma, nuevas opciones donde se requiera de adaptabilidad y no agresividad. Una de esas direcciones es la creación de pinzas robóticas adaptables, capaces de interactuar con objetos regulares e irregulares con propiedades variadas (tamaño, peso, textura, forma).

En esta investigación se presentará el diseño y fabricación de una pinza robótica interconectable, reconfigurable y modular. Estas propiedades proporcionarán capacidades de ensamble continuo para la configuración necesaria de agarre exitoso de objetos con distintas propiedades (tamaño, forma, textura). La pinza se configurará con dos, tres y hasta cuatro dedos blandos distribuidos de distintas formas.

2

Marco Referencial

2.1. Objetivos

2.1.1. Objetivo General

Diseñar, caracterizar, fabricar y probar un manipulador robótico basado en una estructura modular y blanda, capaz de adaptarse a su entorno.

2.1.2. Objetivos específicos

1. Diseñar un conjunto de actuadores blandos modulares interconectables para generar un manipulador robótico.
2. Analizar la calidad y características deseables de los materiales blandos a utilizarse en cada uno de los componentes de la estructura blanda.
3. Fabricar el conjunto de módulos diseñados con material adecuado, utilizando técnicas de fabricación, como la litografía, así como herramientas de manufactura y prototipado.
4. Generar distintas configuraciones y probar y evaluar el desempeño de los ma-

nipuladores resultantes.

2.2. Metodología

El desarrollo de esta investigación constará de tres etapas principales: El diseño, evaluación y fabricación de la pinza robótica; el diseño y fabricación de los dedos blandos de la caracterización; y el circuito de control. Para la caracterización de los dedos y de la pinza es necesario conocer conceptos y fundamentos en cuanto a la estructura de los dedos, los materiales que se utilizarán, las técnicas de fabricación y las herramientas necesarias. Por ello, se realizará un estudio del estado de arte que además ayudará a conocer los avances científicos en el ámbito de los manipuladores blandos. El diagrama que se observa en la figura 2.1 expone las fases y etapas a seguir a lo largo del desarrollo del proyecto.

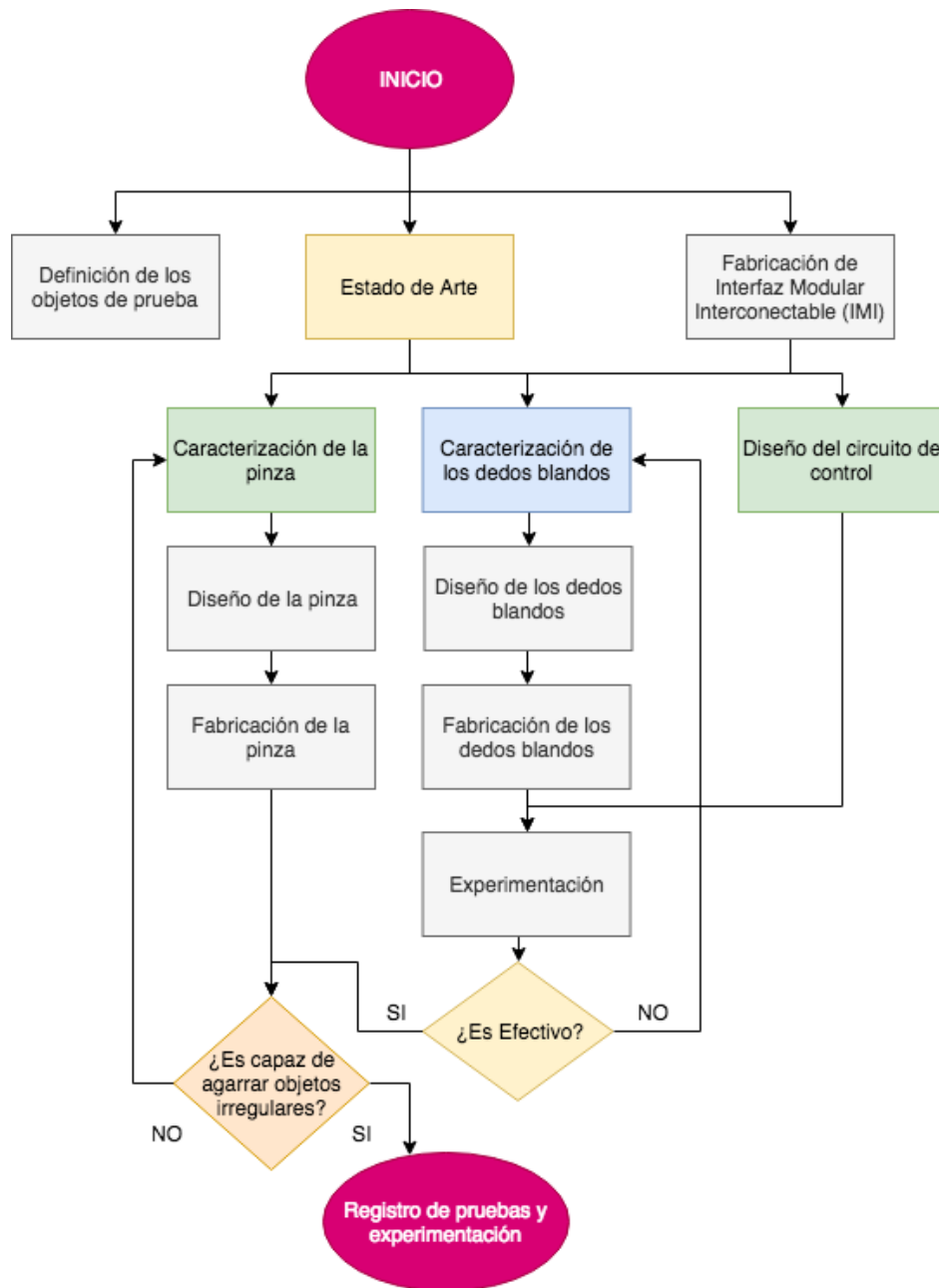


Figura 2.1: Diagrama de la Metodología para el desarrollo del proyecto

3

Estado de Arte

La robótica ingresó con firmeza en la industria, ayudó a minimizar el esfuerzo de las personas que trabajaban en procesos repetitivos y permitió una mayor optimización y precisión de las tareas ejecutadas, entre otras. Esto debido a que el espacio de trabajo de los procesos industriales está estructurado y ordenado. Sin embargo, cuando los espacios no tienen un orden estándar o cuando el entorno es delicado o es sensible a una determinada perturbación se hace necesario incorporar nuevos procesos intermedios que permitan al robot desenvolverse aceptablemente. Estos nuevos procesos deberían ser capaces de reconocer la dinámica del ambiente o ser capaces de desarrollar las acciones físicas necesarias para interactuar con entornos delicados. Se constituyó así en un reto para los investigadores y los ingenieros [1].

Con los años, la robótica se expandió en diversas áreas con aplicaciones incesantemente innovadoras. Según P. Polygerinos [2] el futuro de la tecnología robótica se concentrará, por ejemplo, en mejorar los robots industriales minimizando riesgos de lesiones a los usuarios; en proponer nuevas tecnologías robóticas incorporadas en operaciones quirúrgicas médicas de alta complejidad para elevar la tasa de éxito; y, en proponer nuevas tecnologías de dispositivos wearable para mejorar los movimientos y capacidades físicas de una persona. Es decir, el futuro de la tecnología robótica será la interacción humano - robot.

Entre muchas áreas que son necesarias para potenciar el resultado de esta inter-

acción nace una que se centra en los materiales. En comparación con los materiales rígidos usualmente empleados en la robótica, los materiales blandos brindan una interacción más segura, resistente a las perturbaciones, y con un importante grado de flexibilidad [3]. Este campo se ha denominado *Soft Robotics* o *Robótica Blanda*, donde el cuerpo del robot no sólo es el material de soporte, sino también es el actuador. En algunos casos, el cuerpo del robot también se comporta como un mecanosensor[4] [5] [3].

3.1. Robótica Blanda

Los robots rígidos se caracterizan generalmente por ser poco flexibles, duros y que aplican fuerzas elevadas, convirtiéndose muchas veces en sistemas no-colaborativos, término usado cuando un robot difícilmente puede trabajar en contacto directo con los humanos o con objetos frágiles [6], a diferencia de la gran ventaja que traería consigo la Robótica Blanda.

La literatura aún no tiene una definición oficial para la Robótica Blanda. Por un lado, la comunidad *RoboSoft* - integrante de FET Open Coordination Action -, quienes tienen como objetivo iniciar líneas de tecnología radicalmente nuevas a través de colaboraciones inexploradas entre la ciencia multidisciplinaria avanzada y la ingeniería de vanguardia ¹, hace referencia al término *Soft* tanto por la propiedad estructural generada por una disposición geométrica de materiales duros, como por las propiedades inherentes de los materiales [7] [8].

Según Hamley [9] la suavidad de la materia blanda (estructura química) se define cuando existe suficiente energía térmica en el ambiente que fácilmente puede quebrar y reformar el cuerpo en el material. Una estructura que contiene materia procesada para ser funcional, define su característica suave si el rango de tensión aplicada a éste

¹ Future and Emerging Technologies (FET). El programa FET tiene tres líneas de acción complementarias para abordar diferentes metodologías y escalas, desde nuevas ideas hasta desafíos a largo plazo: FET Open; FET Proactive; FET Flagships

está dentro de las fuerzas ejercidas por la mano humana o por objetos cotidianos de uso, y si las deformaciones resultantes son fácilmente perceptibles por órganos sensoriales, como la piel. Esta percepción directa es necesaria puesto que la interacción deseada de robots se realiza con humanos y seres biológicos [10].

Basándose en ello, Wang utiliza en sus investigaciones el término *Soft-material Robotics* para caracterizar robots que se apoyan en el uso de materiales blandos simples o combinados creativamente entre sí (como elastómeros con fibras de vidrio), tales que generan las características de elasticidad y deformación que requieren los robots [11][12].

Por otro lado, algunos investigadores como Majidi [13] asocian el término *Soft* a materiales con una alta elasticidad. Es decir, si un robot incorpora materiales con esta propiedad capaz de permitir movimientos clave en su estructura base puede ser considerado como un Robot Blando.

El módulo de elasticidad o módulo de Young mide el grado en el cual cambian la longitud y grosor de un cuerpo como resultado de la aplicación de una fuerza óbserve la figura 3.1. Considerando esta relación, la figura 3.2 muestra los valores de elasticidad para diversos tipos de materiales, donde aquellos materias clásicamente usados en la robótica rígida tienen un módulo entre $10^9 - 10^{12}$ Pascal, y los que poseen material blando, como los organismos naturales, cubren entre $10^4 - 10^9$ Pascal [14].

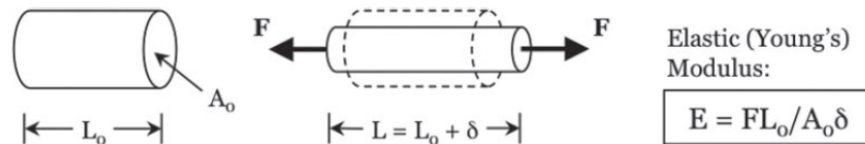


Figura 3.1: Módulo de elasticidad [13]

Donde F : Fuerza; L_0 : Longitud inicial de un cuerpo; A_0 : Área inicial de la base; δ : Variación de la longitud.

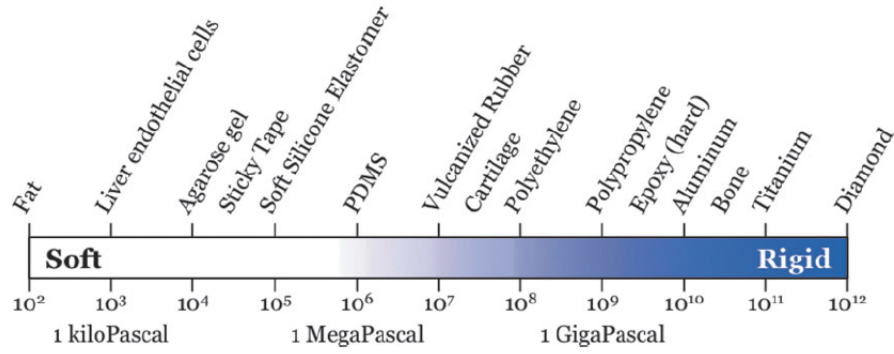


Figura 3.2: Módulo de Young para diversos materiales [13]

Desde otra perspectiva, Trivedi diferencia a los robots blandos por usar diferentes mecanismos para generar movimientos con destreza, esto debido al infinito número de grados de libertad (GDL) que los robots blandos poseen [15], como se observa en la figura 3.3.

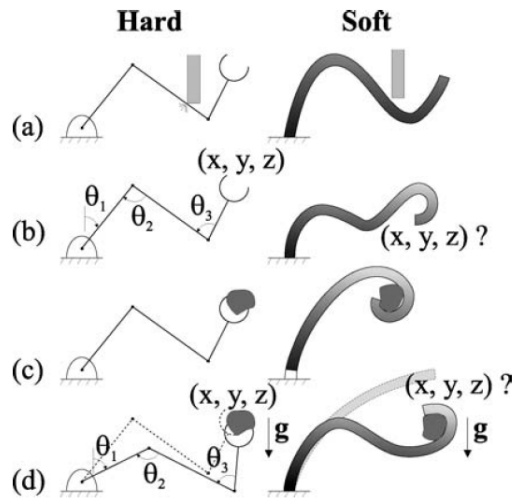


Figura 3.3: Capacidades de robots rígidos y blandos. a) Destreza, b) detección de posición, c) manipulación, d) carga de peso [15]

En suma, a pesar de las diversas interpretaciones, todos coinciden en que la robótica blanda intenta replicar las estructuras biológicas para generar deformaciones y adaptaciones flexibles con el fin de realizar aplicaciones innovadoras que los robots

clásicos se ven limitados de hacer. La biomímesis y bioinspiración están más arraigadas con la robótica blanda debido a que el material utilizado en su estructura misma lo permite.

3.2. Material Blando

Los humanos y otros animales están conformados a partir de células biológicas, una red de neuronas, músculos hechos de material fibroso, un corazón que se deforma para la circulación de la sangre, una piel suave que cubre todo el cuerpo y constantemente recepciona datos del exterior, etc. Todas estas sustancias y estructuras blandas llegan a cubrir aproximadamente el 80 % del peso, al menos en el cuerpo humano [16].

Entre todas estas estructuras blandas, existen algunas totalmente móviles como la trompa de un elefante, la lengua de los mamíferos y lagartos, los tentáculos de los pulpos, el refuerzo de fibra en las paredes celulares de las plantas para que cambie de forma cuando se presuriza, etc. Éstas comparten la característica especial de acomodarse, estirarse y torcerse y son cruciales para los sistemas biológicos porque su deformación es el origen de nuevas funciones necesarias para la sobrevivencia y evolución [17].

Sin embargo, desde la perspectiva tecnológica no es necesaria una mímica exacta de ello. Según Majidi [13] y Kovac [18] es más importante la comprensión de la morfología y la funcionalidad de aquella estructura blanda natural (bioinspiración) para incrementar la percepción y generar nuevos conceptos de diseño en la robótica blanda que permitan cubrir las nuevas aplicaciones que aún constituyen un reto.

Kovac sugiere el proceso de diseño *inspiración-abstracción-implementación* (IAI) como paradigma para la inspiración biológica en robótica [18]. El proceso de IAI está compuesto por tres fases cuyo núcleo es la interacción creativa, como se observa en la figura 3.4, se promueve así la interacción interdisciplinaria entre ingenieros en robó-

tica, biomecánicos, expertos en biomateriales y otros relacionados, todos orientados a generar creativos y novedosos proyectos robóticos.

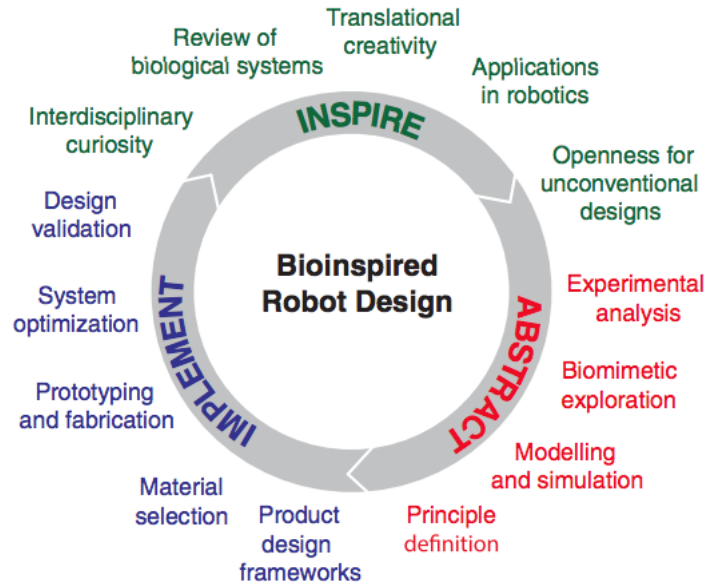


Figura 3.4: Fases del diseño de IAI como paradigma para la inspiración biológica en robótica [18]

Entre los ejemplos de robots rígidos o híbridos que se basaron en la bioinspiración están las pinzas robóticas inspiradas en la aleta de un pez [19], robots trepadores inspirados en las patas de un Gecko [20], arquitecturas de control para caminar y nadar inspiradas en salamandras [21], robots saltarines inspirados en insectos [22], colas robóticas inspiradas en salmones [23], robots inspirados en las orugas [24], robot de cuatro patas de Boston Dynamics basado en un mamífero cuadrúpedo [25], entre muchos otros.

Asimismo, casi la totalidad de robots blandos se basaron en la bioinspiración, como por ejemplo: robots móviles inspirados en la locomoción de una oruga [26], de un gusano [27], de una serpiente [28] y de una mantarraya [29], robots exploradores marinos inspirados en un pez [30], incluso robots modulares blandos inspirados en los movimientos morfogénéticos del embrión [31] y otros como se observan en la tabla

3.1 clasificados por habilidades, comentado por Laschi [32].

Ability	Applied on	Reference
Jumping	GoQBot	[26]
	Tripedal Robot	[33]
	Hemispheroid robot	[34]
Peristaltic locomotion	Meshworm	[27]
	SoftWorm	[35]
Locomotion through small devices	Quadrupedal robot	[36]
	Cockroach-like platform	[37]
Resilience	Quadrupedal robot	[38]
Arm elongation and shortening	OCTOPUS robot	[39]
Underwater legged locomotion	Quadrupedal robot	[40]
	PoseiDRONE robot	[41]
Pulset-jet swimming	PoseiDRONE robot	[42]
Stretchability	Sensing skin of crawling robot	[43]
Climbing	Stickybot	[44]
Growing	PLANTOID	[45]
Combined bending and stiffening	STIFF-FLOP manipulator	[46]
Adaptable grasping	RBO Hand 2	[47]
	Universal gripper	[48]
Self-deployment	Mechanism	[49] [50]
Morphing, self-reconfigurability	Manipulator	[51]
Self-healing	Soft pneumatic actuators	[52] [53]

Tabla 3.1: Robots basados en una habilidad biológica [32]

Así, la bioinspiración toma ventaja de lo blando y la deformación de la naturaleza para adaptar funciones y comportamientos adaptativos en cuanto a estructura, combinándolos con la adopción de diversos tipos de materiales como líquidos, coloides, polímeros, espumas, gel, materiales granulares, donde la característica en común es

que éstos consisten en un conjunto de moléculas grandes o conjuntos de moléculas que se mueven colectivamente dando como resultado una acción larga, lenta y no lineal ante una pequeña fuerza [54], los beneficios para el diseño de robótica blanda son enormes.

3.3. Estructuras del Actuador Blando

3.3.1. Actuadores

Los robots blandos se caracterizan principalmente por la estructura interna y propiedades de su cuerpo. Debido a que el material de éste, además de soporte, desempeña también una acción por su deformabilidad controlada, a éste comportamiento en el enfoque de robótica blanda se constituye como un **actuador**.

Los robots blandos que hasta ahora se han propuesto en la investigación reacen en materiales con tres criterios principales: estructuras compuestas por fluido elastomérico; estructuras habilitadas por geometría determinística; y sistemas biohíbridos [55].

El primer enfoque incorpora materiales intrínsecamente blandos (por ejemplo, elastómeros, fluidos iónicos o metales líquidos) para lograr el cumplimiento y la deformabilidad elástica en todas las direcciones de carga (es decir, cumplimiento isotrópico) [56]. El segundo enfoque utiliza un material rígido o semiblando pero con la característica de poseer internamente una geometría determinística deformable en respuesta a ciertas direcciones de carga [57]. El último es una nueva propuesta que se está desarrollando en el cual hacen combinaciones de material blando con tejidos biológicos [58]. Esta investigación abordará la descripción e investigación del primer enfoque.

En la investigación de Marchese [59] resalta la existencia de cuatro tipos de actuadores comunes:

- **Actuador SMA (Shape Memory Alloy)** El principio básico de funcionamiento de este actuador es que el alambre de Nitinol (NiTi) se contrae al pasar corriente a través del mismo. La contracción puede ser usada como un actuador agonista (similar a la forma en que el bíceps empuja el antebrazo hacia el cuerpo)[60] [39] [61] [27]. Véase la figura 3.5.

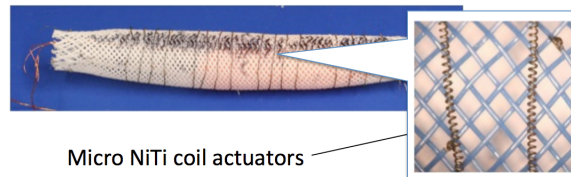


Figura 3.5: Actuador SMA (Shape memory alloy)[27]

- **Actuador de cable** Este tipo de actuadores consiste en tendones que tiran de partes rígidas incrustadas dentro de un cuerpo elastómero [62] [40] [63].
- **Músculos Neumáticos Artificiales** A estos se conoce como SMA o músculos McKibben. Su estructura fundamentalmente está compuesta por un tubo elástico inflable rodeado por una malla trenzada. La respuesta resultante es de extensión y contracción ante una presión de entrada dependiendo del patrón de tejido de la malla [64] [65] [66] [67].
- **Actuadores con Fibra reforzada** Este actuador se caracteriza por tener un cuerpo elastómero revestido de una fibra. Las formas de enrollar la fibra alrededor generan un movimiento diferente al ser actuado por medio de una presión de entrada [29] [68] [69].

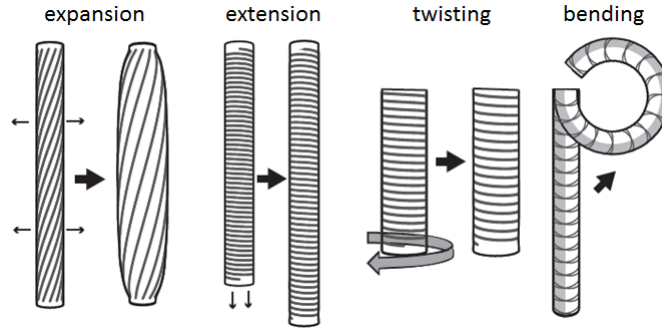


Figura 3.6: Actuador con la estructura de Fibra Reforzada (FRB)

Los movimientos que pueden resultar de este tipo de actuador de acuerdo con el diseño que tenga son: *extending*, *contracting*, *twisting*, *bending* 3.6. También es posible generar una combinación entre estos para tener diversos resultados.

- Actuadores con Elastómero Flúidico** Los FEA son actuadores compuestos por un material flexible como la silicona y activados por la presión de un fluido. Su deformabilidad se debe principalmente a las cavidades internas que posee y también su diseño externo. Considerando ello, se tiene tres tipos de FEA: *Ribbed* (figura 3.7a), *Cylindrical* (figura 3.7b) y *Pleated* (figura 3.7c). El primero tiene una estructura que genera movimientos en dos direcciones; el segundo, puede generar deformación en dos o más direcciones; finalmente el tercer tipo sólo genera deformación controlable hacia una dirección [59].

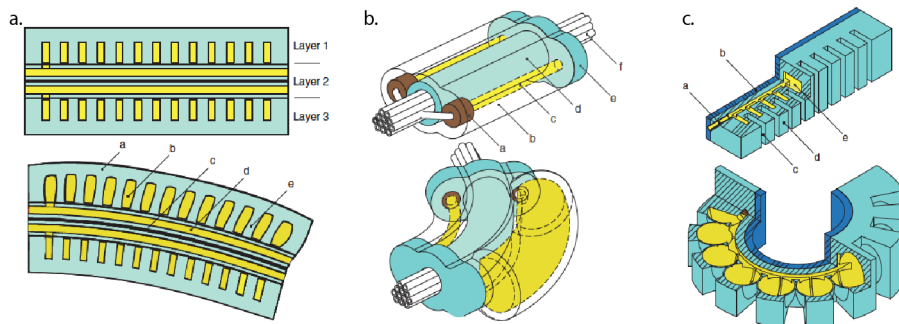


Figura 3.7: Tipos de Actuadores FEA. a. Tipo *Ribbed*. b. *Cylindrical*. c. *Pleated*

Mosadegh [70] define dos tipos de actuadores con la estructura *Pleated*: los *slow FEA* (sFEA) (figura 3.8a) y *fast FEA* (f-FEA) (figura 3.8b). El tipo f-FEA demuestra que es más adecuado para la activación de robots blandos que el sFEA en cuanto a parámetros como: velocidad alcanzada para una tasa de inflexión determinada, fuerza ejercida para una presión dada, cambio en el volumen requerido para un grado dado de flexión, número de ciclos de actuación antes de fallar y correlación entre la presión en el actuador y su grado de flexión sin carga. Además, en la investigación realizada por Mosadegh [70], experimenta y demuestra que la velocidad de fFEA es 25 veces mayor que sFEA, así como también la fuerza que es de 1.4 veces más.

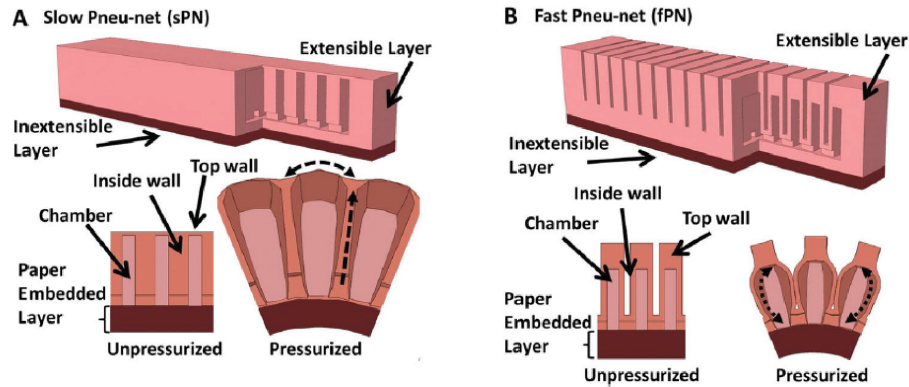


Figura 3.8: Estructura del Actuador Fluídico Elastómero (FEA) de formato lento y rápido. El primero se diferencia en poseer una delgada membrana superior que une a todas las divisiones internas [70].

3.4. Pinzas robóticas

3.4.1. Inspiración en la manipulación

La mano constituye una parte fundamental del cuerpo humano cuando se trata de interactuar con el entorno, ya sea desde la manipulación hasta la comunicación. Por

eso su estudio se ha enfocado desde puntos de vista muy diversos, como el anatómico, el funcional, el social o el evolutivo. Debido a esto, la ciencia e ingeniería se centró en estudiarla y llegar a replicarla. Los estudios se dirigen, por ahora independientemente, a la generación de un dispositivo que manipule objetos de diversas propiedades, la percepción de su textura y forma por contacto directo hasta la interacción humano-robot. Para ello, se considera principalmente los siguientes detalles importantes: la mano posee 30 músculos para generar 20 grados de libertad, y posee 17000 células sensoriales con una resolución espacial y temporal, además de generar una fuerza aplicable de hasta 400 N [71].

3.4.2. Pinzas robóticas con estructura rígida

En la industria ya se han fabricado pinzas robóticas que logren manipular objetos con estructuras determinadas y su funcionamiento es muy eficiente. Sin embargo, el desafío aún persiste en manipular objetos con propiedades variadas, es decir, tamaños, peso, textura y forma. En este sentido se han generado una variedad de propuestas que intentan cubrir las funcionalidades que posee una mano funcional. Como por ejemplo, Chao et. al [72] en su investigación propone una pinza robótica lineal paralela con dos dedos y cada una de ellas con 4 GDL dando como resultado un agarre de pellizco que es estable y preciso para objetos pequeños delgados y gruesos. Estos mecanismos minimiza la complejidad del sistema de control, concluyen que tiene mucho potencial en aplicaciones industriales (figura 3.9a.). De igual manera, Laliberté [73] trabajaron en una pinza con tres dedos subactuados de 10 grados de libertad (GDL) y 2 grados de actuación. Los dedos son capaces de reorientarse lo que genera la ventaja de ser reconfigurable, y así manipular objetos de diferentes características (figura 3.9b.). También existen manos robóticas que tienen como objetivo fabricar una prótesis robótica de mano que logre realizar agarres prensiles con un diseño de tres dedos (pulgar, índice y dedo del medio). Éste posee 6 GDL y 6 GDA y contiene una estructura para realizar movimientos de flexo-extensión y además el dedo pulgar de prono-supinación (figura 3.9c.) [74].

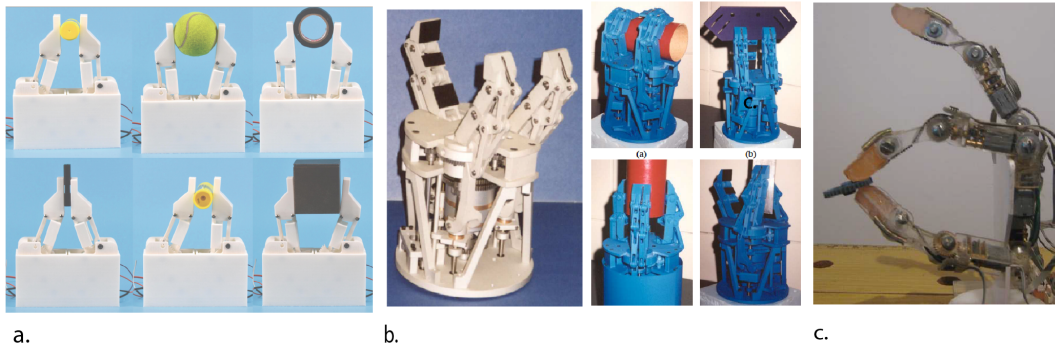


Figura 3.9: Pinzas adaptativas. a. Pinza robótica lineal paralela [72] b. Pinza robótica reconfigurable y adaptable[73]. c. Mano robótica con agarres prensiles [74]

3.4.3. Pinzas robóticas universales

Por otro lado, se encuentra la propuesta saliendo de un diseño tradicional, Scott [75] propone una pinza que posee una matriz de pines (8 filas por 16 columnas), considerados como los dedos. Éstos se mueven verticalmente y generan cierta presión permitiendo adaptarse a la forma del objeto, además de ofrecer información táctil del objeto (figura 3.10a.). De similar estructura se encuentra una pinza universal que posee una matriz de pines que genera suficiente fuerza de agarre para generar estabilidad cuando sujeta un objeto de diferentes formas y tamaño. Las ventajas de este diseño son la sencillez de su control, la estructura concisa que posee y el agarre ligero (figura 3.10b.) [76]. Por otro lado, la pinza universal de membrana con un conjunto de material granular en su interior ha generado considerables resultados para sujetar cualquier tipo de objeto y en cantidad. Esta pinza logra su versatilidad y su notable fuerza de sujeción mediante una combinación de fricción, succión y mecanismos geométricos de enclavamiento (figura 3.10c.) [48].

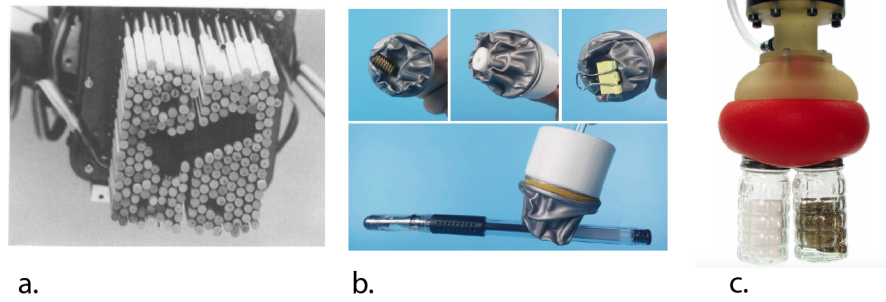


Figura 3.10: Pinzas universales. a. *The omnigripper* [75]; b. Pinza que consiste de una matriz de pines para el agarre [76]; c. Pinza con material granular dentro de una membrana para el agarre mediante succión [48]

3.4.4. Pinzas robóticas con estructura blanda

Una característica distintiva de muchos robots blandos es que los actuadores y/o los sistemas de transmisión de energía están integrados y distribuidos por todo el cuerpo. Esto ayuda a generar nuevas opciones de agarre de objetos irregulares, entre otras aplicaciones.

Existen propuestas desde la incorporación de un material blando como la silicona para ayudar al antideslizamiento o integración de nuevos sensores dentro de éstos hasta la funcionalidad total de un actuador para el agarre. Yoshimi [77] realiza el diseño de una pinza capaz de agarrar objetos planos como papel o tarjetas. Integra una yema y uña en la sección final de sus dedos, por ello éstos incorporan un revestimiento de silicona a su alrededor e incrusta un sensor en la yema de uno de ellos para detectar el contacto con el objeto delgado y efectuar el agarre correspondiente. De igual forma, Manti [78] basó su investigación en una estructura subactuada mecánica conducida por cable utilizando tres dedos con material blando para sujetar objetos con forma variada. El diseño de los dedos posee además tubos y resortes incrustados dando como resultado un rendimiento aceptable para manipular objetos de hasta

3 kg, con un diámetro máximo de 10.15 cm y con una fuerza de agarre de 1 a 6N (véase la figura 3.13 b.).

Aplicaciones

Adicionalmente a la incorporación de material blando a modelos rígidos, se utilizó el diseño de los actuadores blandos en diversas aplicaciones como por ejemplo Zhang [79] quien promueve el aprendizaje de robótica blanda en la educación por medio de un conjunto de piezas modulares y reconfigurables para fabricar el molde de una pinza robótica. La estructura del actuador propuesto es de un elastómero fluídico (sFEA) cuyo número de cavidades y posicionamiento son opcionales al diseño de la persona. Esta flexibilidad de diseño da lugar a comprender las respuestas de deformación del actuador resultante (véase la figura 3.13 c.). En el área médico, Polygerinos [2] propone un dispositivo que sea asequible y portable para la rehabilitación de la movilidad de la mano. Este dispositivo se compone de un guante el cual en su exterior cada dedo está controlado por un actuador blando con Fibra reforzada multisegmentada. Este diseño con la palma abierta brinda la posibilidad de manipular cualquier objeto cotidiano (con un peso de hasta 1.5kg), puede interactuar ejecutando fuerzas de hasta 8 N en los dedos índice y pulgar 3.13 g.). Por otro lado, también existen aplicaciones de pinzas robóticas con dedos blandos dirigidos a manipular objetos delicados de vida marina en un arrecife con fines de estudio e investigación. Este artefacto utiliza dos tipos de dedos blandos, una con la estructura de fibra reforzada y la otra fluídica elastómerica (f-FEA) [80].

De igual forma, para un robot que pueda asistir a las personas o interactuar con ellas se ha fabricado el diseño de una mano blanda [47]. Los dedos con la estructura Pneuflex [81] dan lugar a que éste a diferencia de muchas pinzas y manos robóticas llegue a imitar el agarre humano de los objetos, ya sean delgados como un CD, cilíndricos, largos, maleables y otros. El control de sus dedos ha sido evaluado y aprobado con el test Kapandji, el cual cuenta el número de locaciones indicadas que pueden ser contactadas con la punta del pulgar. Sin embargo, presenta ciertas limitaciones en cuanto a la fuerza de agarre con objetos pesados y la poca rigidez

de mantener una postura estable ante la presencia de fuerzas externas, además de minimizar el sistema de alimentación que es robusto y a futuro la integración de sensores.

Manipular objetos delicados

Considerando que una de las ventajas de los actuadores blandos es la interacción con objetos delicados, Wang [82] realiza un estudio de pinzas robóticas de tres dedos con 4 diferentes materiales. Su propósito recae en estudiar el comportamiento de agarrar y levantar envases de papel. Los materiales que utiliza son DragoSkin, Ecoflex, TangPlus y AR-G1L, la estructura de sus actuadores son todos f-FEA, con excepción del segundo diseño que tiene una estructura s-FEA. Los resultados demuestran que el primer material puede levantar hasta 90g a 20kPa. Mientras que los actuadores con el tercer y cuarto material lograron levantar hasta 70g y 80g a una presión de 40kPa y 60kPa. La pinza fabricada con el segundo material presentó un comportamiento no lineal con flexión desigual y generó fuerzas de agarre desequilibradas. Finalmente, el test de durabilidad demuestra que los dedos fabricados con material de silicona tienen mayor resistencia que los que están fabricados con material 3D, debido a que tienen canales internos muy precisos y delgados son más propensos a desgaste en poco tiempo (figura 3.13 d.). En otra investigación de Wang [83], evalúa no sólo el material sino el el diseño interno de los dedos con el mismo objetivo de empaquetar envases de papel. En esta ocasión los dedos están fabricados por medio de la tecnología 3D con materiales DM9860, DM9850 y DM9840, y con una distribución de sus cavidades internas en diferentes formatos (véase la figura 3.11).

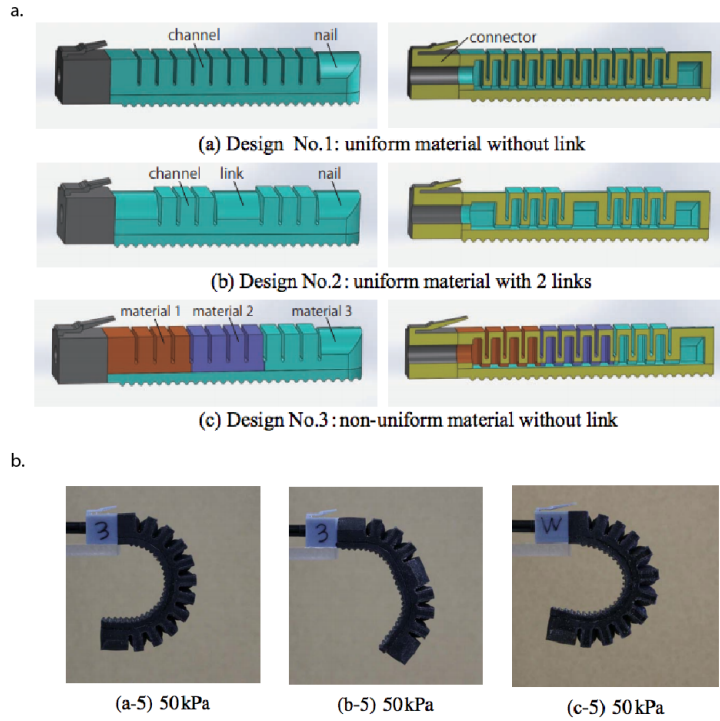


Figura 3.11: Estructura interna de dedos blandos impresos en 3D [83]

Por otro lado, Shih [84] presenta el diseño de una pinza con tres dedos que tienen estructura FEA cilíndrica (ver figura 3.7 b) de tres canales. Esta pinza tiene la particularidad de generar movimientos de giro de los objetos, es decir podría conectar una bombilla a su base enroscada. Además cada dedo posee sensores a lo largo del dedo blando que posibilita la reconstrucción 3D digital del objeto. El limitante es el tamaño de los objetos, debido a la distribución y tamaño de los dedos. Otra novedosa propuesta es el uso de una lámina adhesiva inspirada en las patas del animal gecko. Este animal reptil ha sido parte de investigación debido a su capacidad de desplazarse en paredes verticales sin deslizarse. Esta singularidad se debe a que tiene pelillos dentro del laminillas en sus patas las cuales con presión se doblan y adhieren a la superficie mediante fuerzas Van der Waals (figura3.12).

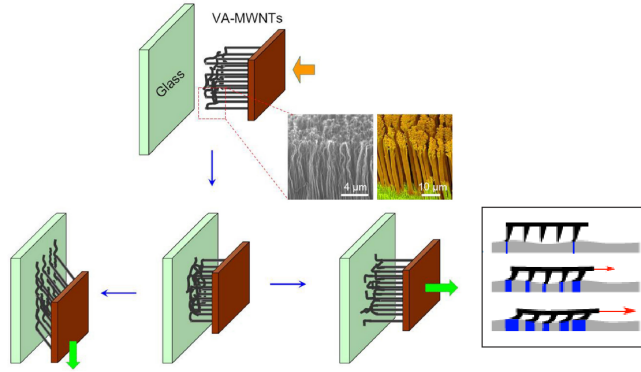


Figura 3.12: Funcionamiento de las laminillas de las patas de un Gecko

Esta interesante reacción llevó a combinar una pinza universal de membrana con material granular y una lámina adhesiva Gecko, denominada GeckoGripper. Su propósito es recoger piezas planas o irregulares y frágiles, que van desde matrices de condensadores de cerámica de múltiples capas a escalas submilimétricas hasta electrónica flexible y tecnología de envasado. Aunque su resultado ha sido muy aceptable, aún proponen mejorar los métodos de limpieza ya que los adhesivos de microfibras en la membrana de la pinza pueden contaminarse fácilmente y minimiza su propiedad adherente (figura 3.13 i) [85].

Manipulación de objetos pesados

Considerando las grandes propiedades que provee la lámina adhesiva Gecko, también se integró en una pinza clásica sencilla proveyendo la capacidad de manipular objetos pesados [86], como también a lo largo de los dedos blandos de una pinza [87]. Con este diseño se incrementa la fuerza de agarre, minimizan las presiones de fluido y de operación rápida. Además, cuando el adhesivo no llega a cubrir el agarre por sí mismo los actuadores blandos, por su estructura f-FEA, sí lo cubren, llegando a ser más eficientes que otros diseños. En las pruebas se registra que esta pinza puede generar fuerzas de 50N con 28kPa y llegar hasta 111N a 40kPa. Por otro lado, Miron et. al [88] se concentra en el agarre de objetos pesados no necesariamente limpios, como el anterior caso. La pinza se compone de dedos blandos a partir de actuadores

con la estructura FRB, además de incorporarse a un Dron agregándole una propiedad ventajosa de reposar en ramas gruesas de árboles o barandas. Su diseño implica el uso de una silicona McMasterCar, bandas elásticas y bandas de nylon alrededor del dedo (véase la figura 3.13 a.).

Integración con otros materiales

Algunos estudios se concentraron en mejorar su rendimiento como por ejemplo el control de dobléz de un dedo blando con formato sFEA añadiendo una cadena de eslabones de material rígido a lo largo de este. Esto se inspiró en un dedo humano por su integración entre huesos y tejidos blandos para adecuarse a objetos irregulares 3.13 j.) [89]. Por otro lado, Wei [90] combina el diseño del dedo blando que posee una estructura FRB con un conjunto de material granular. Con esta combinación la membrana del dedo bordea mucho mejor al objeto por medio de succión y adicionalmente con el dobléz que genera la estructura del actuador blando, el agarre del objeto es más estable (véase la figura 3.13 h.). Por su parte, Yap [91] fabricó una pinza con dedos de material NinjaFlex. Esto se debe a que la fabricación de actuadores con silicona requiere de varios procesos en el molde, las cavidades y el sellado del mismo. si algún proceso no está correctamente efectuado podría generar fugas indeseables. Mientras que con la tecnología FDM (Modelado por deposición fundida) que utiliza la impresión 3D produce una fabricación con geometría interna compleja más uniforme. Sin embargo, al ser un material más duro que la silicona, requiere de mayor presión para generar la deformabilidad, por ejemplo, necesita 300kPa para efectuar una fuerza de 25N.

A continuación, se presenta un resumen en la tabla 3.2 que resume las pinzas con robótica blanda donde se describen la estructura interna que tienen los actuadores, el material con el cual está fabricado y la dureza de ésta y finalmente la aplicación a la cual se dirige cierta investigación.

Gripper Design	Actuator Type	Material	Shore Material	Applied on	Ref.
Finger	-	Silicone	00-30	Picking thin objects	[77]
Gripper (3 fingers)	cable driven	Silicone	A30	Manipulation with simple control	[78]
Gripper (4f)	sFEA	Silicone	00-50	Walker and Gripper	[92]
Finger	sFEA	Silicone, PLA	00-30	Bending control	[89]
Gripper (2f)	FRB	Silicone, particle pack		Full adaptive	[90]
Finger	sFEA	Silicone	00-30, 00-50, A10, A20	Hand Exoskeletons	[93]
Finger	f-FEA	Silicone	A28	Hand Exoskeletons	[2]
Gripper(1-4f)	sFEA	Silicone	00-30	Modular for Education	[79]
Gripper (3f)	sFEA f-FEA	Silicone	00-30, A10, A26, A35	For lunch box packing	[82]
Gripper (3f)	f-FEA	DM 9860 -50-40	A57, A35, A45	Picking paper cups containers	[83]
Finger	f-FEA FRB	Silicone	A20, A28	Biological sampling on deep reefs	[80]
Gripper (4f)	f-FEA	NinjaFlex	A85	High Force	[91]
Gripper (4f)	FRB	Silicone	A35, A50	High Force	[88]
Gripper (2f)	f-FEA	Silicone, Gecko adhesive	A20, A30	Lift heavy objects with few force	[87]
Finger	Inflatable membrane	with Gecko adhesive	-	Picking thin and small objects	[85]
Gripper(3f)	Cylindrical	Silicone	A20	twist movement	[84]
Hand (5 f)	Pnueflex	Silicone	00-30, A20	Hand manipulation	[47]

Tabla 3.2: Pinzas con robótica blanda en la literatura científica

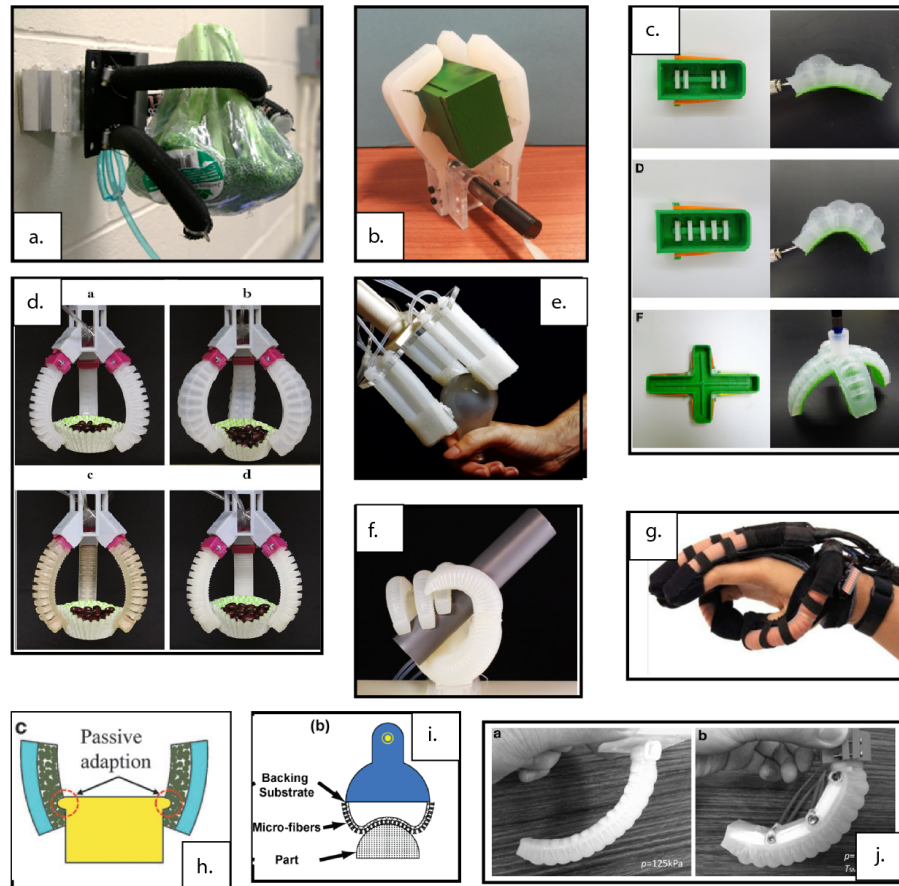


Figura 3.13: Pinzas con robótica blanda

3.5. Inconveniencias de la Robótica Blanda

Se ha mencionado las grandes virtudes que trae consigo la fabricación de robots blandos por su característica de flexibilidad y deformación. A partir de un diagnóstico comparativo de las propiedades, capacidades y diseño de los robots rígidos, hiperredundantes, contínuos y blancos, Trivedi [15] expone los importantes desafíos que debe enfrentar la robótica blanda (Figura 3.14 y Tabla 3.3).

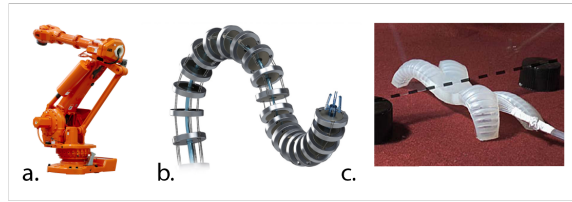


Figura 3.14: Robots rígidos y blandos. a) Robot rígido b) Robot hiper redundante/-continuo c) Robot blando

	Rigid	Discret Hyperredundant	Hard Continuum	Soft
Properties				
DOF	Few	Large	Infinitos	Infinite
ActuaTORS	Few, discrete	Many, discrete	Contínuos	Continuous
Material Strain	None	None	Pequeño	Large
Materials	Metals, plastics	Metals, plastics	Shape memory alloys	Rubber, electroactive polymer
Capabilities				
Accuracy	Very high	High	High	Low
Load capacity	High	Lower	Lower	Lowest
Safety	Dangerous	Dangerous	Dangerous	Safe
Dexterity	Low	High	High	High
Working environment	Structured only	Structured and unstructured	Structured and unstructured	Structured and unstructured
Manipulable objects	Fixed sized	Variable size	Variable size	Variable size
Conformability to obstacles	None	Good	Fair	Highest
Design				
Controllability	Easy	Medium	Dificult	Dificult
Path planning	Easy	Harder	Dificult	Dificult
Position Sensing	Easy	Harder	Dificult	Dificult
Inspiration	Mammalian limbs	Snakes, fish		Muscular Hydrostats

Tabla 3.3: Propiedades, capacidades y diseño de diferentes tipos de robots rígidos y de robots blandos [15]

Como se observa, su reciente desarrollo aún plantea desafíos y muchas complejidades dentro de su diseño. Los desafíos más pronunciados en las investigaciones son:

- **Modelos matemáticos** Las estructuras mecánicas de actuadores blandos o manipuladores naturales o artificiales son complicadas debido a que el material y la geometría son no-lineales. Las conocidas técnicas para conocer la cinemática de un robot rígido no son aplicables.

Si bien los investigadores han desarrollado modelos biomecánicos para predecir los movimientos de la lengua de un reptil [94], de la locomoción de una oruga [95], de los tentáculos de pulpo [96], de la trompa de un elefante [97], entre otros, es aún compleja la comprensión y generación de un modelo matemático para ellos. Esto se debe a que su deformación intrínseca es continua y compleja y a que tienen mayor número de Grados de Libertad con un menor número de actuadores (se tratan de robots subactuados).

Sin embargo, Trivedi [15] y Rus [14] comentan que si un robot blando está conformado por una serie de elementos de actuación, su estructura es similar al de un robot continuo, y muchos investigadores toman en cuenta este hecho para generar un modelo matemático.

En los robots continuos, como los manipuladores por ejemplo, se puede aplicar el modelo PCC (*Piecewise Constant-Curvature*) para generar un modelo matemático aceptable. Éste es un enfoque simplificador que intenta replicar al robot continuo como una serie de arcos de curvaturas constantes. Es válido cuando no existen cargas externas, como incluso el peso del mismo cuerpo, debido a que éstos generarían desviaciones significantivas[98]. Tatlicioglu [99] extendió el modelo incluyendo los efectos de la energía potencial gravitacional. Por otro lado, Trivedi [100] desarrolló un modelo para un robot con forma de trompa de elefante usando el enfoque Cosserat-rod. De igual forma Boyer [101] utilizó la teoría del haz geoméricamente exacta y la técnica de Newton-Euler para predecir los pares de control de un robot parecido a una anguila en función de las deformaciones internas esperadas.

Sin embargo, este modelo no captura todos los aspectos necesarios para un robot continuo. En un esfuerzo de mejorarlo se propuso el modelo no-PCC que en cierta forma es más preciso y válido pero demasiado complejo [102].

A pesar de que muchos investigadores han desarrollado diferentes modelos para predecir el rendimiento de robots blandos particulares, la no-linealidad inherente en los materiales subyacentes, la geometría y actuadores, debido a grandes tensiones y desplazamientos, hace que el modelado matemático sea aún una tarea desafiante. La estructura blanda hace que el efecto de carga distribuida sea significativo y conduzca a inaceptables niveles de inexactitud.

■ Capacidad de carga

Los robots blandos tienen limitaciones para desenvolverse con cargas pesadas, esto debido al material subyacente que si bien permite la deformación necesaria, no logra una fuerza apreciable. Por supuesto, existe una variedad de materiales blandos y flexibles que pueden utilizarse para diversas aplicaciones de acuerdo a la necesidad, sin embargo, si uno de estos materiales tiene un módulo mayor (que lo hace más consistente) requeriría de una fuerza de actuación mucho más alta [12].

De acuerdo a datos analizados por Zupan [103], los actuadores electromagnéticos generan una fuerza máxima de salida de 1-30N, los neumáticos de 10-200 N, los *Shape Memory Alloys* de 0.08-100N, los músculos biológicos generan de 5000 a 15000N, los EAP's entre 0.02-200N y los piezoeléctricos de 0.08 a 500N. A pesar que en los robots blandos es más importante la deformación que el material, es necesario considerar el tamaño de la estructura en demanda a las fuerzas de actuación [12].

Por otra parte, la mayoría de las experimentaciones de robots blandos utilizan energía externa a su cuerpo, como compresores y bombas de aire, por ejemplo, y por supuesto el circuito necesario. Si bien se han propuesto sensores blandos, aún se precisa de componentes electrónicos totalmente compatibles con el cuerpo blando del robot que lleguen a ser flexibles o ligeros.

Debido a todo ello los robots blandos no tienen independencia para realizar su misión, por ejemplo, un robot blando de búsqueda de tamaño pequeño no podría recorrer solo en un espacio totalmente abierto y extenso puesto que está "atado" por las mangueras o cables a su fuente de energía que aún tiene una estructura rígida y no es ligera. Y, como se comentó anteriormente, siendo aún difícil la interacción con objetos pesados más difícil es aún que pueda cargar con el peso de su fuente de energía [104].

Sin embargo, en las últimas investigaciones en robótica blanda se han registrado la experimentación tanto de material elastómero, como la configuración geométrica determinística con material semirígido para generar deformaciones ante fuerzas externas. También se efectuó experimentación biohíbrida que consta de la combinación de material flexible con tejidos musculares [105]. Éstos últimos minimizan la dependencia de un conjunto pesado que suministre energía y ha llevado a generar robots no-atados, es decir, con un grado de autonomía en desplazamiento. Si bien son potencialmente prometedores para su uso en el futuro, tales sistemas biohíbridos actualmente no son lo suficientemente robustos para manejar aplicaciones y entornos convencionales. Esto se debe a las limitaciones en los materiales y estructuras, y la necesidad de mantener vivo el tejido.

Muchos desarrollos recientes nos han acercado a liberar todo el potencial de los robots blandos. Estas incluyen mejoras en la capacidad de carga del actuador para llevar consigo componentes pesados, mejoras en el diseño de sensores blandos para el control de retroalimentación integrado y hardware integrado o miniaturizado [55].

Debido a esto, ante la esperanza de nuevos desarrollos en electrónica blanda, también se plantea el diseño de robots híbridos, combinando robots blandos con rígidos. Por ejemplo Stokes [92] presenta un sistema robótico híbrido que posee un robot con ruedas (rígido) y un robot cuadrúpedo (blando) (figura 3.15a.) ; Marchese, Onal y Rus [30] hacen esta interacción más compacta a partir de la fabricación de un pez capaz de nadar: el torso frontal, compuesto por partes rígidas, lleva todo el circuito necesario, y la cola, que genera el movimiento de

traslación, está compuesta por material blando (Figura 3.15b); por otro lado, Yang [89] propone una integración más directa entre lo blando y lo rígido al mejorar la movilidad de un dedo blando con eslabones rígidos (Figura 3.15c); y Yoshimi [77], por su parte, mejora el agarre de objetos delgados y planos recubriendo los dedos con material de silicona y colocando yemas blandas con sensores blandos a una pinza robótica rígida, como se observa en la Figura 3.15d.

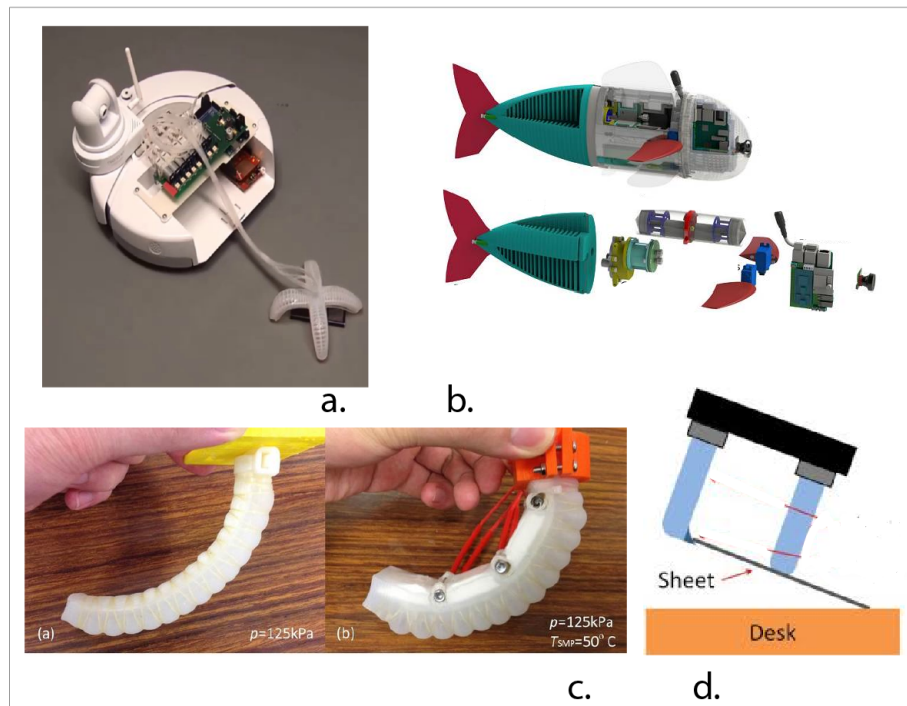


Figura 3.15: Robots híbridos

■ Resistencia

Si bien los robots rígidos se desenvuelven eficazmente en diversas aplicaciones, suelen ser vulnerables al daño por torsión, colisión, presión o impactos contundentes o una compresión en la cual sus juntas o sensores pueden ser altamente dañados y con la probabilidad de llegar a perder funcionalidad. A diferencia de ellos, los robots que utilizan elastómeros flexibles como actuadores que suelen tener características de ligereza, resistencia a impactos, flexibilidad y hasta tienen la propiedad de extenderse anisotrópicamente.

La resistencia mecánica que tienen los robots blandos les permite operar en espacios congestionados sin resultar ser dañados al ser severamente doblados, caídos, martillados o acolchados, como se observa en experimentaciones realizadas por Martínez et. al. [106]. Sin embargo, también se demostró que los robots blandos no resisten a punzadas, cortaduras o altas temperaturas como los rígidos, debido al escape de aire, su fuente de energía principal.

3.6. Creciente investigación científica de la Robótica Blanda

El campo incipiente de la robótica blanda es considerado como el alto potencial y revolucionario en la robótica. Un análisis bibliométrico resaltó que este campo ha sido el que más evidencia ha dejado de su crecimiento en la investigación científica entre 1985 y 2017. Para efectuar este análisis se buscó dentro de una base de datos documental (en ciencia y tecnología) las palabras clave más utilizadas en robótica blanda como las siguientes: *Artificial muscle, Pneumatic muscle actuator, continuous robot, Redundant robot, Soft Robot, Soft Robot, Soft wearable robot, Soft wearable robot, Bioinspired Robot, Soft bodied robot, BioSoft robot, Biomimetic, Microrobotic.*

Entre estas palabras y otras (del área de Robótica) se hizo una comparación del número de publicaciones realizadas entre las tres décadas y se llegó a observar un incremento exponencial, como se muestra en la figura 3.16.

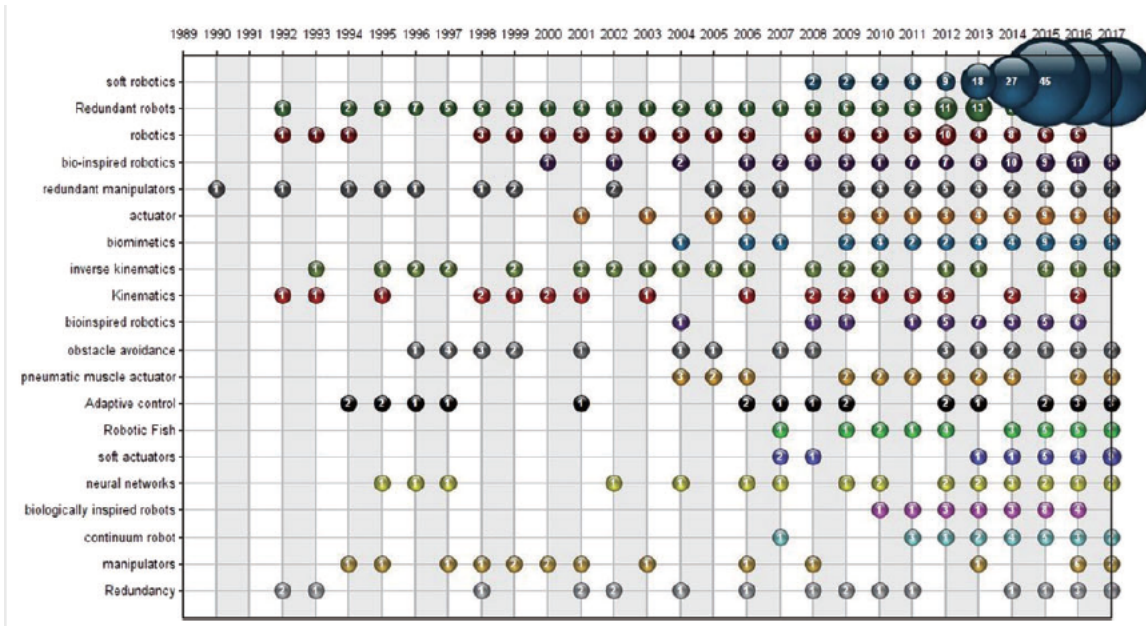


Figura 3.16: Tabla de la cantidad de investigaciones que tienen las 20 palabras claves más importantes en Robótica Blanda [107]

Según este análisis, Bao [107] evidencia que los países con mayor contribución científica en esta área están liderados por Estados Unidos, China e Italia; y entre las Instituciones La Universidad de Harvard, Scuola Superiore Sant'Anna y Chinese Academy of Sciences.

También se observa que las investigaciones recaen en artículos que proponen nuevos desarrollos de estructuras complejas, sensado, control, fabricación y fuentes de energía en relación con la ciencia de los materiales y técnicas de manufactura y fabricación. Además, al ser un área multidisciplinaria se estima que se desarrollarán nuevas investigaciones en robótica blanda con innovadores propuestas vinculadas a la ciencia de los materiales, biónica, computación morfológica, etc.

Ante este efecto, según Wang, existen cinco probables razones para el crecimiento y atracción de investigación en estos últimos años [12], éstas son:

- Los materiales blandos han sido establecidos como un campo en la ciencia de

los materiales desde 1990.

- Una gran cantidad de nuevos materiales blandos han sido sintetizados y están disponibles comercialmente.
- Existe una diversidad de técnicas de fabricación accesible para los materiales blandos.
- Se ha publicado una cantidad cada vez mayor de trabajos que demuestran el uso de material blando en robótica en revistas de alto perfil.
- Los investigadores generalmente coinciden en que la tecnología basada en material blando debe ser usado en aplicaciones robóticas en el futuro puesto que éstos son de bajo precio, seguros y más adaptables a tareas complejas en comparación a sistemas convencionales.

El progreso de la tecnología hacia la integración de materiales blandos en la robótica, su progresiva accesibilidad, el desarrollo de componentes electrónicos, herramientas de fabricación, manufactura y aplicaciones computacionales más una continua investigación global permitirán que a futuro incrementen las propuestas de alternativas de robótica blanda con electrónica blanda y fuentes de energía ligeros capaces de enfrentar retos crecientes [11].

4

Diseño y Fabricación de dedos blandos

Debido a que el propósito de esta investigación es crear una pinza reconfigurable, este capítulo se concentra en el diseño y fabricación de los dedos blandos modulares que tengan la capacidad de ensamblarse mediante un mecanismo de interconexión y un práctico modo de conexión al suministro de energía. Además del diseño externo e interno de los dedos blandos para una mejor adaptación a objetos con formas, tamaños y texturas variadas.

4.1. Interfaz Modular Interconectable (MII)

El dedo blando requiere de una interfaz que lo comunique con las mangueras para suministrarlo de energía, denominándose Interfaz Modular Interconectable (MII) que está compuesto por un Módulo de Conexión (MC) y un Caparazón. Además éste incorpora el diseño de mecanismos necesarios para el ensamblaje de la pinza interconectable.

El diseño de los dedos blandos posee una sección denominada *nozzle* para conectarse al MC. Esta pieza está fabricada con el material PLA a una resolución de

0.1mm y posee un cuello con una altura de 14.5mm (una medida menor podría generar escapes de aire debido a su material y dimensiones). Además posee un tope (*Chock*) que ayuda a posicionar mejor la aleta (*fin*) del *nozzle* del actuador blando (Véase la figura 4.2).

La parte inferior del MC está conectada a un *Push-in fitting* (elemento neumático) que ofrece facilidad de conexión con las mangueras. Adicionalmente a la modularidad que este sistema provee, el actuador blando es activado sin la necesidad de fijar permanentemente una manguera, lo cual usualmente provoca rigidez en dicho sector y posteriormente desgaste o quiebre dando lugar a fugas de aire (observe la figura 4.1).

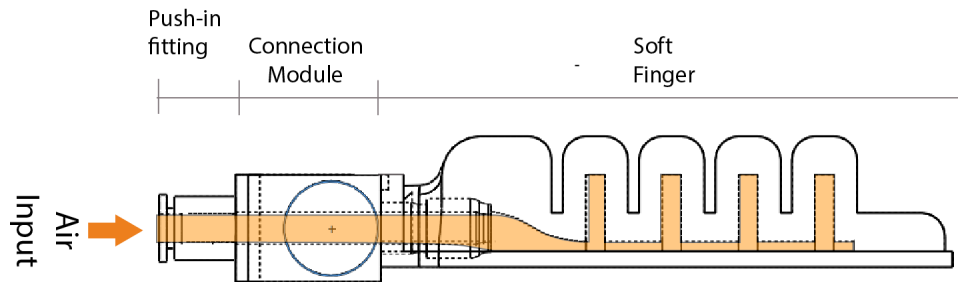


Figura 4.1: Flujo de aire controlado que pasa por el *Push-in fitting*, *Connection Module* y a las cavidades del actuador

Si bien el flujo de aire ya es controlado con este Módulo MC, aún es propenso a desconectarse por la fuerza que genera el aire comprimido en el momento que el actuador es activado. Por esa razón adicionalmente se tiene un caparazón (*Shell*) que encapsula a ese sistema fijando por presión a la aleta y al sector *nozzle* del actuador blando, como se observa en la figura 4.2.

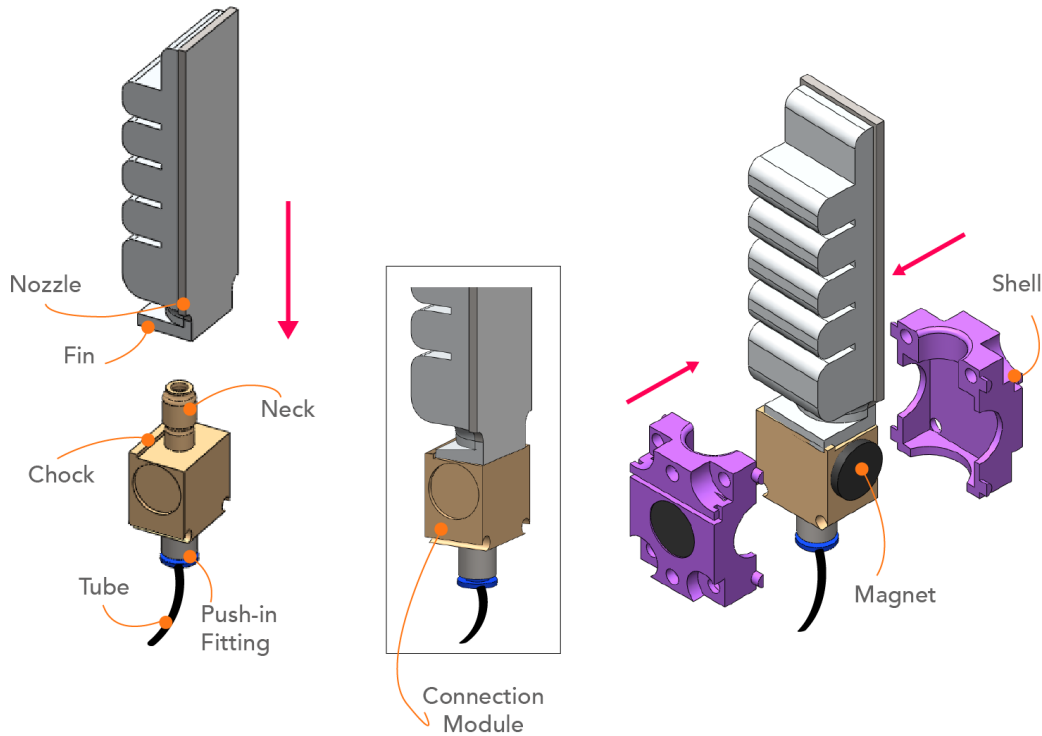


Figura 4.2: Ensamble del actuador blando con la Interfaz Modular Interconectable MII

El mecanismo para ensamblar el dedo blando con el resto de las piezas de la pinza robótica es por medio de atracción magnética. Para ello, se incorpora imanes en las cuatro caras del MII, cada una con polos intercalados. Si bien esta conexión es relativamente fuerte en relación al tamaño y peso de los dedos, presenta un grado de libertad de giro, generando inestabilidad de posicionamiento. Debido a esta situación, cada cara del Módulo contiene dos pestañas en los extremos superior e inferior, al igual que los imanes, éstas están intercaladas entre pestañas macho y hembra (véase la figura 4.3). De este modo la conexión entre dedos y la base de la pinza robótica tiene una mayor estabilidad de posición y ensamble.

Asimismo, las piezas de caparazón contienen imanes en sus cuatro caras para lograr el ensamble con el resto de la pinza. Sin embargo, la conexión sólo entre los imanes genera un eje de rotación entre los MII, dando lugar a una inestabilidad de

los dedos en la pinza robótica. Por esta razón, cada caparazón tiene dos pestañas macho en una cara y hembra en la otra, para apoyar así la sujeción y estabilidad en el ensamble.

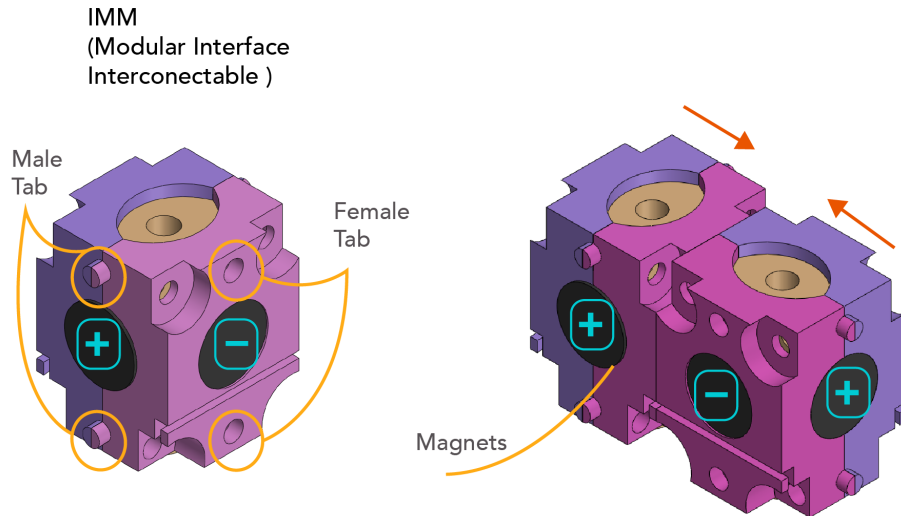


Figura 4.3: Diseño interno del dedo blando pequeño

4.2. Diseño de los Dedos blandos

Los dedos blandos tienen una estructura Fluido Elastómero (FEA), del tipo Pleated (observe la figura 3.7). Según Mosadegh [70], este tipo puede tener una membrana superior que recubre todo el dedo y otra sin ella. El primero tiene una actuación más lenta por pérdidas de energía en sectores superiores del actuador, a diferencia del que no posee la membrana, denominándose *slow FEA (sFEA)* y *fast FEA (f-FEA)* respectivamente.

Esta morfología unidireccional generalmente requiere de mayor energía fluidica que las estructuras *cylindrical* y *ribbed* sin embargo, genera una fuerza mayor en la punta del actuador. El principio de funcionamiento de operación de este actuador evalúa la deformabilidad de las cavidades internas a cierta presión de aire [59]. En

la figura 4.4 se representa al actuador con dos superficies, una de ellas contiene una lámina inextensible y la otra no. Este diseño impulsa el doblado cuando es activado al rellenar con la presión de aire en sus cavidades.

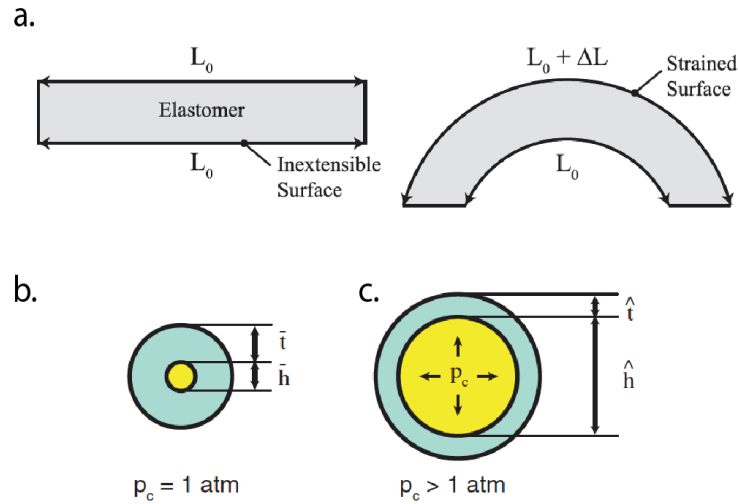


Figura 4.4: Principio de operación del doblado del actuador blando. a. Diferencia de longitud cuando el actuador es activado. b. Diferencia de las dimensiones de las cavidades y paredes del actuador blando en el estado inactivo y activo

Donde:

L_0 = Longitud de las superficies.

$L_0 + \Delta L$ = Cambio de longitud de la superficie deformable.

p_c = Presión del aire en las cavidades internas del actuador.

p_c = Presión del aire en las cavidades internas del actuador.

p_c^{max} = Presión del aire en las cavidades máxima.

Δp_c = Cambio de presión del aire en las cavidades internas del actuador.

\bar{h} = Diámetro de la cavidad en reposo.

\bar{t} = Grosor de la pared del actuador en reposo.

\hat{h} = Diámetro de la cavidad accionada.

\hat{t} = Grosor de la pared del actuador accionada.

Este esquema se representa en el siguiente algoritmo expresando cómo el diámetro de las cavidades crecen en función a la presión:

Algorithm 1: Iterative Channel Deformation

Input: $\bar{t}, \bar{h}, \Delta p_c, p_c^{\max}$
 $\hat{h} \leftarrow \bar{h}$.
 $\hat{t} \leftarrow \bar{t}$.
 $\bar{c} \leftarrow \pi \left(\frac{\bar{t}}{2} + \bar{h} + \frac{\bar{t}}{2} \right)$.
 $p_c \leftarrow p_{atm}$.
 $i \leftarrow 0$.
repeat
 $\sigma \leftarrow p_c \frac{\hat{h}}{2\hat{t}}$.
 $\epsilon \leftarrow \text{strainLookUp}(\sigma)$.
 $\hat{c} \leftarrow \bar{c}(1 + \epsilon)$.
 $\hat{h}, \hat{t} \leftarrow \text{solve} \left\{ \begin{array}{l} \text{Circumferential Strain :} \\ \hat{h} = \frac{\hat{c}}{\pi} - \hat{t} \\ \text{Conservation of Material Volume :} \\ \pi \left[\left(\frac{\hat{h}}{2} + \hat{t} \right)^2 - \frac{\hat{h}^2}{4} \right] = \pi \left[\left(\frac{\bar{h}}{2} + \bar{t} \right)^2 - \frac{\bar{h}^2}{4} \right] \end{array} \right\}$.
 $p_c \leftarrow p_c + \Delta p_{c,i}$.
 $i++$
until $p_c \geq p_c^{\max}$

4.2.1. Dedos Blandos

Los tres diseño de dedos blandos que se presentan en esta investigación tienen la estructura f-FEA. Cada uno de ellos posee un tamaño y propiedad distintivo: el primero tiene un tamaño pequeño; el segundo mediano y un conjunto de laminillas en la punta del dedo; y finalmente el tercero tiene un tamaño largo con un doblez controlado.

Diseño del Dedo Pequeño (S)

Este dedo blando tiene cuatro cavidades uniformes, dando lugar a un doblez circular (4.5), el largo de la superficie funcional es de 66mm, con un ancho de 20mm. Su diseño está dirigido al agarre de objetos pequeños con un peso ligero donde con sólo el contacto de las yemas puede ejecutar la manipulación, como también

para objetos medianos y extensos esféricos donde el largo del dedo logra rodearlo, y finalmente, enrollarse para objetos cilíndricos.

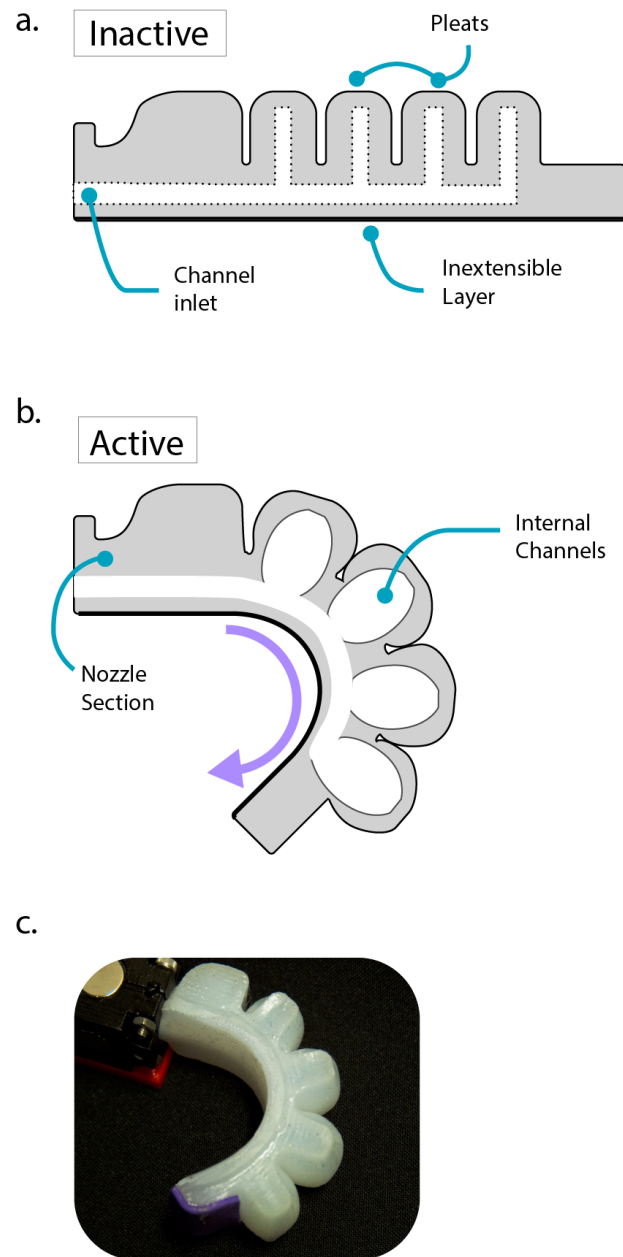


Figura 4.5: Diseño interno del dedo blando pequeño. a. Dedo blando en estado Inactivo. b. Dedo blando en estado activo. c. Imagen real del dedo blando.

Diseño del Dedo Mediano (M)

Por otro lado, el dedo blando mediano tiene un largo funcional de 82mm y un ancho de 20mm. Posee seis cavidades internas uniformes que generan un dobléz circular, además de tener laminillas en la punta del dedo en ambas caras -A y B- (como se observa en la figura 4.7). Este conjunto de laminillas incrementa la estabilidad de agarre de objetos pequeños y delgados, puesto que éstos recaen o quedan atrapadas en las laminillas de silicona. Como se observa en la figura 4.6a. la manipulación de un perno donde se acomodan en las laminillas-A de un dedo y laminillas-B del otro. De igual forma, cuando sujeta un tomate cherry, las laminillas ayudan al apoyo del objeto cuando éste es atrapado por las puntas del dedo blando.

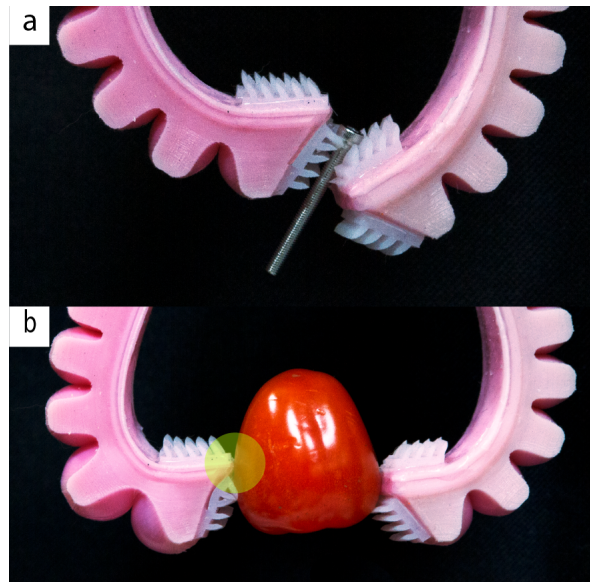


Figura 4.6: Actuación de las laminillas del dedo mediano para el agarre de un perno (a.) y un tomate cherry (b.)

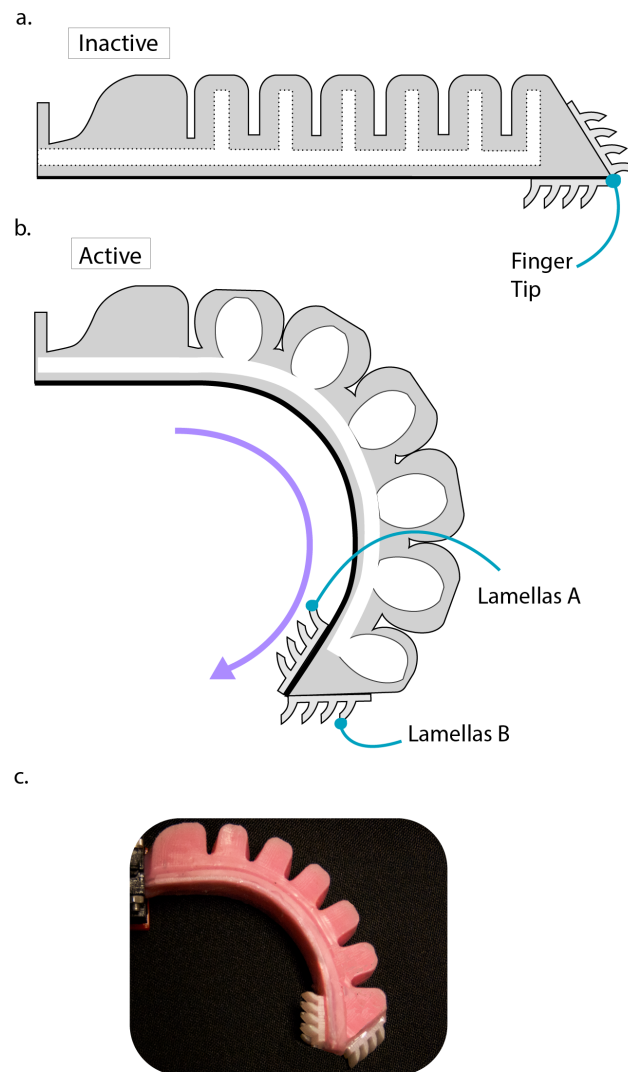


Figura 4.7: Diseño interno del dedo blando mediano

Diseño del Dedo Largo (L)

El diseño del dedo largo tiene como objetivo rodear al objeto para manipularlo, la posición de éste será totalmente horizontal, a diferencia de los anteriores. El largo funcional es de 96mm y un ancho de 20mm. Posee tres pliegues (*pleat*) y cinco cavidades uniformes internas, y una yema más robusta (*finger pulp*). Los pliegues se

encuentran en el centro-extremo final del dedo, a diferencia de los anteriores diseños, para mantener la estabilidad cuando se encuentre en una posición horizontal. Por el contrario, si se encontrara con pliegues desde el inicio, sería propenso a doblarse hacia abajo por el peso y espacios intermedios de dichos pliegues.

Para que el doblado del dedo en el momento que es activado no sea circular, como los dedos pequeño y mediano, se adhiere dos capas de red en una de las caras de dos pliegues (figura 4.8 b.). Estas redes resitringen en cierto grado la deformabilidad de dicho pliegue, de esta forma el aire se expande principalmente en el segundo y último pliegue y así genera un grado de doblado mayor en dichos puntos para que la yema del dedo abrace rápidamente al objeto y luego presionarlo para una sujeción estable.

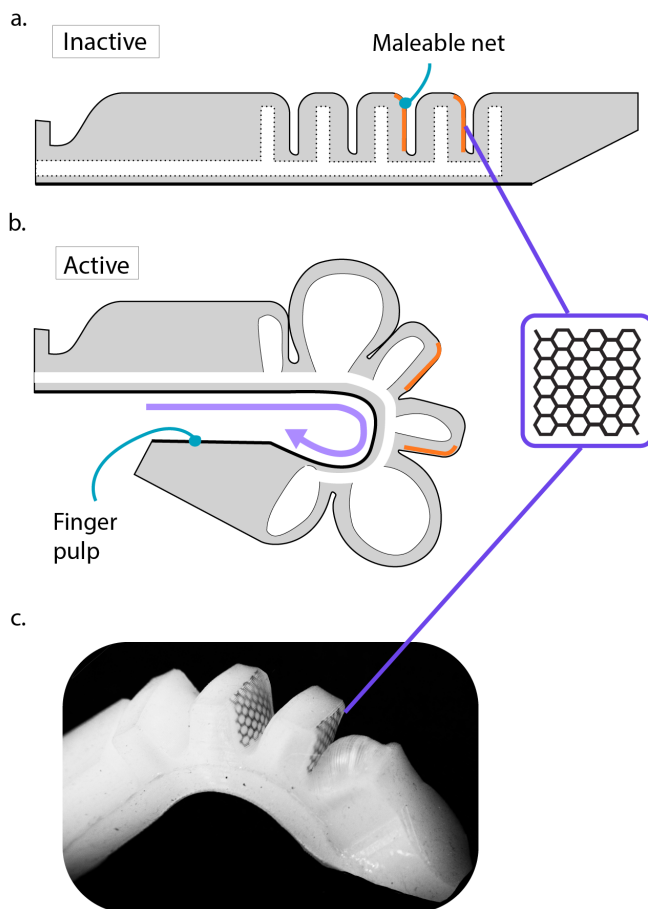


Figura 4.8: Diseño interno del dedo blando grande

Diseño del Dedo Híbrido (H)

Adicionalmente, se propone el diseño de un dedo rígido pasivo impreso con material PLA para ser el apoyo en el momento de manipulación de los objetos por parte de los dedos blandos. Puesto que el plástico es deslizante, éste dedo está recubierto por una capa de silicona de 3mm de grosor. Adicionalmente, posee un conjunto de laminillas en el centro para mejorar la fijación del objeto y en la parte superior de este diseño se encuentra una réplica del caparazón para ensamblarse con las demás piezas.

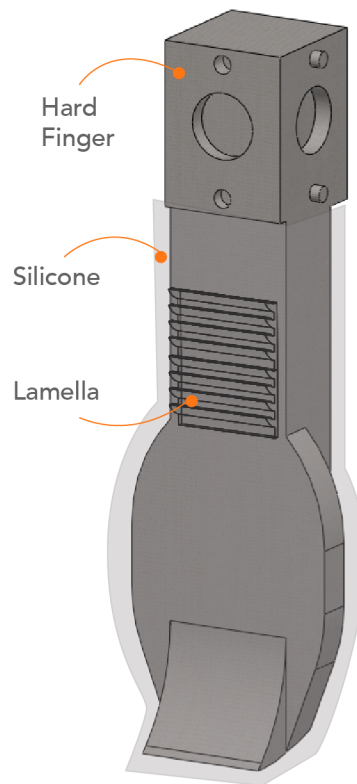


Figura 4.9: Diseño del dedo rígido recubierto por una capa de silicona

4.3. Fabricación de los dedos blandos

4.3.1. Material

Para la elección del material que se utilizará en la fabricación de los dedos blandos se evaluará la experimentación de cuatro tipos de silicona:

- Ecoflex 00-30
- Ecoflex 00-50
- Elite Double 8
- Elite Double 22

Los datos de importancia como las porciones de mezcla, los tiempos de mezclado y curación y porcentaje de alargamiento antes de su ruptura, se detallan en la tabla 4.1.

Tipo de Silicona	Color	Relación de mezcla	Tiempo manual de mezcla [min]	Tiempo de curación [min]	Alargamiento a la ruptura (%)
Ecoflex 00-30	Traslúcido	1:1	3	240	900
Ecoflex 00-50	Traslúcido	1:1	3	180	980
Elite 8	Rosado	1:1	1	40	380
Elite 22	Verde	1:1	1	20	450

Tabla 4.1: Características importantes de las siliconas de prueba

A continuación, luego de su experimentación se registró las siguientes ventajas y desventajas:

- Ecoflex 00-30 es muy flexible, pero presenta poca firmeza. Al menos para levantar objetos, no es deseable.

- Ecoflex 00-50 es flexible, tiene 980 % de alargamiento, lo cual lo hace ideal para la deformación de los dedos. Presenta mayor firmeza que Ecoflex 00-30.
- Elite Double 8 es más firme que los anteriores pero no tiene mucha tolerancia al alargamiento, lo cual indica que tiene un límite de soporte de altas presiones de aire para su deformación. Además es muy sensible a los rasguños.
- Elite Double 22 es mucho más firme que el resto de los materiales. Por ello exige mayor presión de aire para apreciar su deformación en los dedos. De igual forma que Elite Double 8, es en cierto grado sensible a los rasguños.

Considerando esta experimentación y evaluación, se llegó finalmente a elegir la silicona Ecoflex 00-50 por su gran tolerancia a la deformación y cierta firmeza, además de no ser tan sensible a rasguños. También se eligió la silicona Elite D8, por su firmeza y cierta flexibilidad, aunque estará designada para ciertos dedos que no requieran tanto alargamiento, tal que eviten su ruptura. Se descartó Ecoflex 00-30 por su poca firmeza y Elite D8 por su alta exigencia de suministro de aire para generar cierta deformación.

4.3.2. Proceso de Fabricación

El proceso de fabricación del dedo, denominado actuador elastómero, está constituido por las siguientes etapas: Mezcla de la silicona, Vertido del líquido en el molde y curación del elastómero. Estas etapas tienen ciertas diferencias en los subprocesos de acuerdo a la silicona que se utilice. En la tabla 4.2 se observan los pasos necesarios que debe seguirse al utilizar el material Ecoflex 00-50, de igual forma para Elite 8 observados en la tabla 4.3.

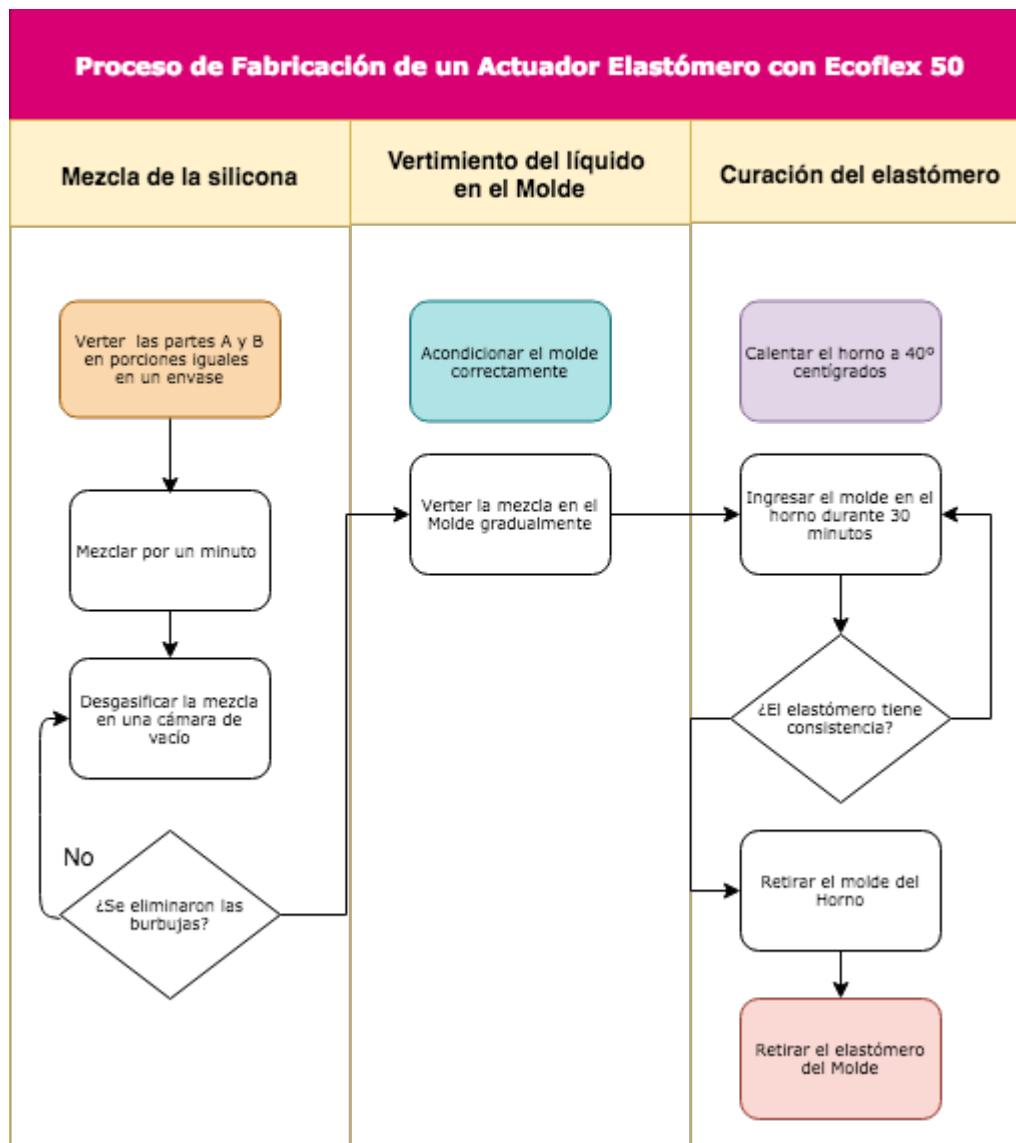


Tabla 4.2: Proceso de fabricación utilizando la silicona Ecoflex 00-50

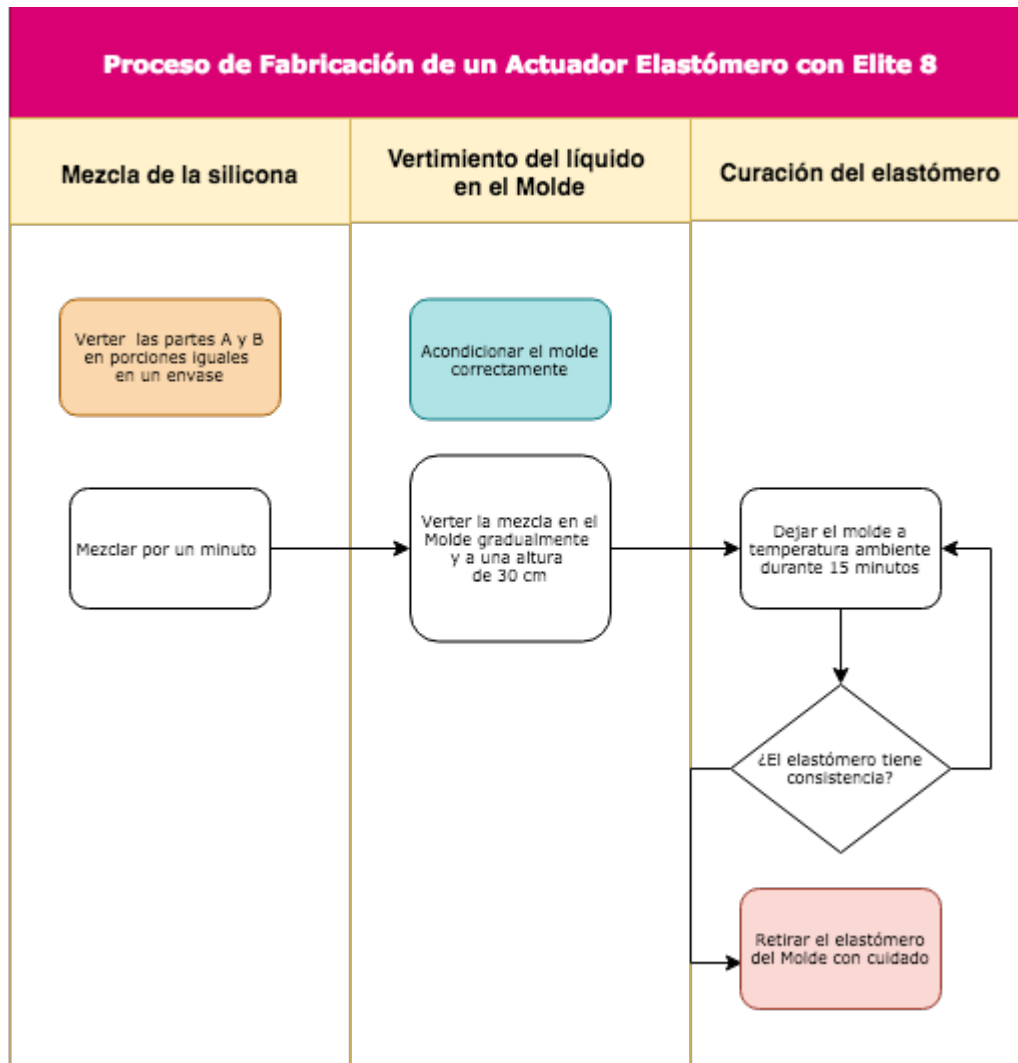


Tabla 4.3: Proceso de fabricación utilizando la silicona Elite D8

La primera etapa consiste en mezclar el catalizador con la base en cantidades iguales y revolverlos durante un minuto. La silicona Ecoflex 00-50 genera burbujas de aire, por lo cual es necesario desgasificarlo con una cámara de vacío. Por su parte, la silicona Elite D8 no requiere de este último subproceso (ver figura 4.10).

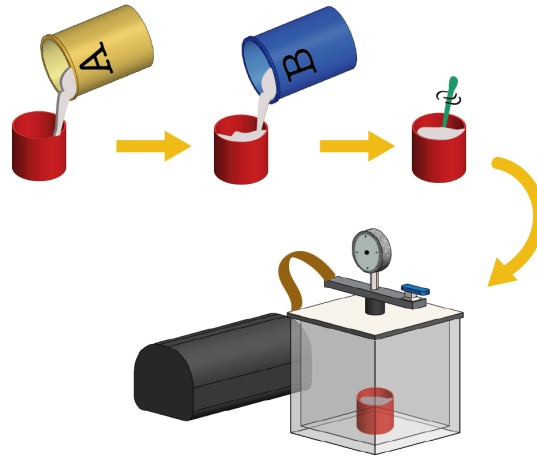


Figura 4.10: Proceso de fabricación - Mezcla de la silicona.

La segunda etapa consiste en verter la mezcla en el molde del dedo, que consta del molde del cuerpo y la espina, la cual generará las cavidades internas. Éste debe estar totalmente cubierto por la mezcla y debe evitarse cualquier grumo o vacío interno. Para minimizar los tiempos de curación se utiliza un horno con una temperatura de 40 grados centígrados. Finalmente, cuando ya se tiene la textura deseada, se extrae la espina y el actuador elastómero del molde (ver figura 4.11).

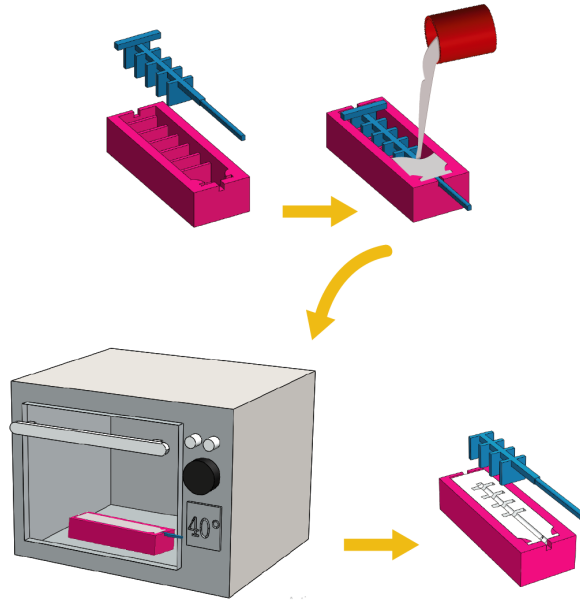


Figura 4.11: Proceso de fabricación - Generación del elastómero.

Consiguientemente, el actuador elastómero ya tiene la forma deseada y con las cavidades internas definidas y expuestas. Finalmente, se debe cubrir la cara inferior expuesta del actuador con una lámina para que pueda deformarse correctamente al suministrarse aire comprimido. Este paso debe evitar contacto de silicona adicional en las cavidades y conductos del diseño para no alterar su deformación deseada, para ello se utiliza una vara de plástico en el conducto principal que luego será removido. Además, debe asegurarse el sellado completo del actuador elastómero con la lámina para evitar cualquier espacio pequeño que pueda provocar fugas de aire. Esta lámina debe ser intextensible pero flexible, para ello se combina la mezcla de silicona con un material de tela. De esta forma, se unifica el actuador elastómero con la lámina fresca. y, d igual forma que los procesos anteriores, es llevado al horno para su curación final.

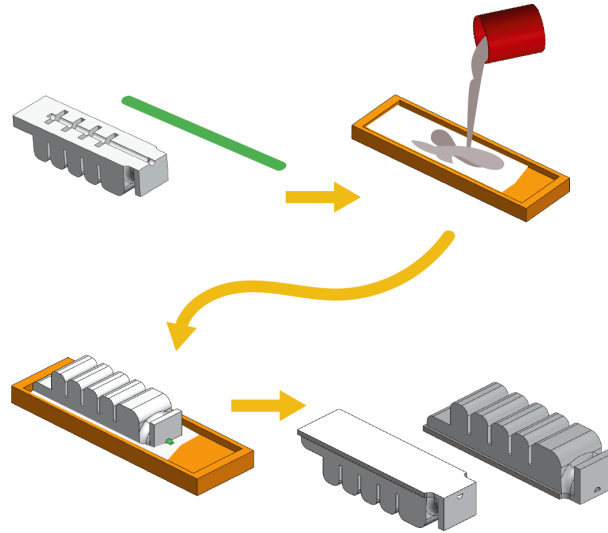


Figura 4.12: Proceso de fabricación - Generación del dedo blando.

De ese modo se tienen tres dedos blandos y uno de apoyo híbrido pasivo para generar diversas configuraciones de la pinza modular para la manipulación de objetos con propiedades variadas.

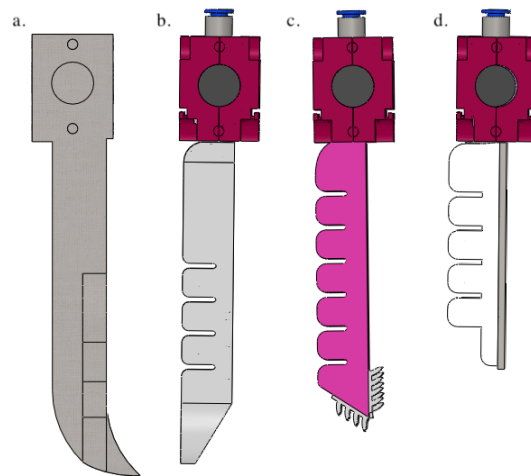


Figura 4.13: Diseño de los dedos blandos modulares: a. Dedo híbrido pasivo. b. Dedo blando largo (L). c. Dedo blando mediano (M). d. Dedo blando pequeño (S).

5

Pinza robótica interconectable

La pinza robótica que se presenta en esta investigación tiene características de interconexión, reconfiguración y diseño modular. Estas características le otorgarán capacidades de ensamble continuo para la configuración necesaria de agarre exitoso de objetos con distintas propiedades (tamaño, forma, textura). La pinza se configurará con dos, tres o cuatro dedos blandos distribuidos de distintas formas.

Para que la pinza robótica adquiera esta característica reconstructiva es preciso realizar un análisis para determinar qué partes y piezas deben ser modulares y qué otras deben ser piezas fijas. Si bien los dedos blandos tienen un sistema que les permite interconectarse entre sí, los imanes y pestañas que poseen en su Interfaz Modular (ver capítulo 4), es necesario evaluar primero el diseño de la que permita el ensamble, distribución, y conformación de la configuración deseada.

La pinza estará conformada por una muñeca que estará sujeta al mecanismo del brazo mecánico; una base que sujetará las piezas de la palma; tres palmas con distintos diseños para ensamblar y distribuir los dedos; y los dedos blandos. Observe la figura 5.1.

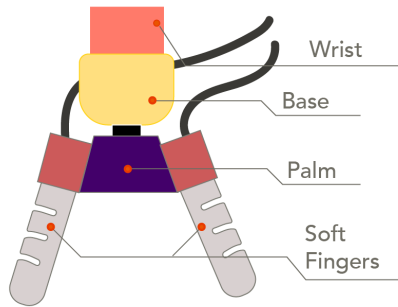


Figura 5.1: Estructura de la pinza robótica interconectable.

A continuación, se desarrollará con más detalle las secciones de la estructura de la pinza robótica.

5.1. Primera Sección: Base

Debido a que existirán tres tipos de palma alternativos para la generación de la pinza, es necesario crear un ensamble rápido y estable entre el cuerpo (palma y dedos) y la muñeca. La interconexión será conducida por la sección Base cuya estructura consta de 3 piezas, como se observa en la figura 5.2. La Pieza *Base* (PB) será fija y estará conectada a la muñeca del brazo mecánico; la Pieza *Connector* (PC) y la Pieza *Extension* (PE) estarán conectadas perpetuamente; ésta última ayudará a generar un espacio de elevación entre la sección de la base y del resto del cuerpo de la pinza para permitir que las mangueras de los dedos blandos no tengan obstrucciones intermedias, véase la figura 5.3 Este conjunto PC y PE tendrá la capacidad de ser removible de la Pieza Base, por tanto, se fabricarán tres conjuntos para cada tipo de pieza Palma que se detallará más adelante.

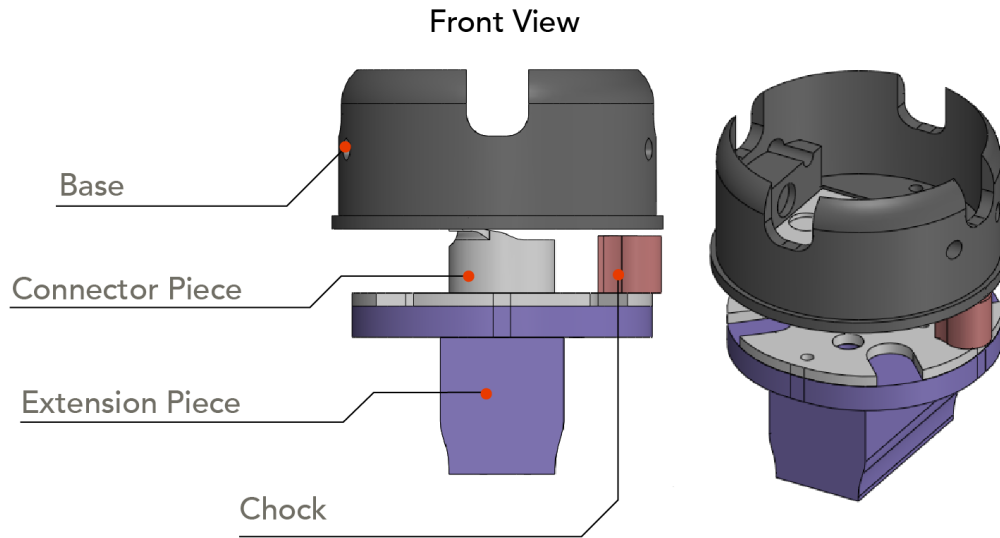


Figura 5.2: Primera Sección: Base de la pinza robótica.

El modo de ensamble se observa en la figura 5.4. Para proporcionar estabilidad y evitar desajustes en el momento de manipulación se coloca una pequeña pieza denominada cuña, ubicada entre el conjunto PC-PE y la PB. Estas piezas fueron diseñadas utilizando el software SOLIDWORKS y fabricadas con tecnología de impresión 3D utilizando material PLA. De esta forma se logra minimizar el peso de todas las piezas de la sección BASE.

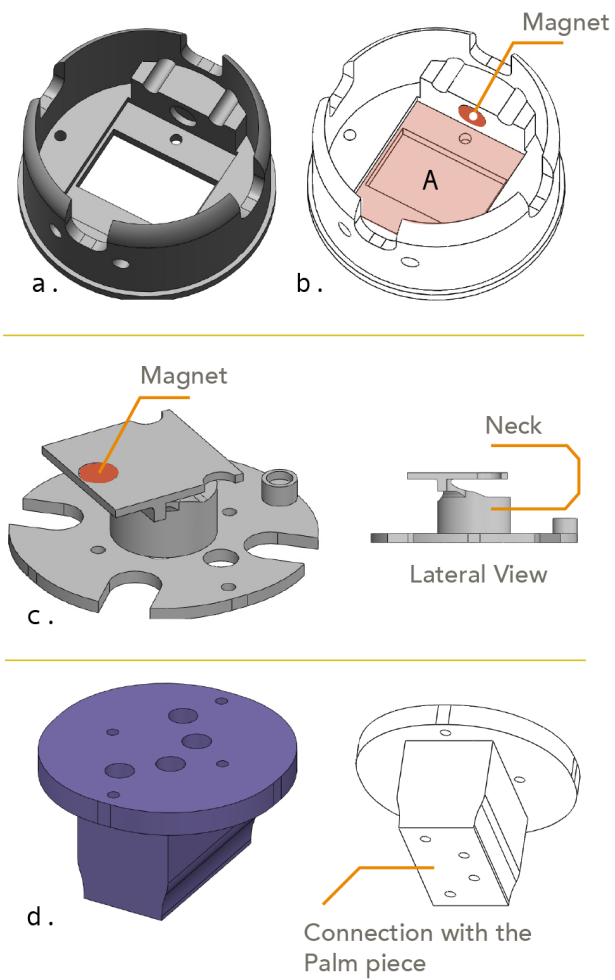


Figura 5.3: a., b. Pieza *Base*, posee una apertura en el centro (A) y un imán que permitirá el ensamble removible con el resto de las piezas; c. Pieza *Sujetador*, el diseño del cuello de la pieza permite generar el mecanismo de ensamble; d. Pieza *Extension*.

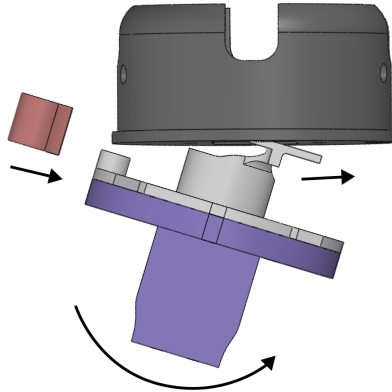


Figura 5.4: Ensamble removible de las piezas para la sección Base

5.2. Segunda Sección: Palma

Cutkosky en su investigación [108] analiza y propone una taxonomía sobre las formas de agarre de diversas piezas con la mano humana, como se observa en la figura 5.5. Clasifica el agarre en dos grupos: potencia y la precisión, enfocándose en la estabilidad y en la destreza respectivamente. Con relación a los objetos, los clasifica en circulares y prismáticos. Con ello, cada tipo de agarre C_i muestra la distribución de los dedos y su posición (Ver detalle en la tabla 5.1).

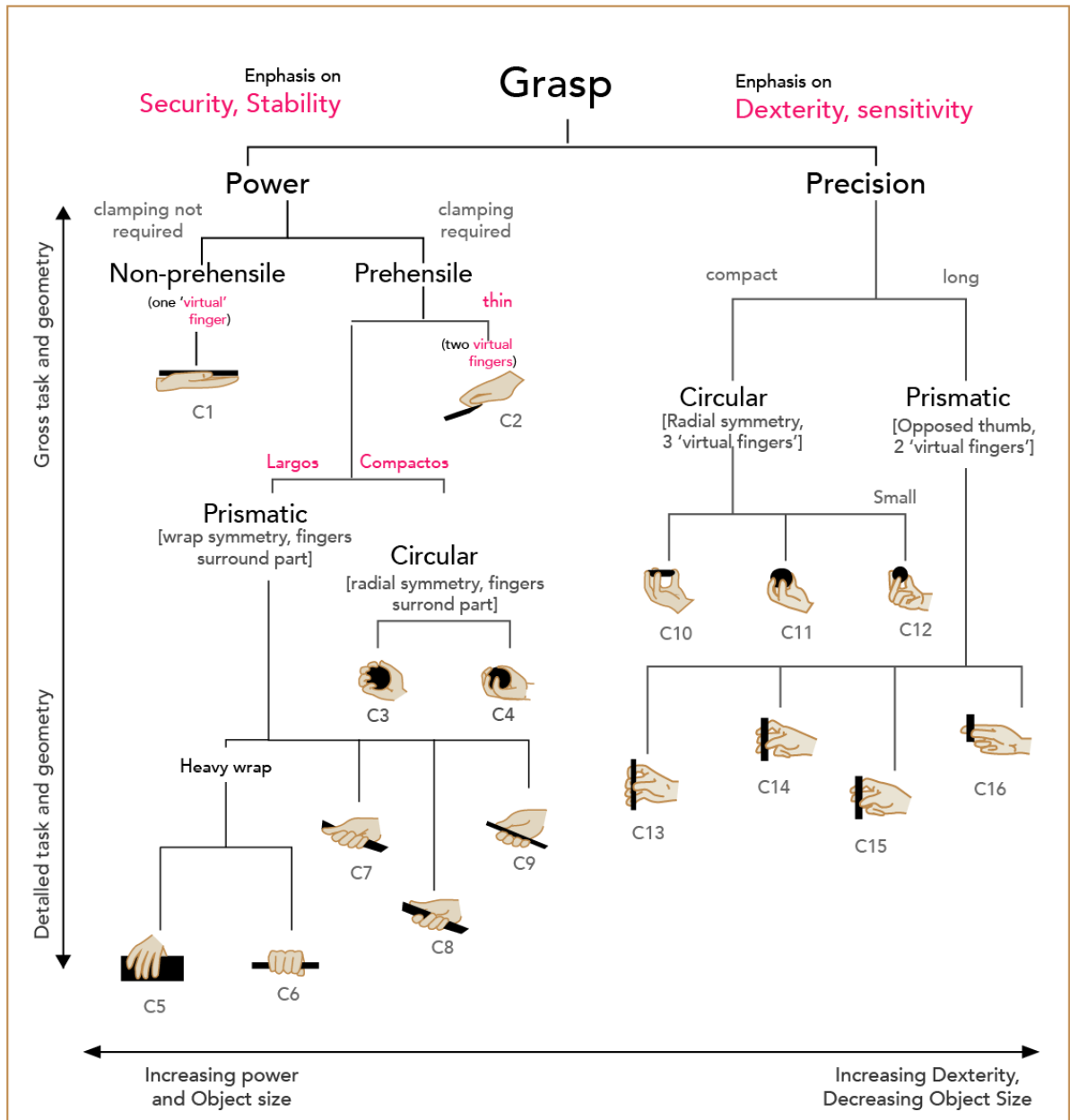


Figura 5.5: Taxonomía del agarre de la mano humana. Traducción y rediseño basado en [108]

















Label	Grasp	Contact of the hand with the object	Label	Grasp	Contact of the hand with the object
C1	Hook, Platafform, Push		C9	Light tool	
C2	Lateral pinch		C10	Disk	
C3	Disk		C11	Sphere	
C4	Sphere		C12	Tripod	
C5	Large Diameter		C13	Thumb - 4 fingers	
C6	Small Diameter		C14	Thumb - 3 fingers	
C7	Medium Wrap		C15	Thumb - 2 fingers	
C8	Adducted Thumb		C16	Thumb - index finger	

Tabla 5.1: Taxonomía del agarre y el contacto necesario de la mano. Basado en [109]

Por su parte, González [109] hace una análisis del área de contacto de la mano humana en base a los tipos de agarre de la taxonomía de Cutkosky, así como de las capacidades de interacción existentes durante la manipulación y exploración. Señala que el agarre de potencia normalmente necesita de la palma de la mano, a diferencia de los agarres de precisión, donde las yemas de los dedos son más valiosos e incluso suficientes.

De esta forma, esta investigación realiza un análisis de la posición que tendrían los dedos para agarrar óptimamente los objetos para luego definir la estructura de la Palma.

Observe la tabla 5.2, se determinan dos configuraciones para agarrar los objetos, la primera (A) es denominada Estrella, la segunda (B) Paralelo. En la primera, los dedos están distribuidos en forma de triángulo y en una dirección hacia el centroide

del triángulo, a diferencia del Paralelo, donde la dirección de los dedos están de lado o de frente sin generar ninguna intersección en su dirección.

Para generalizar las formas de los objetos, este análisis considera a una esfera, que es extensible a un cilindro, un ovoide, un prisma rectangular y un prisma triangular. En este sentido, se observa que los dedos de la configuración Estrella se adaptan mucho mejor ya que permiten una distribución equitativa del objeto. Sin embargo, existen problemas cuando se trata de agarrar objetos con forma prismática rectangular debido al poco espacio de contacto y a la errónea dirección de presión ejercida por parte de dos de los dedos.




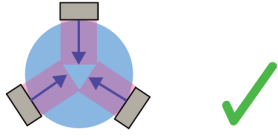
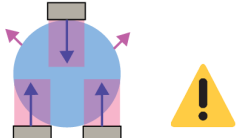

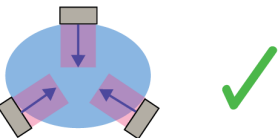
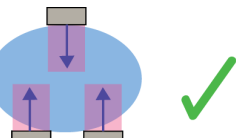

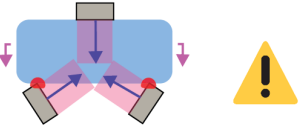
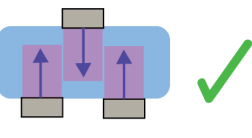

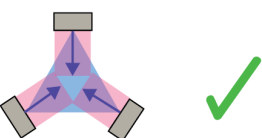
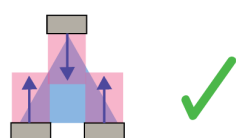

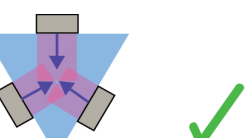
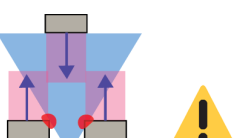
Classic Shapes of objects		Configurations	
		A Star	B Parallel
			
1			
2			
3			
4			
5			

Tabla 5.2: Análisis del contacto de dedos robóticos distribuidos en Estrella y Paralelo con diversas formas de objetos. Se designan con símbolos de aprobación o de peligro cuando su agarre es o no satisfactorio.

Por otro lado, la configuración Paralelo tiene problemas con el agarre de objetos esféricos o cilíndricos, debido a que existe un amplio espacio vacío que por la presión ejercida por cada dedo puede tender a desviar el objeto y dejarlo caer. Sin embargo, si el objeto es más extenso, como un ovoide, no existen problemas y menos aún si se tratan de objetos prisma rectangular debido a la dirección de sus dedos. Finalmente,

si un objeto triangular u otro, tiene poco volumen en contacto con los dos dedos del frente, es muy probable que éste se desvíe y falle el agarre, como se observa en la quinta situación.

Así pues, esta investigación se propone diseñar y fabricar estas dos configuraciones (Estrella y Paralelo) para la palma de la pinza robótica. éstas podrían ser de agarre de precisión o de potencia, donde sólo se requiera las yemas de los dedos, o todo en su conjunto. El agarre de los objetos con estas configuraciones vendrá por el lado superior de los mismos, denominándose en el resto del documento como Agarre Superior. Si bien los dedos llegarían a recubrir los objetos de manera deseada utilizando estas configuraciones, sólo podrá desenvolverse con objetos livianos, debido al material blando y al diseño de su estructura.

Sin embargo, se generará una tercera pieza Palma que estará basada en la configuración Paralelo, cuyo agarre se otorgará frontalmente hacia el objeto. Además, tendrá únicamente el agarre de potencia, donde un gran porcentaje del dedo conectará con el objeto y con la misma sección de la palma.

De esta forma, se presentan a continuación las tres estructuras de la pieza Palma.

5.2.1. Primera Estructura

Palma Tetraédrica de base Triangular con 3 caras funcionales: T-3

La primera configuración de la pieza Palma estará basada en un tetraedro, como se observa en la figura 5.6. Ésta logra sujetar objetos esféricos o voluminosos de tamaño pequeño y mediano. El agarre, en cuanto a la taxonomía que se observa en la figura 5.5, se asimila a un agarre de Prensibilidad Circular con Potencia.

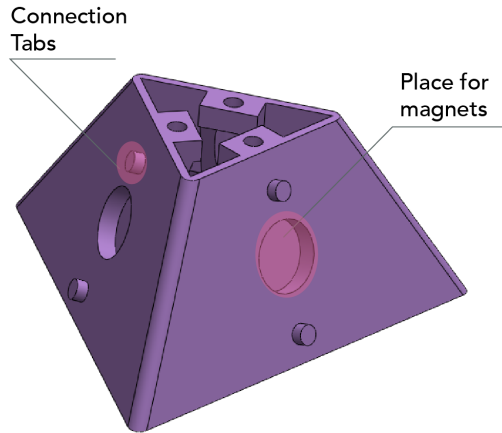


Figura 5.6: Pieza de la Palma tetraédrica de base triangular truncada.

Las tres caras tienen una inclinación de 30 grados "hacia afuera". De esa forma el área de alcance de agarre es mayor, cubriendo un área de 7cm^2 hasta 16cm^2 . La base superior de este tetraedro es un triángulo equilátero y la distribución de los dedos está en el centro de cada lado, generando un encuentro de los tres dedos en el circuncentro, como se observa en la figura 5.8

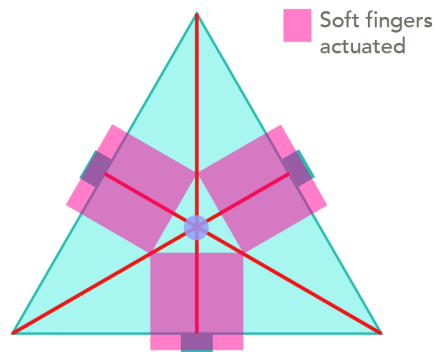


Figura 5.7: Configuración de la base triangular de la palma tetraedro.

Debido a que los dedos tienen un ancho de 2cm, el punto central de encuentro de éstos genera un cierre con una apertura de $1,3\text{ cm}^2$, que llega a constituir el área

mínimo del objeto que es posible sujetar.

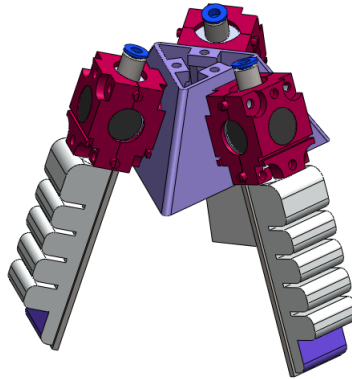


Figura 5.8: Configuración de la base triangular de la palma tetraedro.

5.2.2. Segunda Estructura

Palma Prisma irregular con 8 caras funcionales: PI - 8 La siguiente configuración está basada en una pieza Prismática irregular que posee 8 caras funcionales (véase la figura 5.9), es decir, posibles caras donde los dedos pueden ensamblarse. Su diseño permite cuatro tipos de configuraciones para la pinza robótica, a diferencia de la configuración T-3 que sólo permitía una sola combinación. Estas posibles distribuciones se observan en la figura 5.10.

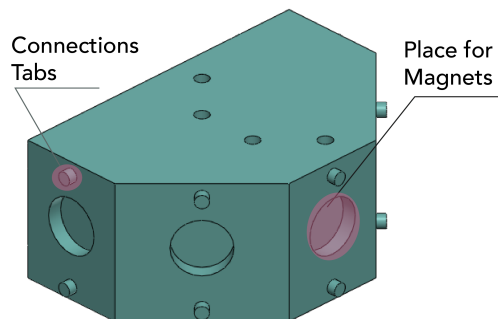


Figura 5.9: Pieza de la Palma con configuración Prismática irregular de 8 caras funcionales: PI-8

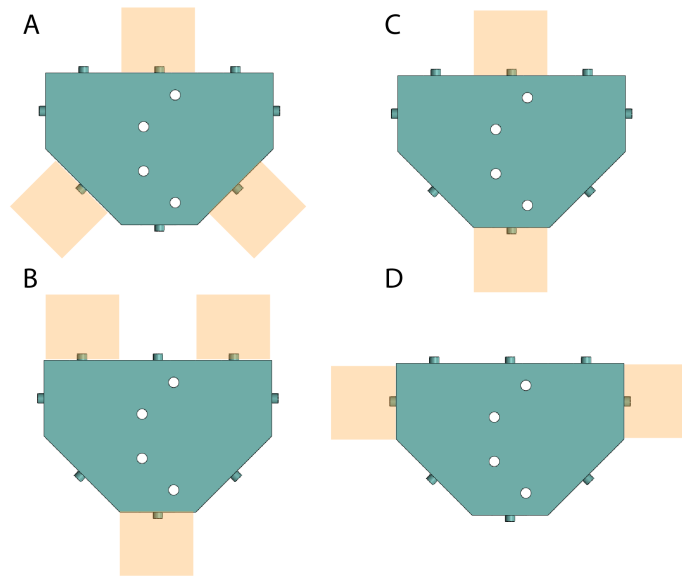


Figura 5.10: Configuraciones posibles de la pieza PI-8.

Como se observa, se tienen configuraciones de la pinza con tres dedos distribuidos en formato estrella, con vértices basados en un triángulo isósceles (A); en formato paralelo también con tres dedos, ideal para el agarre de objetos prismáticos (B); con dos dedos uno frente al otro con una distancia de dos módulos (C); y finalmente con una distancia de tres módulos (D).

A continuación, se observa el ensamble de la pinza robótica con los dedos blandos pequeños distribuidos en el formato A, B y D que se observaron en la figura 5.10.

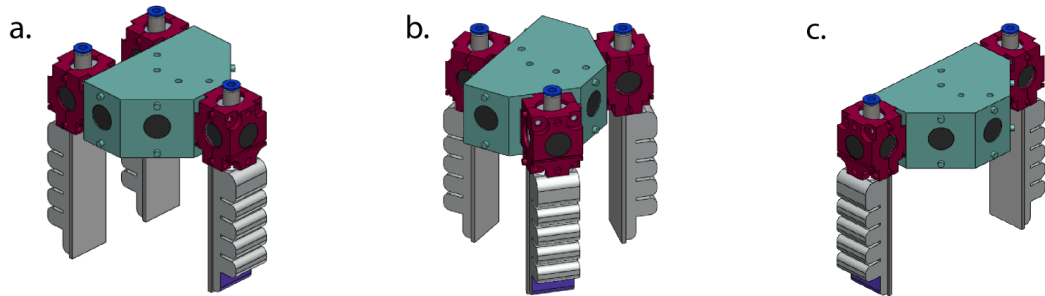


Figura 5.11: a. Configuraciones de la pieza PI-8 en formato estrella con tres dedos; b. Configuración de la pieza PI-8 en formato paralelo con tres dedos; c. Configuración de la pieza PI-8 con dos dedos a distancia de tres módulos

5.2.3. Tercera Estructura

Palma Prisma rectangular con 6 caras funcionales: PR - 6 Finalmente la tercera pieza posee una configuración prismática rectangular, donde los módulos de conexión están distribuidos de forma horizontal en dos caras de la pieza, teniendo así 6 caras funcionales, véase la figura 5.12

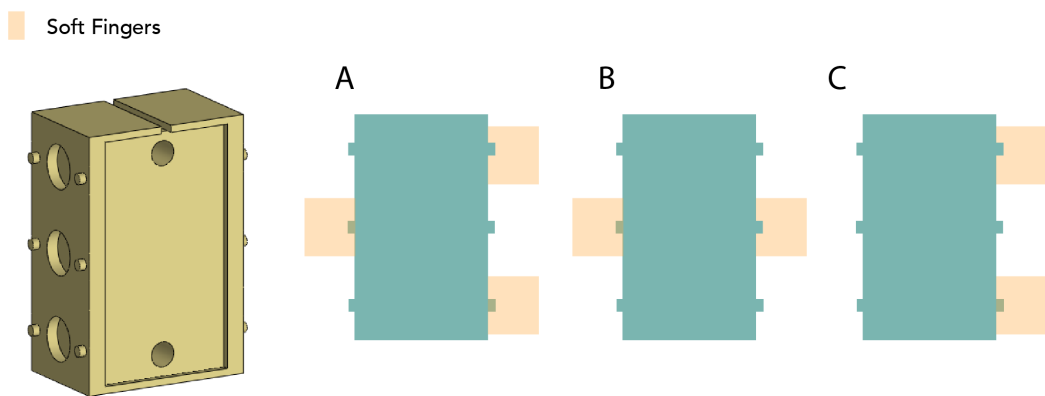


Figura 5.12: Pieza de la Palma con configuración Prismática Rectangular de 6 caras funcionales: PR-6; Configuraciones posibles

Este diseño tiene como objetivo agarrar los objetos ordenándolos ya sea por un lado, o por ambos lados, como se observa en la figura 5.12A, B y C. Debido a que el objeto llega a tener un contacto directo con la pieza, ésta tiende a resbalarse por el material plástico que posee la pieza PR-6, situación no deseada para el agarre. Esto conlleva al siguiente análisis:

Como lo menciona Cutkosky en la taxonomía de la figura 5.5, el agarre de objetos con precisión, que usualmente son livianos, requiere sólo de las yemas de los dedos. Sin embargo, cuando se trata de objetos con mayor peso, la palma de la mano es también un sector de gran importancia para el apoyo y distribución del peso del objeto. Es por eso que se fabricó una almohadilla de laminillas hechas de silicona Ecoflex 00-50 que cubrirá todo el centro de la palma PR-6 (Véase la figura 5.14).

Estas laminillas están inspiradas en la forma y distribución que se encuentran en las patas de los Geckos para adherirse a cualquier superficie. Estos animales reptiles poseen en sus patas laminillas y en cada una de estas otras laminillas que por un proceso químico generan adherencia a cualquier superficie por medio de las fuerzas de Van de Halls (véase la figura 3.12). Existen pinzas robóticas que utilizan esta lámina adhesiva [85] [87], donde sus pelillos son milimétricos y micrométricos y su efecto es activo. En esta investigación se considera la forma que posee las laminillas del gecko pero en formato pasivo, es decir, el material de silicona con la que se fabrican estas laminillas ayudará al antideslizamiento de los objetos en el momento de agarre por su diseño y distribución de éstos.

Esta plancha de laminillas se incrustará en la estructura PR-6 debido a que esta pieza tiene contacto directo con gran porcentaje de los objetos, a diferencia de las anteriores estructuras (Véase la figura 5.13). El material que se utiliza en esta sección es de Ecoflex 00-50 por su propiedad glutinosa que resalta con este diseño.

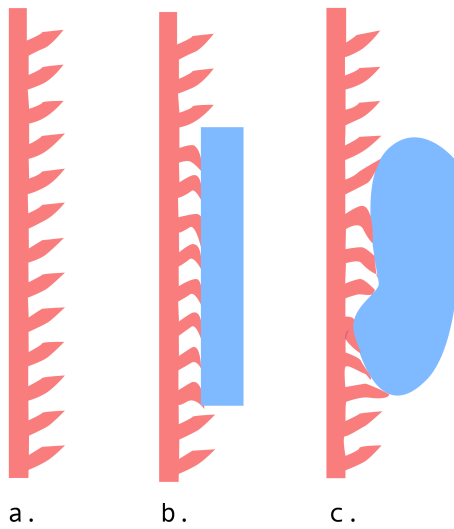


Figura 5.13: Interacción de las laminillas con los objetos

Como se observa en la figura 5.13, las laminillas de esta plancha se adecuarán a la forma de la cara del objeto a manipular. Este contacto ayuda a mantener un contacto directo con el objeto y evita deslizamientos como ocurriría si éste se apoyara en una pared lisa de plástico de la estructura PR-6.

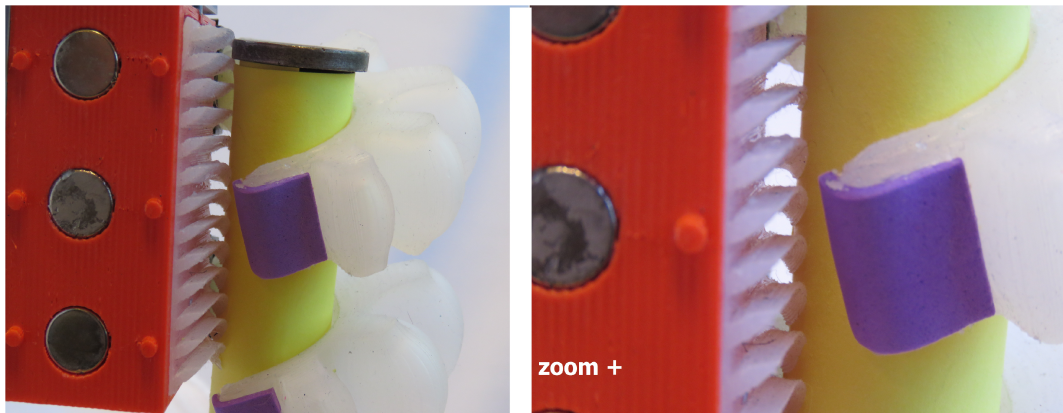


Figura 5.14: Antideslizamiento de objetos con las laminillas

A continuación, se observa las configuraciones con esta estructura PR-6 en la

figura 5.15. Esta estructura es mucho más eficiente utilizando los dedos pequeños y grandes por el material y diseño que posee, además de dirigirse especialmente a la manipulación de objetos pesados o muy deformes.

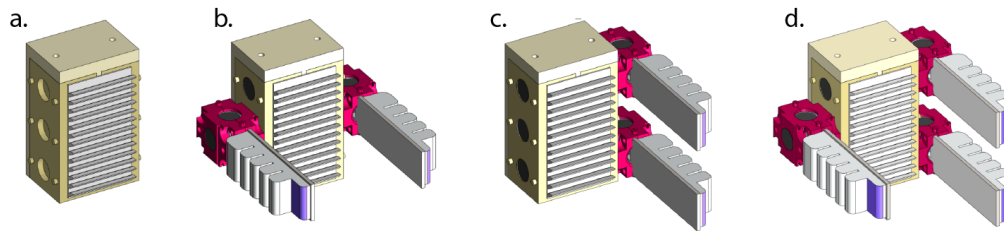


Figura 5.15: a. Pieza PR-6 con almohadilla de laminillas blandas; b. Configuración PR-6 con dos dedos en formato horizontal; c. Configuración PR-6 con dos dedos en formato vertical; d. Configuración PR-6 con tres dedos en formato mixto

5.3. Tipos de Agarres

Finalmente, se resume en la tabla 5.3 el desempeño que las tres estructuras de la palma son capaces de realizar en el momento de agarrar el objeto. Considerando la taxonomía de Cutkosky, las estructuras T-3 y PI8 tienen un mejor desempeño con objetos ligeros y pequeños debido a que por su agarre superior, las yemas de los dedos tienen el principal contacto con el objeto. A diferencia de la tercer estructura, PR-6, que por su agarre lateral logra abrazar al objeto donde no sólo actúa el mayor porcentaje de sus dedos, sino también la sección de la palma para manipular el objeto que puede tener un peso mayor. Además, las tres estructuras pueden adaptarse a las diferentes formas de los objetos, a diferencia de la T-3 que por la distribución de sus dedos no logra acomodarse correctamente a objetos que tengan caras planas y paralelas.



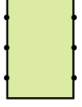
Palm Configuration		Top-Grasp				Side-Grasp			
		Circular		Prism	Deformable	Circular		Prism	Deformable
		Sphere	Cylindrical			Sphere	Cylindrical		
T-3		✓	✓		✓				
PI-8		✓	✓	✓	✓				
PR-6						✓	✓	✓	✓

Tabla 5.3: Desempeño de las configuraciones generadas por la pieza Palma en relación a la dirección de agarre de objetos.

6

Circuito de Control

6.1. Circuito de control

Debido a que los objetos tienen formas, tamaños y pesos variados, la deformación de cada dedo será adaptativa, es decir, mientras más liviano o pequeño sea el objeto, menos deformación requerirá. Esta deformación resulta de la introducción de aire comprimido a los dedos blandos por medio de un sistema electroneumático. Para ello se requiere de un microcompresor que se encarga de comprimir el aire del ambiente(entrada), y de un solenoide que lo descargue para regresar al dedo blando a su estado inicial (salida). Para este efecto y en esta ocasión, se propone un sistema de control manual.

El control es una combinación neumática y eléctrica, el sistema neumático se basa en el esquema que se observa en la figura 6.1. Mientras el solenoide se encuentre en estado cerrado, el microcompresor comprime el aire del ambiente dirigiéndolo al dedo blando. Cuando el solenoide es activado, el aire comprimido del dedo actuado es expulsado y de esa forma retorna a su estado inicial. Tanto el microcompresor y el solenoide son activados por un sistema eléctrico por medio de la placa Arduino MEGA 2560. El esquema electrónico final del circuito de control se observa en la figura 6.2.

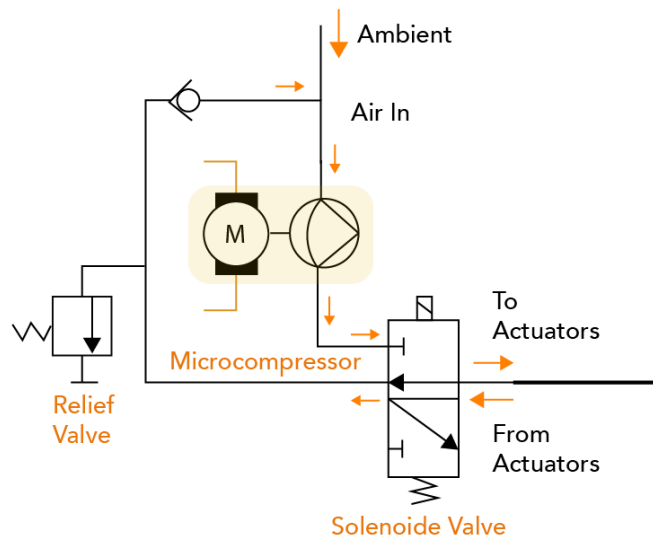


Figura 6.1: Esquema del Circuito Neumático

Este circuito figura 6.3 es fabricado en una placa electrónica perforada para controlar cinco actuadores blandos, y el armazón que recubre el circuito y permite la organización de control está fabricado con la tecnología 3D en material PLA (ver figura 6.3 y tabla 6.2).

Componente	Designación
R1-R10	1k Ω
P1,P2	10k Ω
T1-T5	IRF530
T6-T10	2N2222
S1-S5	Solenoides
C1-C5	Microcompresor

Tabla 6.1: Descripción de los componentes del circuito de control

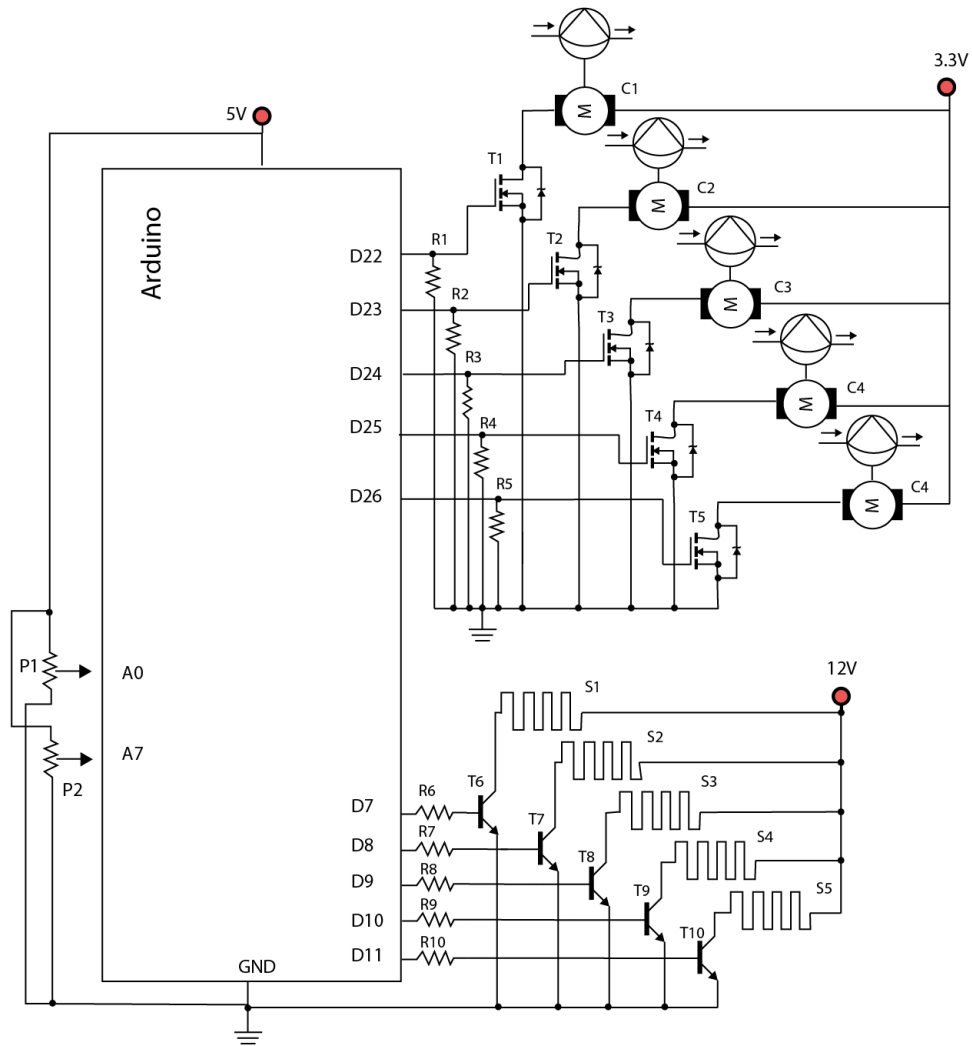


Figura 6.2: Circuito de Control

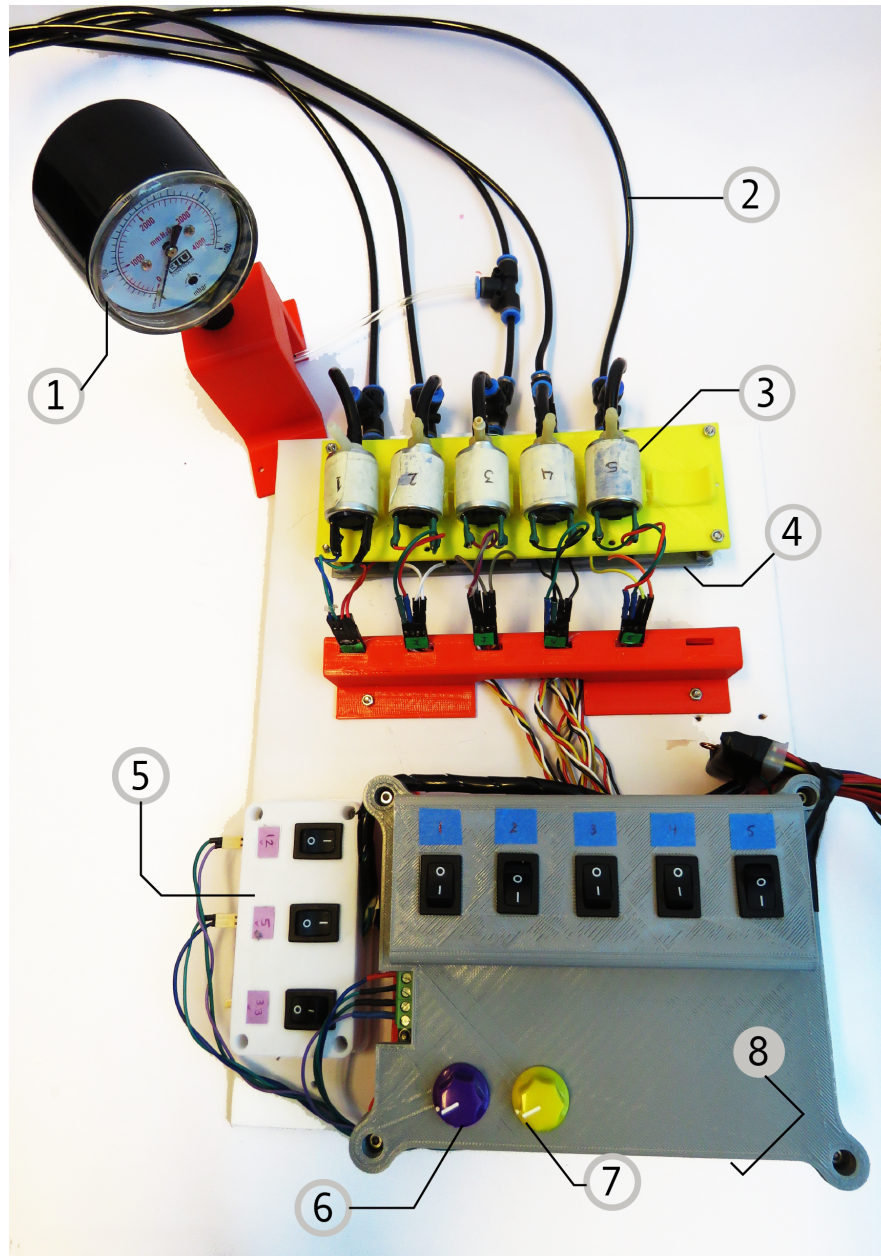


Figura 6.3: Diseño final del Circuito de Control

Etiqueta	Designación
1	Manómetro
2	Mangueras
3	Solenoides
4	Microcompresor
5	Control de Energía
6	Control de activación de inflado
7	Control de escape de aire
8	Placa de Desarrollo Arduino

Tabla 6.2: Descripción de las secciones de la plataforma de control

6.2. Circuito de sensado

Por otro lado, es deseable conocer la fuerza máxima ejercida por cada dedo al ser activada. Para ello, se recurre al uso de un sensor de presión FSR402, que consta de una membrana con un resistor sensible a la presión ejercida en ella. Ésta se conecta a la placa Arduino y por medio de un circuito **divisor de tensión** se realiza una lectura del voltaje de entrada.

$$V_o = V_{cc} * \frac{R}{R + FSR} \quad (1)$$

De acuerdo a la hoja de datos, la relación de la variante de la resistencia del sensor es inversamente proporcional a la fuerza ejercida sobre la membrana (obsérvese la tabla 6.3. Esta relación es importante para evaluar la fuerza ejercida por parte de los dedos blandos de esta investigación.

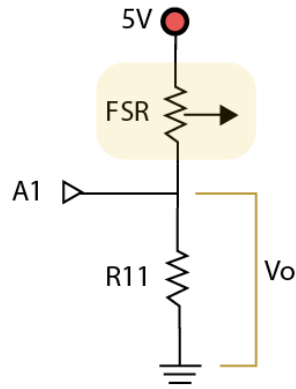


Figura 6.4: Circuito del sensor de presión

Voltaje en R [V]	Resistencia en FSR [Ω]	Fuerza [N]
0	Infinito	Ninguna
1.3	30000	0.2
3.1	6000	1
4.5	1000	10
4.9	250	100

Tabla 6.3: Relación del sensor FSR entre Fuerza, Resistencia y Voltaje

7

Experimentación y Resultados

En este capítulo se observarán los resultados de la experimentación de la deformación de los dedos blandos respecto a la presión de aire aplicada; la definición de los objetos a manipular, las configuraciones aprobadas para el agarre experimental; y respuesta de éstos ante los objetos de prueba.

7.1. Deformación de los dedos blandos

Se evalúa la deformación de los tres dedos, para la experimentación el dedo pequeño posee dos configuraciones internas, una presenta una deformación uniforme (M1), y la otra posee una cavidad más amplia que genera una deformación no uniforme (M2). Asimismo, se tiene el dedo blando mediano (M3) y largo (M4).

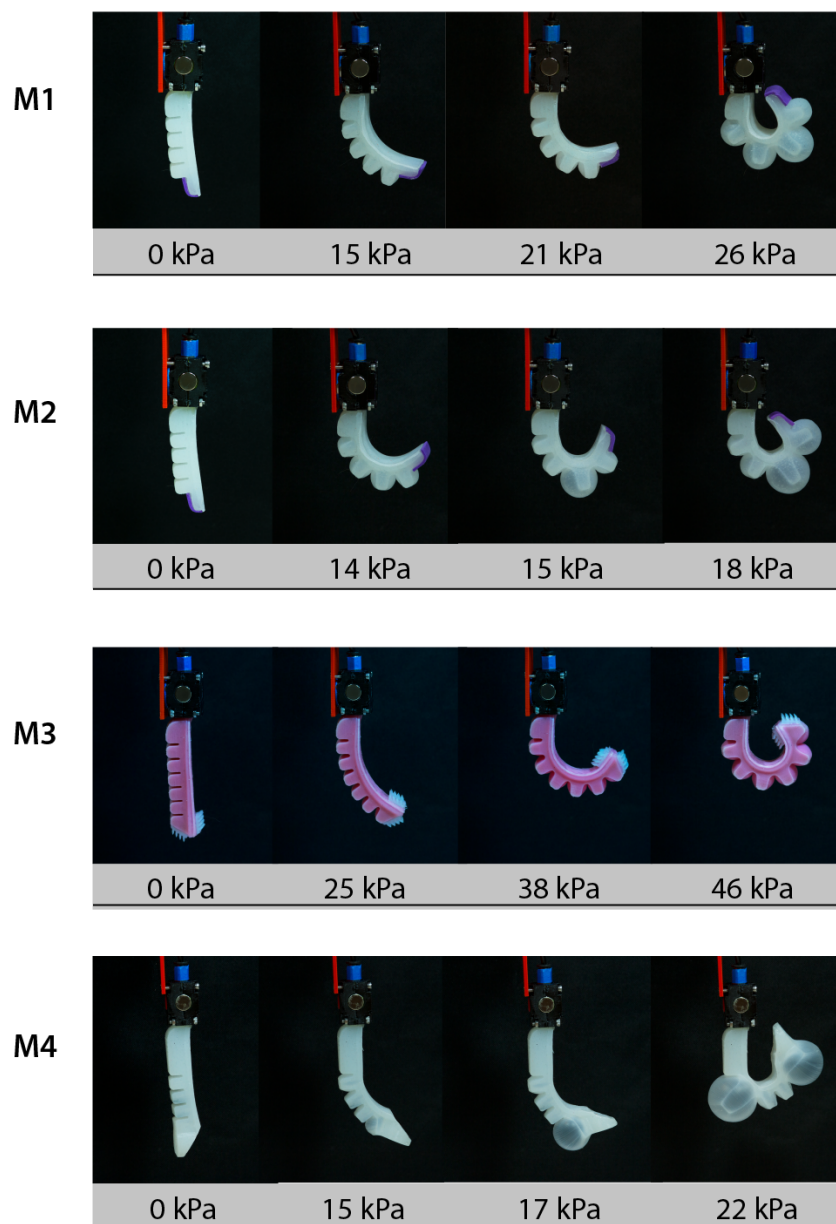


Figura 7.1: Movimientos de los Dedos blandos en respuesta a ciertas presiones kPa

En la figura 7.1 se observa que para llegar a su doblado máximo el M1 requiere de 26kPa, a diferencia de su segunda configuración (M2) donde sólo necesita hasta 18kPa, debido que en 15kPa la penúltima cavidad se empieza a rellenar del aire comprimido, y luego pasa a rellenar a la última cavidad, agilizando la respuesta de

doblado.

De similar forma se encuentra el dedo largo (M4) cuya última y primera cavidad se rellenan de aire de forma consecutiva generando una deformación no uniforme. Este hecho ayuda a posicionar el objeto para el agarre y luego presionarlo generando una estabilidad adecuada.

Por último, la reacción que se observa del dedo mediano (M3) es que al ser fabricado con una silicona más dura y tener más cavidades por rellenar, requiere de mayor presión para generar la deformación necesaria (46kPa).

7.2. Capacidad de presión de los dedos blandos

Utilizando el circuito presión de la figura 6.4, se evalúa la capacidad de presión de fuerza de los dedos blandos pequeños, medianos y grandes (7.2). El dedo mediano requiere de mayor presión de aire para generar una fuerza de 1.6N. Esto se debe al material más duro con el que se fabricó. Por otro lado, los dedos pequeños requieren de 31kPa para alcanzar los 2N, esto se debe al número de cavidades internas que posee y el material. De similar forma, el dedo largo alcanza los 1,8N de fuerza a una presión de 28kPa.

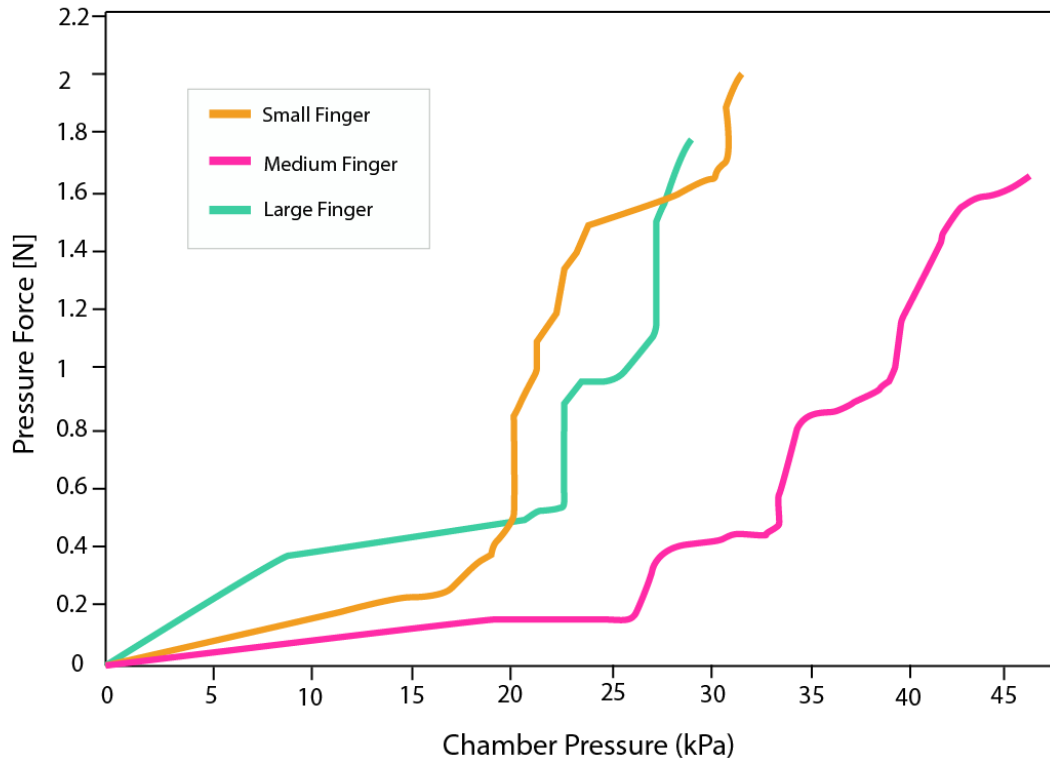


Figura 7.2: Capacidad de presión de fuerza en relación a la presión de aire generada en las cavidades internas de los actuadores

7.3. Objetos de Prueba

Los objetos de prueba fueron seleccionados por la variedad de formas, tamaños y texturas que se encuentran en la manipulación cotidiana. Algunos con cuerpo más regulares que otros, como una taza, y otros sensibles a la deformación, como por ejemplo una bolsa de papas fritas.

En la tabla 7.1 se observa los 20 objetos de prueba con sus propiedades geométricas detalladas como tamaño, forma, dimensiones máximas, peso y material.





















Object	Icon	Size	Shape							Dimensions			Weight (g)	Material	
			Spheric	Cylindrical	Totally Irregular	Alike Cylinder	Alike Prismatic	Special detail	Long (mm)	Wide (mm)	High (mm)	Rigid		Malleable	
1 SD Card		Small							Flat surface	34	24	2	3	x	
2 Cherry Tomato		Small	x							32	28	33	14	x	
3 Polystyrene Sphere		Small	x										2		x
4 Screw		Small		x					Thin	43	3		12	x	
5 Egg		Small	x							40	40	60	50		x
6 Electrical tape		Small		x					Ring	18	50	50	85	x	
7 Disposable PET plastic cup		Medium					x		Angled Chapped	45	65	65	4		x
8 Mouse		Medium						x		35	105	60	125	x	
9 Foaming Pump Bottle		Medium		x						120	40	40	80	x	
10 Cube		Medium						x		57	57	57	130	x	
11 USB Cable		Medium			x				Ring	105	95	28	75	x	
12 Potato Chips Bag		Medium			x			x		210	80	75	42		x
13 Plastic Star		Medium			x				Star	65	23	58	50	x	
14 Irregular Object 1		Medium			x				Ring	50	68	63	80	x	
15 Irregular Object 2		Medium			x					94	90	47	115	x	
16 Masking tape 50 mm		Large		x					Ring	102	102	48	170	x	
17 PET Plastic bottle		Large						x					400	x	
18 Rectangular Plastic Bottle		Large						x					200	x	
19 Cup		Large					x			95	78	78	330	x	
20 Metal Bar		Large		x						133	28	28	205	x	

Tabla 7.1: Objetos de experimentación y sus características básicas

Los objetos están diferenciados por un color de acuerdo al tamaño designado, es decir, se clasificaron por objetos pequeños, medianos y grandes con los colores Rojo, Celeste y Verde respectivamente. Se encuentran 5 objetos maleables, tres de ellos

pequeños y 2 medianos. El resto son objetos con un material rígido. Los que poseen una forma geométrica son 8 y el resto de forma similar o totalmete deformes (véase la Figura 7.3).



Figura 7.3: Objetos de prueba

7.4. Evaluación de agarre con diversas configuraciones de la pinza robótica

Se experimenta el agarre de objetos con 14 combinaciones efectivas de la pinza robótica. De esta forma se evaluará el rendimiento de los dedos y su distribución ante ciertas propiedades de los objetos. Estas configuraciones se presentan en la tabla 7.2 donde cada una de ellas está representada por un esquema y simbología.

Los objetos serán manipulados 15 veces por cada configuración para generar un

estudio de la tasa de éxito. Éstas estarán representadas por una barra y un punto que simboliza la presión necesaria para dicho agarre. Los objetos están representados por un ícono que se detalla en la tabla 7.1. En el lado izquierdo de las gráficas se encuentra un cuadro con el promedio del rendimiento de cierta configuración en relación a la manipulación de objetos pequeños (S), medianos (M) y grandes (L), representadas por los colores Rojo, Celeste y Verde, respectivamente.

Algunas gráficas tendrán casos donde no exista una barra (tasa de éxito) pero sí el punto que representa a la presión. Si éste está en el valor máximo hace referencia al fallo absoluto de agarre del objeto a pesar de generar la presión máxima a los dedos blandos. Por otro lado, si ésta se encuentra en cero, significa que no hay posibilidad de agarre por las dimensiones del objeto.

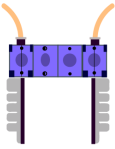

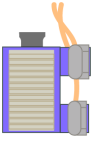

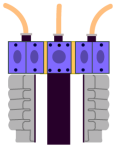

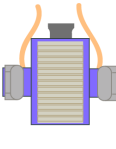

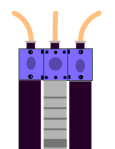

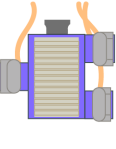

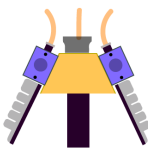

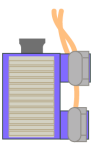

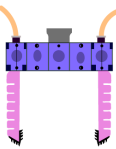

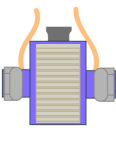

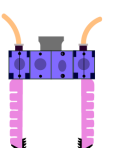

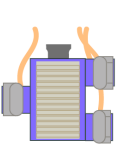

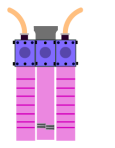

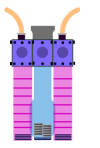

Schemes and Symbology			
	 <p>Short Configuration: PI-8 with 2 Small Soft Fingers</p>		 <p>Vertical Configuration PR - 6 with 2 Small Soft Fingers</p>
	 <p>Star Configuration: PI-8 with 3 Small Soft Fingers</p>		 <p>Horizontal Configuration PR - 6 with 2 Small Soft Fingers</p>
	 <p>Parallel Configuration: PI - 8 with 3 Small Soft Fingers</p>		 <p>Mix Configuration PR - 6 with 3 Small Soft Fingers</p>
	 <p>Delta Configuration: T3 with 3 Small Soft Fingers</p>		 <p>Vertical Configuration PR - 6 with 2 Long Soft Fingers</p>
	 <p>Long Configuration: PI-8 with 2 Medium Soft Fingers</p>		 <p>Horizontal Configuration PR - 6 with 2 Long Soft Fingers</p>
	 <p>Short Configuration: PI-8 with 2 Medium Soft Fingers</p>		 <p>Mix Configuration PR - 6 with 3 Long Soft Fingers</p>
	 <p>Parallel Configuration: PI - 8 with 3 Medium Soft Fingers</p>		 <p>Mixed Parallel Configuration: PI - 8 with 2 Medium Soft Fingers and 1 Rigid Finger</p>

Tabla 7.2: Configuraciones de la pinza que se evalúan con su respectivo esquema y simbología

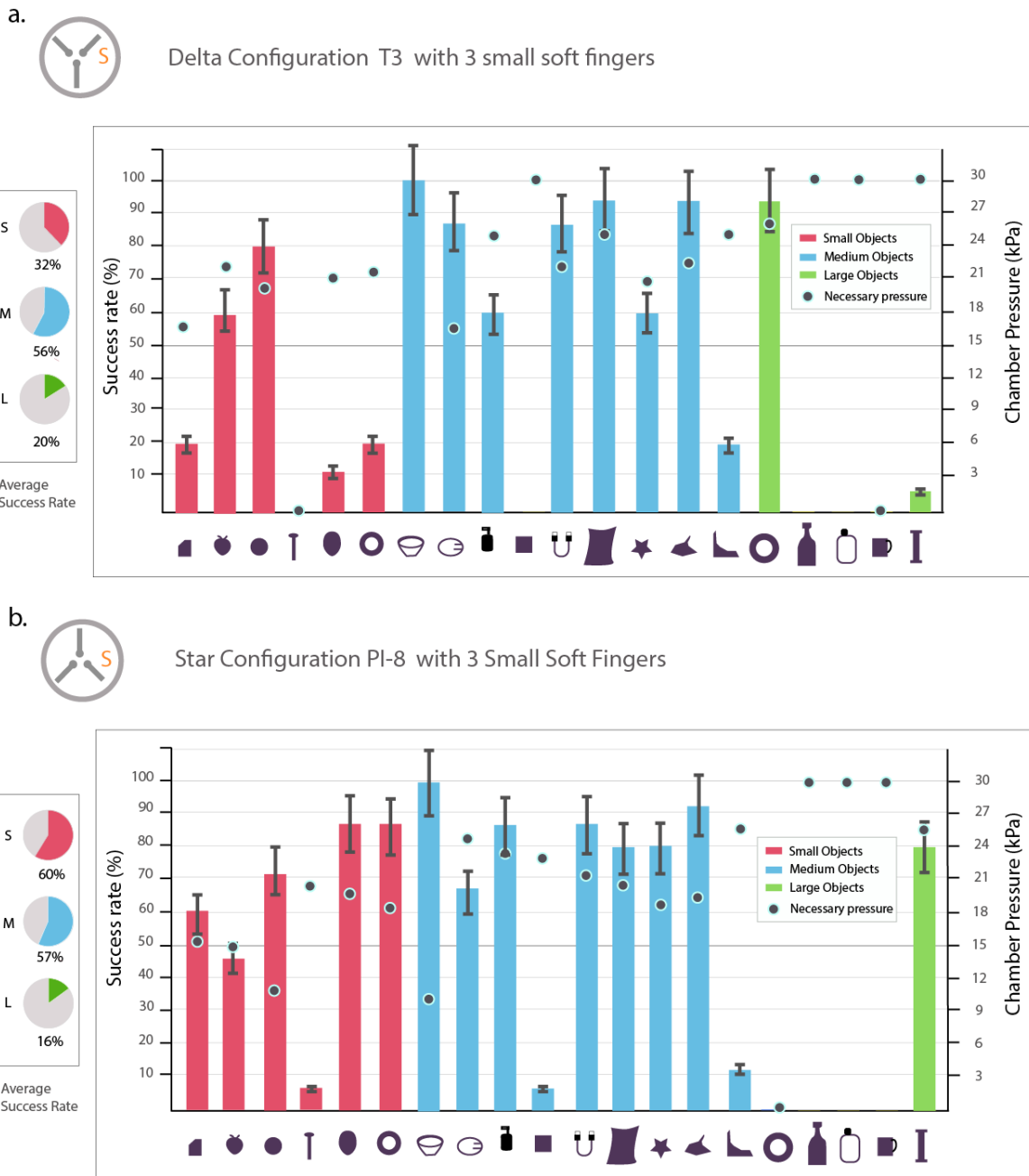


Figura 7.4: Gráfica - Tasa de éxito de cada objeto con la configuración: a. Delta T3 Con 3 dedos pequeños. b. Estrella PI-8 con 3 dedos pequeños

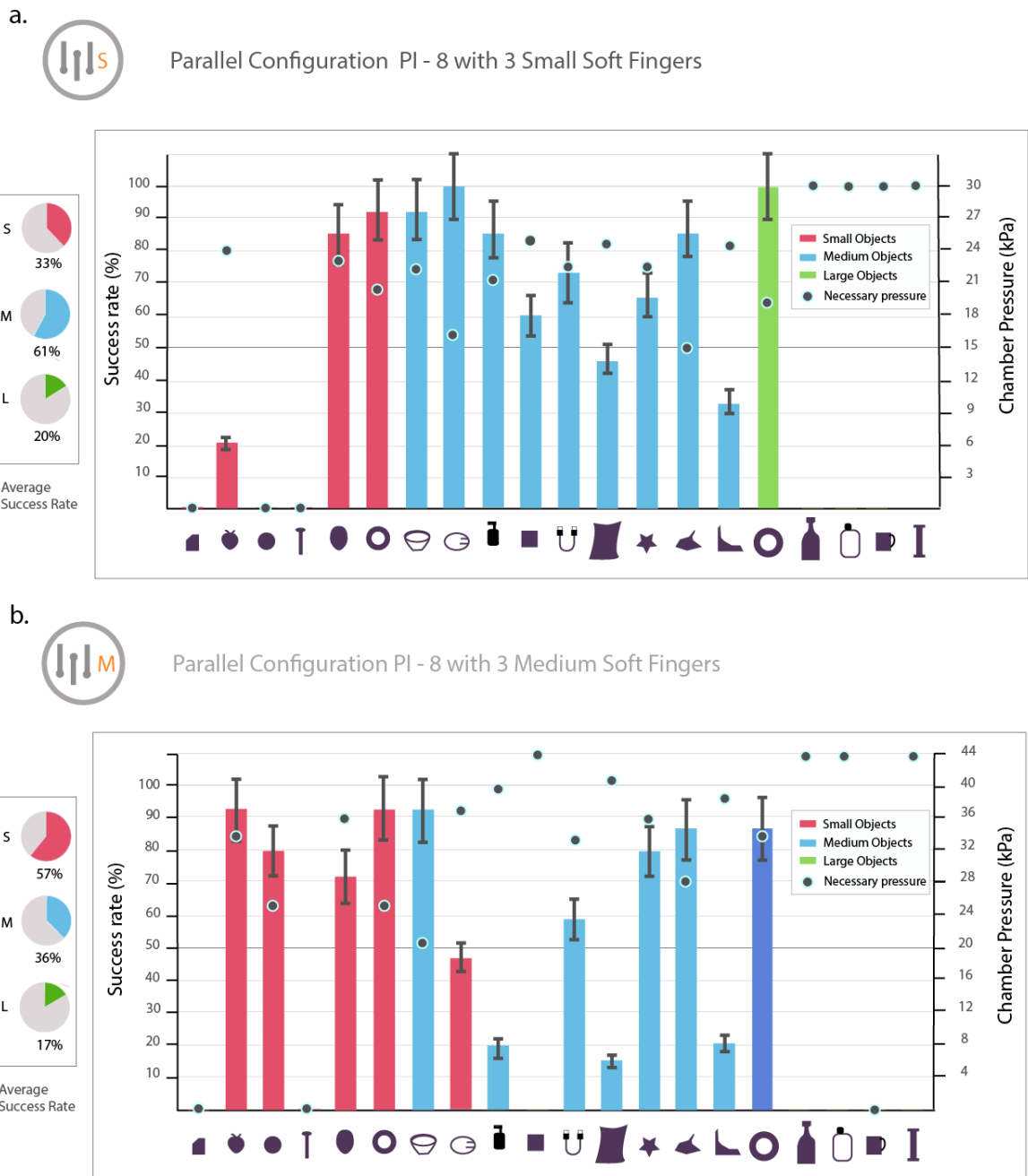

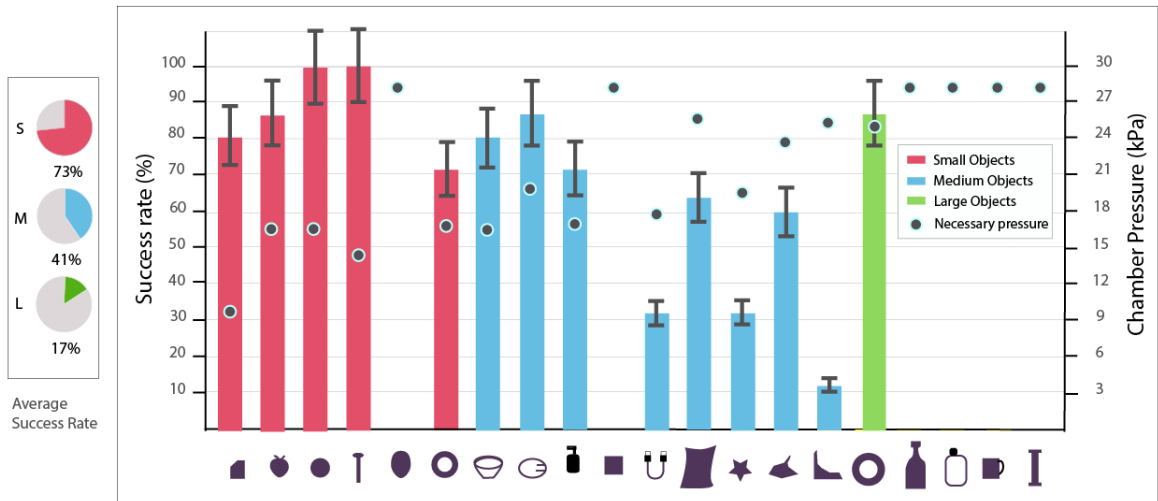



Figura 7.5: Gráfica - tasa de éxito de cada objeto con la configuración: a. Paralela PI-8 con tres dedos pequeños. b. Paralela PI-8 con 3 dedos medianos

a.  Short Configuration: PI-8 with 2 Small Soft Fingers



b.  Short Configuration: PI-8 with 2 Medium Soft Fingers

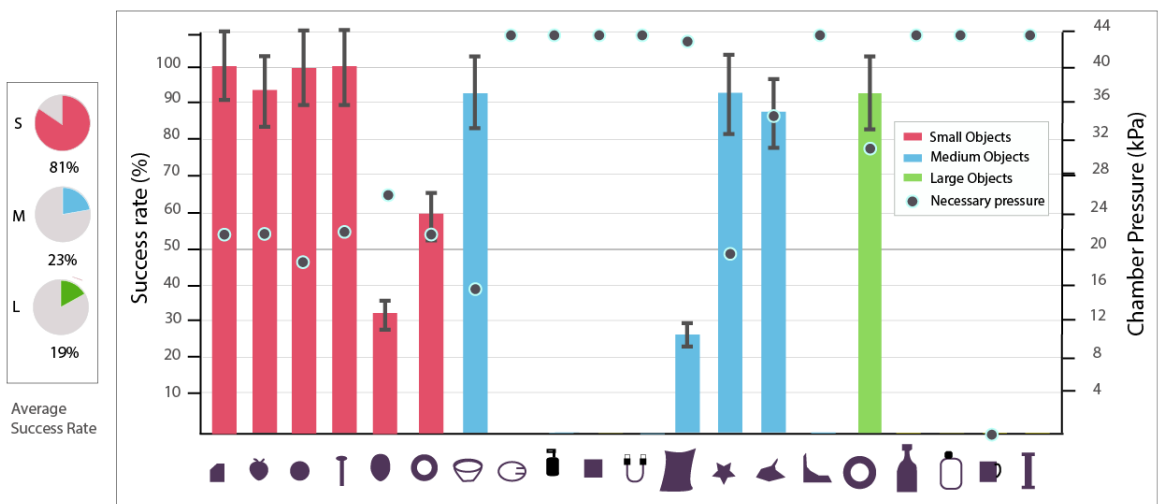


Figura 7.6: Gráfica - tasa de éxito de cada objeto con la configuración: a. Estrecho PI-8 con 2 dedos pequeños. b. Estrecho PI-8 con dedos medianos

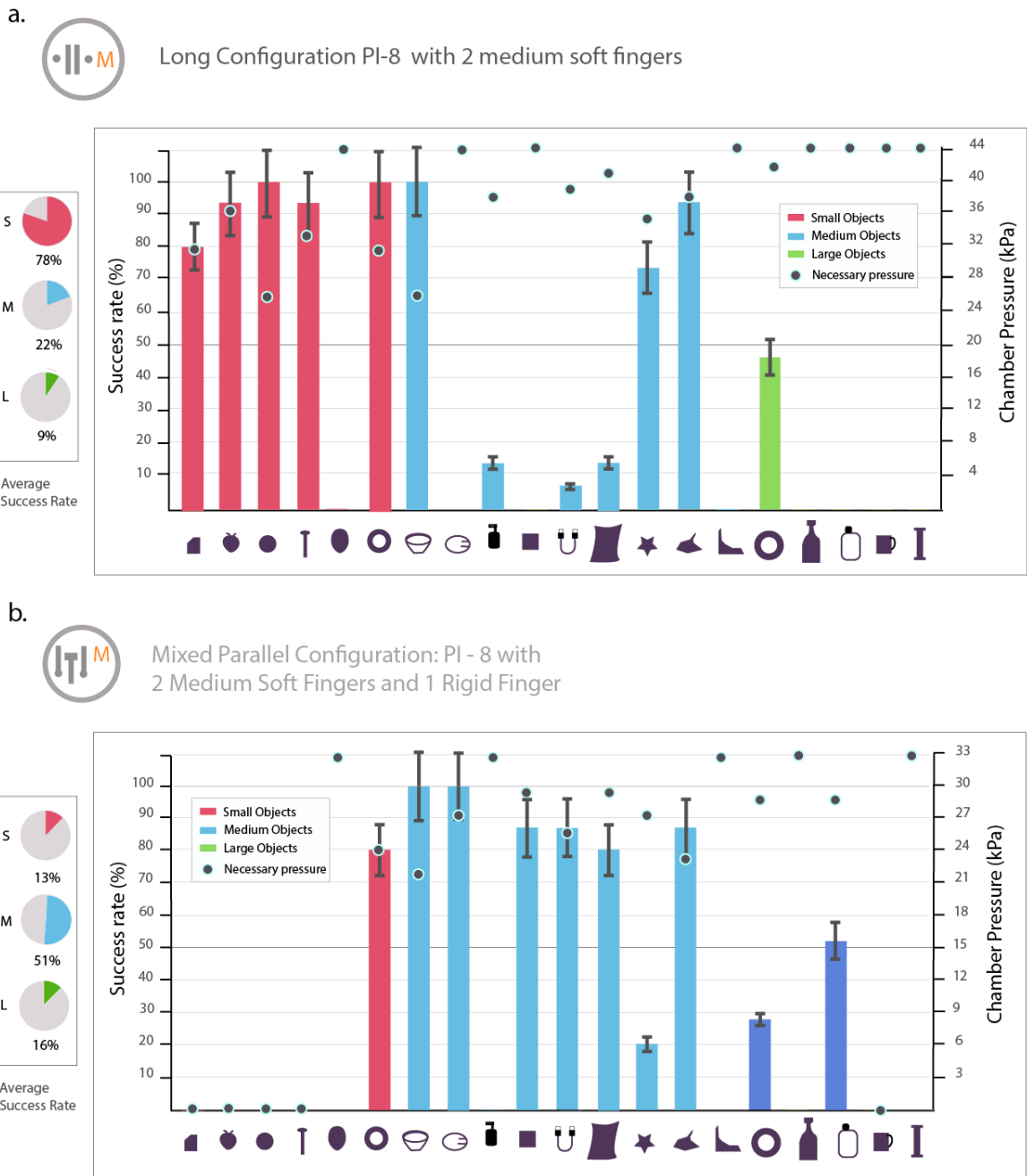


Figura 7.7: Gráfica - tasa de éxito de cada objeto con la configuración: a. Ancha PI-8 con dedos medianos. b. Mixta con 2 dedos medianos y 1 dedo rígido

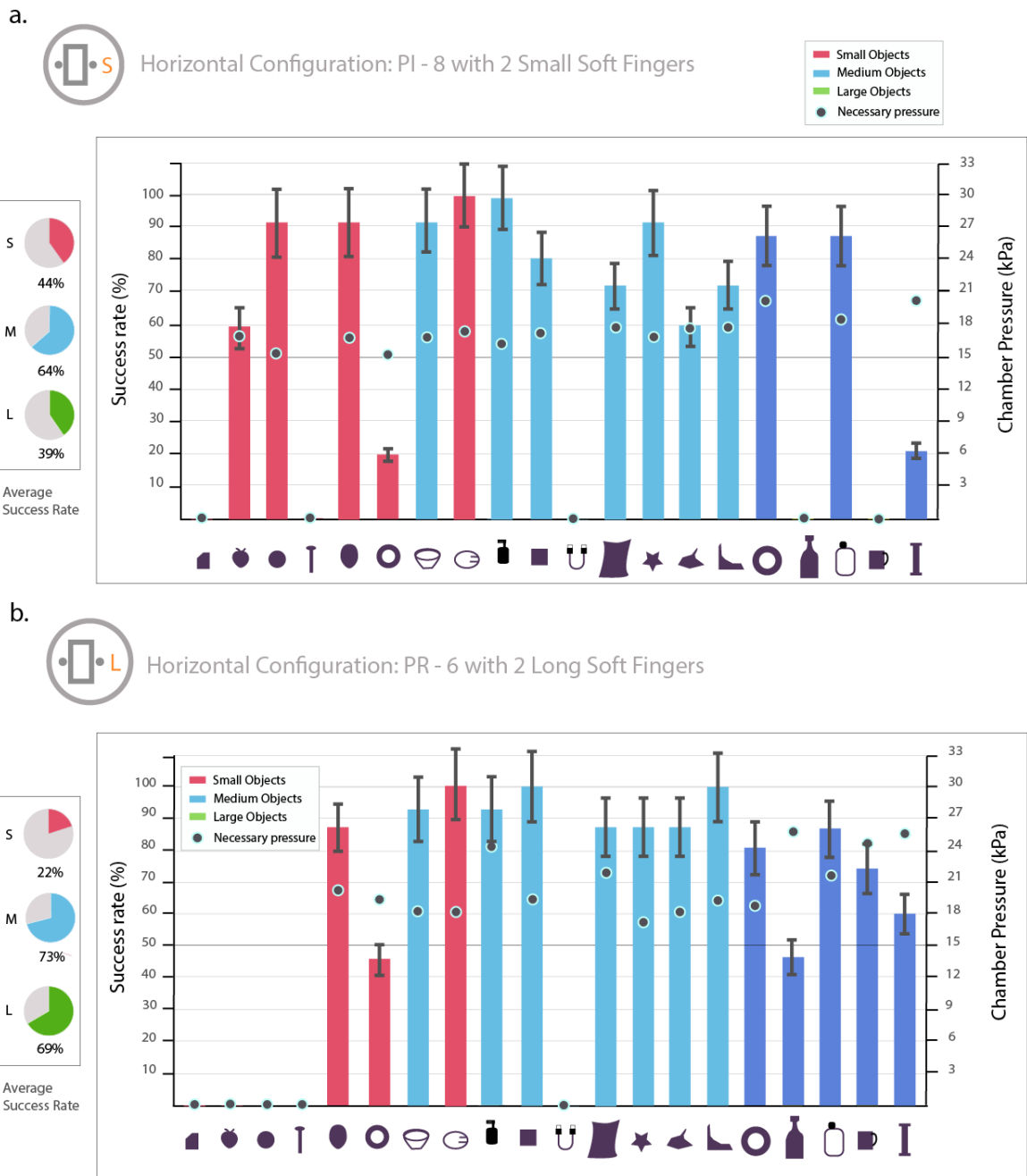

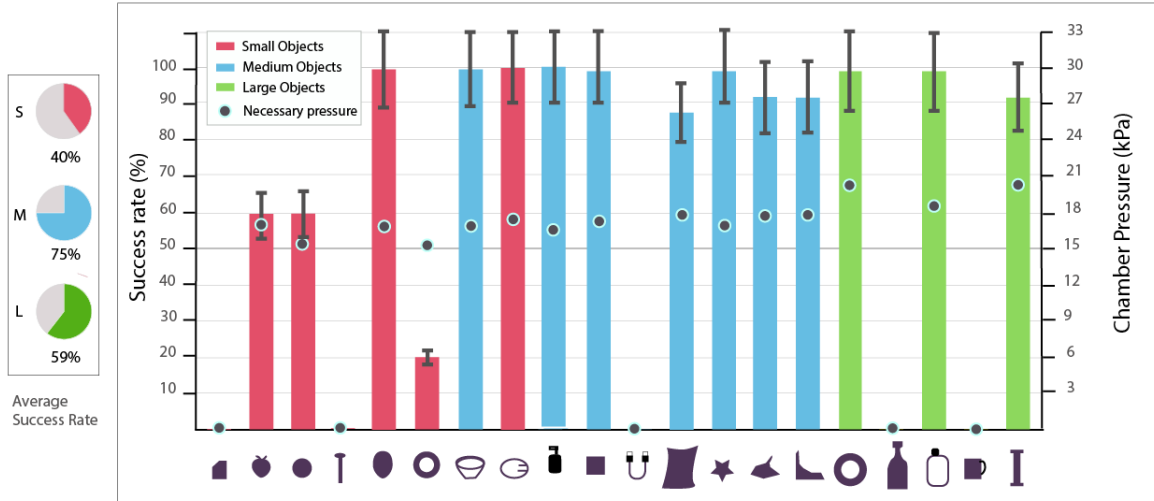



Figura 7.8: Gráfica - tasa de éxito de cada objeto con la configuración: a. Horizontal PR-6 con 2 dedos pequeños. b. Horizontal PR-6 con 2 dedos Largos

a.  Mix Configuration: PI - 8 with 3 Small Soft Fingers



b.  Mix Configuration: PR - 6 with 3 Long Soft Fingers

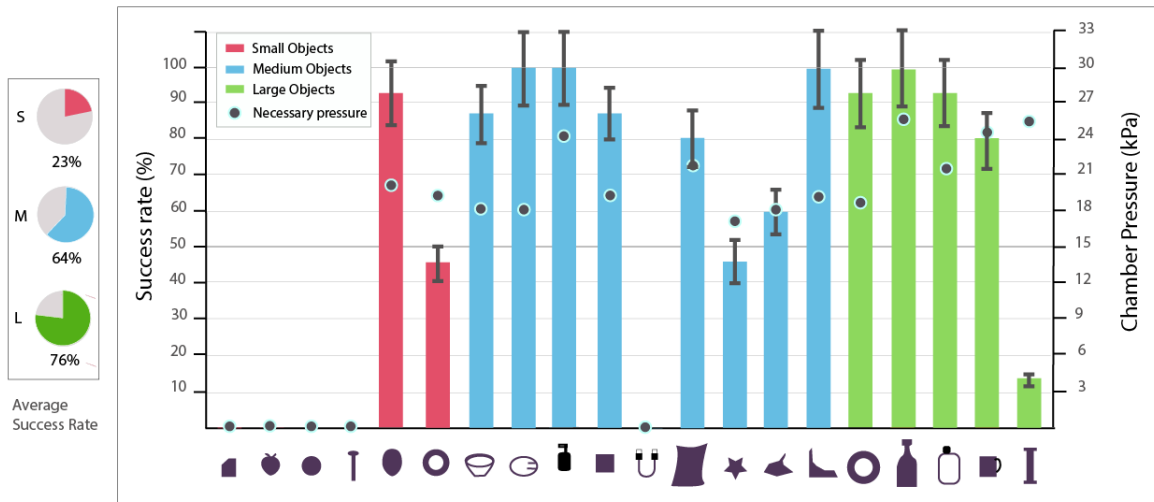


Figura 7.10: Gráfica - tasa de éxito de cada objeto con la configuración: a. Mixto PR-6 con tres dedos pequeños. b. Mixto PR-6 con tres dedos largos

Ánálisis de resultados

Objetos Pequeños:

La configuración **Estrecho - PI8 con dos dedos medianos** ha dado mejores resultados para el agarre de los objetos pequeños con un 81 % en promedio de la tasa de éxito (figura 7.6b). Esto se debe a las laminillas que posee en su extremo proporcionando mejor apoyo y agarre de los objetos. Seguido de su configuración similar **Ancho - PI8 con dos dedos medianos** con un 78 % (figura 7.7a) de promedio y **Estrecho - PI8 con dos dedos pequeños** con 75 % (figura 7.6a).

La configuración **Vertical PR-6 con 2 dedos largos** es la que no logró un agarre prometedor en cuanto a objetos pequeños (figura 7.9b). Esto se debe al largo de los dedos y el área que cubren al bordear el objeto.

Objetos Medianos:

La configuración **Mixto PR-6 con tres dedos pequeños** ha sido la de mejor rendimiento en el agarre de objetos medianos con un promedio de la tasa de éxito de 75 % (figura 7.10a). El largo de sus dedos, posición y la distribución en la pinza robótica dio lugar a enrollar mejor a los objetos, con excepción del cable USB, por su forma y posición recaída en la superficie no logró alcanzarlo ni manipularlo. Otra configuración que también logró manipular exitosamente estos objetos con un 73 % fue **Horizontal PR-6 con 2 dedos largos** (figura 7.8b).

Por otro lado, la configuración **Ancha PI-8 con dos dedos medianos** fue la que menos rendimiento proporcionó, con un 22 % en promedio (figura 7.7a).

Objetos Grandes:

La configuración **Mixta PR-6 con 3 dedos largos** tuvo un rendimiento de 76 % para el agarre de objetos de gran tamaño y peso. La barra metálica es la que menos logró sujetar debido al diámetro delgado que posee (figura 7.10b). Por el contrario, la configuración **Ancha PI-8 con dedos medianos** sólo logró sujetar un objeto

grande (cinta masking) con una tasa de éxito menor al 50% y en promedio un 9% (figura 7.7a).

Las configuraciones que tienen los dedos en posicionamiento vertical, donde mayormente la yema tiene contacto con el objeto no son capaces de agarrar ni levantar objetos de gran tamaño y peso, dando como resultado un promedio de la tasa de éxito menor al 20%. A diferencia de las configuraciones que utilizan la base PR-6.

La siguiente gráfica resume la tasa de éxito de cada configuración para los 20 objetos. Éstas se distinguen por su tamaño y el color rojo, celeste y verde representa a los objetos pequeños, medianos y grandes.



Figura 7.11: Gráfica global de las configuraciones con cada objeto. El tamaño de los círculos representa la tasa de éxito

Finalmente, se muestra una imagen del agarre de algunos objetos con las diversas configuraciones reconstruibles.

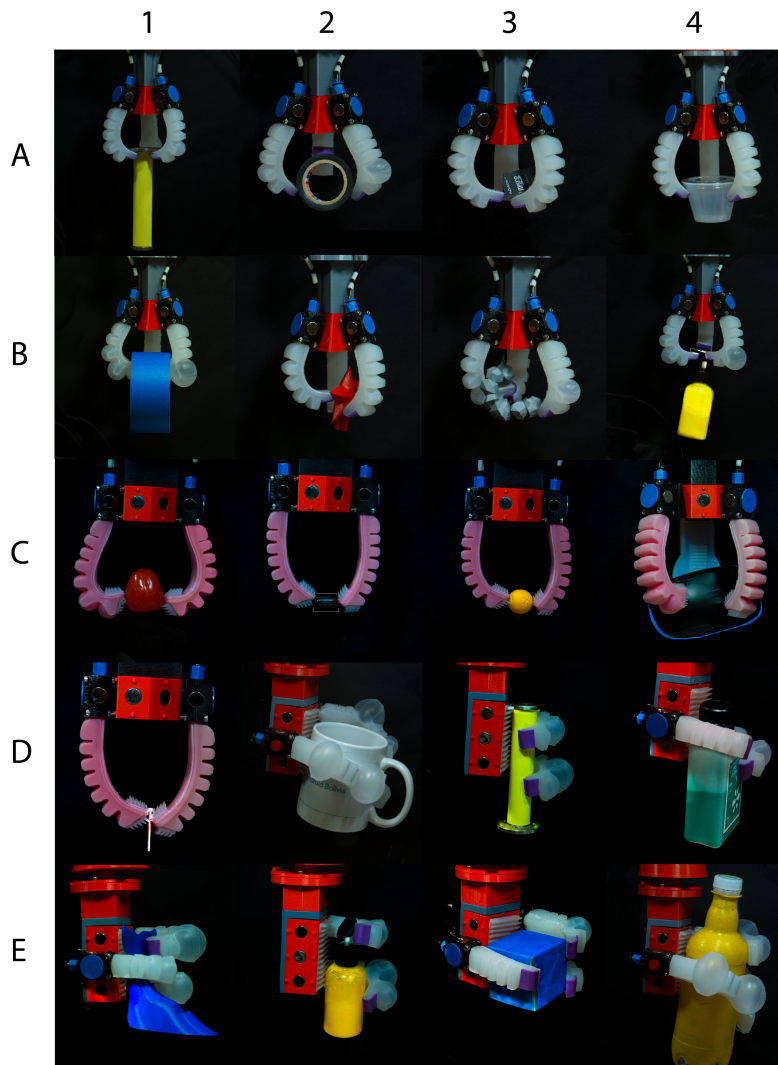


Figura 7.12: Configuraciones de la pinza manipulando: A1 una barra metálica, A2 una cinta aislante, A3 y C2 una tarjeta SD, A4 un envase de plástico, B1 una cinta masking, B2 una estrella de plástico, B3 un objeto irregular 1, B4 y E2 una botella de bomba de espuma, C1 un tomate cherry, C3 una esfera de poliestireno, C4 un mouse, D1 un perno, D2 una taza, D3 una barra metálica, D4 un envase rectangular, E1 objeto irregular 2, E3 un cubo y E4 una botella

8

Conclusiones

Con los resultados expuestos se concluye que la pinza robótica diseñada, caracterizada y fabricada logra tener la capacidad de reconfigurarse manualmente gracias a su sistema modular y mecanismos de conexión de fuerza magnética. Para ello, esta pinza tiene tres tipos de base que conforma la palma: una base triangular, base prismática irregular y base prismática regular. Asimismo, contiene 10 dedos blandos: un dedo híbrido pasivo, tres dedos blandos de longitud pequeña, tres medianos y tres largos. Con éstos es posible la combinación de diversas configuraciones de pinza robótica, pero considerando la efectividad de agarre esta investigación evalúa 14 configuraciones distintas para la manipulación de objetos irregulares permitiendo generar agarres superiores (de pellizco) y laterales (de envolvimiento), es decir, donde los dedos se encuentran en una posición vertical y horizontal respectivamente.

Los objetos de prueba fueron seleccionados por su variedad de forma, textura y tamaño que se presentan en una manipulación cotidiana. Estos se clasificaron por su tamaño, teniendo así un grupo de objetos pequeños, medianos y grandes, denominados de primera, segunda y tercera categoría. Cabe mencionar que el peso de los objetos de prueba es proporcional a su tamaño, es decir, ligeros (3g-85g), peso medio (4g-130g) y pesados (170g-400g) respectivamente.

De igual forma, el desempeño de los manipuladores resultantes en base a una serie de experimentaciones ayudó a obtener las conclusiones tales como las configuraciones

con agarre superior lograron sujetar objetos de primera y segunda categoría con el uso de dedos blandos pequeños y medianos. Esto se debe a su diseño, donde el primer dedo blando posee una estructura f-FEA clásica, con cavidades internas regulares y deformación uniforme. Mientras que el segundo, además de un largo mayor al anterior, tiene consigo dos pequeñas planchas de laminillas en la punta de éste dotándole de una mejor sujeción para objetos pequeños y con detalles. Por otro lado, los objetos grandes y pesados fueron exitosamente sujetados por configuraciones de agarre lateral, donde además de la actuación de los dedos pequeños y largos, la base de la palma ayudó a la adhesión del objeto evitando deslizamientos por medio de una plancha de laminillas que posee en su superficie. Cabe mencionar que la particularidad del diseño de los dedos largos es la deformación no uniforme que está controlada por el inflado de ciertas cavidades internas, de este modo puede rodear al objeto con una mayor área de contacto. Respecto al uso del dedo híbrido pasivo, por su diseño rígido y recubierto por una capa de material blando, logró ayudar al agarre de ciertos objetos medianos con el agarre superior, pero no llega a ser lo suficientemente resistente en agarres laterales.

También se analizó la calidad y características de los materiales a utilizarse. El material Ecoflex 00-50 tiene un mayor estiramiento (980 %) no llega a ser tan firme como el Elite Double 8, pero ésta a su vez tiene la desventaja de tener un estiramiento menor (380 %). Es decir, el primero permite introducir mayor presión a los dedos y así generar una deformación elevada, sin embargo, EliteD 8 es propenso a reventar al introducirse la misma cantidad máxima de aire comprimido.

8.0.1. Trabajos Futuros

En trabajos futuros se diseñarán nuevas morfologías y estructuras de dedos blandos para ampliar el agarre de objetos con un peso mayor a 400g y más voluminosos que los que se evaluaron en esta investigación, de igual forma, con el diseño y fabricación de dedos híbridos pasivos y activos. Adicionalmente, se enfocará también en el diseño matemático y simulación computacional del desempeño de los dedos blan-

dos para ampliar su potencialidad. Por otro lado, se incrustarán sensores blandos en los dedos para proporcionar un control asistido y así evitar el deslizamiento de los objetos provocados por fuerzas externas.

Bibliografía

- [1] C. Heyer, «Human-robot interaction and future industrial robotics applications», *IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems*, 2010.
- [2] P. Polygerinos, Z. Wang, K. Galloway, R. Wood y C. Walsh, «Soft robotic glove for combined assistance and at-home rehabilitation», *Robotics and Autonomous Systems*, vol. 73, págs. 135-143, 2015.
- [3] P. Polygerinos, N. Correl, S. Morin, B. Mosadegh, K. P. C. Onal y R. Shepherd, «Soft Robotics: Review of Fluid-Driven Intrinsically Soft Devices; Manufacturing, Sensing, Control, and Applications in Human-Robot Interaction», *Advanced Engineering Materials*, vol. 19, 2017.
- [4] R. Walker, A. Willingham y C. Zuker, «A Drosophila Mechanosensory Transduction Channel», *Science*, 2000.
- [5] L. Beccai, C. Lucarotti, M. Totaro y M. Taghavi, «Soft robotics Mechanosensing. Soft Robotics: Trends, Applications and Challenges,» *Springer*, 2017.
- [6] B. Matthias, S. Oberer-Treitz, H. Schuller, S. Erich y S. Peldschus, «Injury Risk Quantification for Industrial Robots in Collaborative Operation with Humans», *International Federation of Robotics: Joint International Conference of ISR/Robotik2010*, 2010.
- [7] C. Laschi y M. Cianchetti, «Soft robotics: new perspectives for robot bodyware and control», *Frontiers in Bioengineering and Biotechnology*, 2014.
- [8] *Robosoft*, <http://www.robosoftca.eu/index.php>, Accessed: 2018-10-10, 2018.

- [9] I. Hamley, «Introduction to Soft Matter: Polymer, Colloids, Amphiphilic and Liquid Crystals», *Wiley*, 2000.
- [10] N. Kastor, V. Vikas, E. Cohen y R. White, «A Definition of Soft Materials for Use in the Design of Robots», *SoRo*, 2017.
- [11] L. Wang, S. Nurzaman y F. Iida, «Soft-Material Robotics», *Foundations and Trends in Robotics*, 2017.
- [12] L. Wang y F. Iida, «Deformation in Soft-matter Robotics- A categorization and Quantitative Characterization», *IEEE Robotics & Automation*, 2015.
- [13] C. Majiji, «Soft Robotics: A perspective - Current Trends and Prospects for the Future», *SoRo*, 2013.
- [14] D. Rus y M. Tolley, «Design, fabrication and control of soft robots», *Nature*, vol. 521, págs. 467-475, 2015.
- [15] D. Trivedi, C. Rahn, W. Kier e I. Walker, «Soft robotics: Biological inspiration, state of the art, and future research», *Applied Bionics and Biomechanics*, 2008.
- [16] R. Pfeifer, F. Iida y M. Lungarella, «Cognition from the bottom up: on biological inspiration, body morphology and soft materials», *Trends in Cognitive Sciences*, 2014.
- [17] R. Pfeifer, M. Lungarella y F. Iida, «The Challenges Ahead for Bio-Inspired Soft Robotics», *Communications of the ACM*, 2012.
- [18] M. Kovac, «The Bioinspiration Design Paradigm: A Perspective for Soft Robotics», *SoRo*, 2013.
- [19] W. Crooks, G. Vukasin, M. O'Sullivan, W. Messner y C. Rogers, «Fin Ray® Effect Inspired Soft Robotic Gripper: From the RoboSoft Grand Challenge toward Optimization», *Frontiers in Robotics and AI*, 2016.
- [20] S. Kim, M. Spenko, S. Trujillo, B. Heyneman, V. Mattoli y M. Cutkosky, «Whole body adhesion: hierarchical, directional and distributed control of adhesive forces for a climbing robot», *IEEE International Conference on Robotics and Automation*, 2007.

- [21] A. Ijspeert, A. Crespi, D. Ryczko y J.-M. Cabelguen, «From swimming to walking with a salamander Robot Driven by a spinal cord Model», *Science*, 2007.
- [22] M. Kovac, M. Schlegel, J.-C. Zufferey y D. Floreano, «Steerable miniature jumping robot», *Autonomous Robots*, 2009.
- [23] A. Jusufi, D. Goldman, S. Revzen y R.-J. Full, «Active tails enhance arboreal acrobatics in geckos», *PNAS*, vol. 105, págs. 4215-4219, 2008.
- [24] H.-T. Lin, G. Leisk y B. Trimmer, «GoQBot: a caterpillar inspired soft-bodied rolling robot», *Bioinspiration & Biomimetics*, 2011.
- [25] M. Raibert, K. Blankenspoor, G. Nelson y R. Playter, «BigDog, the rough-terrain quadruped robot», *In Proc. of 17th World Congress of the Int. Fed. of Automatic Control*, 2008.
- [26] H. Lin y B. Trimmer, «Soft Robots in space: a perspective for soft robots», *Acta Futura*, 2013.
- [27] S. Seok, C. Onal, K.-J. Cho, R. Wood, D. Rus y S. Kim, «Meshworm: a peristaltic soft robot with antagonistic nickel titanium coil actuators», *IEEE/ASME Transaction on Mechatronics*, vol. 18, 2013.
- [28] C. Onal y D. Rus, «Autonomous undulatory serpentine locomotion utilizing body dynamics of a fluidic soft robot», *Bioinspiration and Biomimetics*, 2013.
- [29] K. Suzumori, S. Endo, T. Kanda, N. Kato y H. Suzuki, «A bending pneumatic rubber actuator realizing soft-bodied manta swimming robot», *IEEE International Conference on Robotics and Automation*, 2007.
- [30] A. Marchese, C. Onal y D. Rus, «Autonomous soft robotic fish capable of escape maneuvers using fluidic elastomer actuators», *SoRo*, 2014.
- [31] A. Vergara, Y. Lau, R. Mendoza y J.-C. Zagal, «Soft Modular robotic cubes: Toward replicating Morphogenetic Movements of the Embryo», *PLOS One*, 2017.
- [32] C. Laschi, B. Mazzolai y M. Cianchetti, «Soft robotics: Technologies and systems pushing the boundaries of robot abilities», *Science Robotics*, 2016.

- [33] R. Shepherd, A. Stokes, J. Freake, J. Barber, P. Snyder, A. Mazzeo, L. Cade-martiri, S. Morin y G. Whitesides, «Using explosions to power a soft robot.», *Angewandte*, 2013.
- [34] N. Bartlett, M. Tolley, J. Overvelde, J. Weaver, B. Mosadegh, K. Bertoldi, G. Whitesides y R. Wood, «A 3D-printed, functionally graded soft robot powered by combustion», *Science*, 2015.
- [35] A. Boxerbaum, K. Shaw, H. Chiel y R. Quinn, «Continuous wave peristaltic motion in a robot», *The International Journal of Robotics Research*, 2012.
- [36] R. Shepherd, F. Ilievski, W. Choi, S. Morin, A. Stokes, A. Mazzeo, X. Chen, M. Wang y G. Whitesides, «Multigait soft robot», *PNAS*, 2011.
- [37] K. Jayaram y R. Full, «Cockroaches traverse crevices, crawl rapidly in confined spaces, and inspire a soft, legged robot», *PNAS*, 2016.
- [38] M. Tolley, R. Shepherd, B. Mosadegh, K. Galloway, M. Wehner, M. Karpelon, R. Wood y G. Whitesides, «A resilient, untethered soft robot», *SoRo*, 2014.
- [39] C. Laschi, M. Cianchetti, B. Mazzolai, L. Margheri, M. Follador y P. Dario, «Soft robot arm inspired by the octopus», *Advanced Robotics*, 2012.
- [40] M. Calisti, M. Giorelli, G. Levy, B. Mazzolai, B. Hochner, C. Laschi y P. Dario, «An octopusbioinspired solution to movement and manipulation for soft robots», *Bioinspired Biomimetics*, 2011.
- [41] M. Calisti, F. Corucci, A. Arienti y C. Laschi, «Dynamics of underwater legged locomotion: Modeling and experiments on an octopus-inspired robot», *Bioinspiration and Biomimetics*, 2015.
- [42] F. Giorgio-Serchi, A. Arienti y C. Laschi, «Biomimetic vortex propulsion: Toward the new paradigm of soft unmanned underwater vehicles», *IEEE/ASME*, 2013.
- [43] C. Larson, B. Peele, S. Li, S. Robinson, M. Totaro, L. Beccai, B. Mazzolai y R. Shepherd, «Highly stretchable electroluminescent skin for optical signaling and tactile sensing», *Science*, 2016.

- [44] S. Kim, M. Spenko, S. Trujillo, B. Heyneman, D. Santos y M. Cutkosky, «Smooth vertical surface climbing with directional adhesion», *IEEE*, 2008.
- [45] A. Sadeghi, A. Tonazzini y L. P. and B. Mazzolai, «A novel growing device inspired by plant root soil penetration behaviors», *PLOS One*, 2014.
- [46] T. Ranzani, G. Gerboni, M. Cianchetti y A. Menciassi, «A bioinspired soft manipulator for minimally invasive surgery», *Bioinspiration and Biomimetics*, 2015.
- [47] R. Deimel y O. Brock, «A novel type of compliant and underactuated robotic hand for dexterous grasping», *The International Journal of Robotics Research*, 2016.
- [48] J. Amend, E. Brown, N. R. Odenberg, H. Jeager y H. Lipson, «A positive pressure universal gripper based on the jamming of granular material», *IEEE*, 2012.
- [49] S. Felton, M. Tolley, E. Demaine, D. Rus y R. Wood, «A method for building self-folding machines», *Science*, 2014.
- [50] R. Kim, D. Lee, J. Koh y K. Cho, «Fast, compact and lightweight shape-shifting system composed of distributed self-folding origami modules», *Proceedings of the IEEE International Conference on Robotics and Automation*, 2016.
- [51] L. Wang y F. Iida, «Towards "soft" self-reconfigurable robots», *IEEE RA-S/EMBS International Conference on Biomedical Robotics and Biomechanics*, 2012.
- [52] S. Terry, G. Mathijssen, J. Brancart, D. Lefeber, G. Assche y B. Vanderborght, «Development of a self-healing soft pneumatic actuator: A first concept», *Bioinspiration and Biomimetics*, 2015.
- [53] R. Shepherd, A. Stokes, R. Nunes y G. Whitesides, «Soft Machines that are resistant to puncture and that self seal», *Advanced Materials*, 2013.
- [54] M. Doi, «Soft Matter Physics», *Oxford University Press*, 2013.

- [55] R. S., R. Wood y C. Majidi, «Untethered Soft Robotics», *Nature Electronics*, 2018.
- [56] F. Ilievski, A. Mazzeo, R. Shepherd, X. Chen y G. Whitesides, «Soft robotics afor chemists», *Angewandte Chemie*, 2011.
- [57] K. Jang, H. Chung, S. Xu, C. Lee, H. Luan, J. Jeong, H. Cheng, G. K. ahd S. Han, Y. Huang y J. Rogers, «Soft network composite materials with deterministic and bio-inspired designs», *Nature Communications*, 2015.
- [58] T. Patino, R. Mestre y S. Sánchez, «Miniaturized soft bio-hybrid robotics: a step forward into healthcare applications», *Lab Chip*, 2016.
- [59] A. Marchese, R. Katzschmann y D. Rus, «A Recipe for Soft Fluidic Elastomer Robots», *Soft Robotics*, 2015.
- [60] S. Kim, E. Hawkes, K. Cho, M. Joldaz, J. Foleys y R. Wood, «Micro artificial muscle fiber using niti spring for soft robotics», *IEEE / RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems*, 2009.
- [61] M. Cianchetti, A. Licofonte, M. Follador, F. Rogai y C. Laschi, «Bioinspired soft actuation system using shape memory alloys», *Actuators*, 2014.
- [62] M. Calisti, A. Arienti, M. Giannaccini, M. Follador, M. Giorelli, M. Cianchetti, B. Mazzolai, C. Laschi y P. Dario, «Study and fabrication of bioinspired octopus arm mockups tested on a multipurpose plataform», *IEEE RAS and EMBS International Conference on Biomedical Robotics and Biomechatronics*, 2010.
- [63] P. Alvarado y K. Youcef-Toumi, «Design of machines with compliant bodies for biomimetic locomotion in liquid environments», *Dynamic Systems, Measurement, and Control*, 2006.
- [64] C. Chou y B. Hannaford, «Measurement and modeling of mckibben pneumatic artificial muscles», *IEEE Trans Robotics Automation*, 1996.
- [65] B. Tondu y P. Lopez, «Modeling and control of mckibben artificial muscle robot actuators», *IEEE Control Syst*, 2000.

- [66] D. Caldwell, N. Tsagarakis y G. Medrano-Cerda, «Biomimetic actuators: polymeric pseudo muscular actuators and pneumatic muscle actuators for biological emulation», *Mechatronics*, 2000.
- [67] R. Kang, D. Branson, T. Zheng, E. Guglielmino y D. Caldwell, «Design, modeling and control of a pneumatically actuated manipulator inspired by biological continuum structures», *Bioinspiration and Biomimetics*, 2013.
- [68] K. Galloway, P. Polygerinos, C. Walsh y R. Wood, «Mechanically programmable bend radius for fiberreinforced soft actuators», *IEEE*, 2013.
- [69] J. Bishop, G. Krishnan, C. Kim y S. Kota, «Design of soft robotic actuators using fluid-filled fiber-reinforced elastomeric enclosures in parallel combinations», *IEEE*, 2012.
- [70] B. Mosadegh, P. Polygerinos, C. Keplinger, S. Wennstedt, R. Shepherd, U. Gupta, J. Shim, K. Bertoldi, C. Walsh y G. Whitesides, «Pneumatic Networks for Soft Robotics that Actuate Rapidly», *Advanced Functional Materials*, 2013.
- [71] G. Cheng, «Humanoid Robotics and neuroscience», *CRC Press*, 2015.
- [72] L. Chao y Z. Wenzeng, «Development of a Novel Linear-Parallel robot Hand», *International Conference on Intelligent Robotics and Applications*, 2018.
- [73] T. Laliberté, L. Birglen y C. Grosselin, «Underactuation in robotic grasping hands», *Machine Intelligence and Robotic Control*, 2002.
- [74] C. Quinayás, «Diseño y construcción de una prótesis robótica de mano UC-1», *Ing. Univ*, 2010.
- [75] P. Scott, «The omnigripper a form of robot universal gripper», *Robotica*, 1985.
- [76] F. Hong y Z. Wenzeng, «A Novel Self-adaptive Robot Hand with Pin-array Structure Driven by Negative Pressure», *Intelligent Robotics and Applications, 11th International Conference, ICIRA*, 2018.
- [77] T. Yoshimi, N. Iwata, M. Mizukawa e Y. Ando, «Picking up operation of thin objects by robot arm with two fingered parallel soft gripper», *IEEE International Workshop n Advanced Robotics and its Social Impacts*, 2012.

- [78] M. Manti, T. Hassan, G. Passetti, N. d'Élia, M. Cianchetti y C. Laschi, «An underactuated and adaptable soft robotic gripper», *Biomimetic and Biohybrid Systems*, Springer, 2015.
- [79] J. Zhang, A. Jackson, N. Mentzer y R. Kramer, «A Modular, Reconfigurable Mold for a Soft Robotic Gripper Design Activity», *Frontiers in Robotics and AI*, 2017.
- [80] K. Galloway, K. Becker, B. Phillips, J. Kirby, S. Licht, D. Tchernov, R. Wood y D. Gruber, «Soft Robotic Grippers for biological sampling on Deep Reefs», *Soft Robotics*, 2016.
- [81] R. Deimel y O. Brock, «A Compliant Hand Based on a Novel Pneumatic Actuator», *IEEE International Conference on Robotics and Automation (ICRA)*, 2013.
- [82] Z. Wang, M. Zhu, S. Kawamura y S. Hirai, «Comparison of Different soft grippers for Lunch Box packaging», *Robotics and Biomimetics*, 2017.
- [83] Z. Wang, D. Chathuranga y S. Hirai, «3D Printed Soft Gripper for Automatic Lunch Box Packing», *IEEE International Conference on Robotics and Biomimetics*, 2016.
- [84] B. Shih, D. Drotman, C. Christianson, Z. Huo, R. White, H. Christensen y M. Tolley, «Custom Soft Robotic Gripper Sensor Skins for Haptic Object Visualization», *IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS)*, 2017.
- [85] S. Song, C. Majidi y M. Sitti, «GeckoGripper: A Soft, Inflatable robotic Gripper using Gecko-inspired Elastomer Micro-Fiber Adhesives», *IEEE RSJ International conference on Intelligent Robots and Systems*, 2014.
- [86] E. Hawkes, D. Christensen, A. Kyungwon, H. Jiang y M. Cutkosky, «Grasping Without Squeezing: Shear Adhesion Gripper with fibrillar Thin Film», *IEEE International Conference on Robotics and Automation (ICRA)*, 2015.

- [87] P. Glick, S. Suresh, D. Ruffatto, M. Cutkosky, M. Tolley y A. Parness, «A Soft Robotic Gripper with Gecko-Inspired Adhesive», *IEEE Robotics and Automation Letters*, 2018.
- [88] G. Miron, B. Bedard y J.-S. Plante, «Sleeved Bending actuators for soft grippers: A durable solution for High Force-to-Weight Applications», *Actuators*, 2018.
- [89] Y. Yang, Y. Chen, Y. Li, Z. Chen e Y. Wei, «Bioinspired Robotic Fingers Based on Pneumatic Actuator and 3D Printing of Smart Material», *Soft Robotics*, 2017.
- [90] Y. Wei, T. R. adn Q. Chen, C. Yan, Y. Yang e Y. Li, «A novel, variable Stiffness Robotic Gripper Based on Integrated Soft Actuating and Particle Jamming», *Soft Robotics*, 2016.
- [91] H. Yap, H. Ng y C. Yeow, «High-Force Soft Printable Pneumatics for Soft Robotic Applications», *Soft Robotics*, 2016.
- [92] A. A. Stokes, R. F. Shepherd, S. A. Morin, F. Ilievski y G. M. Whitesides, «A Hybrid Combining Hard and Soft Robots», 2013.
- [93] H. Yap, J. Lim, F. Nasrallah y J. G. C. Yeow, «Characterization and evaluation of soft elastomeric actuators for Hand Assistive and Rehabilitation Applications», *Medical Engineering and Technology*, 2016.
- [94] H. Chiel, P. Crago, J. Mansour y K. Hathi, «Biomechanics of a muscular hydrostat; a model of lapping by a reptilian tongue», *Biol Cybernet*, vol. 67, 1992.
- [95] B. Trimmer, A. Takesian, B. Sweet, C. Rogers, D. Hake y D. Rogers, «Caterpillar locomotion: a new model for soft-bodied climbing and burrowing robots», *In 7th International Symposium on Technology and the Mine Problem.*, 2006.
- [96] J. van Leeuwen y W. Kier, «Functional design of tentacles in squid: linking sarcomere ultrastructure to gross morphological dynamics», *Philos Trans R Soc Lond B Biol Sci.*, 1997.

- [97] J. Wilson, D. Li, Z. Chen y R. George, «Flexible robot manipulators and grippers: relatives of elephant trunks and squid tentacles», *Robots and biological systems*, 1993.
- [98] L. Webster y B. Jones, «Design and Kinematics modeling of constant curvature continuum robots: A Review», *The International Journal of Robotics Research*, 2010.
- [99] E. Tatlicioglu, I. Walker y D. Dawson, «New dynamic models for planar extensible continuum robot manipulators», *IEEE International Conference on Intelligent Robots and Systems*,
- [100] D. Trivedi y C. Rahn, «Geometrically exact dynamic models for soft robotic manipulators», *IEEE International Conference on Intelligent*, 2007.
- [101] F. Boyer, M. Porez y W. Khalil, «Macro-continuous computed torque algorithm for a three-dimensional Ee1-like robot», *IEEE Transaction on Robotics*, 2006.
- [102] F. Renda, M. Giorelli, M. Calisti, M. Cianchetti y C. Laschi, «Dynamic model of a multibending soft robot arm driven by cables», *IEEE Transactions on Robotics*, 2014.
- [103] M. Zupan, M. Ashby y N. Fleck, «Actuator Classification and Selection - The development of a Database», *Advanced Materials*, 2002.
- [104] G. Whitesides, «Soft Robotics - Viewpoint», *Angewandte Chemie*, 2018.
- [105] C. Cvetkovica, R. Ramanb, V. Chana, B. Williams, M. Tolishe, P. Bajaja, M. Sakard, H. Asadad, M. Saifb y R. Bashira, «Three-dimensionally printed biological machines powered by skeletal muscle», *PNAS*, 2014.
- [106] R. Martinez, A. Glavan, C. Keplinger, A. Oyetibo y G. Whitesides, «Soft Actuators and Robots that are Resistant to Mechanical Damage», *Advanced Funtional Materials*, 2014.
- [107] G. Bao, H. Fang, L. Chen, Y. Wan, F. Xu, Q. Yang y L. Zhang, «Soft Robotics: Academia Insights and Perspectives Through Bibliometric Analysis», *SoRo*, vol. 5, 2018.

- [108] M. Cutkosky, «On Grasp Choice, Grasp Models, and the Design of Hands for Manufacturing Tasks», *IEEE Transaction on Robotics and Automation*, vol. 5, 1989.
- [109] F. Gonzalez, F. Gosselin y W. Bachtá, «Analysis of Hand Contact Areas and Interaction Capabilities During Manipulation and Exploration», *IEEE Transactions on Haptics*, 2014.