



Universidad de Valladolid



UNIVERSIDAD DE VALLADOLID

ESCUELA DE INGENIERIAS INDUSTRIALES

Grado en Ingeniería Electrónica y Automática

Diseño de robots flexibles mediante neumática de baja presión.

Autor:

Carlos Villagarcía Martín

Tutor:

Eduardo Zalama Casanova

**Departamento de Ingeniería de
Sistemas y Automática**

Valladolid, diciembre 2021

RESUMEN:

Este Trabajo de Fin de Grado consiste en un estudio de la tecnología conocida como Soft Robotic (robótica suave) en conjunción con la impresión 3D para el diseño y prototipado de un actuador para un robot manipulador.

Se trata de un actuador neumático de baja presión orientado robots colaborativos o que trabajan con objetos delicados de formas irregulares. Se pretende diseñar un actuador junto con un controlador y realizar las pruebas pertinentes para verificar su funcionamiento.

PALABRAS CLAVE:

Soft robotics, impresión 3D, diseño 3D, actuador neumático, robot manipulador

ABSTRACT:

This Final Degree Project consists of a study of the technology known as Soft Robotic in conjunction with 3D printing for the design and prototyping of an actuator for a manipulator robot.

This is a low-pressure pneumatic actuator aimed at collaborative robots or robots that work with delicate objects of irregular shapes. The aim is to design an actuator together with a controller and carry out the relevant tests to verify its operation.

KEY WORDS:

Soft robotics, 3D printing, 3D desing, pneumatic actuator, robot manipulator

 ÍNDICE DE CONTENIDO

1	INTRODUCCIÓN Y OBJETIVOS	11
1.1	INTRODUCCIÓN	11
1.2	OBJETIVOS	14
1.3	ESTRUCTURA DEL DOCUMENTO	16
2	SOFT ROBOTICS	19
2.1	DESCRIPCIÓN DE LA TECNOLOGÍA	19
2.2	AVANCES RECIENTES	19
2.2.1	<i>Impresión 3D</i>	19
2.2.2	<i>Soft Robotics</i>	20
2.3	ESTUDIO DE MERCADO.....	21
3	ESTUDIO DE IMPLEMENTACIÓN	27
3.1	IMPRESIÓN 3D	28
3.1.1	<i>Materiales para impresión 3D</i>	29
3.1.1.1	Materiales blandos	32
3.1.1.2	Materiales duros.....	35
3.2	PARTES NO IMPRIMIBLES.....	37
3.2.1	<i>Materiales blandos</i>	37
3.2.2	<i>Materiales duros</i>	37
4	DISEÑO Y EXPERIMENTACIÓN	39
4.1	APÉNDICES MODULARES	39
4.1.1	<i>Versión 1</i>	39
4.1.1.1	Etapa de estudio y diseño:.....	39
4.1.1.2	Etapa de experimentación:	40
4.1.1.3	Conclusiones:.....	42
4.1.2	<i>Versión 2</i>	43
4.1.2.1	Etapa de estudio y diseño:.....	43

4.1.2.2	Etapa de experimentación:.....	46
4.1.2.3	Conclusiones:.....	47
4.1.3	<i>Métodos de conexión neumática</i>	49
4.1.3.1	Etapa de estudio y diseño:.....	49
4.1.3.2	Etapa de experimentación:.....	51
4.1.3.3	Conclusiones:.....	51
4.1.4	<i>Versión 3</i>	53
4.1.4.1	Etapa de estudio y diseño:.....	53
4.1.4.2	Etapa de experimentación:.....	55
4.1.4.3	Conclusiones:.....	59
4.1.5	<i>Versión 3.1</i>	60
4.1.5.1	Etapa de estudio y diseño:.....	60
4.1.5.2	Etapa de experimentación:.....	62
4.1.5.3	Conclusiones:.....	63
4.2	CUERPO DEL ACTUADOR	64
4.2.1	<i>Versión 1</i>	64
4.2.1.1	Etapa de estudio y diseño:.....	64
4.2.1.2	Etapa de experimentación:.....	67
4.2.1.3	Conclusiones:.....	69
4.3	HARDWARE ELECTRÓNICO	70
4.3.1	<i>Componentes:</i>	70
4.3.1.1	Microcontrolador.....	70
4.3.1.2	Pantalla de navegación.....	71
4.3.1.3	Botones de navegación.....	71
4.3.1.4	Electroválvulas.....	72
4.3.1.5	Fuente de alimentación.....	74
4.3.1.6	Sensores de estado.....	74
4.3.2	<i>Diseño controlador para electroválvulas</i>	76
4.4	LÍNEA DE PRESIÓN	84
4.4.1	<i>Deposito versión 1</i>	84
4.4.1.1	Etapa de estudio y diseño:.....	84
4.4.1.2	Etapa de experimentación:.....	86
4.4.1.3	Conclusiones:.....	86
4.4.2	<i>Depósito versión 2</i>	87
4.4.2.1	Etapa de estudio y diseño:.....	87

4.4.2.2	Etapa de experimentación:.....	89
4.4.2.3	Conclusiones:.....	90
4.4.3	Compresor.....	91
4.4.3.1	Etapa de estudio y diseño:.....	91
4.4.3.2	Etapa de experimentación:.....	91
4.4.3.3	Conclusiones:.....	95
4.5	SOFTWARE DEL CONTROLADOR	96
4.5.1	<i>Estructura:</i>	96
4.5.2	<i>Pantallas:</i>	98
5	RESULTADOS Y VALORACIÓN	103
5.1	VALORACIÓN GENERAL.	103
5.2	MATERIALES ELEGIDOS	106
5.3	COMPONENTES ELECTRÓNICOS	109
5.4	SOFTWARE DEL CONTROLADOR	110
5.5	DISEÑO	110
5.6	VALORACIÓN ECONÓMICA.	110
5.6.1	<i>Coste del Personal</i>	111
5.6.2	<i>Coste de recursos empleados.</i>	112
5.6.2.1	Costes Hardware	112
5.6.2.2	Costes software	113
5.6.3	<i>Costes derivados de los materiales.</i>	114
5.6.4	<i>Costes indirectos</i>	115
5.6.5	<i>Costes totales.</i>	116
6	CONCLUSIONES	117
6.1	FUTURAS LÍNEAS DE DESARROLLO.....	118
7	BIBLIOGRAFÍA	121
8	APÉNDICE	127
8.1	TABLA DE CONTENIDOS ADICIONALES	127

ÍNDICE DE ILUSTRACIONES

Ilustración 1: soft robotic ventricular assist device (D. Van Story, 2017).....	12
Ilustración 2: MGRIP system (softroboticsinc).	13
Ilustración 3: Vine Robot (Selvaggio, Ramirez, Naclerio, Siciliano, & Hawkes, 2020).	13
Ilustración 4: Self-powered soft robot in the Mariana Trench (Li, y otros, 2021). 14	
Ilustración 5: MultiChoiceGripper (Festo, s.f.).....	22
Ilustración 6: FlexShapeGripper (Festo, s.f.).	23
Ilustración 7: TentacleGripper (Festo, s.f.).	24
Ilustración 8: el BionicSoftArm (derecha) junto a sus dos predecesores – el Bionic Handling Assistant (izquierda) y el BionicMotionRobot (Festo, s.f.)	25
Ilustración 9: impresión de prueba de TPU.	33
Ilustración 10: demostración De flexión del material.	34
Ilustración 11: prueba de estanqueidad.	34
Ilustración 12: Propiedades Del ABS Utilizado (Prusa research, s.f.).	36
Ilustración 13: modelo 3D de los moldes y las guías para silicona.	40
Ilustración 14: modelo impreso en Pla para 1 apéndice.	41
Ilustración 15: modelo impreso en ABS para 3 apéndices.....	42
Ilustración 16: vista inferior del modelo 3D del molde con su cierre.	44
Ilustración 17: vista superior del modelo 3D del molde con su cierre.....	44
Ilustración 18: modelo 3D de la parte central junto con la abrazadera.	46
Ilustración 19: impresión en ABS de los moldes y prototipo de una garra completa.	47
Ilustración 20: plano de corte de un racor industrial.	49
Ilustración 21: versión 1 del diseño 3D de un racor.	50
Ilustración 22: segundo prototipo de racor neumático.....	51
Ilustración 23: modelo 3D del molde superior y su negativo.	54
Ilustración 24: modelo 3D del molde inferior y su negativo.	54

Ilustración 25: impresión en ABS del molde inferior.	55
Ilustración 26: impresión en ABS del molde superior.	55
Ilustración 27: burbujas de aire atrapadas en la silicona.....	56
Ilustración 28: cara interior de los modelos de silicona fuera de los moldes.	57
Ilustración 29: cara exterior de los modelos de silicona fuera de los moldes.	57
Ilustración 30: prueba del sistema de unión.	58
Ilustración 31: prueba de resistencia.....	59
Ilustración 32: evolución del modelo, vista superior.....	60
Ilustración 33: evolución del modelo, vista inferior.....	61
Ilustración 34: modelo 3D del apéndice completo.....	61
Ilustración 35: corte transversal del modelo 3D de un apéndice completo.....	62
Ilustración 36: apéndice completo. Vista superior.	62
Ilustración 37: apéndice completo. Vista inferior.	63
Ilustración 38: sensor de fuerza rebajado en anchura.	63
Ilustración 39: cuerpo de la garra.....	65
Ilustración 40: grupo de presión inferior.....	65
Ilustración 41: modelo 3D de la garra junto con el acople.....	66
Ilustración 42: modelo final de la garra junto con el acople.....	66
Ilustración 43: modelo final de la garra impreso. Vista superior.....	67
Ilustración 44: modelo final de la garra impreso. Vista lateral.....	68
Ilustración 45: modelo final de la garra impreso. Vista inferior.	68
Ilustración 46: esquema de conexiones neumáticas.....	73
Ilustración 47: electroválvulas conectadas por tubos neumáticos.....	74
Ilustración 48: sensor de fuerza (superior) y sensor de flexión (inferior).	75
Ilustración 49: corroboración de valores calculados mediante una calculadora online.	77
Ilustración 50: esquema realizado en Kicad.	78
Ilustración 51: montaje en placa de prototipado.	78
Ilustración 52: diseño de la PCB en Kicad.	79
Ilustración 53: visualización 3D del modelo final.....	80

Ilustración 54: modelo final ensamblado y soldado. Cara superior.....	81
Ilustración 55: modelo final ensamblado y soldado. Cara inferior.....	81
Ilustración 56: esquema de componentes.	82
Ilustración 57: esquema de conexiones a la placa de arduino.....	83
Ilustración 58: corte transversal de una válvula de émbolo.....	85
Ilustración 59: modelo 3D salida de depósito.	85
Ilustración 60: prototipo salida de depósito.	86
Ilustración 61: válvula de bicicleta y modelos de ensayo.	87
Ilustración 62: modelo 3D de la segunda versión.....	88
Ilustración 63: modelo 3D de la segunda versión modificada.	89
Ilustración 64: gráfica presión-tiempo del depósito de aire.	90
Ilustración 65: paletas montadas sobre la dremel.....	92
Ilustración 66: vista frontal de la turbina montada.	93
Ilustración 67: vista lateral de la turbina montada.	93
Ilustración 68: demostración de la turbina.....	94
Ilustración 69: Diagrama UML de casos de uso.	96
Ilustración 70: Diagrama UML de actividad para el modo automático.....	97
Ilustración 71: pantalla menú principal.....	99
Ilustración 72: pantalla modo automático.	100
Ilustración 73: pantalla ajuste sensores.	101
Ilustración 74: pantalla movimientos manuales.	102
Ilustración 75: pantalla ajustes.	102
Ilustración 76: manipulador industrial.	104
Ilustración 77: vista trasera y lateral del apéndice.	105
Ilustración 78 : daño producido por el tornillo de estrangulación en la garra....	107
Ilustración 79: tornillo de estrangulación de nuestro diseño.	108
Ilustración 80: racor industrial con tornillo de estrangulación integrado.....	108

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1: Métodos de impresión 3D (All3dp, 2020)	28
Tabla 2: Materiales de impresión FDM.	32
Tabla 3: Estado lógico para control de las electroválvulas	73
Tabla 4: Distribución temporal del trabajo.....	111
Tabla 5: Costes directos del personal.	112
Tabla 6: Costes del hardware.....	112
Tabla 7: Costes hardware con amortización.....	113
Tabla 9: Costes de los consumibles.	115
Tabla 10: Costes indirectos.....	115
Tabla 11: Suma de costes.....	116

1 INTRODUCCIÓN Y OBJETIVOS

1.1 Introducción

Aunque tradicionalmente los sistemas robóticos se han fabricado mediante materiales rígidos como el acero o el aluminio, en la naturaleza es difícil ver componentes rígidos, si no que los cuerpos tienden a ser blandos, elásticos y flexibles, lo que les permite adaptarse e interactuar mejor con el entorno.

Este es uno de los motivos por el cual cada vez es mayor el interés en el uso de materiales y morfologías no convencionales debido a las propiedades mecánicas que estas ofrecen al interactuar con entornos dinámicos.

Es cierto que desde los inicios de la robótica se han ido incorporando elementos elásticos y deformables, pero en su mayoría siempre han sido piezas metálicas semirrígidas tales como muelles y amortiguadores; o piezas caucho como absorbedores de impacto de goma. Normalmente estas partes se encuentran en las articulaciones y ayudan a la estabilizar los movimientos.

La robótica suave pretende ir un paso más allá y aboga por robots en los cuales los materiales blandos o flexibles sean la parte principal del cuerpo acercándonos a los diseños mecánicos que podemos encontrar en la naturaleza y morfologías que puedan reconfigurarse en función de los elementos con los que interactúan.

Las principales ventajas de esta robótica suave frente al a tradicional son un agarre de objetos de formas no definidas y la interacción segura con seres humanos. Todo gracias a una morfología inspirada en la naturaleza que simplifica la ejecución de acciones que serían de elevada complejidad si se realizan mediante robótica tradicional. También al contar con menos número de

piezas mecánicas y ser más sencillos necesitan menos mantenimiento y si reciben un golpe pueden absorber el impacto sin partirse ni deformarse de manera permanente.

Todas estas ventajas hacen que actualmente cada vez sean más los ámbitos en los que se están utilizando robots suaves; en medicina se emplea en sistemas de rehabilitación o prótesis (ilustración 1) y dentro de la industria destaca su uso en robots colaborativos y manipuladores de objetos irregulares ayudados de visión 3D como pasa en la industria alimentaria (ilustración 2). Así mismo, su presencia cada vez es mayor en la exploración de terrenos de difícil acceso como cuevas con pasos estrechos (ilustración 3) y fondos marinos (ilustración 4).

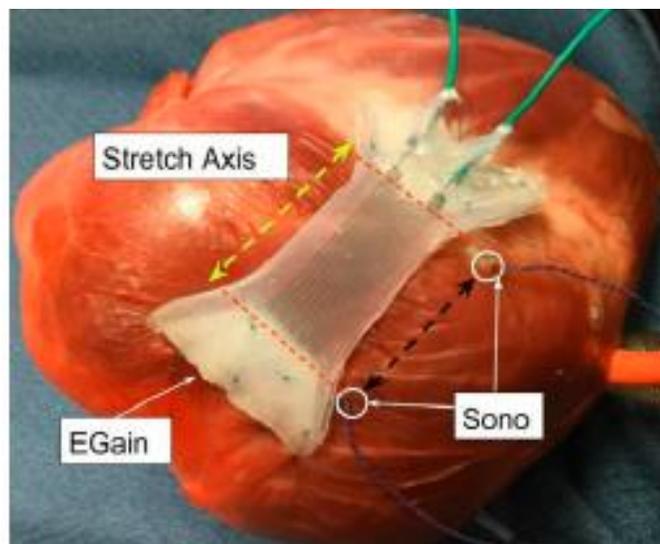


Ilustración 1: soft robotic ventricular assist device (D. Van Story, 2017)

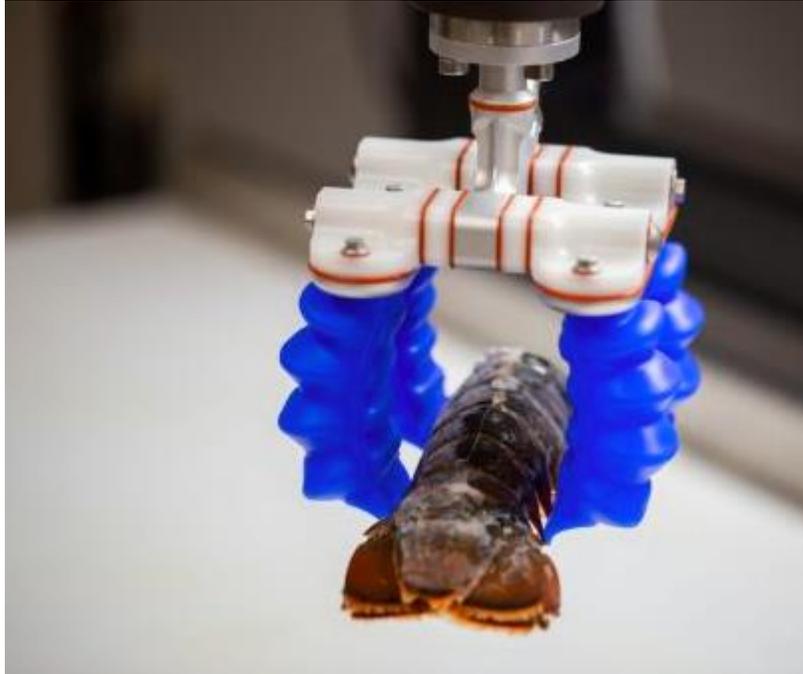


Ilustración 2: MGRIP system (softroboticsinc).



Ilustración 3: Vine Robot (Selvaggio, Ramirez, Naclerio, Siciliano, & Hawkes, 2020).

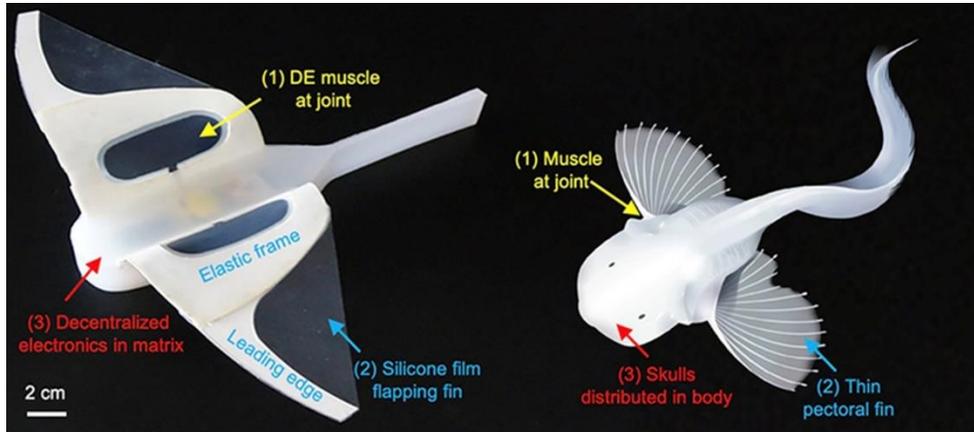


Ilustración 4: Self-powered soft robot in the Mariana Trench (Li, y otros, 2021).

Actualmente su uso más mayoritario es el de las garras de robots manipuladores, y es en esta aplicación de la robótica suave donde se centra este proyecto, que pretende fabricar una de ellas con el objetivo de investigar nuevas técnicas de producción, que permitan abaratar costes y hacer de esta tecnología más accesible.

Este campo de investigación está cobrando cada vez más relevancia y está permitiendo alcanzar nuevas metas dentro de la robótica, por lo que necesita ser investigada desde diferentes áreas de conocimiento.

1.2 Objetivos

El objetivo principal de este proyecto es el de diseñar un actuador blando tipo garra capaz de realizar la aprehensión de objetos, con el propósito de que pueda ser acoplado a robots manipuladores de tamaño reducido o robots colaborativos.

El primer objetivo secundario es encontrar qué materiales son los adecuados para este prototipo de garra, y con qué métodos de fabricación puede conseguirse una mejor asequibilidad. También se pretende que estas técnicas de elaboración tengan un reducido tiempo de producción y bajo coste, de modo que puedan realizarse varias iteraciones en el diseño.

El segundo objetivo secundario es crear un diseño 3D completo del proyecto, el cual, adaptándose a los materiales y técnicas de fabricación anteriormente escogidas, pretenderá conseguir un prototipo funcional que pueda ser fácilmente ensamblado y permita un mantenimiento del sistema y sustitución de piezas de forma cómoda y sencilla. Esto puede ser efectuado mediante elementos de unión desmontables que permitan acceder a los puntos clave. Del mismo modo, el diseño procurará ser modular para facilitar que futuros usuarios puedan modificarlo a sus necesidades. También se obtendrá el despiece de todos los elementos que conforman el modelo para que puedan ser fabricados.

El tercer objetivo secundario es crear un mecanismo de control para la garra, que contará con un microcontrolador, el cual mediante una interfaz permitirá realizar funciones básicas para su funcionamiento como pueden ser: movimientos manuales, movimientos en automático, ajuste de valores y calibración, etc. También contará con sensores que puedan detectar su estado, la posición, orientación o incluso forma de el objeto con el que interactúan. Asimismo, será necesario el diseño de los circuitos, tanto eléctricos como neumáticos, necesarios para la conexión los sensores, las electroválvulas y el controlador.

El cuarto objetivo secundario es que la realización del proyecto sea lo más económica posible, ya que debe de ser fácilmente replicable fuera de un entorno industrial o un laboratorio especializado, y de este modo hacer más accesible esta tecnología. Los diferentes materiales y técnicas de fabricación, así como el

diseño o el hardware utilizado, están orientados a que pueda ser producido, adaptado, modificado y reparado de la forma más sencilla y barata posible.

1.3 Estructura del documento

En este primer capítulo (Capítulo 1), se enumeran los objetivos de este trabajo y cómo se estructura este documento.

En el segundo capítulo (Capítulo 2), se realiza un estudio del estado del arte de la robótica suave donde se introducen los principales conceptos, la inspiración biológica, tecnologías disponibles y desafíos de la robótica suave.

En el tercer capítulo (Capítulo 3), se aborda el estudio de que materiales y técnicas que se han usado para la realización del manipulador.

En el cuarto capítulo (Capítulo 4), se desarrolla el cuerpo central del trabajo donde explica cómo se ha realizado el diseño, la fabricación y el modelado de los diferentes prototipos de actuadores neumáticos blandos; así como el diseño e implementación del controlador y la programación requerida para su funcionamiento.

En el quinto capítulo (Capítulo 5), se presentan y valoran los resultados obtenidos.

En el sexto capítulo (Capítulo 6), se exponen las conclusiones y futuras líneas de desarrollo.

En el séptimo capítulo (Capítulo 7), se incluye la bibliografía y referencias.

En el octavo capítulo (Capítulo 8), se listan los diferentes archivos y programas con los que abrirlos que se adjuntan junto a este documento.

2 SOFT ROBOTICS

2.1 Descripción de la tecnología

La robótica suave es un campo dentro de la robótica que ha empezado a despertar interés a comienzos del siglo XXI. Esta tecnología se caracteriza por utilizar materiales blandos y flexibles que les permiten deformarse para adaptarse mejor a objetos de diversas geometrías o al entorno. Normalmente, se define un robot como “blando” cuando tiene un módulo de elasticidad (módulo de Young) del orden de 10^2 - 10^6 pascales.

Este tipo de robots surge de la necesidad de tener robots más seguros que puedan compartir espacios con humanos, por lo que, inspirándose en la naturaleza, se buscan materiales y movimientos más amigables a la interacción.

2.2 Avances recientes

2.2.1 Impresión 3D

Desde que en 2009 expiró la patente de S. Scott Crump sobre la impresión FDM (Estados Unidos Patente nº US5121329A, 1989) el mercado se ha visto inundado de impresoras 3D a precios muy asequibles, lo que ha provocado un incremento en las investigaciones y grandes avances en este campo.

Para este proyecto me interesan en particular las técnicas utilizadas en la impresión para crear canales microfluídicos por estereolitografía (Toshimitsu & Masaki, 2016) y por deposición fundida donde se han conseguido canales de 600 μm de diámetro (Gaal, y otros, 2016). También se ha conseguido canales microfluídicos con un diámetro interno de 12 μm gracias a la tecnología 2PP (Two-Photon Polymerization) (Lölsberg, y otros, 2018). Para el desarrollo de este

proyecto se pretende imprimir a una escala mucho mayor, pero estas líneas de investigación muestran la máxima resolución que podemos obtener con cada técnica, lo cual determinará la facilidad con la que conseguiremos estanqueidad con diferentes tecnologías de impresión.

También son de especial interés los materiales que pueden ser utilizados para la impresión 3D. Actualmente ya se ha conseguido imprimir tejido muscular usando miofibrilla (Kang Gu, Yahya, Spinks, & Kim, 2009), baterías de LiFePO₄ (Maurel, y otros, 2019) o piezo-electricos (Kanguk, y otros, 2014) y eso unido a la posibilidad de realizar impresiones multimaterial, permite cada vez desarrollar estructuras más complejas (Lin, y otros, 2014).

2.2.2 Soft Robotics

Los materiales son muy variados en el desarrollo de los robots blandos, estos pueden ser fluidos, geles, elastómeros blandos, compuestos de polímero blando o metal líquido embebido en elastómeros (Gariya & Kumar, 2021); también con materiales no elásticos como puede ser tela impermeable se pueden realizar robots blandos (Selvaggio, Ramirez, Naclerio, Siciliano, & Hawkes, 2020). La geometría es una parte fundamental como lo demuestran los modelos que están inspirados en el arte del kirigami (Rafsanjani, Zhang, Liu, Rubinstein, & Bertoldi, 2021).

La escuela de ingenierías de Harvard consiguió un robot blando de un octópodo el cual contaba con un circuito lógico de canales microfluídicos que redirige la energía que se genera por una reacción química en su interior para mover las extremidades (Wehner, 2016); sin embargo, este robot autónomo no disponía de la capacidad de desplazarse.

Recientemente se han conseguido operar robots blandos bajo condiciones extremas de casi 100 MPa de presión y bajas temperaturas que existen en la

fosa de las Marianas (Li, y otros, 2021), estos avances supondrán un abaratamiento de los costes de exploración del suelo submarino a corto plazo.

También se han conseguido polímeros y elastómeros capaces de “repararse” a sí mismos (Bilodeau & Kramer, 2017); también hay líneas de investigación de robots blandos que imitan los movimientos de los peces, y cuentan con un mayor número de sensores y componentes electrónicos a bordo (Katzschmann, DelPreto, MacCurdy, & Rus, 2018), de esta investigación no es de especial interés los métodos que se han utilizado para hacer el molde de la silicona utilizando piezas impresas en 3D y un núcleo de cera realizado en otro molde de silicona para poder realizar los canales internos y después recuperar la cera calentándolo hasta la temperatura de fusión de la parafina (entre 40 y 65 °C).

También se han conseguido robots blandos que operan mediante campos magnéticos (Eshaghi, Ghasemi, & Khorshidi, 2021), pero la fuerza de agarre es débil y por ello están principalmente orientados a aplicaciones médicas.

2.3 Estudio de mercado

Actualmente hay varias empresas que comercializan actuadores blandos para robots manipuladores; en su mayoría están orientados a la industria de la alimentación, aunque también se utilizan para robots que manipulan diversos objetos de formas muy diferentes y cuya orientación no es importante, de modo que se evita que el robot necesite cambiar de garra.

Pero si hay alguna empresa que merezca ser destacada por encima de las demás esta es Festo. Esta empresa alemana fundada en 1925, con 20.100 empleados y valorada en 3.1 billones € (datos de 2018) es pionera en la investigación, implantación y comercialización de actuadores blandos. En sus

proyectos de 2006-2009 desarrollaron Airacuda (Festo, s.f.), el cual se trata de prototipo de pez el cual se impulsa mediante una cola de silicona activada neumáticamente.

En el periodo de 2010-2012 fue el Asistente biónico de manipulación (Festo, s.f.), pero mayor éxito fue en 2013-2014, cuando se desarrolló el MultiChoiceGripper (ilustración 5) (Festo, s.f.) el cual se sigue usando actualmente de forma extendida.

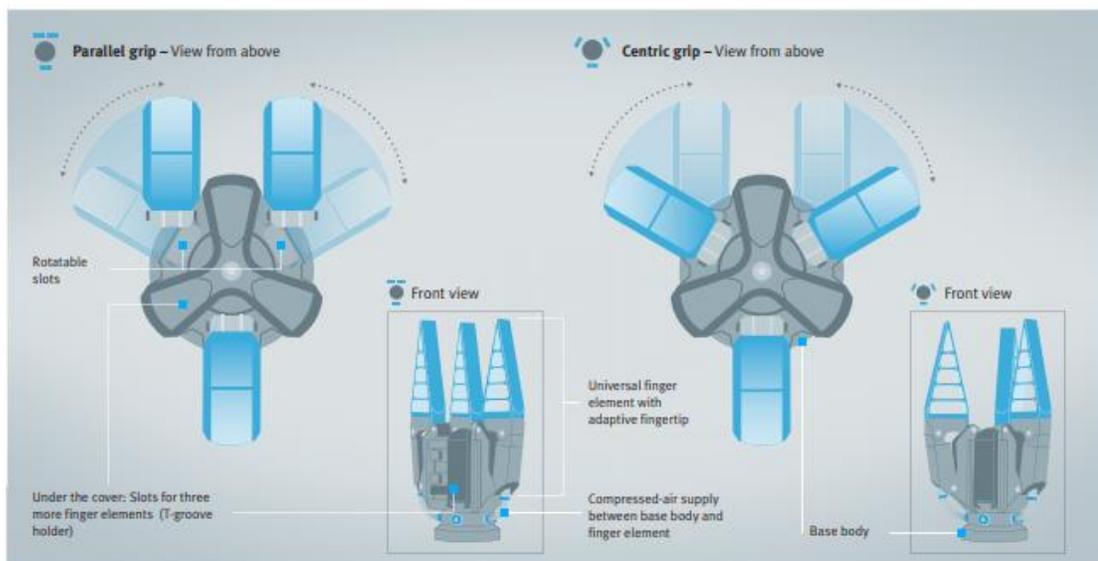


Ilustración 5: MultiChoiceGripper (Festo, s.f.).

Su diseño hace que sea muy fácil de adaptar para diferentes tipos de piezas, pudiendo desplazar la posición de los dedos o rotarlos. A diferencia del resto de prototipos, los dedos de este eran solo un armazón y solo se doblan por puntos en concreto lo que permite una mayor variedad de materiales para su fabricación y elimina el problema de pérdida de aire en el circuito neumático en caso de que se perfora un dedo.

En el periodo de 2015-2017 presentaron el FlexShapeGripper (Festo, s.f.) y el TentacleGripper (Festo, s.f.). Ambos diseños estaban orientados a abordar el

mayor problema del multichoicegripper; y este era que, a pesar de la gran versatilidad para configurar la posición de cierre de los dedos, esta configuración no podía cambiarse de forma automática y solo podía hacerse desmontando la garra. Esto provocaba que la garra se configurase para coger un único tipo de piezas.

El FlexShapeGripper (ilustración 6) y el TentacleGripper (ilustración 7) tienen la capacidad de coger una mayor variedad de objetos sin necesidad de cambiar la configuración inicial de la garra.

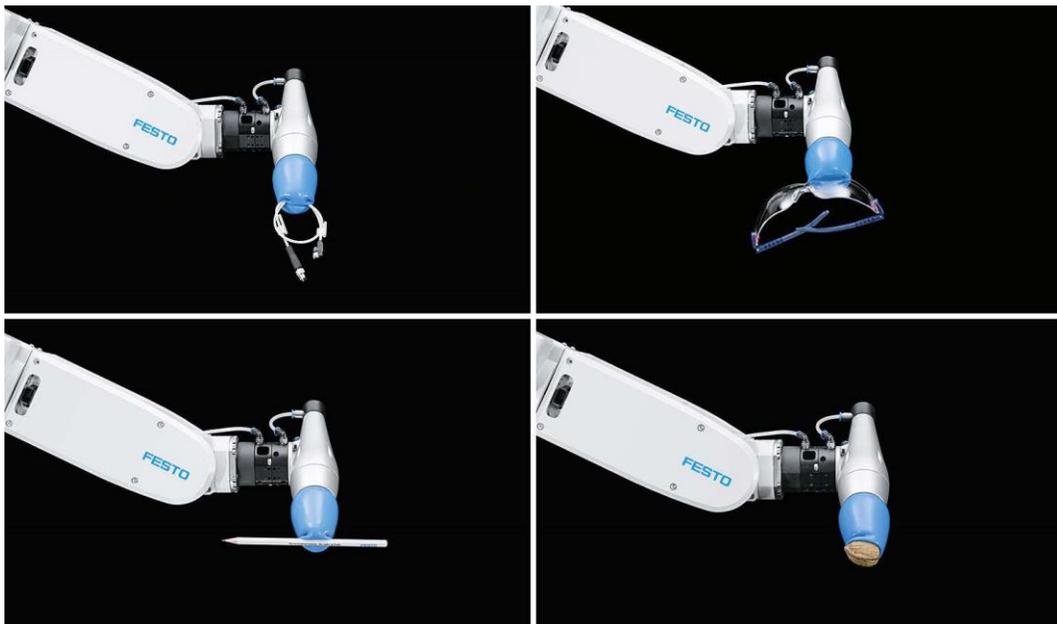


Ilustración 6: FlexShapeGripper (Festo, s.f.).

La tecnología del primero está inspirada en la lengua de los camaleones. Su modo de funcionamiento consiste en colocarse sobre el objeto de modo que la bolsa de silicona, la cual está llena de un material semejante a la arena, lo rodee y después se hace vacío dentro de la garra lo que hace que mantenga la forma con la que cogió el objeto.

Este tipo de manipuladores encontraron su sitio dentro del sector industrial en el descontenerizado de piezas a granel, las cuales vienen descolocadas o incluso mezcladas. Normalmente va acompañado de un sistema de cámaras de visión.



Ilustración 7: TentacleGripper (Festo, s.f.).

El Tentaclegrripper como indica su nombre se inspira en los tentáculos de los artrópodos. Este tipo de manipuladores pueden o no llevar ventosas en una cara para evitar que se muevan los objetos que coge.

Por desgracia este manipulador no se utiliza apenas en la industria.

Las últimas publicaciones correspondientes al periodo de 2018-2019 hablan del BionicSoftArm (Festo, s.f.) el cual es una combinación de el asistente biónico para manipulación y el BionicMotionRobot, y de la BionicSoftHand (Festo, s.f.) la cual cuenta con inteligencia artificial integrada (ilustración 8).

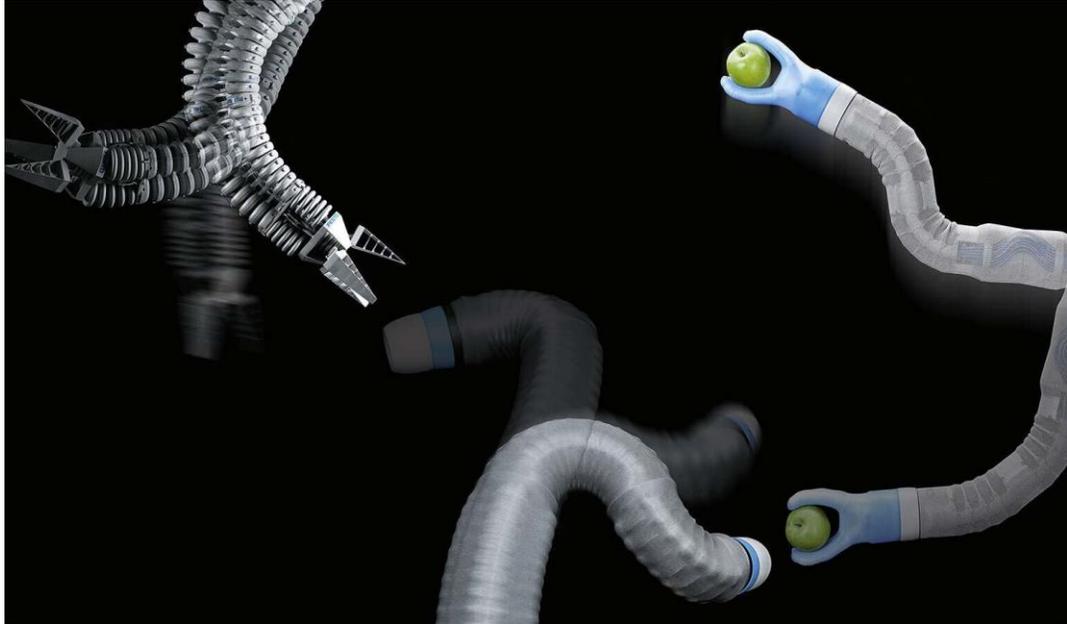


Ilustración 8: el BionicSoftArm (derecha) junto a sus dos predecesores – el Bionic Handling Assistant (izquierda) y el BionicMotionRobot (Festo, s.f.)

3 ESTUDIO DE IMPLEMENTACIÓN

Se busca que no sea necesario un gran desembolso inicial en equipo especializado y materiales, con el objetivo de que un número mayor de gente pueda acceder a estos diseños.

El método de fabricación de garras más empleado es el mecanizado. Este consiste en la fabricación de la pieza mediante la sustracción de material mediante corte, perforación o esmerilado. También se denomina fabricación sustractiva.

También se emplea en menor medida el conformado el cual se basa en la deformación plástica del material, principalmente piezas de metal.

Estos métodos tienen como principal problema que necesitan de varias máquinas especializadas de un coste elevado y conocimientos de cómo utilizarlas, lo cual acotaría mucho el público objetivo.

Existe otro método de fabricación que es la fabricación aditiva, este tipo de fabricación también utiliza máquinas especializadas, sin embargo, son más versátiles y el precio de estas máquinas tiene un rango más amplio y debido a la popularización de la impresión 3D no profesional podemos encontrar máquinas muy baratas como la Anet A8 o la Anycubic Photon zero.

El mejor método de fabricación para este proyecto es la impresión 3D ya que no solo el coste de estas máquinas es inferior, sino que la curva de aprendizaje es muy empinada al comienzo y poco a poco se va aplanando, lo que permite obtener buenos resultados en poco tiempo. También el software necesario para controlar estas máquinas es gratuito en su mayoría y tienen una comunidad con un gran número de miembros activos, lo que permite resolver rápidamente dudas en foros especializados.

3.1 Impresión 3D

Existen diversas técnicas de impresión, las más destacables son las siguientes:

TIPO	TECNOLOGÍA	MATERIALES	PRECISIÓN
Extrusión	FMD – modelado por deposición fundida	Filamento termoplástico (PLA, ABS, PET, TPU)	$\pm 0.5\text{mm}$
Hilado	EBF3 – fabricación por haz de electrones	Casi cualquier aleación metálica	
Polimerización	SLA - Estereolitografía	Resina fotopolímera	$\pm 0.15\text{mm}$
	DLP – procesamiento digital de la luz		
Fusión en lecho de polvo	DMLS - Sinterizado directo de metal por láser	Polvo de metal (aluminio, acero inoxidable, titanio)	$\pm 0.1\text{mm}$
	EBM – Fusión por haz de electrones		
	SHS – Sintetizado selectivo por calor	Polvo termoplástico	
	SLS – Sintetizado selectivo por láser	Termoplásticos, polvos metálicos, polvos cerámicos	
Inyección de material	MJ – inyección de material	Resina fotopolímera	$\pm 0.1\text{mm}$
	DOD – drop on demand		

Tabla 1: Métodos de impresión 3D (All3dp, 2020)

De todas estas tecnologías descartaría las de hilado, fusión en lecho de polvo e inyección de material debido al elevado coste del equipo, y me quedaría con

polimerización y extrusión, que además son las tecnologías más extendidas. Las resinas fotopolímeras son tóxicas en su forma líquida. Es cierto que con un tratamiento de lavado y curación puede eliminarse la resina toxica en estado líquido, pero solo de la parte exterior de la pieza, es por esto por lo que vamos a descartar esta tecnología también ya que un gran nicho de aplicación de los robots manipuladores con actuadores suaves es el sector alimentación.

El modelado por deposición fundida (FDM) se trata de un modelado por filamento extruido por una boquilla, para construir objetos de plástico principalmente. Se denomina de igual forma fabricación aditiva, ya que se la realiza por una sucesión de capas de la parte inferior, hacia arriba. (Himenez, 2011)

Actualmente se dispone de la impresora PRUSA MINI (Průša, s.f.), la cual permite imprimir en una amplia variedad de plásticos y es pues, con la que se imprimirán todas las piezas necesarias. La impresora PRUSA MINI que se va a usar cuenta con la versión software Marlin 4.3.0 (Zalm, s.f.), todas las piezas son originales y no ha sido modificada. El software de Slicer que se va a usar para esta impresora es el Prusa Slicer 2.3.0 (Prusa, s.f.)

3.1.1 Materiales para impresión 3D

Para las impresoras FDM existen diversos filamentos termoplásticos que se pueden utilizar, como se puede ver en la tabla 2: Materiales de impresión FDM (Marcos Fernandez & León Calero, 2019)

MATERIAL	PROPIEDADES	APLICACIONES EN LA INDUSTRIA
ABS	Resistente y fuerte.	Automoción, aeroespacial, dispositivos médicos.
ASA	Resistencia mecánica y	Prototipos funcionales

	estabilidad UV.	desde soportes y carcasas eléctricas hasta prototipos de automóviles y piezas de producción prácticas para uso en exteriores bajo el sol.
Nylon 12	Buena resistencia química, alta resistencia a la fatiga y alta resistencia al impacto.	Material ideal para aplicaciones que requieren componentes de protección contra impactos y alta resistencia a la fatiga, incluidas cubiertas de antenas, herramientas de producción personalizadas, insertos de ajuste por fricción y ajustes a presión en las industrias automotriz y aeroespacial.
PC	Alta resistencia a la tracción y flexión.	Prototipos funcionales, herramientas y accesorios, moldes para las industrias automotriz y aeroespacial
PPSF/PPSU	Excelente resistencia química y al calor y fuerza mecánica.	PPSF / PPSU puede soportar varios métodos de esterilización, incluido

		<p>el óxido de etileno, autoclave y la radiación. Dispositivos médicos esterilizables, prototipos automotrices y herramientas para aplicaciones exigentes en una variedad de industrias.</p>
PEI o ULTEM	<p>Biocompatible, excelente resistencia mecánica y química y estabilidad térmica.</p>	<p>Debido a su alta relación resistencia / peso y la certificación existente, ULTEM es ideal para aplicaciones de creación rápida de prototipos y herramientas avanzadas en las industrias aeroespacial, automotriz, médica y de producción de alimentos.</p>
PLA	<p>Buena resistencia a la tracción y calidad de la superficie.</p>	<p>Ideal para modelos y prototipos que requieren detalles estéticos y ser respetuosos con el medio ambiente tanto para el hogar como para la oficina.</p>
TPU	<p>Excelente resistencia al desgarro y al desgaste,</p>	<p>Flexibilidad excepcional (es decir alargamiento a</p>

	alto impacto, fuerza y dureza.	la rotura) y resistencia a la corrosión para muchos productos químicos y aceites industriales comunes. Material altamente versátil con propiedades de caucho y plástico para una variedad de aplicaciones industriales.
--	--------------------------------	---

Tabla 2: Materiales de impresión FDM.

Veo conveniente distinguir dos partes de la garra: la parte blanda que tiene que ser elástica y soportar esfuerzos de tracción, y la parte dura que tiene que ser resistente a impactos y a esfuerzos mecánicos.

3.1.1.1 Materiales blandos

Para la parte blanda no hay ninguna duda que el mejor material es el TPU ya que presenta varias ventajas como gran resistencia al impacto, al desgaste, a la abrasión y a los cortes. Y como inconveniente cabe destacar que no se adapta bien a los entornos calurosos. (M., 2020)

Dentro del TPU hay muchas opciones debido a que las marcas añaden aditivos para mejorar sus propiedades, como el TPU 95^a de Ultimaker que soporta hasta un 580% de alargamiento antes de rotura (ultimaker, s.f.) , o el filamento Ninjaflex el cual es una mezcla de elastómeros termoplásticos (TPE) y poliuretano termoplástico (TPU) (León Cárdenas & Romero Andrade, 2018) y promete un impresionante 660% de elongación además de resistencia a químicos como aceites, petróleo o el freón (Ninjaflex, s.f.)

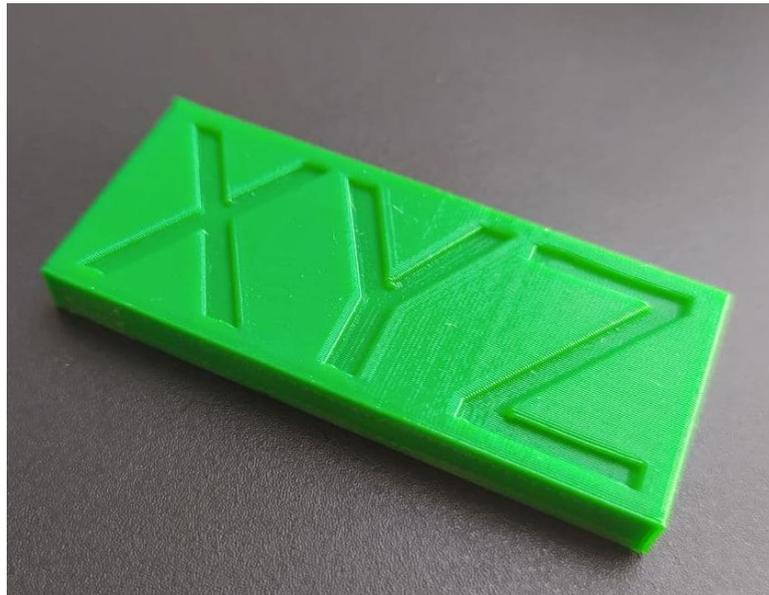


Ilustración 9: impresión de prueba de TPU.

Se han realizado pruebas con un filamento flexible de la marca XYZ (ilustración 9), en las que he comprobado la gran flexibilidad del material. Lamentablemente, he visto que es bastante difícil conseguir imprimir paredes estancas delgadas, lo que supone un gran problema, ya que el aire escapará fácilmente y producirá pérdidas de presión.



Ilustración 10: demostración De flexión del material.

En la ilustración 10 se observa como al doblarse las líneas de filamento se separan entre sí y es por donde se producen las fugas.



Ilustración 11: prueba de estanqueidad.

Al sumergirlo el aire atrapado dentro escapa con facilidad (ilustración 11), lo cual hace que este material no sea la mejor opción para las partes blandas. Posibles materiales sustitutos se tratarán en el apartado de partes no imprimibles.

3.1.1.2 Materiales duros

Como ya habíamos comentado, la idea es que la garra cuente con una parte blanda correspondiente a los dedos y una parte dura, la cual hará de punto de unión con brazo del robot. Para la parte dura la variedad de materiales es mucho mayor, pero viendo los problemas planteados con que las impresiones no sean estancas, he decidido a elegir un material el cual se pueda tratar químicamente para hacer que las capas de impresión se fundan entre sí.

Hay muchos materiales que se pueden tratar para obtener este acabado, pero los disolventes son caros o difíciles de obtener, como es el caso del Ácido Poliláctico (PLA) que es soluble en cloroformo y tetrahidrofurano. Buscando un disolvente más común, encontré que el ABS y ASA es soluble en acetona y con una técnica conocida como baño en vapor de acetona se consigue un acabado brillante con las capas expuestas fundidas entre sí (Kočí, 2020).

Con este criterio, procederé a utilizar filamento ABS de la marca EasyABS (ilustración 12).

Physical	Nominal Value (English)	Nominal Value (SI)	Test Method
Density	1.05 g/cm ³	1.05 g/cm ³	ISO 1183/B
Apparent Density	0.65 g/cm ³	0.65 g/cm ³	ISO 60
Melt Mass-Flow Rate (MFR) (220°C/10.0 kg)	5.2 g/10 min	5.2 g/10 min	ISO 1133
Melt Volume-Flow Rate (MVR) (220°C/10.0 kg)	0.323 in ³ /10min	5.30 cm ³ /10min	ISO 1133
Molding Shrinkage - Flow	0.0040 to 0.0070 in/in	0.40 to 0.70 %	ISO 294-4
Mechanical	Nominal Value (English)	Nominal Value (SI)	Test Method
Tensile Modulus			ISO 527-2
0.126 in (3.20 mm), Injection Molded	310000 psi	2140 MPa	
Tensile Stress			ISO 527-2/50
Yield, 0.126 in (3.20 mm), Injection Molded	6240 psi	43.0 MPa	
Tensile Strain			ISO 527-2/50
Yield, 0.126 in (3.20 mm), Injection Molded	2.7 %	2.7 %	
Flexural Modulus			ISO 178 ^{1, 2}
0.126 in (3.20 mm), Injection Molded	297000 psi	2050 MPa	
Flexural Strength			ISO 178 ^{1, 2}
0.126 in (3.20 mm), Injection Molded	9430 psi	65.0 MPa	
Elastomers	Nominal Value (English)	Nominal Value (SI)	Test Method
Fogging	98 %	98 %	ISO 6452 ³
Impact	Nominal Value (English)	Nominal Value (SI)	Test Method
Charpy Notched Impact Strength			
-22°F (-30°C), Injection Molded	6.2 ft-lb/in ²	13 kJ/m ²	ISO 179/1eA
-22°F (-30°C), Injection Molded	4.3 ft-lb/in ²	9.0 kJ/m ²	ISO 179/2C
73°F (23°C), Injection Molded	11 ft-lb/in ²	23 kJ/m ²	ISO 179/1eA
73°F (23°C), Injection Molded	7.1 ft-lb/in ²	15 kJ/m ²	ISO 179/2C
Notched Izod Impact Strength			ISO 180/1A
-22°F (-30°C), Injection Molded	5.71 ft-lb/in ²	12.0 kJ/m ²	
73°F (23°C), Injection Molded	11.9 ft-lb/in ²	25.0 kJ/m ²	
Thermal	Nominal Value (English)	Nominal Value (SI)	Test Method
Heat Deflection Temperature			ISO 75-2/A
264 psi (1.8 MPa), Annealed	214 °F	101 °C	
Vicat Softening Temperature	216 °F	102 °C	ISO 306/B50

Ilustración 12: Propiedades Del ABS Utilizado (Prusa research, s.f.).

3.2 Partes no imprimibles

3.2.1 Materiales blandos

Como ya he indicado, las partes flexibles no se pueden imprimir. Es por esto por lo que imprimiré en 3D moldes con los cuales hacer las piezas flexibles. El material utilizado será silicona debido a que es fácil trabajar con ella en moldes, no es tóxica y es un material utilizado en garras de robot de grandes empresas como Festo (Festo, 2017). Los moldes se pueden realizar con el mismo ABS con el que imprimiremos las partes duras, y al ser tratado con acetona para eliminar las líneas de impresión conseguiremos una superficie lisa en la silicona, lo que hará que sea más difícil que se acumulen residuos y se generen bacterias, algo muy a tener en cuenta si queremos utilizarlo en la industria alimentaria.

La silicona empleada es Dragons Skin FX-Pro de la marca Smooth-on (smooth-on, s.f.), la cual he elegido porque es el modelo más blando de todos siendo más flexible y elástico. Además, tiene un tiempo de curado y secado muy bajo, inferior a 1h.

3.2.2 Materiales duros

En su mayoría todas las partes duras serán impresas en 3D, si bien es cierto que habrá partes que no sea posible imprimir, porque sea inviable o porque no merece la pena desde un punto de vista económico. En estos casos siempre procuraré usar piezas que sean fácilmente reemplazables y estén estandarizadas.

Estos elementos en su mayoría serán tuercas y tornillos que utilizaremos para unir las piezas entre sí, ya que, aunque es posible diseñar las piezas pe modo

que estas encajen sin necesidad de usar tornillos, las uniones son más débiles y las tolerancias mayores.

4 DISEÑO Y EXPERIMENTACIÓN

4.1 Apéndices modulares

4.1.1 Versión 1

En esta primera versión pretendo realizar la mayor parte posible de la garra de silicona. Sé que esta no es la solución correcta ya que la mayoría de las garras que se utilizan no tienen todo el cuerpo blando, pero no he encontrado información de por qué es así, de modo que realizaré unas pruebas para ver que problemas da e intentar solucionarlos en un siguiente diseño.

4.1.1.1 Etapa de estudio y diseño:

Diseño inicial de un apéndice básico. Las canalizaciones interiores son rectangulares al igual que la forma exterior. Se realiza en silicona con un único molde, la parte inferior es de tela para que no sea elástico y doble hacia el lado deseado.

Diseño de moldes modulares para la realización de una garra completa en silicona con diverso número de apéndices (ilustración 13).

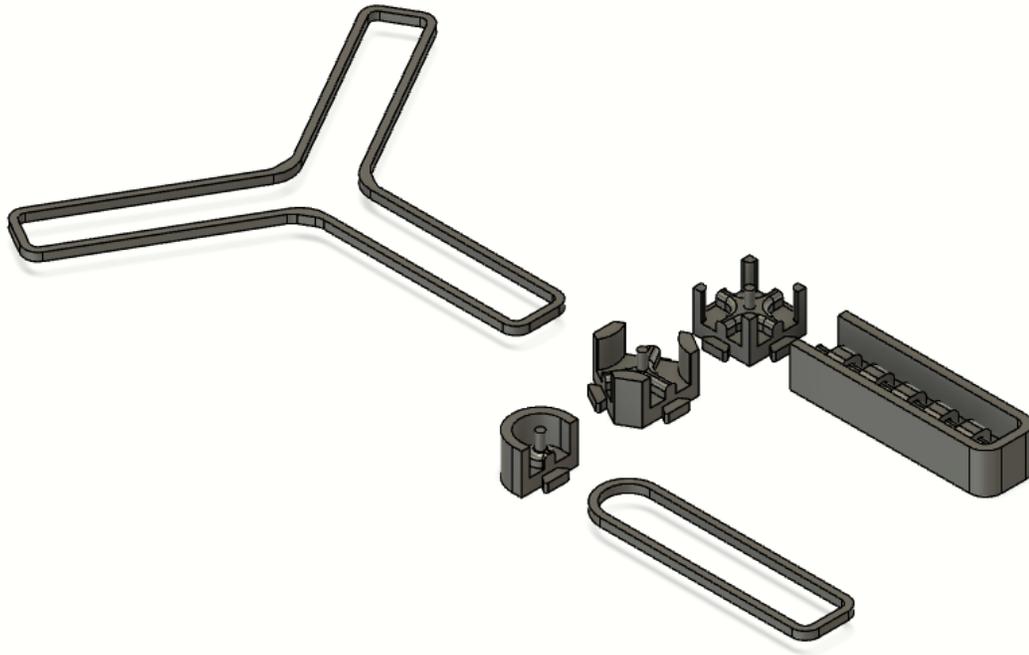


Ilustración 13: modelo 3D de los moldes y las guías para silicona.

Se opta por un diseño modular compuesto de dos piezas que se unen más tarde usando la propia silicona como método de unión.

Los apéndices se unen a la pieza central y permiten fabricar la parte superior; para la parte inferior se coloca la guía sobre un trozo de tela y se vierte la silicona. Una vez tengamos las dos piezas las unimos con silicona.

4.1.1.2 Etapa de experimentación:

En primer lugar, se imprime en 3D con PLA (ilustración 14) un molde de un apéndice y en ABS (ilustración 15) las piezas para un molde de 3 apéndices. A continuación, se realizan las pruebas de flexión. La presión para su funcionamiento es de 1,5-2 bar.

Se ha impreso en estos dos materiales para ver las diferencias en los acabados de la silicona, ya que para el molde nos da igual el material del que se componga el molde.

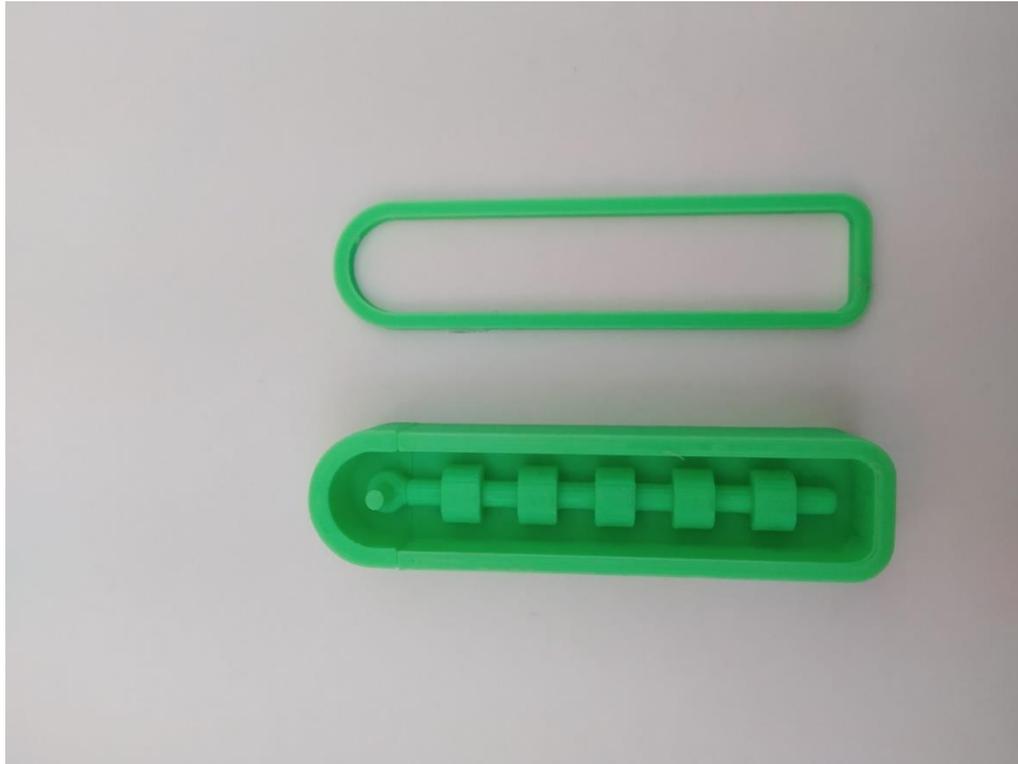


Ilustración 14: modelo impreso en Pla para 1 apéndice.



Ilustración 15: modelo impreso en ABS para 3 apéndices

4.1.1.3 Conclusiones:

Se descarta la idea de una garra cuya unión central sea blanda debido a la posibilidad de que la presión ejercida de la pieza a coger sobre el centro de la garra bloquee las vías de aire y evite el buen funcionamiento, la dificultar para acoplar un tubo neumático a la silicona.

Se ha detectado que la punta de los dedos no se hincha y esto disminuye la fuerza con la que agarra. Para solucionarlo se hará que termine en una cavidad.

4.1.2 Versión 2

En la primera versión se vio que, como sospechaba, realizar la garra completamente en silicona no es viable, de modo que en este diseño voy a utilizar para la base de la garra materiales duros y de este modo solucionar los problemas que nos encontramos en la primera versión.

Vamos a reutilizar la mayor parte del primer diseño para ahorrar tiempo, ya que lo que más nos interesa en este diseño es ver cuál es la mejor técnica para unir la silicona con el ABS.

4.1.2.1 Etapa de estudio y diseño:

En las conclusiones de la versión inicial se comenta que la punta de los dedos no funciona como se desea, para solucionarlo se van a redondear los canales interiores y se desplazan para que la punta tenga una cavidad que permita hincharse.

También se hace que la cavidad de entrada sea más amplia para que sea más fácil la sujeción con la base de la garra, ya que se pretende que entre por la parte interior de la silicona.

Se va a poner una pequeña tapa en el molde (ilustración 16 y 17) donde antes encajaba la unión central de la garra. He optado por esto en lugar de cerrar el diseño para que sea más fácil el desmolde de la pieza. También he creado un surco alrededor del molde para colocar una goma elástica y que mantenga la forma mientras se seca, ya que el primer modelo la silicona goteaba por las uniones y permitía cierto juego.

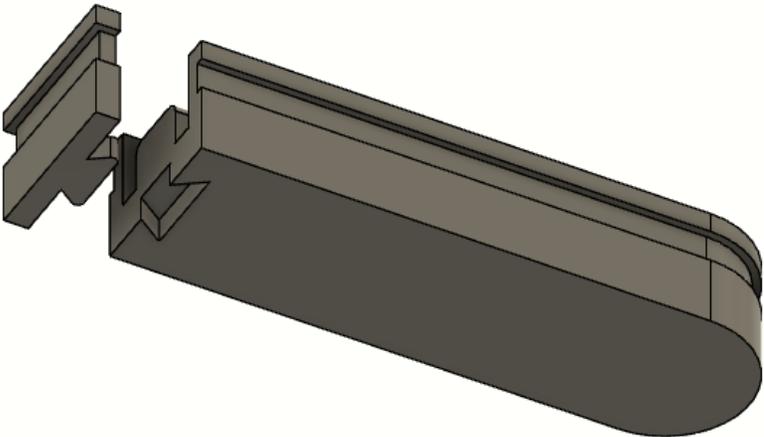


Ilustración 16: vista inferior del modelo 3D del molde con su cierre.

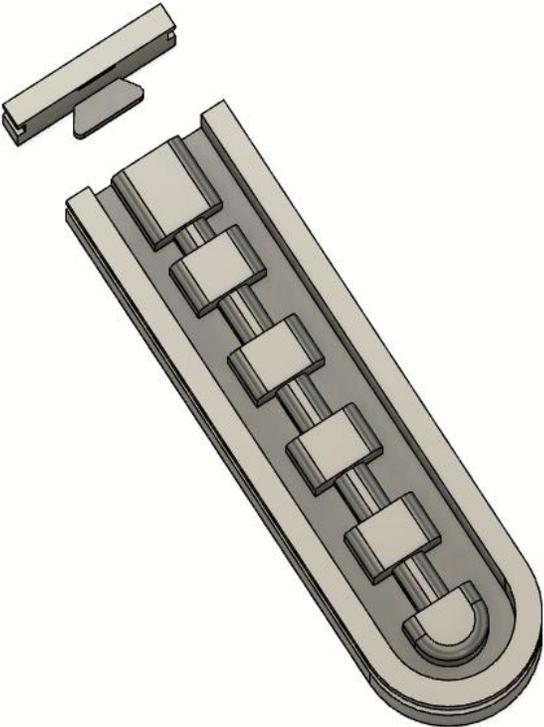


Ilustración 17: vista superior del modelo 3D del molde con su cierre.

El mayor cambio consiste en rediseñar la parte central de la garra (ilustración 18) de forma que sea de plástico duro y solo los dedos sean de silicona.

En la anterior versión realizamos diseños para garras con distinto número de dedos, pero a partir de ahora solo se van a hacer diseños para una garra con 3 apéndices ya que hemos visto que es el menor número con el cual el agarre es óptimo.

Para el diseño del sistema de unión entre la silicona y el ABS, voy a hacer diversas pruebas para ver que solución es la adecuada. Se han probado tres métodos para unir la silicona a un canal interior. Estos han consistido en:

- Secar la silicona en contacto con el ABS. Lo mantiene unido, pero no resiste esfuerzos elevados, no nos vale
- Una brida. Cumple su función, es fácil de poner, pero no se puede retirar sin destruirla y se corre el riesgo de dañar la silicona en el proceso
- Una abrazadera 3D. Se ha diseñado una abrazadera la cual consta de 2 piezas iguales que usan como eje un trozo de filamento de 1.75mm el cual se derrite en los bordes para fijarlo. Después se aprieta con un tornillo de 3mm lo cual permite que sea retirado fácilmente. Esta será la opción que se implementará.

Para la fabricación del molde se ha cambiado de PLA a ABS ya que este material permite trabajarlo más cómodamente mediante abrasión mecánica, o fundir diferentes capas entre sí mediante productos químicos (acetona), de forma que el molde quede liso y no aparezcan las líneas en la silicona.

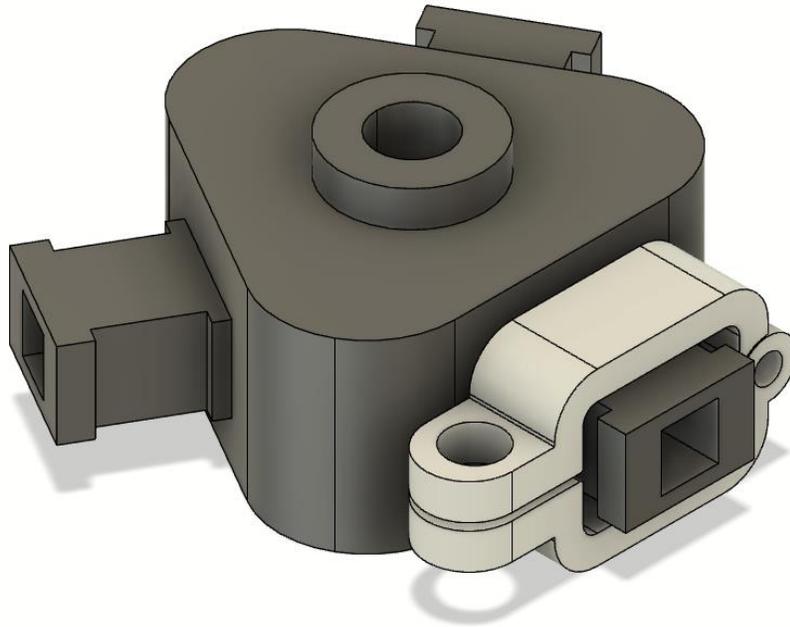


Ilustración 18: modelo 3D de la parte central junto con la abrazadera.

4.1.2.2 Etapa de experimentación:

Se imprimen en 3D moldes con ABS y la parte central de la garra. Aunque el método de unión con bisagra es efectivo, deforma la silicona debido a la excesiva presión.

Se hace patente la diferencia de espesor entre los diferentes apéndices impresos con el mismo molde, esto conlleva a que cada uno tenga una presión diferente para su óptimo funcionamiento. Podemos ver la garra y los moldes empleados en la figura 19.

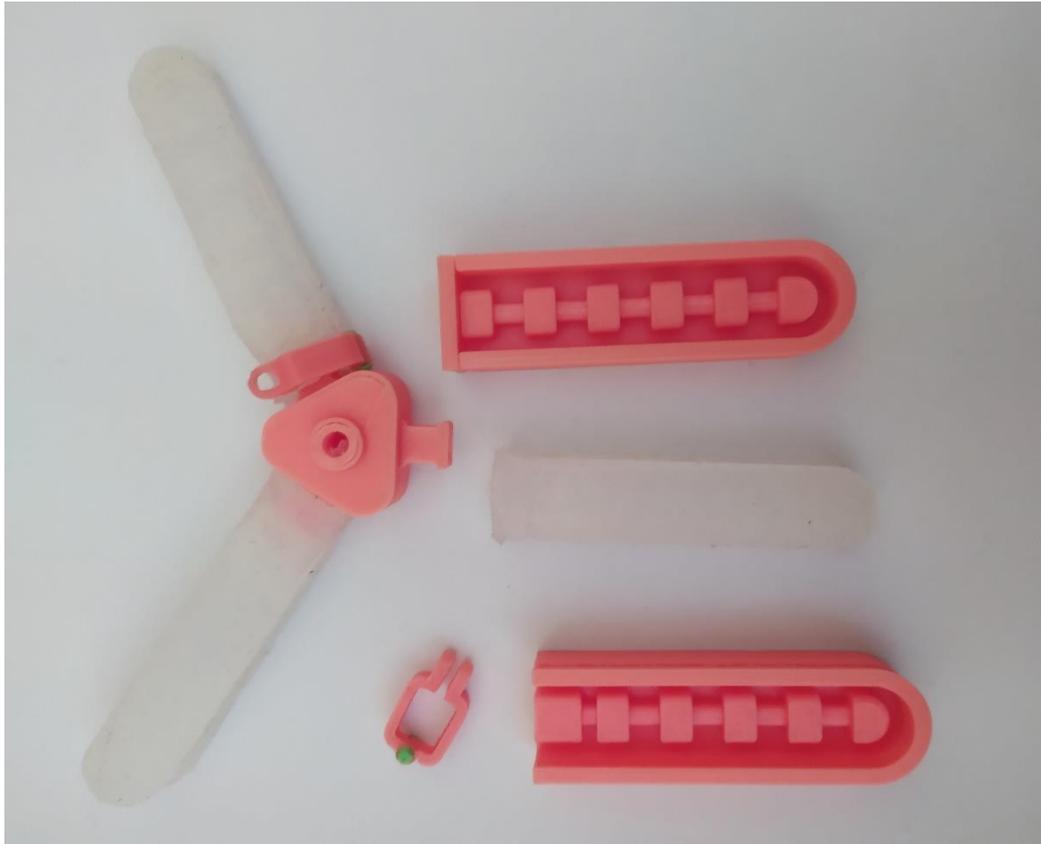


Ilustración 19: impresión en ABS de los moldes y prototipo de una garra completa.

4.1.2.3 Conclusiones:

Es pertinente modificar el diseño para un molde con una “tapa”, para disminuir la dispersión en el proceso de fabricación de los apéndices. Esta tapa también nos ayudará con otro problema y es que hay partes del apéndice con “exceso de material” que no aprovechan toda la elasticidad de la silicona, la tapa nos permitiría dar formas más complejas que sean más eficientes en el uso de material.

También considero necesario un nuevo diseño del método de unión, ya que la bisagra ejerce más presión en un lado que en otro y esto produce deformaciones.

Hace falta diseñar de nuevo la parte central de la garra y en este diseño evaluar la inclusión de métodos de regulación de entrada del aire para cada apéndice de modo que se con la misma presión de entrada tengan el mismo rendimiento, como también tener en cuenta que debería tener la parte central dedicada a el método de unión garra-robot en lugar de usarlo como el punto de conexión entre la garra y el tubo neumático.

Pretendo, asimismo, evaluar en un apartado por separado la viabilidad del diseño de racores neumáticos de conexión rápida para la impresión en 3D frente al uso de racores comerciales. Las ventajas de poder imprimirlos sería una mejor integración en la garra, así como un número menor de piezas, pero el grado de dificultad y el tamaño reducido puede hacer que sean poco fiables y den muchos fallos.

4.1.3 Métodos de conexión neumática

He visto que unir el tubo neumático con la silicona no es viable, de modo que se unirá con la parte dura de la garra. El método de conexión neumática más empleado son racores de conexión rápida, estos podemos intentar diseñarlos en 3D ya que a diferencia de los racores que utilizan olivas metálicas, estos no dependen de una pieza que es necesaria deforma plásticamente para su correcto funcionamiento.

Como este es un diseño complicado vamos a hacerlo por separado de la garra y si el resultado es satisfactorio lo juntaremos todo.

4.1.3.1 Etapa de estudio y diseño:

Tomando como referencia el mecanismo de un racor industrial de conexión rápida (figura 20) se intenta replicar el diseño en 3D y adaptarlo para que pueda ser impreso.

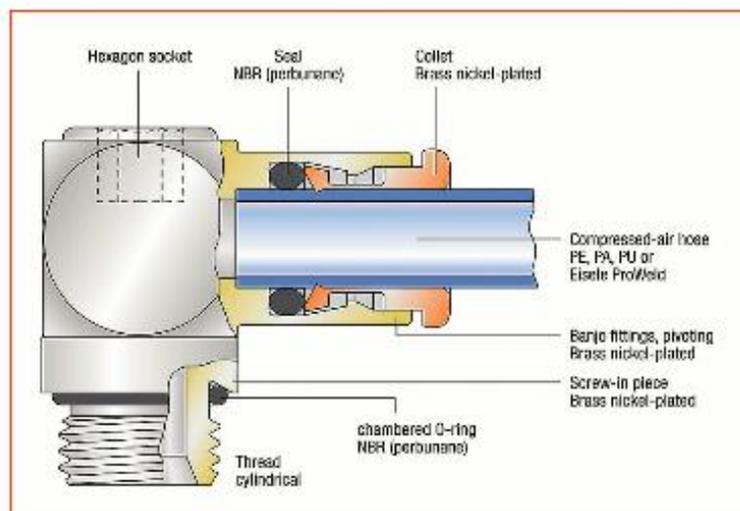


Ilustración 20: plano de corte de un racor industrial.

El primer diseño en 3D realizado basado en un modelo comercial (figura 21) necesitaría llevar una tórica de goma para poder sellar completamente, pero esta podríamos fabricarla también a medida con la misma silicona que empleamos para los dedos.

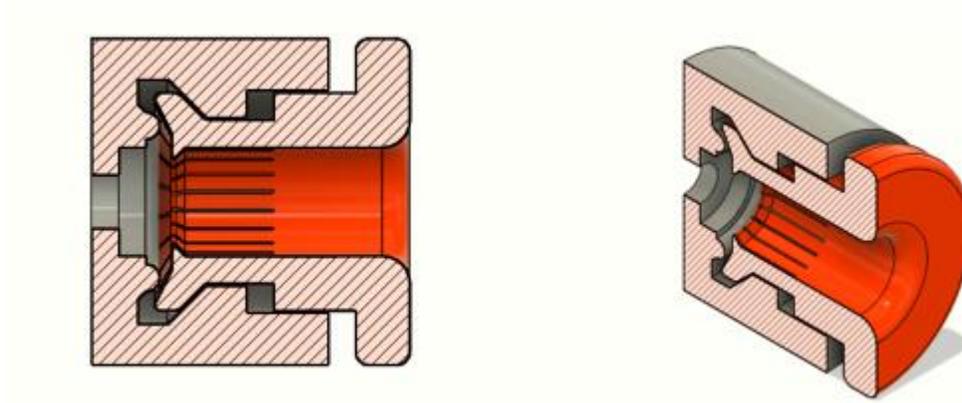


Ilustración 21: versión 1 del diseño 3D de un racor.

El primer modelo lo imprimí en dos piezas separadas que se encajarían a presión. Sin embargo, las pequeñas palancas que presionan el tubo quedaron todas unidas entre sí, lo que provocaba que el diseño no funcionara. Este problema fue debido a que son partes muy pequeñas. Para intentar evitar esto he diseñado un segundo modelo (ilustración 22) que cuenta con solo 4 palancas, lo que permite que sean de mayor tamaño y más espaciadas entre sí. Además, he modificado la orientación de impresión para que sea más resistente en la dirección en la cual se aplicará la fuerza.

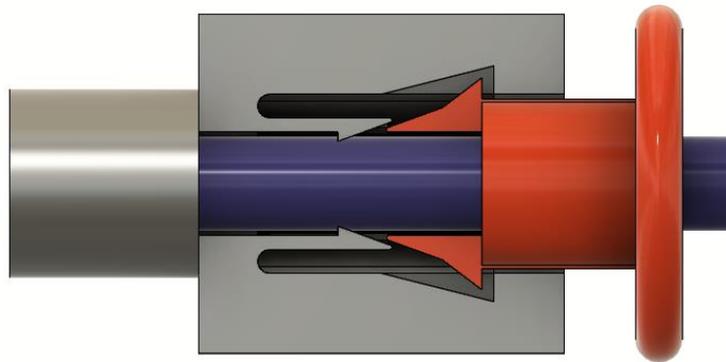


Ilustración 22: segundo prototipo de racor neumático.

4.1.3.2 Etapa de experimentación:

Aunque el segundo modelo se ha impreso sin problemas el resultado no ha sido el deseado, cabía esperar que las pérdidas de aire serían elevadas debido a que este modelo tiene espacios más grandes. No obstante, esto puede solucionarse diseñando un molde para una tórica de goma o silicona específica. Sin embargo, la presión que se ejerce en el tubo para mantenerlo en su sitio es insignificante y apenas lo mantiene en su sitio incluso sin presión de aire en el tubo.

4.1.3.3 Conclusiones:

El modelo es inviable y habría que rediseñarlo teniendo en mente un nuevo mecanismo que lo mantenga en posición. Sin embargo, considero que no merece la pena dedicar más tiempo en esta parte que no es esencial cuando los racores neumáticos industriales tienen un precio inferior a 1€ la unidad y disponen de una amplia gama de tamaños.

Es cierto que al descartar la idea de que el racor sea de conexión rápida es posible conseguir mejores resultados. Un diseño de este tipo sería los racores que utilizan olivas, sin embargo, las olivas deberán ser de metal ya que su objetivo es que sufran una deformación para quedar fijas en el tubo, por lo que las partes que se pueden imprimir son las roscas y estas tienen un precio muy bajo en el mercado. De modo que el resultado es el mismo: no es rentable.

4.1.4 Versión 3

Con la experiencia de los dos modelos anteriores y sabiendo que necesitaremos utilizar racores y que uniremos la silicona con el plástico mediante un mecanismo de presión vamos a hacer el diseño final de los moldes.

4.1.4.1 Etapa de estudio y diseño:

Se desechan los diseños anteriores de los moldes de silicona y se opta por un diseño con mejor estética y que optimice mejor el uso de material. Para esto se diseña un apéndice con grandes cavidades redondeadas y cuyo exterior sigue el mismo patrón.

Se diseña la parte de unión entre las dos partes de silicona con forma de escalón para incrementar la superficie de la unión.

El método de unión que seguirá la curva de la silicona y contará con dos puntos de presión para evitar que deforme la silicona. Para esta unión se utilizarán tornillos M2x8 y está limitado el recorrido para evitar que se apriete de más y puedan dañar la garra.

Se decide la inclusión de sensores para detectar el estado de la garra y poder obtener una realimentación para regular la entrada de aire. Los sensores adecuados para este trabajo pueden ser sensores de flexión, o sensores de presión. Pero el estudio y conclusión sobre cuál es el sensor adecuado se abordará más adelante en la parte de Hardware, por ahora nos limitaremos en determinar la ubicación donde irán.

El diseño final se ve en las ilustraciones 23 y 24.

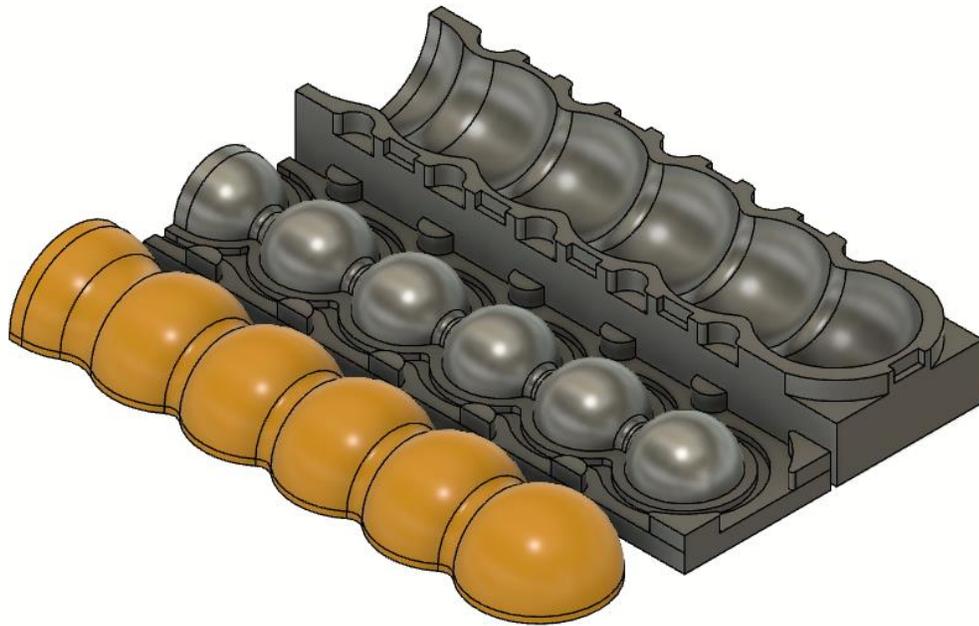


Ilustración 23: modelo 3D del molde superior y su negativo.

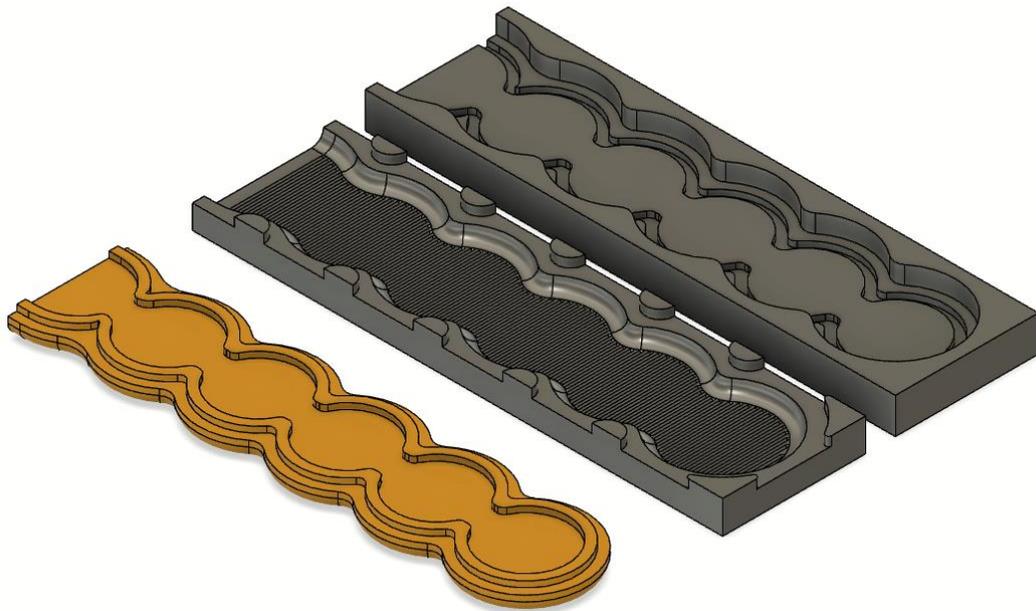


Ilustración 24: modelo 3D del molde inferior y su negativo.

4.1.4.2 Etapa de experimentación:

Se imprimen en 3D moldes con ABS como se ve en las ilustraciones 25 y 26.



Ilustración 25: impresión en ABS del molde inferior.



Ilustración 26: impresión en ABS del molde superior.

Los nuevos moldes cuya forma deja solo una ligera apertura para verter la silicona presentan un nuevo reto para evitar que burbujas de aire queden atrapadas dentro del molde (ilustración 27). Para facilitar que las burbujas escapen del molde he utilizado una base vibrante, lo cual permitirá que se obtengan mejores resultados con una cámara de vacío (pero no dispongo de ninguna y su precio es elevado). La elección de una silicona cuyo tiempo de curación es inferior a 1h también hace más difícil que las burbujas de aire escapen de la silicona antes de que esta se solidifique.

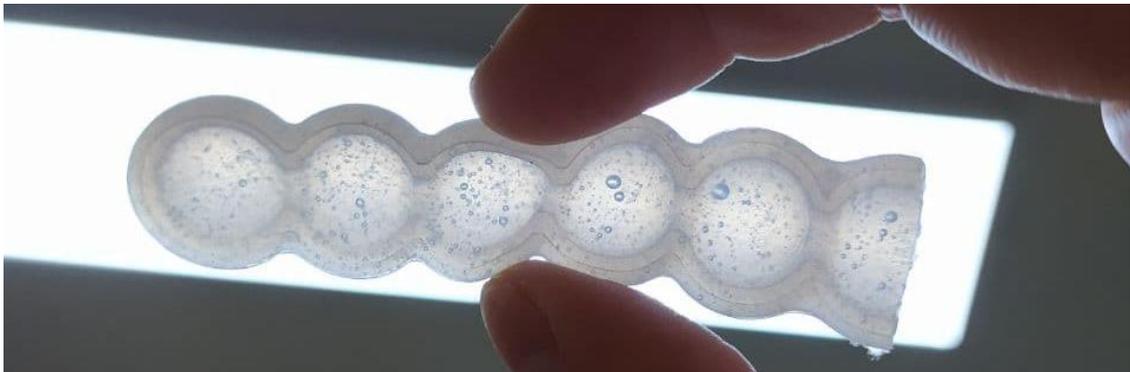


Ilustración 27: burbujas de aire atrapadas en la silicona.

Se introduce el sensor de fuerza dentro de uno de los moldes para dejarlo dentro del apéndice (ilustraciones 28 y 29), está colocado en la parte inferior del apéndice, más próximo del canal central que del exterior. El objetivo es que se vea afectado por la presión interna principalmente y que sustituya al tejido que se utilizaba en los otros diseños para evitar que esa cara sea elástica forzando a que doble.

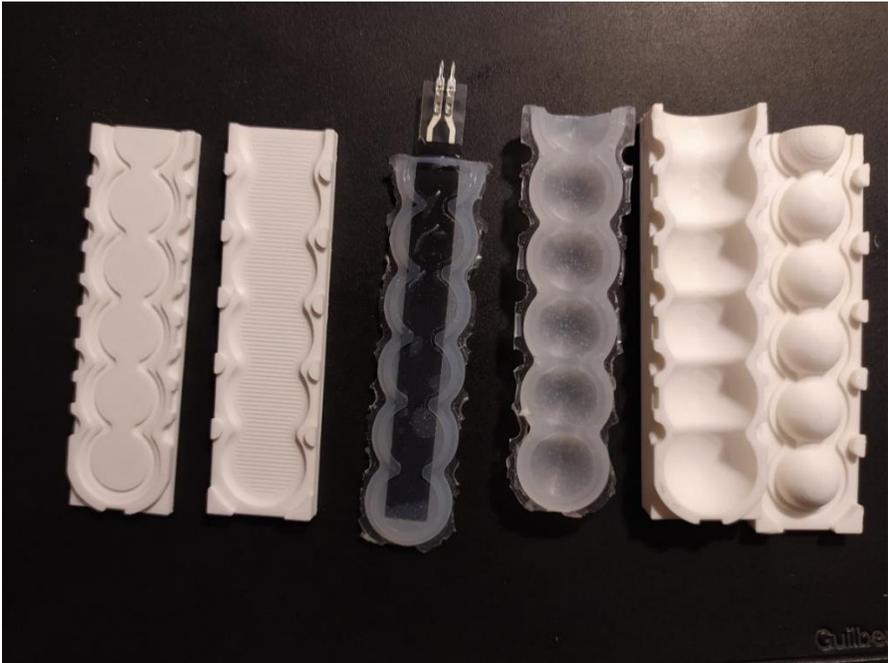


Ilustración 28: cara interior de los modelos de silicona fuera de los moldes.

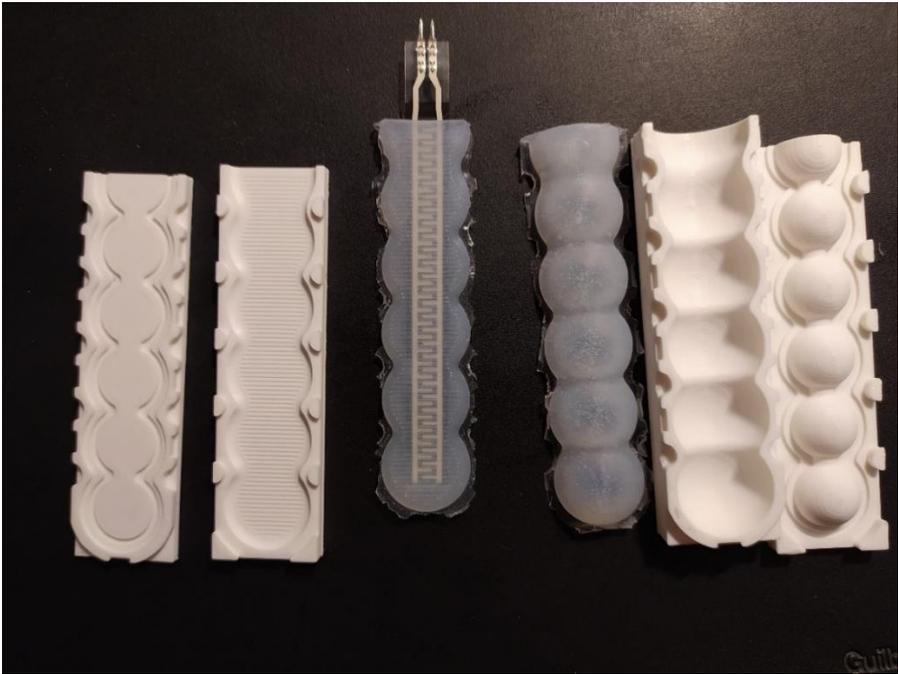


Ilustración 29: cara exterior de los modelos de silicona fuera de los moldes.

Tras limpiar la silicona y juntar las partes se procede a probar el sistema de unión (ilustración 30), para lo que he impreso la pieza central por separado para poder ver con mayor claridad como ajusta por dentro.

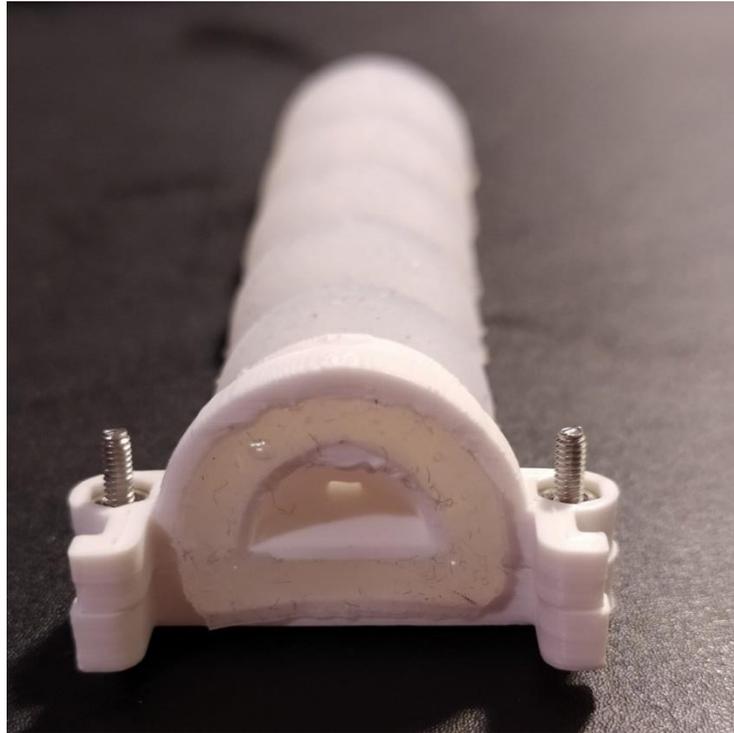


Ilustración 30: prueba del sistema de unión.

Al intentar hinchar el apéndice la unión de la silicona con el sensor no ha sido lo suficientemente fuerte, soltándose y no cumpliendo el cometido de impedir que la cara inferior se deforme.

Aprovechando que ese apéndice no funciona correctamente, ya que no se dobla sobre sí mismo, sino que se hincha de manera uniforme, ha sido sometido a una prueba destructiva para probar la resistencia.

La prueba ha concluido cuando se ha separado una unión. La rotura parece haberse producido porque en esa parte la pared era más fina debido a una burbuja de aire atrapada en la silicona. El resultado final ha sido que el apéndice ha alcanzado una longitud de 17cm; teniendo en cuenta que en su estado

relajado mide 7.5 cm su volumen antes de romperse era un 225% del original (ilustración 31).



Ilustración 31: prueba de resistencia.

4.1.4.3 Conclusiones:

El sensor inmerso dentro del apéndice no restringe la elasticidad, al ser una superficie lisa no se adhiere bien la silicona y se desprende de esta, resultando en que pueda incluso quedar arrugado dentro de la silicona sin la posibilidad de que se pueda recolocar.

Es necesario volver al uso de material textil, y sería adecuado que el sensor sea más accesible de modo que se pueda reemplazar en caso de que se dañe. Estudiar la creación de un “bolsillo” con la tela de forma que se pueda introducir el sensor en la cavidad fácilmente y pueda extraerse al igual.

El nuevo sistema de unión encaja a la perfección, al contrario que su predecesor no hace falta apretarlo tanto para conseguir la estanqueidad con lo cual no deforma la silicona. Además, estéticamente se integra mejor con el conjunto.

4.1.5 Versión 3.1

Los resultados de la anterior versión son satisfactorios de modo que se va a diseñar un modelo base para la parte central de la garra y a probar a hacer un bolsillo de tela dentro de la silicona para poder meter el sensor.

4.1.5.1 Etapa de estudio y diseño:

Tras la decisión de utilizar racores industriales (en concreto uno apto para tubos neumáticos de 4mm de diámetro y una rosca de 1/8”), se diseña la parte central de la garra para que haya uno por apéndice, junto con un tornillo de regulación que consiste en un M5x12 que estrangula el flujo de aire. Este tornillo de estrangulación lo he añadido porque seguramente cuando tenga varios dedos estos no se hinchen a la misma velocidad debido a variaciones en los procesos de fabricación de unos y otros, y con el tornillo se podrá ajustar el flujo de aire.

Tras diseñar un modelo inicial e imprimirlo, el acabado no era el adecuado ya que no armonizaba con la estética de los dedos, de modo que se rediseña el modelo para optimizar mejor el espacio interior, darle unas formas más orgánicas e introducir espacios dedicados a pasar cables por la parte inferior (figuras 32 y 33).

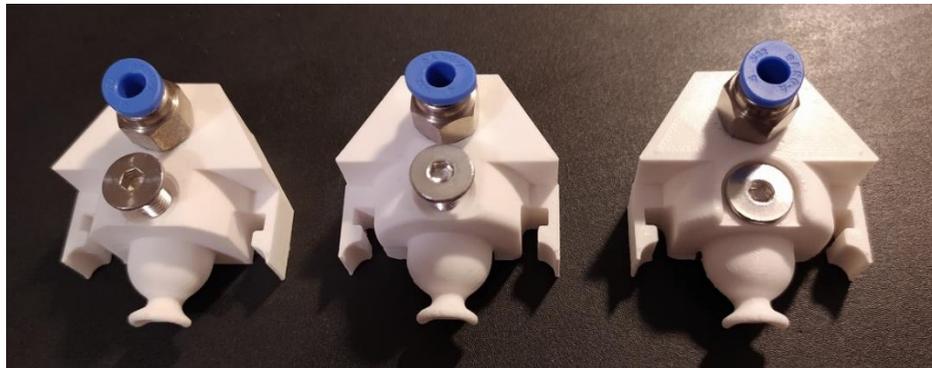


Ilustración 32: evolución del modelo, vista superior.



Ilustración 33: evolución del modelo, vista inferior.

Al final el modelo obtenido es el que se observa en las ilustraciones 34 y 35.

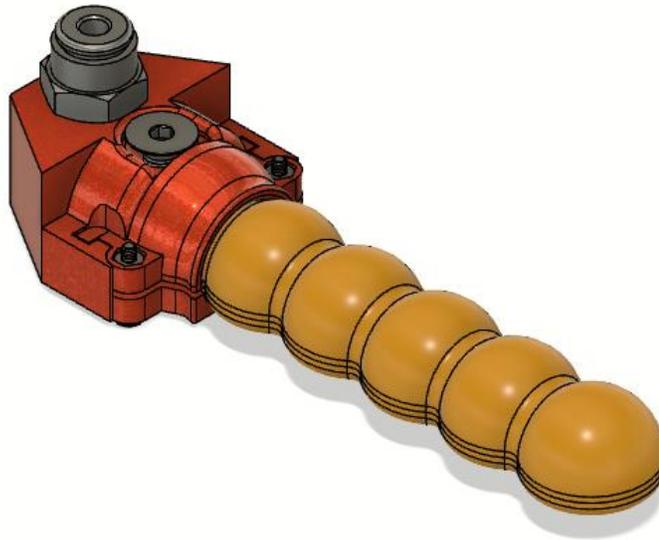


Ilustración 34: modelo 3D del apéndice completo.

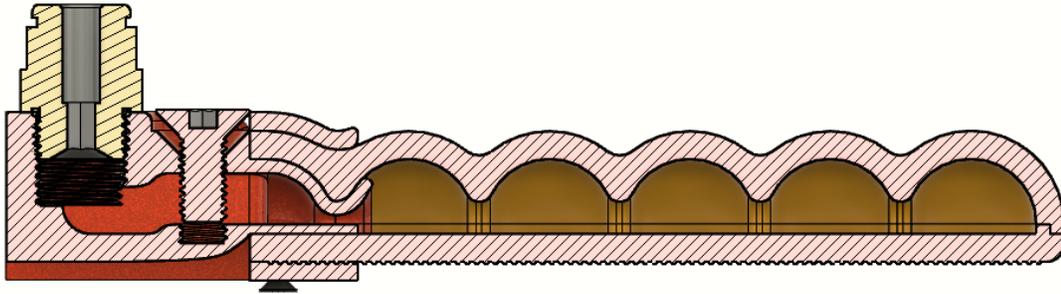


Ilustración 35: corte transversal del modelo 3D de un apéndice completo.

4.1.5.2 Etapa de experimentación:

Se procede a imprimir y ensamblar todas las piezas (ilustraciones 36 y 37).



Ilustración 36: apéndice completo. Vista superior.

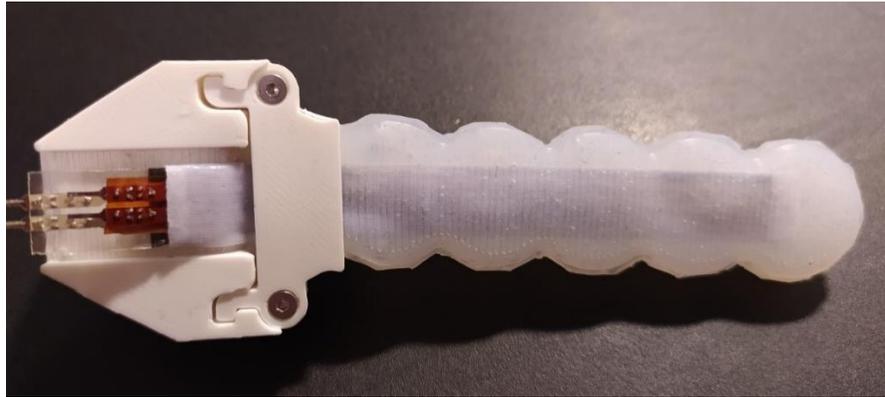


Ilustración 37: apéndice completo. Vista inferior.

Durante el proceso han surgido problemas para introducir el sensor de fuerza, es por ello por lo que se ha decidido rebajar 1mm la anchura del sensor (ilustración 38).



Ilustración 38: sensor de fuerza rebajado en anchura.

4.1.5.3 Conclusiones:

Considero esta la versión más optimizada y la definitiva. Es un diseño robusto fácil de imprimir, ensamblar y sustituir piezas; además permite restringir el flujo de aire y facilita la organización de los cables de los sensores.

Cuando se diseñe la garra completa se abordará el método para cubrir el canal por dónde van los cables para que no sufran daños.

4.2 Cuerpo del actuador

Ya con un diseño base del cuerpo del actuador solo queda replicarlo tantas veces como dedos deseemos y diseñar la forma final teniendo en cuenta los cables que debemos pasar para leer los sensores.

4.2.1 Versión 1

4.2.1.1 Etapa de estudio y diseño:

Una vez conseguido un diseño definitivo para un apéndice, se procede a realizar un diseño que comprenda una mano entera. Esta mano estará compuesta de 3 apéndices.

Se pretende que este diseño permita llevar los cables por el centro de la garra, además de que sea capaz de protegerlos en el mayor grado posible para evitar que se dañen al manipular objetos. Para esto pretendemos cubrir las canaletas inferiores que llevará la garra con una tapa que formará parte de los grupos de presión que sostienen la silicona; de este modo no se reduce el número de partes y además se dota de mayor consistencia.

También se pretende que la garra pueda ser cambiada con facilidad por lo que se diseñará un acople el cual también permita llevar los cables por su interior y que permita intercambiar las garras de forma rápida.

El resultado lo podemos ver en la ilustración 39.

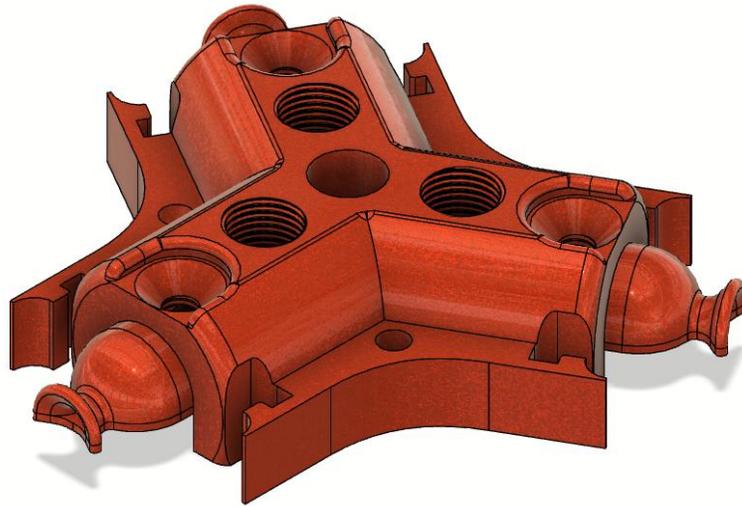


Ilustración 39: cuerpo de la garra.

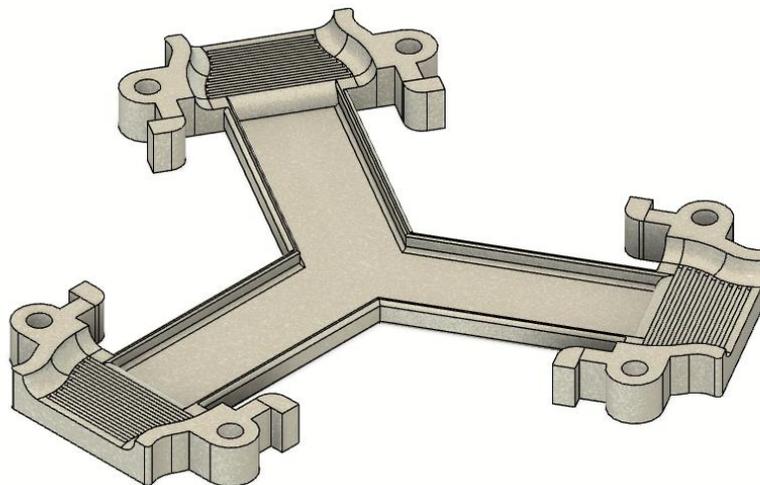


Ilustración 40: grupo de presión inferior.

Con esta nueva pieza (ilustración 40) se pretenden ocultar los cables y de este modo protegerlos. El espesor es bastante reducido pero el hecho de que vaya encajada le otorga suficiente consistencia como para que sea difícil que se parta.

Solo queda diseñar el punto de unión con el robot. El resultado es la pieza naranja de la ilustración 41.

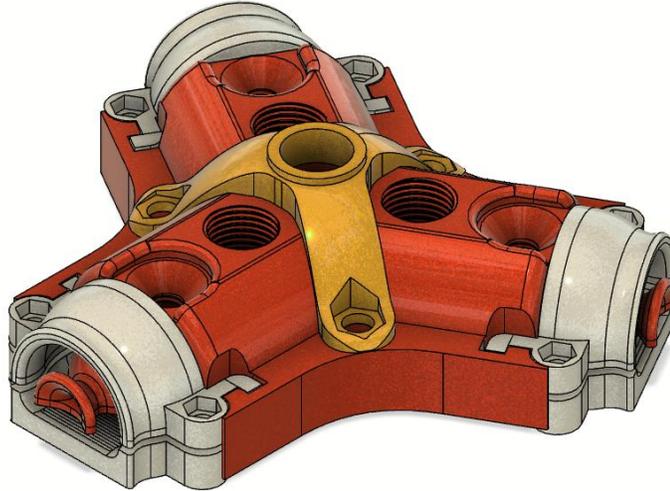


Ilustración 41: modelo 3D de la garra junto con el acople.

Tras imprimir esta pieza se ha observado que tenía partes excesivamente finas y es fácil que parta si recibe un golpe o con una aceleración brusca del robot que lleve la garra. Por lo que he rediseñado la pieza de unión para que sea más resistente, como se ve en la ilustración 42.

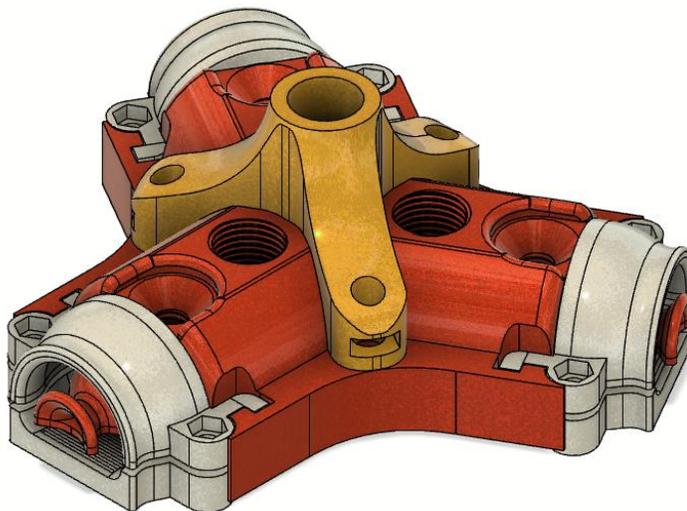


Ilustración 42: modelo final de la garra junto con el acople.

4.2.1.2 Etapa de experimentación:

Se imprimen en 3D moldes con ABS y se ensamblan para comprobar que el diseño e impresión han sido correctas (ilustraciones 43, 44 y 45).



Ilustración 43: modelo final de la garra impreso. Vista superior.

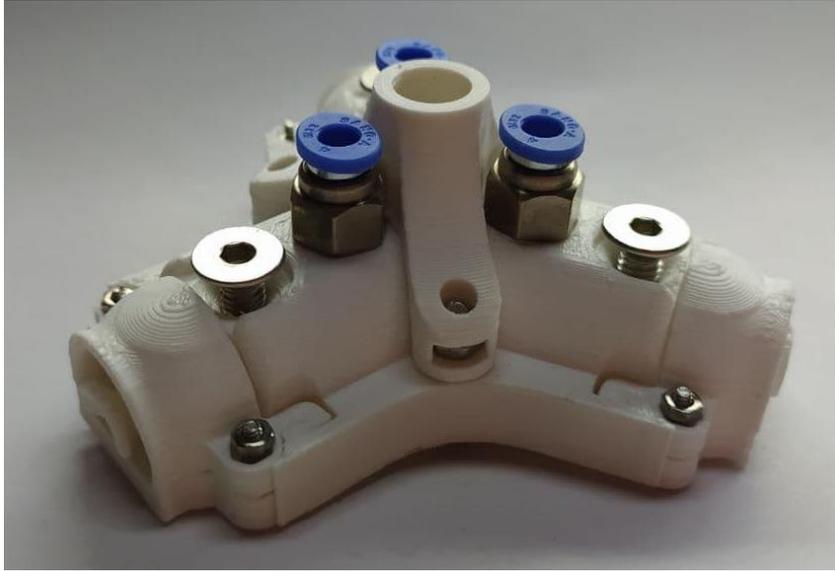


Ilustración 44: modelo final de la garra impreso. Vista lateral.

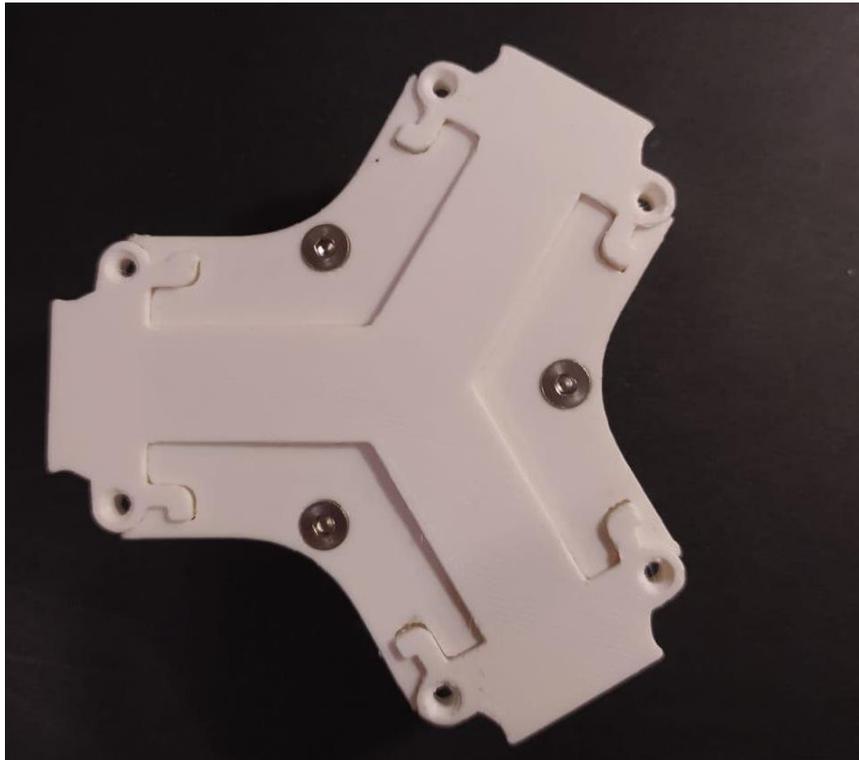


Ilustración 45: modelo final de la garra impreso. Vista inferior.

4.2.1.3 Conclusiones:

Este diseño es estéticamente agradable, la disposición de los elementos es adecuada y el tamaño es compacto; todo eso junto con el correcto funcionamiento de los canales, la protección de los cables y la ausencia de pérdidas de aire en las uniones lleva a considerar este diseño como el definitivo.

4.3 Hardware electrónico

4.3.1 Componentes:

Lo primero será analizar los componentes necesarios, cuáles son las mejores opciones y si son compatibles entre sí.

4.3.1.1 Microcontrolador

El microcontrolador es la parte principal de la electrónica que condicionará las demás opciones en cuanto a compatibilidad.

Entre las opciones, se barajan un microcontrolador de Arduino (Arduino, s.f.), o un Teensy (PaulStoffregen, s.f.).

A favor los Teensy se puede decir que trabajan a una frecuencia muy superior a la que trabaja Arduino, hablamos de 600MHz del Teensy 4.0 frente a los 16MHz del Arduino UNO; el número de entradas y salidas en relación con su tamaño es mayor que cualquier Arduino y el precio es menor, si se compara con una versión original Arduino, y no con una réplica.

Como se puede observar en cuestión de hardware los Teensy son superiores, sin embargo, carecen de entorno de programación propio y usan el entorno de Arduino con modificaciones para adaptarse a su software. También está menos extendido y por ello tiene menor número de librerías y el soporte técnico y de la comunidad es también muy inferior.

Debido a que no estoy familiarizado con la programación del Teensy, y que la información acerca de su programación es escasa comparada con la que hay de

Arduino, se va a tener que invertir demasiado tiempo del proyecto para realizar la curva de aprendizaje de la programación del Teensy.

Por esto, se ha elegido el Arduino UNO como controlador. De todos modos, sería interesante, para futuros proyectos en los cuales la frecuencia para la monitorización de señales sea crítica, utilizar un controlador Teensy.

4.3.1.2 Pantalla de navegación

Considero indispensable que el controlador tenga una pantalla que permita visualizar los parámetros y modificarlos si fuera necesario para evitar tener que cargar todo el programa si se quieren realizar pequeños ajustes.

Para esta tarea se va a usar una pantalla TFT de 1,8" a color, también incluye un lector de tarjetas SD que puede servir para almacenar imágenes de la interfaz de usuario o para guardar informes de funcionamiento desde el Arduino.

Es una versión de pantalla TFT muy extendida con diversos tutoriales sobre conexionado y programación (Santos, s.f.), y también la IDE 1.0.5 de Arduino viene con una librería integrada para controlar estas pantallas.

4.3.1.3 Botones de navegación

Puesto que la pantalla no es táctil, se necesitará una botonera para poder desplazarse por las opciones de pantalla. He considerado que la mejor opción es un botón con codificador incremental ya que proporciona una mayor versatilidad de opciones.

También es un elemento muy extendido en los foros de Arduino y es fácil encontrar guías de uso y programación (Osoyoo, s.f.).

4.3.1.4 Electroválvulas

Para controlar el flujo de aire se van a utilizar unas electroválvulas de solenoide de 12V, en concreto el modelo FA0520F (mantech).

En un principio la idea era utilizar una única electroválvula de dos estados por dedo esto permitiría abrir la válvula para que se cerrase la garra o cerrar la válvula para que se abriera. El problema de esta configuración es que al llegar al punto donde la garra está cerrada completamente si se mantiene la válvula abierta es probable que el dedo se hinche en exceso y sufra daños, y si se cierra la válvula entonces el dedo se deshinchará rápidamente. Esto obliga a configurar un pequeño ciclo de histéresis para el estado en el que la garra está cerrada y conmutar varias veces por segundo el estado de las electroválvulas lo cual disminuirá la vida útil de los componentes.

Para evitar este problema se usarán dos electroválvulas, de modo que esto permite añadir un estado más en el cual el flujo de aire queda bloqueado de modo que el dedo no cambie de tamaño. El motivo por el que se utilizan dos electroválvulas de 3 vías en lugar de una única de 4 vías es porque son menos comunes, tienen un precio superior y en su mayoría suelen consistir en dos electroválvulas en su interior.

El esquema de conexión de las electroválvulas podemos verlo en la ilustración 46, y como quedaría montado en la ilustración 47.

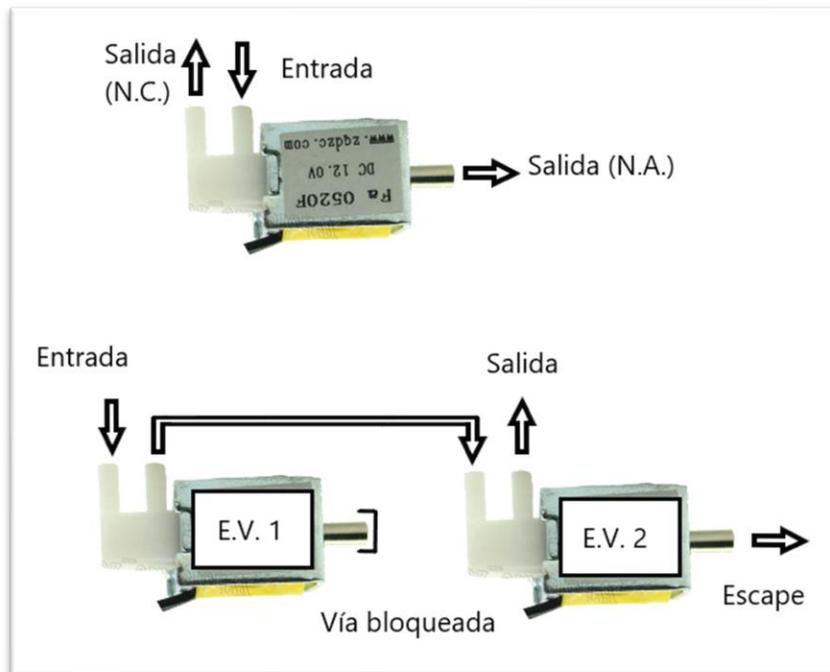


Ilustración 46: esquema de conexiones neumáticas.

De acuerdo con cómo queda conectado neumáticamente, las válvulas tendrán que ser pilotadas de acuerdo con la tabla 3.

Control Estado	Valor Lógico Electroválvula 1	Valor Lógico Electroválvula 2
Apertura de la garra	0	0
Cierre de la garra	1	1
Bloqueo de estado	0	1

Tabla 3: Estado lógico para control de las electroválvulas

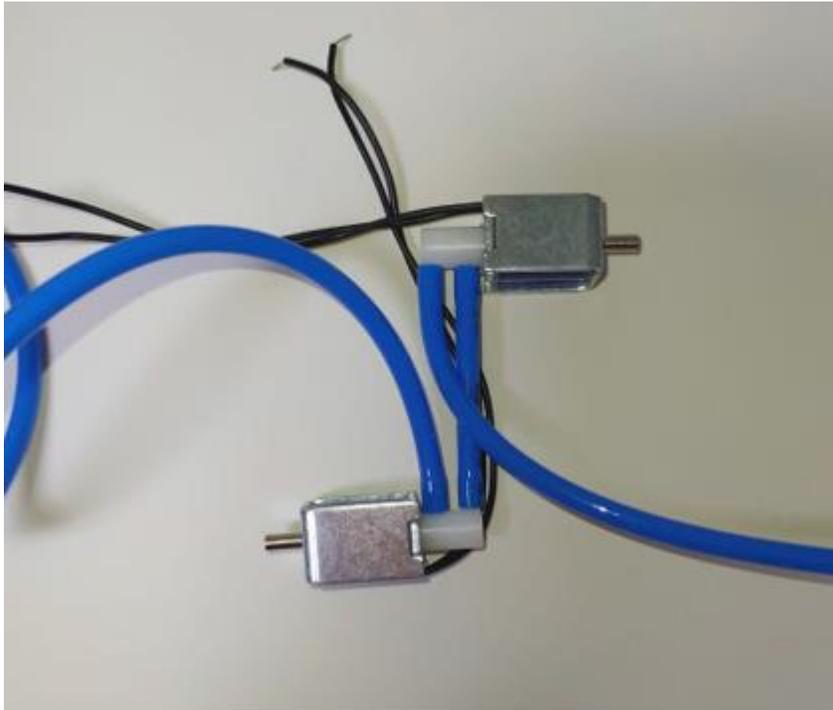


Ilustración 47: electroválvulas conectadas por tubos neumáticos.

4.3.1.5 Fuente de alimentación

Las válvulas funcionan a 12V y el Arduino UNO es capaz de trabajar con una entrada de 12 V, por lo que este será el voltaje de la fuente de alimentación.

El consumo en mA del Arduino uno junto con la pantalla es inferior a 100 mA (aproximadamente 50/50) y las electroválvulas al activarse consumen entorno a 150mA. Por lo que con una fuente de alimentación de 12V y 15W es más que suficiente. (RCScomponents, 1998)

4.3.1.6 Sensores de estado

Los sensores adecuados para este trabajo pueden ser sensores de flexión, o sensores de presión:

- Los de flexión, consistentes en una resistencia variable, permiten determinar de forma aproximada el grado en que está doblado. Es exactamente la función que se necesita. (Bricogreek, s.f.)
- Los de fuerza, también consistentes en una resistencia variable, permiten determinar la fuerza que se ejerce sobre ellos, aunque no miden la flexión como tal, al ser doblados también varían su valor por la fuerza necesaria para doblarlos. También permitirían saber si la garra tiene un objeto. Su precio es considerablemente menor que el de flexión y existe una mayor cantidad de formas y tamaños, de modo que es una buena opción.

Tras la adquisición de los sensores (ilustración 48) y la realización de varios ensayos, se llega a la conclusión de que el sensor de flexión representa mucho mejor el grado de flexión de la garra de forma unívoca. El sensor de fuerza bien es cierto que podría utilizarse para detectar esfuerzos excesivos o junto con el de flexión para detectar el tipo de objeto que se está sujetando un objeto en base a la configuración de los dedos y la presión aplicada sobre el objeto.

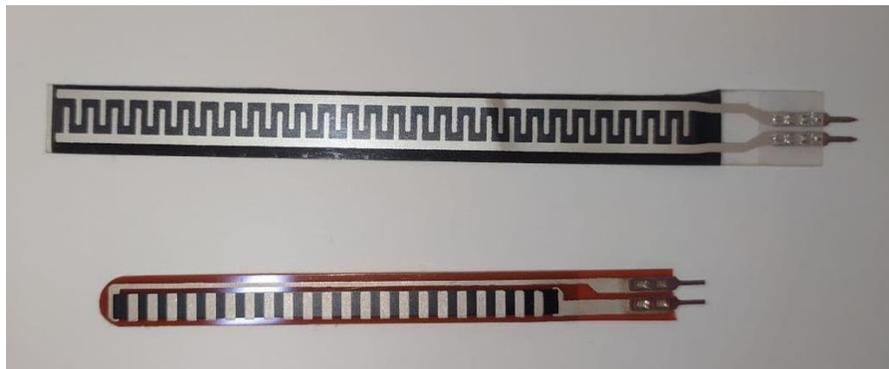


Ilustración 48: sensor de fuerza (superior) y sensor de flexión (inferior).

4.3.2 Diseño controlador para electroválvulas

Puesto que las electroválvulas trabajan a 12V y el Arduino trabaja a 5V es necesario un mecanismo intermediario. Para esta tarea las opciones son:

- Relé: Son los más lentos en conmutar, están destinados a controlar altos voltajes y dependen de piezas mecánicas. No es una buena solución para este problema.
- Mosfet: Controlados por voltaje, la resistencia que utilizan entre “Drenaje” y “Fuente” es mayor que en los BJT y esto deriva en mayores pérdidas de potencia cuando trabaja en conmutación. Son adecuados para este caso.
- BJT: Controlados por corriente, es necesario utilizar una resistencia en la “Base”. No son adecuados para altos voltajes ya que tienden a calentarse en exceso. No obstante, en este caso sí que se podría utilizar.

En este caso se opta con un BJT, ya que presentará pérdidas de potencia menores y al estar trabajando con bajos voltajes no corremos el riesgo de que se sobrecaliente; en concreto el 2N2222 (SGS-Thomson, 1989).

Para la entrada de la Base la cual controlará el Arduino es necesaria una resistencia de aproximadamente 1K. El emisor conectado a GND y entre el colector y 12V irá la electroválvula.

Para proteger el transistor frente a la descarga de energía almacenada en la bobina de la electroválvula es aconsejable el uso de un diodo flyback en paralelo. También se incluirá un diodo LED de 3mm junto con una resistencia para facilitar la visualización del estado de la electroválvula.

Para calcular la resistencia que protegerá el diodo led lo primero que se debe tener en cuenta será que color de diodo y que corriente queremos que lo atraviese. Se va a utilizar un único led de color verde con una intensidad de

10mA que permitirá extender la vida útil del diodo. Con estos datos y sabiendo que el fabricante recomienda que el LED trabaje a 2V se puede calcular la resistencia necesaria.

$$R = \frac{V}{I} = \frac{12 - 2}{0.01} = 1000\Omega$$

$$P = R * I^2 = 1000 * 0.01^2 = 0.1W \quad (1)$$

La potencia disipada por la resistencia no es elevada por lo que se debe continuar con el diseño.

Este cálculo es muy sencillo, también existen calculadoras online específicas para esta tarea (inventable, s.f.) que nos permiten corroborar los cálculos (ilustración 49).

Datos para el cálculo

Tensión (voltage supply): 12V

Color de los leds (leds color): verde / green (2.1V)

Cantidad de leds (number of leds): 1

Corriente (current): 10 mA

Valores calculados

V.led: 2.1 V

V.Resist.: 9.9 V

Corriente (current): 10 mA

Resist.calc.: 990 ohms

Resist.standard: 1000 ohms

Pot.resist.: 0.1 W

Circuito



The circuit diagram shows a vertical connection starting from a +12V DC source (represented by a red circle with a plus sign). This source is connected to a resistor labeled '1K ohms' (represented by a resistor symbol with a '1K' label). The other end of the resistor is connected to the anode of a green LED (represented by a green diode symbol). The cathode of the LED is connected to a ground symbol (represented by a black circle with a plus sign).

Ilustración 49: corroboración de valores calculados mediante una calculadora online.

Conocidos ya todos los componentes necesarios, se procede a realizar el esquema en el programa Kicad (ilustración 50).

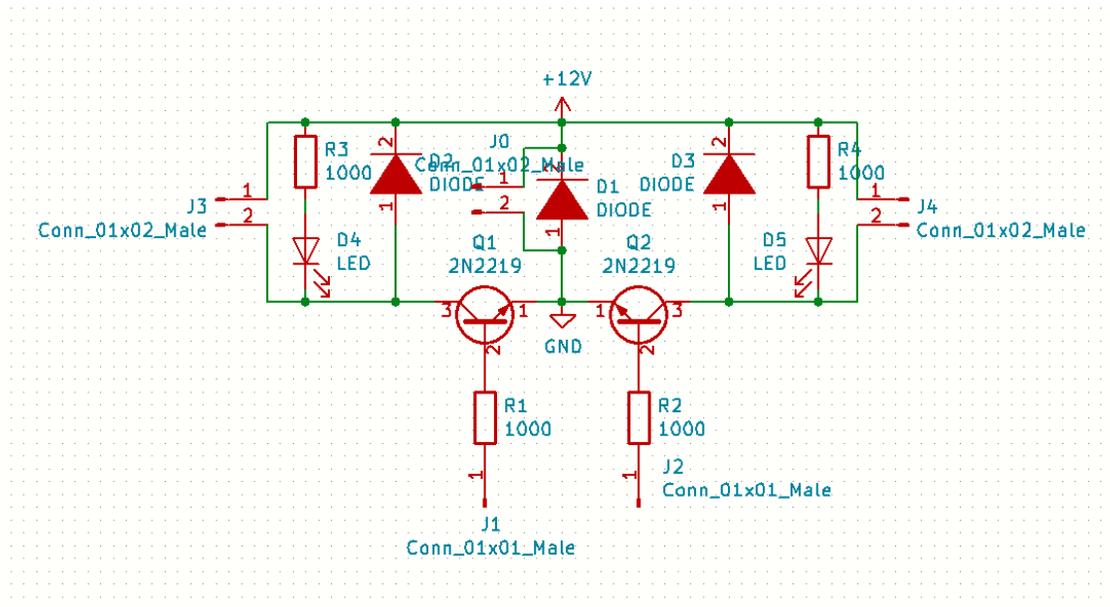


Ilustración 50: esquema realizado en Kicad.

Antes de realizar el diseño de la PCB se comprueba el correcto funcionamiento del diseño sobre una placa de prototipado (ilustración 51).

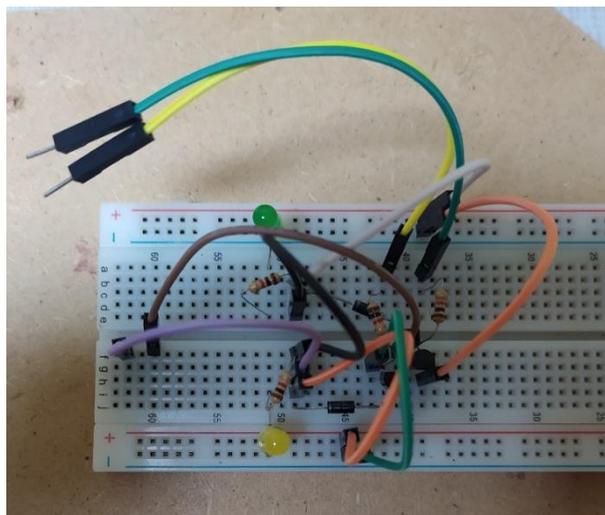


Ilustración 51: montaje en placa de prototipado.

Ya comprobado el correcto funcionamiento se procede a diseñar la PCB (ilustración 52).

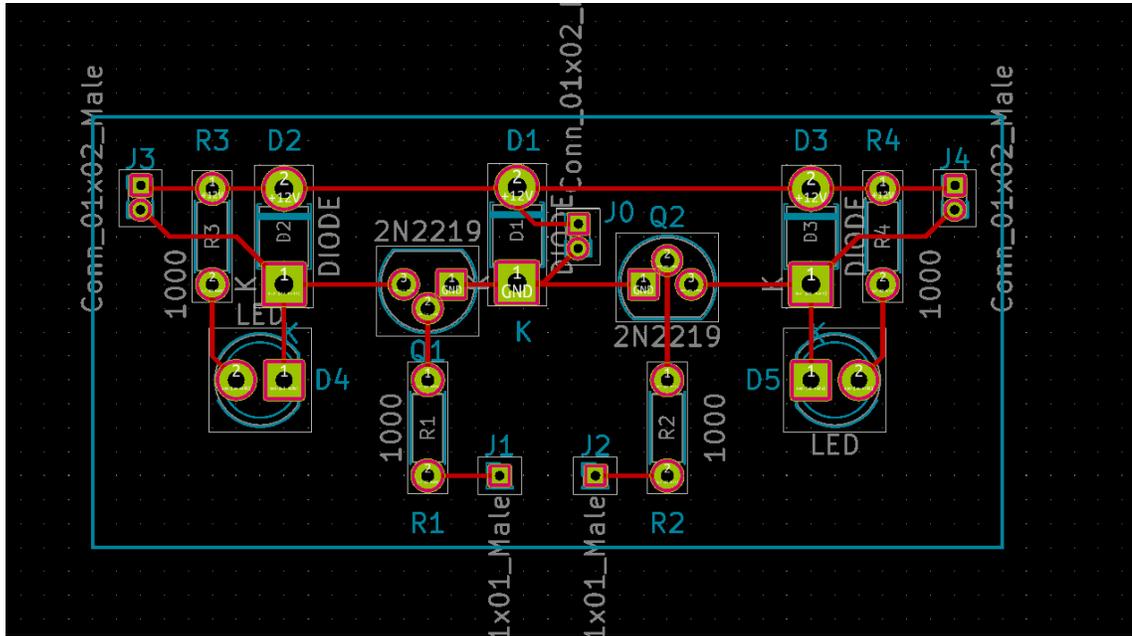


Ilustración 52: diseño de la PCB en Kicad.

Con la PCB ya diseñada es posible realizar un renderizado para visualizar como quedaría el producto final, el cual quedaría como en la ilustración 53.

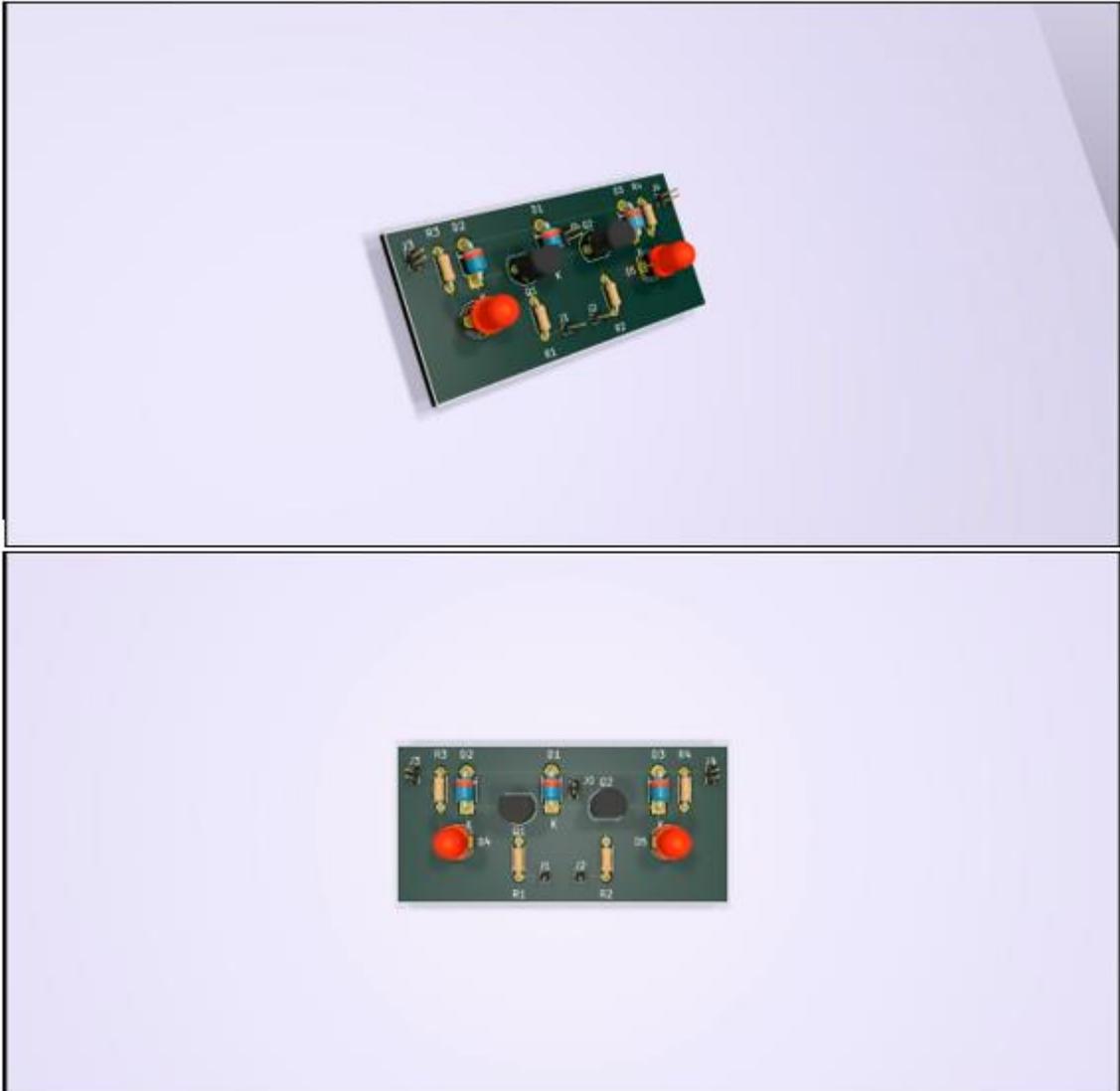


Ilustración 53: visualización 3D del modelo final.

Con esto se obtiene el diseño final de la placa la cual mediante los pines de J0 se conecta a 12V y GND, J1 y J2 son los pines que se conectan al Arduino y J3 y J4 van a las electroválvulas. Este modelo se puede enviar a fabricar, pero se ha decidido montar los componentes sobre una PCB (placa de pruebas), lo que ahorra tiempo de fabricación y transporte, el acabado es bastante peor (ilustraciones 54 y 55), pero funciona igual de bien.

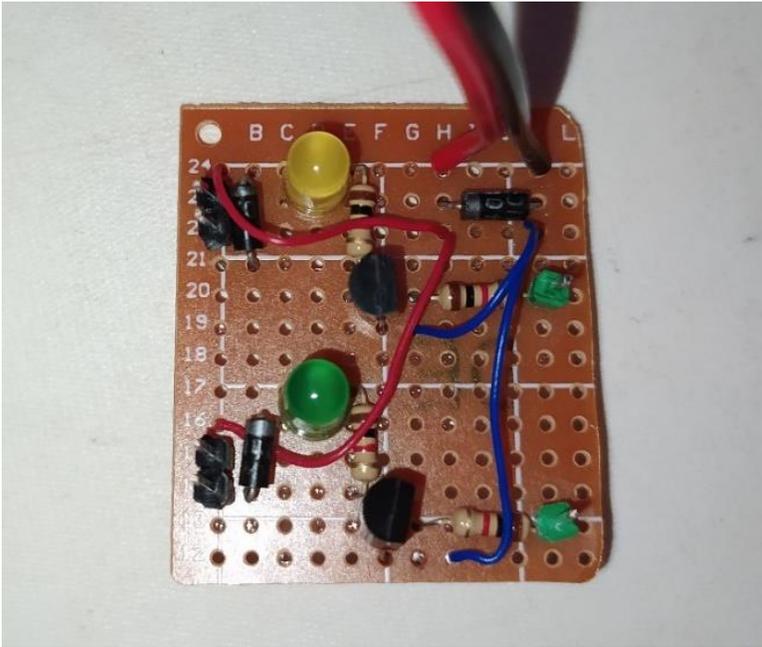


Ilustración 54: modelo final ensamblado y soldado. Cara superior.

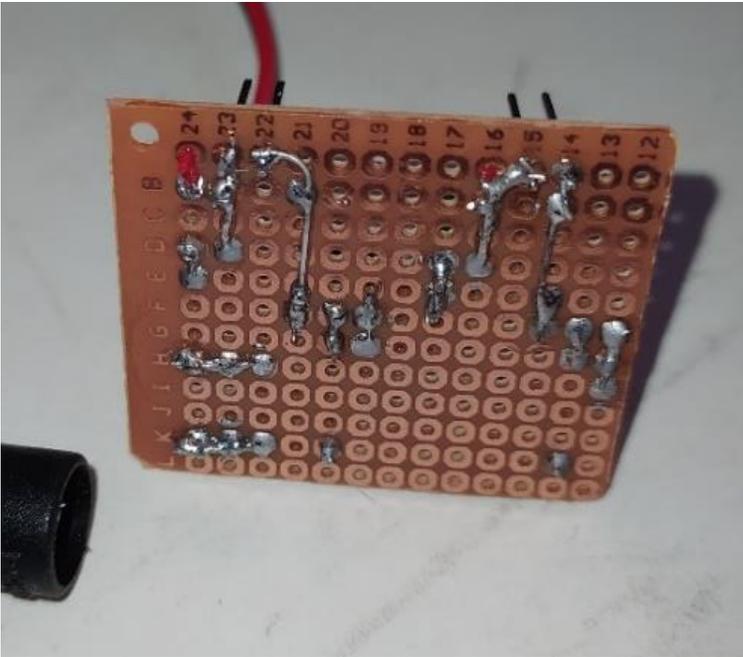


Ilustración 55: modelo final ensamblado y soldado. Cara inferior

Esquema de conexiones:

El esquema de conexiones se ha realizado en la aplicación Fritzing con todas las anotaciones necesarias sobre el conexionado, como podemos ver en la ilustración 56 y 57.

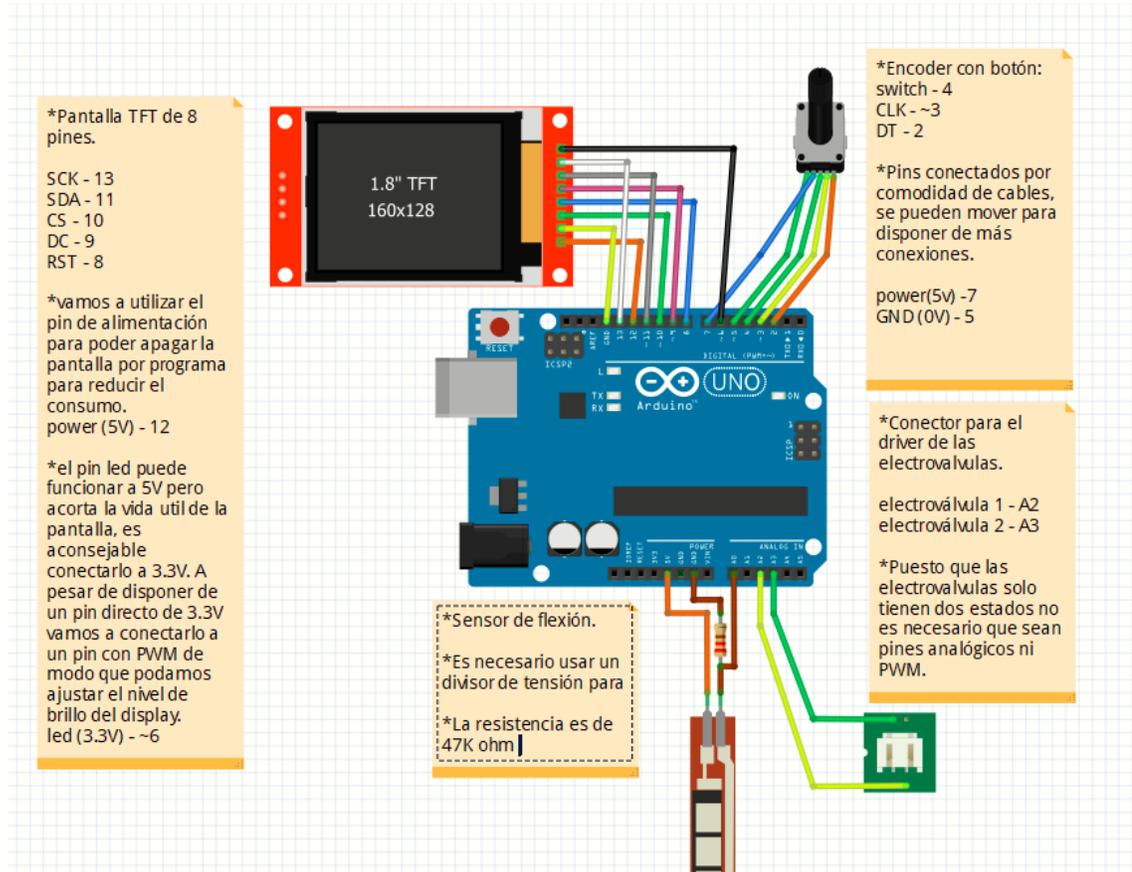


Ilustración 56: esquema de componentes.

Se ha cableado el circuito sin usar una protoboard de modo que para facilitar las conexiones algunos pines se han usado para alimentar otros componentes.

El pin LED de la pantalla funciona con una alimentación de 3,3V. Con una tensión superior, como por ejemplo 5V, seguirá funcionando, pero esto acorta la vida útil de la pantalla. El Arduino UNO que se utiliza tiene una salida de 3,3V, pero si no dispusiésemos de una, también se puede conseguir en una salida PWM, como se ha hecho en este caso para poder bajar el brillo de la pantalla.

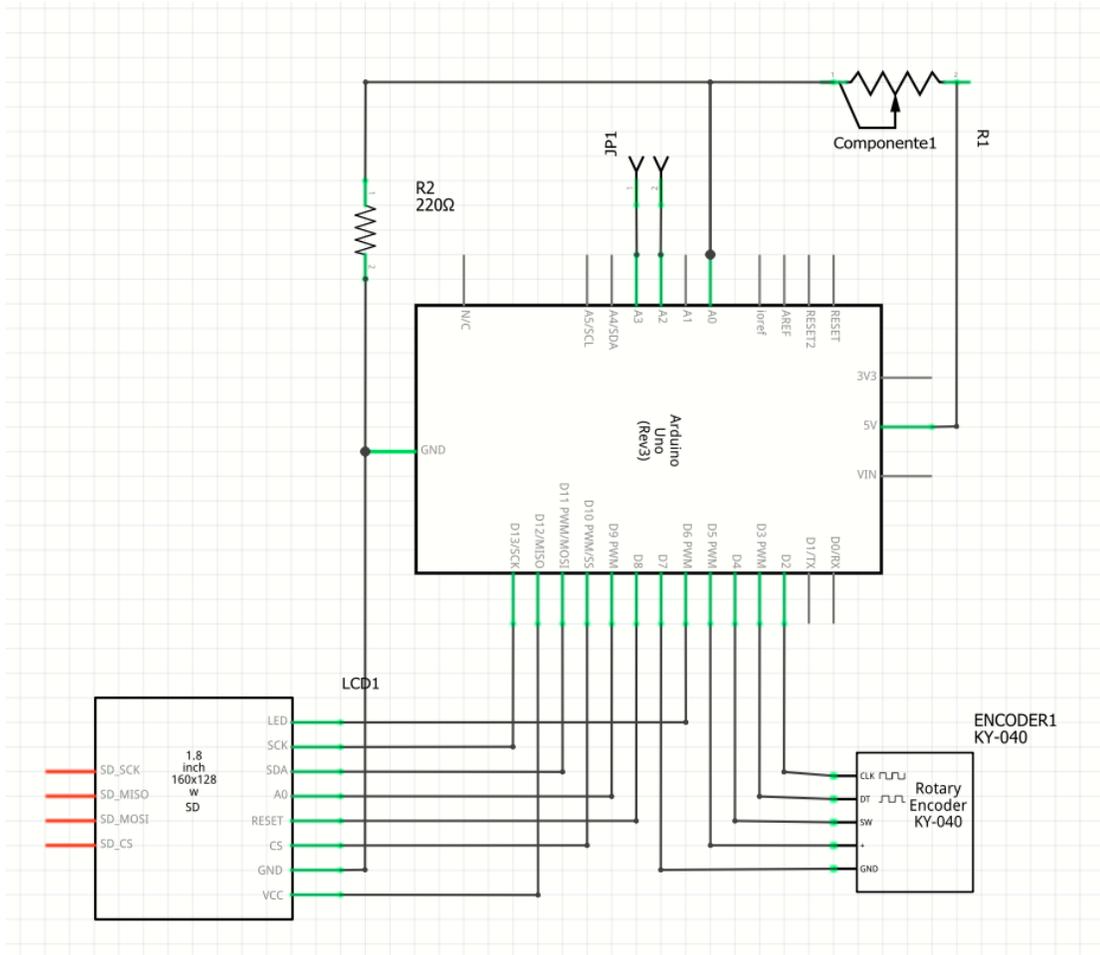


Ilustración 57: esquema de conexiones a la placa de arduino

4.4 Línea de presión

Es necesario tener una línea capaz de suministrar una presión constante; por lo que se va a trabajar con una presión muy baja de entre 1 y 2 bares (presión manométrica).

4.4.1 Depósito versión 1

Para asegurarse de que puede suministrar presión durante periodos de tiempo prolongados sin sobrecargar al compresor, se necesitará un depósito.

Con un depósito solo es necesario que el compresor funcione cuando el nivel de presión caiga bajo cierto límite en lugar de estar funcionando todo el rato permitiéndonos extender la vida útil del compresor, tener un consumo eléctrico muy inferior y también generar menos ruido.

4.4.1.1 Etapa de estudio y diseño:

Se va a utilizar a botella de 2 litros como depósito y se diseñará en 3D un tapón que permita el acople de un manómetro, una válvula unidireccional y un racor.

Para la válvula unidireccional se va a utilizar un racor normal, el cual con un rodamiento de 6mm y un muelle se puede convertir en una válvula unidireccional de embolo (ilustración 58).

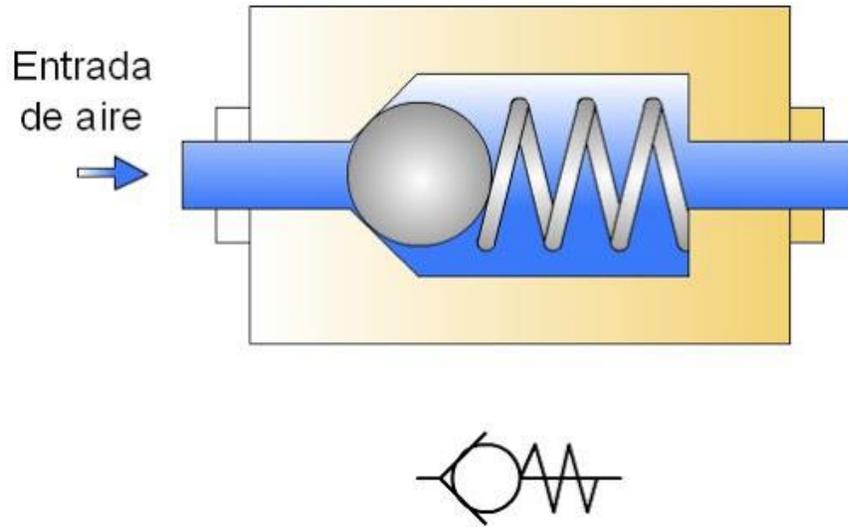


Ilustración 58: corte transversal de una válvula de émbolo

El diseño queda como se puede ver en la ilustración 59.

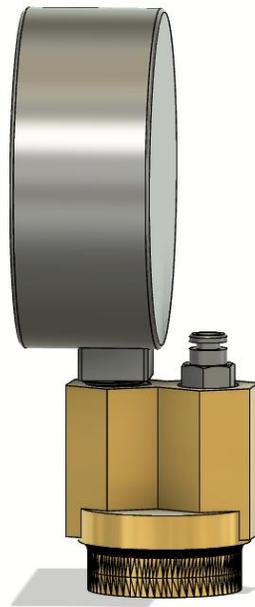


Ilustración 59: modelo 3D salida de depósito.

4.4.1.2 Etapa de experimentación:

Se ha montado el dispositivo en una botella y utilizando cinta de teflón en las roscas para evitar fugas (ilustración 60).



Ilustración 60: prototipo salida de depósito.

Se ha podido comprobar que se pierde aire por el racor, por lo que sería necesario añadir una junta tórica para disminuir las fugas, pero seguramente no las eliminaría por completo.

4.4.1.3 Conclusiones:

Este diseño, aunque funcional, no ajustaba a la perfección y perdía presión, por lo que se buscó otra solución.

El acople al manómetro no presenta fugas y parece funcionar a la perfección; el de la botella sin embargo ajusta algo peor, pero con el teflón queda solucionado el problema.

4.4.2 Depósito versión 2

4.4.2.1 Etapa de estudio y diseño:

La alternativa a la válvula unidireccional diseñada se encuentra en las válvulas de bicicletas, las cuales son baratas ni fáciles de encontrar. Lamentablemente las adquiridas no tenían una buena documentación y fueron necesario varios ensayos para determinar qué tipo de rosca se utilizarían, para ello imprimí varias roscas como se ve en la ilustración 61.



Ilustración 61: válvula de bicicleta y modelos de ensayo.

Una vez determinada la rosca se diseñó una segunda versión que utilizase estas válvulas. Se ha impreso en ABS para que luego usando este mismo material y acetona crear un líquido viscoso que se aplicará en las roscas (previamente envueltas en teflón para puedan ser recuperadas con facilidad y no se adhiera el

ABS al metal) con el fin de corregir posibles imperfecciones en la impresión y que ajusten lo mejor posible.

También se ha dado a la base una forma hexagonal que ayuda a que sea apretada con una llave fija. Y se han marcado los tipos de rosca que utiliza para que sea más fácil su sustitución durante el mantenimiento.



Ilustración 62: modelo 3D de la segunda versión.

Este modelo (ilustración 62) funcionaba perfectamente, pero debido al gran tamaño del manómetro, era difícil acoplar una bomba manual a la válvula. Para solucionar este inconveniente se cambia el ángulo de la válvula, lo cual deja un mayor espacio de maniobra (ilustración 63).

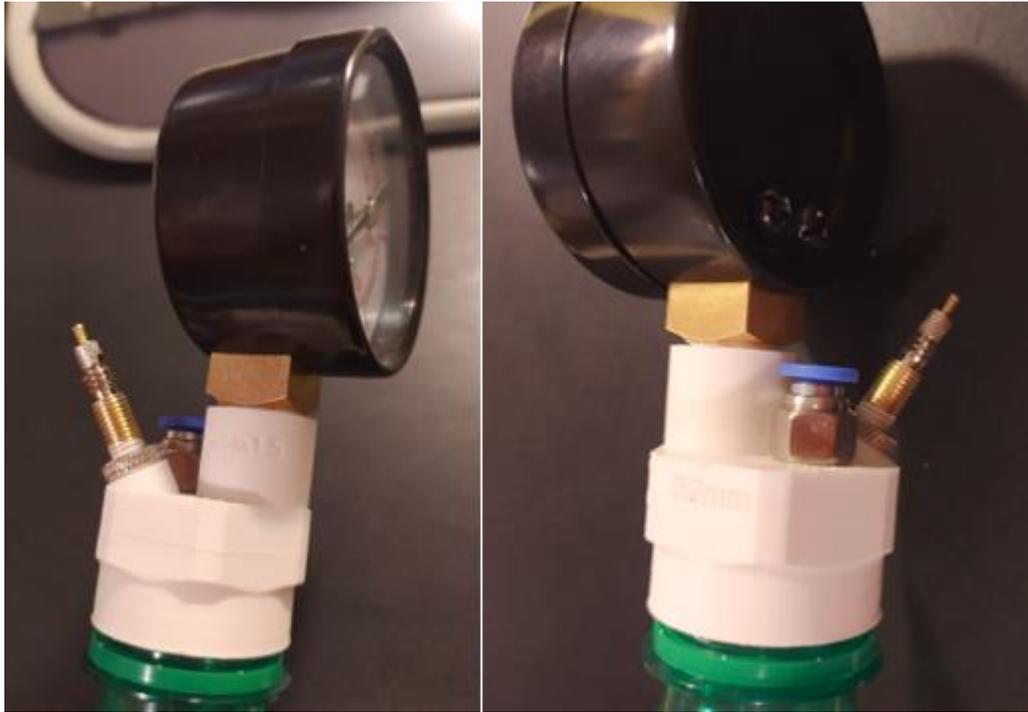


Ilustración 63: modelo 3D de la segunda versión modificada.

4.4.2.2 Etapa de experimentación:

Se comprobado experimentalmente que esta configuración puede superar los 3 bar de presión manométrica sin fugas de aire. Las electroválvulas que regulan la salida de aire también operan perfectamente a esta presión, muy superior a la cual se va a trabajar.

Para terminar, se realiza un experimento para comprobar realmente su estanqueidad y cuánto tiempo tarda en alcanzar la presión ambiente partiendo desde 2bares (≈ 30 PSI), el resultado se puede ver en la gráfica de la ilustración 64.

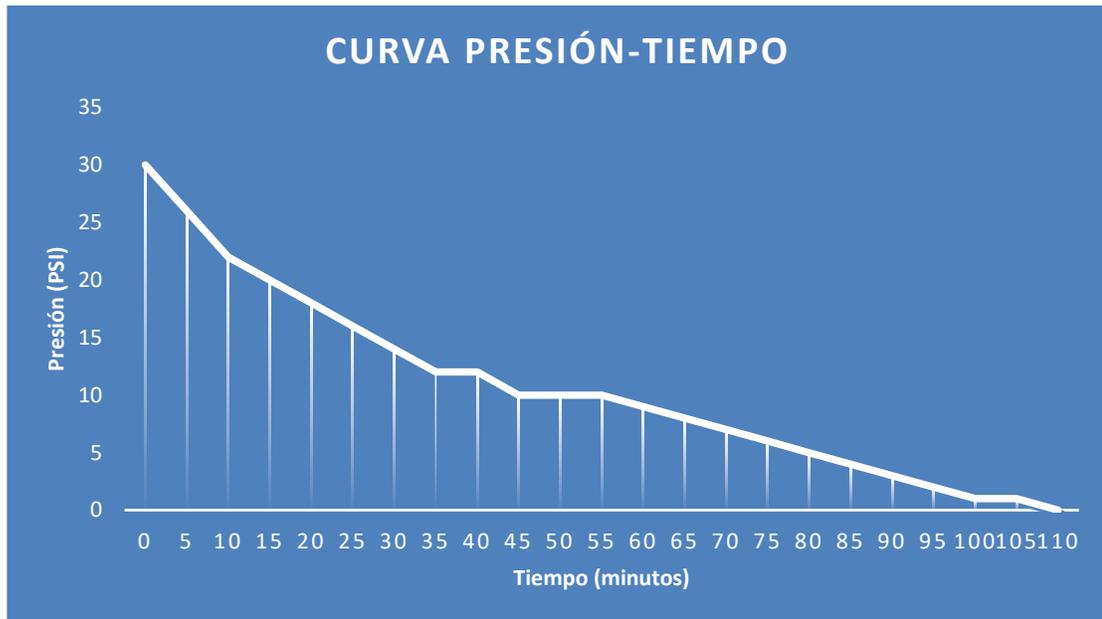


Ilustración 64: gráfica presión-tiempo del depósito de aire.

4.4.2.3 Conclusiones:

El resultado es el esperado, no es un depósito completamente estanco y la pérdida de presión es más rápida cuanto mayor sea esta. Sin embargo, cumple con las características necesarias para mi propósito.

Sería interesante estudiar la posibilidad de sustituir el método de llenado del depósito con la bomba manual, por uno automático.

4.4.3 Compresor

Uno de los objetivos es que este proyecto pueda ser fácilmente replicable fuera de un entorno industrial o un laboratorio especializado.

Para ello se va a diseñar un compresor que permita llenar el depósito antes visto, y de este modo pueda disponer de un funcionamiento autónomo fuera del laboratorio.

4.4.3.1 Etapa de estudio y diseño:

Debido a que se pretende imprimir en 3D las piezas, se van a evitar los diseños que tienen mucho rozamiento, como puede ser el compresor de pistón o el compresor de tornillo; en su lugar se usarán compresores axiales de paletas.

Para agilizar el proceso he buscado un modelo 3D de compresor de turbina de aire en la página de Thingiverse, una famosa web donde los usuarios comparten sus diseños optimizados para la impresión 3D o corte laser.

El modelo que probar es el siguiente: (Laundru, 2011)

4.4.3.2 Etapa de experimentación:

Primero se imprime y se montan las paletas sobre la dremel (ilustración 65). Se procede a continuación a probar a hacerlas girar incrementando la velocidad hasta la máxima que permite la herramienta (30.000 rpm) para comprobar que resisten y no se rompen por la fuerza centrífuga.

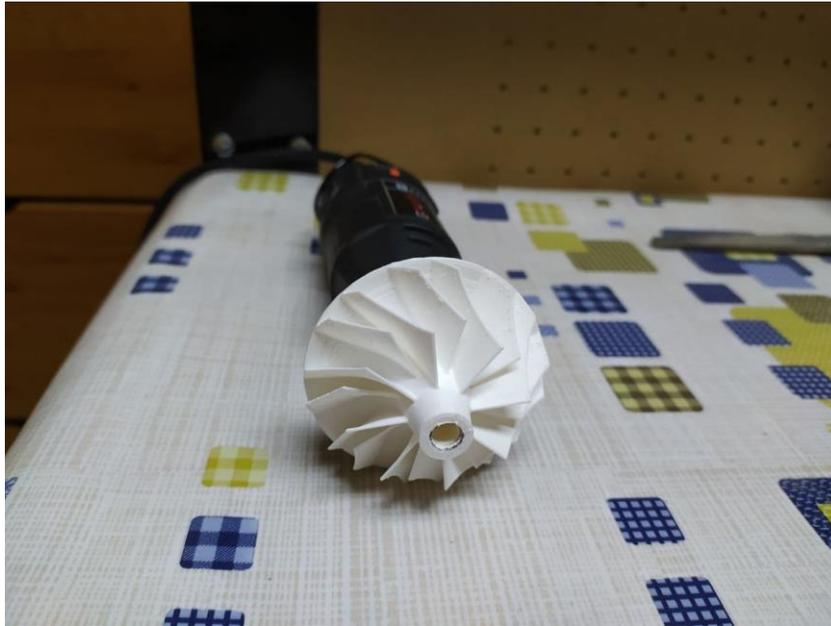


Ilustración 65: paletas montadas sobre la dremel.

Tras realizar las pruebas pertinentes y comprobar que las paletas no estaban dañadas ni se habían aflojado del eje se procede a montar todas las piezas (ilustraciones 66 y 67).



Ilustración 66: vista frontal de la turbina montada.



Ilustración 67: vista lateral de la turbina montada.

La cantidad de aire desplazada por la turbina es elevada y también la velocidad con la que sale. Sin embargo, no es capaz de crear la diferencia de presión necesaria para hinchar un globo (ilustración 68) y al reducir el diámetro de salida los resultados empeoran drásticamente, lo que nos complica la tarea de acoplarlo al depósito de aire.



Ilustración 68: demostración de la turbina.

4.4.3.3 Conclusiones:

Se puede concluir que este modelo no es adecuado para alimentar el depósito, por lo que por ahora mientras no estemos en el laboratorio se seguirá usando la bomba de aire manual a falta de un compresor.

4.5 Software del controlador

4.5.1 Estructura:

Primero se va a abordar el modo de funcionamiento desde el punto de vista del usuario. En la ilustración 69 podemos ver el diagrama UML de casos de uso que recoge las acciones que puede llevar a cabo el sistema.

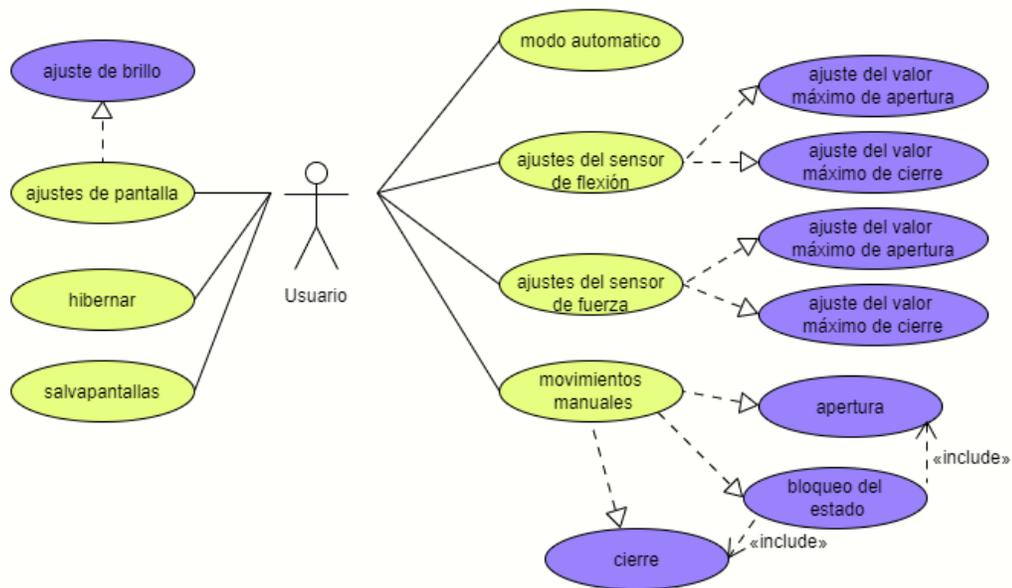


Ilustración 69: Diagrama UML de casos de uso.

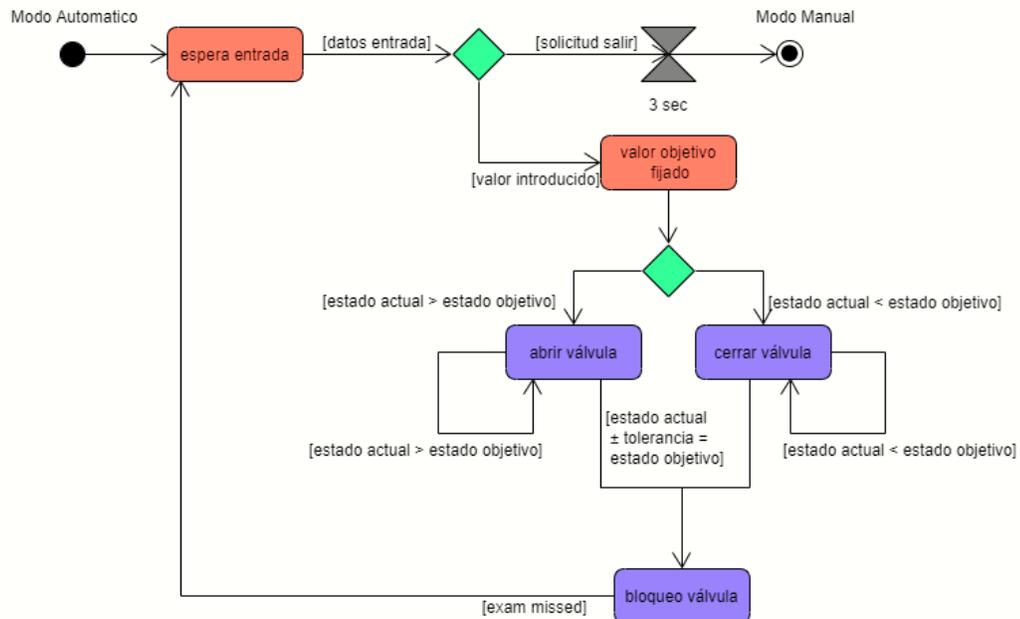


Ilustración 70: Diagrama UML de actividad para el modo automático.

El programa va a estructurarse en diversos bloques los cuales son:

- SorfRB_controler: El programa principal. Aquí se encuentra el bucle Loop y el Setup, así como las declaraciones de todas las variables globales, librerías y la distribución de pines.

Para simplificar este bloque de programa y que contenga el menor código posible dentro del bucle setup se llaman a diversas funciones que se encargan de inicializar los pines y que están declaradas en sus bloques correspondientes.

- TFT_screen_menu: contiene la función que inicializa la pantalla, *setup_tft()*, y otra función, *tft_menu()*, que es la pantalla principal y la que gestiona los diferentes menús.

- Encoder: contiene una función para inicializar el encoder, *setup_encoder()*, otra función que detecta un flanco positivo en el botón, *btn_fl()*, y la última función la cual
- Menu_options: aquí se encuentran las diferentes funciones que gestionan las opciones del menú. Están: *mode_auto()* que gestiona el valor deseado para un movimiento automático de la garra, *sensor_force()* y *sensor_flex()* que permiten visualizar los valores de los sensores de fuerza o de flexión y ajustar sus límites superiores e inferiores y por último *manual_mov()* que muestra los movimientos manuales de la garra.
- Miscelanea: son funciones las cuales no aportan ninguna característica fundamental para el funcionamiento y son meramente visuales. Dentro de estas funciones se encuentra *settings()* la cual tiene algunos ajustes básicos de la pantalla como puede ser el brillo, *scrsaver()* la cual activa un salvapantallas y *scrsleep()* que apaga la pantalla para disminuir el consumo de energía.
- Movements: todas las funciones que controlan las electroválvulas se encuentran en este bloque. Aparte de la función que inicializa los pines que controlan las electroválvulas, *setup_evalve()* , también hay una función que gestiona de forma automática el movimiento de la garra en base a el porcentaje de cierre deseado y el retorno de los sensores, *auto_close(int sens,int percent)*. Tres funciones más: *man_open()*, *man_close()* y *man_lock()* se encargan de abrir cerrar y de bloquear el estado de la garra mediante movimientos manuales.
- Sensores: también formado por dos funciones. La primera para inicializar los sensores, *setup_sensores()*, y la segunda para leer los valores de estos, *read_sens()*.

4.5.2 Pantallas:

Al encender la pantalla lo primero que se ve es el menú principal con las diferentes opciones (ilustración 69). Se usa el codificador incremental para

desplazarse por las opciones. Si se sobrepasa el límite de opciones por debajo se vuelve a la primera, y si se hace por arriba va directamente a la última.

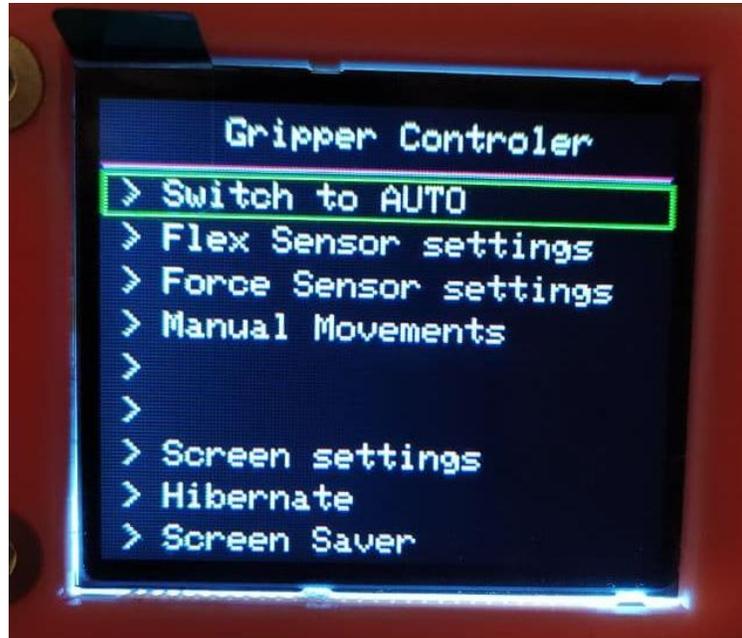


Ilustración 71: pantalla menú principal.

Al elegir la primera opción se entrará en el modo automático (ilustración 70), desde ahí se elige el porcentaje deseado de cierre de la garra y ésta ejecutará la acción al pulsar el boton. También permitirá visualizar en que estado está y los mensajes de diagnostico en caso de error. Para salir de este modo se debe mantener el boton presionado 3 segundos.

También aparecerá el estado actual del manipulador, con lo que sabrá si está realizando alguna acción o si está en espera.

El cuadro de diagnostico indicará si la última acción se ha realizado correctamente o si ha sucedido un error durante la ejecución, como por ejemplo que algún límite se ha sobrepasado o que el tiempo del watch dog ha sido excedido.

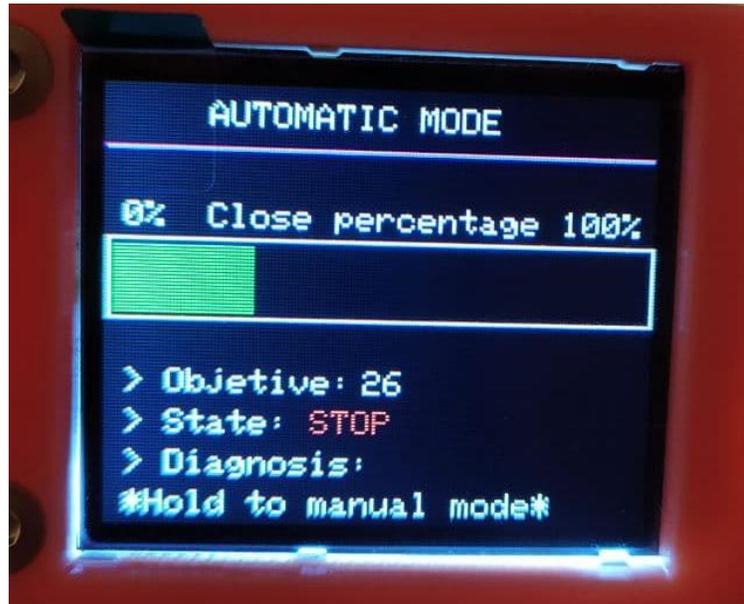


Ilustración 72: pantalla modo automático.

Las pantallas de ajuste de sensores (ilustración 71). son iguales tanto para el sensor de flexión como el sensor de fuerza. Actualmente, el control mediante el sensor de fuerza no está activo por lo que solo funciona el sensor de flexión. Se mantiene la opción de ajuste del sensor de fuerza porque es posible cambiar el sensor predefinido de flexión por uno de fuerza, pero para esto hay que hacerlo desde el código y no desde los menús en pantalla.

Para ajustar los límites del sensor, y por tanto la apertura y cierre máximos de la garra, hay que llevarla hasta la posición deseada y a continuación pulsar el botón de la opción deseada.



Ilustración 73: pantalla ajuste sensores.

En los movimientos manuales (ilustración 72) aparecerá un indicador si el movimiento está activo; al desactivar un movimiento de apertura o cierre automáticamente se bloqueará el estado.

Estos movimientos no están restringidos por software de modo que es posible dañar los apéndices si no se realiza correctamente.

Para evitar hacer un mal uso de los movimientos manuales, una vez activado alguno de ellos el cursor quedará bloqueado en esa posición hasta que desactive ese movimiento, no dejando realizar más acciones.

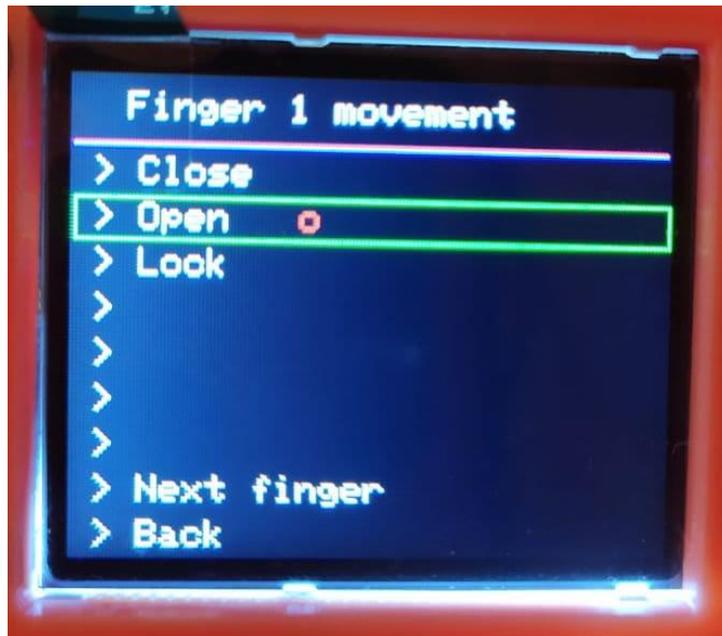


Ilustración 74: pantalla movimientos manuales.

Actualmente en la pantalla de ajustes (ilustración 73) solo se encuentra el control de brillo de la pantalla.



Ilustración 75: pantalla ajustes.

5 RESULTADOS Y VALORACIÓN

5.1 Valoración general.

Se ha conseguido operar los dedos de forma individual de forma satisfactoria, sin embargo, ha resultado imposible conseguir que los tres dedos se moviesen al unísono de forma consistente.

Esto se debe principalmente a que no se ha conseguido que todos los dedos flexen con la misma presión. Ya había previsto este caso, y debido a eso, añadí unos tornillos para estrangular el paso de aire y poder jugar con el tiempo que tardaba cada dedo en doblarse; pero la diferencia es tan grande que no se puede absorber con ese diseño de tornillo de estrangulación, que además se ha visto que no ajustaba de forma adecuada.

También se han sufrido varias veces pinchazos en la silicona debido a presiones inadecuadas. Al contrario de lo que creía, las roturas no se han producido en puntos donde había una mayor concentración de burbujas ni donde estas eran de mayor tamaño, si no en la unión de las dos piezas de silicona. Esto puede deberse a que cuando se realizó la unión esta no estaba libre de impurezas, o a la dificultad de distribuir uniformemente la silicona por la delgada línea de unión. Ambos problemas pueden ser solucionados fácilmente ayudándose de unas guías impresas en 3D para verter la silicona y dejar las dos piezas alineadas y limpiándola adecuadamente, así como realizando todo el proceso en un ambiente libre de partículas de suciedad en suspensión.

Se ha podido coger piezas utilizando dos dedos, sin embargo el espacio que queda entre ellos cuando la garra está completamente cerrada es bastante grande, si la intención es que pueda coger piezas más pequeñas sería necesario o bien dar un ángulo interno a los dedos, de modo que ese espacio quedaría reducido, pero se sacrificaría el poder coger piezas más grandes, o hacer más

largos los dedos e introducir más cámaras de aire, lo cual permitiría que se doblasen más, pero por el contra aumentaría el tamaño de la garra y también su coste.

He contactado con una empresa de ingeniería que se dedica a la integración de robótica y automatización en instalaciones, lo que me ha permitido saber cuáles son las garras blandas que utilizan en los proyectos de alimentación (ilustración 74).

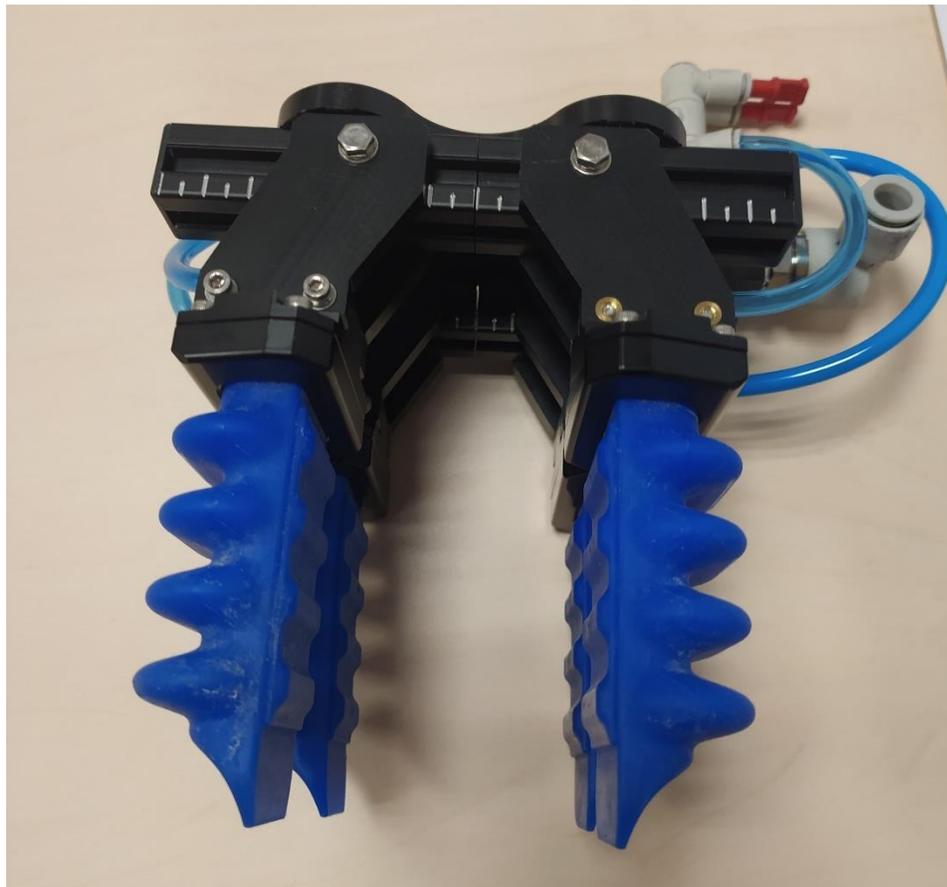


Ilustración 76: manipulador industrial.

Ésta consiste, al igual que la mía, en módulos individuales que se montan sobre una base para formar la garra. Para poder ajustar el espacio entre los dedos cuando la garra está completamente cerrada, se montan los dedos sobre un perfil de aluminio que les permite ajustar el ángulo. Esta idea podría ser implementada en mi diseño para solucionar el mismo problema.

Los dedos desmontados los podemos ver en la imagen 75.

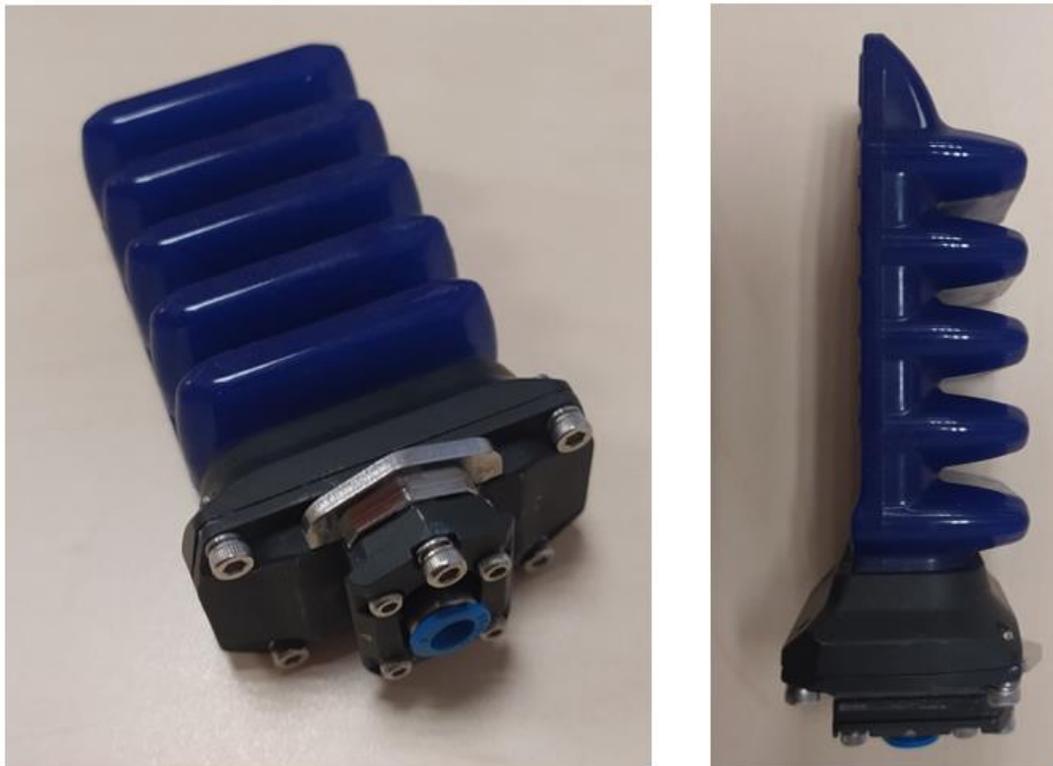


Ilustración 77: vista trasera y lateral del apéndice.

Los módulos de los apéndices no tienen ningún tipo de retorno de información para saber el estado, de modo que solo pueden estar completamente abierta o cerrada. La forma y diseño es bastante parecido al mío, sin embargo, el material de estos dedos industriales es mucho más rígido y las paredes también más

gruesas. Esto hace que recuperen su forma mucho más rápido, pero sobre todo que aguanten presiones mayores y resistan mejor golpes u objetos afilados.

5.2 Materiales elegidos

Como se ha visto en la comparativa con un modelo industrial, sería recomendable usar una silicona menos flexible, de este modo aguantará más y no se deformará tanto al hincharse.

La silicona elegida es muy fácil de usar y los resultados son buenos incluso si las proporciones no son exactas, además tiene un tiempo de curación muy bajo lo cual es bueno para crear varios prototipos rápidamente o añadir retoques. Sin embargo, esta curación tan rápida complica el proceso de eliminación de burbujas atrapadas dentro de la silicona. Estas burbujas no solo son un problema estético si no que son puntos más proclives a roturas, sobre todo cuanto mayor es su tamaño.

Por ello, a no ser que se disponga de cámaras de vacío que ayuden a expulsar las burbujas, esta elección de la silicona no sería la óptima para un producto final.

También se ha visto que las válvulas de estrangulación que se integraron en el cuerpo del manipulador no son capaces de compensar las diferencias de presión que necesita cada dedo; de modo que si se conectan todos a la misma línea neumática no flexionan todos los dedos el mismo ángulo; y si se conectan cada uno a una línea diferente con su propio controlador, no tardan lo mismo en cerrarse.

Es cierto que se podía reajustar el tiempo dando un retraso por software, pero no es la solución adecuada.

Además, si se aprietan demasiado los tornillos de estrangulación pueden dañar la base de la garra como podemos ver en la ilustración 76.

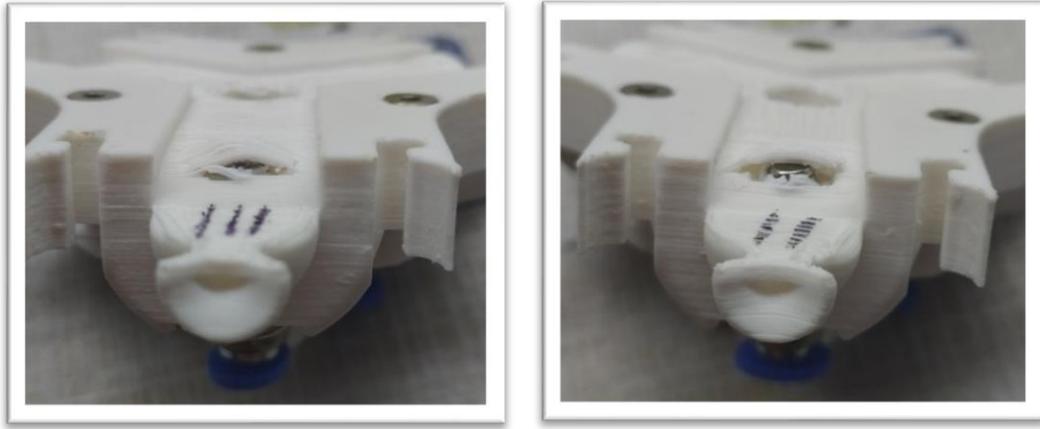


Ilustración 78 : daño producido por el tornillo de estrangulación en la garra.

Debido a que estos tornillos de estrangulación (ilustración 77) no consiguen el resultado esperado ya que no ajustan a la perfección, considero que la mejor opción es sustituir este mecanismo y utilizar un racor neumático industrial que ya incluya esta opción (ilustración 78).

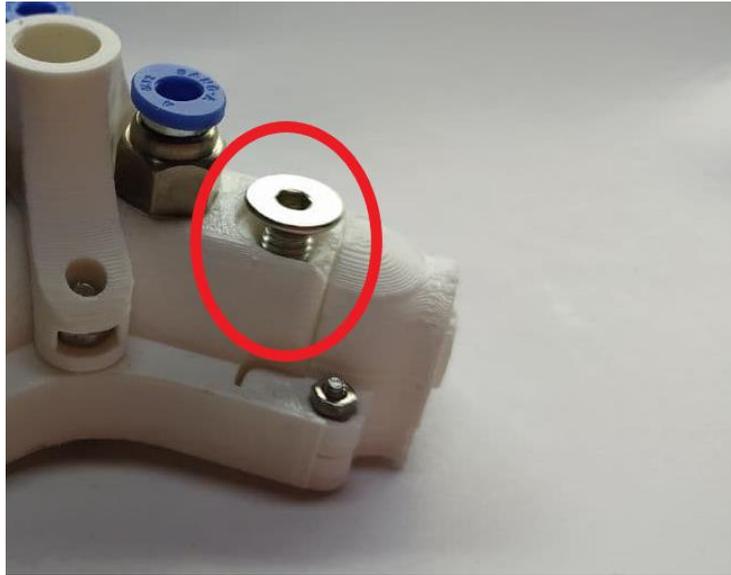


Ilustración 79: tornillo de estrangulación de nuestro diseño.



Ilustración 80: racor industrial con tornillo de estrangulación integrado.

Estos racores tienen un precio muy similar a los que utilizo actualmente y al eliminar el tornillo se reduce el tamaño de la garra.

En cuanto a los materiales usados para la impresión 3D parecen los correctos y los acabados son buenos. Salvo los daños producidos por el tornillo antes

mencionado no se ha partido ninguna otra pieza impresa, de modo que no sería necesario utilizar materiales más resistentes a esfuerzos mecánicos.

5.3 Componentes electrónicos

Los componentes elegidos para el controlador funcionan correctamente, aunque es cierto que para garras de mayor tamaño será necesario utilizar un controlador con más entradas y salidas, o usar módulos de expansión. La frecuencia de lectura de los sensores y el tiempo de reacción es bueno y la navegación por la pantalla mediante el codificador incremental es fluida.

El controlador de las electroválvulas no ha dado ningún problema, sin embargo, las electroválvulas en sí se calientan bastante mientras están en funcionamiento. Todas ellas se calientan cuando están en funcionamiento de modo que mientras esté en un rango adecuado no debería suponer ningún problema. Solo necesitan activarse para un estado, el otro estado lo consiguen con un muelle, de modo que sería interesante mirar cómo cambiar los canales neumáticos de modo que cuando ninguna electroválvula esté encendida la garra quede en el estado bloqueado manteniendo su posición. De este modo, aparte de reducir el consumo de energía necesario para operar, conseguiremos que las electroválvulas se activen durante menos tiempo y por lo tanto se calienten menos.

El detector de flexión funciona como se esperaba y no se desplaza durante los movimientos, que era algo que me preocupaba debido a que no está sujeto más que en la base. Los valores que devuelve el sensor de flexión no son lineales, esto no supone ningún problema, pero los movimientos automáticos de la garra se realizan en base a un porcentaje y actualmente no hay ninguna corrección entre el valor no lineal del sensor y el porcentaje, de modo que el grado de cierre de la garra tampoco es lineal.

5.4 Software del controlador

En la programación no se han encontrado fallos, aunque bien es cierto que todavía hay bastante margen de mejora. Algunas de estas mejoras son para comodidad del usuario, como podría ser el ajuste de los límites del sensor mediante un valor que cambiemos con el codificador incremental, en lugar de guardar el valor de la posición actual. Otras mejoras son del funcionamiento, como tener en cuenta el tiempo de histéresis de las electroválvulas, también pueden ser mejoras estéticas como permitir cambiar el fondo a blanco y letras en negro para entornos con mucha luz en los que sea difícil ver la pantalla.

5.5 Diseño

Los problemas que se han visto han sido que espesor de las paredes de silicona debería ser mayor, para darle más rigidez y consistencia, que habría que añadir la posibilidad de dar ángulo a los dedos para conseguir un mejor agarre, y que para inferior de la palma puede ser perforada con el tornillo de estrangulación si no se tiene cuidado. Aunque este último problema desaparece si se utiliza el racor con ajuste y se quita el tornillo.

Por lo general el diseño de la garra es bastante satisfactorio y no ha presentado más problemas.

5.6 Valoración económica.

Hasta este momento se ha estudiado la viabilidad de este proyecto desde un punto de vista técnico, pero teniendo en cuenta que el mantener unos costes

bajos ha sido uno de los objetivos principales vamos a abordar la viabilidad económica del proyecto.

5.6.1 Coste del Personal

Para poder asociar un coste de personal lo primero es poder calcular las horas que se han empleado en la realización del proyecto, este cálculo de horas también será necesario para el cálculo de la amortización de los recursos.

Distribución temporal del trabajo	
Formación y documentación	100 h
Estudio de implementación	100 h
Diseño	250 h
Experimentación	200 h
Documentación del proyecto	250 h
Tiempo total empleado:	1.100 h

Tabla 4: Distribución temporal del trabajo.

Tomando como referencia el convenio del metal de Valladolid de 2019, el salario anual de un ingeniero es de 28.885,92€.

Teniendo el contratado un título universitario si lo contratamos en prácticas el salario durante el primer año es del 64% lo cual quedaría en 18.486,98€, Y si el contrato es de formación corresponde un 80% quedando 23.108,74€ de salario anual durante el primer año.

Teniendo en cuenta que según ese mismo convenio el cómputo anual de horas de trabajo efectivo es de 1.744 horas y tomado como salario el de primer año de formación sale a un precio de 13,25€/h.

Siendo la duración del proyecto de 1.100 horas, a un precio de 13,25€ la hora sale un total de 14.575,47€ de coste de personal directo

Costes directos del personal	
Salario de 1 ingeniero en formación	14.575,47€
Coste Total:	14.575,47€

Tabla 5: Costes directos del personal.

5.6.2 Coste de recursos empleados.

En los recursos se va a englobar los costes de los equipos, del hardware y del software que se haya empleado.

5.6.2.1 Costes Hardware

El coste más alto es para el ordenador empleado, en este caso es un ThinkPad E590, con La memoria RAM DDR4 ampliada a 16Gb y con un segundo disco HDD de 500Gb de memoria cuyo precio ronda los 1.000€. Ya se disponía con anterioridad de este ordenador por lo que no ha sido necesario adquirirlo, y en caso de necesitar comprar el ordenador se puede realizar el proyecto con uno con un coste mucho inferior.

La impresora 3D empleada es la Prusa Mini, la cual cuesta unos 450€ (con el sensor de filamento incluido). Aunque es posible conseguir impresoras 3D de extrusión por 200€, lo cierto es que la calidad de impresión es muy inferior y se verá reflejado en los resultados.

Costes Hardware	
ThinkPad E590	1.000€
Prusa Mini	450€
Coste Total:	1.450€

Tabla 6: Costes del hardware.

La inversión inicial en Hardware es de 1.450€ pero para tener un precio más realista es necesario calcular la amortización de cada uno en función de su vida útil y el tiempo que se ha empleado.

La vida útil de un ordenador portátil es de 3 años de media (26.280 horas) y se ha empleado para la formación y documentación (100 h), el estudio de implementación (100 h), el diseño (250 h) y la documentación (250 h), que hace un total de 700 horas.

La vida útil de una impresora 3D es de 20.000 horas de trabajo. No se ha llevado la cuenta de las horas que ha estado imprimiendo por lo que se va a estimar que el tiempo de uso es igual al tiempo de experimentación (200 h).

Costes Hardware con amortización	
ThinkPad E590 (3 años vida útil)	$1000 * \frac{700}{26280} = 27\text{€}$
Prusa Mini (20mil horas útiles)	$450 * \frac{200}{20000} = 4,5\text{€}$
Coste Total amortización:	31,5€

Tabla 7: Costes hardware con amortización.

5.6.2.2 Costes software

Para el software se han buscado alternativas de programas que fueran gratuitos por lo que no han tenido coste alguno.

Los programas utilizados son:

- Arduino IDE: programa gratuito que se ha usado para programar el controlador Arduino.
- Ki CAD: programa gratuito que se ha usado para diseñar el prototipado de los circuitos

- Fritzing: programa gratuito que se ha usado para diseñar el esquema de conexiones.
- Prusa Slicer: Programa gratuito para crear el código necesario para la impresora 3D
- Paquete Microsoft 265 Personal: tiene un precio anual de 70€, sin embargo, con la matrícula de la universidad dispones de una cuenta de modo gratuito. Se ha utilizado este programa para realizar la documentación.
- Fusion 360: La versión que se ha empleado tiene un precio anual de 500€ al año, sin embargo, con la matrícula de la universidad puedes usarlo de modo gratuito. También existe una versión gratuita de prueba que está limitada en funcionalidad. Se ha usado para el diseño 3D de las piezas.

5.6.3 Costes derivados de los materiales.

En costes directos agruparemos los costes de todos los consumibles.

Coste de consumibles	
Filamento ABS 1,75mm	1,5kg x 24€/kg = 36€
Silicona dragonSkin	35€
Juego de tornillería cabeza allen	20€
Racores neumáticos	6Uds. x 1€/Uds. = 6€
Tubo neumático	1m x 9€/m = 9€
Arduino Uno	25€
Fuente de alimentación 12V 1A	5€
Sensor de flexión	9€
Sensor de fuerza	7€

Pantalla TFT 1,8" a color	5€
Encoder con botón	3€
Manómetro	5€
Válvulas para rueda tubeless de bicicleta	2Uds. x 4€/Uds. = 8€
Componentes electrónicos variados (resistencias, diodos, leds, transistores ...)	10€*
Bomba de mano para bicicleta	20€
Coste Total:	203€

Tabla 8: Costes de los consumibles.

* Los costes de cables y componentes electrónicos sueltos como resistencias, diodos o transistores es una estimación debido a que todos ellos eran componentes de los que se disponía de antemano y que se compran en grandes cantidades.

5.6.4 Costes indirectos

Los costes indirectos son los costes asociados a la realización de la actividad requerida para la elaboración del proyecto y que no se pueden referenciar a los costes directos.

Costes indirectos	
Consumo de electricidad	200€
Gasto en tarifas de telefonía e internet	50€
Coste Total:	250€

Tabla 9: Costes indirectos.

5.6.5 Costes totales.

El resultado de la suma de los costes tanto directos como indirectos.

Suma de costes	
Coste total del personal	14.575,47€
Coste total hardware con amortización	31,5€
Coste total del software	0€
Coste total de consumibles	203€
Costes totales indirectos	250€
Coste Total:	15.059,97€

Tabla 10: Suma de costes.

Redondeando podemos concluir que el **coste total del proyecto es de 16.060€.**

6 CONCLUSIONES

A lo largo de estos meses de trabajo desarrollando el proyecto, se ha podido cumplir el objetivo principal, aunque por el camino se han encontrado diversos obstáculos que se han sorteado de la mejor forma, pudiendo llegar así al actuador neumático suave, la meta de este trabajo.

El propósito principal que era el de operar la garra con éxito moviendo los dedos de forma que permita la aprehensión de objetos se ha alcanzado,

En cuanto a la electrónica, el hardware elegido funciona de forma correcta en conjunción con el software. Los componentes elegidos también; son compatibles entre sí y son fáciles de sustituir en caso de avería.

Con respecto al software, la programación realizada cumple sus objetivos, tiene unos entornos gráficos intuitivos, es sencillo de configurar y es capaz de proteger el actuador en caso de una mala manipulación.

En lo concerniente a los materiales escogidos, cabe destacar que, la elección de la silicona como elemento principal para los dedos ha sido clave y ha dado unos resultados satisfactorios. Del mismo modo, el ABS que compone las partes rígidas del cuerpo también ha dado buenos resultados y sería el material que debería utilizarse para próximos proyectos debido a sus cualidades,

Aunque por el camino se ha encontrado ciertos inconvenientes, el diseño final ha resultado muy satisfactorio. Las dificultades referentes a esto son las relacionadas con la morfología de los dedos, en los que cuales se ha observado una excesiva deformación. Este hecho se subsanaría cambiando el material e incrementando el espesor de las paredes.

La realización de este proyecto ha resultado económicamente asequible en cuanto a los materiales empleados, componentes electrónicos y herramientas. A decir verdad, un desarrollo propio como el expuesto en este proyecto resulta mucho más ventajoso que la obtención de una garra similar en el mercado.

6.1 Futuras líneas de desarrollo

Aunque conforme con el resultado, existen mejoras en su funcionamiento; una de estas mejoras sería la reducción del consumo energético de las electroválvulas que se conseguiría cambiando los canales neumáticos, de modo que cuando ninguna electroválvula esté encendida, la garra quede en el estado bloqueado manteniendo su posición.

También se ha visto que deberían haberse usado racores neumáticos con válvula de estrangulación integrada en lugar de diseñar un mecanismo de estrangulación del flujo de aire dentro de la garra. Estos racores industriales no solo tienen un mejor desempeño, sino que ahorran espacio.

Y aunque la garra es capaz de coger objetos, en la mayoría de las ocasiones lo realiza únicamente con dos dedos. Esto se ha debido a una combinación de factores: la dificultad de realizar dos modelos exactamente idénticos, que la silicona elegida no era lo suficientemente rígida, y que el grosor de la pared y el diseño del tornillo de estrangulación no fuesen capaces de absorber estas diferencias de manufactura (lo que hacía que los dedos no se doblaran con la misma presión).

Dichos inconvenientes son de fácil subsanación, si en el futuro se utiliza una silicona más rígida y se emplean racores neumáticos que incluyan su propio mecanismo de regulación.

El siguiente paso por tomar en un futuro desarrollo de este proyecto sería independizar los movimientos de los dedos, para lo que será necesario añadir más electroválvulas y más sensores, obteniendo así un mejor control.

Si se quisiera ahondar en esta cuestión, habría que introducir varios canales en cada dedo de forma enfrentada, de modo que no solo puedan moverse en una dirección. Esto abriría un gran abanico de posibilidades permitiendo a la garra adoptar configuraciones complejas.

Otra alternativa sería montar los dedos suaves sobre una base que accionada por cilindros neumáticos o pequeños motores eléctricos, permita cambiar la orientación o distancia entre los dedos dependiendo de las dimensiones del objeto con el que se interactúa, lo cual otorgará mayor versatilidad.

Si bien es cierto que para llevar a cabo cualquiera de estas dos mejoras sería necesario cambiar a un controlador con mayor el número de entradas y salidas.

Otra mejora interesante es la implementación de un sistema de comunicación para poder interactuar con el robot sobre el que vaya montado. Esta conexión podría realizarse directamente sobre la misma red Profinet o EtherNet que opere el robot, o a través de un módulo de entradas y salidas.

7 BIBLIOGRAFÍA

- Rafsanjani, A., Zhang, Y., Liu, B., Rubinstein, S. M., & Bertoldi, K. (2021). Kirigami skins make a simple soft actuator crawl. *Science Robotics*. doi:10.1126/scirobotics.aar7555
- All3dp. (2020). *All3dp*. Obtenido de <https://all3dp.com/es/1/tipos-de-impresoras-3d-tecnologia-de-impresion-3d/>
- Arduino. (s.f.). *Arduino store*. Obtenido de <https://store.arduino.cc/arduino-uno-rev3>
- Bilodeau, R. A., & Kramer, R. K. (2017). Self-Healing and Damage Resilience for Soft Robotics: A Review. *Front. Robot. AI*, 4-48. doi:<https://doi.org/10.3389/frobt.2017.00048>
- Bricogreek. (s.f.). *Bricogreek*. Recuperado el 2021, de <https://tienda.bricogeek.com/sensores/432-sensor-flex-7cm.html>
- Crump, S. S. (1989). *Estados unidos Patente n° US5121329A*. Obtenido de <https://patents.google.com/patent/US5121329A/en>
- D. Van Story, e. a. (2017). Approaches to Real-Time Ventricular Wall Strain Measurement for the Control of Soft Robotic Ventricular Assist Devices. *The 9th Hamlyn Symposium on Medical Robotics*.
- Eshaghi, M., Ghasemi, M., & Khorshidi, K. (2021). Design, manufacturing and applications of small-scale magnetic soft. *Extreme Mechanics Letters*(44). doi:<https://doi.org/10.1016/j.eml.2021.101268>
- Festo. (2017). *Festo*. Obtenido de <https://www.festo.com/group/es/cms/10217.htm>
- Festo. (s.f.). *Festo*. Recuperado el 2021, de Airacuda: <https://www.festo.com/group/es/cms/10249.htm>
- Festo. (s.f.). *Festo*. Recuperado el 2021, de Asistente biónico de manipulación: <https://www.festo.com/group/es/cms/10241.htm>
- Festo. (s.f.). *Festo*. Recuperado el 2021, de MultiChoiceGripper: <https://www.festo.com/group/es/cms/10221.htm>

- Festo. (s.f.). Festo. Recuperado el 2021, de FlexShapeGripper:
<https://www.festo.com/group/es/cms/10217.htm>
- Festo. (s.f.). Festo. Recuperado el 2021, de TentacleGripper:
<https://www.festo.com/group/en/cms/12745.htm>
- Festo. (s.f.). Festo. Recuperado el 2021, de BionicSoftArm:
<https://www.festo.com/group/es/cms/13527.htm>
- Festo. (s.f.). Festo. Recuperado el 2021, de BionicSoftHand:
<https://www.festo.com/group/es/cms/13508.htm>
- Gaal, G., Mendes, M., de Almeida, T. P., Piazzetta, M. H., Gobbi, Â. L., Riul, A., & Rodrigues, V. (2016). Simplified fabrication of integrated microfluidic devices using fuseddeposition modeling 3D printing. *Sensors and Actuators B*, 242, 35-40.
- Gariya, N., & Kumar, P. (2021). A review on soft materials utilized for the manufacturing of soft robots. *Materials Today: Proceedings*. doi:<https://doi.org/10.1016/j.matpr.2021.02.380>
- Himenez, J. (2011). *La impresión 3D con FDM: Cómo funciona?* . (Stratasys, Ed.)
Obtenido de <https://caminstech.upc.edu/sites/default/files/FDM%20I%20-%20Tecnologia.pdf>
- inventable. (s.f.). *inventable*. Recuperado el 2021, de <https://www.inventable.eu/paginas/LedResCalculatorSp/LedResCalculatorSp.html>
- Kang Gu, B., Yahya, I., Spinks, G., & Kim, S. I. (2009). A Linear Actuation of Polymeric Nanofibrous Bundle for Artificial Muscles. *Chem Mater*(21), 511-515.
- Kanguk, K., Zhu, W., Qu, X., Aaronson, C., McCall, W. R., Sirbuly, D. J., & Chen, S. (2014). 3D Optical Printing of Piezoelectric Nanoparticle–Polymer Composite Materials. *ACS NANO*, 8(10), 9799-9806. doi:<https://doi.org/10.1021/nn503268f>

- Katzschmann, R. K., DelPreto, J., MacCurdy, R., & Rus, D. (2018). Exploration of Underwater Life with an Acoustically Controlled Soft Robotic Fish. *Sci. Robot*, 3. doi:10.1126/scirobotics.aar3449
- Kočí, J. (2020). *prusaprinters*. Obtenido de https://blog.prusaprinters.org/improve-your-3d-prints-with-chemical-smoothing_36268/
- Laundru. (2011). *Thingiverse*. Obtenido de <https://www.thingiverse.com/thing:13188>
- León Cárdenas, M. A., & Romero Andrade, P. A. (2018). *Investigación de propiedades mecánicas de materiales flexibles impresos en 3D para el diseño e implementación de un prototipo de prótesis funcional de mano, controlada automáticamente para facilitar habilidades motrices*. Latacunga: ESPE Universidad de las Fuerzas Armadas.
- Li, G., Chen, X., Zhou, F., Liang, Y., Xiao, Y., Cao, X., . . . Xie, T. (2021). Self-powered soft robot in the Mariana Trench. *Nature*(591), 66-71. doi:<https://doi.org/10.1038/s41586-020-03153-z>
- Lin, D., Nian, Q., Jin, S., Deng, B., Hu, Y., Wang, W., & Cheng, G. J. (2014). Three-Dimensional Printing of Complex Structures: Man Made or toward Nature? *ACS NANO*, 8(10), 9710-9715.
- Lölsberg, J., Linkhorst, J., Cinar, A., Jans, A., J., A., & Wessling, M. (2018). 3D nanofabrication inside rapid prototyped microfluidic channels showcased by wet-spinning of single micrometre fibres. *Lab on a Chip*, 1341-1348. Obtenido de <https://www.nanoscribe.com/en/news-insights/news/in-chip-printing-of-microfluidic-devices>
- M., A. (2020). *3dnatives*. Obtenido de <https://www.3dnatives.com/es/guia-completa-tpu-040620202/>
- mantech. (s.f.). *mantech*. Recuperado el 2021, de https://www.mantech.co.za/datasheets/products/1057895_BG.pdf
- Marcos Fernandez, A., & León Calero, M. (2019). *Revista de plásticos modernos*, 118(747), 8.

- Maurel, A., Grugeon, S., Fleutot, B., Courty, M., Prashantha, K., Tortajada, H., . . . Dupont, L. (2019). Three-Dimensional Printing of a LiFePO₄/Graphite Battery Cell via Fused Deposition Modeling. *SICENTIFIC REPORTS natureresearch*, 9(18031), 1-14.
- Ninjabflex. (s.f.). Recuperado el 2021, de Ninjabflex: <https://ninjatek.com/ninjabflex/>
- Osoyoo. (s.f.). Osoyoo. Recuperado el 2021, de <https://osoyoo.com/2017/09/30/arduino-lesson-rotary-encoder/>
- PaulStoffregen. (s.f.). *PJRC*. Obtenido de <https://www.pjrc.com/teensy/>
- Prusa. (s.f.). *Prusa3d*. Recuperado el 2021, de <https://www.prusa3d.es/prusaslicer/>
- Prusa research. (s.f.). *prusa3d*. Recuperado el 2021, de <https://shop.prusa3d.com/es/filamento/130-filamento-easyabs-blanco-1kg.html>
- Průša, J. (s.f.). *Prusa3d*. Recuperado el 2020, de <https://www.prusa3d.com/original-prusa-mini/>
- RCScomponents. (1998). *RCScomponents*. Obtenido de <https://www.rcscomponents.kiev.ua/datasheets/S-15.pdf>
- Santos, S. (s.f.). *Random Nerds Tutorial*. Recuperado el 2021, de <https://randomnerdtutorials.com/guide-to-1-8-tft-display-with-arduino/>
- Selvaggio, M., Ramirez, L. A., Naclerio, N. D., Siciliano, B., & Hawkes, E. (2020). An obstacle-interaction planning method for navigation of actuated vine robots. *IEEE International Conference on Robotics and Automation (ICRA)*, 3227-3233. doi:10.1109/ICRA40945.2020.9196587.
- SGS-Thomson. (1989). *alldatasheet*. Obtenido de <https://www.alldatasheet.es/datasheet-pdf/pdf/21675/STMICROELECTRONICS/2N2222.html>
- smooth-on. (s.f.). *smooth-on*. Recuperado el 2021, de <https://www.smooth-on.com/product-line/dragon-skin/>
- softroboticsinc. (s.f.). *softroboticsinc.com*. Recuperado el mayo de 2021, de softroboticsinc.com

Toshimitsu, K., & Masaki, T. (2016). Microfluidic devices fabricated using stereolithography for preparation. *Chemical Engineering Journal*, 290, 400-404.

ultimaker. (s.f.). *ultimaker*. Recuperado el 2021, de <https://ultimaker.com/es/materials/tpu-95a>

Wehner, M. T. (2016). An integrated design and fabrication strategy for entirely soft, autonomous robots. *nature*(536), 451-455. doi:<https://doi.org/10.1038/nature19100>

Wikipedia. (s.f.). Obtenido de https://es.wikipedia.org/wiki/Impresi%C3%B3n_3D

Zalm, E. v. (s.f.). Recuperado el 2021, de <https://marlinfw.org/>

8 APÉNDICE

8.1 Tabla de contenidos adicionales

Nombre	Ruta	Programa para visualización	Descripción
control_board.fzz	. \fritzing-control_board	fritzing	Esquema de conexionado de las entradas y salidas del controlador Arduino UNO
Kicad_evalve.pro	. \Kicad-electronic valve	Kicad	Diseño de PCB para controlar las electroválvulas
SoftRB_controler.ino	. \Arduino-Software\SoftRB_controler	Arduino	Programa del controlador
múltiples archivos	. \fusion360-diseños 3D\...*.f3z	Fusión360	Diseño 3D
múltiples archivos	. \fusion360-diseños 3D\...*.stl	Slicer para impresión 3D(PrusaSlicer)	Diseño 3d preparado para impresión
múltiples archivos	. \multimedia	Reproductor de video	Archivos multimedia

No se incluyen los archivos G-code empleados para la impresión ya que esos archivos son específicos para cada impresora.