







Trabajo de Fin de Grado:

DESAROLLO DE HERRAMIENTAS DE AGARRE BASADAS EN ROBÓTICA BLANDA PARA ROBOTS MANIPULADORES COLABORATIVOS

Autor:

Miguel Argüelles Hortelano

Supervisión:

Antonio Barrientos Cruz Silvia Terrile

UNIVERSIDAD POLITÉCNICA DE MADRID ESCUELA TÉCNICA SUPERIOR DE INGENIEROS INDUSTRIALES DE MADRID CENTRO DE AUTOMÁTICA Y ROBÓTICA INDUSTRIAL

Agradecimientos

En primer lugar, el desarrollo de este trabajo habría sido imposible sin Silvia Terrile, mi tutora, que apostó por llevar un trabajo de fin de grado más práctico que teórico, y en el que he podido desarrollar mis habilidades de diseño y creatividad en la resolución de problemas prácticos. Además, me ha ayudado siempre que lo he necesitado y me ha dado un poco de espacio en las temporadas en las que estaba más agobiado.

Antonio Barrientos, que me ha ayudado a entender la capacidad de trabajo que puede llegar a desarrollar una persona además de darme consejos sobre la toma de decisiones en lo relativo al trabajo de fin de grado.

La asociación de estudiantes sin ánimo de lucro Reset, en la que me han ayudado con toda la impresión 3D y me han dejado su compresor para realizar los experimentos con las herramientas de agarre neumáticas. En especial Alfonso Salcedo, Óscar García e Iván Rodríguez.

Además querría agradecerles a algunos profesores a cuyas clases he asistido, que me han recordado que con la ingeniería uno se lo puede pasar genial, como María Jesús ... (Estadística y diseño de experimentos y modelos de regresión) e Ignacio Paniagua (Termodinámica II) para nombrar algunos.

A mi familia, que aunque no entiendan la mitad de las frases que digo e intentan que salga a la calle y que me dé un poco el aire en mis épocas de estudio, me han apoyado en todo mi recorrido y han celebrado conmigo mis éxitos y ayudado en mis fracasos.

A mis amigos etsiianos que me hayan aguantado tanto en mis momentos de estrés y desesperación, y en los que he encontrado personas con las mismas pasiones que yo y muy diferentes puntos de vista que han hecho que, como poco, me replantearse mis puntos de vista sobre el mundo, y en el peor de los casos, cambiarlos radicalmente. Podría escribir páginas enteras con los nombres de las personas que me han ayudado a llegar hasta aquí, Mario Martín, José Luis Millán, Raúl Herbada, Montserrat Díaz, Lucía García, Jesús Pareja, Paula Martín, María Martínez, Laura Bachiller, Cristina Escribano...

Sandra Romero y Ana Olmos, estar tirado a vuestro lado comiendo pizza y sin hacer nada es lo mejor.

Y la mejor, y mi compañera de carrera, con la que he conseguido no atender en clase cuando nos sentábamos juntos, y con la que he ido a conciertos y festivales (no todo en la vida es ingeniería, aunque en la ETSII intenten hacernos creer que si): Irene Suárez.

Abstract

La robótica blanda y, en concreto las herramientas de agarre basadas en ella, tienen un objetivo claro, relacionarse con su entorno sin causar daños. Esto se puede aplicar tanto a robótica colaborativa, evitando posibles daños causados a operarios y trabajadores por errores en los movimientos de los robots o por su propia actuación normal, como a la manipulación de objetos de características complejas. Estas pueden ser una gran fragilidad o capacidad de deformación. Estas propiedades pueden complicar el agarre de los objetos para las garras robóticas convencionales, ya sea porque no sean capaces de realizar el agarre o bien porque no pueden realizarlo sin dañarlos. Otra aplicación de las garras robóticas blandas consiste en el trabajo con diferentes tipologías de objetos sin cambios en los ajustes ni en la programación. Las herramientas blandas tienen una gran versatilidad y son capaces de coger una gran variedad de objetos, su principal limitación es el tamaño y el peso máximo de los mismos. Durante el desarrollo de este proyecto, se realizado una investigación bibliográfica del estado actual de las herramientas blandas de agarre y de su trayectoria desde su creación en los años 80. Se han seleccionado cuatro garras diferentes, dos de ellas con actuación neumática y dos electromecánicas. Se han diseñado y fabricado prototipos de cada una de ellas y posteriormente se han llevado a cabo pruebas experimentales para comprobar su funcionamiento en servicio. Para la experimentación se ha utilizado el robot Universal Robots 3, que dispone de una sencilla programación por guiado directo. Los experimentos se han llevado a cabo con doce objetos con diferentes propiedades, como capacidad de deformación, geometría, tamaño y peso. Los ensayos se han realizado en tres entornos diferentes, en condiciones normales, en un ambiente con polvo y en un ambiente húmedo.

Resumen

La robótica se ha implantado poco a poco en una gran cantidad de industrias como herramienta de apoyo a los trabajadores o como su reemplazo en tareas que requieren excesiva precisión o con un alto grado de monotonía. Una de las industrias que más robots consume actualmente es la industria automovilística, que utiliza los robots para una gran variedad de operaciones. En concreto los robots manipuladores son diseñados para trabajos repetitivos en cadenas de montaje, una de sus labores es colocar piezas sobre el chasis del coche para que otros robots las fijen de forma permanente. Para manipular estas piezas es necesaria una altísima precisión, por lo que las herramientas de agarre se diseñan en especial para cada pieza. Esto se hace posible porque la misma herramienta va a desempeñar la misma tarea durante un alto número de repeticiones y acaba siendo rentable. Sin embargo, cuando se cambia el modelo que se está fabricando es necesario reajustar y reprogramar dichas herramientas, lo que consume un elevado tiempo no productivo. Para las largas tiradas que se fabrican en la industria automovilística esto no representa grandes pérdidas. Esto no es así en muchísimas otras aplicaciones que se están desarrollando en los últimos años con la implantación de la robótica en otros entornos menos controlados.

Utilizando los principios de la robótica blanda se pueden desarrollar herramientas de agarre con una amplia versatilidad, que no precisan cambios en su programación ni construcción para manipular diferentes objetos y además reducen la precisión necesaria para realizar los agarres.

Durante el desarrollo de este proyecto se van a diseñar cuatro prototipos de herramientas de agarre basadas en robótica blanda, y se van a realizar una serie de experimentos para comprobar hasta qué punto estas garras son funcionales y versátiles. Se van a comparar todas ellas con una serie de objetos con unas caracteristicas definidas y no conocidas por el robot, de dimensiones dentro de los límites que las garras permiten, en tres entornos diferentes. Estos entornos son, en primer lugar, una zona de trabajo limpia y seca como escenario base, sobre la que se crean dos situaciones que se pueden dar en escenarios reales, que haya humedad en el ambiente y que haya una gran cantidad de polvo. Por ejemplo, en agricultura, uno de los principales campos de aplicación de la robótica blanda, es muy común que durante la recolección de frutas y verduras los productos estén cubiertos de tierra o polen, o que haya llovido recientemente y que los productos tengan una superficie mojada.

Las cuatro herramientas que se han elegido están inspiradas en diseños existentes, tanto en prototipos de investigación como productos comercializados actualmente. Para crear una muestra representativa de las herramientas blandas existentes, se van a crear dos de ellas con actuación neumática y dos con actuación electromecánica. El curso que sigue el proyecto pasa en primer lugar por una investigación del estado actual de la tecnología en el campo de la robótica blanda y en concreto de las herramientas de manipulación basadas en ella. A continuación, se aborda la selección de las garras que se quieren recrear y se procede a diseñarlas. A partir de los diseños se fabrican los prototipos de las cuatro garras y con ellos se realizan una serie de experimentos. De estos se extrae información para determinar cuál de las cuatro herramientas es la más versátil.

La primera garra neumática seleccionada es uno de los diseños sobre los que más bibliografía existe [1][2][3][4][5][6], y es una de las primeras herramientas blandas en estar disponible comercialmente. Consiste en un grupo de cuatro dedos de silicona, con una geometría determinada, que genera un movimiento de flexión en los dedos cuando se introduce aire a presión en ellos, y de extensión cuando se genera vacío en su interior. Los movimientos combinados de los dedos generan una garra que puede abrirse en su aproximación a un objeto y cerrarse en torno a él para agarrarlo. El contacto con los objetos es suave pero firme, lo que permite agarrar objetos frágiles o deformables sin dañarlos.



Figura 1: Herramienta neumática de agarre

La segunda herramienta neumática está basada en la "jamming transition" o bloqueo que sufren los materiales granulares al estar sometidos a presión. Para generar un movimiento de agarre con este fenómeno físico, se introduce en el interior de una cámara, fabricada con un polímero elastómero, un material granular. En este caso se ha utilizado café molido, que es el material que mejores resultados presenta en pruebas realizadas manualmente. Introduciendo aire a presión en la cámara se consigue que el contenido se comporte como un líquido, y presionando la cámara contra el objeto que se pretende agarrar se consigue que esta se deforme y adopte la forma de la superficie exterior del objeto. Una vez en esta situación se genera vacío en el interior de la cámara, lo que modifica el comportamiento del material granular, que se asemeja más a un sólido. En este momento el objeto se encuentra sujeto por la garra y lo seguirá estando mientras se mantenga el vacío. Para liberarlo basta con aumentar la presión en el interior de la cámara.



Figura 2: Herramienta neumática de agarre basada en materiales granulares

La tercera garra, de actuación electromecánica, consiste en tres dedos articulados actuados por cables inextensibles. Mediante el giro de un motor de corriente sobre el que se monta una polea a la que se fijan los cables, se consigue el movimiento de flexión de los dedos. Los distintos eslabones de cada dedo generan una estructura híperredundante que se adapta a la superficie de los objetos. Por la parte posterior de cada dedo se coloca un tensor elastico que se comporta como un tendón, generando el movimiento de extensión del dedo, para que cuando la polea gire en el sentido contrario los dedos vuelvan a su posición de extensión. Estos dos estados son los que permiten agarrar objetos. En primer lugar, se produce la aproximación al objeto y se gira la polea mediante un motor de corriente continua, que genera la flexión de los dedos alrededor del objeto. Una vez se revierta el sentido de giro del motor los dedos volverán automáticamente a su posición inicial y se soltará el objeto.



Figura 3: Herramienta electromecánica de agarre con dedos articulados

La última herramienta de agarre seleccionada se basa en la deformación de unas estructuras pasivas. Esta garra está formada por tres dedos, o estructuras pasivas, que se pueden deformar de forma elástica longitudinalmente, de forma que cuando los esfuerzos que están causando la deformación cesan, las estructuras vuelven a su estado inicial. Estos dedos son estructuras triangulares flexibles que en su interior contienen unas secciones rígidas. Mientras que las paredes de los dedos se pueden deformar libremente, su núcleo asegura que la distancia entre las paredes laterales se mantenga constante. Cuando los tres dedos se fuerzan sobre la superficie exterior de un objeto se adaptan y ejercen presión sobre ella. Debido a que el área de contacto es muy elevada, apenas se produce presión sobre la superficie. Mediante un mecanismo de husillo más tuerca se consigue la apertura y cierre de la garra, manteniendo un extremo de los dedos fijo en la base de la herramienta y moviendo el otro. Este movimiento vertical de la tuerca en el husillo hace que las puntas de los dedos se aproximen al centro de la garra. Para cerrar y abrir la herramienta basta con girar el husillo en un sentido u en otro, mediante un motor de corriente continua.



Figura 4: Herramienta electromecánica de agarre con estructuras pasivas

Para la experimentación se utiliza el robot UR3 de Universal Robots, para el que se han diseñado especialmente las bases de las cuatro herramientas de agarre. Los experimentos se realizan en tres entornos diferentes, en un ambiente normal, con exceso de humedad y con exceso de polvo. Este último se simula recubriendo tanto los objetos como la superficie de trabajo con una fina capa de harina.



Se han seleccionado doce objetos con diferentes propiedades físicas como tamaño, peso, rigidez o fragilidad. Los experimentos consisten en el agarre del objeto, el movimiento del robot y el movimiento de liberación. Si durante estas tres acciones el objeto no ha caído se considera que el agarre ha tenido éxito. Con cada objeto se realizan 20 repeticiones en cada entorno y para cada herramienta de agarre, lo que supone un total de 2.880 repeticiones. Además de este modo se puede comprobar que las garras siguen funcionando después de un considerable número de repeticiones.

Los resultados obtenidos se aproximan bastante a lo que se esperaba al principio del proyecto. Las dos mejores herramientas de agarre son la de los dedos de silicona y la que utiliza estructuras pasivas, con unas tasas de éxito globales del 85 % y 87 % respectivamente. La segunda garra neumática estaba en cierta desventaja con el resto por las limitaciones que impone sobre el tamaño de los objetos y obtuvo un 27 % de éxito, sin embargo, cabe destacar que en los objetos que sí era capaz de coger sus tasas de éxito no bajan del 58 %. Por último, la segunda herramienta electromecánica tiene claras limitaciones que se podrían solventar, al menos de forma parcial, modificando su diseño en una futura versión. Su tasa de éxito global resultó ser del 30 %.

Teniendo en cuenta las desventajas que suponen los sistemas neumáticos, la necesidad de disponer de aire a presión y el ruido que generan las bombas de vacío, para una instalación sencilla que no disponga ya de una fuente de aire a presión la mejor herramienta de agarre sería la electromecánica de las estructuras pasivas. Sin embargo, si ya se dispone de dichos instrumentos, la garra neumática de los dedos de silicona tiene varias ventajas, como su facilidad de limpieza y la sustitución de dedos. También en estado de reposo los dedos son mucho más blandos y deformables que las estructuras pasivas, con lo que en caso de choque con objetos o personas producen mucho menos daño que estas.

Palabras clave: Soft Robotics, robótica colaborativa, herramienta de manipulación, herramienta neumática, herramienta electromecánica, dedo flexible, material granular, dedo articulado y estructura pasiva.

Códigos UNESCO: 331302 (Compresores de Aire), 331322 (Equipo Neumático), 331314 (Máquinas Herramienta y Accesorios) y 330703 (Diseño de Circuitos).

Índice general

1	Int	troducción	3
	1.1	Objetivos del proyecto	4
	1.2	Estructura de la memoria	5
2	Es	tado del Arte	7
	2.1	Actuación neumática	8
	2.2	Actuación electro-mecánica	13
	2.3	Otros tipos de actuación	15
	2.4	Sensorización blanda	17
3	Di	seño y fabricación	19
	3.1	Sistema neumático	20
	3.2	Gripper 1	22
		3.2.1 Diseño y fabricación	24
		3.2.2 Problemas encontrados y soluciones propuestas	29
		3.2.3 Mejoras para versiones futuras	29
	3.3	Gripper 2	30
		3.3.1 Diseño y fabricación	32
		3.3.2 Problemas encontrados y soluciones propuestas	34
		3.3.3 Mejoras para versiones futuras	35
	3.4	Sistema mecánico	36
	3.5	Gripper 3	38
		3.5.1 Diseño y fabricación	39
		3.5.2 Problemas encontrados y soluciones propuestas	42
		3.5.3 Mejoras para versiones futuras	43

	3.6	Grippe	er 4	44		
		3.6.1	Diseño y fabricación	45		
		3.6.2	Problemas encontrados y soluciones propuestas	49		
		3.6.3	Mejoras para versiones futuras	49		
4	Co	ontrol		51		
	4.1	Univer	rsal Robots 3	51		
	4.2	Contro	ol neumático	53		
		4.2.1	Problemas encontrados y soluciones propuestas	53		
	4.3	Contro	ol electromecánico	54		
		4.3.1	Problemas encontrados y soluciones propuestas	55		
	4.4	Progra	amación UR3	56		
5	Experimentación					
	5.1	Plante	eamiento experimental	57		
	5.2	Objete	os para experimentación	58		
	5.3	Result	ados	64		
6	Di	n de resultados	67			
7	Conclusiones					
8	\mathbf{R}_{0}	eferencias y Bibliografía				
Ar	exc	os		7 5		
Ι	Pl	anifica	ción temporal y estudio económico	77		
	I.1	Planifi	cación temporal	77		
	I.2	Diagra	ama Gantt	78		
	I.3	Presup	puesto	79		
II	Pl	anos d	etallados y acotados	81		
III	III Índice de figuras y tablas					
IV	IV Glosario y Abreviaturas					

Capítulo 1

Introducción

La robótica es una ciencia precisa, rápida y controlada, programada al detalle para evitar errores e imperfecciones. Los movimientos son controlados y los resultados tienen una alta calidad. Pero cuando se saca a los robots de las fábricas y de los entornos controlados, se convierten en trozos de metal muy caros, pesados y, en general, bastante torpes. Siguiendo una evolución de millones de años, se puede observar que en la naturaleza la mayoría de seres vivos que interactúan con su entorno están compuestos por materiales blandos y deformables, dejando en segundo lugar a los materiales rígidos para formar las estructuras principales. La biomimética, utilizar a la naturaleza como fuente de inspiración para el desarrollo de nuevas tecnologías, es el camino que sigue la robótica blanda. Uno de los primeros sujetos en los que se inspiró es en el movimiento del pulpo, y cómo es capaz de utilizar simultáneamente sus tentáculos para motricidad y el agarre de cuerpos u objetos.

En las empresas se trabaja, cada vez más, con una variedad de productos más amplia, por ejemplo, en un almacén de productos para la venta online. Esta variedad de formas y tamaños impedía a la empresa automatizar sus procesos, ya que no existían soluciones en el mercado con la versatilidad demandada. La mayoría de las soluciones robóticas actuales se basan en elementos rígidos y complejos, acompañados por sistemas de visión por computador. Si una empresa cambia el producto que manipula, la reprogramación y reajuste de las herramientas de agarre supone cientos de horas, que se traducen directamente en pérdidas económicas para la empresa. La robótica blanda propone utilizar la ciencia de materiales como herramienta de resolución de problemas, en vez de los altos niveles de computación y complejidad que se han utilizado tradicionalmente. Esto supone una gran inversión a priori en investigación de nuevos materiales y en la simulación de los mismos para estudiar sus capacidades de deformación y adaptabilidad.

Uno de los campos de aplicación más claros es la agricultura. Con el crecimiento de la población mundial y con el aumento de capacidad adquisitiva media en los países desarrollados está aumentando la demanda global de comida. Este aumento de producción se produce al mismo tiempo que la reducción del número de trabajadores dispuestos a trabajar en agricultura. Esto se debe principalmente al duro espacio de trabajo y a la repetitividad de las tareas que se llevan a cabo, como la recolección de frutos. Poco a poco, la agricultura se ha ido robotizando, desde tractores de sembrado, cosechadoras automáticas... Pero los productos que recogen, de momento, son muy resistentes a los golpes y la abrasión, o no son importantes las imperfecciones. Por ejemplo, en la cosecha de trigo, cuyo producto no llega, en general, al consumidor directamente, sino que pasa por varios procesos en los que se transforma, como por ejemplo para conseguir harina de trigo.

A la hora de recolectar otro tipo de frutos, como tomates, pimientos y otras verduras, ya no es tan sencillo automatizar los procesos. Los productos deben llegar al consumidor prácticamente intactos ya que, si no, cuando tengan el mínimo defecto superficial, no se llegan a vender. Por este motivo los distribuidores no aceptan productos dañados, y esto retrocede en la cadena de producción hasta el agricultor, que no consigue vender la totalidad de su producción. Ante la posibilidad de automatizar su trabajo, no merece la pena la inversión inicial necesaria, por lo menos hasta que no se desarrollen las herramientas que aseguren un mínimo de productos sin defectos. Para esta aplicación la robótica blanda permite aportar una gran solución ya que, trabajando con materiales más baratos, ligeros, flexibles y adaptables a una gran variedad de objetos permite obtener mejores resultados con una menor capacidad computacional.

Otro gran campo de aplicación de la robótica blanda es en el desarrollo de robots colaborativos. Cuando una persona trabaja en contacto directo con un robot, se aumenta la velocidad de trabajo. Esto se debe a que se reducen los procedimientos de seguridad mínimos necesarias que garantizan la seguridad del trabajador. Por ejemplo, cuando un robot está en el interior de una jaula de seguridad y para intercambiar un objeto sin procesar por uno que el robot ya ha procesado es necesario parar el robot por completo, abrir la jaula, realizar el cambio, volver a cerrar la jaula y reactivar el robot. Todo este procedimiento podría eliminarse por completo si un error en la programación o cualquier otro fallo en el robot que supusiera un movimiento brusco o inesperado, al generar un choque con el trabajador, no generara un gran daño. Esto se puede conseguir trabajando con materiales flexibles y deformables, como siliconas o plásticos elastómeros, por ejemplo. Estos materiales además son más ligeros que los metales de los que se construyen tradicionalmente los robots, con esta reducción de masa, y para una misma velocidad de trabajo, se reduce la energía que se imprime en los impactos inesperados con el trabajador o con el entorno del robot. Estos avances en robótica colaborativa acercan esta ciencia al mundo de la enseñanza y al trabajo en pequeñas y medianas empresas. Estas pueden desarrollar sus productos con un prototipado más veloz y barato. En cuanto a la educación, es una herramienta perfecta para introducir a los niños a las nuevas tecnologías, y a que aprendan otros modos de expresión creativa. Además de iniciarles en la programación, una herramienta cada vez más demandada en el mundo laboral.

1.1. Objetivos del proyecto

En el desarrollo de este proyecto se pretende investigar la robótica blanda, su desarrollo pasado y presente y su implantación en el mercado actual, en concreto en el campo de las herramientas de agarre. También en la utilización de robots colaborativos y su programación por guiado. Se van a construir cuatro prototipos de herramientas de agarre, dos electromecánicas y dos neumáticas. Y posteriormente al diseño y fabricación se llevarán a cabo experimentos para comprobar su versatilidad y su capacidad de coger diferentes objetos tanto flexibles como rígidos de distintos tamaños y formas.

- Investigación preliminar
- Diseño y fabricación
- Experimentación
- Análisis de resultados

1.2. Estructura de la memoria

La memoria de este trabajo de fin de grado está dividida en varios capítulos y cuatro anexos:

- Capítulo 1: Introducción: Este mismo capítulo que sirve para introducir el proyecto, su motivación y su estrutura.
- Capítulo 2: Estado del arte: En él se describe el estado actual de las herramientas de manipulación basadas en robótica blanda, los diferentes prototipos que se han creado y que líneas de investigación se han seguido.
- Capítulo 3: Diseño y fabricación: El capítulo de diseño incluye los dos módulos neumático y electromecánico y el diseño en detalle de los cuatro prototipos seleccionados.
- Capítulo 4: ControlSe describe el control que es necesario realizar para manejar las garras, incluyendo una descripción del robot utilizado, el UR3, y las conexiones eléctricas que hay que realizar. También se incluye una descripción del programa que se carga al robot para la realización de los experimentos.
- Capítulo 5: Experimentación: En este capítulo se expone la experimentación que se ha llevado a cabo, tanto una descripción de la metodología seguida, número de repeticiones, entornos... como una descripción de los objetos que se pretende manipular.
- Capítulo 6: Discusión de resultados: Se describen los resultados obtenidos en la experimentación y algunas observaciones sobre las herramientas de agarre.
- Capítulo 7: Conclusiones: Se describen las ideas que se extraen a partir del diseño, fabricación y experimentación de las cuatro herramientas de agarre.
- Capítulo 8: Referencias y bibliografía: Utilizadas para la investigación sobre robótica blanda, en su mayoría para la redacción del capítulo 2.
- Anexo I: Planificación temporal y estudio económico: Se describe la programación temporal del proyecto, un diagrama Gantt y el presupuesto del proyecto.
- Anexo II: Planos detallados y acotados: Se incluyen los planos acotados de cada una de las piezas diseñadas, tanto para las herramientas como para los dos módulos mecánico y neumático.
- Anexo III: Índice de tablas y figuras.
- Anexo IV: Glosario y abreviaturas: Se incluyen algunas definiciones de expresiones o palabras utilizadas a lo largo de la memoria del proyecto.

Capítulo 2

Estado del Arte

Una de las principales aplicaciones de la robótica blanda y en concreto de los actuadores blandos, es el sector alimentario. Uno de los problemas más importantes a los que se enfrenta es a la contaminación microbiológica, por lo que se intenta reducir el contacto humano. Los robots con los que se pretende automatizar la manipulación de alimentos, deben ser fáciles de limpiar, rápidos en sus tareas, tener un bajo coste y poder trabajar de forma segura con personas. Además, deben tratar los productos con destreza y no dañarlos de ninguna manera. Para conseguir que el gripper se adapte correctamente al objeto, es necesario aumentar los grados de libertad de los dedos que lo forman. Cada uno de ellos necesita estar controlado, con lo que aumenta rápidamente su complejidad. Se pueden realizar diseños de manipuladores que se adapten de forma pasiva a los objetos, reduciendo así la complejidad de su actuación. Una solución a este problema puede ser utilizar materiales flexibles para la fabricación de los dedos. Además, así se reducen tanto la complejidad mecánica de los conectores intermedios como su coste de producción. Los dedos deben ser lo más anchos posible para repartir la presión de forma más uniforme sobre el objeto. Además, es importante que no haya nada duro en los puntos de contacto, para reducir las posibilidades de dañar el cuerpo.



Figura 2.1: Ejemplo de herramienta de agarre de la startup de Cambridge SoftRobotics

2.1. Actuación neumática

Constituyen una gran parte del objetivo de la investigación actual. En general los diseños están compuestos por cámaras neumáticas deformables, normalmente fabricadas con diferentes tipos de siliconas y plásticos elastómeros. Lo que los diferencia son las formas de las cámaras neumáticas. Estas se diseñan en algunos casos para obtener un movimiento, extensión, y en otros dos, extensión y contracción. Estos movimientos se consiguen mediante la introducción de aire a presión o vacío en las cámaras.

La forma general de las cámaras neumáticas es bastante similar en todos los productos, consisten en una sección plana en oposición a unos recovecos donde se puede almacenar aire. Esta geometría permite la flexión del dedo cuando se introduce aire a presión, dado que dichos espacios se llenan de aire y aumentan de volumen, mientras que la sección opuesta, que es plana, no se deforma. Al generar un vacío en el interior de la cámara, estos recovecos se contraen, generando el movimiento de extensión. Estas tres posiciones se pueden observar en la figura 2.2.

En primer lugar, la herramienta de la figura 2.2, de la compañía Soft Robotics Inc., ya se encuentra en el mercado y es una de las primeras garras blandas comercializadas en el mundo.



Figura 2.2: Soft Robotics [1]

Esta segunda herramienta es un prototipo de bajo coste del laboratorio de investigación Super Releaser, en Brooklyn, NY. En este caso la superficie interior de los dedos tiene una rugosidad mucho más pronunciada, para mejorar el agarre. Además, se puede ver en la superficie una rugosidad de tamaño mucho más pequeño, debida a que se han moldeado en un molde impreso en 3D. Durante el curado, la silicona se ha adaptado a la superficie interior del molde, que tiene una superficie muy rugosa.



Figura 2.3: Super Releaser [2]

Este gripper es la miniaturización de las ideas anteriores, con una longitud de tan solo 3 centímetros. Forma parte de una investigación [3] que estudia las diferencias de comportamiento entre modelos con diferentes parámetros A y B. Tanto su deformación, como el ángulo máximo que pueden formar con su base. Estos experimentos se realizaron previamente en simulaciones por ordenador y después en un banco de pruebas con prototipos reales.

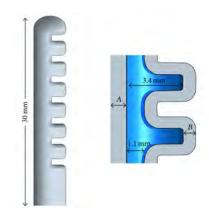


Figura 2.4: Dedo neumático en miniatura

Por último, aunque no se trate de un actuador neumático, sino hidráulico, merece la pena incluirlo en esta sección por su gran parecido con los anteriores ejemplos. Al utilizar un sistema hidráulico, se mejora tanto la precisión como el control que se puede llevar a cabo. Además, aumenta la presión máxima que puede ejercer sobre el objeto que pretende agarrar. En concreto en este caso se trata de una herramienta de agarre para el trabajo submarino en arrecifes de coral, para obtener muestras biológicas sin dañarlas durante el proceso de recogida.

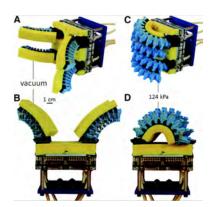


Figura 2.5: Obtención de muestras biológicas submarinas [4]

Para estas herramientas se utiliza agua como líquido hidráulico, así las cámaras de actuación, más frágiles, están aisladas por completo del resto del brazo robótico, que utiliza aceite a una mayor presión. Si se daña la herramienta de agarre, que es mucho menos resistente que el brazo, y que va a estar en contacto con corales, que tienen una superficie muy abrasiva, se produciría una fuga de agua al océano, en lugar de una fuga de aceite, que resultaría increíblemente dañina para el ecosistema estudiado.

Esta herramienta incluye además un hilo inextensible a lo largo de todo el dedo. Su función es que durante la flexión del dedo, este además se curve de forma helicoidal, para adaptarse todavía mejor a la forma esbelta de los corales.

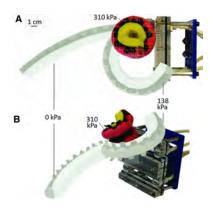


Figura 2.6: Contracción helicoidal [4]

Un claro ejemplo de la multitud de aplicaciones que tienen las herramientas blandas de agarre se pone de manifiesto por ejemplo en robots con la capacidad de identificación háptica de objetos [5]. Gracias a las propiedades de la garra blanda, el sistema es capaz de coger una gran variedad de objetos. Durante el agarre se toman datos, por medio de sensores resistivos, de la flexión que se ha dado en cada dedo, para después identificarlos con una base de datos que recoge los valores de flexión que se producen al agarrar cada objeto.



Figura 2.7: Varios objetos identificados por el robot

La fabricación de los dedos de este gripper es ligeramente diferente a la del resto. En una primera fase se crea la parte del dedo que va a estar sometida a flexión con una silicona ligera y elástica. Utilizando la técnica de moldeo a la cera perdida se realiza la base del dedo, generando machos de cera que forman el interior del dedo, y que después del curado de la silicona se retiran. Estas bases se realizan con una silicona más rígida que la anterior. Además, se añade una capa de resina acetática, un material con elevada rigidez y resistencia a la fatiga. Esta lámina se corta por láser con un patrón determinado para permitir su flexión, pero no su extensión. Esto evita que la base del dedo se elongue, y que solo pueda doblarse. Por último, se añade el sensor resistivo. Cuando termina el curado de la silicona se retira la cera del interior y se sellan las juntas para evitar fugas.

El diseño de las herramientas blandas no está tan estandarizado como el de las clásicas. Otra forma de diseñar, en vez de utilizar técnicas biomiméticas o por simple intuición, es la optimización topológica de los modelos mediante simulaciones por ordenador [6]. Con esta técnica por métodos numéricos tras una serie de simulaciones por ordenador se obtiene el modelo de la figura 2.8 con el que se consiguen las mayores deformaciones de flexión. Se puede observar que se generan dos tipos de secciones, nodos y cámaras, similares a la forma de los modelos previos. Esta complicada geometría se puede conseguir mediante fabricación aditiva, como la impresión 3D, que sustituye a la creación de moldes y el moldeo que se utiliza en los modelos anteriores.

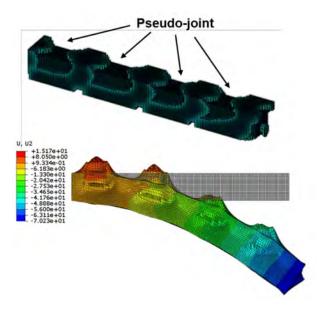


Figura 2.8: Diseño con topología optimizada

Otra tipología de estructura pasiva es la propuesta por FESTO en su FlexShapeGripper. Este producto se creó basándose en el comportamiento de la lengua de los camaleones. Dispone de una membrana flexible, sujetada desde su interior y en el centro mediante un cable. Al recoger este cable la membrana envuelve al objeto que pretende agarrar, como se muestra en la figura 2.9.



Figura 2.9: FlexShapeGripper de FESTO [7]

Por último, esta otra herramienta de la compañía FESTO [8], ha sido diseñada utilizando como inspiración la naturaleza, en concreto la mecánica del agarre que los pulpos utilizan con sus tentáculos. Consiste en un agarre por partida doble, con múltiples ventosas de vacío y con el propio contacto del tentáculo cerrándose alrededor del objeto. La estructura base del tentáculo está hecha de silicona, aportándole a la garra una gran flexibilidad además de asegurar la seguridad en el trabajo en el mismo espacio que las personas, ya que un golpe no generaría daños apreciables.



Figura 2.10: Herramienta biónica de agarre derivada del estudio de los pulpos

2.2. Actuación electro-mecánica

Las herramientas de agarre rígidas con actuación electromecánica, son el primer paso hacia la robótica blanda. Utilizando una multitud de elementos rígidos unidos, se consiguen mecanismos que se adaptan a la forma de los objetos que se pretende agarrar. Cuanto mayor sea el número de elementos que forman la cadena, más se parecerá su perfil al de una línea continua. Esto resulta interesante debido a que cuanta más área de contacto exista entre la herramienta de agarre y un objeto, menor será la presión ejercida sobre dicha área. En cuanto a su fabricación, disminuyendo el tamaño de los eslabones, se aumentan tanto su precio como su dificultad de ensamblaje. Este aumento de coste es debido a que no se pueden utilizar los mismos métodos de fabricación, y deben utilizarse técnicas más sofisticadas. Por lo tanto, es necesario llegar a un compromiso entre los dos, y buscar el menor tamaño posible para la técnica de fabricación utilizada.

Uno de los primeros prototipos es de 1977 [9], se puede apreciar en la figura 2.11 como se adapta a un objeto cilíndrico. En este caso el movimiento es generado tirando de dos hilos, uno para la extensión y otro para la flexión. Cuando se retrae el hilo de flexión, los eslabones de la cadena intentan aproximarse hacia la base, en dirección hacia el centro de la garra, debido al modo en la que están enrollados los cables en las poleas. Al encontrarse un objeto en su camino, se irá cerrando la cadena a su alrededor, según se vaya reduciendo la longitud de hilo disponible.

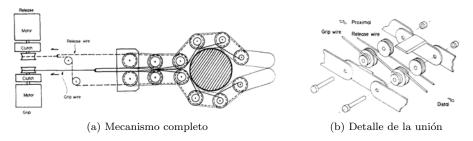


Figura 2.11: Herramienta de agarre mecánica

Una evolución del ejemplo anterior es la unión del movimiento mediante cables y eslabones flexibles, fabricados con silicona [10]. Este diseño, cuya tercera iteración se puede observar en la figura 2.12, está compuesto por dos tipos de siliconas diferentes, una más rígida para la base de los dedos y otra más flexible para la sección que estará en contacto con los objetos. La silicona más rígida está representada en las figuras en azul, y la que tiene una mayor capacidad de deformación en gris. En el interior de las secciones de silicona se incluyen unos conductos rígidos por los que pasar los cables, para evitar la fricción entre ellos, que reduciría en gran medida la vida en servicio de la herramienta de agarre.

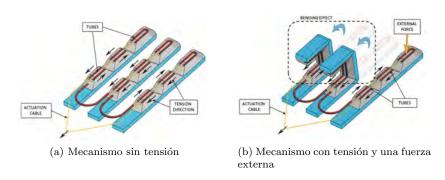


Figura 2.12: Herramienta de agarre flexible mediante cables

Se puede observar en la figura anterior que dispone únicamente de un cable, lo que reduce la complejidad de actuación mecánica. Esto permite que el cable se distribuya entre los dedos de la forma que se lo permitan los esfuerzos a los que están sometidos los dedos.

Otro ejemplo es el gripper de la figura 2.13 cuya principal aplicación es coger objetos planos, como tarjetas de crédito o papeles. Consta de dos dedos flexibles, uno de ellos con una "uña" en su extremo. La operación de agarre consiste en que el dedo con final redondo se desplace hacia el otro, empujando al objeto contra la "uña" del dedo, elevando ligeramente al objeto por ese extremo. Posteriormente se inclina la herramienta de agarre para poner al objeto en posición vertical, y por último se completa el agarre aproximando del todo los dedos.

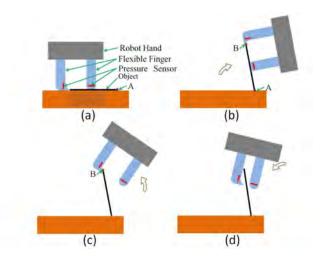
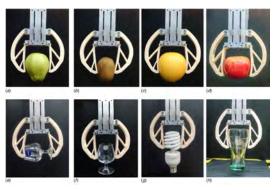
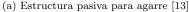


Figura 2.13: Garra para objetos finos [11]

Un amplio campo de herramientas es el comprendido por las garras que utilizan estructuras pasivas para el agarre [12]. Mediante la modificación de la posición de dichas estructuras con motores eléctricos, se consigue que se adapten a la geometría de los objetos que se imponen en su camino.







(b) MultichoiceGripper de la empresa FESTO

Figura 2.14: Herramientas con estructuras pasivas

2.3. Otros tipos de actuación

Esta herramienta de agarre presenta una mezcla entre materiales rígidos y blandos. Su estructura, y su mecanismo de movimiento mediante dos motores con tornillo sin fin y engranaje son rígidos, mientras que los dedos son flexibles, permitiendo un agarre suave. Todo el dedo está cubierto por una piel de silicona que lo protege de la entrada de agua, ya que su principal aplicación es su uso bajo el agua.

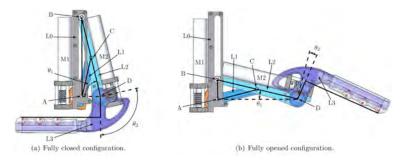


Figura 2.15: Herramienta mecánica de agarre subacuática

En segundo lugar, la compañía Grabit [14] está desarrollando un manipulador que se basa en la electroadhesión. Es un efecto electrostático que genera la adhesión entre los electrodos, que se encuentran en los dedos, y la superficie del objeto sobre la que se induce una carga eléctrica, simplemente aportando cargas positivas y negativas a los electrodos. Esta tecnología también ha sido explorada por el SRI International, un instituto de investigación sin ánimo de lucro, en sus Electroadhesive Surface-Climbing Robots

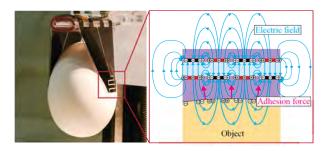


Figura 2.16: Herramienta de agarre mediante electroadhesión

La siguiente herramienta de agarre, basada también en adhesión electromagnética, utiliza fluido magnetorreológico. Este tipo de fluidos inteligentes consisten en partículas ferromagnéticas en suspensión en un aceite inerte. La viscosidad de estos fluidos aumenta cuando son sometidos a campos magnéticos. Al crear el campo, se induce en las partículas en suspensión del fluido dipolos magnéticos, que tienden a encadenarse, y a escala macroscópica esto se aprecia con un aumento en la viscosidad. El fluido, que moja tanto al objeto como a la herramienta de agarre, crea una adhesión entre los dos, generando el agarre. Un esquema de este contacto se representa en la figura 2.17. Este tipo de garra puede ser utilizada para el agarre de metales no ferromagnéticos y algunos plásticos, aunque dependiendo del tipo de aceite utilizado puede dañar algunos plásticos.

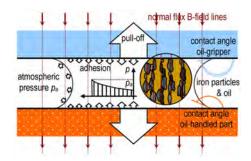


Figura 2.17: Modelo de adhesión mediante fluido magnetorreológico

El objetivo principal de las siguientes garras es la manipulación de objetos de un tamaño extremadamente reducido [12]. Debido a sus dimensiones, hasta 500 micrómetros, la actuación se realiza gracias a los materiales con los que están construidos. La garra en miniatura central de la figura 2.18, cuya superficie tiene un patrón de tinta negra, reacciona a la luz infrarroja calentándose de forma localizada, que produce su encogimiento una vez superada una temperatura umbral.



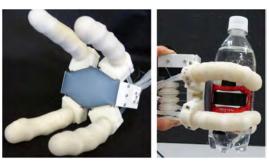
Figura 2.18: Herramientas en miniatura con materiales activos actuados por métodos diferentes

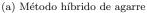
La siguiente herramienta de agarre está basada en la "jamming transition" de los materiales granulares [15]. Está constituida por una cámara neumática que contiene un material granular. Dependiendo de la presión del aire en su interior, el comportamiento del material granular varía desde sólido, cuando hay prácticamente vacío, hasta líquido o gaseoso cuando se introduce aire a presión. Esta variación de rigidez o "jamming transition" permite que la garra se adapte a las irregularidades de los objetos, en "estado líquido", y se mantenga dicha forma mientras esté en "estado sólido". Mientras se mantenga el vacío en el interior de la cámara el objeto se mantendrá agarrado.



Figura 2.19: Herramienta de agarre Versaball de Empire Robotics

La garra de la figura 2.20 [16] es una mezcla de dos mecanismos de agarre diferentes, en primer lugar, consta de cuatro dedos articulados con actuación por cables, pero además todo el interior de cada dedo está relleno con un material granular como en el caso anterior. Esta fusión permite que no tengan que aplastarse los objetos para poder realizar el agarre correctamente. Si no que el agarre granular sirve como un agarre auxiliar para evitar que los objetos se escapen de la garra. Para objetos de tamaño más reducido, como pequeños tornillos, puede utilizarse el mecanismo granular como único método de agarre.







(b) Método granular para objetos pequeños

Figura 2.20: Herramienta híbrida cables más material granular

2.4. Sensorización blanda

Durante el desarrollo de todas estas herramientas de agarre es muy útil disponer de datos sobre deformaciones y tensiones internas en los materiales utilizados para su fabricación. Esto presenta un gran desafío, ya que los sensores clásicos no se pueden deformar, por lo que no se pueden adaptar a estas garras. Los principales sensores utilizados [17] son de tipo resistivo [18], piezoeléctricos [19], capacitivos [20]... Uno de los principales problemas que genera la inclusión de los sensores en las herramientas es que les restan capacidad de deformación, y por tanto modifican el comportamiento que la garra tendría en servicio si no incluyera este sensor. En herramientas rígidas estos efectos son prácticamente despreciables. Una posibilidad sería incluir de forma permanente estos sensores en las garras y utilizar los datos obtenidos para otras aplicaciones, como el ejemplo citado anteriormente en cuanto a la identificación háptica.

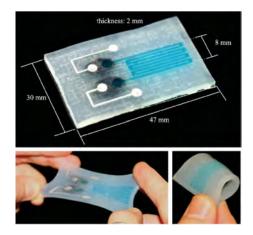


Figura 2.21: Ejemplo de sensor resistivo elástico

Capítulo 3

Diseño y fabricación

Para obtener una imagen representativa de las herramientas de agarre basadas en robótica blanda existentes, se ha decidido crear cuatro prototipos. Dos de ellos con actuación neumática y dos de ellos electromecánicos. Las dos garras neumáticas utilizan el mismo módulo neumático, que les proporciona una fuente de aire a presión y una generación de vacío. Y las dos electromecánicas están accionadas por un motor de corriente continua. A continuación se describen los dos módulos principales, neumático y motor, y las cuatro garras. Todas ellas están diseñadas para acoplarse al robot UR3 de Universal Robots.



Figura 3.1: Herramienta de agarre 4 montada en el UR3

3.1. Sistema neumático

Para controlar las dos garras neumáticas es necesario disponer de una fuente de aire a presión y un generador de vacío. Para el aire a presión se utiliza un compresor con un pequeño depósito, del que se obtiene una presión máxima de 6 bares. La presión de trabajo de las herramientas de agarre está en torno a 1 y 2 bares para la garra granular y la de los dedos de silicona respectivamente. Para la generación de vacío se utiliza una bomba de vacío eléctrica. Consiste en un motor eléctrico de corriente continua conectado a una pequeña turbina, que extrae el aire de una vía neumática y lo expulsa por la otra. Por tanto, se puede utilizar tanto para generar vacío como para crear presión. Con la configuración inicial del sistema neumático no se pueden utilizar ambas funciones de forma simultánea. Además, esta bomba de vacío genera una cantidad de ruido considerable en los dos modos de funcionamiento, mientras que obtener aire a presión del depósito es un proceso muy silencioso. Así se consigue reducir el tiempo durante el que se produce ruido durante el funcionamiento de la herramienta de agarre.



Figura 3.2: Bomba de vacío

Esta técnica de vacío consiste en extraer aire de forma continua. Por lo que permite que haya pequeñas fugas, y mientras la bomba se mantenga encendida se continuará extrayendo aire de la cámara. Hay que tener en cuenta que ni el llenado ni el vaciado de las cámaras es instantáneo, por lo que habrá que realizar pausas en el control para esperar a que las cámaras se llenen o se vacíen de aire.

Para conectar todo el sistema y formar el módulo neumático se dispone además de conectores neumáticos en T y en L, adaptadores para distintos diámetros de tubo, dos electroválvulas de vías 3/2 con actuación por solenoide y retorno por muelle y tuberías de 4 y 6 milímetros de poliuretano y de 8 milímetros de silicona. Una de las electroválvulas se utiliza para conectar a la garra la vía que lleva aire a presión y la de la que se extrae aire con la bomba de vacío. La otra electroválvula conecta el tubo proveniente del depósito de aire a presión con la entrada de la primera electroválvula y con un tubo ciego. Esta configuración hace las veces de una válvula todo o nada. Por último, se dispone de un regulador de presión para controlar la presión que se administra a las herramientas de agarre.



Figura 3.3: Electroválvula 3/2 FESTO

Todos los elementos anteriores se montan sobre el soporte de la figura 3.4, que sirve como unión al robot UR3 para las dos garras neumáticas. El soporte dispone de conexiones para todos los conectores necesarios y las válvulas. Además, y debido a las diferentes geometrías de las dos garras, tiene dos agujeros a través de los cuales se conducen los tubos neumáticos, el de la base sirve para la primera herramienta de agarre y el de la sección vertical para la segunda.

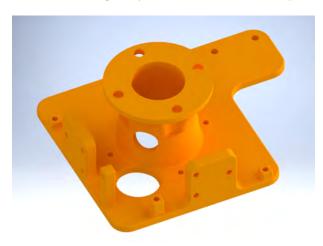


Figura 3.4: Soporte neumático

Por último se añaden los esquemas neumático y eléctrico, las señales de control 1, 2 y 3 son los cables que se conectan al UR3 para su control. En el esquema neumático se representa la bomba de vacío con el símbolo de un eyector de vacío debido a la falta de este tipo de componente en el software utilizado para la representación. En el esquema eléctrico la bomba de vacío se representa como el motor de corriente continua que contiene, simplificado a un grupo LR.

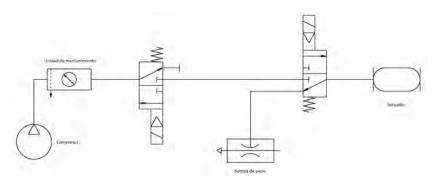


Figura 3.5: Esquema neumático de conexiones

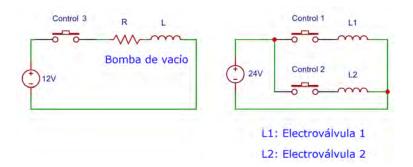


Figura 3.6: Esquema eléctrico de conexiones

3.2. Gripper 1

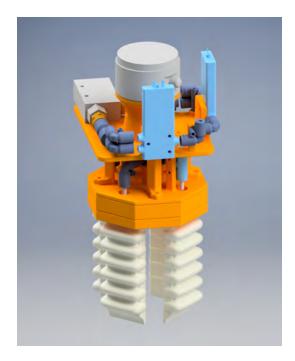


Figura 3.7: Diseño herramienta de agarre $1\,$

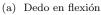


Figura 3.8: Prototipo de herramienta de agarre 1

La primera herramienta de agarre neumática está basada en un producto fabricado por Soft Robotics, disponen de varias configuraciones para su herramienta de agarre, dependiendo de la aplicación a la que están destinada. Se diferencian tanto en el número de dedos de los que disponen como en su disposición. Las configuraciones más utilizadas son de dos, tres, cuatro y seis dedos. En el caso de las pinzas con tres y cuatro dedos pueden situarse tanto enfrentados como distribuidos equidistantes y orientados al centro de la pinza. Cuando solo hay dos dedos deben situarse enfrentados, y cuando hay seis se disponen de forma hexagonal. Para este prototipo se han utilizado cuatro dedos, en general un número de dedos par suele dar mejores resultados. Esto es porque cuando la actuación de los dedos no está sincronizada y se dispone de un número impar de dedos, los esfuerzos que se generan en el agarre no tienen una oposición directa, como en el caso de las garras con dedos pares. Para aumentar la versatilidad de la herramienta se utilizan cuatro y no dos dedos, ya que resulta más fácil adaptarse tanto a geometrías complicadas como a geometrías simples en posiciones complejas. Además, teniendo dos dedos se podría producir el giro del objeto. Sin embargo, cuando se utilizan cuatro este giro se evita, gracias a la presión que ejercen los otros dos dedos.

En el diseño del dedo, en primer lugar, destaca la forma asimétrica del diseño en su plano longitudinal, esta asimetría permite el movimiento del dedo. Las cámaras exteriores tienen la capacidad de expandirse o contraerse en función de que administremos al interior del dedo aire a presión o vacío respectivamente. Esta contracción genera una flexión del dedo hacia fuera, si se expanden, el movimiento es el opuesto, una flexión hacia dentro, este comportamiento se representa en la figura 3.9. En conjunto, aplicando aire a presión al actuador completo, se genera un movimiento de agarre de los cuatro dedos hacia el centro (figura 3.9a), y si se aplica vacío el movimiento es de liberación, abriéndose los cuatro dedos hacia el exterior (figura 3.9b).







(b) Dedo en extensión

Figura 3.9: Posiciones dedo neumático

3.2.1. Diseño y fabricación

Esta pinza consta de los cuatro dedos de silicona y una base constituida por cuatro piezas. La primera, sirve para posicionar los dedos, la segunda fija los dedos y crea una junta estanca con las cámaras internas de los dedos y la tubería que los alimenta. La tercera pieza sujeta las conexiones neumáticas necesarias, un conector en cruz, tres conectores en L y un conector en T. Y la última sirve de conexión entre la garra y el módulo neumático.

La parte más crítica es el diseño de los dedos, ya que determina la funcionalidad correcta de la herramienta de agarre. El principio de funcionamiento, mencionado anteriormente, se basa en la asimetría de la cámara interna del dedo. Una de las caras del dedo presenta un perfil plano, con pequeños resaltes para mejorar el agarre de los objetos, esta sección será la que está en contacto con el objeto. La cara opuesta tiene seis cámaras con forma de prisma redondeado en las que, al introducir aire a presión, se hinchan y generan el movimiento de contracción del dedo, y al crear vacío en su interior, se contraen, generando el movimiento de extensión. Estos movimientos se deben al alargamiento y acortamiento de la longitud del dedo en uno de sus laterales, mientras que en el opuesto se producen deformaciones mucho menores.







(b) Sección del dedo

Figura 3.10: Dedo neumático

En uno de los extremos el dedo presenta una sección que permite su sujeción en la base del gripper, además de permitir la entrada y salida de aire de la cámara. En el otro extremo, que es ciego, se ha añadido una "uña" al dedo, una sección con mayor rigidez y con perfil triangular. Esto proporciona una sección relativamente recta al dedo para realizar un mejor agarre con el extremo.

Para la creación de este prototipo, se pueden diferenciar dos partes. La fabricación de los dedos de silicona y la impresión del resto de piezas que forman la base de la herramienta de agarre.

Creación de los dedos de silicona

Para poder obtener un dedo de silicona, en primer lugar, hay que crear un molde. El molde diseñado está formado por tres partes diferentes, un macho, que proporciona la forma interna del dedo, y dos hembras, que proporcionan la exterior. Para que la impresión 3D pueda llevarse a cabo correctamente, es necesario dividir el macho en dos partes independientes, que se pegan posteriormente. Para diseñar el modelo del molde por ordenador basta con sustraer el material ocupado por el modelo del dedo de un bloque macizo. Este tiene ahora en su interior la forma en negativo del dedo. Este bloque se divide entonces en las tres partes, el macho y las dos hembras, y se crean piezas independientes. Para poder montar el molde y que no se distorsione la forma del dedo en negativo, es necesario añadir a estas piezas unos conectores. Las relaciones que hay que asegurar son la unión plana de las dos hembras, y la posición del macho respecto a ellas. Un desajuste en su posición podría suponer que el espesor del dedo se redujera en ciertas partes, lo que crearía unas secciones más susceptibles a la rotura y deformaciones indeseadas en el movimiento del dedo al introducir aire a presión o generar vacío. El montaje del molde resulta muy sencillo, simplemente hay que introducir el macho en una de las hembras y añadirle a esta pareja la hembra restante.

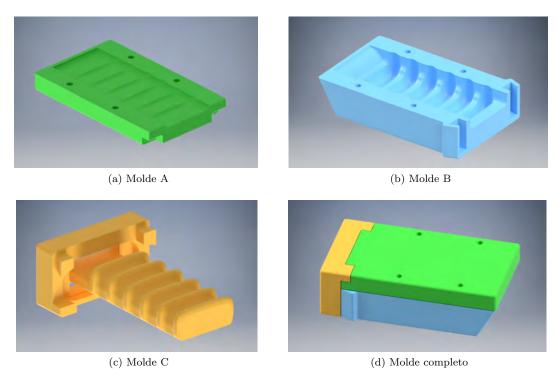


Figura 3.11: Molde para la fabricación de los dedos de silicona

Una vez montado el molde, puede realizarse el llenado con silicona. Se han probado dos siliconas diferentes, Silastic 3481 (base más catalizador), de color blanco y con un resultado opaco, con gran flexibilidad, pero poca elasticidad, y Ecoflex 00-30 Supersoft (dos partes que se mezclan a partes iguales en volumen) que tiene una gran flexibilidad y elasticidad. Tras probar a hinchar ambos dedos manualmente, se comprueba que el dedo fabricado con silicona Ecoflex 00-30 se deforma demasiado y que no sería capaz de soportar el esfuerzo normal necesario para sujetar un objeto. Sin embargo, el fabricado con la otra silicona, que no presenta prácticamente elasticidad, tiene, a priori, un buen comportamiento tanto cuando se hincha como cuando se genera un vacío en su interior.

Por lo tanto, se selecciona la silicona Silastic 3483 como material de trabajo. Para realizar el curado de esta silicona se añade un catalizador a una mezcla base. La cantidad de catalizador requerida es un 5 % en peso de la cantidad de base añadida, para cada dedo aproximadamente se utilizaban unos 60 o 70 gramos de material base, lo que supone unos 3 o 3,5 gramos de catalizador. Por ser tan precisa la cantidad del catalizador, y como un error en las proporciones generaría un error en el curado de la silicona, se debe medir con una báscula electrónica de precisión. En este caso se ha utilizado una báscula con capacidad hasta 600 gramos y una precisión de 10 miligramos. Una vez mezcladas las dos partes, se mezclan durante aproximadamente 3 minutos hasta que queda una mezcla homogénea, a partir de este momento se dispone de unos 60 minutos para trabar con la mezcla hasta que comience el curado de la silicona, que tiene una duración aproximada de 24 horas.

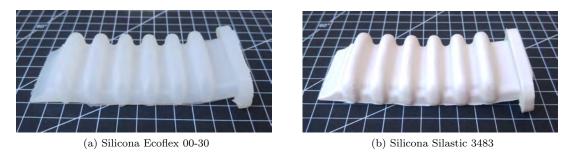


Figura 3.12: Dedo neumático

Para eliminar las posibles burbujas contenidas en la mezcla, este sería el momento de introducirla en una cámara de vacío, que eliminaría prácticamente en su totalidad el aire infiltrado en la mezcla durante el mezclado anterior. Al no disponer de cámara de vacío, la solución más práctica consiste en realizar un vibrado del molde cuando ya se ha producido el llenado, para asegurar que las burbujas más grandes ascienden hacia la superficie.

Para realizar el llenado correctamente y producir piezas sanas, y debido a la alta viscosidad de esta silicona, el llenado debe realizarse con mucha lentitud, permitiendo que la mezcla alcance el fondo del molde y que vaya subiendo el nivel del líquido poco a poco. Para esto es mejor introducir la mezcla por la sección que conecta con la parte recta del dedo, que aumenta las probabilidades de que el líquido llegue al final del molde antes de pasar por las secciones onduladas, más problemáticas de rellenar y que podrían atrapar aire dentro. Para retirar el dedo de silicona pasadas las 24 horas, simplemente puede enrollarse sobre sí mismo como un calcetín, y no tiene demasiadas dificultades.

Es importante mencionar, que mientras que con la silicona silicona EcoFlex es necesario utilizar un agente desmoldante, para la de Silastic no es necesario. Para la prueba con Ecoflex se utilizó una fina capa de vaselina recubriendo el interior del molde. Debido a la superficie ligeramente rugosa del molde, inherente a la impresión 3D, la silicona tiende a adherirse más que a una superficie lisa, por lo que con la silicona Silastic también se aplicó esta fina capa para sacar el dedo del molde con más facilidad.

Creación del resto de las piezas

En el diseño de las piezas que componen la base, se han seguido las características de la base fabricada por Soft Robotics Inc. La primera pieza de la base tiene forma octogonal, y tiene cuatro vaciados con la forma en negativo del cabezal de cada dedo, marcando su disposición, y los taladros necesarios para unir las tres piezas mediante tornillos.



Figura 3.13: Primera pieza de la base

El cometido principal de la pieza central de la base es unir cada cámara interna de los dedos con un tubo neumático para poder conectarlo a la alimentación. Para cada dedo, tiene un saliente prismático con un hueco que lo atraviesa, al juntar las dos piezas de la base, este saliente sujeta al dedo, fijándolo en su posición y sellando la junta. En su interior, la sección que conecta con el interior del dedo se va reduciendo hasta acabar, en la superficie superior, en un cilindro de 4 milímetros de diámetro, para aceptar el tubo neumático del mismo diámetro. Para asegurar la estanqueidad de esta junta, se sella esta unión con silicona, mediante una pistola de silicona. También presenta los taladros necesarios para los tornillos.

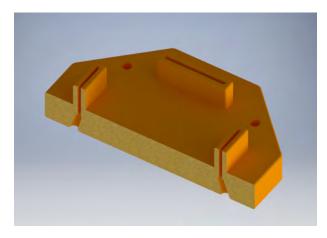


Figura 3.14: Pieza central de la base

La tercera pieza de la base tiene unos salientes verticales que sirven para sujetar los conectores neumáticos necesarios. Las uniones en L se sujetan mediante un único tornillo, y las uniones en T y en cruz con dos. Además, tiene los cuatro taladros para su unión con el resto de las piezas.

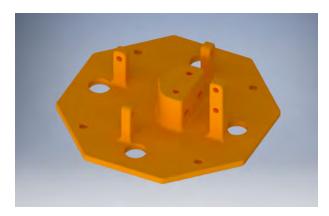


Figura 3.15: Tercera pieza de la base

Por último, la base se conecta a la estructura neumática con las válvulas mediante una pieza con cuatro patas, que se une con los mismos tornillos que las piezas de la base entre sí. Esta pieza tiene una geometría tal, que le permite no coincidir con los conectores neumáticos, y minimizar la altura de la pinza. Su forma de mesa es suficientemente estable y rígida.



Figura 3.16: Unión al módulo neumático

3.2.2. Problemas encontrados y soluciones propuestas

El molde impreso en 3D no tiene unas superficies perfectamente planas, lo que genera pequeños espacios abiertos al realizar el montaje, esto resulta especialmente problemático con la silicona Ecoflex, debido a su gran fluidez y baja viscosidad. Este problema, aunque enormemente reducido, también surge con la silicona Silastic 3481, por lo que se pueden sellar las juntas en el molde con cinta adhesiva. Después del desmoldeo, simplemente debe cortarse el exceso de silicona. Debido al uso de cinta adhesiva, y que la silicona podía salir incluso por los taladros designados a los tornillos, no es realmente necesario utilizar tornillos para cerrar el molde.

La disposición de los conectores neumáticos hace que uno de los dedos, el que está conectado mediante la T en vez de la L, sea el primero en realizar los movimientos, tanto la flexión como la extensión. Esta diferencia de velocidad no es representativa, y no presenta problemas a la hora de coger objetos. Podría mejorarse haciendo que el sistema neumático fuera perfectamente simétrico, así todos los dedos realizarían los movimientos de modo simultáneo. Otras configuraciones simétricas de los conectores aumentaban en exceso la altura de la herramienta, por lo que se decidió sacrificar la perfecta simultaneidad del movimiento.

3.2.3. Mejoras para versiones futuras

La primera modificación sería reducir el ancho de los dedos que, en proporción a su longitud, es demasiado elevada. Esto haría que aumentara la versatilidad de la garra, tanto a la hora de manipular objetos de tamaño más reducido, como para mejorar la adaptación a morfologías más complejas. Así se conseguiría que el agarre no solo fuera por fricción con la pared interna del dedo, sino además por una sujeción desde la base u otras irregularidades del objeto. Además, habría que reducir el tamaño de la sección prismática interna y aumentar el de los salientes que generan el movimiento. Esto reduciría la cantidad de aire que es necesario introducir y reduciría su peso.

Otra posible mejora sería cambiar la base de la herramienta, y orientar los dedos hacia fuera respecto de la vertical. Esta modificación permitiría, junto con la reducción de peso antes mencionada, eliminar la necesidad de crear vacío en el interior de los dedos para abrir la garra, ya que con esta nueva configuración ya estarían suficientemente abiertos en su posición de reposo. Esta simple modificación supone una simplificación enorme del sistema neumático requerido y por tanto una reducción de peso y de volumen.

La poca estanqueidad del sistema genera pérdidas de aire, tanto en la flexión como en la extensión de los dedos, esto es al introducir aire a presión y al crear vacío en el interior de las cámaras neumáticas. Para resolver este problema se podría conectar directamente un tubo neumático flexible a la cámara neumática y sellarla con silicona. Así se eliminarían las fugas de aire inherentes a las piezas impresas en 3D.

3.3. Gripper 2



Figura 3.17: Diseño de herramienta de agarre $2\,$



Figura 3.18: Prototipo de herramienta de agarre $2\,$

La segunda herramienta de agarre neumática está basada en el producto Versaball de la empresa Empire Robotics Inc. Su funcionamiento se basa en la física de los materiales granulares, en concreto en la "jamming transition" o transición de bloqueo que sufren al ser sometidos a presión. Un material granular está compuesto por partículas macroscópicas sólidas, de un tamaño suficiente como para que las fuerzas que actúan entre ellas sean las de fricción. Estos materiales pueden adoptar las propiedades de un sólido, un líquido e incluso un gas, dependiendo de la fricción que exista entre las partículas. Cuando se introducen en una cámara flexible y se aumenta la presión en su interior, las fuerzas de fricción entre las partículas disminuyen enormemente, con lo que el conjunto se comporta como un gas. Si esta presión se va reduciendo su comportamiento se va asemejando más al de un líquido. Y por último si se crea un vacío en el interior de la cámara, las fuerzas de fricción se hacen muy grandes, con lo que los esfuerzos para deformar el conjunto aumentan, asemejándose a un sólido.

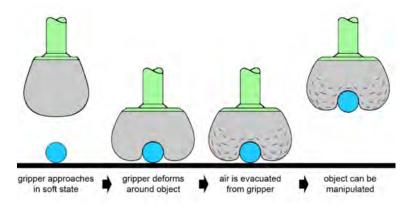


Figura 3.19: Jamming transition

La garra utiliza una cámara esférica con una fina membrana de plástico elastómero que está rellena de un material granular, sobre la que se aplica aire a presión y vació para obtener los pseudoestados líquido y sólido. Para agarrar un objeto se tiene que, en primer lugar, llenar la cámara con un poco de aire, para que se asemeje a un líquido, después presionar la garra contra el objeto, adaptándose el contenido de la cámara a la forma exterior del objeto. En ese momento se crea vacío dentro de la cámara, con lo que se "solidifica" su interior, manteniendo la forma del objeto. Mientras se mantenga el vacío el objeto será sujetado por pinza. Posteriormente, basta con llenar la cámara de aire de nuevo para volver al estado "líquido" y liberar al objeto. Este método de agarre requiere que el tamaño del objeto sea aproximadamente la mitad del diámetro de la cámara neumática.

3.3.1. Diseño y fabricación

Esta herramienta de agarre está compuesta por el módulo neumático descrito anteriormente, que le permite obtener tanto aire a presión como vacío, una pieza que une el módulo con la garra, dos piezas que mantienen un filtro en su lugar, y dos piezas finales que sujetan la cámara neumática y hacen que no sea dañada cuando el gripper es presionado contra el objeto.

Igual que en el caso anterior la cámara neumática es el elemento básico de esta herramienta de agarre. En este caso sus propiedades son críticas puesto que es necesario que sea muy versátil. El material granular que se coloca en el interior es un abrasivo y va a estar rozando la cámara por dentro durante el proceso de agarre. Además, el exterior de la cámara va a estar en contacto directo con los objetos por lo que es necesario un espesor mínimo que asegure la integridad de la cámara, y que no sea perforada ni por dentro por el material granular ni desde el exterior por los objetos. Cuanto más fino sea el espesor más fácil es que se adapte a las pequeñas irregularidades de los objetos, además de ganar flexibilidad y elasticidad. Después de valorar diferentes opciones se decidió que la mejor opción era utilizar un globo de látex, de aproximadamente 1 milímetro de espesor y unos 8 centímetros de diámetro. Otra alternativa más compleja pero que podría haber dado un buen resultado habría sido moldear con látex la cámara. Esto habría permitido darle una forma más parecida a una esfera que la que se obtiene con el globo.

Como material granular con el que rellenar la cámara también se valoraron varias opciones, como café molido, arena fina, pan rallado... En concreto en el prototipo de la universidad Cal Tech CA, EEUU [15], utilizaban pequeñas esferas de cristal de 100 micrómetros de diámetro, llenando aproximadamente el 80 % del volumen de la cámara. Esta opción resulta mucho más cara y en principio no representa una gran diferencia con el resto de opciones más baratas. Tras probar el funcionamiento manualmente con café molido y pan rallado se observa experimentalmente que con café molido como material granular la cámara se adapta mucho mejor a los objetos.

Para mantener a la cámara en su lugar la base de esta garra está formada por dos piezas. La base principal de la figura 3.20 es la que va a soportar la presión generada en la primera fase del agarre, cuando se aproxima la garra al objeto, por lo que su superficie interior tiene una sección esférica, así se adapta a la forma de la cámara y empuja a los laterales de la cámara hacia el centro, para crear más presión sobre el objeto. Esta pieza dispone también de una hendidura en cuyo interior se pretendía almacenar el exceso de la cámara neumática, pero su tamaño es demasiado pequeño para este propósito. En el centro dispone de un conducto cónico, que será la superficie que estará en contacto directo con la cámara neumática. Por último, dispone de cuatro orificios en los que se alojan cuatro tuercas autobloqueantes y es donde terminan los tornillos que mantienen la base de la garra unida.

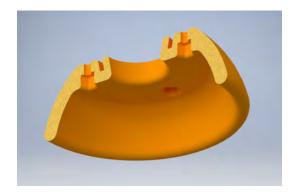


Figura 3.20: Base principal gripper 2

La segunda pieza de la base tiene en el centro la forma complementaria de la anterior, además de un agujero para poder introducir el material granular. Presenta también los cuatro taladros pasantes para los tornillos que fijan las piezas de la base. Todas las aristas tanto de esta pieza como de la anterior están redondeadas para evitar un envejecimiento excesivo de la cámara neumática debido al rozamiento.

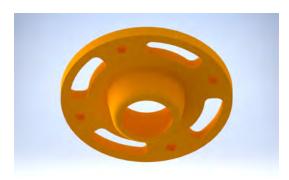


Figura 3.21: Base secundaria gripper 2

Después de las dos piezas de la base, el siguiente módulo que se monta es el filtro. Este está compuesto por dos mallas que retienen al filtro en su lugar y evitan que se mueva durante el llenado y vaciado de aire de la cámara, lo que podría llevar a un envejecimiento temprano del filtro. Para montar el filtro se coloca una malla por encima y otra por debajo del filtro. El filtro mantiene aislado el material granular del sistema neumático, dejando pasar el aire en ambos sentidos. El filtro en sí está compuesto por un círculo de fieltro del mismo diámetro que la sección superior de la base y un espesor de aproximadamente un milímetro. Este tiene también los agujeros correspondientes a los cuatro tornillos.

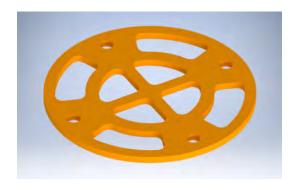


Figura 3.22: Red para filtro gripper 2

La última pieza de la herramienta tiene los agujeros necesarios para atornillar todas las piezas de la garra anteriormente descritas y cuatro en su sección superior para su unión al módulo neumático. Dispone también de una sujeción para un conector neumático en L. Un tubo neumático se mantiene fijo en el orificio central de la pieza y se ajusta a dicho conector, cuyo otro extremo se conecta con otro tubo al módulo neumático.

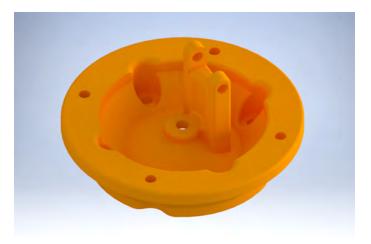


Figura 3.23: Base 3 gripper 2

3.3.2. Problemas encontrados y soluciones propuestas

Con el diseño actual de la unión de todas las piezas de la base se tienen que utilizar tornillos de una longitud muy precisa, para que no sobresalgan y perforen la cámara durante el agarre. Por este motivo se han cortado los tornillos y se ha aplicado en los extremos un poco de pegamento termofusible. Para poder acceder a los tornillos con un destornillador es necesario realizarlo desde la parte superior, ya que la cámara neumática cubre toda la sección inferior, en caso contrario se podrían colocar los tornillos en el otro sentido y que sus cabezas quedaran completamente introducidas en la pieza base y nunca estuvieran en contacto con la cámara.

3.3.3. Mejoras para versiones futuras

Para aumentar el rendimiento del sistema neumático es necesario mejorar la estanqueidad de la cámara neumática y de todas las juntas de la herramienta. El lugar en el que más pérdidas se generan es en el filtro, habría que hacer que estuviera completamente aislado del exterior y colocar algún tipo de junta en sus conexiones para hacerlas estancas. También se podría reducir el tamaño del filtro y de la sección interior en general.

Con el tamaño actual de la cámara neumática esta garra no puede coger objetos de más de 4 o 5 centímetros en su sección más pequeña, por lo que está en clara desventaja con el resto de prototipos creados. Sin embargo, su tamaño es el correcto para coger objetos de tamaños más reducidos.

La forma de la cámara no es la más óptima para el agarre de objetos pequeños, su rendimiento mejoraría si en vez de la forma ovalada que tienen los globos tuviera una forma más similar a una esfera. Esto se conseguiría con el método descrito anteriormente, moldeando una cámara personalizada con látex, que además de tener forma esférica, podría tener una conexión mucho más sencilla en su sección superior para su fijación a la base. Así se podría reducir el tamaño del filtro y sería más fácil controlar las pérdidas de aire.

3.4. Sistema mecánico

Para las dos herramientas de agarre siguientes, se utilizan medios electromecánicos. Las dos garras son mecánicas y se mueven gracias a un motor de corriente continua con una reducción por medio de un sistema de engranajes. Aplicando tensión eléctrica en los terminales del motor se obtiene el giro en un sentido y cambiando la polaridad se obtiene el giro en sentido contrario.

Los motores que se utilizan son los dos de 6V, cada uno con una reducción diferente. Para calcular la reducción necesaria se puede aproximar el tiempo que va a tardar en cerrarse la garra y el par que va a generar. En la cuarta herramienta de agarre, la de los dedos flexibles, como utiliza además un sistema husillo más tuerca, la reducción es más que suficiente para generar un par adecuado para esta aplicación. Por esto se elige la reducción únicamente basándose en el tiempo de cierre de la garra. Para la tercera garra, la de los dedos movidos por cables, es necesaria una gran reducción, ya que el par que genera el motor debe ser suficiente para tirar de los tres cables de manera simultánea. En un principio se planteó utilizar un motor para cada cable, pero surge un problema de sincronización de los motores, para que la garra funcione correctamente es necesario que se tire de los tres dedos de forma simultánea. Por esto y por la reducción de peso que supone se dispone un único motor con una reducción más elevada. Dentro de los márgenes adecuados para las dos garras está una reducción de 1:125. Para la cuarta garra esta reducción resulta suficiente, pero no así para la tercera, por lo que hay que utilizar como mínimo una reducción de 1:298.



Figura 3.24: Motor Micrometal con reductora de 1:125

Para el montaje de los motores sobre las dos garras se utiliza la misma estructura, ya que, aunque varíe la reducción el tamaño del motor es el mismo. Esta está compuesta por dos piezas, una base y un adaptador, la pieza base aloja en su interior al motor, está diseñada a apriete, para no permitir el desplazamiento longitudinal del motor. Además, esta pieza dispone de dos orificios donde se introducen dos tuercas autobloqueantes para la sujeción del motor. La pieza auxiliar es necesaria por un cambio de diseño. En principio el motor iba a ir montado a presión en el interior de una única pieza, pero se comprobó que, debido al poco control de tolerancias con impresoras de bajo coste, no era posible obtener un ajuste tan preciso. Al estar las piezas base de las garras ya fabricadas, es necesaria esta pieza auxiliar para mantener al motor centrado en el eje de la garra.

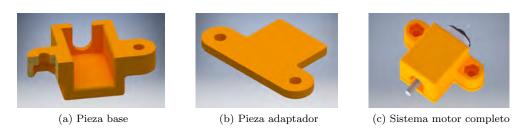


Figura 3.25: Acoplamiento para motor Micrometal

Por último se añade el esquema eléctrico simplificado, el grupo LR representa el motor de corriente continua y el puente H está compuesto por los cuatro bipolares y las dos señales de control. Estas son las que se conectan al panel de entradas/salidad del UR3.

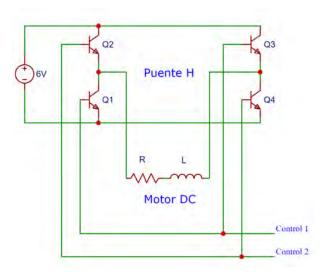


Figura 3.26: Esquema eléctrico de conexiones

3.5. Gripper **3**



Figura 3.27: Diseño herramienta de agarre 3



Figura 3.28: Prototipo de herramienta de agarre 3 [SUSTITUIR POR OTRA]

La primera herramienta de agarre mecánica utiliza dedos articulados y cables atados en sus extremos. Al tirar de los cables mediante un motor unido a una polea, se consigue la flexión de los dedos que, debido a sus grados de libertad, no tienen una forma definida para una longitud de cable disponible determinada. El motor seleccionado para esta herramienta es el modelo de MicroMetal con una reducción de 1:298 de 6 Voltios. La forma que adopta el dedo es función del objeto que se esté pretendiendo agarrar, los eslabones del dedo se adaptarán a la superficie exterior del objeto. En este caso se ha seleccionado tres como el número de dedos necesarios para conseguir un agarre óptimo. Para que esta garra funcione es necesario que los tres dedos realicen sus movimientos de forma simultánea, por lo que los tres cables se enrollan sobre una misma polea que, cuando gira en un sentido u otro recoge o suelta los cables generando la flexión o extensión de los dedos. Para sincronizar su movimiento basta con extender completamente los dedos e ir tirando de los cables hasta que todos estén tensos, pero sin llegar a flexionar ningún dedo. Con esta longitud de cable hasta la polea fijada todos los dedos disponen de la misma longitud de cable.

3.5.1. Diseño y fabricación

Esta herramienta de agarre cuenta con una base sobre la que se sujetan los tres dedos, y un adaptador para su conexión al robot. Cada dedo consta de tres módulos base, un extremo y un anclaje. También dispone de una polea y un cable para cada dedo, y la sujeción para un motor de corriente continua, descrita anteriormente y que se atornilla directamente a la base de la garra.

A partir de la geometría del módulo o eslabón base se han desarrollado los módulos anclaje y extremo. Para unirlos unos a otros y permitir su rotación relativa se utilizan tornillos. Esta unión se crea entre dos secciones que encajan una dentro de otra. Cada módulo base tiene en un extremo una sección interior y en el opuesto otra exterior. Esto permite que un extremo pueda introducirse en el otro y dejar un agujero pasante para colocar el tornillo. En el centro de cada uno de ellos se encuentra un taladro pasante que permite el paso del cable. La posición de este agujero es crítica, ya que cuanto más separado del eje de giro se encuentre, más par mecánico se generará al tirar del cable y por tanto más eficiente será el mecanismo. Los eslabones disponen además de unos topes para limitar su movimiento respecto a los demás, además de las secciones de conexión, hay unas secciones perpendiculares a la base, que hacen que en el movimiento de extensión no se supere la horizontal. Unos topes con un ángulo de 60 grados que hacen que en el movimiento de flexión no se supere una posición relativa de más de 120 grados.

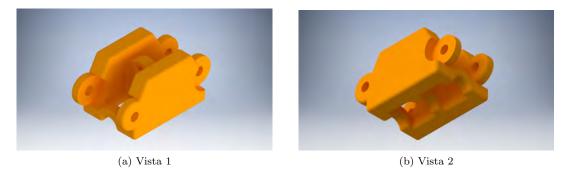


Figura 3.29: Eslabón base

La geometría triangular de los eslabones extremos permite que el esfuerzo normal a la superficie de contacto con los objetos que agarra se dirija hacia el interior de la garra y hacia arriba, favoreciendo el agarre. Disponen del mismo tipo de geometría de conexión que los eslabones base, para ser conectado al último de ellos en cada dedo mediante tornillos. En su base, dispone de dos salientes con secciones más anchas en su parte externa. Estos sirven para sujetar una goma elástica que mantiene al dedo estirado en caso de que el motor no esté ejerciendo par.

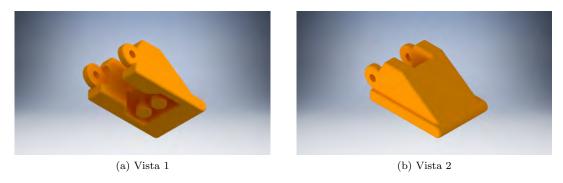


Figura 3.30: Eslabón Extremo

Los eslabones de anclaje tienen en su base dos taladros pasantes para conectarlos a la base mediante dos tornillos, aunque estén en el extremo de la pieza, sujetan al dedo perfectamente en su lugar. La conexión con el resto de eslabones se realiza del mismo modo que los eslabones base entre sí, en este caso la sección interior es la que pertenece al anclaje y será la exterior de un eslabón anclaje la que se conectará. Disponen también de los salientes descritos en el extremo para sujetar la goma elástica, que hace las veces de tendón.

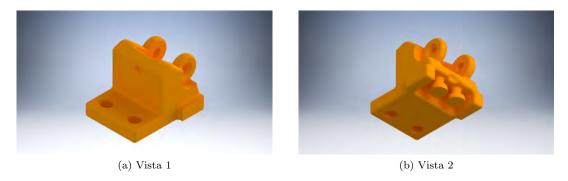


Figura 3.31: Eslabón Anclaje

En la primera iteración del diseño del dedo el tendón estaba hecho de silicona, a partir de un molde impreso en 3D, y se adaptaba a las formas de los salientes tanto del extremo como del anclaje. Estaba diseñado con una longitud suficiente para mantener al dedo estirado en su posición normal, pero no lo suficientemente corto como para evitar que el motor no fuera capaz de generar el par suficiente para realizar la flexión de los tres dedos de forma simultánea. El problema de este tendón es que, en las secciones extremas, donde se unía con los salientes del anclaje y del extremo, tenía un espesor demasiado pequeño. Al cabo de poco tiempo y con una mínima imperfección en dicha superficie se formaba una grieta que terminaba rompiendo la silicona. Por este motivo se decidió utilizar gomas elásticas para realizar el mismo cometido. Se probaron dos longitudes diferentes y se eligió una un poco más amplia que, aunque no mantiene los dedos perfectamente estirados, ayuda al mecanismo a ejercer más fuerza sobre el objeto a agarrar.

La base principal de la herramienta dispone de los taladros necesarios para atornillar los tres dedos, distribuidos cada 120 grados. En el centro de la base hay una sección hueca, a través de la cual pasa el motor. Este se fija a la base mediante dos tornillos y hace que el eje del motor esté centrado respecto a los dedos. El eje del motor debe sobresalir lo suficiente para que la polea quede a la altura de los cables que vienen de los dedos. Además, dispone de tres agujeros. El más grande es para pasar los cables eléctricos de alimentación del motor, y los dos más pequeños sirven como vía de acceso a los tornillos del módulo motor, ya que sin ellos no se podría alcanzar los tornillos con un destornillador.

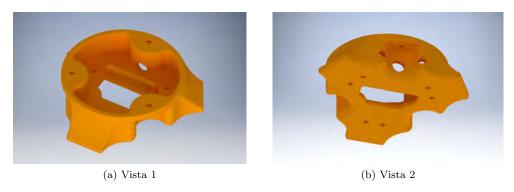


Figura 3.32: Base principal gripper 3

La polea es una parte crucial del diseño, ya que es la que sincroniza el movimiento de los dedos. Dispone de una sección interior en la que se introduce una tuerca para poder sujetar la polea a la cara plana del eje del motor. Está diseñada con un diámetro suficientemente pequeño para generar un buen par para la aplicación, pero suficientemente grande para poder ser impreso en 3D y que no sea demasiado frágil. También tiene un conducto con sección circular que conecta la cara exterior de la polea, donde se enrollan los cables, con la cara inferior de la polea. Los cables, provenientes de cada dedo, se enrollan sobre la polea y necesitan recorrer más o menos perímetro hasta llegar al orificio anterior, se introducirán a través de él y saldrán por la cara inferior. Con los cables en esta posición es el momento de ajustar la longitud de cada uno de ellos como se ha descrito anteriormente. Para fijar los cables en esa posición la pieza dispone de otro tornillo, con una tuerca sobre la que roscar en su interior, que presiona a los cables y los mantiene en su lugar. Finalmente se anudan los extremos sobrantes de cable y se corta la longitud sobrante. Este segundo ajuste permite modificar los cables una vez se vayan desgastando o se rompan. Esto implicaría cambiar la polea entera si se hubiera utilizado algún adhesivo permanente. Debido a la geometría tan compleja del interior de esta pieza existe un límite inferior de tamaño y espesor que no pueden ser superados en el modelo para evitar la extrema fragilidad de la pieza.

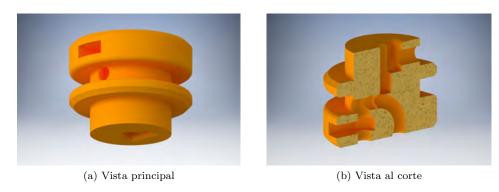


Figura 3.33: Polea gripper 3

Por último, la herramienta de agarre consta de una pieza que sirve de unión al robot UR3. Esta dispone de cuatro taladros pasantes, para tornillos M6, en la sección que conecta con el extremo del robot y de tres taladros pasantes, en este caso para tornillos M3, para conectarse a la base principal de la herramienta.



Figura 3.34: Base secundaria gripper 3

3.5.2. Problemas encontrados y soluciones propuestas

En una primera versión del módulo base, se trató de crear una unión "snap-fit", que eliminase la necesidad de utilizar tornillos para enlazar los módulos. Esto supone el contacto directo entre los dos módulos, que genera una fricción mucho más elevada que la creada entre plástico y metal utilizando tornillos. Realizar esta conexión supone la deformación elástica de dos piezas, en sus secciones concentradoras de tensiones. Esto supone llevar a las piezas cerca de su límite, además de poder llegar a deformarlas plásticamente y, por tanto, de modo permanente, o incluso a romperlas. Si la escala a la que se fabricaran fuera mayor, este tipo de conexión podría llegar a ser viable, aunque probablemente la utilidad de este tipo de garras dejaría de tener sentido, ya que no podrían cargar con el peso de objetos de ese tamaño en cuanto tuvieran una densidad media o elevada.

En cuanto a la polea, la primera versión que se diseñó e imprimió resultó tener espesores demasiado finos. Esto suponía que al apretar el tornillo de control de longitud de los cables la pieza se partía. Este tornillo está en una posición crítica, ya que genera un esfuerzo perpendicular a las capas de impresion en la seccion más estrecha de la pieza. Este problema podría solucionarse utilizando otro material para su fabricación, como un plástico más resistente o aluminio, o una técnica de fabricación distinta.

3.5.3. Mejoras para versiones futuras

Para mejorar la adaptabilidad a una mayor variedad de objetos, podría reducirse el tamaño de los eslabones y aumentar su cantidad. Esta modificación crearía nuevos nodos de articulación en los dedos, lo que generaría nuevas posiciones posibles en el espacio para los eslabones. Así, pueden adaptarse a superficies más complicadas, aumentando el área de contacto con los objetos y por tanto reduciendo la presión ejercida sobre ellos. Además, pueden adaptarse a superficies más complejas, aumentando las probabilidades de que el agarre se realice con éxito.

Para mejorar el comportamiento de la garra es necesario aumentar la fuerza que ejercen los dedos. En su estado actual, debido al diseño del prototipo y aunque se ejerza un par muy grande sobre la polea, la fuerza que imprimen los dedos sobre los objetos que agarra es muy pequeña. Una posible resolución para este problema sería separar todavía más los agujeros de guiado del hilo del eje de giro de cada articulación, y tratar de tirar de la forma más recta posible del cable, para evitar rozamientos excesivos.

Otra mejora que podría implementarse es utilizar un único cable para los tres dedos, que recorra cada uno de ellos ida y vuelta. Esto haría que la garra fuera todavía más adaptable, ya que permitiría que cada dedo se contrajera todo lo que le permitiera el objeto a manipular. Con el diseño actual, cuando un único dedo se ve bloqueado, se impide el movimiento del resto, ya que se bloquea la polea, que es la que conecta los tres dedos.

El disñeo de la polea en general debería ser mejorado, en especial el sistema de fijado de los cables. Cada cable debería tener su propio orificio de entrada para que el ajuste sea más sencillo y preciso. Además, con esta configuración la pinza podría, desde la posición de reposo con los dedos estirados, cerrarse girando el motor en cualquier sentido. Con la configuración actual si el motor se pasa de giro los cables pueden salirse de la polea, lo que lleva a un mal funcionamiento de los dedos.

Por último, aunque la herramienta se ha creado con tres dedos habría sido mejor haber incluido otro más, teniendo un total de cuatro dedos. Debido a la dificultad de sincronización práctica de los dedos daría mejor resultado tener cuatro dedos que crean esfuerzos opuestos dos a dos.

3.6. Gripper 4



Figura 3.35: Diseño herramienta de agarre 4



Figura 3.36: Prototipo de herramienta de agarre $4\,$

La cuarta y última herramienta de agarre está basada en el producto MultiChoiceGripper, manufacturado por la compañía FESTO. Este diseño se basa en la mecánica de la mano humana, y en como el pulgar sirve para imponer un esfuerzo con la misma dirección y sentido contrario que el resto de los dedos. Para adaptarse a distintas tipologías de objeto, la herramienta desarrollada por FESTO es capaz de reorientar los dedos, y obtener diferentes configuraciones. Por ejemplo, para objetos con perímetro redondo se colocan con simetría ternaria, sin embargo, para objetos con caras paralelas se coloca uno en oposición a los otros dos.

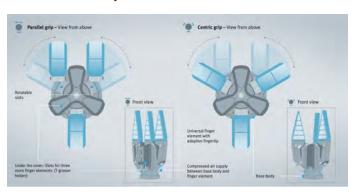


Figura 3.37: Diferentes disposiciones de los dedos del MultiChoiceGripper de FESTO

Para la reproducción de este prototipo, sin embargo, se va a obviar esta característica y a centrar la atención en el diseño de los propios dedos. Son estructuras pasivas que se adaptan a los objetos que los deforman. Esta herramienta de agarre está constituida por tres dedos de un material flexible. Los dedos son triangulares con paredes delgadas y, longitudinalmente, tiene un núcleo formado por distintas partes rígidas que impide que las paredes del dedo se aproximen. Con esta morfología, al intentar deformar el dedo, lo que ocurre es que la punta se queda aproximadamente en el mismo lugar, pero el cuerpo se desplaza lateralmente con el esfuerzo impuesto sobre el dedo. Esta deformación del dedo, le permite adaptarse a la forma de la superficie del objeto con el que hará contacto, y dada la flexibilidad del mismo, se deformará antes de dañarlo. En este caso la elección del número de dedos que forman la garra podría haber sido dos, tres o cuatro. Finalmente son tres debido a que el mecanismo del husillo hace que estén perfectamente sincronizados y no es necesario complicar más el diseño añadiendo un cuarto dedo, aunque en algún escenario podría resultar útil disponer de él.

3.6.1. Diseño y fabricación

Para generar el movimiento de agarre, cada dedo puede sujetarse con juntas rotacionales en los dos extremos de su base. Manteniendo fija la posición de los extremos exteriores de las bases de los dedos y, modificando la altura de los extremos interiores, se consigue el movimiento de apertura y cierre de la mano. Este movimiento, que se puede generar de muchos modos, se realiza con un mecanismo tuerca más husillo. Un motor gira el husillo, lo que hace que la tuerca se desplace arriba y abajo cuando se impide su rotación. Se conectan a la tuerca los extremos interiores de los dedos mediante unos conectores, que permiten la posibilidad del movimiento, al mismo tiempo que imposibilita la rotación de la tuerca. El motor seleccionado para esta herramienta es el modelo de MicroMetal con una reducción de 1:125 de 6 Voltios.

La herramienta de agarre se compone de tres dedos flexibles, una base rígida y un conector correspondientes a cada uno, una base donde se sujetan los extremos exteriores de la base de los dedos y un adaptador para el UR3. Además, la parte mecánica está compuesta por un motor de corriente continua, un acoplador flexible, el husillo y la tuerca, un tirador al que se fija la tuerca y a la que se sujetan los conectores de los dedos y el soporte del motor.

En primer lugar, para la fabricación de los dedos se pueden utilizar tanto materiales rígidos de pequeño espesor, lo que les confiere cierta flexibilidad, o materiales flexibles. Como materiales flexibles se pueden utilizar diferentes tipos de siliconas y plásticos elastómeros. Para la impresión tridimensional, la primera opción, utilizar materiales rígidos de bajo espesor, no resulta viable, porque los materiales rígidos con los que se imprime son demasiado frágiles, y su vida a fatiga cuando son sometidos a esfuerzos alternos es muy baja. Dentro de los materiales flexibles, y para aportar cierta anisotropía en el dedo, se pueden utilizar materiales de impresión flexibles. Por ejemplo, el termoplástico elastómero producido por la compañía Recreus [21] denominado FilaFlex. Este tipo de materiales se diferencian principalmente en su elasticidad, además de presentar flexibilidad. Para esta aplicación en concreto no resulta interesante la elasticidad, porque a la hora de coger objetos con una masa elevada, dentro de los límites de la mano y del robot que la lleva incorporada, el simple peso del objeto podría hacer que el dedo se deforme y falle el agarre.

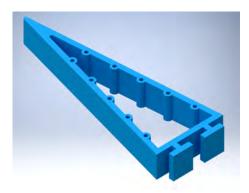


Figura 3.38: Dedo de termoplástico flexible gripper 4

Los dedos tienen en su base una geometría que permite que sean insertados en unas piezas rígidas, la fricción entre las dos piezas es más que suficiente para que se mantengan en su sitio. Estas piezas tienen dos orificios en sus extremos, en los que se introducirán tornillos que harán las veces de ejes de rotación. Uno de los extremos se une a la base y el otro a un conector.



Figura 3.39: Base rígida para el dedo gripper 4

En cuanto a las secciones rígidas que forman la estructura interna del dedo, en una primera versión iban a ser piezas impresas en 3D, con taladros pasantes en sus extremos, para meter un eje y sujetarlos a los cilindros interiores del dedo. Estas secciones no iban a ser continuas, sino que iban a tener una profundidad de unos 5 milímetros desde cada cara del dedo. El inconveniente de este diseño es que al imprimir con materiales flexibles como el FilaFlex no se puede generar material de soporte, porque se queda unido al modelo y no se puede separar de manera sencilla. Por este motivo se optó por utilizar simplemente un alambre rígido y crear un bucle que se introduce por los agujeros de la estructura del dedo. Para el primer prototipo se utilizó un alambre muy rígido, pero con un diámetro demasiado próximo al de los agujeros del dedo. Entre el alambre y el dedo se creaba una fricción altísima, lo que no permitía al dedo deformarse con facilidad, o una vez se deformaba no volvía a su posición inicial. Por tanto, se optó por utilizar un alambre más fino, aunque menos rígido. Esta vez había suficiente juego entre las piezas para que el dedo se comportara como se esperaba. Aunque no tenga una gran rigidez, en las pruebas realizadas no se aprecian grandes deformaciones.

La pieza central sobre la que se acopla la tuerca (figura 3.40a), del mecanismo husillo más tuerca, es a la que se unen también los tres conectores (figura 3.40b), que a su vez conectan con los dedos.

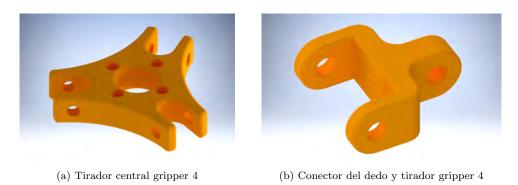


Figura 3.40: Tirador y conector gripper 4

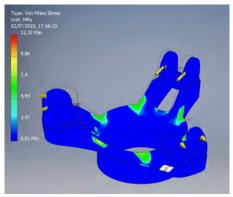
La base está formada por dos piezas, la principal, sobre la que se montan los dedos y se acopla el motor, y una secundaria que sirve para unir la herramienta de agarre con el robot.

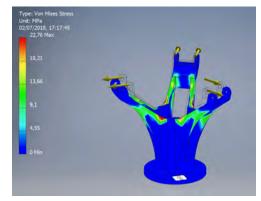
La segunda pieza de la base tiene los cuatro agujeros correspondientes al extremo del UR3 y los tres que la conectan con la pieza principal de la base. Presenta un agujero por el que podrán salir los cables eléctricos que alimentan el motor.



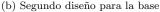
Figura 3.41: Unión de la base principal al robot UR3 gripper 4

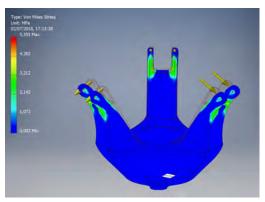
Para la pieza principal de la base se realizaron varios diseños, y se hizo un estudio básico de deformación para cada uno de ellos. Estas simulaciones se llevan a cabo en el propio entorno de Inventor, la herramienta software de CAD utilizada. Se seleccionan las características físicas del material con el que se va a fabricar, termoplástico PLA, y se seleccionan tanto los esfuerzos a los que va a ser sometida la pieza, como los puntos o superficies que están fijos en el espacio. Los esfuerzos a los que va a ser sometida la pieza, de modo simplificado, son tres fuerzas iguales, perpendiculares al apoyo de cada dedo y hacia fuera. La superficie inferior es la que queda fija en el espacio. La rigurosidad de estas simulaciones no es realmente importante, dado que lo que se pretende observar es la diferencia de deformación entre los modelos, no el comportamiento simulado de uno de ellos ante una situación real. El módulo de las fuerzas se ha elegido suficientemente grande como para mostrar las diferencias entre los diseños.





(a) Primer diseño para la base





(c) Tercer diseño para la base

Figura 3.42: Tensión de Von Mises gripper 4

En las simulaciones se observa que hay una notable diferencia entre los esfuerzos máximos de tracción que experimentan las piezas, siendo los de compresión prácticamente iguales. Los esfuerzos a tracción son críticos en las piezas impresas en 3D, en la dirección perpendicular a los planos de deposición de material. Esto es debido a la menor adhesión que presentan las distintas capas entre sí al ser depositadas frente a la cohesión del filamento al ir creando cada capa de modo continuo. En las imágenes se representan las tensiones principales, asociadas a una escala de color, y son los esfuerzos de tracción/compresión que se generan en cada punto de la pieza, con las condiciones de carga establecidas.

Como se puede apreciar, la pieza que menos deformaciones sufre es la tercera, por lo que es el modelo con el que se construye el prototipo. La pieza tiene unos agujeros en su lateral, por donde se introducirán los tornillos que sujetan el motor en su sitio. La sujeción del motor es la misma que en el caso anterior.

3.6.2. Problemas encontrados y soluciones propuestas

La longitud de las piezas que conectan la base de los dedos con el tirador es crítica, ya que afecta directamente al espacio que tiene que recorrer la tuerca verticalmente para abrir y cerrar la garra por completo. La reducción de esta distancia se consigue reduciendo al máximo la longitud de los conectores. De la primera a la segunda versión de los conectores se consiguió reducir la longitud del husillo necesaria aproximadamente 2,5 centímetros.

El principal problema presentado es el posicionamiento del husillo en el centro de la garra, que afecta al agarre de los objetos más esbeltos que no se pueden coger por sus extremos, dado que el husillo chocaría con ellos. Por este motivo se ha intentado reducir al máximo la longitud del husillo, sin que por ello se salga la tuerca del husillo en su movimiento normal.

3.6.3. Mejoras para versiones futuras

En el diseño de los dedos, y para solventar el problema anterior, podría hacerse la base más estrecha. Haciendo que las conexiones a la base y al conector estén más próximas. Esto reduce la amplitud del movimiento vertical de la tuerca necesario para abrir y cerrar la garra. Además, la unión del dedo a su base rígida podría tener su conexión en los extremos, esta modificación haría que la deformación del dedo, y por tanto su adaptación a los objetos, fuera aún mayor.

Para la estructura interna del dedo podría seleccionarse un material más rígido. En general, para diámetros de aproximadamente 1.5mm es difícil encontrar materiales muy rígidos, que a su vez permitan su deformación en servicio y puedan ser deformados en la fabricación del dedo. Este problema trató de solucionarse con un material de un diámetro ligeramente más grande, pero este creaba demasiada fricción con el dedo, lo que no permitía su rotación. Esto a su vez suponía que el dedo no se deformara con facilidad, lo que eliminaba su calidad de herramienta de agarre blanda. Para solucionar el problema de modo correcto, podría utilizarse un material con mayor diámetro y agrandar los agujeros del dedo donde van alojados.

Capítulo 4

Control

4.1. Universal Robots 3



Figura 4.1: Productos Universal Robots

El robot sobre el que se van a montar las herramientas de agarre es el UR3, un producto de la gama de robots colaborativos de la compañía Universal Robots. En este grupo de productos se incluyen tres robots UR3, UR5 y UR10, de izquierda a derecha en la figura 4.1. Cada uno de ellos tiene una capacidad de carga y un alcance diferentes. En concreto para este proyecto se va a utilizar el modelo UR3. Tiene una capacidad de carga de 3 kilogramos y un alcance de 500 milímetros. El robot dispone de seis grados de libertad, denominadas base, hombro, codo y muñecas 1, 2 y 3. Cada articulación puede girar 360 grados en ambos sentidos, y la muñeca 3, la articulación del extremo tiene giro infinito en ambos sentidos. La velocidad máxima de las articulaciones base, hombro y codo es de 180 grados por segundo, la del resto es de 360 grados por segundo. Además dispone de una seta de seguridad que, al ser pulsada, detiene todos los movimientos del robot.

Dispone de herramientas de programación muy sencillas e intuitivas. El proceso de programación se basa en el guiado directo, presionando un botón de la interfaz gráfica de programación se liberan los motores de las articulaciones y se puede mover manualmente el robot a una posición determinada. Con esta herramienta se pueden determinar una serie de puntos, y el robot los sigue al iniciar el programa. Además de mover el robot por un camino, el software permite crear bucles, sentencias condicionales o incluso incluir un script de código. También permite crear variables y actualizar sus valores y utilizarlas durante la ejecución del programa. Dispone de un cuadro de conexiones para entradas y salidas tanto analógicas como digitales, como puede verse en la figura 4.2. El cuadro está dividido en varias secciones, la amarilla con texto rojo sirve para conexiones de botones de emergencia y seguridad, la amarilla con texto negro incluye entradas/salidas configurables con señales de seguridad compartidas con otras máquinas. La sección gris es para entradas/salidas digitales de propósito general y la verde es para entradas/salidas analógicas de propósito general. En general las salidas son de 24 Voltios, pero las salidas analógicas se pueden configurar para que la salida tenga un valor entre 0 y 10 Voltios. Esto es especialmente útil cuando se quiere trabajar con esas señales en un microprocesador externo por ejemplo, para el control direccional de un motor de corriente continua como en el caso de las dos garras electromecánicas.

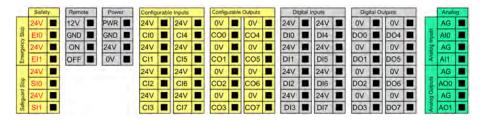


Figura 4.2: Entradas y salidas UR3

Para ejecutar un programa basta con abrirlo desde la interfaz de programación y reproducirlo. Si el robot no se encuentra en la posición de inicio, habrá que llevarlo hasta ella, de forma manual o automática, a una velocidad menor que la normal del robot. Para ajustar una herramienta al robot es necesario programar tres datos, el PCH, el centro de gravedad respecto al sistema de coordenadas del extremo y la carga útil. El PCH es el punto de contacto de la herramienta y la pieza de trabajo. En una garra, estaría en el centro geométrico de los puntos de contacto entre la garra y el objeto, y en una herramienta destornillador estaría en el extremo de la herramienta.

Como se puede ver en la figura 4.3 la unión del robot a la herramienta se realiza mediante cuatro tornillos, en concreto son de métrica 6 y están distribuidos en una circunferencia de diámetro 50 milímetros.



Figura 4.3: Robot UR3 en detalle

4.2. Control neumático

Para la automatización del módulo neumático es necesario controlar la posición de las dos electroválvulas y la tensión en los bornes de la bomba de vacío. En las posiciones normales de las electroválvulas, cuando no se aplica tensión a sus solenoides, la primera conecta el depósito de aire a presión con un tubo ciego y la segunda conecta la salida de la bomba de vacío con la herramienta. Para generar vacío en el interior de la herramienta basta con aplicar tensión a la bomba de vacío. Para que llegue aire a presión a la herramienta es necesario aplicar tensión a las dos electroválvulas, así se conecta el depósito de aire a presión con las cámaras neumáticas pasando por un módulo con un regulador de presión y filtro.

Para actuar sobre las electroválvulas es necesaria una tensión de 24 Voltios y una potencia aproximada de 4,8 W, por lo que las salidas digitales del UR3 tienen potencia suficiente para manejarlas. La referencia de tensión es aleatoria, ya que solo hay que alimentar una bobina, que es un dispositivo electrónico pasivo reversible. Para programar estas señales se utiliza la función $set_standard_digital_out_(n,b)$ siendo n el identificador de puerto de salida del panel de entradas y salidas del UR3 y b el valor booleano de la salida, high (True) o low (False). Los parámetros de velocidad y aceleración de las articulaciones del robot en el caso de las herramientas neumáticas se puede aumentar hasta 200 °/s y 200°/ s^2 respectivamente. Valores mayores empiezan a crear problemas en el transporte de los objetos.

4.2.1. Problemas encontrados y soluciones propuestas

Para la generación de vacío en primer lugar se probó con un eyector de vacío. Los eyectores de vacío consisten en un dispositivo con tres conexiones, por una de ellas se inyecta aire a presión, en el interior del eyector el tubo por el que pasa el aire se va estrechando, y en su sección más estrecha tiene una sección abierta. El aire después continúa hacia el exterior por otra vía. La tercera vía de aire conecta el exterior con la sección interior abierta. Al pasar aire a presión por la vía principal se genera una reducción de presión en el estrechamiento por el efecto Venturi, este lugar de presión reducida está conectado la tercera vía, que conecta con una zona a más presión. Esta diferencia de presiones genera un flujo del aire hacia dentro del eyector y en la dirección de salida del aire. Cuando la tercera vía se conecta a una cámara neumática cerrada se va extrayendo de su interior aire poco a poco, consiguiendo eventualmente una presión igual que la generada en el estrechamiento. Esto supone crear prácticamente un vacío en dicha cámara.

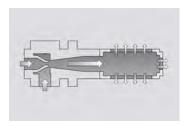


Figura 4.4: Esquema de un eyector de vacío

Lamentablemente, los eyectores de vacío no funcionan correctamente cuando hay pequeñas fugas en la cámara neumática. Y conseguir una unión perfectamente sellada con piezas impresas en 3D es prácticamente imposible, a menos que se usen adhesivos permanentes. Esto eliminaría una de las mejores características de estas herramientas de agarre, no podrían ser desmontadas y limpiadas con facilidad, además de dificultar su reparación y el reemplazamiento de alguna cámara al ser dañadas o simplemente cambiarlas al final de su vida útil.

4.3. Control electromecánico

Para realizar el cambio de polaridad de los motores, necesario para obtener los dos sentidos de giro, el robot UR3 no permite realizar directamente este cambio desde el panel de conexiones, por lo que es necesario utilizar un puente en H. Se puede utilizar uno como el de la figura 4.5.



Figura 4.5: Puente en H modelo L298

Para el control del puente H se utiliza un microprocesador que recoge dos señales que provienen del robot y se ejecuta un código simple. Si no hay tensión en ninguna señal el motor debe permanecer parado, si hay tensión en uno de ellos el motor debe girar en un sentido, es decir activar una de las señales del puente, y si hay tensión en la otra señal el motor deber girar en el sentido contrario, activar la otra señal del puente. Por comodidad y disponibilidad, se ha utilizado un microprocesador que incluye un puente H, lo que reduce el número de conexiones necesarias, y el tamaño del módulo de control eléctrico. En concreto es el modelo Romeo V2 (figura 4.6) que se programa desde como un Arduino Leonardo, desde la misma aplicación.



Figura 4.6: Placa microcontroladora con control de motores integrado

Para la apertura y cierre de las garras electromecánicas se tienen que controlar dos señales desde el robot, la señal de apertura y la de cierre. Estas dos señales se envían al microprocesador y dependiendo de sus valores hace que en el puente H se aporte tensión al motor en un sentido si una señal está activa, en sentido opuesto si lo está la otra, o que no se aporte tensión al motor si ninguna de las dos está activa. Como estas señales van a ser procesadas por un microprocesador es necesario que su valor de tensión sea aproximadamente de 5 Voltios. Para ello se utilizan las dos señales de salida analógica configurables de las que dispone el UR3. Para utilizarlas se programa en la interfaz del robot el código de script set_standard_analog_out_(n,f) siendo n el identificador de la señal, 0 o 1, y f el porcentaje de tensión sobre 10 Voltios que se desea seleccionar, un valor decimal entre 0 y 1. Por ejemplo con los valores (1,0.3) se pondría una tensión de 3V en la salida analógica 1.

El código en el microprocesador simplemente controla el comportamiento del puente H a partir de las dos señales anteriores. En concreto modifica el valor de dos señales, una señal digital de enable del conector para el motor y una señal digital que controla el sentido de giro del motor.

La alimentación del puente H se realiza de forma interna en el microprocesador, y para la alimentación del motor se conecta una fuente de tensión de 5 Voltios que aporta una corriente máxima de 2 Amperios, que tiene la potencia suficiente para alimentar un motor de 6 Voltios.

Los parámetros de velocidad y aceleración de las articulaciones del robot en el caso de la garra de los dedos articulados se puede aumentar hasta $200~^{\circ}/\mathrm{s}$ y $150^{\circ}/\mathrm{s}^2$ respectivamente. Sin embargo, para la segunda herramienta estos valores se pueden aumentar a $720~^{\circ}/\mathrm{s}$ y $250^{\circ}/\mathrm{s}^2$ respectivamente.

4.3.1. Problemas encontrados y soluciones propuestas

El primer puente H que trató de utilizarse no era capaz de transmitir la potencia suficiente y sus componentes alcanzaban una temperatura muy elevada. Esta disipación de potencia hacía que los motores no tuvieran potencia suficiente para moverse. En segundo lugar se probó el modelo L298 de puente H. En este caso su funcionamiento era el esperado, pero suponía realizar un elevado número de conexiones entre el microprocesador y el puente H. Finalmente se optó por utilizar el puente H interno incluido en el microprocesador, cuyas conexiones están puenteadas y solo hace falta conectar al microprocesador las dos señales provenientes del UR3, las tierras de dichas señales y la del microprocesador, el motor y su alimentación.

4.4. Programación UR3

Las acciones que lleva a cabo el robot se realizan en bucle infinito, y son las indicadas a continuación:

Programa principal bidireccional:

- 1. Movimiento del robot a un punto sobre el objeto
- 2. Aproximación del extremo del robot al objeto garra abierta
- 3. Cierre de la garra
- 4. Movimiento del robot sobre el objeto
- 5. Desplazamiento a un punto diferente
- 6. Aproximación del extremo del robot al lugar de liberación
- 7. Apertura de la garra
- 8. Movimiento del robot sobre el objeto
- 9. Aproximación del extremo del robot al lugar de liberación con la garra abierta
- 10. Cierre de la garra
- 11. Movimiento del robot sobre el objeto
- 12. Vuelta al punto inicial
- 13. Aproximación del extremo del robot al lugar de liberación
- 14. Apertura de la garra

Los movimientos que rigen el experimento dependen del objeto. Esto es debido a que algunos objetos pueden sostenerse por sí mismos sobre una superficie plana y otros no, como un huevo o una pelota. Estos objetos se colocan sobre una base y las acciones que sigue el robot se ven modificadas de la siguiente manera:

Programa principal unidireccional:

- 1. Movimiento del robot a un punto sobre el objeto
- 2. Aproximación del extremo del robot al objeto garra abierta
- 3. Cierre de la garra
- 4. Movimiento del robot sobre el objeto
- 5. Desplazamiento a un punto diferente
- 6. Vuelta al punto inicial
- 7. Aproximación del extremo del robot al lugar de liberación
- 8. Apertura de la garra

Capítulo 5

Experimentación

5.1. Planteamiento experimental

Para comprobar la versatilidad de las herramientas de agarre y para poner a prueba su resistencia se han realizado numerosos experimentos. El objetivo de los experimentos es conseguir que una garra consiga coger un objeto determinado, que el robot realice algún movimiento y que lo libere. Se considerará que la prueba ha tenido éxito si el objeto no se cae ni en el agarre ni en el desplazamiento. Se pretende que las herramientas sean capaces de manipular una gran cantidad de objetos diferentes, atendiendo a su forma, rigidez, fragilidad... Por ello se han elegido como objetos para la experimentación doce objetos diferentes. Cada uno de ellos con características que los diferencian del resto. El proceso de experimentación se lleva a cabo en tres entornos diferentes, normal, húmedo y con polvo. El entorno normal se consigue sin modificar las propiedades del medio. El entorno húmedo consiste en humedecer tanto la herramienta de agarre como el objeto. Este humedecimiento causa efectos mayores en unos objetos que en otros, dependiendo de la superficie del objeto y de cuanto sea capaz de mojarlo el agua. Por ejemplo, un envase de plástico con paredes lisas debería verse muy poco afectado por este entorno, sin embargo, una esponja modifica enormemente sus propiedades, como su peso y adherencia superficial. Por último, el entorno con polvo se simula esparciendo tanto por la herramienta como por el objeto una generosa cantidad de harina.

Para poder llevar a cabo los experimentos a una mayor velocidad, en primer lugar, se realizan los experimentos en entorno normal y después con polvo. Una vez se han llevado a cabo los experimentos en los dos primeros entornos se limpia tanto el objeto como la superficie de trabajo y la herramienta de agarre. Y a continuación se realizan los ensayos en entorno húmedo.

En cuanto a las repeticiones de cada experimento, se realizan 20. Esto supone que para cada objeto en cada herramienta se realizan 60 repeticiones, veinte para cada entorno, que son 240 por cada garra y objeto. Al tratarse de doce objetos, se realizan un total de 2880 repeticiones.

Debido al carácter doble del programa bidireccional mencionado anteriormente cada vez que se ejecuta una vuelta del bucle se realizan dos repeticiones, una en la posición inicial y otra en la posición secundaria. Sin embargo, con el programa unidireccional se realiza una única repetición cada vuelta del bucle, aunque el desplazamiento del robot para cada repetición se vea prácticamente duplicado. Se ha comprobado de forma experimental que esto último no afecta de forma considerable, ya que una vez agarrado un objeto, recorrer una distancia mayor, a una velocidad

prácticamente constante, no influye en el agarre.

Para cada grupo de garras, neumáticas y electromecánicas, las acciones de abrir y cerrar las garras se realizan como se ha indicado en los apartados anteriores. En la herramienta de agarre basada en materiales granulares se considera la apertura de la garra como inyectar aire dentro de la cámara, y cerrarla como generar vacío.

5.2. Objetos para experimentación

Pelota de tenis

Este objeto ha sido seleccionado por su forma prácticamente esférica y por su tamaño, puede considerarse bastante rígida para los esfuerzos a los que va a estar sometida. Los resultados esperados son que en general todas las garras excepto la granular sean capaces de cogerla con una alta tasa de éxito. Para esta garra en concreto, el tamaño del objeto puede resultar excesivo.



Figura 5.1: Pelota de tenis

• Dimensiones: Diámetro 70mm

• Peso: 57,60g

Limpiador de pantalla

Este objeto con forma de Q, es poco denso y es considerablemente blando y deformable. Como en el caso anterior se espera que todas las garras excepto la granular sean capaces de realizar los agarres con éxito. En caso de que fuera deformado se espera que el objeto vuelva a su estado original. De todos modos, estas deformaciones no deberían ser excesivamente elevadas.



Figura 5.2: Limpiador de pantalla

• Dimensiones: Diámetro 80mm, espesor 30mm

• Peso: 12,80g

Envase de vaselina

Este envase de plástico tiene forma cilíndrica y su superficie es muy lisa y poco porosa. Además, es uno de los objetos más pesados de todos los seleccionados.



Figura 5.3: Envase de vaselina

• Dimensiones: Altura 50mm, diámetro 80mm

• Peso: 147,00g

Envase metálico

Este objeto tiene forma prismática, con caras planas y paralelas 2 a 2, además de varias irregularidades. Está hecho de metal, pero está cubierto por una capa de pintura, que hace que su superficie sea lisa y poco porosa.



Figura 5.4: Envase metálico

 $\bullet\,$ Dimensiones: Longitud 85mm, anchura 50mm, espesor 30mm

• Peso: 47,90g

Nuez

Este fruto seco tiene unas pequeñas dimensiones en comparación con el resto de objetos. Tiene una superficie muy rugosa y es muy ligera.



Figura 5.5: Nuez

• Dimensiones: Altura 45mm, diámetro 35mm

• Peso: 14,40g

Piedra

Este es el objeto más pequeño con el que se experimenta, y con el que se pretende comprobar el alcance de las herramientas de agarre en cuanto a objetos de tamaño reducido. Los resultados esperados son que mientras que con las garras granular y multichoice sea muy sencillo su agarre, con las otras dos no se tenga demasiado éxito.



Figura 5.6: Piedra

 \bullet Dimensiones: Longitud 25mm, anchura 15mm, espesor 10mm

• Peso: 12,90g

Tomate

Debido a la larga duración de los experimentos y a la caducidad de este producto para los experimentos con las distintas garras, realizados en días diferentes, no ha podido utilizarse exactamente el mismo tomate. En general se han buscado ejemplares lo más similares posibles, tanto en forma como en grado de madurez y peso. Además del reto principal de coger el tomate este objeto presenta una oportunidad perfecta para comprobar si durante el proceso de agarre se daña su superficie.



Figura 5.7: Tomate

• Dimensiones: Altura 70 mm, diámetro 90 mm

• Peso: 229,60g

Huevo crudo

Es uno de los objetos más complicados, ya que se trata de un objeto duro pero muy frágil. Puede soportar un elevado esfuerzo cuando se sujeta por sus polos, pero no así por sus laterales. Las pruebas se realizan sujetándolo por sus laterales para poner al objeto en su posición más comprometida.



Figura 5.8: Huevo crudo

• Dimensiones: Altura 65 mm, diámetro 50 mm

• Peso: 71,00g

Pegamento en barra

Este objeto es más esbelto que el resto, teniendo una pequeña área de base, pero una considerable altura. Su forma es prácticamente cilíndrica, pero en su parte superior e inferior presenta ciertas irregularidades que podrían ayudar al agarre.



Figura 5.9: Pegamento en barra

 \bullet Dimensiones: Altura 100mm , diámetro 25mm

• Peso: 19,60g

Estropajo

Junto con el limpiador de pantalla son los objetos más deformables del grupo. Este objeto está compuesto por una base de esponja y una pequeña superficie más abrasiva y un poco más rígida.



Figura 5.10: Estropajo

• Dimensiones: Longitud 105 mm, anchura 80mm, espesor 25mm

• Peso: 10,20g

Brócoli

Una pequeña rama de brócoli es el segundo producto de agricultura, aunque en este caso, debido a la lenta maduración del producto, sí que ha sido posible utilizar la misma muestra para todas las garras.



Figura 5.11: Brócoli

• Dimensiones: Altura 120mm, diámetro 90mm

• Peso: 130,40g

Caja de caramelos

Este último objeto debería representar un gran reto para todas las herramientas de agarre excepto para la granular. Esto es debido a su forma muy plana y con caras planas y paralelas dos a dos. Además, su bajo peso dificulta el agarre ya que, con una pequeña desincronización de los dedos de las garras, en su caso, podrían empujar al objeto fuera del alcance de la garra durante el agarre.



Figura 5.12: Caja de caramelos

• Dimensiones: Longitud 60mm, anchura 35mm, espesor 15mm

• Peso: 7,90g

5.3. Resultados

A continuación, se presentan los datos obtenidos a partir de los resultados de la experimentación. En la tabla siguiente se asigna un número de identificación a cada objeto para simplificar las tablas de resultados. En las tablas de resultados Las tres primeras columnas de datos corresponden al porcentaje de éxito de las herramientas de agarre en los tres escenarios, normal, humedad y polvo. En la cuarta columna se presenta la media de las tasas de éxito para cada objeto en todos los escenarios. Por último, bajo las tablas, se encuentra la tasa de éxito global, hallada como la media entre las tasas de cada objeto en cada escenario.

Identificador	Descripción		
1	Pelota de tenis		
2	Limpiador de pantalla		
3	Envase de vaselina		
4	Envase metálico		
5	Nuez		
6	Piedra		
7	Tomate		
8	Huevo crudo		
9	Pegamento en barra		
10	Estropajo		
11	Brócoli		
12	Caja de caramelos		

Tabla 5.1: Identificación de los objetos

Tasa de éxito Normal Humedad Polvo Media Objeto 1 $100\,\%$ 100% $100\,\%$ $100\,\%$ Objeto 2 100%100% $100\,\%$ 100%Objeto 3 $100\,\%$ $100\,\%$ $0\,\%$ $67\,\%$ Objeto 4 $95\,\%$ $87\,\%$ $100\,\%$ $65\,\%$ Objeto 5 $100\,\%$ $100\,\%$ $100\,\%$ $100\,\%$ Objeto 6 $20\,\%$ 0% $30\,\%$ 17%Objeto 7 95%95% $5\,\%$ 65% $0\,\%$ $0\,\%$ Objeto 8 0%0%Objeto 9 $100\,\%$ $100\,\%$ $100\,\%$ 100%Objeto 10 $80\,\%$ 100% $75\,\%$ $85\,\%$ Objeto 11 $95\,\%$ $100\,\%$ $95\,\%$ $97\,\%$ Objeto 12 $100\,\%$ 100% $100\,\%$ 100% $76\,\%$ Global

Tabla 5.2: Experimentacion con herramienta de agarre 1

Tasa de éxito

	Normal	Humedad	Polvo	Media
Objeto 1	0%	0%	0%	0 %
Objeto 2	0%	0%	0%	0 %
Objeto 3	0%	0%	0%	0 %
Objeto 4	0%	0%	0%	0 %
Objeto 5	70%	90%	60%	73 %
Objeto 6	85%	90%	0%	58 %
Objeto 7	0%	0%	0%	0 %
Objeto 8	0%	0%	0%	0 %
Objeto 9	100%	100%	95%	98 %
Objeto 10	0%	0%	0%	0 %
Objeto 11	0%	0%	0%	0 %
Objeto 12	95%	100%	100%	98 %

Global 27 %

Tabla 5.3: Experimentacion con herramienta de agarre $2\,$

Tasa de éxito

	Normal	Humedad	Polvo	Media
Objeto 1	50%	55%	20%	42%
Objeto 2	100%	30%	95%	75 %
Objeto 3	0%	0%	0%	0 %
Objeto 4	0%	0%	0%	0 %
Objeto 5	0%	0%	0%	0 %
Objeto 6	0%	0%	0%	0 %
Objeto 7	100%	80%	100%	93 %
Objeto 8	0%	0%	0%	0 %
Objeto 9	30%	20%	10%	20 %
Objeto 10	85%	20%	65%	57 %
Objeto 11	85%	70%	50%	68 %
Objeto 12	0%	0%	0%	0 %

Global 30%

Tabla 5.4: Experimentacion con herramienta de agarre $3\,$

	Tasa de éxito			
	Normal	Humedad	Polvo	Media
Objeto 1	100%	100%	100%	100 %
Objeto 2	100%	100%	100%	100 %
Objeto 3	100%	100%	100%	100 %
Objeto 4	75%	45%	55%	58 %
Objeto 5	100%	100%	100%	100 %
Objeto 6	85%	90%	75%	83 %
Objeto 7	100%	100%	100%	100 %
Objeto 8	100%	100%	100%	100 %
Objeto 9	100%	100%	100%	100 %
Objeto 10	95%	90%	95%	93 %
Objeto 11	100%	100%	100%	100 %
Objeto 12	10%	0 %	0%	3 %
Global		87 %		

Tabla 5.5: Experimentacion con herramienta de agarre $4\,$

Capítulo 6

Discusión de resultados

Después de analizar los resultados obtenidos durante la experimentación se ha llegado a varias conclusiones. En primer lugar, el orden de éxito de las garras ha sido el siguiente:

1. Estructuras pasivas	(Gripper 4)
2. Dedos de silicona	(Gripper 1)
3. Dedos articulados	(Gripper 3)
4. Material granular	(Gripper 2)

En cuanto a los entornos de experimentación en las garras neumáticas se obtiene el mejor comportamiento de las garras en ambientes húmedos. Esto se debe a que tanto en la silicona de los dedos como en el látex de la cámara neumática se aumenta la adherencia en presencia de humedad. Le sigue el entorno normal y por último el ambiente con polvo. Este comportamiento se corresponde con lo esperado, ya que el coeficiente de fricción con superficies cubiertas de polvo es menor que cuando se encuentran limpias, que a su vez es menor que con humedad.

Sin embargo, en las garras electromecánicas no se dan los mismos resultados, siendo el entorno normal en el que mejor se comportan seguido de los otros dos, en los que se obtienen tasas de éxito similares. Esto es debido a que el agarre de los objetos depende en mucha menor medida de los coeficientes de fricción.

Analizando los datos de cada objeto individualmente es interesante observar como hay objetos que el cambio de entorno no afecta prácticamente nada a los resultados y sin embargo en otros cambian drásticamente. Por ejemplo, en el caso del tomate en la primera herramienta de agarre, que tiene una caída drástica de la tasa de éxito en el entorno con polvo. Estas variaciones tan drásticas se deben a las propiedades de la superficie de los objetos, en el caso del tomate su superficie es perfectamente lisa y nada porosa, por lo que el polvo se mantiene sobre su superficie y afecta directamente al agarre. Sin embargo, con la pelota de tenis no se produce este efecto por ser tan rugosa su superficie. Otro ejemplo de este fenómeno se da con la piedra en la segunda herramienta de agarre neumática, teniendo unas tasas de éxito del 85 % y 90 % en entornos normal y húmedo respectivamente, la garra es incapaz de agarrar la piedra ni siquiera una vez.

El objeto con el que mejores resultados se han obtenido ha sido el pegamento en barra, con un 80% de éxito de forma global en todos los entornos y con todas las garras. Y los tres objetos con peores resultados han sido el envase metálico, la piedra y el envase de vaselina, con unos resultados globales del 36%, 40% y 42% respectivamente.

La elección de los objetos trató de realizarse de manera aleatoria. La segunda garra neumática está en desventaja por no poder coger los objetos más grandes, debido a la restricción por la que no puede coger objetos de más del 50 % de su diámetro. Sin embargo, debería coger los objetos pequeños mejor que el resto y no se aprecia esta gran diferencia salvo con la herramienta de los dedos articulados que es incapaz de agarrarlos. Las otras dos garras tienen un comportamiento aceptable con los objetos de pequeño tamaño además de poder manipular objetos grandes. Lo que supone que en general son herramientas de agarre más versátiles.

Observaciones gripper 1

La primera garra neumática presenta excesivas pérdidas de aire, lo que genera un elevado consumo de aire a presión en su funcionamiento, y esto hace que tenga que rellenarse el depósito de aire a presión más a menudo. El montaje sobre el robot de las dos herramientas neumáticas resulta complicado debido al poco espacio del que se dispone para atornillar las uniones. Dependiendo de la bomba de vacío para funcionar generan una gran cantidad de ruido, que sería evitado en su mayor medida si se implementara una generación de vacío funcional con un eyector de vacío.

Observaciones gripper 2

Para la segunda garra neumática se realizaron experimentos con un objeto extra, un rollo de cinta adhesiva, cuyos resultados fueron un 70 % de éxito en entorno normal y un 100 % de éxito tanto en entorno húmedo como en polvo. Esta herramienta de agarre es muy efectiva para ciertos objetos, como con el pegamento en barra y la caja prismática de caramelos, con los que se obtuvo una tasa de éxito del 98 % de media en los tres entornos. Esta herramienta por tanto podría utilizarse con un grupo de objetos definido, no teniendo por qué estar siempre en la misma orientación y permitiendo una variación pequeña en su geometría. Durante la experimentación se observó que era necesario aplicar un esfuerzo relativamente grande sobre los objetos para que el agarre se realizara con éxito, por lo que no se recomienda utilizarla con materiales extremadamente frágiles. Además, para su correcto funcionamiento los objetos tienen que estar centrados con respecto a la garra.

Observaciones gripper 3

Para poder llevar a cabo los experimentos con esta herramienta de agarre era necesario elevarlos sobre una plataforma, ya que no es capaz de recoger objetos de una superficie plana a menos que su perfil sea muy convexo, es decir que su sección vaya aumentando desde su base hasta su sección superior. Esta herramienta es la que peor comportamiento ha presentado, además de ser incapaz de manipular objetos pequeños presentaba grandes dificultades con el resto de objetos. Esto es debido sobre todo al diseño del mecanismo, y el poco par que es capaz de ejercer sobre los objetos. Es importante destacar que, en los experimentos con los objetos más frágiles y blandos, como el tomate maduro, se dejaron marcas sobre ellos, llegando incluso a perforar la piel del tomate tras ocho repeticiones.

Observaciones gripper 4

La cuarta y última herramienta de agarre es con la que se han obtenido los mejores resultados. Su instalación es la más rápidas junto con la anterior, y son las que menos ruido producen durante su utilización. Al manipular los objetos, si se encontraban en posiciones complicadas para el agarre los dedos se deformaban no solo longitudinalmente, como se han diseñado, sino además transversalmente. Esta deformación generada en los dedos es la que protege a los objetos durante el agarre. Ninguno de los objetos fue dañado durante las repeticiones de los experimentos.

Capítulo 7

Conclusiones

Durante el desarrollo de este proyecto se ha demostrado que a partir de herramientas de bajo coste y fácil adquisición se pueden diseñar y fabricar herramientas de agarre funcionales basadas en robótica blanda. Se han desarrollado cuatro prototipos, incluyendo su diseño y su fabricación, para una posterior etapa de experimentación. En esta se ha comprobado la capacidad de manipulación de las distintas garras en tres entornos de trabajo diferentes y para un total de doce objetos aleatorios. Los tres entornos son un ambiente normal sin perturbar, un exceso de humedad y un exceso de polvo tanto en la garra como en el objeto y en la superficie de trabajo. Los doce objetos seleccionados tratan de representar objetos variados que podrían ser los que estas garras tuvieran que manipular en servicio si se comercializaran. Entre ellos se encuentran objetos ligeros y pesados, grandes y pequeños, en términos relativos a las dimensiones de las garras, y con diferentes rigideces y geometrías.

Las que han presentado mejores tasas de éxito en la etapa de experimentación han sido la garra neumática con dedos de silicona y la electromecánica con estructuras pasivas. La herramienta con el proceso de fabricación más rápido y sencillo resultó ser esta última. Además, su control es muy sencillo y simplemente requiere una fuente de alimentación eléctrica, mientras que en el caso de las garras neumáticas se necesita un compresor, un depósito de aire a presión y una bomba de vacío. Otro factor a tener en cuenta es el ruido que generan las herramientas durante se utilización. Las dos garras electromecánicas son mucho más silenciosas que las neumáticas, debido al trabajo del compresor y de la bomba de vacío, aunque esta última podría sustituirse por un eyector de vacío, que es mucho más silencioso, si consiguieran eliminarse las fugas de aire de las cámaras neumáticas.

La mejor herramienta de agarre para la manipulación de objetos, no definidos a priori por tanto es la que utiliza estructuras pasivas. Es la que mejores resultados ha obtenido durante la experimentación, su fabricación ha sido además la más sencilla y rápida y durante en funcionamiento la cantidad de ruido que genera es mucho menor que las alternativas neumáticas.

La segunda mejor apuesta es la primera herramienta neumática con los dedos de silicona, también tiene muy buenos resultados y aunque su periodo de fabricación es tedioso, una vez diseñado y construido el molde los dedos pueden fabricarse sin prácticamente ningún esfuerzo y su sustitución es sencilla. Por tanto, es posible que a largo plazo una herramienta neumática sea más adecuada para algunas aplicaciones.

Otro aspecto a tener en cuenta si se pretende utilizar las herramientas de agarre en la industria alimentaria es que las herramientas neumáticas pueden ser limpiadas de forma muy efectiva y sencilla, y sus formas de actuación, el compresor y el depósito, pueden estar alejados de las herramientas y fuera del entorno de manipulación. Por tanto, para estas aplicaciones resulta más interesante la utilización de este tipo de garras. En oposición, en las herramientas electromecánicas los mecanismos de actuación están en contacto directo con el entorno de trabajo y podrían comprometer la seguridad de la instalación.

Si la velocidad de actuación es determinante en la aplicación, como en tareas de pick & place en las que la velocidad de apertura y cierre de las herramientas son críticas para la productividad, también deben considerarse las garras neumáticas como mejor opción debido a su mayor velocidad.

Desde la perspectiva del mantenimiento de las herramientas de agarre sin embargo no es sencillo determinar cuál es la más adecuada. Porque, aunque el cambio de algún componente de las garras electromecánicas supone más tiempo, los elementos neumáticos pueden fallar con mayor probabilidad que los mecánicos.

En definitiva, se podría elegir cualquiera de las dos herramientas mencionadas anteriormente como la más adecuada para una aplicación concreta. Pero si lo que se precisa es versatilidad y un buen comportamiento para la manipulación de objetos desconocidos sin duda la mejor de las herramientas de agarre diseñadas es la electromecánica con estructuras pasivas.

Capítulo 8

Referencias y Bibliografía

- [1] Soft Robotics Inc. Soft Robotics core technology. 2012. URL: https://www.softroboticsinc.com/core-technology.
- [2] Kari Love Mathew Borgatti. Simple 3D Printed Soft Robotic Gripper. Dic. de 2015. URL: https://superreleaser.com/blog/2015/12/15/simple-3d-printed-soft-robotic-gripper.
- [3] Ganesha Udupa y col. «Asymmetric Bellow Flexible Pneumatic Actuator for Miniature Robotic Soft Gripper». En: *Journal of Robotics* 2014 (2014), pág. 11. URL: http://dx.doi.org/10.1155/2014/902625%20%]%20902625.
- [4] Kevin C. Galloway y col. «Soft Robotic Grippers for Biological Sampling on Deep Reefs». En: Soft Robotics 3.1 (2016). PMID: 27625917, págs. 23-33. DOI: 10.1089/soro.2015.0019. eprint: https://doi.org/10.1089/soro.2015.0019. URL: https://doi.org/10.1089/soro.2015.0019.
- [5] B. S. Homberg y col. «Haptic identification of objects using a modular soft robotic gripper». En: 2015 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS). Sep. de 2015, págs. 1698-1705. DOI: 10.1109/IROS.2015.7353596.
- [6] H. Zhang y col. «Design and development of a soft gripper with topology optimization». En: 2017 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS). Sep. de 2017, págs. 6239-6244. DOI: 10.1109/IROS.2017.8206527.
- [7] Dr Elias Knubben Dr Wilfried Stoll Dr Heinrich Frontzek. Gripping modelled on a chameleon's tongue. Abr. de 2015. URL: https://www.festo.com/group/en/cms/10217.htm.
- [8] Dr Elias Knubben Dr Wilfried Stoll Dr Heinrich Frontzek. *Gripping modelled on an octopus tentacle*. Mar. de 2017. URL: https://www.festo.com/group/en/cms/12745.htm.
- [9] Shigeo Hirose y Yoji Umetani. «The development of soft gripper for the versatile robot hand». En: *Mechanism and Machine Theory* 13.3 (1978), págs. 351-359. ISSN: 0094-114X. DOI: https://doi.org/10.1016/0094-114X(78)90059-9. URL: http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/0094114X78900599.
- [10] Mariangela Manti y col. «A Bioinspired Soft Robotic Gripper for Adaptable and Effective Grasping». En: Soft Robotics 2.3 (2015), págs. 107-116. DOI: 10.1089/soro.2015.0009. eprint: https://doi.org/10.1089/soro.2015.0009. URL: https://doi.org/10.1089/soro.2015.0009.
- [11] T. Yoshimi y col. «Picking up operation of thin objects by robot arm with two-fingered parallel soft gripper». En: 2012 IEEE Workshop on Advanced Robotics and its Social Impacts (ARSO). Mayo de 2012, págs. 7-12. DOI: 10.1109/ARSO.2012.6213390.

- [12] Shintake Jun y col. «Soft Robotic Grippers». En: Advanced Materials 0.0 (), pág. 1707035. DOI: 10.1002/adma.201707035. eprint: https://onlinelibrary.wiley.com/doi/pdf/10.1002/adma.201707035. URL: https://onlinelibrary.wiley.com/doi/abs/10.1002/adma.201707035.
- [13] Chih-Hsing Liu y col. «Topology Synthesis and Optimal Design of an Adaptive Compliant Gripper to Maximize Output Displacement». En: Journal of Intelligent & Robotic Systems 90.3 (jun. de 2018), págs. 287-304. ISSN: 1573-0409. DOI: 10.1007/s10846-017-0671-x. URL: https://doi.org/10.1007/s10846-017-0671-x.
- [14] Grabit Inc. Electroadhesion gripper. 2013. URL: https://grabitinc.com/.
- [15] Eric Brown y col. «Universal robotic gripper based on the jamming of granular material». En: Proceedings of the National Academy of Sciences 107.44 (2010), págs. 18809-18814. ISSN: 0027-8424. DOI: 10.1073/pnas.1003250107. eprint: http://www.pnas.org/content/107/44/18809.full.pdf. URL: http://www.pnas.org/content/107/44/18809.
- [16] Kaori Mizushima y col. «Multi-fingered Robotic Hand based on Hybrid Mechanism of Tendon-Driven and Jamming Transition». En:
- [17] Josie Hughes y col. «Soft Manipulators and Grippers: A Review». En: Frontiers in Robotics and AI 3 (2016), pág. 69. ISSN: 2296-9144. DOI: 10.3389/frobt.2016.00069. URL: https://www.frontiersin.org/article/10.3389/frobt.2016.00069.
- [18] Jean-Baptiste Chossat y col. «A Soft Strain Sensor Based on Ionic and Metal Liquids». En: *IEEE Sensors Journal* 13 (2013), págs. 3405-3414.
- [19] Gullapalli Hemtej y col. «Flexible Piezoelectric ZnO-Paper Nanocomposite Strain Sensor». En: Small 6.15 (), págs. 1641-1646. DOI: 10.1002/smll.201000254. eprint: https://onlinelibrary.wiley.com/doi/pdf/10.1002/smll.201000254. URL: https://onlinelibrary.wiley.com/doi/abs/10.1002/smll.201000254.
- [20] Frutiger Andreas y col. «Sensors: Capacitive Soft Strain Sensors via Multicore—Shell Fiber Printing (Adv. Mater. 15/2015)». En: Advanced Materials 27.15 (), págs. 2548-2548. DOI: 10.1002/adma.201570105. eprint: https://onlinelibrary.wiley.com/doi/pdf/10.1002/adma.201570105. URL: https://onlinelibrary.wiley.com/doi/abs/10.1002/adma.201570105.
- [21] Ignacio García. Recreus, impresión 3D con filamento flexible. 2013. URL: https://recreus.com/es/.

Herramientas blandas de manipulación para robots colaborativos

Anexos

Anexo I

Planificación temporal y estudio económico

I.1. Planificación temporal

Durante el desarrollo del proyecto se han llevado a cabo varias tareas. En primer lugar una investigación de la bibliografía de herramientas de agarre basadas en robótica blanda de los últimos años y de los productos que están en el mercado. Después el diseño preliminar de las cuatro garras, así como un diseño definitivo. A continuación, y simultáneo al diseño se han ido fabricando las piezas terminadas. Al final del proceso de fabricación, en la etapa de montaje final, ha sido necesario rediseñar o crear nuevas piezas, de diseño auxiliar. Y por último la experimentación y la redacción de la memoria del proyecto. Durante los meses de septiembre y octubre se ha realizado una formación autodidacta del programa de CAD Autodesk Inventor, utilizado para el diseño de los modelos. Además se ha aprendido a utilizar Simplify 3D, un slicer para impresión 3D, Latex, para la redacción del documento, y a programar y utilizar el robot UR3.

I.2. Diagrama Gantt

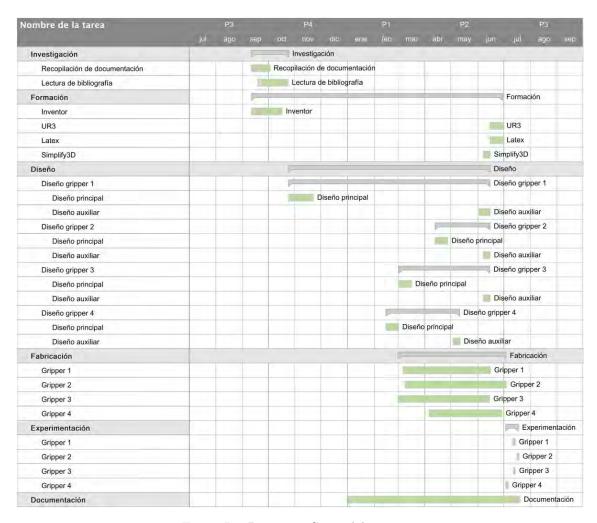


Figura I.1: Diagrama Gantt del proyecto

I.3. Presupuesto

A continuación se detalla el presupuesto del proyecto. Para el cálculo de la amortización del robot UR3 se ha utilizado el dato de la hora de especificaciones de vida útil, que son 35.000 horas. Con el precio del robot, 23.000 euros, el coste horario es de aproximadamente 70 céntimos. El robot consume aproximadamente 100W con un programa normal, utilizándolo durante unas 40 horas son 4kWh, que representa en total aproximadamente 50 céntimos.

En cuanto al coste de ingeniería, se han tomado las condiciones vigentes del convenio laboral y la normativa aplicable en el BOE según las disposiciones del Ministerio de Empleo y Seguridad Social de España. En la resolución del 16 de febrero de 2018 de la Dirección General de Empleo, en el documento BOE-A-2018-2822, se establece que el sueldo base para personal del grupo profesional 1-B, en este caso ingeniero, es de 22.062,64 euros anuales, con 3.677,11 euros en concepto de pagas extra. Además, en concepto de complementos salariales como ingeniero se establece un valor de 7.159,20 euros anuales. Lo que supone un total de 32.898,95 euros. Considerando que anualmente se trabajan unas 1.880 horas, con tres semanas de vacaciones y festivos y tomando la duración de la jornada ordinaria de trabajo legal de 40 horas semanales. Esto supone un salario horario mínimo de 17,50 €. Debido al tipo de trabajo que se desarrolla se decide establecer un salario de 25 €por hora.

	Unidades	Precio (\in)	Total (€)
Investigación			
Suscripción anual IEEE	1	70,00	70,00
Diseño			
Suscripción anual Autodesk Inventor	1	2.553,10	2.553,10
Licencia Simplify3D	1	127,00	127,00
Fabricación			
PLA Naranja 1kg BQ	1	20,00	20,00
FilaFlex 250g Recreus	1	20,50	20,50
Impresión (horas)	100	6,00	600,00
Globo	2	3,50	7,00
Tornillería	80	0,06	4,80
Husillo + tuerca	1	10,00	10,00
Gomas elásticas	2	1,00	2,00
Alambre	1	2,00	2,00
Conectores neumática	30	0,40	12,00
Electroválvula	2	40,00	80,00
Bomba de vacío	1	16,00	16,00
Motores	2	17,00	34,00
Tubería poliuretano 4mm	12	0,62	7,44
Tubería silicona 8mm	1	1,74	1,74
Romeo V2.2	1	40,00	40,00
Amortización UR3	40	0,70	28,00
Consumo eléctrico UR3	1	0,50	0,50
Cableado	1	3,50	3,50
Silicona EcoFlex 00-30	1	32,70	32,70
Silicona Silastic 3483	1	20,00	20,00
Mano de obra	60	15,00	900,00
Salarios			
Salario ingeniero Miguel Arguelles Hortelano	390		9.750

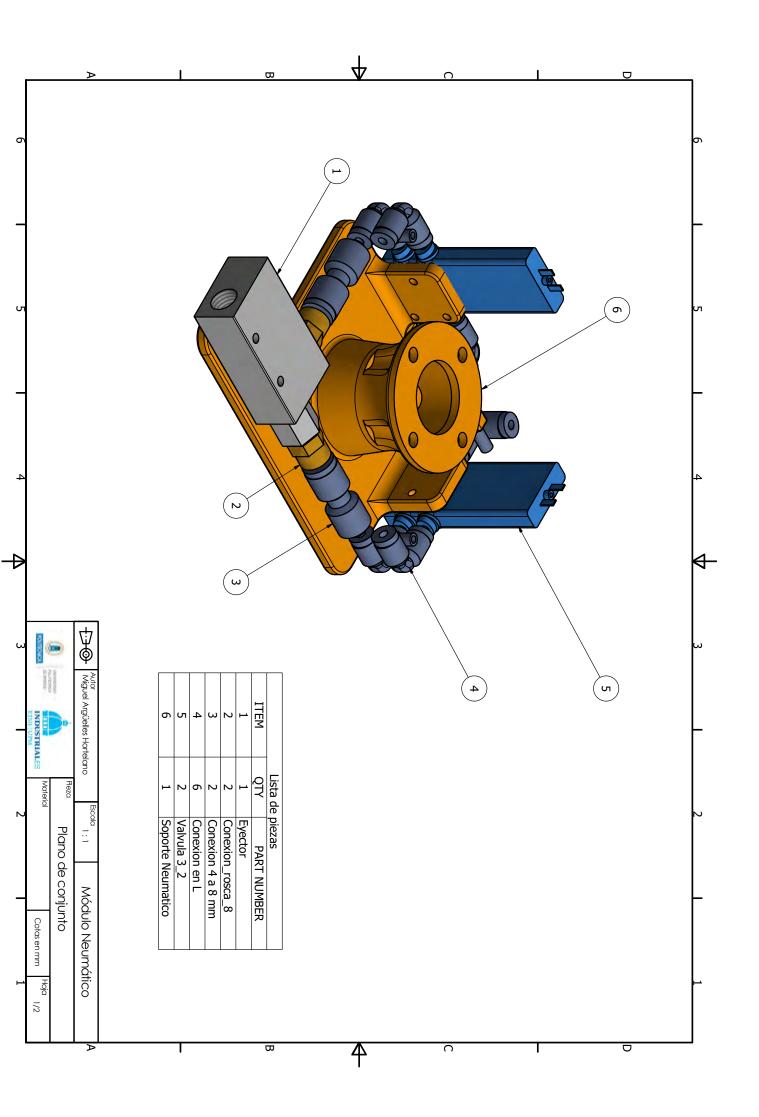
Total 13.442,28 €

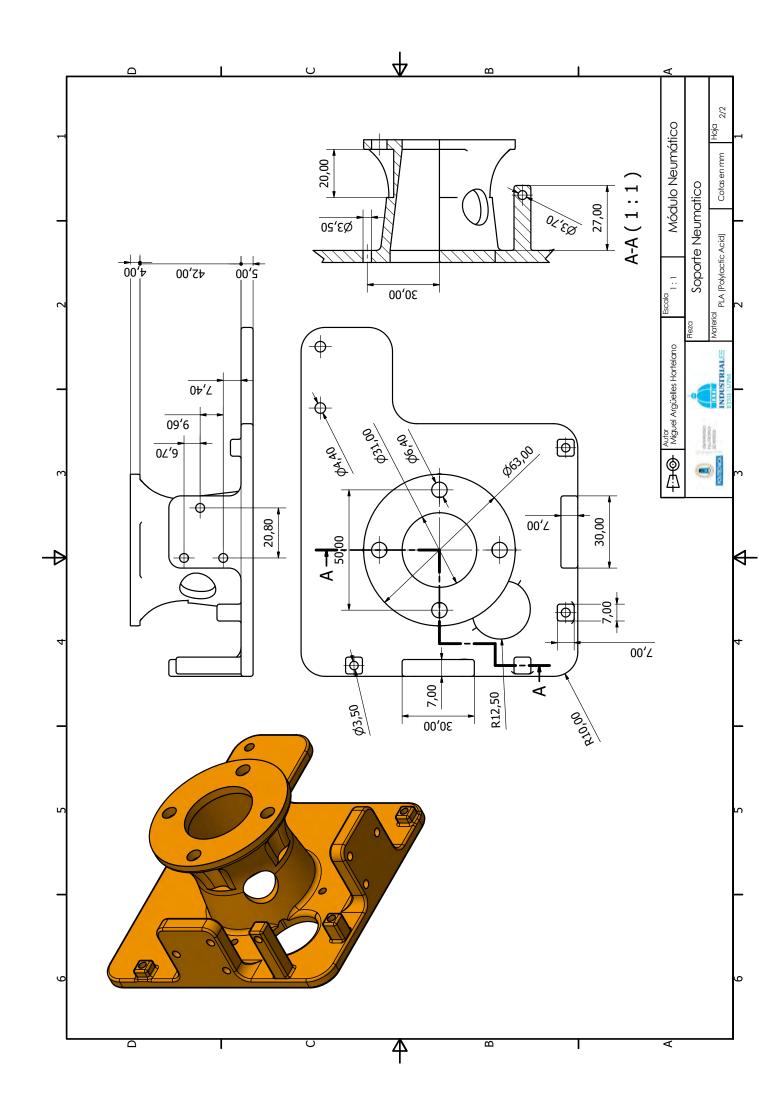
80

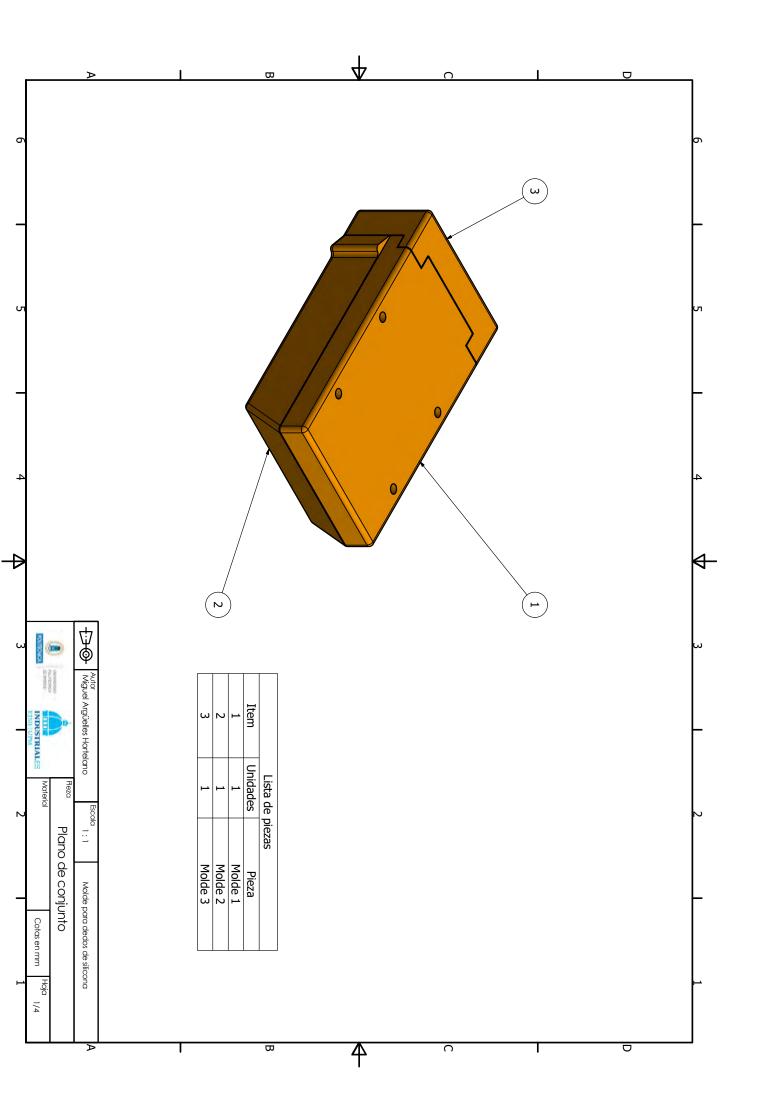
Tabla I.1: Presupuesto del proyecto

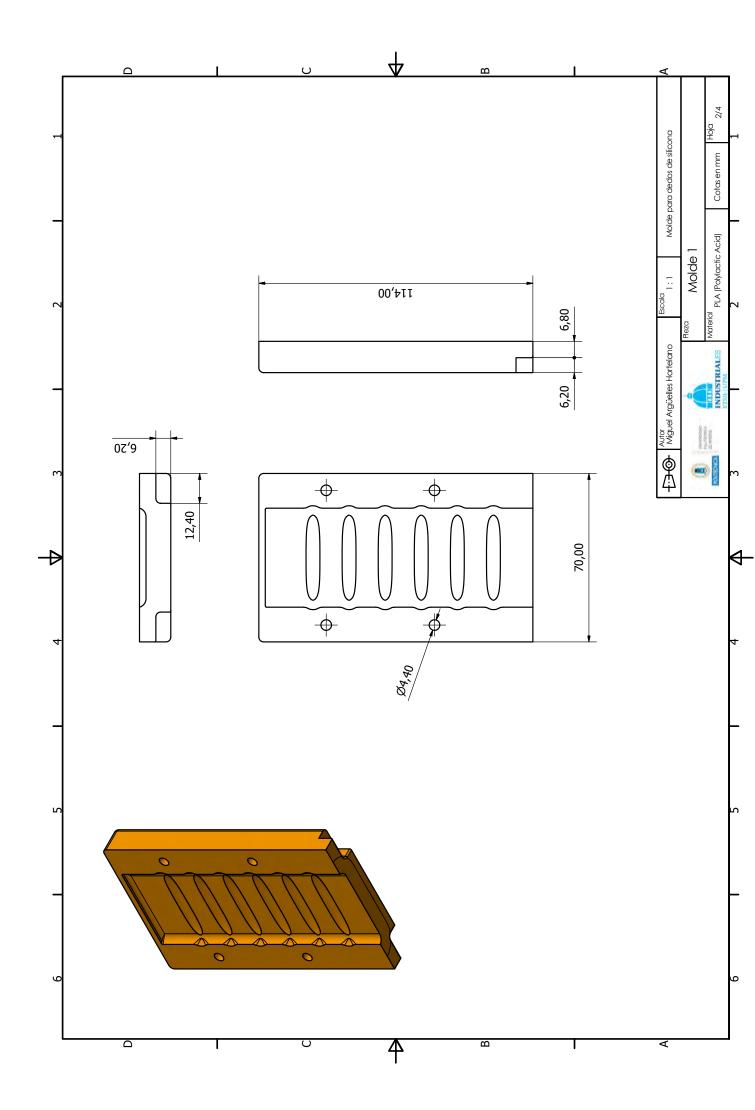
Anexo II

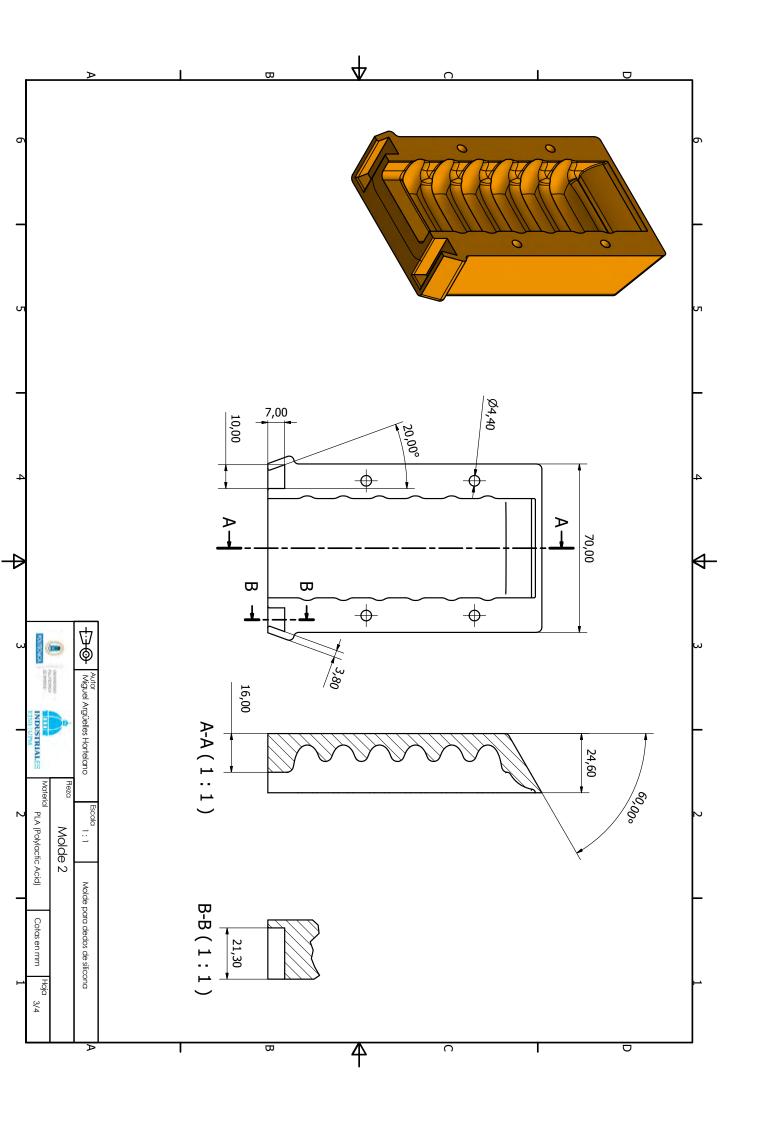
Planos detallados y acotados

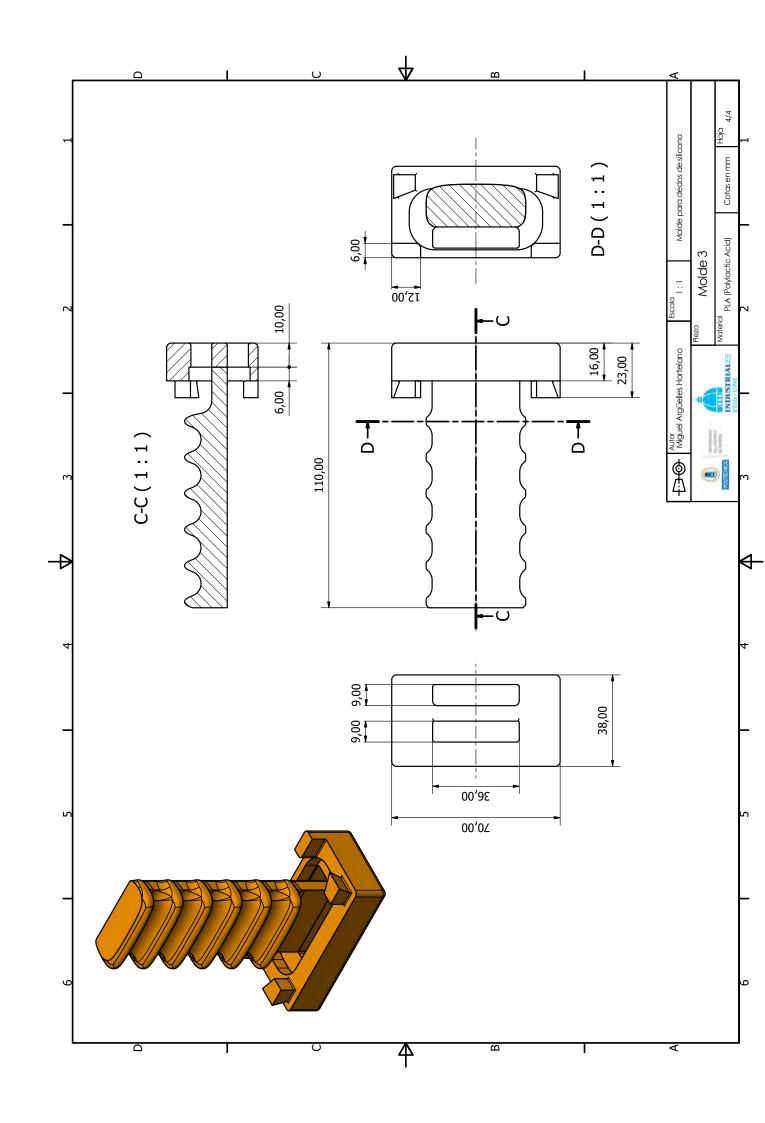


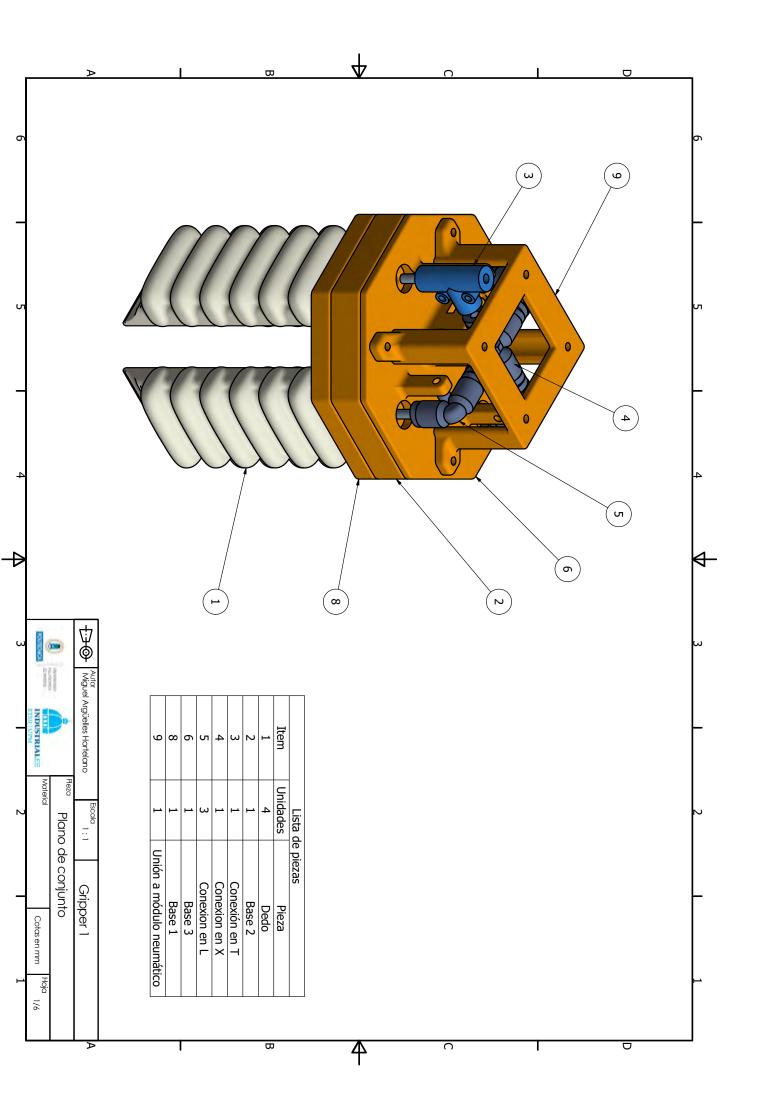


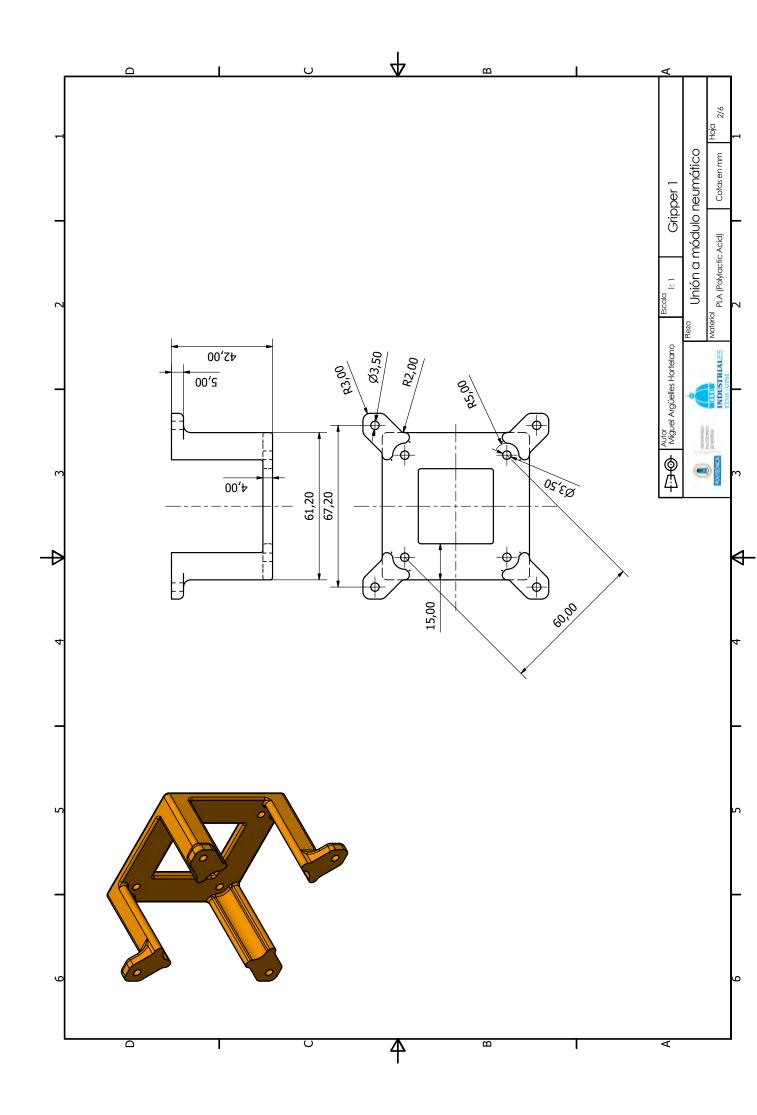


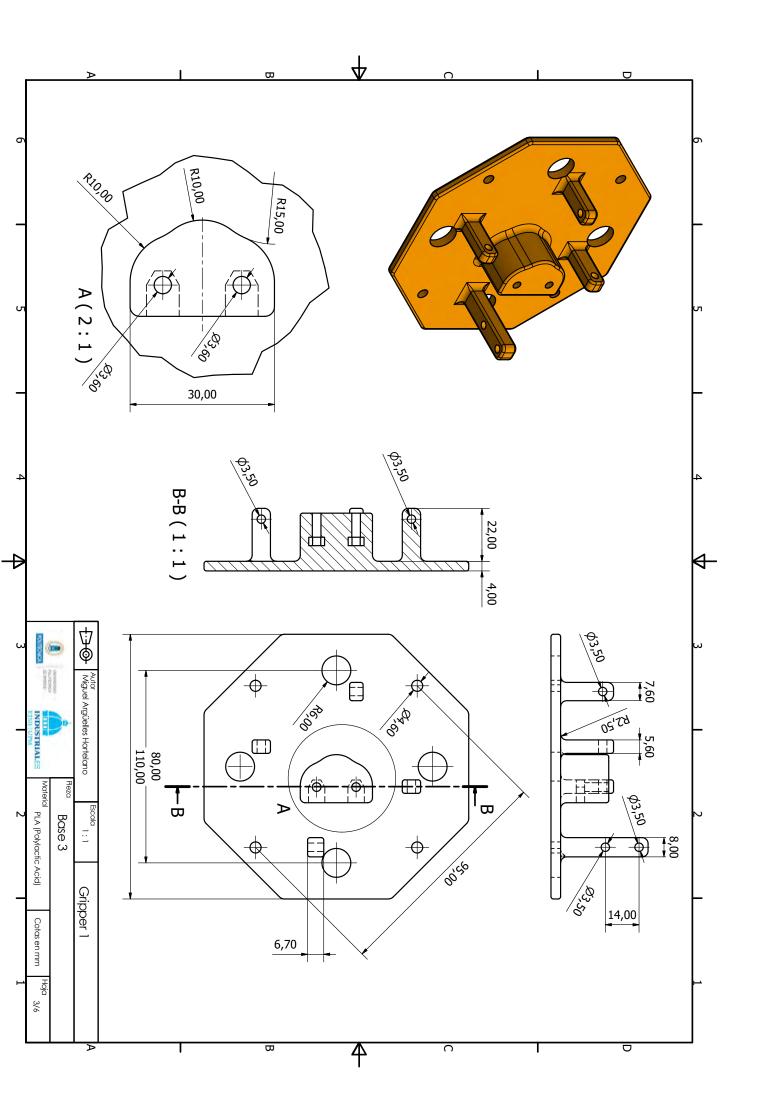


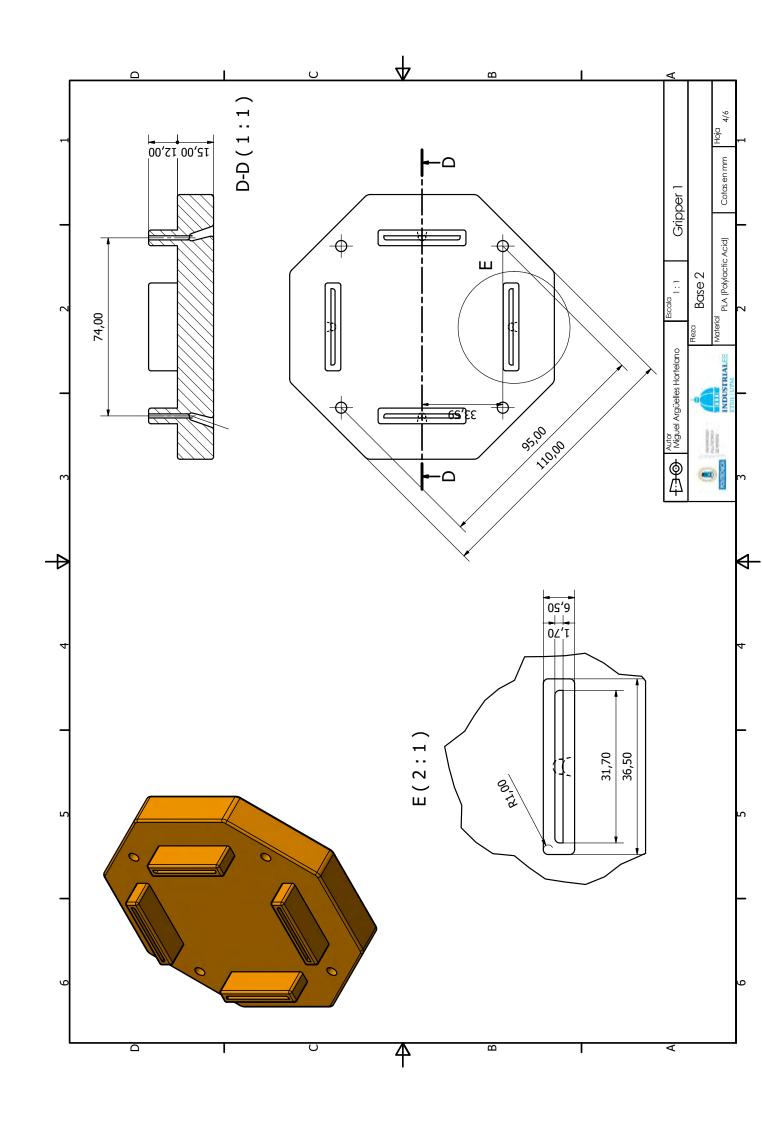


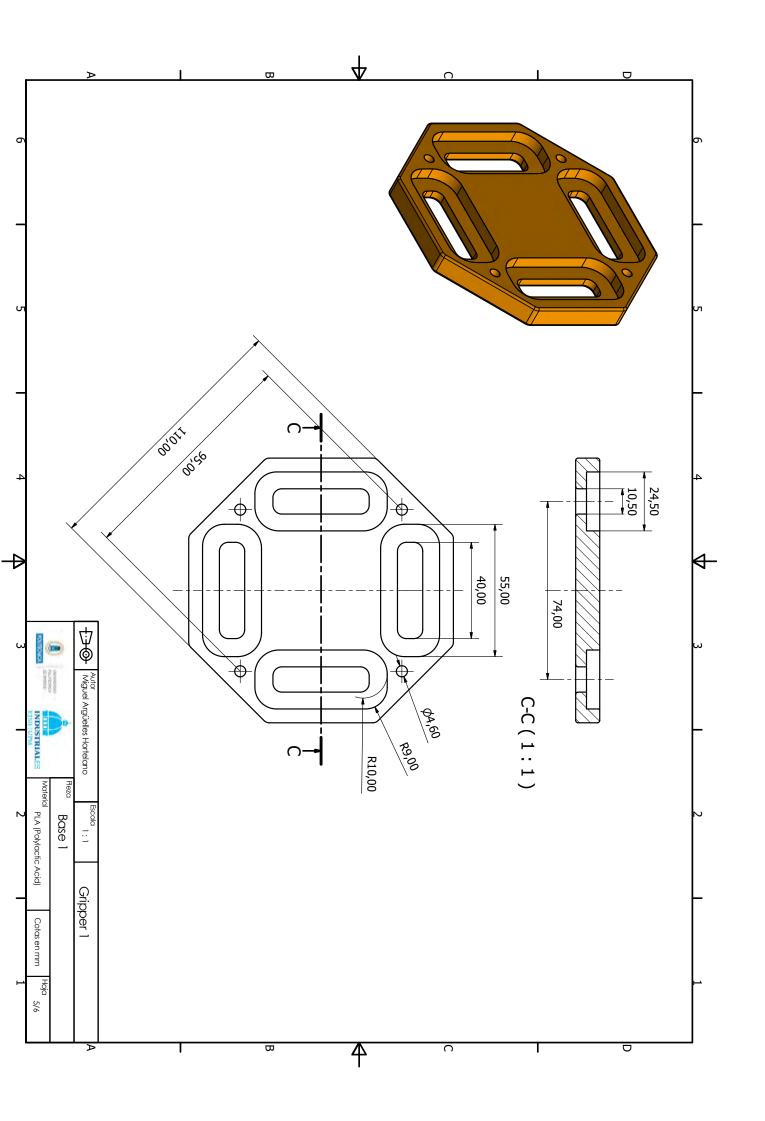


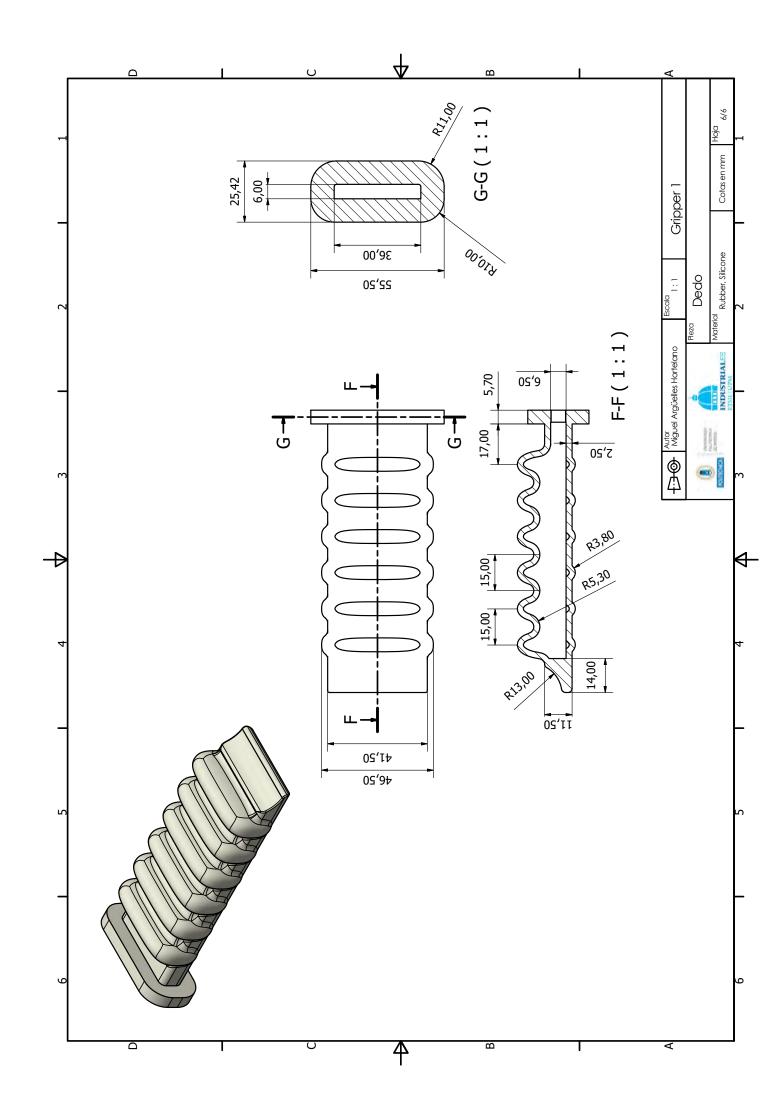


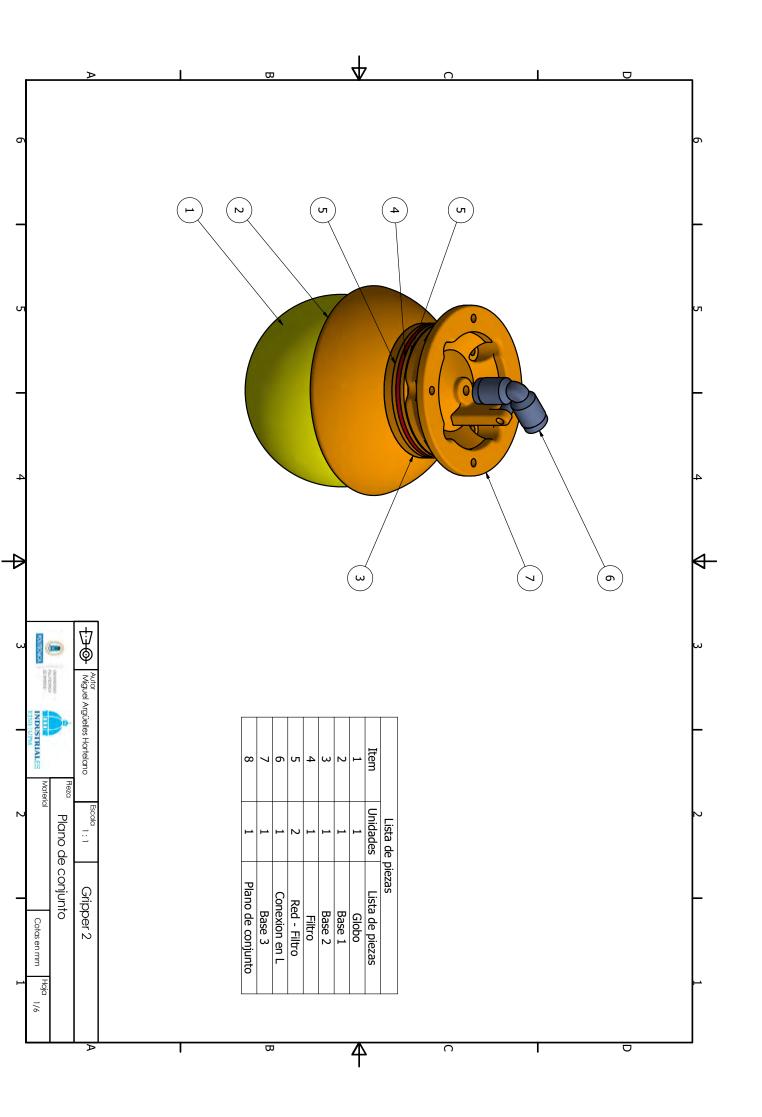


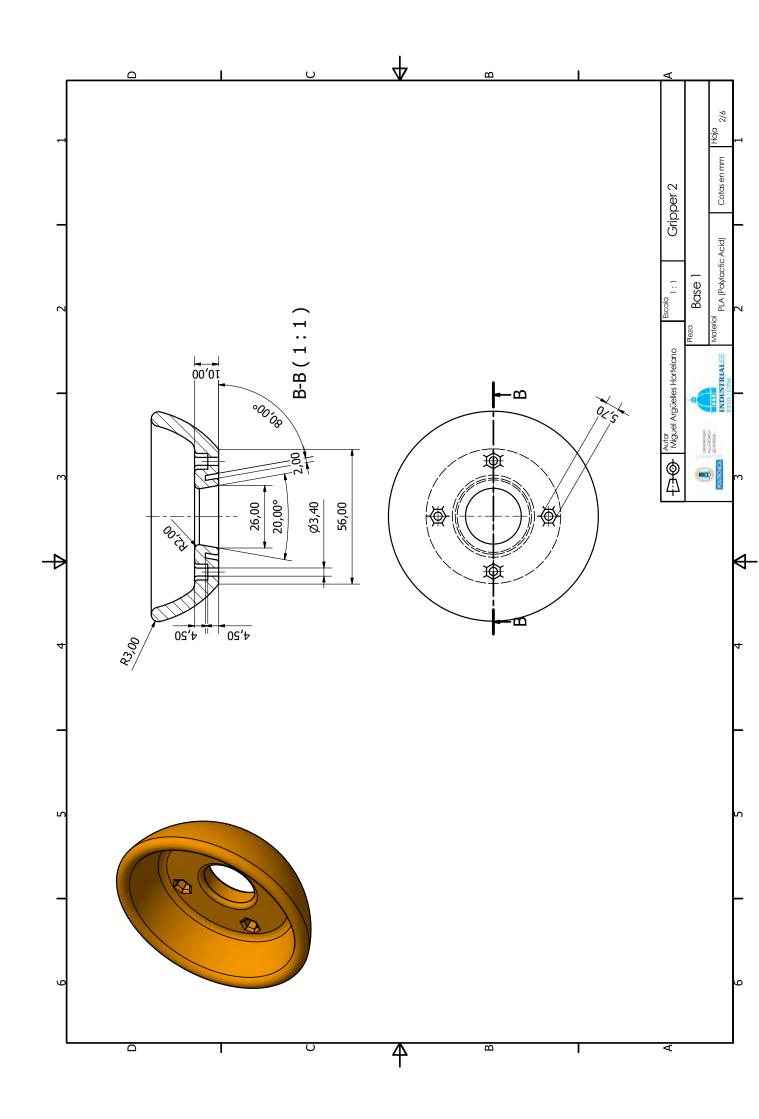


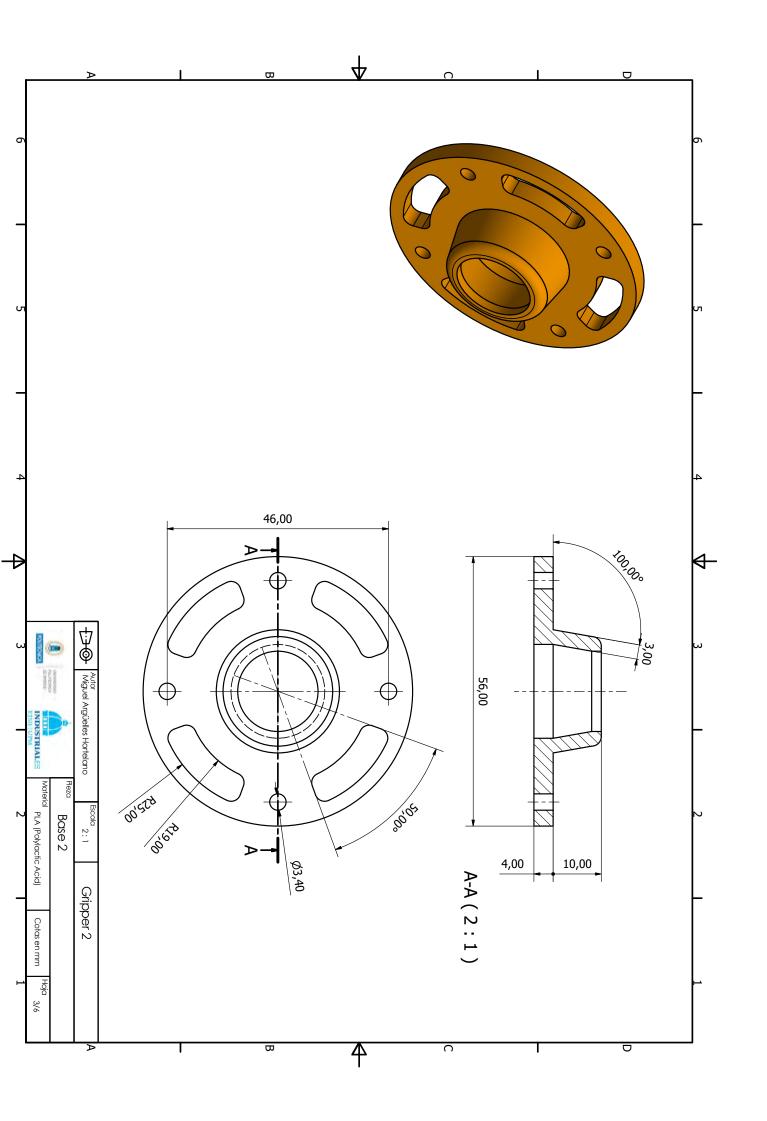


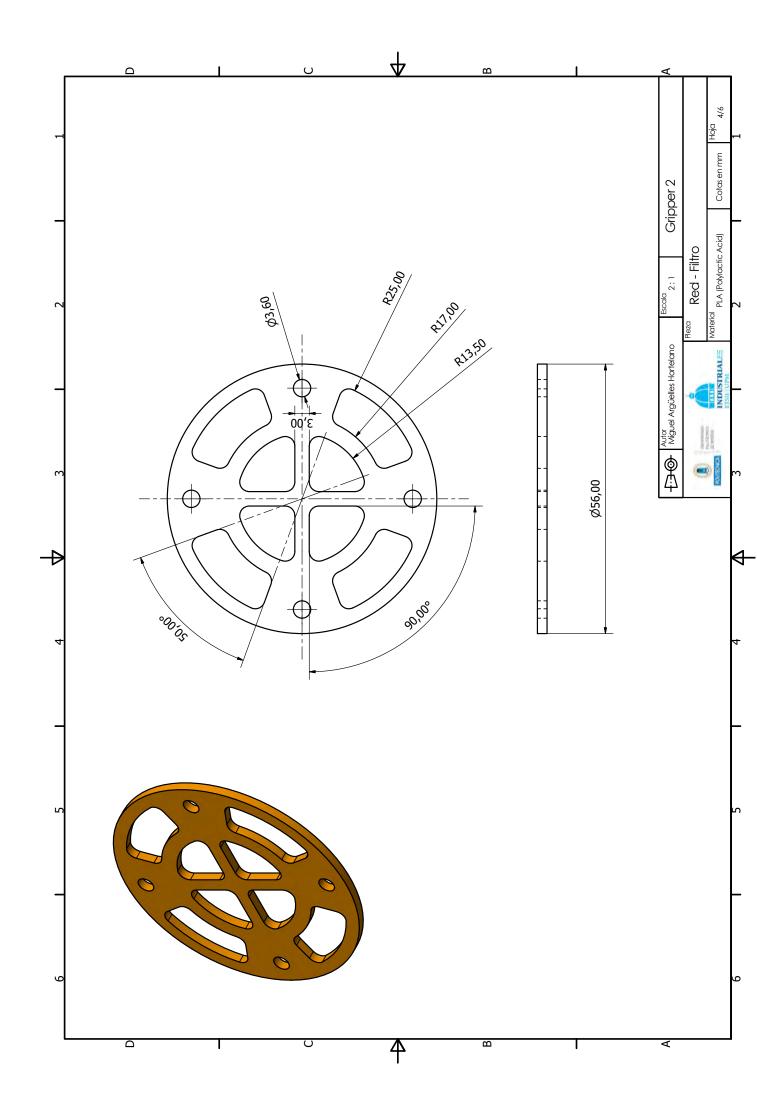


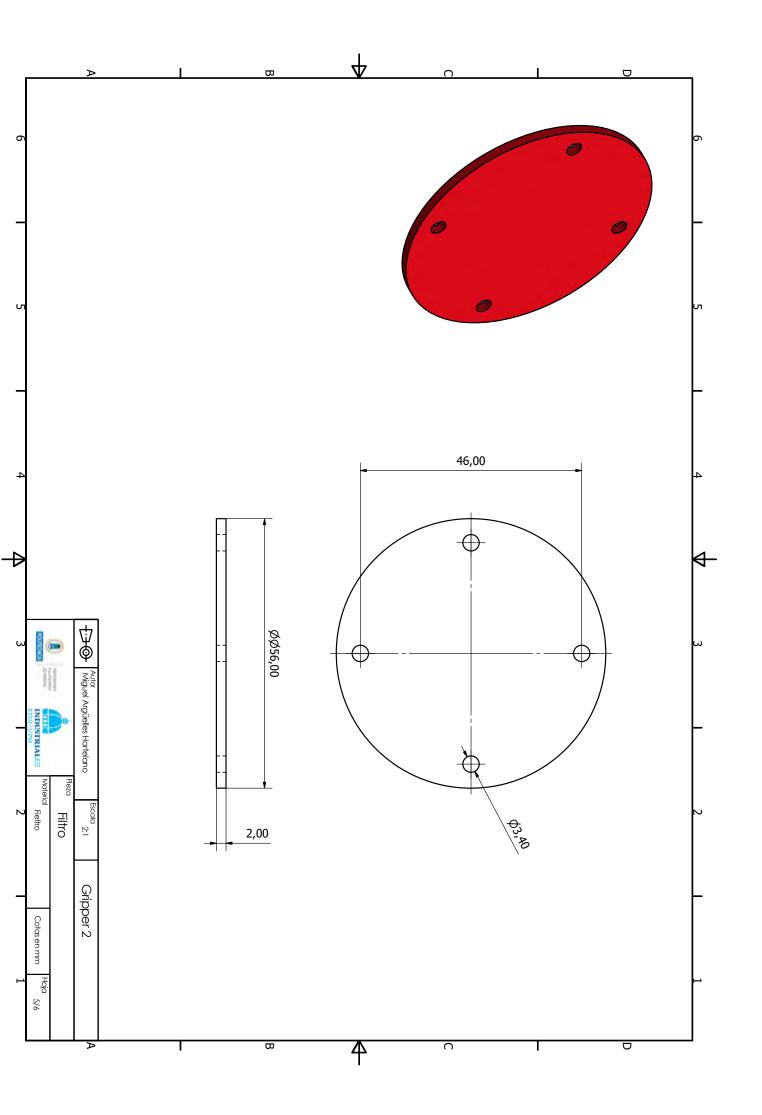


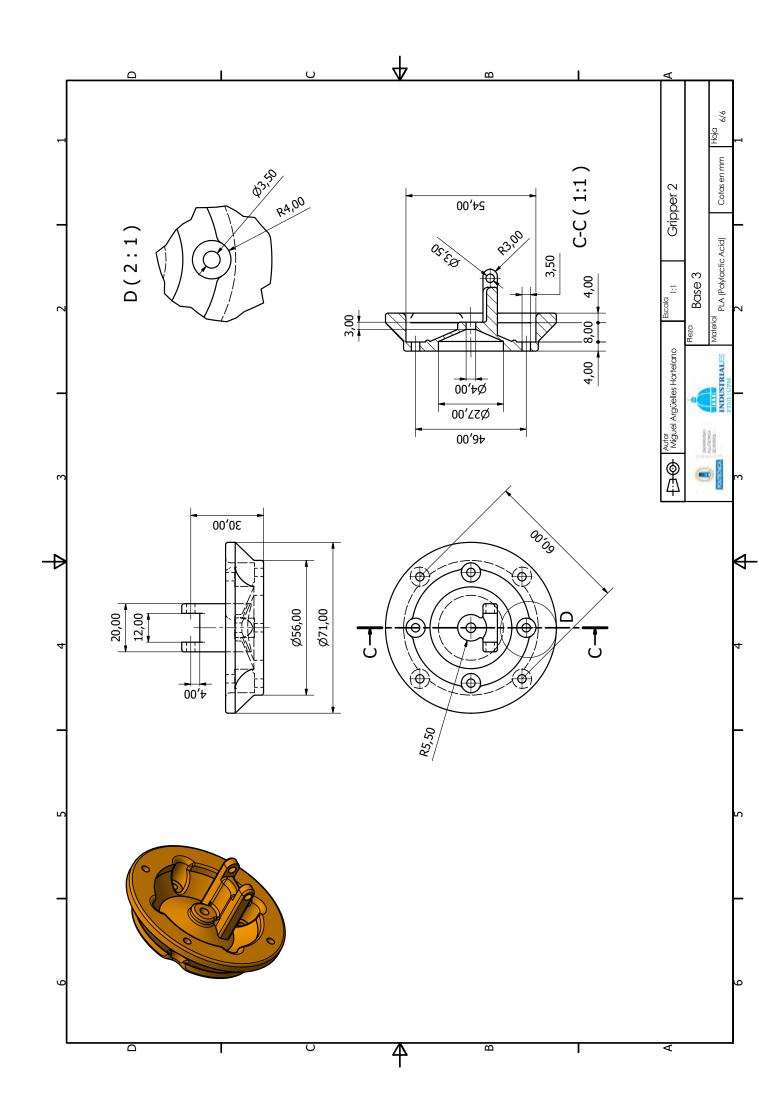


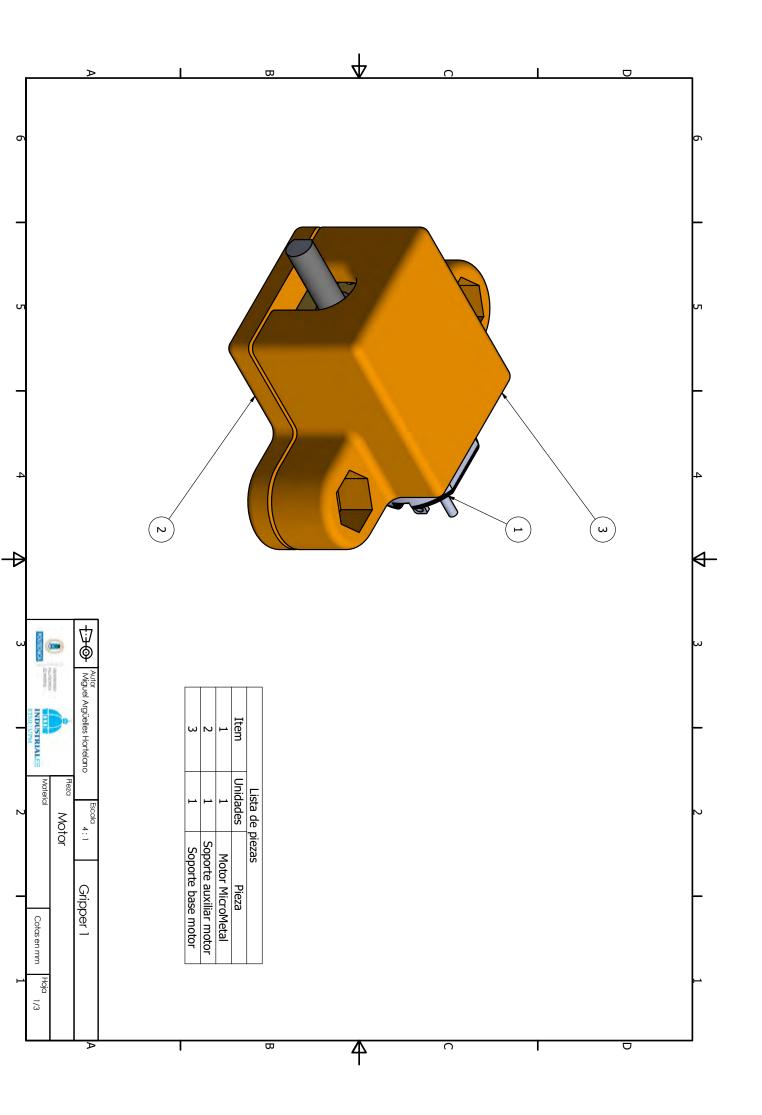


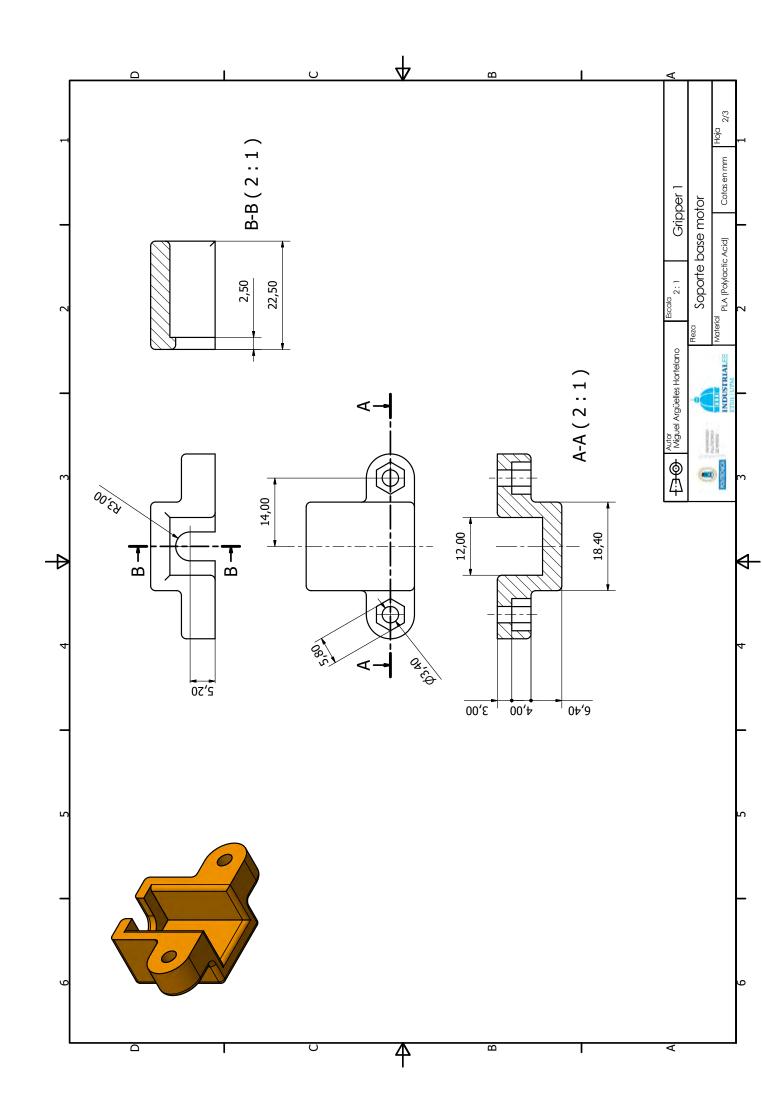


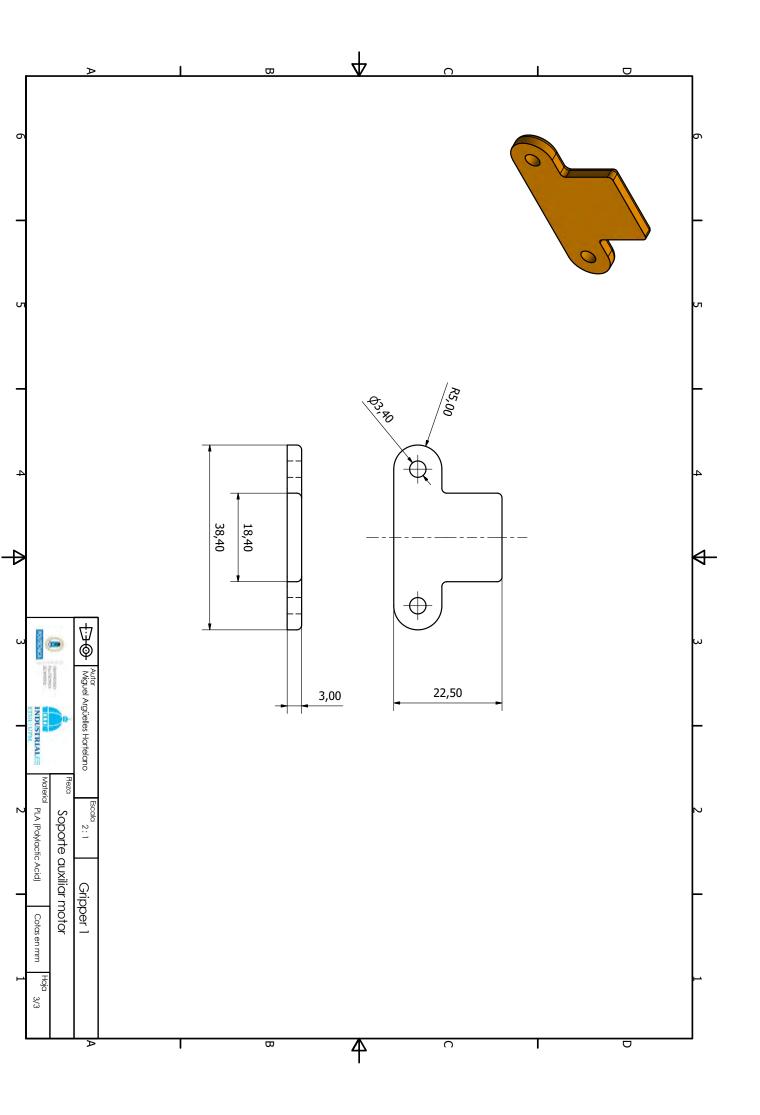


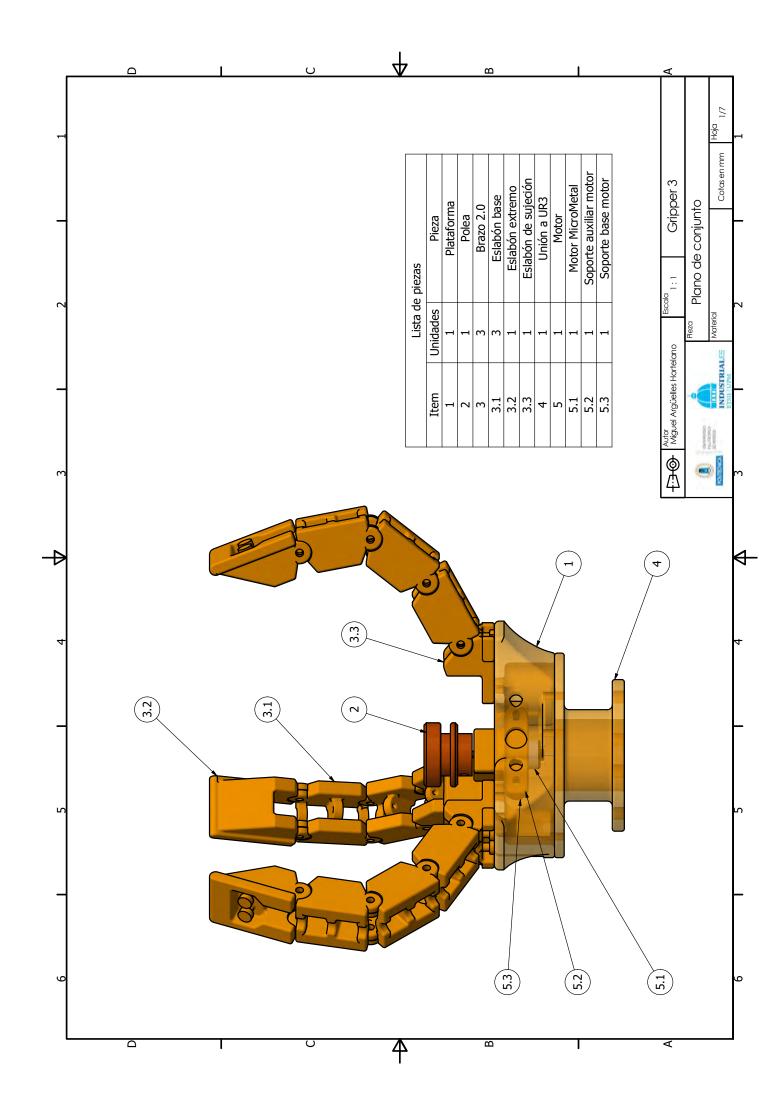


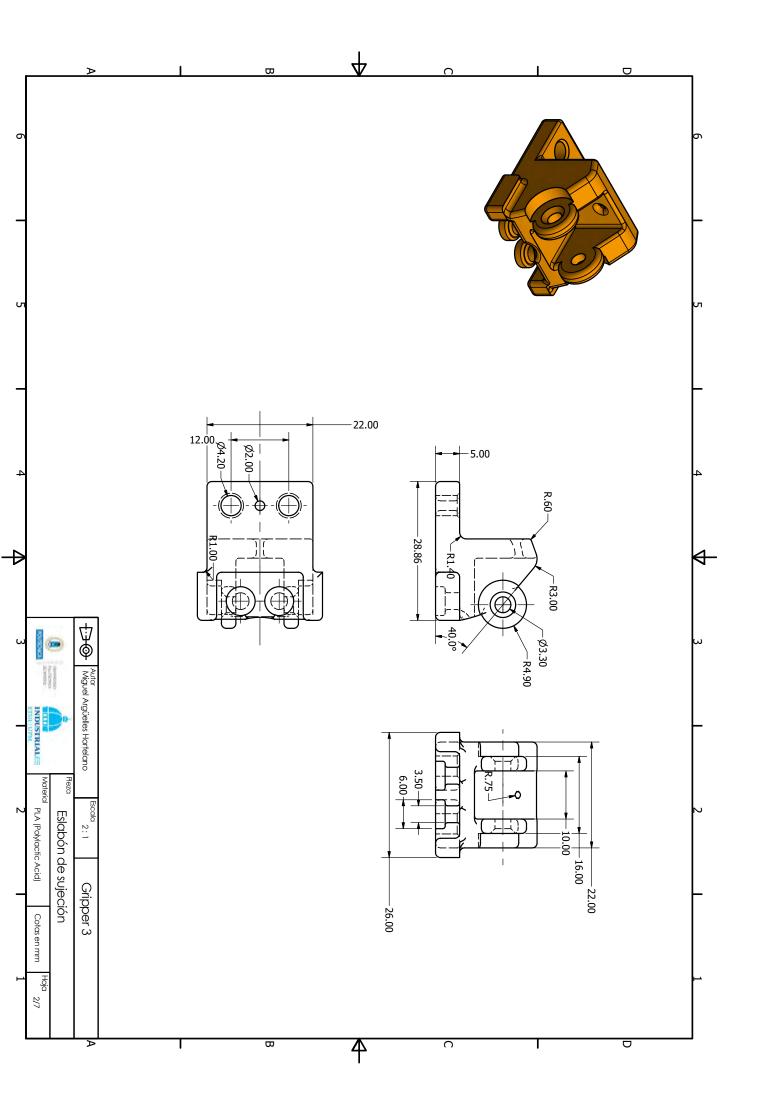


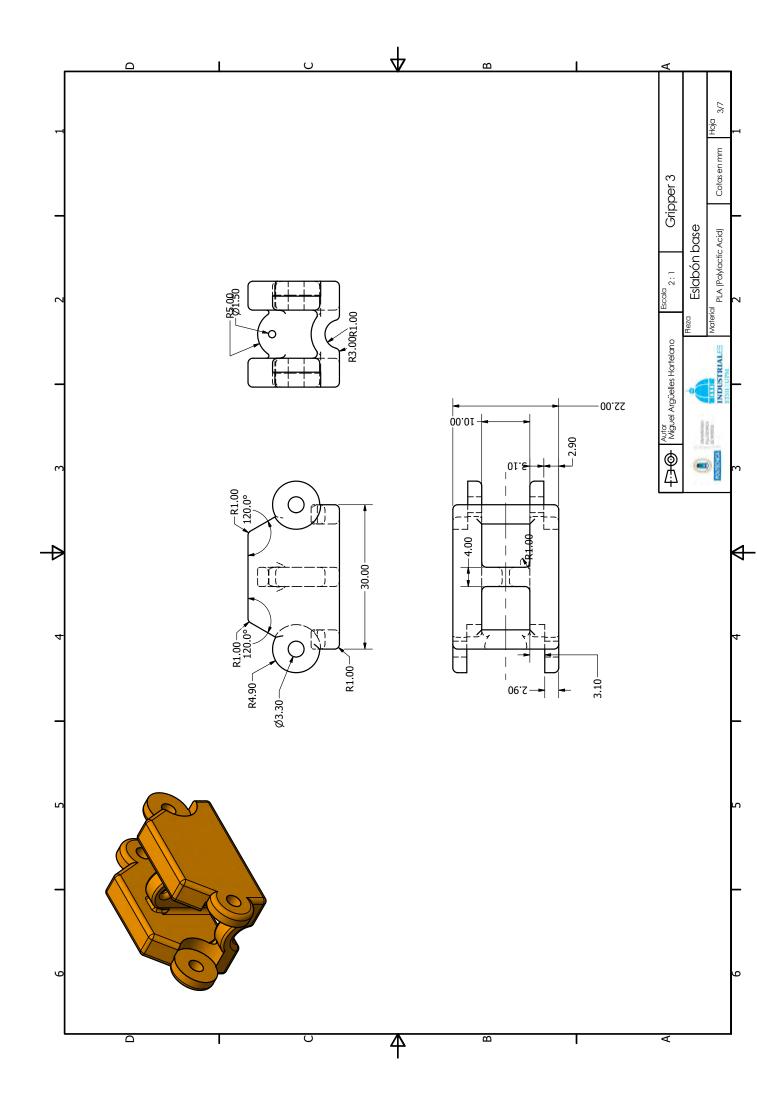


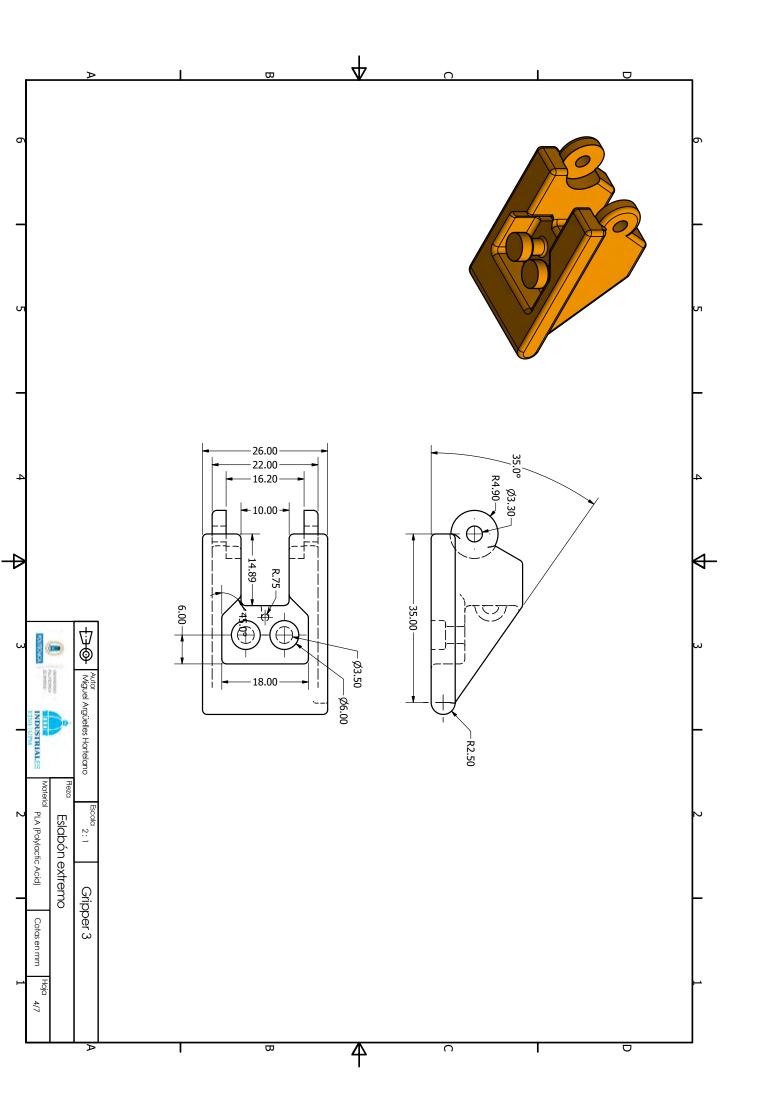


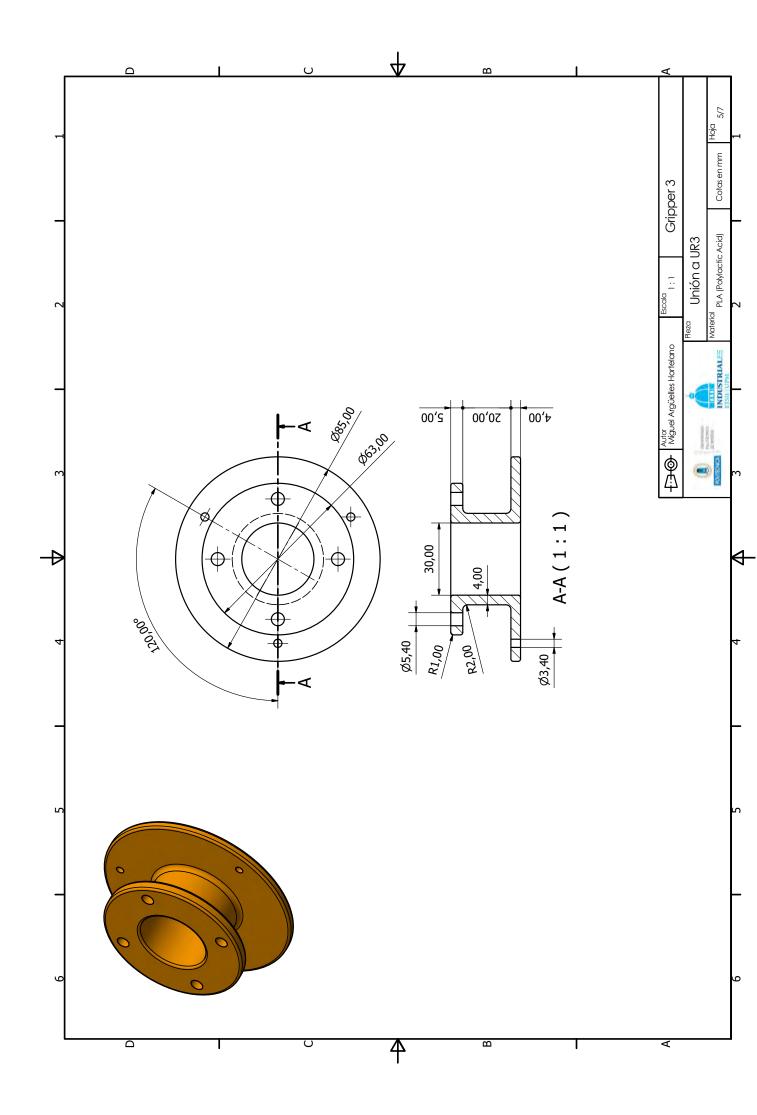


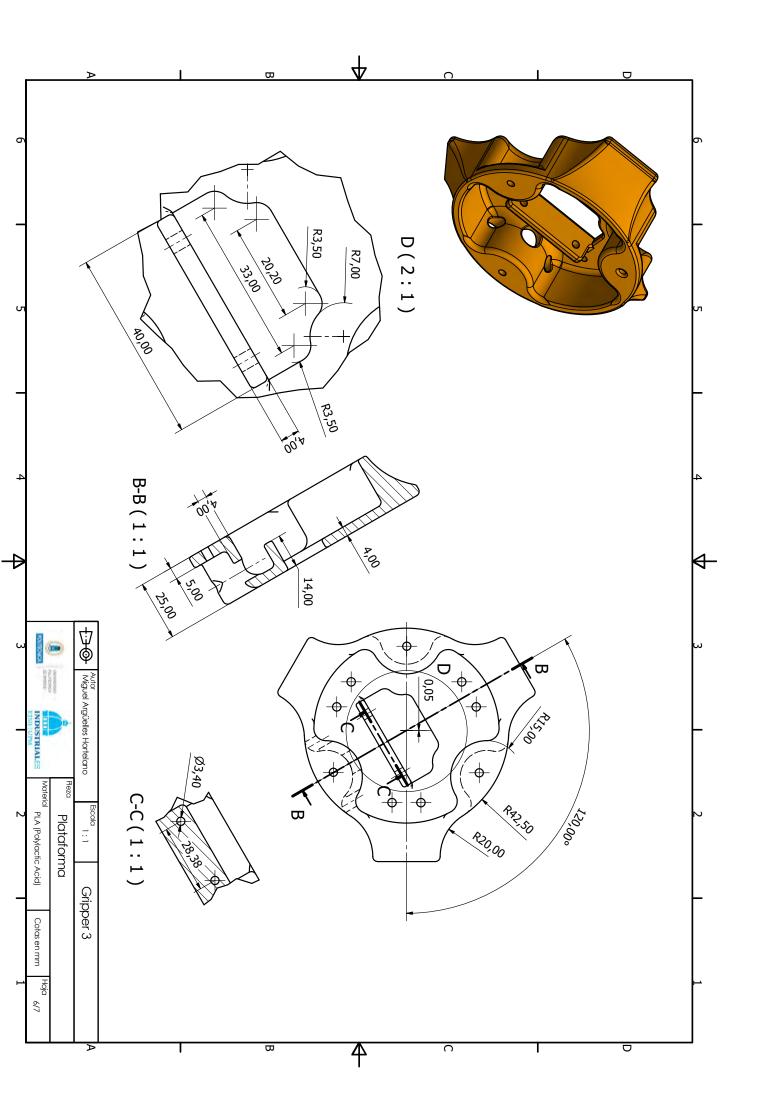


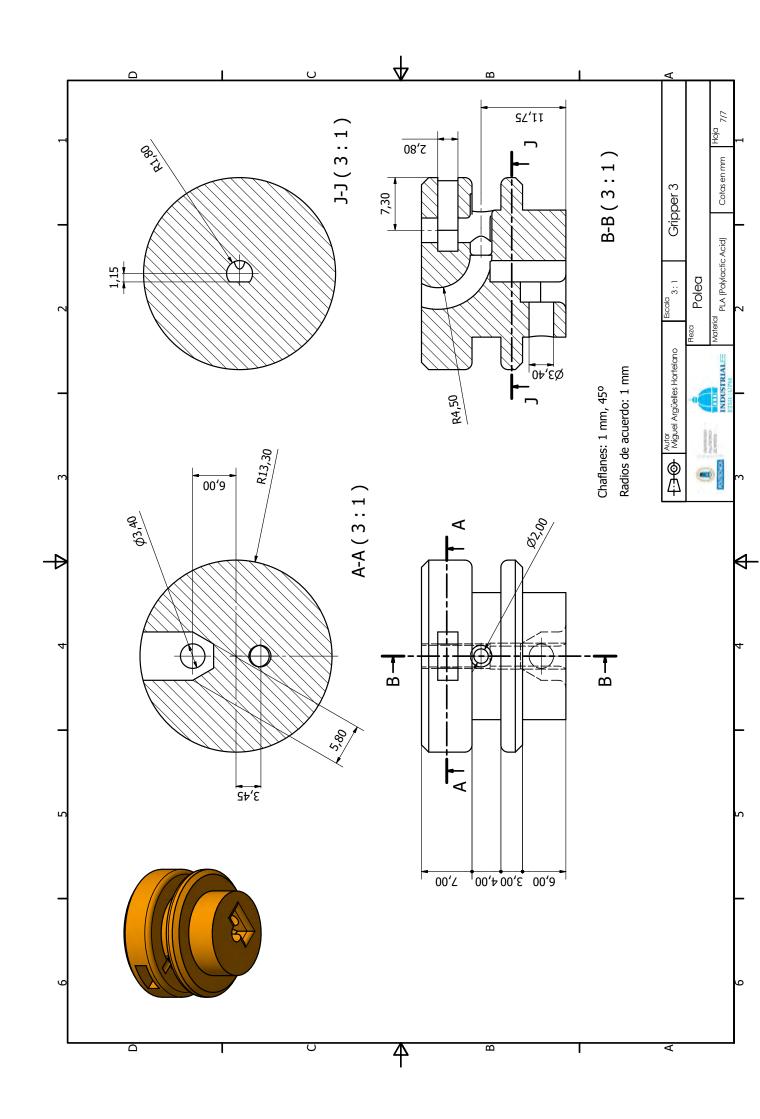


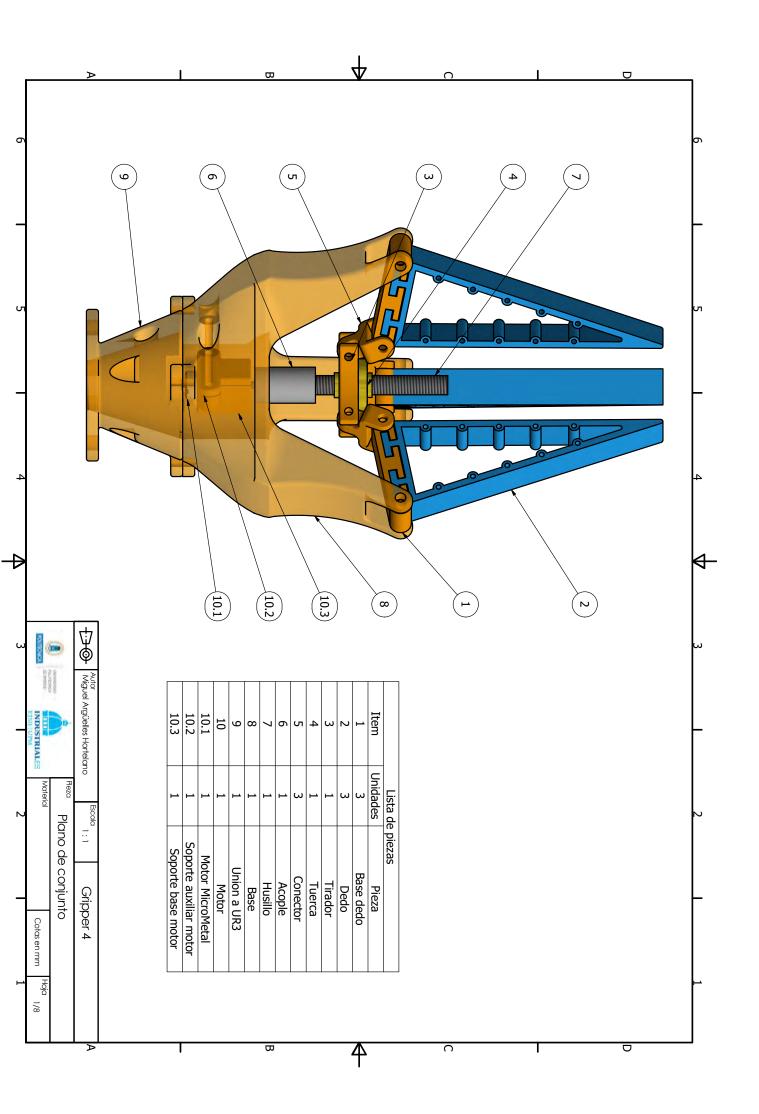


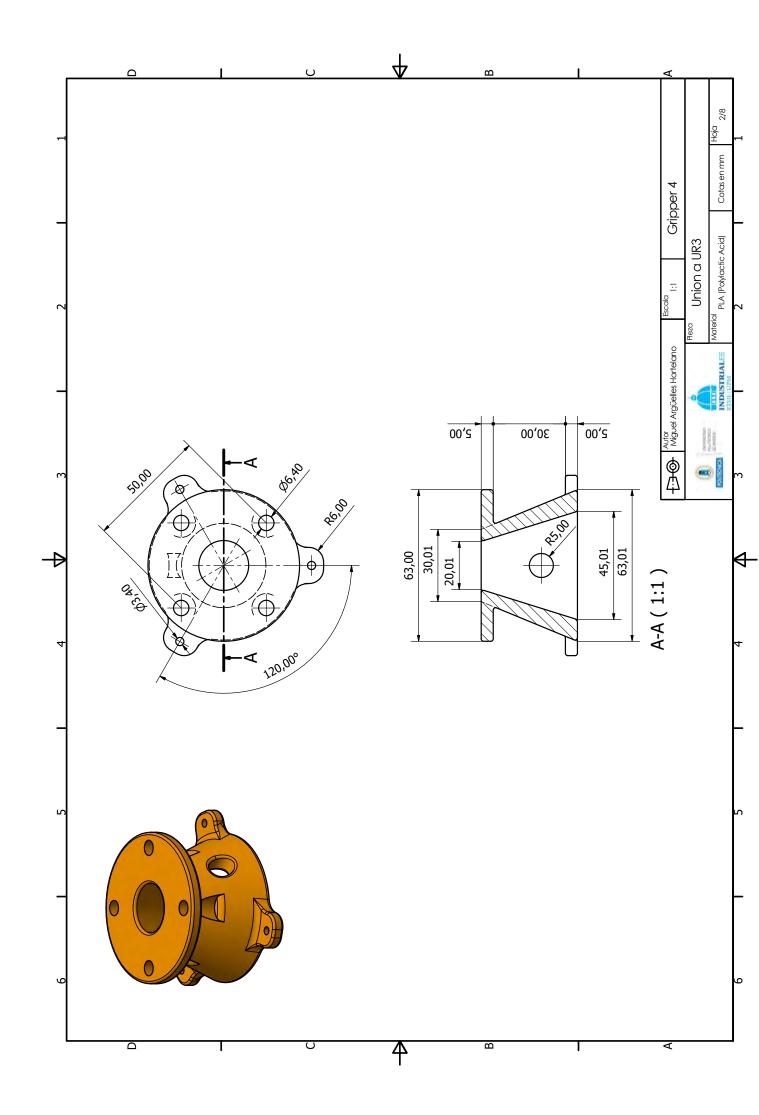


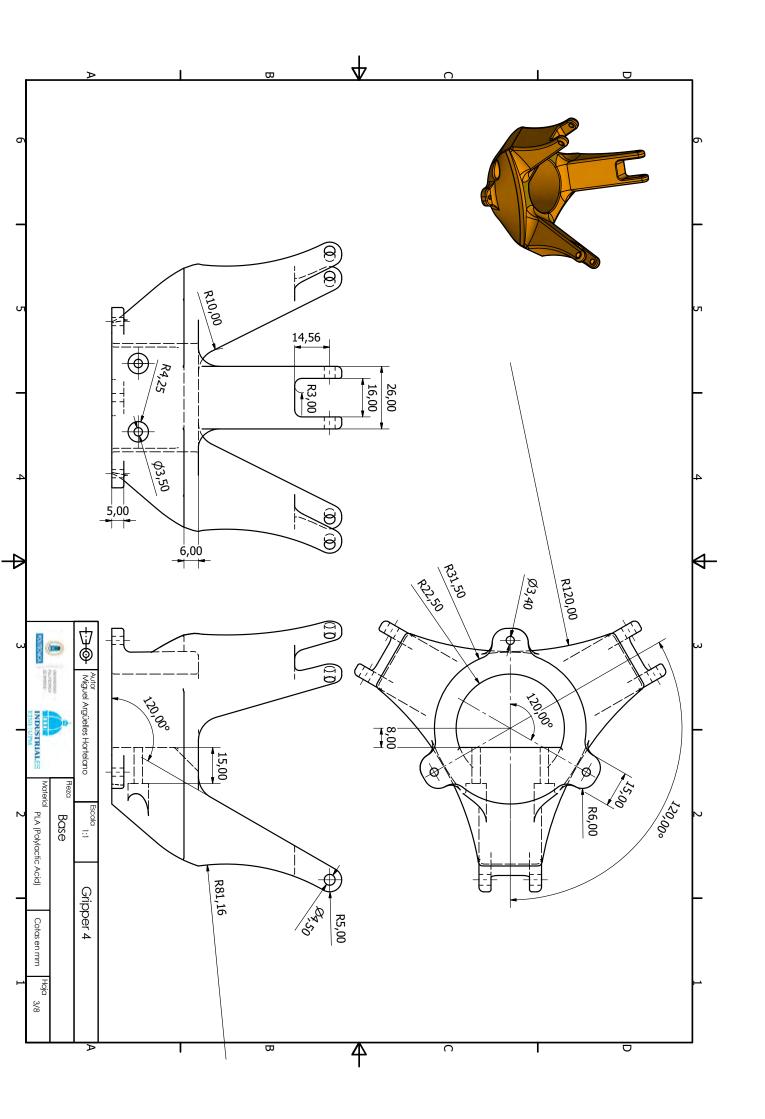


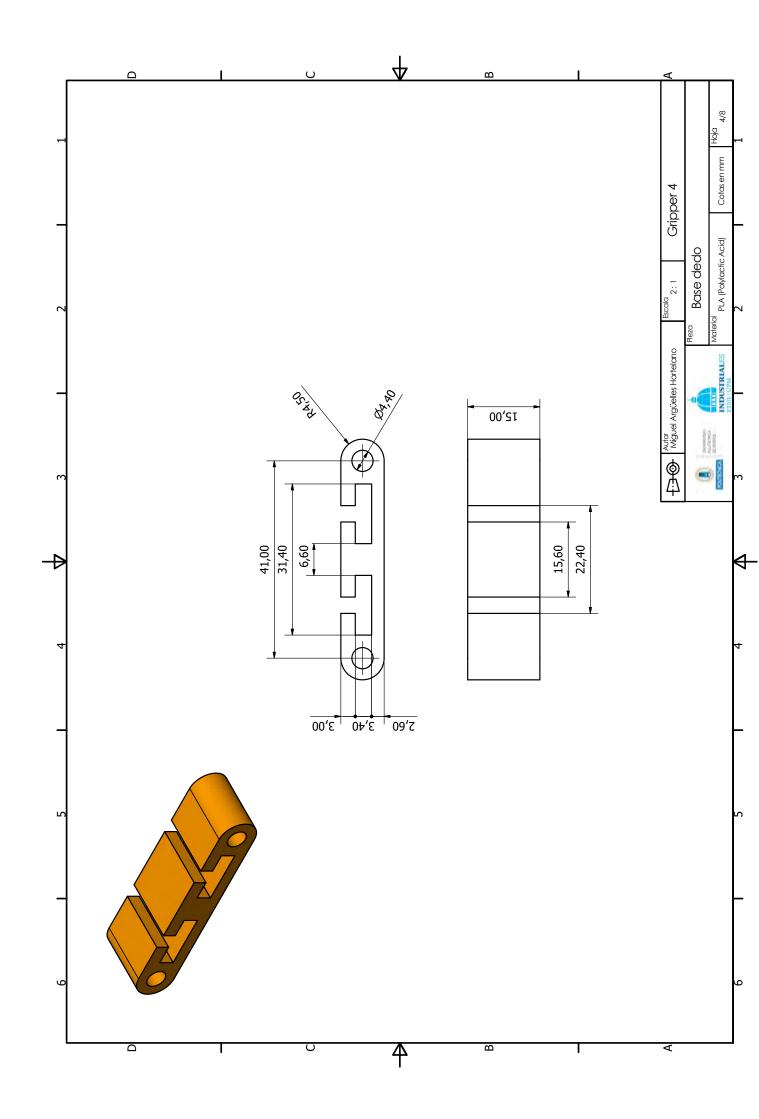


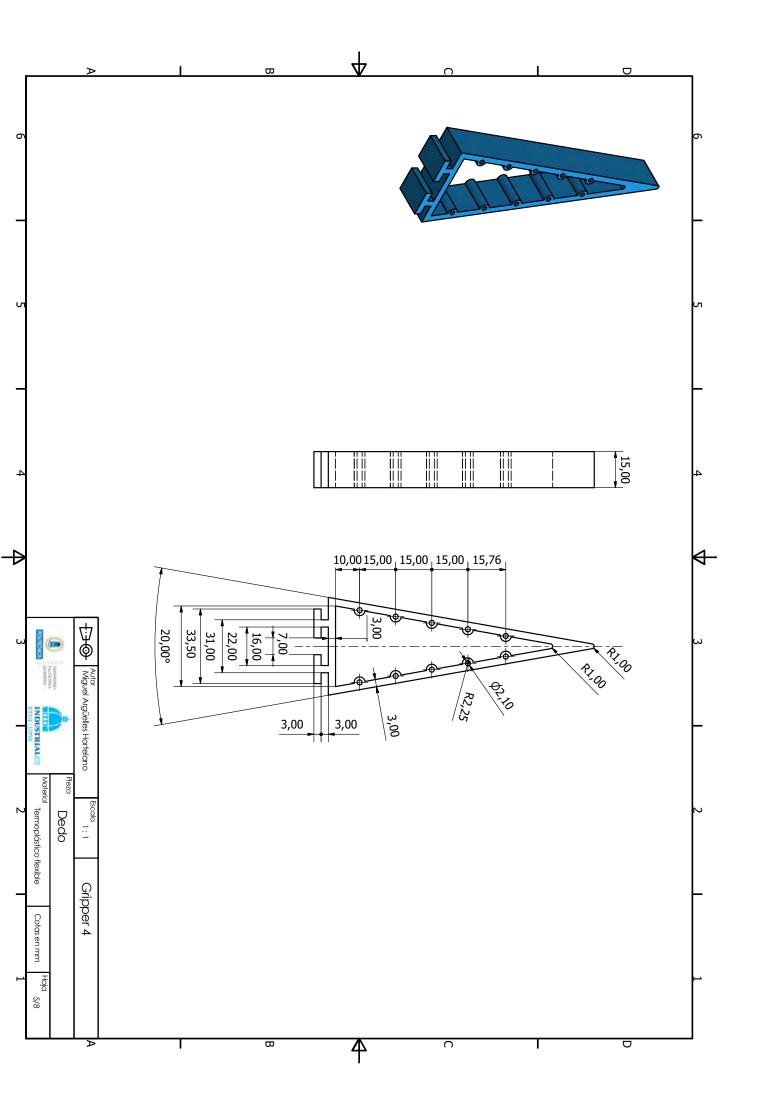


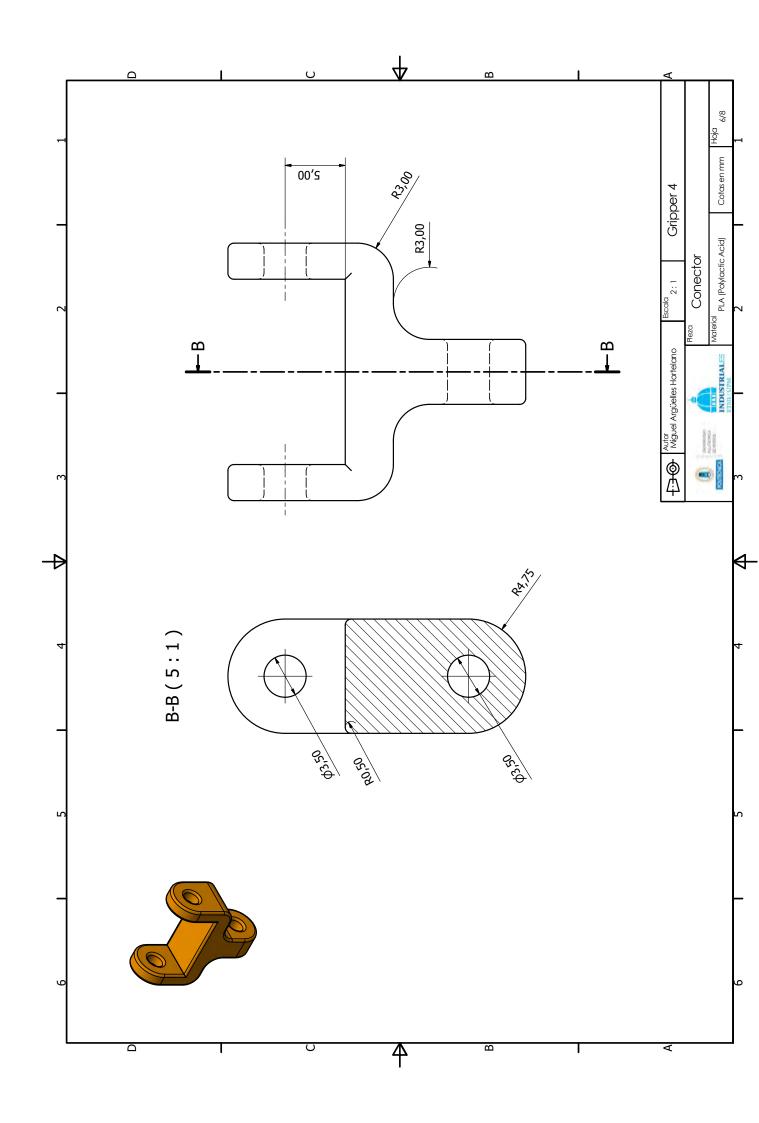


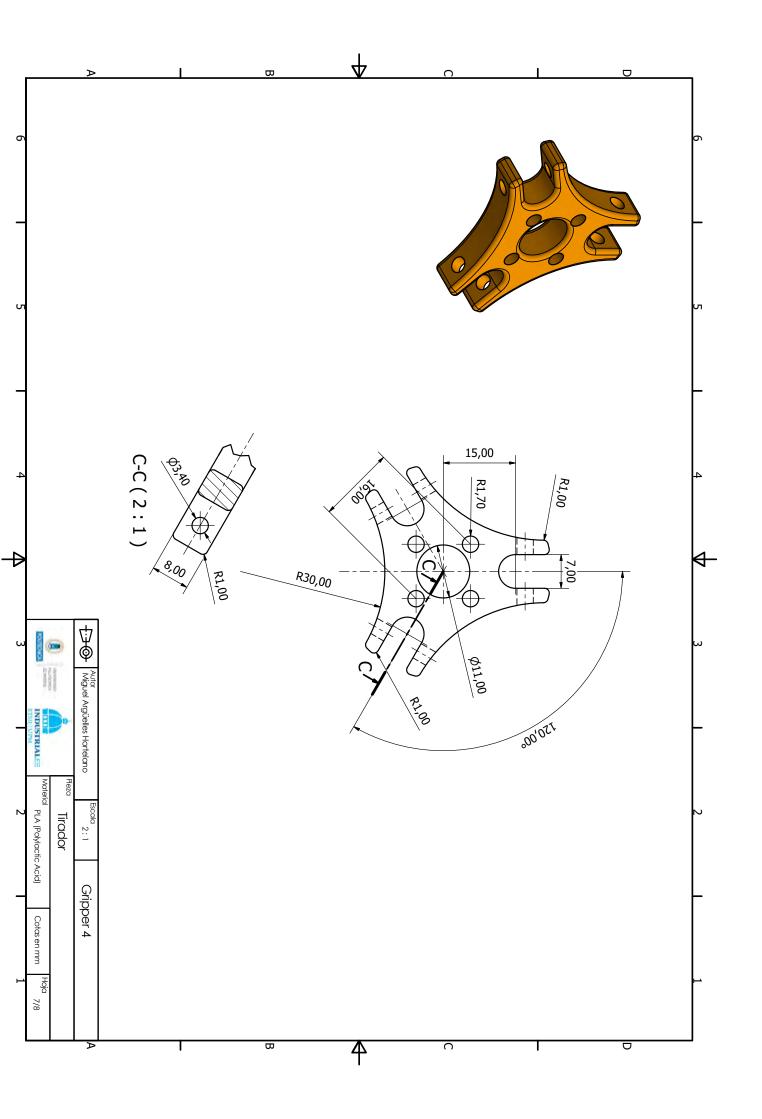


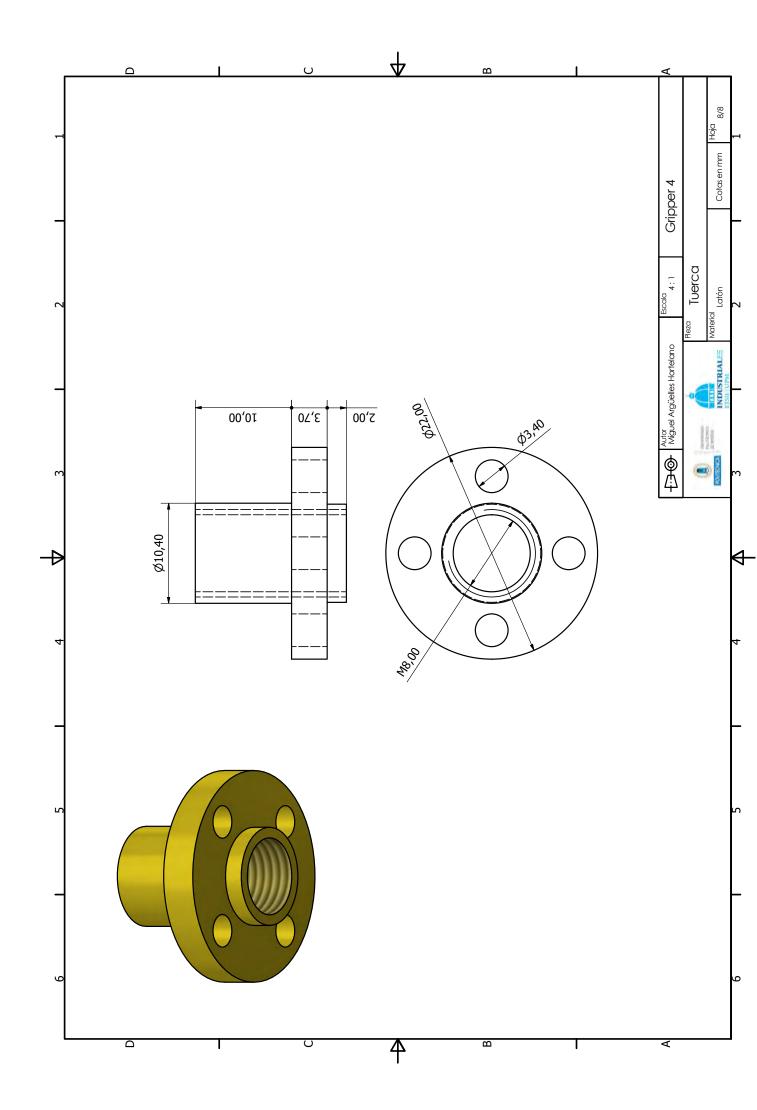












Anexo III

Índice de figuras y tablas

Índice de figuras

1	Herramienta neumática de agarre
2	Herramienta neumática de agarre basada en materiales granulares
3	Herramienta electromecánica de agarre con dedos articulados VI
4	Herramienta electromecánica de agarre con estructuras pasivas VI
2.1	Ejemplo de herramienta de agarre de la startup de Cambridge SoftRobotics
2.2	Soft Robotics [1]
2.3	Super Releaser [2]
2.4	Dedo neumático en miniatura
2.5	Obtención de muestras biológicas submarinas [4]
2.6	Contracción helicoidal [4]
2.7	Varios objetos identificados por el robot
2.8	Diseño con topología optimizada
2.9	FlexShapeGripper de FESTO [7]
2.10	Herramienta biónica de agarre derivada del estudio de los pulpos
	Herramienta de agarre mecánica
2.12	Herramienta de agarre flexible mediante cables
	Garra para objetos finos [11]
2.14	Herramientas con estructuras pasivas
2.15	Herramienta mecánica de agarre subacuática
2.16	Herramienta de agarre mediante electroadhesión
	Modelo de adhesión mediante fluido magnetorreológico
2.18	Herramientas en miniatura con materiales activos actuados por métodos diferentes 16
	Herramienta de agarre Versaball de Empire Robotics
	Herramienta híbrida cables más material granular
	Ejemplo de sensor resistivo elástico

3.1	Herramienta de agarre 4 montada en el UR3
3.2	Bomba de vacío
3.3	Electroválvula 3/2 FESTO
3.4	Soporte neumático
3.5	Esquema neumático de conexiones
3.6	Esquema eléctrico de conexiones
3.7	Diseño herramienta de agarre 1
3.8	Prototipo de herramienta de agarre 1
3.9	Posiciones dedo neumático
3.10	Dedo neumático
	Molde para la fabricación de los dedos de silicona
	Dedo neumático
	Primera pieza de la base
	Pieza central de la base
	Unión al módulo neumático
	Diseño de herramienta de agarre 2
	Prototipo de herramienta de agarre 2
	Jamming transition
	Base principal gripper 2
3.21	Base secundaria gripper 2
3.22	Red para filtro gripper 2
3.23	Base 3 gripper 2
3.24	Motor Micrometal con reductora de 1:125
	Acoplamiento para motor Micrometal
	Esquema eléctrico de conexiones
	Diseño herramienta de agarre 3
	Prototipo de herramienta de agarre 3 [SUSTITUIR POR OTRA]
	Eslabón base
	Eslabón Extremo
	Eslabón Anclaje
	Base principal gripper 3
	Polea gripper 3
	Base secundaria gripper 3
3.35	Diseño herramienta de agarre 4
	Prototipo de herramienta de agarre 4
	Diferentes disposiciones de los dedos del MultiChoiceGripper de FESTO 45
3.38	Dedo de termoplástico flexible gripper 4
3.39	Base rígida para el dedo gripper 4
	Tirador y conector gripper 4
	Unión de la base principal al robot UR3 gripper 4
	Tensión de Von Mises gripper 4
0.12	Tonision de von Missos Support I
4.1	Productos Universal Robots
4.2	Entradas y salidas UR3
4.3	Robot UR3 en detalle
4.4	Esquema de un eyector de vacío
	- · · · · · · · · · · · · · · · · · · ·
4.5	Puente en H modelo L298
4.6	Placa microcontroladora con control de motores integrado
5 1	Pelota de tenis
5.1	
5.2	Limpiador de pantalla
5.3	Envase de vaselina
5.4	Envase metálico
5.5	Nuez

5.6	Piedra
5.7	Tomate
5.8	Huevo crudo
5.9	Pegamento en barra
5.10	Estropajo
5.11	Brócoli
5.12	Caja de caramelos
I.1	Diagrama Gantt del provecto

Índice de tablas

5.1	Identificación de los objetos
5.2	Experimentacion con herramienta de agarre 1
5.3	Experimentacion con herramienta de agarre 2
5.4	Experimentacion con herramienta de agarre 3
5.5	Experimentacion con herramienta de agarre 4
I.1	Presupuesto del provecto

Anexo IV

Glosario y Abreviaturas

- Gripper: Herramienta de agarre
- Biomimética: Ciencia que se basa en la inspiración en la naturaleza como fuente de soluciones para resolver problemas humanos
- Tensión de Von Mises: Es una magnitud física proporcional a la energía de distorsión
- UR3: Universal Robot 3
- Jamming transition: Bloqueo en los materiales granulares al ser sometidos a presión