

---

---

# Diseño de una mano robótica subactuada con sensor de tacto flexible

---

---

GRADO EN INGENIERÍA EN TECNOLOGÍAS INDUSTRIALES

TRABAJO FIN DE GRADO

**Autor:**

Trinidad Sánchez Montoya

**Tutor:**

Jesús Manuel Gómez de Gabriel

**Cotutor:**

Juan Manuel Gandarias Palacios



UNIVERSIDAD DE MÁLAGA

Departamento de Ingeniería de Sistemas y Automática  
ESCUELA DE INGENIERÍAS INDUSTRIALES

JUNIO 2019



## **DECLARACIÓN DE ORIGINALIDAD**

**Y**o, Trinidad Sánchez Montoya, con DNI 77167453-S y dirección de correo electrónico trinisanmon@uma.es, estudiante del Grado en Ingeniería en Tecnologías Industriales en la Escuela de Ingenierías Industriales de la Universidad de Málaga, en relación con este Trabajo de Fin de Grado, titulado: "Diseño de una mano robótica subactuada con sensor de tacto flexible", declaro bajo mi responsabilidad ser autora del texto entregado y que no ha sido presentado con anterioridad, ni total ni parcialmente, para superar materias previamente cursadas en esta u otras titulaciones de la Universidad de Málaga o cualquier otra institución de educación superior u otro tipo de fin. Así mismo, declaro no haber trasgredido ninguna norma universitaria con respecto al plagio ni a las leyes establecidas que protegen la propiedad intelectual, así como que las fuentes utilizadas han sido citadas adecuadamente.

EN MÁLAGA, A 10 DE JUNIO DE 2019



FIRMADO: TRINIDAD SÁNCHEZ MONTOYA



## **RESUMEN**

**E**n este trabajo se realiza el diseño y prototipado de una pinza robótica subactuada que combina materiales rígidos y flexibles para conseguir una interacción física segura con personas. Se presenta el desarrollo de una pinza con dedos rígidos y uno híbrido rígido-flexible de dos grados de libertad, incorporando en este último un sensor táctil de alta resolución que permita disponer de la información relativa a las distribuciones de presión durante el agarre. Se incluyen también sensores propioceptivos a la pinza que registran la posición de sus componentes. Esto permitirá al robot equipado con la pinza disponer de percepción háptica, entendiendo háptico como la suma de las sensaciones táctiles proporcionadas por el sensor táctil y kinestésicas, proporcionadas por los sensores propioceptivos. Además, se presentan y comparan los resultados del comportamiento de distintas superficies flexibles para el dedo híbrido en relación a su flexibilidad y la distribución de presiones cuando la pinza agarra el antebrazo de una persona. Se observa cómo las variaciones en la pieza flexible condicionarán las lecturas de presión realizadas y el tipo de agarre.



## ÍNDICE GENERAL

	Página
<b>Índice de Figuras</b>	<b>vii</b>
<b>Índice de Tablas</b>	<b>xiii</b>
<b>1 Introducción</b>	<b>1</b>
1.1 Visión General . . . . .	1
1.1.1 Marco del Proyecto . . . . .	1
1.1.2 Motivación y Justificación . . . . .	1
1.1.3 Antecedentes . . . . .	3
1.1.4 Objetivos . . . . .	5
1.2 Estructura de la Memoria . . . . .	8
<b>2 Modelado e Implementación</b>	<b>9</b>
2.1 Modelo simplificado del sistema mecánico . . . . .	9
2.1.1 Pinza rígida . . . . .	9
2.1.2 Pinza híbrida . . . . .	11
2.2 Modelado 3D . . . . .	13
2.2.1 Versión 1: Modelo basado en dedo rígido individual . . . . .	13
2.2.2 Versión 2: Modelo mejorado para incorporar pieza flexible y adaptarse a la base de la pinza . . . . .	16
2.2.3 Versión 3: Mejora en la resistencia de los eslabones . . . . .	17
2.2.4 Versión 4: Cambios en el sistema de sujetaciones de la pieza flexible . . . . .	18
2.2.5 Versión Final: Modelo que se procede a prototipar y estudiar . . . . .	20
<b>3 Percepción Háptica</b>	<b>29</b>
3.1 Percepción háptica aplicada a la pinza robótica . . . . .	29
3.1.1 Sensor táctil . . . . .	30
3.1.2 Ángulo del actuador . . . . .	30
3.1.3 Potenciómetro para posición relativa entre eslabones rígidos . . . . .	31
<b>4 Experimentos y Resultados</b>	<b>33</b>

## ÍNDICE GENERAL

---

4.1	Primer experimento: Esfuerzo a flexión . . . . .	33
4.1.1	Descripción del experimento . . . . .	33
4.1.2	Simulación del experimento . . . . .	34
4.1.3	Relación fuerza-desplazamiento . . . . .	36
4.2	Segundo experimento: Distribución de presiones . . . . .	38
4.2.1	Descripción del experimento . . . . .	39
4.2.2	Lecturas de presión . . . . .	39
4.3	Discusión de los resultados . . . . .	39
<b>5</b>	<b>Conclusiones</b>	<b>43</b>
<b>6</b>	<b>Futuros Trabajos</b>	<b>45</b>
	<b>Referencias</b>	<b>47</b>

## ÍNDICE DE FIGURAS

FIGURA	Página
1.1 Pinza adaptativa <i>Co-Gripper</i> agarrando un objeto y experimentando sobre su fuerza de agarre [Fuente: [1]] (a). Pinza subactuada de dos dedos [Fuente: [2]] (b) . . . . .	4
1.2 Pinza <i>MultiChoiceGripper</i> creada por <i>Festo</i> agarrando un objeto. [Fuente: [3]] . . . . .	5
1.3 Brazo robótico equipado con un sensor táctil para lecturas de presión [Fuente: [4]] (a). Pinza flexible con sensor táctil para la lectura de presiones al agarrar un objeto [Fuente: [5]] (b) . . . . .	6
1.4 Prototipo final de la pinza subactuada híbrida de tres dedos realizada en este Trabajo de Fin de Grado. La pinza incluye sensores hápticos proprioceptivos que permiten conocer la posición relativa de las articulaciones subactuadas de los dedos y un sensor táctil en el dedo flexible para obtener la distribución de la presión ejercida en el agarre. . . . .	6
2.1 Modelo simplificado del sistema mecánico de un dedo rígido de pinza robotizada. Se diferencian los eslabones que la componen y la forma esquematizada de estos. En azul se representa un resorte introducido en el modelo y el par motor representado por un flecha indica el sentido de giro del motor que activaría el cierre del dedo. . . . .	10
2.2 Modelo simplificado del sistema mecánico completo de la pinza rígida con dos dedos simétricos. Entre ellos se posicionaría el objeto a agarrar. . . . .	10
2.3 Primer modelo simplificado del sistema mecánico completo de la pinza híbrida con un dedo híbrido y otro rígido. La superficie roja es el material flexible. Entre ellos se posicionaría el objeto a agarrar. En este modelo se mantiene el ángulo fijo entre los extremos de $H_1$ y se incorpora un eslabón $H_5$ en la parte inferior. . . . .	11
2.4 Segundo Modelo simplificado del sistema mecánico completo de la pinza híbrida con un dedo híbrido y otro rígido. La superficie roja es el material flexible. Entre ellos se posicionaría el objeto a agarrar. En este modelo se mantiene el ángulo fijo entre los extremos de $H_1$ . . . . .	12
2.5 Tercer Modelo simplificado del sistema mecánico completo de la pinza híbrida con un dedo híbrido y otro rígido. La superficie roja es el material flexible. Entre ellos se posicionaría el objeto a agarrar. En este modelo se libera el ángulo entre los eslabones $H_1$ y $H_5$ . . . . .	13

## ÍNDICE DE FIGURAS

---

2.6 Cuarto Modelo simplificado del sistema mecánico completo de la pinza rígida con un dedo híbrido y otro rígido. Entre ellos se posicionaría el objeto a agarrar. En este modelo se elimina completamente el eslabón intermedio. Se muestra una simplificación de la respuesta elástica y amortiguadora de la pieza flexible frente a una fuerza ejercida sobre su superficie. . . . .	14
2.7 Primer modelo 3D del dedo híbrido siguiendo el primer modelo simplificado del sistema mecánico (a). Primer modelo 3D de la pieza flexible. Visible la zona de contacto con el objeto (b). Primer modelo 3D de la pieza flexible. Visible la zona posterior de la pieza y las sujetaciones (c). . . . .	14
2.8 Modelo de sensor de mapeo de presión <i>Tekscan</i> para el que se diseña la pieza flexible de la versión 1 de la pinza híbrida, las dimensiones de la matriz sensorizada son de 96,0mm de alto por 53,0 mm de ancho (a). Modelo de sensor de mapeo <i>Tekscan</i> que finalmente se decide utilizar para la sensorización de la pinza híbrida, las dimensiones de la matriz sensorizada son de 55,9mm de alto por 55,9mm de ancho (b). . . . .	15
2.9 Segundo modelo 3D del dedo híbrido siguiendo el primer modelo simplificado del sistema mecánico (a). Segundo modelo 3D de la pieza flexible. Visible la zona de contacto con el objeto (b). Segundo modelo 3D de la pieza flexible. Visible la zona posterior de la pieza y las sujetaciones (c). . . . .	16
2.10 Tercer modelo 3D de la pinza híbrida siguiendo el tercer modelo simplificado del sistema mecánico. Vista lateral-inferior. Para facilitar la visualización del dedo híbrido no se representan los dedos rígidos, pero se mantienen sus bases y el posicionamiento de sus motores para poder comprender la composición de la pinza en su conjunto (a). Tercer modelo 3D de la pinza híbrida siguiendo el tercer modelo simplificado del sistema mecánico. Vista superior-lateral (b). Tercer modelo 3D de la pieza flexible. Visible la zona de contacto con el objeto (c). Tercer modelo 3D de la pieza flexible. Visible la zona posterior de la pieza y las sujetaciones (d). . . . .	17
2.11 Cuarto modelo 3D de la pinza híbrida siguiendo el tercer modelo simplificado del sistema mecánico. Vista superior-lateral (a). Cuarto modelo 3D de la pinza híbrida siguiendo el tercer esquema de modelo simplificado del sistema mecánico. Vista lateral izquierda (b). Cuarto modelo 3D de la pinza híbrida siguiendo el tercer modelo simplificado del sistema mecánico. Vista lateral derecha (c). Cuarto modelo 3D de la pieza flexible con un espesor de 5mm. Visible la zona posterior de la pieza y las sujetaciones (d). . . . .	18

2.12 Impresión 3D de la pieza flexible en material FLEX siguiendo según la versión 4 de la pinza con 5mm de espesor, zona de contacto con el objeto (a). Impresión 3D de la pieza flexible en material FLEX siguiendo según la versión 4 de la pinza con 5mm de espesor, vista lateral (b). Impresión 3D de la pieza flexible en material FLEX siguiendo según la versión 4 de la pinza con 5mm de espesor, zona puesta a la de contacto con el objeto, mostrando detalle de modo de sujeción a dedo (c) . . . . .	19
2.13 Cuarto modelo de la pinza con la pieza flexible modificada a 1mm de espesor. Vista frontal-lateral derecho (a). Cuarto modelo de la pinza con la pieza flexible modificada a 1mm de espesor. Vista frontal-lateral izquierdo (b). Rediseño del cuarto modelo 3D de la pieza flexible con un espesor de 1mm. Visible la zona posterior de la pieza y las sujetaciones (c) . . . . .	19
2.14 Impresión 3D de la pieza flexible en material FLEX siguiendo según la versión 4 de la pinza con 1mm de espesor, zona de contacto con el objeto (a). Impresión 3D de la pieza flexible en material FLEX siguiendo según la versión 4 de la pinza con 1mm de espesor, vista lateral (b). Impresión 3D de la pieza flexible en material FLEX siguiendo según la versión 4 de la pinza con 1mm de espesor, zona puesta a la de contacto con el objeto, mostrando detalle de modo de sujeción a dedo (c) . . . . .	20
2.15 Montaje del cuarto modelo de la pinza con la pieza flexible modificada a 1mm de espesor. Vista frontal-lateral derecho. Se realiza el montaje de las piezas obtenidas mediante impresión 3D sobre una base de poliestireno expandido moldeado con las dimensiones del motor. . . . .	21
2.16 Detalle señalando con flechas amarillas las protuberancias observadas sobre la superficie de la pieza flexible al unirla al resto de eslabones del dedo híbrido. . . . .	21
2.17 Modelo de la pinza híbrida en el que se nombran sus componentes para ser definidas sus dimensiones. Dedo híbrido rígido-flexible a la izquierda, en rojo, y dedo completamente rígido a la derecha, en azul. Base de la pinza en verde. . . . .	23
2.18 Modelo final de la pinza con la pieza flexible de PTEG. Vista frontal-lateral izquierdo, siendo visible la colocación de los cubre-potenciómetros (a). Modelo final de la pinza con la pieza flexible de PTEG. Vista frontal-lateral derecho (b). Modelo de pieza flexible para su impresión en PTEG (c) . . . . .	24
2.19 Pieza flexible impresa en PTEG color negro. Vista frontal principal (a). Pieza flexible impresa en PTEG color negro. Vista de perfil en la que puede apreciarse el grosor de 1mm (b). Pieza flexible impresa en PTEG color negro. Vista trasera (c) . . . . .	24
2.20 Conjunto de piezas rígidas impresas en PLA, color negro, previo montaje. . . . .	25
2.21 Esquema de colocación de tornillos según la simbología especificada en la Tabla ??. No será necesario el uso de tuercas para la unión de la pinza con el eje móvil del servomotor, en la parte inferior de los eslabones $H_4$ ni para la unión de los cubre-potenciómetros, sí se utilizarán en el resto de casos. . . . .	26

---

## ÍNDICE DE FIGURAS

---

2.22	Modelo de pieza flexible tipo sándwich para su impresión en material FLEX. . . . .	27
2.23	Pieza flexible impresa en material FLEX blanco con una estructura que busca aumentar la rigidez de la pieza impresa con material FLEX sin perder su adaptabilidad y flexibilidad. Vista frontal. La vista trasera coincide con la frontal, pues su superficie exterior es igual en ambas caras (a). Pieza impresa en material FLEX blanco. Vista de perfil. Puede observarse la estructura diseñada entre las superficies exteriores de la pieza (b). . . . .	27
2.24	Montaje del prototipo final de la pinza con la pieza flexible de PTEG (a). Montaje del prototipo final de la pinza diseñada con la pieza flexible de material FLEX (b). . . . .	28
3.1	Fotografía del sensor táctil modelo 5051 de <i>Tekscan</i> . A la derecha se encuentra la matriz de sensel y, a la izquierda, la zona de conexión con el dispositivo de adquisición de datos. . . . .	30
3.2	Fotografía del servomotor <i>Dynamixel MX-64AR</i> . Se muestra el eje motorizado. . . . .	31
3.3	Fotografía del potenciómetro <i>muRata</i> modelo SV01 10kΩ lineal. . . . .	31
4.1	Diseño y explicación del experimento llevado a cabo para la caracterización de las piezas flexibles. Se muestran los extremos de la pieza que serán fijados y la dirección y el sentido de la fuerza ejercida. . . . .	34
4.2	Fotografía explicativa del experimento realizado para caracterizar la pieza flexible de PTEG. Se muestra el eje mediante el cual se ejerce una fuerza sobre la pieza, la pieza flexible de PTEG, la superficie sobre la que se fija la pieza, el papel milimetrado para medir los desplazamientos y los sargentos utilizados para fijar la pieza (a). Fotografía explicativa del experimento realizado para caracterizar la pieza flexible de material FLEX. Se muestra el eje mediante el cual se ejerce una fuerza sobre la pieza, la pieza flexible de material FLEX, la superficie sobre la que se fija la pieza, el papel milimetrado para medir los desplazamientos y los sargentos utilizados para fijar la pieza (b). . . . .	35
4.3	Simulación realizada en SolidWorks para la pieza flexible de material FLEX, aplicando una fuerza de 24N. Se muestran los desplazamientos producidos por la fuerza ejercida (flechas moradas). . . . .	36
4.4	Resultados de la simulación de la respuesta de la pieza flexible de material FLEX frente a esfuerzos de flexión, comparados con los resultados experimentales obtenidos. . . . .	37
4.5	Simulación realizada en SolidWorks para la pieza flexible de PTEG, aplicando una fuerza de 24N. Se muestran los desplazamientos producidos por la fuerza ejercida (flechas moradas). . . . .	37
4.6	Resultados de la simulación de la respuesta de la pieza flexible de PTEG frente a esfuerzos de flexión, comparados con los resultados experimentales obtenidos. . . . .	37

4.7 Representación de las curvas de comportamiento a flexión de la piezas flexibles de material FLEX y de PETG. . . . .	38
4.8 Esquema del sensor de mapeo de presión <i>Tekscan</i> ( <i>Fuente: [6]</i> ). . . . .	39
4.9 Fotografía de la pinza con un brazo posicionado en el lugar de agarre. . . . .	40
4.10 Lectura e histograma del sensor de presión para la pieza en material FLEX sin que la pinza se cierre, posicionando sobre ella un antebrazo (a). Lectura e histograma del sensor de presión para la pieza en material FLEX con la pinza cerrándose sobre un antebrazo (b). Lectura e histograma del sensor de presión para la pieza en material PETG sin que la pinza se cierre, posicionando sobre ella un antebrazo (c). Lectura e histograma del sensor de presión para la pieza en material PETG con la pinza cerrándose sobre un antebrazo (d). . . . .	40



## **ÍNDICE DE TABLAS**

<b>TABLA</b>	<b>Página</b>
2.1 Dimensiones que delimitan el diseño final de pinza realizado. . . . .	22
2.2 Descripción de la tornillería utilizada para el ensamblaje del dedo híbrido. . . . .	25



# 1

## INTRODUCCIÓN

### 1.1 Visión General

#### 1.1.1 Marco del Proyecto

El presente documento contiene la memoria del Trabajo de Fin de Grado (referido con las siglas TFE en el Reglamento de Proyecto/Trabajo de Fin de Grado de la Escuela de Ingenierías Industriales) titulado *Diseño de una mano robótica subactuada con sensor de tacto flexible*. Con este trabajo se pretenden obtener los créditos necesarios para superar la asignatura de Trabajo de Fin de Grado de cuarto curso del Grado de Ingeniería en Tecnologías Industriales de la Universidad de Málaga.

Este trabajo ha sido ofertado y dirigido por miembros del Departamento de Ingeniería de Sistemas y Automática de la Universidad de Málaga. Para la realización de este trabajo se ha proporcionado información relacionada con anteriores proyectos llevados a cabo en el departamento, cuya temática ha servido de base para el surgimiento y oferta de este TFE.

#### 1.1.2 Motivación y Justificación

En los últimos años ha aumentado el interés por la introducción de robots en tareas que implican la interacción con humanos, desde la contribución en actividades industriales [7] hasta el cuidado o asistencia de personas [8] o la creación de prótesis robotizadas [9]. La presencia de robots en numerosos ámbitos ha tenido repercusiones beneficiosas para la sociedad, no solamente facilitando tareas físicas sino también sociales [10]. La posibilidad de confiar diversas tareas a robots facilita el papel a desempeñar por las personas para llevar a cabo acciones que sin la asistencia de robots serían más difíciles de desarrollar o requerirían un mayor esfuerzo. De esta

## 1. INTRODUCCIÓN

---

forma es posible llegar a desarrollar nuevas ideas y a innovar en diversos ámbitos gracias a esta nueva "libertad" que adquieren las personas al colaborar con los robots y poder confiar en que llevarán a cabo las tareas asignadas.

El uso de robots en el ámbito de la medicina y la salud es hoy en día una realidad, con el uso de sistemas robotizados para la asistencia en la realización de cirugía, que ha supuesto importantes avances y mejoras en este campo [11]. No solo en el ámbito quirúrgico se ha podido observar este progreso en los últimos años, también es destacable el avance en el cuidado de personas mayores [12]. En este sentido se contempla cómo la introducción de robots puede ayudar no solo a la realización de tareas que requieren un esfuerzo físico, sino también puede tener beneficios sociales y psicológicos. Sin embargo actualmente la mayorías de necesidades relacionadas con el ámbito físico son suplidas por personas, siendo aún un terreno en vías de desarrollo en la robótica [13]. Dentro del ámbito del cuidado de la salud de las personas aún pueden encontrarse áreas en las que la introducción de robots no ha sido tan ampliamente explorada, como es el caso de la interacción directa de robots con personas para el movimiento y la manipulación de partes del cuerpo de estas. Por ello se presenta una oportunidad de estudio en este sentido. La aplicación en las que se basa la idea de esta pinza robotizada es la interacción física segura, de forma que se pueda permitir la manipulación de las extremidades de pacientes o personas con dificultades a la hora de realizar ciertas acciones o movimientos en beneficio de su salud. También se contempla la posibilidad de la interacción con heridos o víctimas de accidentes que se encuentren en situaciones en las que no es posible la intervención humana. En este último caso se puede asegurar que, a pesar de que la interacción física de robots con víctimas no es, aún, completamente segura en situaciones de catástrofe, se contempla como un enfoque más apropiado el diseñar la parte del robot que interactúa con la persona con materiales flexibles, garantizando así el mayor confort y la máxima seguridad de las personas.

Un campo destacable de estudio es la colaboración de robots en tareas de búsqueda y rescate de personas [14], donde la intervención de robots puede suponer una mejora en la eficiencia y seguridad de la tarea. Para llevar a cabo cualquier interacción física humano-robot (pHRI) es necesario, en primer lugar, garantizar la seguridad de las personas [15]. El desarrollo de sistemas de agarre adaptativos y de rigidez variable, tales como los presentados en [16, 17] resultan esenciales para pHRI. En [18, 19] se presenta la idea de que un robot sea capaz de ayudar a víctimas de catástrofes naturales realizando un reconocimiento de su antebrazo y tomando mediciones de sus constantes vitales mediante la colocación de sensores biométricos.

Para llevar a cabo este tipo de tareas es necesario disponer de una mano o pinza robótica con un diseño adaptativo que presente a la vez un agarre firme de la persona y pueda controlar su fuerza y movimientos para garantizar la seguridad. En [20, 21, 4] se utiliza información de la presión ejercida durante el agarre que, mediante técnicas de aprendizaje automático (Machine Learning), se puede utilizar para obtener información de alto nivel, clasificar el contacto, e incluso

reconocer objetos. Para conseguir una interacción lo más segura posible entre robots y personas es necesario realizar un control exhaustivo de todas las acciones del robot, con el fin de evitar causar daños a las personas de manera imprevista. Por otra parte, el mapeo de la presión que ejerce la pinza podría proporcionar información sobre el objeto de agarre, con la que identificar a dicho objeto, ya sea una parte del cuerpo de una persona u otro elemento y, además, se podría controlar la presión ejercida. El desarrollo de robots capaces de interactuar de forma totalmente segura con las personas es una meta que supondría un avance en el ámbito tecnológico, tanto en medicina como en otros campos como la seguridad. En las últimas décadas los sistemas robotizados han ido incrementando su presencia no solo en la industria, si no que cada vez más en nuestro día a día y es previsible que el mañana esté caracterizado por una mayor presencia de estos sistemas que nos facilitan tareas y nos ayudan a resolver problemas complejos de manera sencilla. De estos motivos surge el interés por el estudio de este campo y su desarrollo para futuras aplicaciones.

Para el desarrollo de pinzas robóticas adaptativas se han obtenido buenos resultados mediante la implementación de sistemas subactuados [22, 2] y el uso de materiales flexibles [23, 24], buscando un sistema de prototipado y fabricación asequible mediante su producción a través de impresión 3D [25]. También ha sido contemplado un diseño modular en el que la pinza queda conformada por dedos individuales que trabajan de manera coordinada [26, 27]. Por otro lado, hasta la fecha pueden encontrarse algunos ejemplos de sistemas robóticos que utilizan sensores de presión para garantizar la seguridad en pHRI, como en el caso de el modelo diseñado para la asistencia para vestir a personas en [28]. Sin embargo no ha sido llevado a cabo aún un diseño y desarrollo de un robot capaz de reconocer a una persona e interaccionar físicamente de manera directa con ella.

En este trabajo se presenta una solución novedosa para tareas de pHRI en las que el robot debe agarrar a una persona. Para ello se propone un diseño de pinza robótica híbrida subactuada que integra materiales rígidos y flexibles para garantizar la adaptabilidad y ergonomía del sistema a la vez que se mantiene una estructura suficientemente resistente. La pinza dispone de dos dedos rígidos subactuados y un dedo híbrido en el que la superficie de contacto con el objeto está fabricada con materiales flexibles. Todas las articulaciones pasivas cuentan con sensores proprioceptivos que permiten conocer el ángulo para obtener información de la forma y tamaño del objeto agarrado. Además, se integra un array de sensores táctiles en la superficie flexible que permite obtener la distribución de presión durante el agarre.

### 1.1.3 Antecedentes

Existen numerosos diseños de pinzas robóticas, sin embargo son menos comunes aquellas que combinan materiales flexibles con los convencionales materiales rígidos con los que las pinzas y mecanismos son realizados. Algunos enfoques para el diseño de pinzas adaptativas se centran en imitar el funcionamiento de los tendones, de forma que elementos elásticos y flexibles accionan

## 1. INTRODUCCIÓN

---

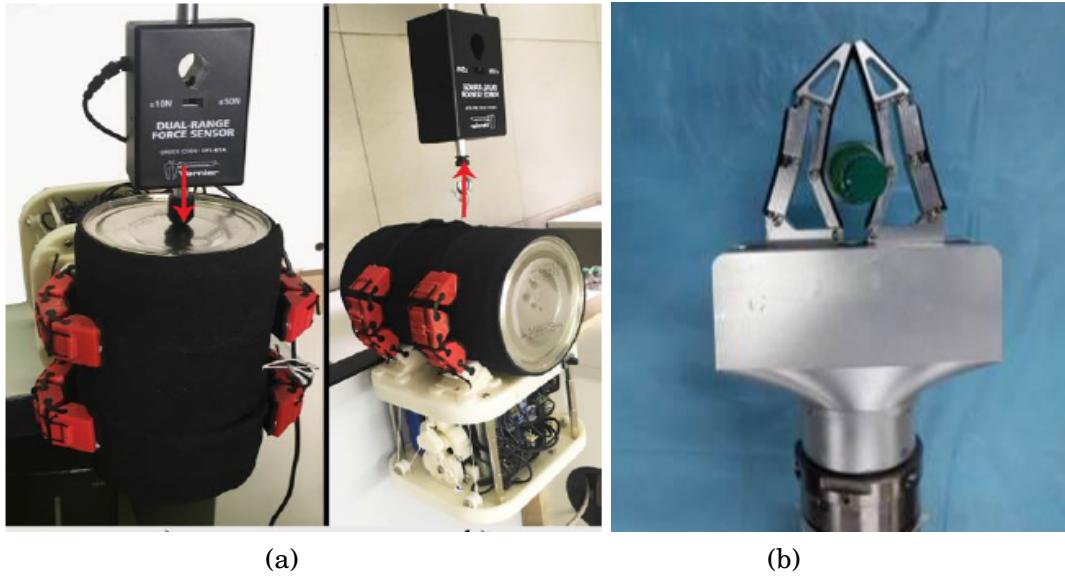


Figura 1.1: Pinza adaptativa *Co-Gripper* agarrando un objeto y experimentando sobre su fuerza de agarre [Fuente: [1]] (a). Pinza subactuada de dos dedos [Fuente: [2]] (b).

el movimiento de las partes rígidas, produciendo el agarre. En la Figura 1.1 (a) se muestra una pinza robótica, *Co-Gripper* [1], formada por cuatro dedos compuestos por eslabones rígidos unidos mediante elementos flexibles y accionados gracias a un componente que actúa como tendón. En esta figura se están realizando experimentos para comprobar la fuerza de agarre del sistema. Otro enfoque es el mostrado en la Figura 1.1 (b), en la que se muestra una pinza subactuada de dos dedos [2] agarrando un objeto. El funcionamiento de esta pinza se apoya en la estructura de dedo de tres falanges, que se adapta al agarre del objeto y, mediante un elemento elástico, se abre una vez se deja de ejercer fuerza mediante los actuadores que la mantienen cerrada.

Se han desarrollado algunos modelos de pinzas en los que la superficie de agarre está compuesta en su totalidad por material flexible. Un ejemplo de este tipo de pinza adaptativa es el modelo mostrado en la Figura 1.2, que recoge la pinza *MultiChoiceGripper* creada por *Festo*, y basada en el efecto *Fin Ray* ®. En este diseño la fuerza que se ejerce mediante los actuadores, a través de los componentes rígidos de la base, hace posible el cierre de los componentes flexibles, de forma que estos agarran el objeto adaptándose a su forma.

En este trabajo no se busca únicamente diseñar una pinza adaptativa híbrida rígida-flexible, si no que es de especial importancia la incorporación de sensores para controlar las acciones de la misma. Se han llevado a cabo estudios en los que se complementa el uso de brazos robóticos con sensores táctiles de mapeo de presión, como aparece en la Figura 1.3 (a). En este caso se han estudiado métodos para el reconocimiento de objetos a través de la información proporcionada por el sensor táctil, situado sobre una superficie plana rígida. En la Figura 1.3 (b) se muestra otro estudio en el que el sensor táctil es colocado sobre la superficie flexible de una pinza, comprobando que las lecturas cambian respecto a las recogidas cuando se utiliza una superficie de mayor



Figura 1.2: Pinza *MultiChoiceGripper* creada por *Festo* agarrando un objeto. [Fuente: [3]]

rigidez, debido a que el sensor se curva siguiendo la forma de la pinza adaptada al objeto.

A pesar de que se han encontrado ejemplos de pinzas que combinan la utilización de elementos rígidos y flexibles y se han realizado estudios sobre el uso de sensores de presión, aún no se han creado soluciones que, además de utilizar ambos tipos de materiales, combinen el uso de sensores propioceptivos y táctiles al mismo tiempo, dotando a la pinza de percepción háptica y, potencialmente, pudiendo ser aplicada para una pHRI segura.

#### 1.1.4 Objetivos

La intención con este proyecto es desarrollar un prototipo de pinza robótica destinada a la interacción física entre robots y humanos. La propuesta de pinza que se lleva a cabo parte de una idea base innovadora que busca implementar materiales rígidos y sólidos al diseño, enfoque que hasta ahora no ha sido estudiado para este tipo de aplicación. Con esta idea se busca aprovechar las ventajas de la combinación de una estructura rígida con las propiedades de adaptabilidad de los materiales flexibles. Así mismo se pretende incorporar sensores a la pinza para dotarla de percepción háptica, incluyendo un sensor táctil flexible y sensores propioceptivos (potenciómetros). En la Figura 2.20 se muestra la pinza que se ha prototipado.

Puesto que el objetivo principal de este trabajo es el diseño de una pinza robotizada destinada a la interacción con personas, el diseño estudiará la inclusión de piezas flexibles y un sensor de presión con el fin de obtener información con la que poder realizar un control sobre el

## 1. INTRODUCCIÓN

---

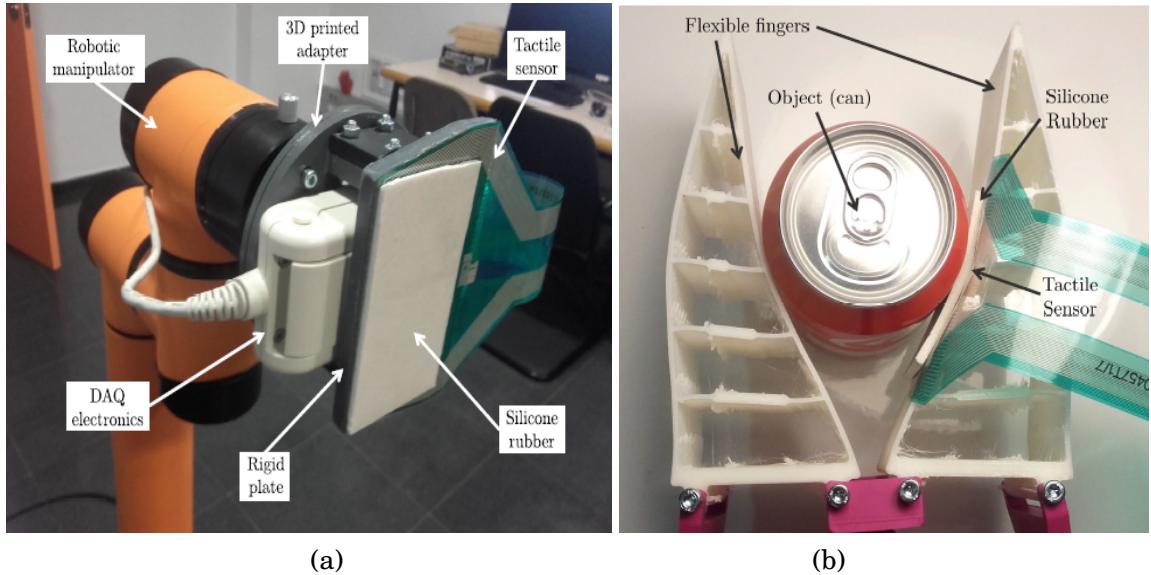


Figura 1.3: Brazo robótico equipado con un sensor táctil para lecturas de presión [Fuente: [4]] (a). Pinza flexible con sensor táctil para la lectura de presiones al agarrar un objeto [Fuente: [5]] (b).

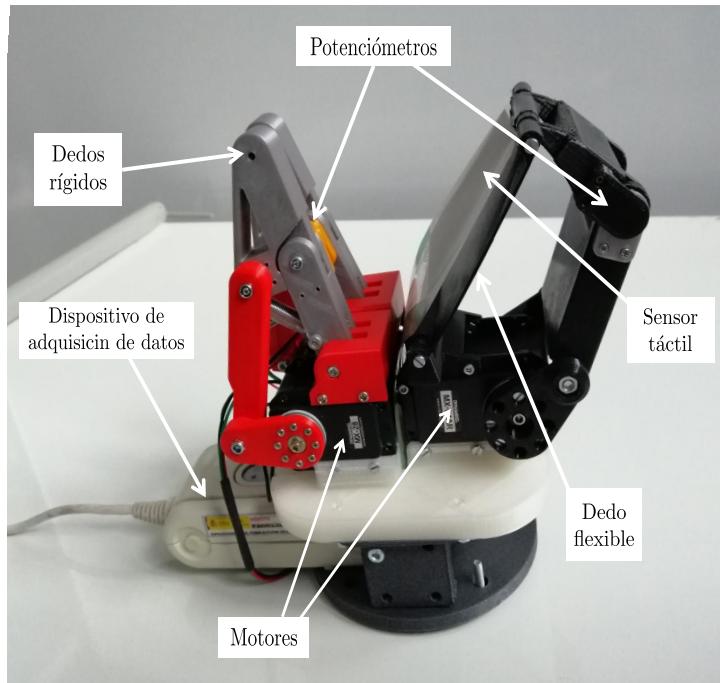


Figura 1.4: Prototipo final de la pinza subactuada híbrida de tres dedos realizada en este Trabajo de Fin de Grado. La pinza incluye sensores hápticos proprioceptivos que permiten conocer la posición relativa de las articulaciones subactuadas de los dedos y un sensor táctil en el dedo flexible para obtener la distribución de la presión ejercida en el agarre.

funcionamiento de la pinza.

Con la incorporación del sensor de mapeo de la presión y los sensores propioceptivos se buscará una lectura de fuerzas y presiones que puedan ser interpretadas y proporcionen información sobre el objeto que está siendo agarrado y sobre la forma en que el agarre está siendo realizado.

Seguidamente se enumeran los distintos objetivos concretos que se pretenden completar a lo largo de la realización de este Trabajo de Fin de Grado:

- Adquisición de conocimientos sobre los temas relacionados con pinzas robotizadas y su diseño y sobre la impresión 3D de elementos rígidos y flexibles.
- Diseño 3D de las piezas que componen la pinza en SolidWorks.
- Ensamblaje de la pinza en SolidWorks.
- Impresión de las piezas, tanto rígidas como flexibles.
- Montaje del prototipo utilizando las piezas impresas.
- Conexión del hardware de la pinza.
- Comprobación del comportamiento del prototipo creado mediante la programación software de un entorno de control.

Este trabajo aporta una idea base con la que contribuir en los distintos campos de aplicación de la interacción física robot-humano. En primer lugar se busca diseñar un modelo de pinza que beneficie dicha interacción mediante una estructura rígida, que asegure un agarre firme y la posibilidad de implementar un mecanismo subactuado que controle la pinza, junto con una parte flexible que pueda adaptarse e interaccionar de manera segura con las personas. Por otro lado se desea conseguir la implementación de un sensor de mapeo de presión en la pieza flexible que entrará en contacto con las personas, de forma que también se puedan presentar los resultados de experimentos de lecturas de presión realizados con el diseño implementado. De este modo se complementará el trabajo con los resultados obtenidos, que servirán para analizar cómo de acertado es el enfoque de diseño que ha sido llevado a cabo.

Un factor destacable del trabajo es que el prototipado físico de las piezas se realizará mediante impresión 3D de los diseños realizados, facilitando el proceso de obtención y reproducción de las piezas.

## 1. INTRODUCCIÓN

---

La realización de este trabajo dejaría abierta la puerta a posteriores estudios y experimentos con las posibles mejoras de diseño de la pinza encontradas y con la implementación de esta a sistemas más complejos de interacción con humanos. Además de un futuro desarrollo de la interfaz háptica incorporada al robot, de forma que la información recogida pueda ser interpretada a tiempo real por el robot y, mediante el uso de inteligencia artificial, pueda llegar a actuar basándose en ella.

### 1.2 Estructura de la Memoria

La memoria se estructura de la siguiente manera:

En el capítulo 2 se recogen las ideas iniciales y conceptos que se busca implementar en el diseño de la pinza y se analizan las modificaciones y distintas versiones por las que ha pasado el diseño hasta alcanzar la versión escogida para llevar a cabo su prototipado. También se muestra el proceso de impresión y ensamblaje de las piezas realizadas.

En el capítulo 3 se presenta el proceso de incorporación a la pinza del sensor de presión y la realización de una interfaz que permita la recogida de datos a partir de las lecturas del sensor. Se recogerá de igual modo la incorporación de sensores para el control de la posición de cada uno de los eslabones que compone la estructura rígida.

En el capítulo 4 se describen los experimentos llevados a cabo con la pinza y se recogen los resultados obtenidos.

En el capítulo 5 se analizan los resultados obtenidos y se presentan las conclusiones sobre el diseño y el prototipado propuestos.

Finalmente, en el capítulo 6 se presentan sugerencias e ideas, obtenidas a partir de los resultados observados durante el proceso de realización del diseño y experimentación, que podrían derivar en el futuro en nuevas líneas de trabajo.

# 2

## MODELADO E IMPLEMENTACIÓN

Para obtener el prototipo de pinza robotizada ha sido necesario partir de una idea de pinza, la cual se ha desarrollado para su fabricación real. Se ha partido de la configuración de una pinza completamente rígida y se ha ido modificando su diseño para incorporar una parte flexible y sensorizada.

### 2.1 Modelo simplificado del sistema mecánico

Para diseñar el sistema mecánico que conforma la pinza se ha partido del modelo inicial del sistema, en el cual se recogen de manera simplificada las características que se busca que cumpla la pinza.

La idea de la que se ha partido es la de construir la pinza tomando como base el diseño de dedos robotizados individuales que puedan replicarse y acoplarse de tal manera que el conjunto de dedos pueda agarrar objetos. De este modo se buscará la colocación de los dedos enfrentados entre sí de manera que el movimiento de cierre de la pinza haga que el objeto quede atrapado entre ellos.

#### 2.1.1 Pinza rígida

Se ha partido del modelo simplificado de un dedo individual subactuado con todos sus componentes rígidos, como se muestra en la Figura 2.1. Este diseño ha sido desarrollado en el departamento de Ingeniería de Sistemas y Automática de la Universidad de Málaga y cuenta con cuatro eslabones rígidos por dedo y un muelle que lo devuelve a su posición de apertura cuando no se está ejerciendo un ningún par de fuerza desde la articulación inferior, a la que quedaría conectado el motor

## 2. MODELADO E IMPLEMENTACIÓN

---

responsible del funcionamiento del dedo. El dedo cuenta con dos falanges y un único actuador. El muelle de acero que se utiliza tiene un diámetro de 6 mm y cuenta con una rigidez de 164N/m.

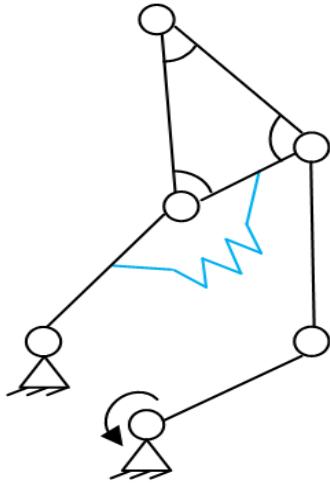


Figura 2.1: Modelo simplificado del sistema mecánico de un dedo rígido de pinza robotizada. Se diferencian los eslabones que la componen y la forma esquematizada de estos. En azul se representa un resorte introducido en el modelo y el par motor representado por un flecha indica el sentido de giro del motor que activaría el cierre del dedo.

La combinación de dos de estos dedos enfrentados forma una pinza subactuada, rígida en la totalidad de sus componentes. El Modelo simplificado de una pinza de dos dedos rígidos puede verse en la Figura 2.2.

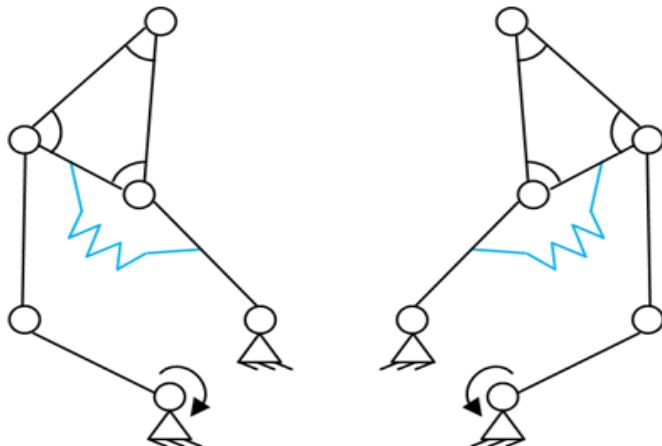


Figura 2.2: Modelo simplificado del sistema mecánico completo de la pinza rígida con dos dedos simétricos. Entre ellos se posicionaría el objeto a agarrar.

El objeto agarrado quedaría entre los dos dedos, entrando en contacto con los eslabones interiores de estos. A partir de este concepto de pinza se plantea la modificación de uno de los dedos para incorporar una superficie de contacto flexible, sustituyendo a las superficies rígidas que en este modelo ejercen la fuerza sobre el objeto.

### 2.1.2 Pinza híbrida

A partir del modelo de dedo rígido se han obtenido cuatro propuestas de dedo híbrido, en los que se combina el uso de materiales rígidos y flexibles. En primer lugar se ha contemplado el diseño mostrado en la Figura 2.3, basado en el dedo rígido. Para este modelo se ha mantenido fijo el ángulo entre los dos extremos del eslabón  $H_1$ , según la nomenclatura adoptada en la Figura 2.3, y se ha incorporado un eslabón  $H_5$  en la parte inferior para restringir el movimiento del resto de eslabones. Manteniendo rígida la unión entre los extremos de  $H_1$  se ha buscado imitar la estructura del dedo rígido, incorporando al diseño los efectos de las deformaciones de la pieza flexible entre los extremos de  $H_1$  y entre  $H_1$  y la sujeción inferior. La unión en mitad de la pieza flexible con  $H_1$  diferenciará dos secciones de trabajo de dicha pieza.

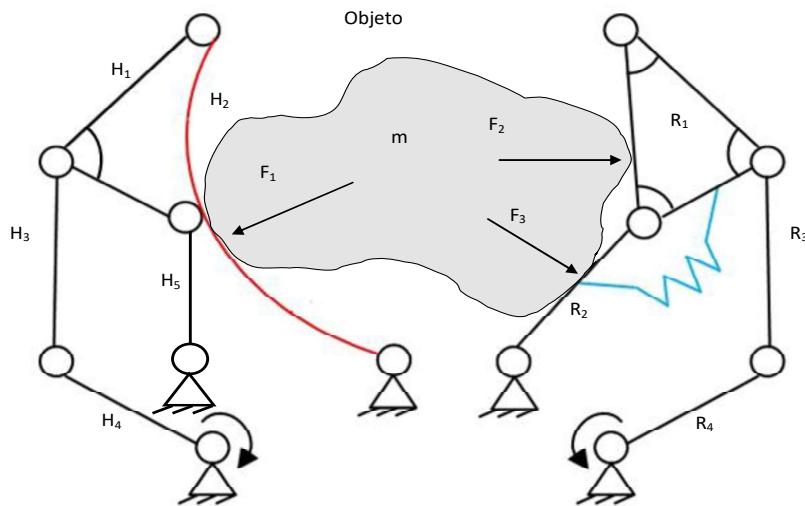


Figura 2.3: Primer modelo simplificado del sistema mecánico completo de la pinza híbrida con un dedo híbrido y otro rígido. La superficie roja es el material flexible. Entre ellos se posicionaría el objeto a agarrar. En este modelo se mantiene el ángulo fijo entre los extremos de  $H_1$  y se incorpora un eslabón  $H_5$  en la parte inferior.

El segundo modelo simplificado realizado se muestra en la Figura 2.4. En este caso se ha diseñado el dedo híbrido con cuatro eslabones, manteniendo un ángulo fijo entre los dos extremos

## 2. MODELADO E IMPLEMENTACIÓN

---

del eslabón  $H_1$ , que se conectan con la pieza flexible. Este dedo híbrido mantiene el mismo número de eslabones que el dedo rígido.

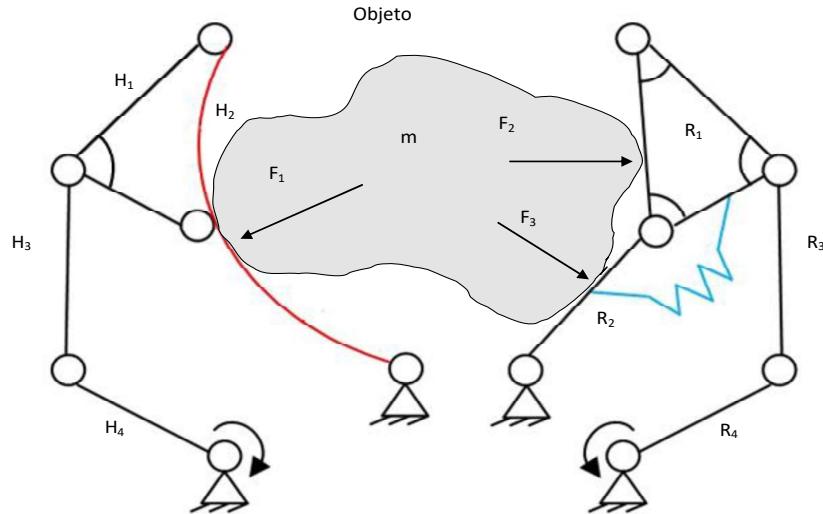


Figura 2.4: Segundo Modelo simplificado del sistema mecánico completo de la pinza híbrida con un dedo híbrido y otro rígido. La superficie roja es el material flexible. Entre ellos se posicionaría el objeto a agarrar. En este modelo se mantiene el ángulo fijo entre los extremos de  $H_1$ .

Tras esta primera idea se ha contemplado la posibilidad de liberar el ángulo fijo entre los extremos de  $H_1$ , introduciéndose así un nuevo eslabón con libertad de movimiento, un nuevo  $H_5$ , como puede verse en la Figura 2.5.

Finalmente se ha planteado la posibilidad de eliminar por completo el eslabón  $H_5$ , como se muestra en la Figura 2.6, donde se representan también las componentes elástica y amortiguadora de la pieza flexible responsables del funcionamiento de la pinza. En el caso de los dedos rígidos se introduce un elemento elástico (muelle) que obliga al dedo a permanecer completamente estirado cuando no se está aplicando una fuerza interna, es decir, cuando no se está agarrando ningún objeto. Por otro lado, en el caso del dedo híbrido, será la componente elástica del propio material flexible la que devolverá el dedo a la posición de referencia. En este trabajo no se han modelado las constantes elástica y amortiguadora de la pieza flexible, si no que esta pieza se ha caracterizado mediante el estudio de la relación entre fuerza y desplazamiento en el capítulo de 4. Queda abierta la puerta del estudio de estas constantes para futuros proyectos, de forma que pueda simularse el comportamiento de la pieza flexible.

Estas diferentes versiones de dedo híbrido han sido modeladas en 3D, comparadas y estudiadas con el objetivo de encontrar la mejor opción y desarrollar la pinza con las mejores

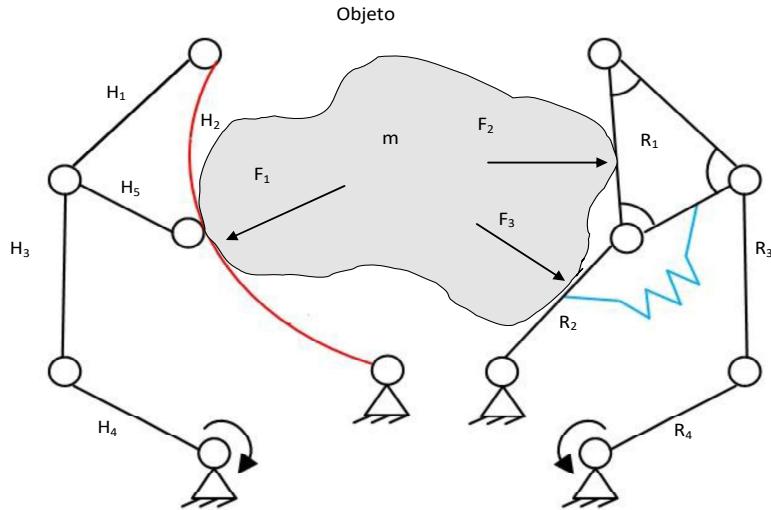


Figura 2.5: Tercer Modelo simplificado del sistema mecánico completo de la pinza híbrida con un dedo híbrido y otro rígido. La superficie roja es el material flexible. Entre ellos se posicionaría el objeto a agarrar. En este modelo se libera el ángulo entre los eslabones  $H_1$  y  $H_5$ .

prestaciones posibles.

## 2.2 Modelado 3D

Una vez se han definido los modelos del dedo rígido se procede a su modelado 3D mediante el software SolidWorks 2018 Student Edition.

### 2.2.1 Versión 1: Modelo basado en dedo rígido individual

La primera versión creada se basa en el primer modelo simplificado del sistema mecánico, mostrado en la Figura 2.3. En esta primera versión, presentada en la Figura 2.7 (a), se ha contemplado únicamente el dedo flexible, sin llegar a incorporarlo a la pinza completa y utilizando el mismo modelo de motor, el actuador *Dynamixel MX-28*, en el dedo híbrido que el utilizado con los dedos rígidos. La pieza flexible diseñada en este caso cuenta con una superficie rectangular de contacto con el objeto agarrado, visible en la Figura 2.7 (b), y queda unida a la estructura mediante solapas laterales, que pueden apreciarse en la Figura 2.7 (c), del mismo material a través de las cuales se introduciría tornillería.

## 2. MODELADO E IMPLEMENTACIÓN

---

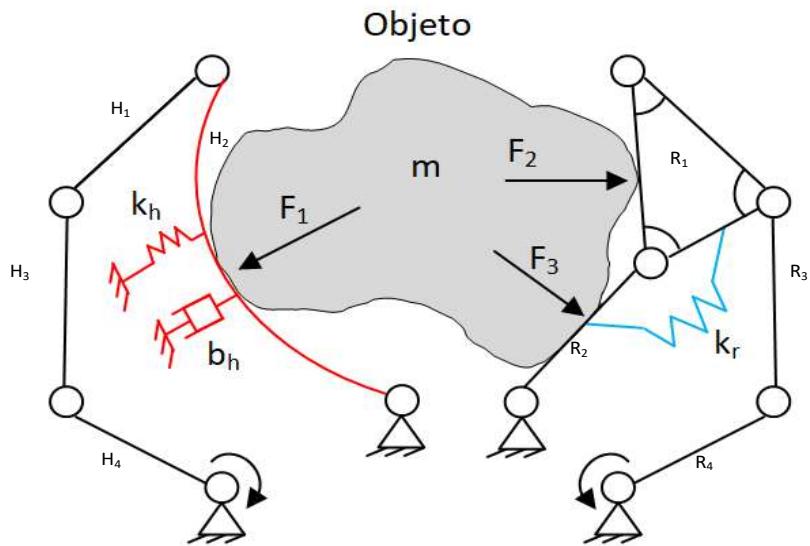


Figura 2.6: Cuarto Modelo simplificado del sistema mecánico completo de la pinza rígida con un dedo híbrido y otro rígido. Entre ellos se posicionaría el objeto a agarrar. En este modelo se elimina completamente el eslabón intermedio. Se muestra una simplificación de la respuesta elástica y amortiguadora de la pieza flexible frente a una fuerza ejercida sobre su superficie.

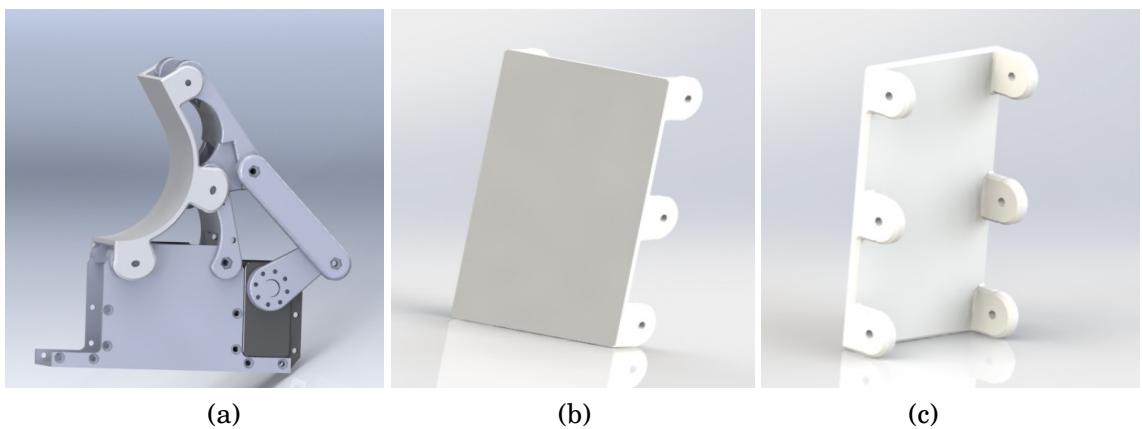


Figura 2.7: Primer modelo 3D del dedo híbrido siguiendo el primer modelo simplificado del sistema mecánico (a). Primer modelo 3D de la pieza flexible. Visible la zona de contacto con el objeto (b). Primer modelo 3D de la pieza flexible. Visible la zona posterior de la pieza y las sujetaciones (c).

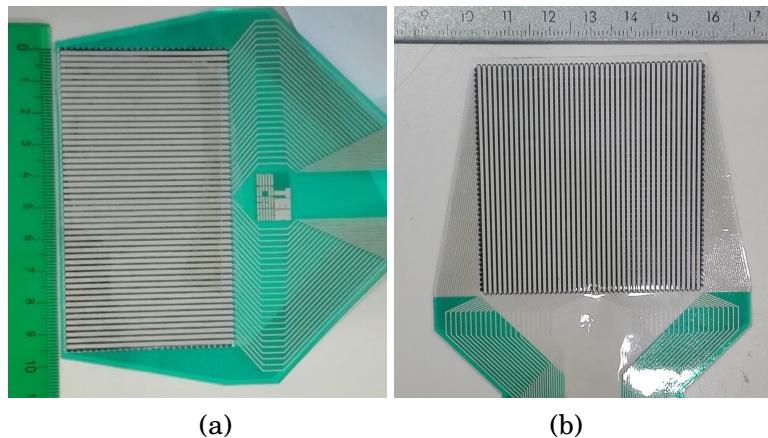


Figura 2.8: Modelo de sensor de mapeo de presión *Tekscan* para el que se diseña la pieza flexible de la versión 1 de la pinza híbrida, las dimensiones de la matriz sensorizada son de 96,0mm de alto por 53,0 mm de ancho (a). Modelo de sensor de mapeo *Tekscan* que finalmente se decide utilizar para la sensorización de la pinza híbrida, las dimensiones de la matriz sensorizada son de 55,9mm de alto por 55,9mm de ancho (b).

Tras la realización de esta primera versión se ha observado una serie de problemas de diseño que son abordados en las posteriores versiones. El primero de los problemas es el solapamiento entre el punto de unión de la pieza flexible con la posición del potenciómetro que se pretenderá usar para la lectura de la posición del dedo a partir del ángulo entre los eslabones rígidos. Será, por lo tanto, necesario el diseñar una zona dedicada al posicionamiento de dichos potenciómetros. Otro punto en el que se plantean posibles mejoras es en el dimensionamiento de la pieza flexible. Por un lado la separación entre la superficie plana y las sujetaciones se plantea excesiva, teniendo en cuenta la flexibilidad del material, lo que podría llevar a deformaciones indeseadas. En posteriores versiones se tiene en cuenta esta observación y las sujetaciones se modifican. Por otro lado se decide el cambio del modelo de sensor de presión utilizado, pasando de uno rectangular a uno trapezoidal. Los sensores pueden verse comparados en la Figura 2.8. Este cambio se realiza ya que la forma de conexión del sensor rectangular con el lector del sensor era mediante la prolongación del sensor hacia el lateral de la pinza, mientras que la conexión del sensor trapezoidal se realiza mediante su prolongación por la parte inferior de la pinza, de modo que será más difícil que el sensor se dañe al doblarse y se obtendrán mejores lecturas. Estos motivos conllevan una necesidad del redimensionamiento y rediseño de la pieza flexible. También es observa que el grado de curvatura del eslabón  $H_1$ , según la nomenclatura anteriormente adoptada en la Figura 2.3, es excesivo dado el comportamiento que se espera de la pieza flexible. En las siguientes versiones también se modifica la base de la pinza para poder soportar tanto al dedo híbrido como a los rígidos.

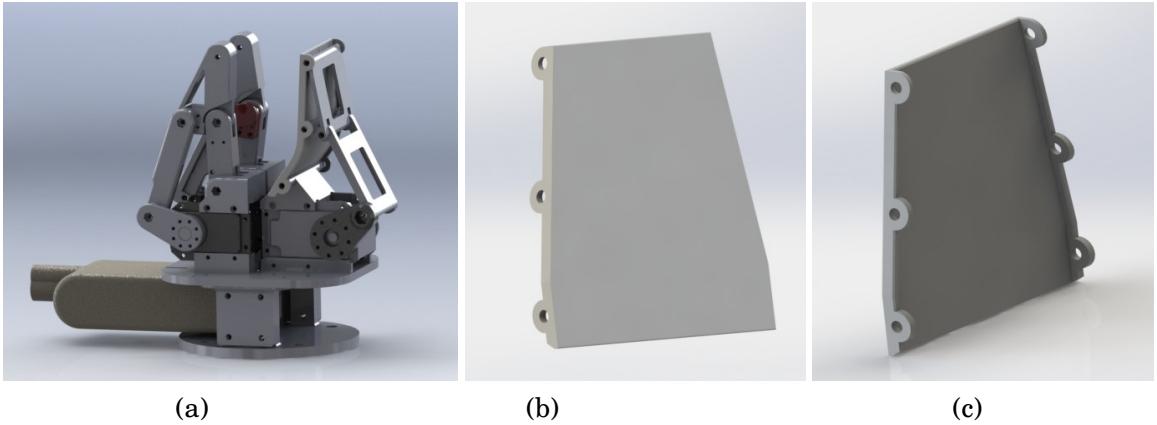


Figura 2.9: Segundo modelo 3D del dedo híbrido siguiendo el primer modelo simplificado del sistema mecánico (a). Segundo modelo 3D de la pieza flexible. Visible la zona de contacto con el objeto (b). Segundo modelo 3D de la pieza flexible. Visible la zona posterior de la pieza y las sujeciones (c).

### **2.2.2 Versión 2: Modelo mejorado para incorporar pieza flexible y adaptarse a la base de la pinza**

La segunda versión realizada, presentada en la Figura 2.9 (a), se ha basado en el modelo de la Figura 2.4, se ha eliminado el eslabón  $H_5$  de la primera versión y se ha modificado el diseño del resto de eslabones. En este modelado se han incorporado los dedos rígidos enfrentados al dedo híbrido, unidos en la misma base, en cuya parte inferior se incluye también el lector del sensor Teckscan. En esta versión se ha cambiado el tipo de motor que moverá al dedo híbrido por uno de mayor potencia, un actuador *Dynamixel MX-64 AR*, ya que tendrá que trabajar enfrentado a dos motores de dedo rígido. Para esta pinza, la pieza flexible rediseñada es trapezoidal, como puede verse en la Figura 2.9 (b), siguiendo las dimensiones del sensor. Se ha reducido su espesor y el radio de las solapas que hacen de sujeción, tal y como se apuntó en la versión anterior. Las solapas rediseñadas pueden observarse en la Figura 2.9 (c).

Para este diseño se ha optado por reducir el espesor de los eslabones, buscando que estos no interfieran en la flexión de la pieza flexible. Sin embargo llega a considerarse que las dimensiones escogidas son demasiado pequeñas y no se conseguiría una pinza proporcionada entre los dedos rígidos y el híbrido. Por lo tanto se considera en posteriores versiones un dimensionado proporcional al de los eslabones de los dedos rígidos. Con esta versión se observa que al mantener el eslabón  $H_1$  con un ángulo rígido no se permite a la pieza flexible adaptarse por completo al objeto que está agarrando, pues tiene fijada su posición en el eje medio de unión con el extremo inferior de  $H_1$ . Se considerará como una mejora en el diseño el seguir con el modelo de la Figura 2.5, liberando este ángulo de forma que sea posible que la pieza flexible adapte su forma. En lo referente a las posibles mejoras a introducir a la pieza flexible se considera la introducción de

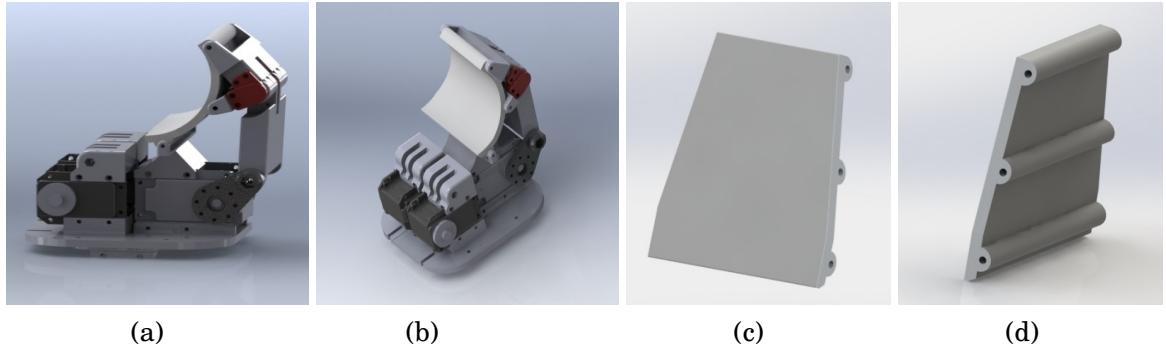


Figura 2.10: Tercer modelo 3D de la pinza híbrida siguiendo el tercer modelo simplificado del sistema mecánico. Vista lateral-inferior. Para facilitar la visualización del dedo híbrido no se representan los dedos rígidos, pero se mantienen sus bases y el posicionamiento de sus motores para poder comprender la composición de la pinza en su conjunto (a). Tercer modelo 3D de la pinza híbrida siguiendo el tercer modelo simplificado del sistema mecánico. Vista superior-lateral (b). Tercer modelo 3D de la pieza flexible. Visible la zona de contacto con el objeto (c). Tercer modelo 3D de la pieza flexible. Visible la zona posterior de la pieza y las sujetaciones (d).

refuerzos tubulares para próximas versiones de modo que se consiga una flexión en el eje deseado, con las mínimas deformaciones en el resto de ejes de la pieza.

### 2.2.3 Versión 3: Mejora en la resistencia de los eslabones

En esta tercera versión se ha introducido un nuevo eslabón  $H_5$ , que surge de la división del anterior  $H_1$ , tal y como se mostraba en la Figura 2.5. Para conseguir un refuerzo de las piezas, tal y como se ha señalado que se buscaba a partir de comprobar el resultado de la segunda versión de la pinza, el eslabón  $H_1$  es rediseñado eliminando material de la parte superior de forma que a pesar de que se aumenta el grosor del eslabón, este no interfiere con el movimiento de la pieza flexible. En este caso se posicionan dos potenciómetros para medir los ángulos entre eslabones. Un potenciómetro se encontrará entre los eslabones  $H_1$  y  $H_5$  y el otro entre el  $H_1$  y el  $H_3$ . En la Figura 2.10 (a) puede observarse el posicionamiento del potenciómetro entre  $H_1$  y  $H_5$  bajo las piezas modeladas en color rojo, que actuarán como cubre-potenciómetro y fijarán cada uno de los eslabones con una parte del potenciómetro, variando así la resistencia al cambiar el ángulo entre los eslabones. El otro potenciómetro se sitúa de forma análoga entre  $H_1$  y  $H_3$  en el eje de simetría longitudinal del dedo. En la figura 2.10 (b) puede observarse cómo la nueva forma de sujeción diseñada para la pieza flexible se basa en que los eslabones soporten a la pieza desde los extremos, eliminando por completo las solapas de las versiones anteriores. En las figuras 2.10 (c) y (d) puede observarse en detalle la pieza flexible en su tercera versión, la cual se caracteriza por los refuerzos tubulares añadidos en la parte posterior a partir del diseño de la versión anterior.

Tras observar los resultados de esta tercera versión se considera una posible mejora al

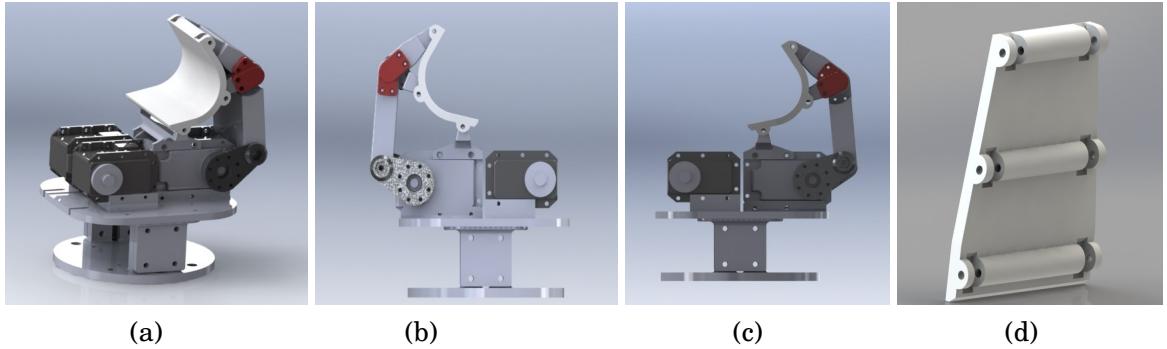


Figura 2.11: Cuarto modelo 3D de la pinza híbrida siguiendo el tercer modelo simplificado del sistema mecánico. Vista superior-lateral (a). Cuarto modelo 3D de la pinza híbrida siguiendo el tercer esquema de modelo simplificado del sistema mecánico. Vista lateral izquierda (b). Cuarto modelo 3D de la pinza híbrida siguiendo el tercer modelo simplificado del sistema mecánico. Vista lateral derecha (c). Cuarto modelo 3D de la pieza flexible con un espesor de 5mm. Visible la zona posterior de la pieza y las sujeciones (d).

diseñar las sujeciones de la pieza flexible de modo que los eslabones rígidos no sobresalgan por sus extremos, ya que esto podría interferir en el momento del agarre, chocando las partes rígidas con el objeto agarrado. Por este motivo en la siguiente versión se estudiará una forma de conseguir este cambio.

#### 2.2.4 Versión 4: Cambios en el sistema de sujeciones de la pieza flexible

Esta cuarta versión, mostrada en la Figura 2.11 (a), supone una modificación de la versión tres, de forma que pueda adoptarse la idea propuesta para las sujeciones de la pieza flexible. Para llevar a cabo esta tarea se ha optado por reducir la separación entre los extremos laterales de los eslabones rígidos, de forma que los puntos en los que estos se unen con la pieza flexible no sobresalgan. La pieza flexible debe ser, por lo tanto, modificada, introduciendo ranuras sobre los refuerzos tubulares a modo de articulación con los eslabones rígidos. Para la unión mediante tornillería y tuercas se deja un espacio con las dimensiones de la tuerca en la parte interior de la zona de sujeción de los eslabones rígidos, de forma que la cabeza del tornillo quede accesible por los laterales de la pinza. En esta versión se mantiene el posicionamiento de uno de los potenciómetros, como se muestra en la Figura 2.11 (b) y cambia el posicionamiento del segundo potenciómetro entre los eslabones  $H_1$  y  $H_3$ , eliminando la simetría entre las uniones de los eslabones  $H_1$ ,  $H_3$  y  $H_5$ , de forma que este potenciómetro pueda colocarse en la cara derecha de la pinza, tal y como se muestra en la Figura 2.11 (c). Las ranuras introducidas en la pieza flexible pueden observarse en la Figura 2.11 (d).

Llegado este punto del trabajo se realiza una prueba de impresión 3D de la pieza flexible para comprobar el comportamiento del material en el diseño realizado. Se imprime en material

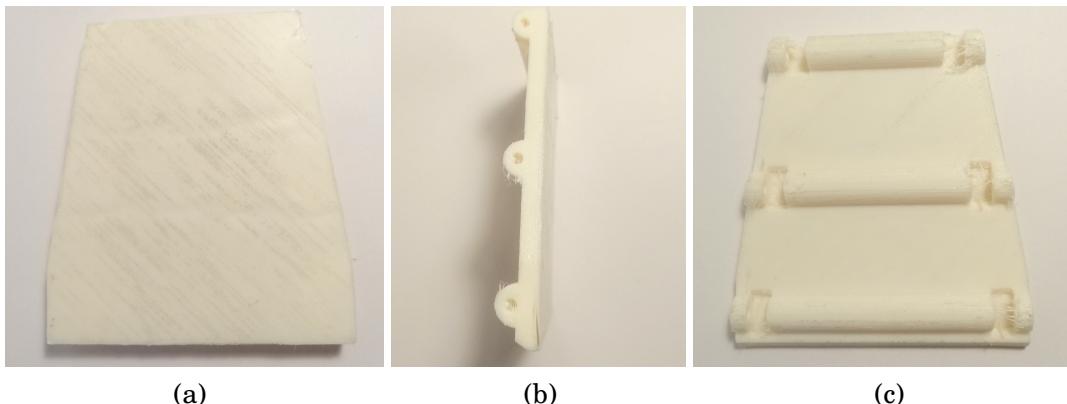


Figura 2.12: Impresión 3D de la pieza flexible en material FLEX siguiendo según la versión 4 de la pinza con 5mm de espesor, zona de contacto con el objeto (a). Impresión 3D de la pieza flexible en material FLEX siguiendo según la versión 4 de la pinza con 5mm de espesor, vista lateral (b). Impresión 3D de la pieza flexible en material FLEX siguiendo según la versión 4 de la pinza con 5mm de espesor, zona puesta a la de contacto con el objeto, mostrando detalle de modo de sujeción a dedo (c).

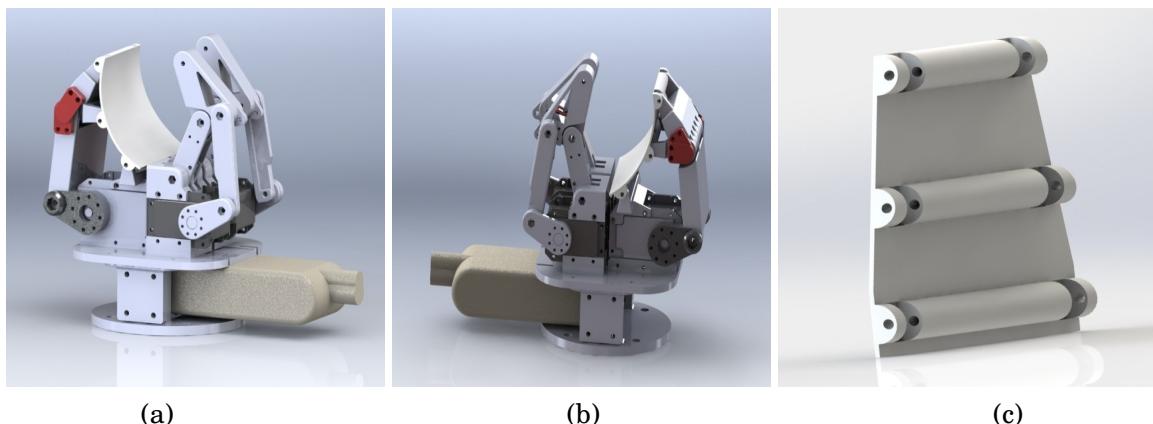


Figura 2.13: Cuarto modelo de la pinza con la pieza flexible modificada a 1mm de espesor. Vista frontal-lateral derecho (a). Cuarto modelo de la pinza con la pieza flexible modificada a 1mm de espesor. Vista frontal-lateral izquierdo (b). Rediseño del cuarto modelo 3D de la pieza flexible con un espesor de 1mm. Visible la zona posterior de la pieza y las sujetaciones (c).

FLEX la pieza flexible, con un espesor de 5mm. El resultado puede observarse en la Figura 2.12. Tras esta prueba se comprueba que dicho espesor es demasiado grueso para las características de flexibilidad buscadas, haciendo a la pieza excesivamente rígida. Por este motivo se procede al rediseño de la pieza flexible con un espesor menor, reduciéndolo de 5mm a 1mm. El rediseño de esta versión de la pinza supone únicamente la reducción del espesor de la pieza flexible. Puede observarse en las Figuras 2.13 (a) y (b) el resultado del renderizado del modelo 3D con la modificación implementada y en la Figura 2.13 (c) se muestra en detalle el diseño de la pieza flexible.

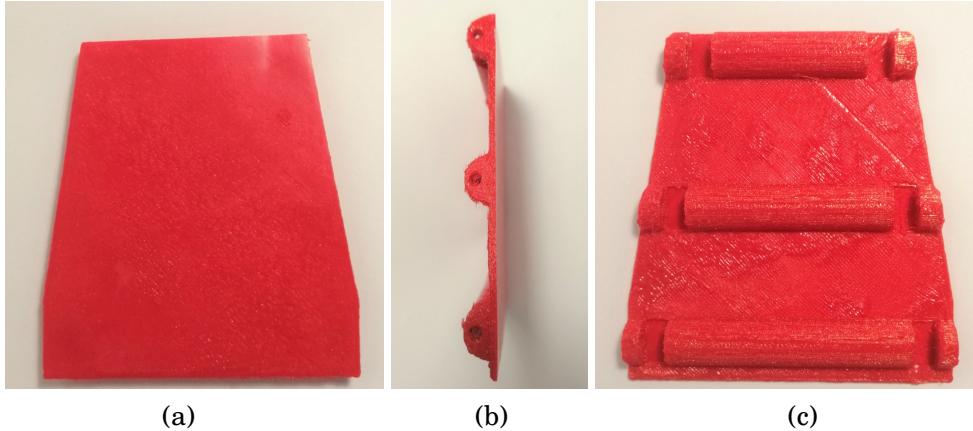


Figura 2.14: Impresión 3D de la pieza flexible en material FLEX siguiendo según la versión 4 de la pinza con 1mm de espesor, zona de contacto con el objeto (a). Impresión 3D de la pieza flexible en material FLEX siguiendo según la versión 4 de la pinza con 1mm de espesor, vista lateral (b). Impresión 3D de la pieza flexible en material FLEX siguiendo según la versión 4 de la pinza con 1mm de espesor, zona puesta a la de contacto con el objeto, mostrando detalle de modo de sujeción a dedo (c).

Una vez diseñada la pieza flexible se procede a su reimpresión en material FLEX. El resultado obtenido se muestra en la Figura 2.14. Con el nuevo espesor de 1mm se consigue una mayor flexibilidad, suficiente como para decidir proceder con la impresión en PLA de los eslabones rígidos que conformarán al dedo híbrido para así poder comprobar el funcionamiento del mismo. Se realiza una prueba de montaje, mostrada en la Figura 2.15.

Con el montaje físico de las piezas impresas se observa el comportamiento del sistema. En primer lugar se observa que la pieza flexible de 1mm de espesor es excesivamente flexible, ya que es necesario un ligero grado de rigidez que permita a la estructura del dedo agarrar firmemente objetos. Otro aspecto observado es el efecto de los eslabones rígidos sobre la superficie de contacto de la pieza flexible. Se observa un efecto no deseado que ocasiona protuberancias en la superficie de la pieza flexible, tal y como aparece detallado en la Figura 2.16. Este efecto supondría una modificación indeseada de las lecturas de presión realizadas con el sensor colocado sobre la superficie de la pieza flexible. Por otro lado se comprueba que debido a las características de la pieza flexible y del resto de eslabones el ángulo entre el eslabón  $H_1$  y  $H_5$  no varía de forma apreciable. Todas estas consideraciones llevan a contemplar como una mejor opción de diseño el modelo simplificado del sistema mecánico presentado en la Figura 2.6.

### 2.2.5 Versión Final: Modelo que se procede a prototipar y estudiar

El diseño por el que finalmente se ha optado tras el estudio de posibles variaciones es el mostrado en la Figura 2.18. En este diseño los eslabones se han dimensionado de forma que el



Figura 2.15: Montaje del cuarto modelo de la pinza con la pieza flexible modificada a 1mm de espesor. Vista frontal-lateral derecho. Se realiza el montaje de las piezas obtenidas mediante impresión 3D sobre una base de poliestireno expandido moldeado con las dimensiones del motor.

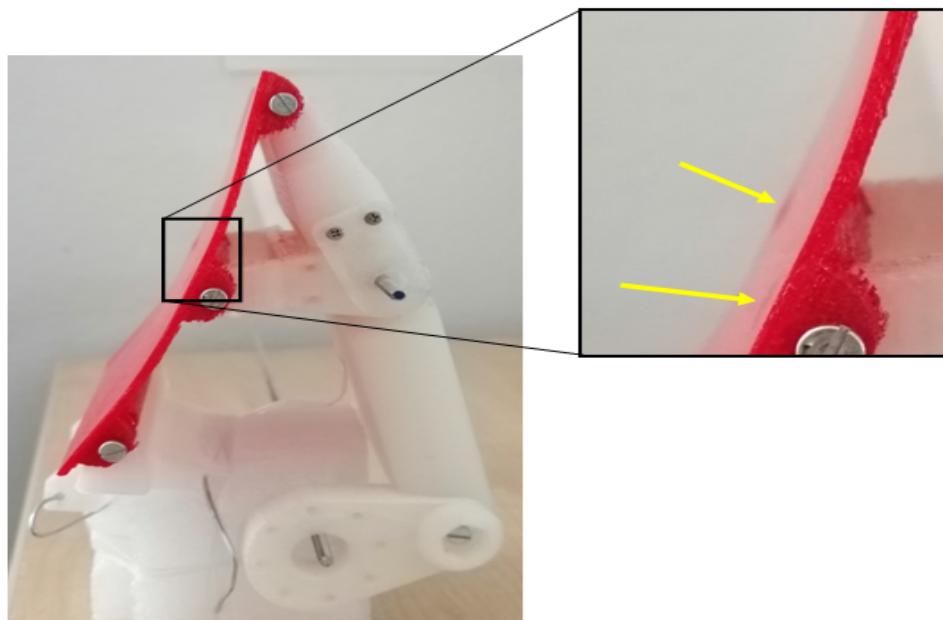


Figura 2.16: Detalle señalando con flechas amarillas las protuberancias observadas sobre la superficie de la pieza flexible al unirla al resto de eslabones del dedo híbrido.

## 2. MODELADO E IMPLEMENTACIÓN

---

Parámetro	Valor	Parámetro	Valor
$a$	35 mm	$R$	20 mm
$b$	30 mm	$R_1$	45 mm
$c$	25 mm	$R_2$	40 mm
$d$	90 mm	$R_3$	60 mm
$e$	25 mm	$R_4$	27 mm
$f$	55 mm	$H_1$	40 mm
$g$	8 mm	$H_2$	70 mm
$z$	8 mm	$H_3$	60 mm
$\alpha$	90°	$H_4$	27 mm

Tabla 2.1: Dimensiones que delimitan el diseño final de pinza realizado.

sistema sea resistente y pueda adaptarse a la pieza flexible. Se ha tenido también en consideración la aplicación que se le quiere dar a la pinza (potencialmente el objeto de agarre será un antebrazo humano), por lo que las dimensiones deben permitir el agarre de un objeto de estas dimensiones y características. Se ha buscado igualmente que haya suficiente distancia entre la pieza flexible y los eslabones rígidos para que estos no impidan que la superficie flexible se curve o adapte al objeto. Las dimensiones consideradas se recogen en la Tabla 2.1, de acuerdo con la nomenclatura definida en la Figura 2.17. Se incluirá un eslabón  $H_4$  a cada lado del servomotor. Los eslabones  $H_4$  cuentan con un tope mecánico para controlar ángulo entre  $H_3$  y  $H_4$ .

El espesor de la pieza flexible se ha elegido de tal forma que la elasticidad y flexibilidad obtenidas permitan a la pinza moverse correctamente. Además de dimensionar su espesor, se contemplan las dimensiones del sensor de presión que se utilizará de forma que la pieza flexible lo abarque en su totalidad. Tras observar que las piezas flexibles diseñadas anteriormente en material FLEX no han cumplido con las características funcionales buscadas, se opta por utilizar otro material de impresión, el PTEG. El PTEG es una variante del PTE obtenida de la modificación del polímero, de forma que se consigue una menor fragilidad y una mayor facilidad de procesado. Este material presenta una menor rigidez que otros materiales utilizados comúnmente para la impresión 3D, como son el PLA y el ABS, y una mayor resistencia que los mismos, por lo que se presenta como una buena alternativa a utilizar. Otra propiedad destacable de este material es que puede ser utilizado para uso alimentario, de modo que será seguro para el contacto con personas en la aplicación de la pinza robótica a diseñar.

Para las uniones de los eslabones rígidos con el flexible se quiere conseguir una articulación que interfiera lo menos posible en la lectura de presiones, por lo que estas articulaciones se han situado fuera de los límites del sensor de presión.

Con estas dimensiones se ha realizado el modelo definitivo en 3D, mostrado en las Figuras 2.18 (a) y (b). Pueden observarse en rojo las piezas que cubren al potenciómetro que medirá el ángulo entre los eslabones  $H_1$  y  $H_3$ . En la parte inferior de la base se encuentra el sistema de adquisición de datos del sensor de presión. Los dos dedos rígidos permiten que el agarre pueda adaptarse

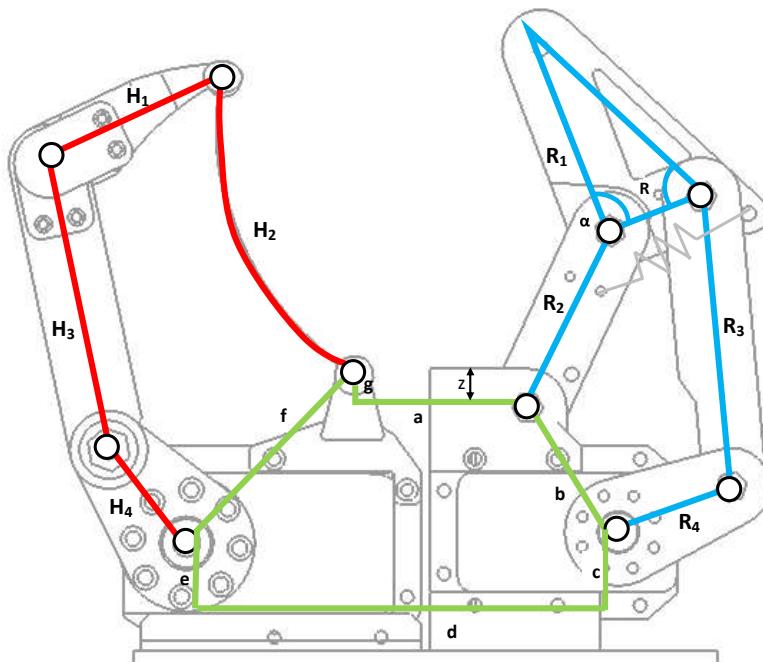


Figura 2.17: Modelo de la pinza híbrida en el que se nombran sus componentes para ser definidas sus dimensiones. Dedo híbrido rígido-flexible a la izquierda, en rojo, y dedo completamente rígido a la derecha, en azul. Base de la pinza en verde.

mejor a la geometría del objeto cogido y no se pierda información del sensor de presión. En la Figura 2.18 (c) se muestra un detalle del modelo de la pieza flexible para su impresión en PTEG. Para este material se ha optado por un diseño rectangular con refuerzos tubulares en los extremos, orientados hacia la superficie de contacto con el objeto agarrado, pero sin colisionar con el posicionamiento del sensor de presión sobre dicha superficie. Se busca un diseño tal que sea posible su impresión sin la necesidad de soportes, de forma que no se altere la estructura de la pieza por la unión a los mismos. Por ello la superficie trasera de la pieza estará sobre un único plano, el cual se imprimirá sobre la cama de la impresora 3D.

La impresión 3D de las piezas rígidas se ha realizado en PLA mediante una impresora *BCN3D sigma*. La configuración que se escoge para la impresión, realizada con el software específico de la impresora, *BCN3D CURA*, es: 0,2mm de altura de capa, 1,2mm de grosor de las capas externas verticales (Shell thickness), 1mm para las capas externas horizontales y una densidad del 20%. Se imprime a una velocidad de 60mm/s, a una temperatura de 205º para el extrusor y de 55º para la cama. El resultado de la impresión de las piezas que conforman el dedo híbrido puede verse en la Figura 2.20. Se ha utilizado tornillería de métricas M1,4, M2,5 y M4, según se recoge en la Figura 2.21. La tornillería será simétrica a ambos lados de la pinza, exceptuando que solo

## 2. MODELADO E IMPLEMENTACIÓN

---

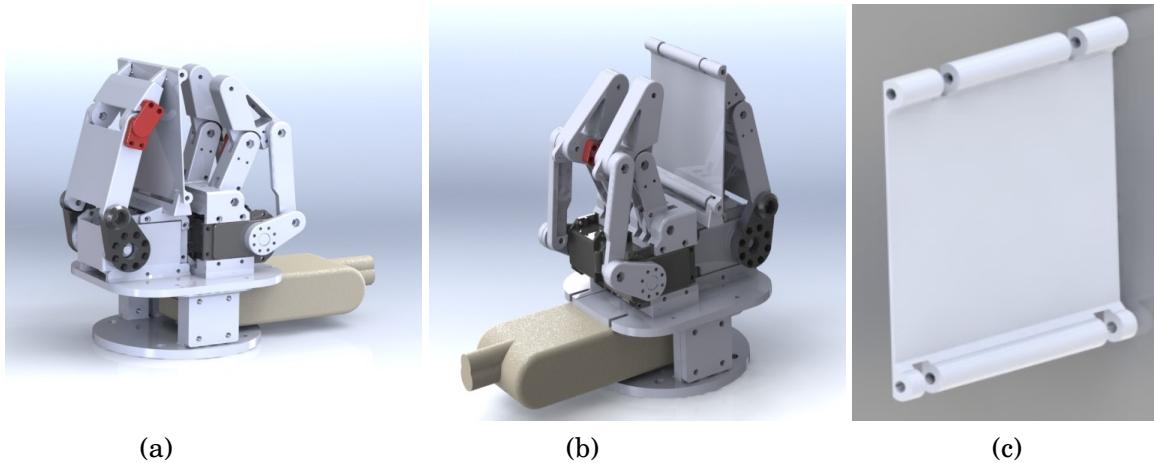


Figura 2.18: Modelo final de la pinza con la pieza flexible de PTEG. Vista frontal-lateral izquierdo, siendo visible la colocación de los cubre-potenciómetros (a). Modelo final de la pinza con la pieza flexible de PTEG. Vista frontal-lateral derecho (b). Modelo de pieza flexible para su impresión en PTEG (c).

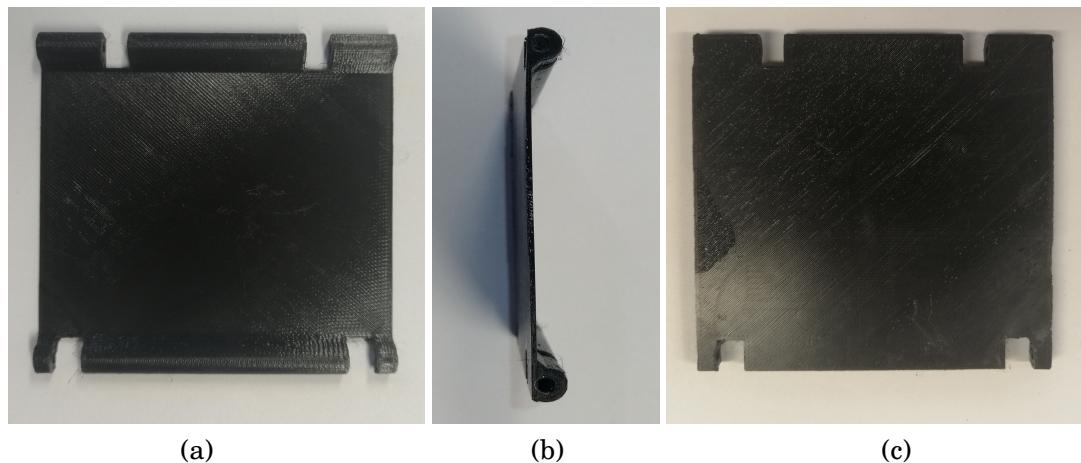


Figura 2.19: Pieza flexible impresa en PTEG color negro. Vista frontal principal (a). Pieza flexible impresa en PTEG color negro. Vista de perfil en la que puede apreciarse el grosor de 1mm (b). Pieza flexible impresa en PTEG color negro. Vista trasera (c).

Simbología tornillería	Métrica	Cantidad en dedo híbrido
●	M 1,4	4
●	M 2,5	26
●	M 4	2

Tabla 2.2: Descripción de la tornillería utilizada para el ensamblaje del dedo híbrido.

será necesario colocar un potenciómetro en uno de los lados, por lo que esta tornillería solo se implementará a un lado.

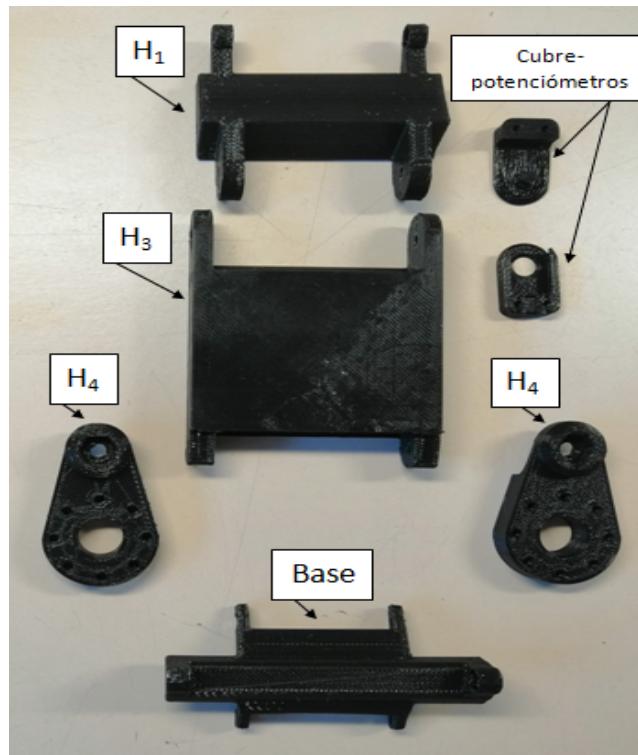


Figura 2.20: Conjunto de piezas rígidas impresas en PLA, color negro, previo montaje.

Tras haber encontrado una estructura rígida para el dedo híbrido se han decidido estudiar las posibilidades de modificar el dedo híbrido mediante la incorporación de distintos tipos de pieza flexible. Por ello se opta por experimentar con una pieza flexible de material FLEX, utilizado en versiones anteriores de la pieza flexible. Para ello se ha optado por diseñar una pieza flexible con



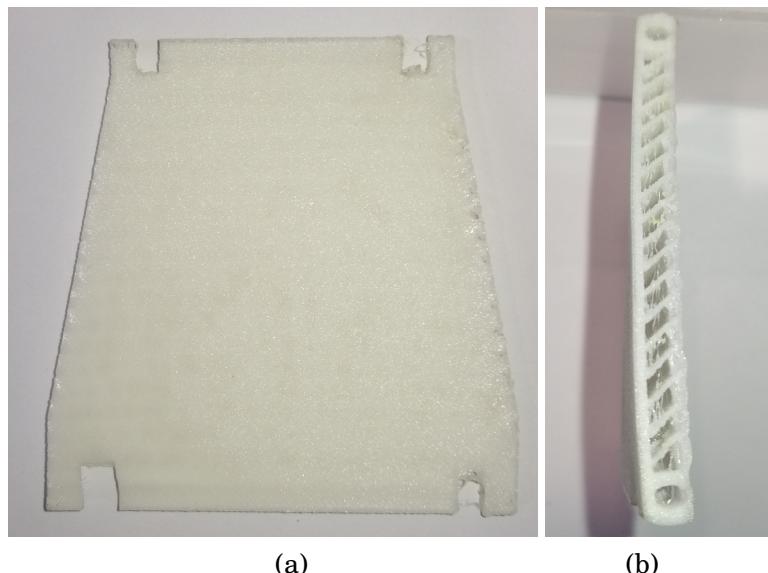
Figura 2.21: Esquema de colocación de tornillos según la simbología especificada en la Tabla ???. No será necesario el uso de tuercas para la unión de la pinza con el eje móvil del servomotor, en la parte inferior de los eslabones  $H_4$  ni para la unión de los cubre-potenciómetros, sí se utilizarán en el resto de casos.

una estructura tipo sándwich, de forma que se intenta llegar a un compromiso entre flexibilidad y rigidez, no conseguido hasta el momento con el uso del material FLEX en los anteriores diseños. En la Figura 2.22 se muestra el diseño 3D realizado para su impresión.

Para cerrar este capítulo de modelado 3D e implementación se muestra en la Figura 2.24 una comparación de la pinza diseñada montada con la pieza flexible de PTEG, en la Figura 2.24 (a), y con la pieza flexible de material FLEX, en la Figura 2.24 (b).



Figura 2.22: Modelo de pieza flexible tipo sándwich para su impresión en material FLEX.



(a)

(b)

Figura 2.23: Pieza flexible impresa en material FLEX blanco con una estructura que busca aumentar la rigidez de la pieza impresa con material FLEX sin perder su adaptabilidad y flexibilidad. Vista frontal. La vista trasera coincide con la frontal, pues su superficie exterior es igual en ambas caras (a). Pieza impresa en material FLEX blanco. Vista de perfil. Puede observarse la estructura diseñada entre las superficies exteriores de la pieza (b).

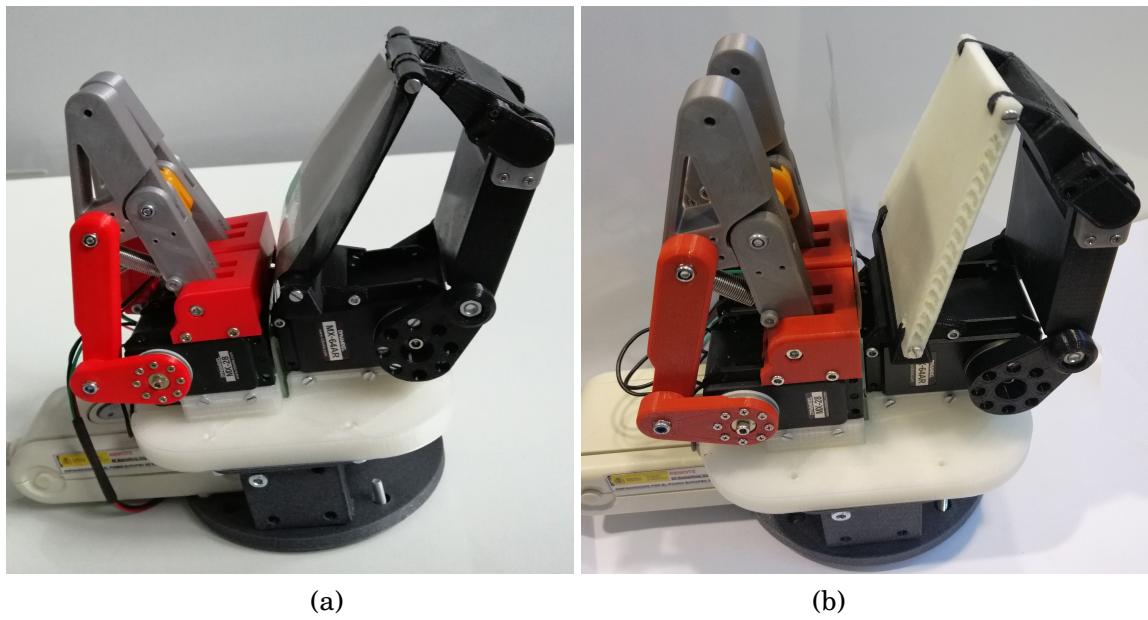


Figura 2.24: Montaje del prototipo final de la pinza con la pieza flexible de PTEG (a). Montaje del prototipo final de la pinza diseñada con la pieza flexible de material FLEX (b).

# 3

## PERCEPCIÓN HÁPTICA

**E**n este capítulo se detalla la sensorización de la pinza, así como los propósitos a conseguir mediante ella. Se describen los sensores utilizados y su modo de funcionamiento.

### 3.1 Percepción háptica aplicada a la pinza robótica

La percepción háptica, o tacto activo, puede considerarse como la suma de dos componentes, la percepción táctil y la kinestésica. La percepción táctil es la responsable de la adquisición de información mediante un tacto pasivo, en el que el receptor recibe información táctil del objeto tocado sin realizar movimientos sobre él o inspeccionarlo de otro modo. En el caso de la pinza diseñada, el sensor encargado de percibir esta información es el sensor de mapeo de presión, que recoge información cuando la superficie de la pinza entra en contacto con un objeto. Por otro lado, la percepción kinestésica recaba información proprioceptiva, relacionada con la posición en la que se encuentra el propio sistema que realiza el proceso de percepción. Para dotar a la pinza de una percepción kinestésica se opta por realizar lecturas de la posición relativa entre los eslabones  $H_1$  y  $H_3$  que la conforman y, a partir de esta información poder aproximar la curvatura descrita por la pieza flexible,  $H_2$ , a partir de la obtención previa de un modelo de comportamiento que relacione el ángulo de los eslabones con el comportamiento de la pieza flexible. Para realizar estas lecturas se ha decidido utilizar un potenciómetro, además de registrar la posición del eje del actuador responsable del movimiento de cierre de la pinza. Finalmente, será la combinación del sensor de mapeo de presión junto con el potenciómetro y la lectura del ángulo del eje del actuador lo que dote a la pinza robótica de percepción háptica.

### 3. PERCEPCIÓN HÁPTICA

---

#### 3.1.1 Sensor táctil

En el segundo experimento llevado a cabo en el capítulo 4 se utiliza el sistema *I-Scan* de *Tekscan*. Este sistema cuenta con un sensor de mapeo de presión, un dispositivo de electrónica de adquisición de datos y un software para la captura y muestra de los mapas de presión registrados. En el experimento llevado a cabo se utiliza el sensor modelo 5051 de *Tekscan*, mostrado en la Figura 3.1. Este modelo cuenta con un total de 1936 sensels resistivos de presión, distribuidos con una resolución espacial de 62 sensels por  $cm^2$ . La matriz de sensels, mostrada en la Figura 2.8 (b), tiene unas dimensiones de 55,9 mm x 55,9 mm, contando con un espaciado entre filas y entre columnas de 1,3 mm. El rango de presión de trabajo del sensor es de 48 kPa a 172.375 kPa.



Figura 3.1: Fotografía del sensor táctil modelo 5051 de *Tekscan*. A la derecha se encuentra la matriz de sensel y, a la izquierda, la zona de conexión con el dispositivo de adquisición de datos.

#### 3.1.2 Ángulo del actuador

En el caso de los dedos rígidos el actuador que se ha seleccionado es un servomotor *Dynamixel* MX-28, que cuenta con un encoder magnético con 12 bits, con una resolución de 0,088º. El software necesario para su control y movimiento se puede encontrar en la documentación adjunta a este trabajo, en su versión digital en CD. Para el dedo híbrido se opta por un servomotor *Dynamixel* MX-64AR, mostrado en la Figura 3.2, que comparte las características con el modelo MX-28 del encoder e 12 bits y la resolución de 0,088º. El modelo seleccionado para el dedo híbrido cuenta con un eje libre en el lado opuesto al eje controlado por el servomotor, de modo que a pesar de que el dedo híbrido es diseñado con dos eslabones  $H_4$  de unión entre el servomotor y el eslabón  $H_3$ , solo es de uno de los lados estará motorizado, mientras que el otro se moverá libremente conducido por el movimiento de la pinza.



Figura 3.2: Fotografía del servomotor *Dynamixel MX-64AR*. Se muestra el eje motorizado.

### 3.1.3 Potenciómetro para posición relativa entre eslabones rígidos

Entre los eslabones  $H_1$  y  $H_3$  se posiciona un potenciómetro para realizar lecturas del ángulo formado por ambos eslabones. El potenciómetro que se introduce en el diseño es un potenciómetro en miniatura *muRata* modelo SV01 10k $\Omega$  lineal, mostrado en la Figura 3.3.



Figura 3.3: Fotografía del potenciómetro *muRata* modelo SV01 10k $\Omega$  lineal.



# 4

## EXPERIMENTOS Y RESULTADOS

**E**n este capítulo se describen los experimentos realizados para obtener un modelo del comportamiento de la pinza, caracterizando para ello las piezas flexibles impresas, y se presentan los resultados obtenidos. Se compara el resultado experimental con el obtenido mediante simulación en SolidWorks. En un segundo experimento de caracterización se toman imágenes del sensor de presión colocado en la pinza híbrida mientras esta agarra un antebrazo.

### 4.1 Primer experimento: Esfuerzo a flexión

En este primer experimento se ha sometido a las piezas flexibles de material FLEX y de PTEG a un esfuerzo de flexión y se ha comparado el comportamiento de ambas, observando también cómo el comportamiento real se relaciona con el descrito mediante simulación.

#### 4.1.1 Descripción del experimento

El experimento llevado a cabo para la caracterización de las piezas flexibles y la comparación de sus propiedades se basa en someterlas a un esfuerzo a flexión. Para ello se ha procedido a ejercer una fuerza puntual en el centro de la pieza, manteniendo fijos los extremos que conforman los ejes de unión de la pieza con los eslabones rígidos. En la Figura 4.1 se muestra un esquema del procedimiento descrito. Para llevar a la práctica este experimento se hace uso de una balanza digital, a la que se le atornilla un eje de forma que los Newtons de fuerza ejercida sobre la pieza a través de dicho eje quedan registrados con la balanza. Se ha medido la deformación de la pieza flexible en el eje de acción de la fuerza y se ha estudiado su relación con la fuerza ejercida, el material y diseño de la pieza. En la Figura 4.2 se muestra el montaje del experimento

#### 4. EXPERIMENTOS Y RESULTADOS

---

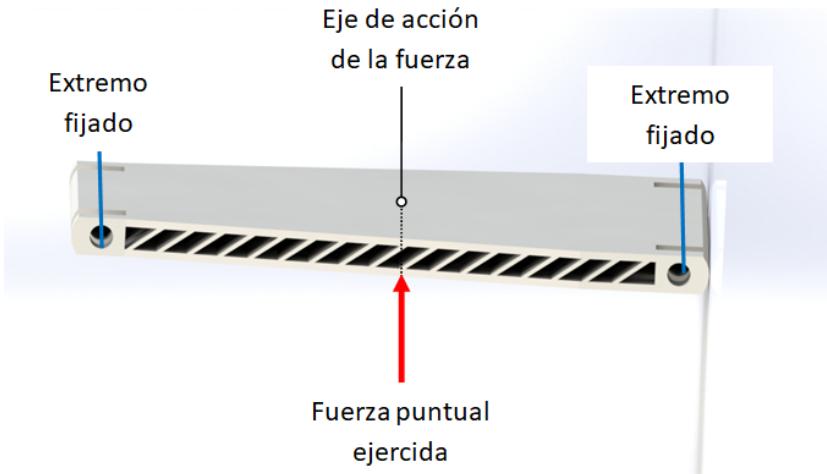


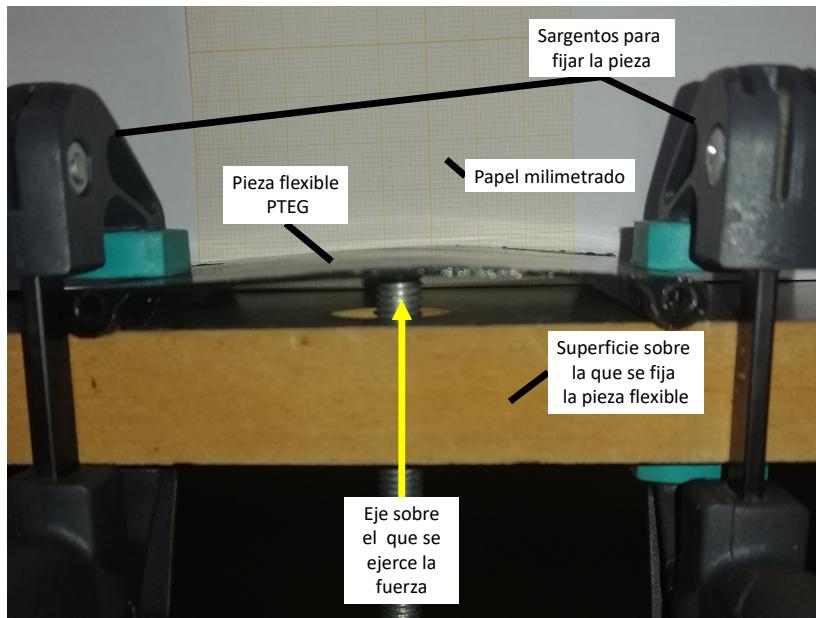
Figura 4.1: Diseño y explicación del experimento llevado a cabo para la caracterización de las piezas flexibles. Se muestran los extremos de la pieza que serán fijados y la dirección y el sentido de la fuerza ejercida.

realizado para la pieza flexible de material FLEX. Para sujetar la pieza flexible de material FLEX se han utilizado sargentos fijados a una mesa de trabajo que cuenta con orificios, uno de los cuales se ha utilizado para introducir el eje unido a la balanza digital. Dicho eje puede observarse en la Figura 4.2 bajo la flecha amarilla indicadora de la dirección y el sentido de la fuerza ejercida. Perpendicularmente a la superficie plana de la pieza flexible se sitúa una hoja de papel milimetrado, de forma que permite recoger la deformación de la pieza en el eje de acción de la fuerza.

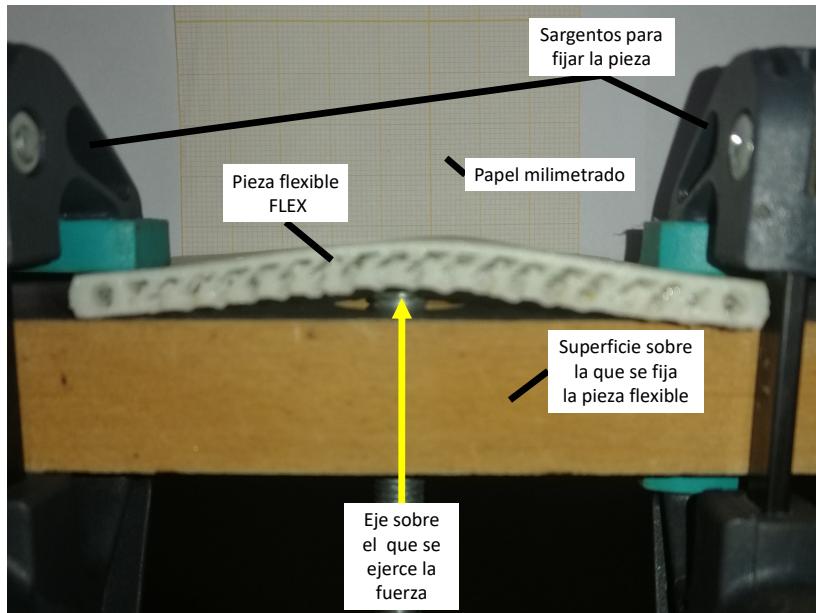
Se han realizado mediciones cada 4 Newtons de fuerza aplicados sobre las piezas, hasta alcanzar los 24 Newtons de fuerza. Se decide realizar mediciones hasta dicho límite para no ocasionar la ruptura ni deterioro de las piezas flexibles, pues no quiere llevarse a las piezas hasta su punto de ruptura.

##### 4.1.2 Simulación del experimento

Se ha procedido a realizar una simulación de la aplicación de fuerzas sobre las piezas flexibles diseñadas, haciendo uso de la función de simulación de SolidWorks. Como la licencia de la que se dispone de SolidWorks es una versión para estudiantes no cuenta con la posibilidad de realizar un análisis de materiales anisótropos, como es el caso de las piezas producidas mediante impresión 3D. Por ello cabe esperar que el modelo obtenido mediante simulación no se ajuste de manera exacta a los datos recogidos mediante experimentación. Las propiedades de las piezas reales dependerán de la dirección en la que se hayan impreso las capas que las conforman, de la configuración elegida para la impresión y de la impresora utilizada para su fabricación, por lo



(a)



(b)

Figura 4.2: Fotografía explicativa del experimento realizado para caracterizar la pieza flexible de PTEG. Se muestra el eje mediante el cual se ejerce una fuerza sobre la pieza, la pieza flexible de PTEG, la superficie sobre la que se fija la pieza, el papel milimetrado para medir los desplazamientos y los sargentos utilizados para fijar la pieza (a). Fotografía explicativa del experimento realizado para caracterizar la pieza flexible de material FLEX. Se muestra el eje mediante el cual se ejerce una fuerza sobre la pieza, la pieza flexible de material FLEX, la superficie sobre la que se fija la pieza, el papel milimetrado para medir los desplazamientos y los sargentos utilizados para fijar la pieza (b).

#### 4. EXPERIMENTOS Y RESULTADOS

---

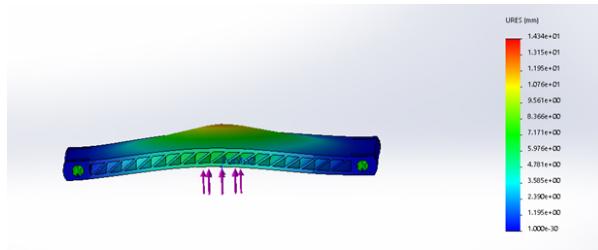


Figura 4.3: Simulación realizada en SolidWorks para la pieza flexible de material FLEX, aplicando una fuerza de 24N. Se muestran los desplazamientos producidos por la fuerza ejercida (flechas moradas).

que a pesar de que puede utilizarse el modelo de simulación de SolidWorks para aproximar la respuesta de las piezas, no será un modelo completamente fiel a la realidad.

Para realizar la simulación de fuerzas sobre las piezas se han definido los modelos como isotrópicos lineales, debido a las limitaciones del software. Para simular la pieza de material FLEX se ha escogido unas propiedades de un módulo de elasticidad de 6,37 MPa, un coeficiente de Poisson de 0,45 y una densidad de  $1210\text{kg/m}^3$ . Para la pieza de PTEG se ha escogido un módulo de elasticidad de 80 MPa, un coeficiente de Poisson de 0,4 y una densidad de  $1200\text{kg/m}^3$ . En ambos casos se definen las sujeciones como bisagras fijas. Cada pieza consta de dos sujetos, uno en cada uno de los ejes de unión de las piezas flexibles con el resto de eslabones de la pinza. Para reproducir el experimento realizado se ha definido una superficie de acción de la fuerza que actuará perpendicular a la superficie de las piezas. Se ha considerado una circunferencia de 10 mm de diámetro sobre la que se ejerce la fuerza de valor variable. En la Figura 4.3 puede observarse el resultado de la simulación para el caso de la pieza de material FLEX sometida a una fuerza de 24N. En la Gráfica 4.4 se recogen los resultados del análisis completo realizado mediante simulación para la pieza flexible de material FLEX, al igual que un ajuste lineal y un ajuste cúbico de los resultados obtenidos y los datos experimentales para su comparación.

En la Figura 4.5 puede observarse el resultado de la simulación para el caso de la pieza de material FLEX sometida a una fuerza de 24N. En la Gráfica 4.6 se recogen los resultados del análisis completo realizado mediante simulación para la pieza flexible de material FLEX, al igual que un ajuste lineal y un ajuste cúbico de los resultados obtenidos y los datos experimentales para su comparación.

##### 4.1.3 Relación fuerza-desplazamiento

Una de las formas de caracterizar el comportamiento de la superficie flexible del dedo híbrido consiste en obtener la relación fuerza-desplazamiento. Para medir esta relación se realiza el experimento descrito previamente, de forma que se visualiza la diferencia del comportamiento a flexión de las dos piezas flexibles.

En la Figura 4.7 se muestran las deformaciones de la pieza impresa en material FLEX y de la

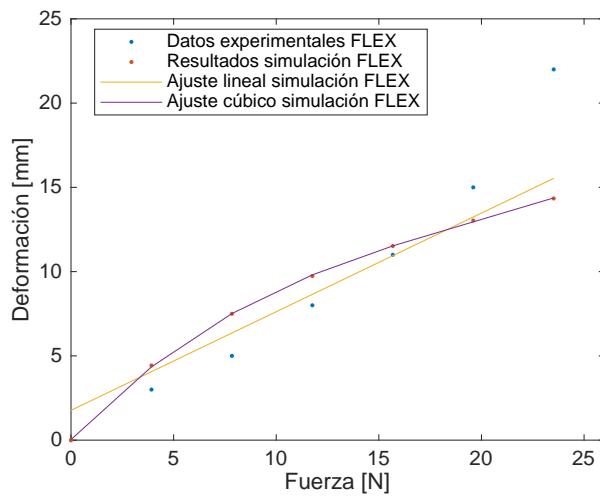


Figura 4.4: Resultados de la simulación de la respuesta de la pieza flexible de material FLEX frente a esfuerzos de flexión, comparados con los resultados experimentales obtenidos.

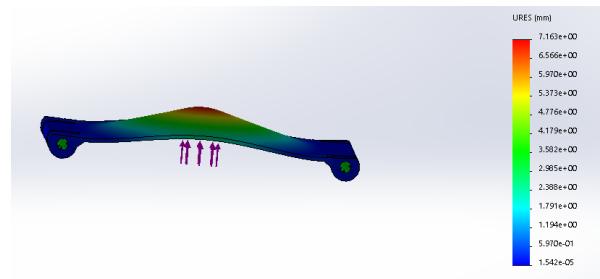


Figura 4.5: Simulación realizada en SolidWorks para la pieza flexible de PTEG, aplicando una fuerza de 24N. Se muestran los desplazamientos producidos por la fuerza ejercida (flechas moradas).

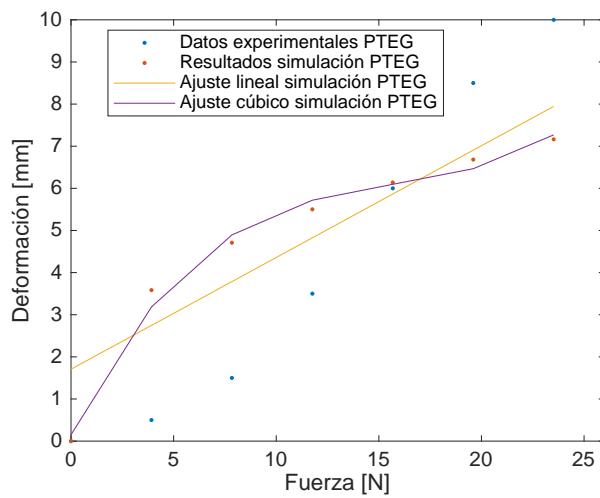


Figura 4.6: Resultados de la simulación de la respuesta de la pieza flexible de PTEG frente a esfuerzos de flexión, comparados con los resultados experimentales obtenidos.

#### 4. EXPERIMENTOS Y RESULTADOS

---

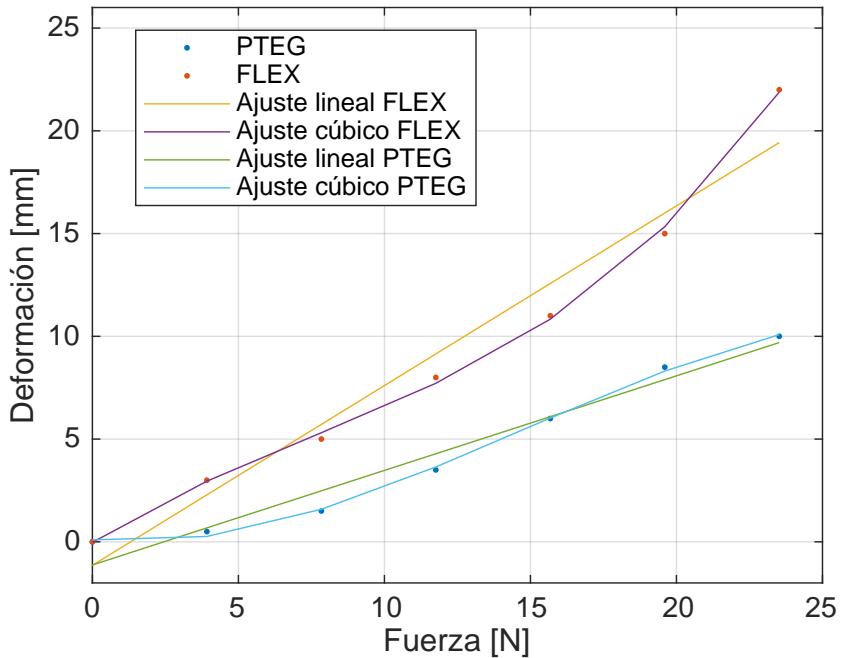


Figura 4.7: Representación de las curvas de comportamiento a flexión de la piezas flexibles de material FLEX y de PETG.

pieza impresa en PTEG frente a la acción de fuerzas perpendiculares a su superficie de agarre. En la imagen se representan, además de los datos obtenidos en los experimentos, un ajuste lineal y un ajuste de tercer orden de las curvas de comportamiento de las piezas.

$$\delta_{FLEX}^l(F) = 8,7F - 1,1$$

$$\delta_{PETG}^l(F) = 4,6F - 1,1$$

$$\delta_{FLEX}^p(F) = 1,8F^3 - 4,2F^2 + 8,9F - 0,024$$

$$\delta_{PETG}^p(F) = 1,2F^3 - 5,1F^2 - 1,4F - 0,095$$

Donde  $F$  representa a la fuerza ejercida perpendicular a la superficie de las piezas, y  $\delta_{PETG}^l$  y  $\delta_{FLEX}^l$  representan la deformación de las piezas de PETG y FLEX, respectivamente. El superíndice  $l$  hace referencia al resultado de la regresión lineal, mientras que el superíndice  $p$  hace referencia al resultado de la regresión polinomial de tercer orden.

## 4.2 Segundo experimento: Distribución de presiones

Para obtener información sobre la adaptabilidad de la superficie flexible cuando se está agarrando un antebrazo, se ha realizado un experimento en el que se han tomado diferentes imágenes de presión realizando agarres del brazo de un sujeto con las piezas de PETG y FLEX.



Figura 4.8: Esquema del sensor de mapeo de presión *Tekscan* (*Fuente: [6]*).

#### 4.2.1 Descripción del experimento

Este experimento consiste en la lectura de presiones del sensor durante la acción de la pinza de agarrar un antebrazo. El sensor utilizado es un sensor mapeador de presión *Tekscan 5051*, cuyo montaje se ejemplifica en la Figura 4.8. El sensor consta de una matriz de tactels que recogen la lectura de presión en cada uno de ellos. Esta información es procesada por el lector del sensor, que es conectado en el extremo de este y que lo comunica con el software de interpretación presente en el ordenador. Se obtiene así una matriz de puntos en los que se ha registrado un valor de presión.

#### 4.2.2 Lecturas de presión

En la Figura 4.10 se muestran las matrices de lecturas de presión del sensor sobre las piezas flexibles para un caso en el que la pinza no ejerce y ejerce su cierre al rededor del brazo.

### 4.3 Discusión de los resultados

En base a las curvas fuerza/desplazamiento obtenidas, se puede asegurar que la pieza de material FLEX posee mayor flexibilidad que la pieza de material PETG. Además, al realizar el experimento, se ha comprobado que la pieza de material FLEX es capaz de soportar fuerzas superiores a 25 N, sin embargo, a partir de ese valor, la pieza de PETG se puede llegar a romper.

Por otro lado, a partir de los resultados obtenidos de las imágenes de presión se puede obtener la superficie de contacto dividiendo el número de tactels distintos de 0 entre la densidad del sensor  $\kappa$ , en este caso  $\kappa = 62 \text{ tactels/cm}^2$ . Tal y como se muestra en la siguiente ecuación, en la

#### 4. EXPERIMENTOS Y RESULTADOS

---



Figura 4.9: Fotografía de la pinza con un brazo posicionado en el lugar de agarre.

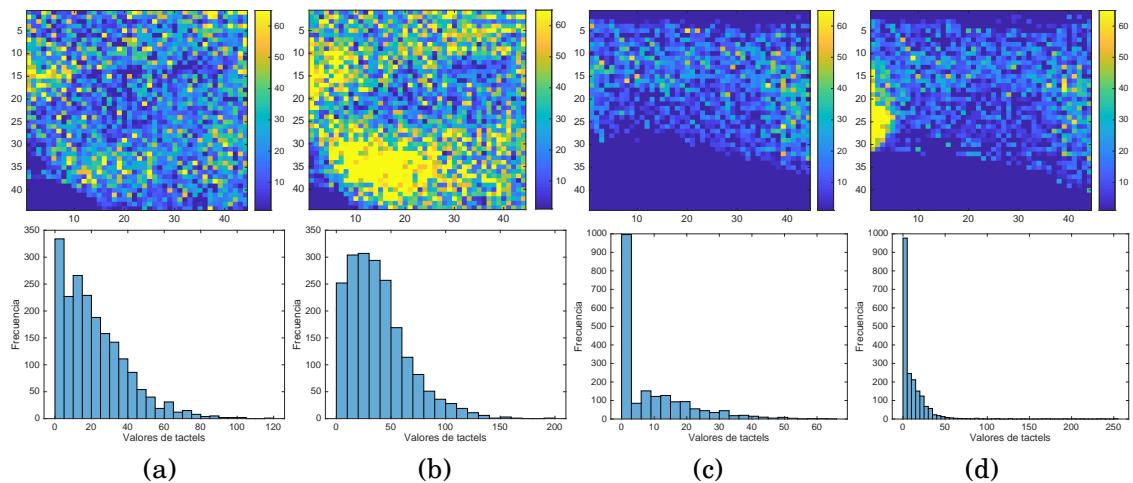


Figura 4.10: Lectura e histograma del sensor de presión para la pieza en material FLEX sin que la pinza se cierre, posicionando sobre ella un antebrazo (a). Lectura e histograma del sensor de presión para la pieza en material FLEX con la pinza cerrándose sobre un antebrazo (b). Lectura e histograma del sensor de presión para la pieza en material PETG sin que la pinza se cierre, posicionando sobre ella un antebrazo (c). Lectura e histograma del sensor de presión para la pieza en material PETG con la pinza cerrándose sobre un antebrazo (d).

que  $\mathcal{I}(t)$  es el valor del tactel  $t$  de la imagen de presión  $\mathcal{I}$ , y  $\tau$  es el número total de tactels del sensor, en este caso,  $\tau = 1936$  tactels.

$$S = \frac{\sum_{t=0}^{\tau} \mathcal{I}(t) \neq 0}{\kappa}$$

En el caso de la pieza de material FLEX se ha medido un área de contacto de  $66,12 \text{ cm}^2$  cuando la pinza se cierra sobre el brazo. Sin embargo, para el caso de la pieza de PTEG se obtiene un área de contacto de  $40,94 \text{ cm}^2$ , por lo que se demuestra que la pieza de material FLEX se adapta mejor al objeto en contacto. Sin embargo, en las imágenes táctiles de la Figura 4.10 puede observarse que, debido a esta mayor adaptabilidad, es más difícil distinguir la forma del antebrazo agarrado, ya que gran parte de la superficie del sensor está en contacto con el brazo, a diferencia de lo que ocurre con el PETG.



# 5

## CONCLUSIONES

**E**n este trabajo se ha presentado un modelo de pinza robotizada híbrida rígida-flexible, subactuada y sensorizada para tareas de pHRI que requieran manipular extremidades humanas, centrándonos en un diseño apto para el agarre del antebrazo. Este modelo combina las características de agarre que ofrecen tanto las pinzas rígidas subactuadas como las pinzas blandas. Se han especificado las condiciones de diseño y se ha presentado el modelo 3D de la pinza. Además, se ha presentado el montaje definitivo, con dos dedos rígidos subactuados y un dedo híbrido con la superficie de contacto flexible. Se han realizado experimentos de caracterización y validación del comportamiento de la pinza con dos piezas flexibles de diferentes materiales y estructuras. Los resultados demuestran que tanto el PETG como el FLEX son aptos para el agarre y manipulación del antebrazo de personas, sin embargo, se ha demostrado que con el FLEX se obtiene mayor flexibilidad, robustez y superficie de contacto. Sin embargo, la mayor flexibilidad del FLEX puede ser un impedimento para el agarre del antebrazo, ya que ambas superficies son deformables. En futuros trabajo se realizarán experimentos con más materiales y diseños que proporcionen distinta rigidez a fin de encontrar un diseño óptimo para la manipulación de extremidades humanas. Por otro lado, se investigará la posibilidad de integrar dedos con dureza y fricción variables.



# 6

## FUTUROS TRABAJOS

**F**uturas líneas de trabajo con esta pinza incluirían la realización de lecturas del sensor de presión al agarrar un antebrazo humano y el control del funcionamiento de la pinza a través de la interpretación de esta información junto con la proporcionada mediante los potenciómetros, haciendo uso así de la percepción háptica de la pinza. Una posibilidad es la de controlar la forma y posición de la pieza flexible mediante sensores magnéticos que recojan la distancia entre esta pieza y los eslabones rígidos, de forma que se sustituya o complemente la información aportada por los potenciómetro. Otra rama de trabajo derivada del concepto de pinza híbrida es la del estudio del funcionamiento de la pinza con el uso de distintos tipos de materiales flexibles y adaptables, entre los que puede encontrarse el uso de materiales esponjosos que varíen su rigidez en función de la presión a la que son sometidos mediante aire.



## REFERENCIAS

- [1] G. Salvietti, Z. Iqbal, I. Hussain, D. Prattichizzo, and M. Malvezzi. The co-gripper: A wireless cooperative gripper for safe human robot interaction. In *2018 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS)*, pages 4576–4581, Oct 2018.
- [2] B. Gao, S. Yang, H. Jin, Y. Hu, X. Yang, and J. Zhang. Design and analysis of underactuated robotic gripper with adaptive fingers for objects grasping tasks. In *IEEE International Conference on Robotics and Biomimetics (ROBIO)*, pages 987–992, 2016.
- [3] Festo. <https://www.festo.com>. Fecha de acceso: 03-06-2019.
- [4] J. M. Gandarias, A. J. García-Cerezo, and J. M. Gómez-de-Gabriel. CNN-based methods for object recognition with high-resolution tactile sensors. *IEEE Sensors Journal*, 2019.
- [5] Juan M. Gandarias, Jesús M. Gómez de Gabriel, and Alfonso García-Cerezo. Enhancing perception with tactile object recognition in adaptive grippers for human–robot interaction. In *Sensors*, 2018.
- [6] Tekscan. <https://www.tekscan.com>. Fecha de acceso: 02-06-2019.
- [7] Kensuke Harada, Kazuyuki Nagata, Juan Rojas, Ixchel G. Ramirez-Alpizar, Weiwei Wan, Hiromu Onda, and Tokuo Tsuji. Proposal of a shape adaptive gripper for robotic assembly tasks. *Advanced Robotics*, 30(17-18):1186–1198, 2016.
- [8] D. Gallenberger, T. Bhattacharjee, Y. Kim, and S. S. Srinivasa. Transfer depends on acquisition: Analyzing manipulation strategies for robotic feeding. In *ACM/IEEE International Conference on Human-Robot Interaction (HRI)*, pages 267–276, 2019.
- [9] B. Chen, Q. Wang, and L. Wang. Adaptive slope walking with a robotic transtibial prosthesis based on volitional emg control. *IEEE/ASME Transactions on Mechatronics*, 20(5):2146–2157, 2015.
- [10] J. Fasola and M. J. Mataric. Using socially assistive human–robot interaction to motivate physical exercise for older adults. *Proceedings of the IEEE*, 100(8):2512–2526, 2012.
- [11] V. Vitiello, S. Lee, T. P. Cundy, and G. Yang. Emerging robotic platforms for minimally invasive surgery. *IEEE Reviews in Biomedical Engineering*, 6:111–126, 2013.

## REFERENCIAS

---

- [12] Tetsuya Tanioka. Nursing and rehabilitative care of the elderly using humanoid robots. *The Journal of Medical Investigation*, 66(1.2):19–23, 2019.
- [13] Joseph Andrew Pepito and Rozzano Locsin. Can nurses remain relevant in a technologically advanced future? *International Journal of Nursing Sciences*, 6(1):106 – 110, 2019.
- [14] Ramón González, Francisco Rodríguez, and José Luis Guzmán. Robots móviles con orugas historia, modelado, localización y control. *Revista Iberoamericana de Automática e Informática Industrial RIAI*, 12(1):3 – 12, 2015.
- [15] S. A. Bowyer and F. Rodriguez y Baena. Dissipative control for physical human–robot interaction. *IEEE Transactions on Robotics*, 31(6):1281–1293, 2015.
- [16] A. H. Memar, N. Mastronarde, and E. T. Esfahani. Design of a novel variable stiffness gripper using permanent magnets. In *IEEE International Conference on Robotics and Automation (ICRA)*, pages 2818–2823, 2017.
- [17] A. Stilli, L. Grattarola, H. Feldmann, H. A. Wurdemann, and K. Althoefer. Variable stiffness link (vsl): Toward inherently safe robotic manipulators. In *IEEE International Conference on Robotics and Automation (ICRA)*, pages 4971–4976, 2017.
- [18] Franciso J. Ruiz-Ruiz, Juan M. Gandarias, Antonio J. Muñoz-Ramírez, Alfonso J. García-Cerezo, Francisco Pastor, and Jesús M. Gomez-de Gabriel. Monitorización de víctimas con manipuladores aéreos en operaciones de búsqueda y rescate. In *XXXIX Jornadas de Automática, Badajoz*, 09 2018.
- [19] J. M. Gómez-de-Gabriel, J. M. Gandarias, F. J. Pérez-Maldonado, F. J. García-Núñez, E. J. Fernández-García, and A. J. García-Cerezo. Methods for autonomous wristband placement with a search-and-rescue aerial manipulator. In *IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS)*, pages 7838–7844, 2018.
- [20] S. Funabashi, S. Morikuni, A. Geier, A. Schmitz, S. Ogasa, T. P. Torno, S. Somlor, and S. Sugano. Object recognition through active sensing using a multi-fingered robot hand with 3d tactile sensors. In *2018 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS)*, pages 2589–2595, Oct 2018.
- [21] J. M. Gandarias, J. M. Gómez-de-Gabriel, and A. García-Cerezo. Human and object recognition with a high-resolution tactile sensor. In *IEEE SENSORS*, pages 1–3, 2017.
- [22] A.T. Velázquez-Sánchez, E. Lugo-González, C. Torres-San-Miguel, and E.A. Merchán-Cruz. Síntesis de un mecanismo subactuado a partir de la función descriptiva del dedo índice. *Científica*, 13:95–103, 2009.

- [23] C.I. Basson, G. Bright, and A.J. Walker. Testing flexible grippers for geometric and surface grasping conformity in reconfigurable assembly systems. *South African Journal of Industrial Engineering*, 29:128 – 142, 00 2018.
- [24] Dalibor Petković, Shahaboddin Shamshirband, Nor Badrul Anuar, Aznul Qalid Md Sabri, Zulkanain Bin Abdul Rahman, and Nenad D. Pavlović. Input displacement neuro-fuzzy control and object recognition by compliant multi-fingered passively adaptive robotic gripper. *Journal of Intelligent & Robotic Systems*, 82(2):177–187, 2016.
- [25] Zbroja, Piotr, Szykiedans, Ksawery, and Credo, Wojciech. Flexible grippers for industrial robots - comparison of features of low-cost 3d printed component. *MATEC Web Conf.*, 254:02020, 2019.
- [26] M. Manz, S. Bartsch, M. Simnofske, and F. Kirchner. Development of a self-adaptive gripper and implementation of a gripping reflex to increase the dynamic payload capacity. In *International Symposium on Robotics (ISR)*, pages 1–7, 2016.
- [27] K. Xue, H. Qian, and Z. Sun. Design of an adaptive mini gripper for climbing robots. In *International Conference on Advanced Robotics and Mechatronics (ICARM)*, pages 618–623, 2018.
- [28] Z. Erickson, H. M. Clever, G. Turk, C. K. Liu, and C. C. Kemp. Deep haptic model predictive control for robot-assisted dressing. In *IEEE International Conference on Robotics and Automation (ICRA)*, pages 1–8, 2018.

