

ESCUELA TÉCNICA SUPERIOR DE INGENIEROS INDUSTRIALES
UNIVERSIDAD POLITÉCNICA DE MADRID

José Gutiérrez Abascal, 2. 28006 Madrid
Tel.: 91 336 3060
info.industriales@upm.es

www.industriales.upm.es



POLITÉCNICA

INDUSTRIALES

05 TRABAJO FIN DE MASTER

Florentino Gómez Mollux

TRABAJO FIN DE MASTER

ROBOT CONTINUO ACTUADO CON SMA

ENERO 2020

MIGUEL GUZMÁN MERINO

DIRECTOR DEL TRABAJO FIN DE MASTER:
ANTONIO BARRIENTOS CRUZ
SILVIA TERRILE

Resumen

La robótica flexible presenta una nueva manera de acercar los robots a las personas. El hecho de desarrollar estructuras libres de elementos rígidos que puedan resultar peligrosos abre nuevos campos de aplicación de la robótica, que continúa su evolución fuera de los entornos industriales. Por su parte, los robots continuos redundantes presentan características muy atractivas, pudiendo lograr configuraciones y llevar a cabo tareas que no están al alcance de los robots más convencionales.

En el presente Trabajo Fin de Máster se presenta la unión de estos dos conceptos, en un diseño de un robot flexible continuo redundante. Este diseño, actuado mediante muelles fabricados a partir de aleaciones con memoria de forma, pretende explorar las posibilidades de movimientos de tres segmentos de silicona actuados de manera independiente. Cada segmento de silicona contiene tres muelles que permiten mover su extremo en un espacio tridimensional y realizar rotaciones respecto a los ejes perpendiculares al eje central del segmento.

Cada segmento se dispone a continuación del anterior formando un conjunto compacto actuado mediante 9 muelles, dispuestos de tres en tres en cada uno de los segmentos. Una interfaz de usuario permite accionar los muelles que mueven el conjunto y un sistema de visión por ordenador captura los movimientos para su posterior análisis.

Los resultados obtenidos hacen referencia a los puntos que pueden alcanzar el extremo libre del conjunto y los ángulos de inclinación que puede lograr cada uno de los segmentos en su extremo.

Como otros robots continuos, este diseño podría ser empleado en tareas de inspección de cavidades. El hecho de presentar una estructura blanda de silicona permite ampliar las aplicaciones a los ámbitos de la medicina y la veterinaria.

Abstract

Soft robotics gives a new way to approach robots to people. The development of structures without hard, dangerous parts opens new robotics applications, which continues its evolution out of the industry. On the other hand, redundant continuous robots show very attractive features, achieving configurations and developing tasks that can not be performed by conventional robots.

In the current Master Thesis, the union of these two concepts is shown, as a flexible continuous redundant robot design. This design actuated by shape memory alloy springs explores the movement possibilities of three silicon segments actuated independently. Each silicon segment has three springs that allow to move the end of the segment in a three-dimensional space and do rotations perpendicularly to the central segment axis.

The results obtained are referred to the positions reached by the end of the set and the angles that each of the segments' ends can achieve.

Like other continuous robots, the design could be used at hollow inspection tasks. The fact of showing a soft silicon structure allows to amplify its utilities to medicine and veterinary.

Resumen global

En este trabajo fin de máster se presenta el diseño, fabricación y control de un robot blando continuo, actuado con SMA. Este robot se enmarca en el área de investigación de la robótica blanda o flexible. Los desarrollos que se llevan a cabo en esta área buscan reducir o eliminar por completo los elementos rígidos que forman parte de los diseños. Los principales componentes que forman parte de estos robots flexibles son plásticos blandos o siliconas, así como actuadores que permitan mantener el concepto de blando o flexible. Los actuadores convencionales como los motores eléctricos o los actuadores neumáticos son sustituidos en muchas ocasiones por materiales inteligentes como las aleaciones con memoria de forma.

El robot presentado en este proyecto (Figura 1) se centra en la exploración de los movimientos de flexión de tres segmentos de silicona cilíndricos que cuelgan en disposición vertical de una base fija, no realiza ningún tipo de desplazamiento. La disposición vertical permite definir una posición estable de reposo sin necesidad de emplear actuadores para mantenerla. Los segmentos que componen el conjunto son idénticos y se actúan de manera independiente. Se disponen uno a continuación del otro de manera que los movimientos de un segmento repercuten en la posición de los segmentos que se disponen a continuación. La composición de los movimientos de los tres segmentos genera un amplio rango de movimientos, uno de los objetivos del diseño.



Figura 1: Robot blando continuo

Antes de presentar con más detalle el diseño del robot, se realiza una descripción de la fabricación y del funcionamiento de los actuadores basados en aleaciones con memoria de forma justificando de esta manera su utilización. Uno de los tipos de aleación con memoria de forma que emplea normalmente es la aleación Níquel (55 %)-Titanio(45 %), conocida también como Nitinol. Al igual que todas las aleaciones presentan distintas estructuras atómicas en función de su composición y temperatura. La elaboración de un actuador basado en SMA, concretamente un muelle, comienza con un cable de Nitinol. El cable se dispone en forma de espira para crear un muelle, en este caso arrollándolo sobre una varilla roscada como muestra la Figura 2. Se eleva la temperatura del cable con esta disposición hasta 500 °C durante 15 minutos. A esta temperatura el Nitinol se encuentra en fase austenítica y sus átomos se reorganizan para hacer estable la configuración de muelle. Posteriormente se enfriá el cable a temperatura ambiente, cambiando su estructura atómica a martensítica. Este cambio se produce a nivel atómico mientras que la disposición en forma de muelle permanece estable. Una vez concluido el tratamiento térmico se dice que el cable ha "memorizado" la configuración en forma de muelle, lo que quiere decir que el material tenderá a

recuperar esta disposición memorizada cuando se alcance su temperatura de activación, 45° para el cable empleado en este proyecto.



Figura 2: Cable de SMA arrollado sobre una varilla roscada

La manera del controlar la activación de los muelles, es decir, la manera en que estos alcanzan su temperatura de activación es mediante el efecto Joule. La circulación de corriente por el cable de SMA eleva su temperatura, y cuando se alcanza la temperatura de activación se produce el cambio de fase explicado anteriormente. La manera de controlar la corriente que circula por el cable es mediante un transistor mosfet gobernado por una señal PWM. En este caso la señal PWM procede de una placa de control Arduino Uno y a parte del transistor únicamente es necesaria una fuente de alimentación capaz de generar la corriente necesaria, típicamente en torno a 2 amperios por muelle. Como se explicará a continuación el robot tiene 9 muelles de SMA dispuestos en su interior, pero solo se contempla la activación de 6 de ellos al mismo tiempo, por lo que una fuente de 18 A cubre la demanda de corriente. Como se puede observar la electrónica necesaria para controlar estos actuadores es simple, otro aspecto importante a la hora de elegirlos.

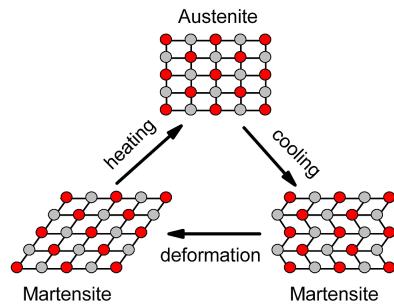


Figura 3: Alternancia entre las estructuras atómicas del Nitinol

El funcionamiento de este tipo de actuadores, muelles de SMA, se basa en la alternancia entre las estructuras atómicas martensita y austenita como se muestra en la Figura 3. Durante su deformación (estado de reposo) el muelle presenta una estructura martensítica a nivel atómico y cuando alcanza su temperatura de activación recupera su estructura austenítica. Puesto que en la fase de austenita el material presenta una disposición en forma de muelle contraído el muelle deformado sufre una contracción. La manera de convertir este cambio de forma en un esfuerzo es asegurando los extremos del muelle a los elementos que se desean mover. Los muelles pueden sufrir cualquier tipo de deformación durante su estado de reposo, y cuando se activen recuperaran siempre su forma inicial de muelle. Al tratarse de hilos de diámetro reducido, 0.5 mm en el caso del hilo empleado en este proyecto, presentan un peso y volumen muy reducidos. A pesar de esto, pueden realizar esfuerzos de hasta 15 N dependiendo del tipo de cable empleado.

Una vez descrito el funcionamiento de los actuadores se comprende su utilización en los diseños de robótica flexible. No solo presentan un reducido peso en relación a la fuerza que pueden desarrollar, si no que además pueden sufrir deformaciones en su estado de reposo sin alterar su funcionamiento. Estos

aspectos suponen una gran ventaja frente a los actuadores convencionales para la elaboración de robots flexibles. Los actuadores de SMA pueden presentar configuraciones diferentes a las de un muelle, dependiendo de la necesidad del diseño.

En cuanto al empleo de los muelles de SMA en el robot que se presenta en este trabajo, se opta por disponerlos en el interior de los segmentos de silicona para conseguir un diseño compacto. Los muelles deben poder contraerse libremente por lo que es necesario disponer cavidades a lo largo de los segmentos en las que se puedan alojar los muelles. La Figura 4(a) muestra el diseño de los segmentos con las cavidades en su interior. Tal como se ha indicado anteriormente es necesario asegurar los extremos de los muelles a los elementos sobre los que se desea realizar la fuerza que estos desarrollan. Puesto que se desea flexionar los segmentos de silicona, es necesario disponer elementos rígidos en los extremos de cada segmento, de esa manera la contracción de un muelle en el interior de un segmento tenderá a juntar los extremos del mismo. Los elementos rígidos que se integran en el cuerpo de silicona son discos con agujeros pasantes que coinciden con las cavidades del segmento en las que se alojan los muelles. Sobre estos discos se sitúan los topes que mantienen los extremos de cada muelle en una posición estable (Figura 4 (b)) y permiten realizar las conexiones necesarias (Figura 4 (c)).

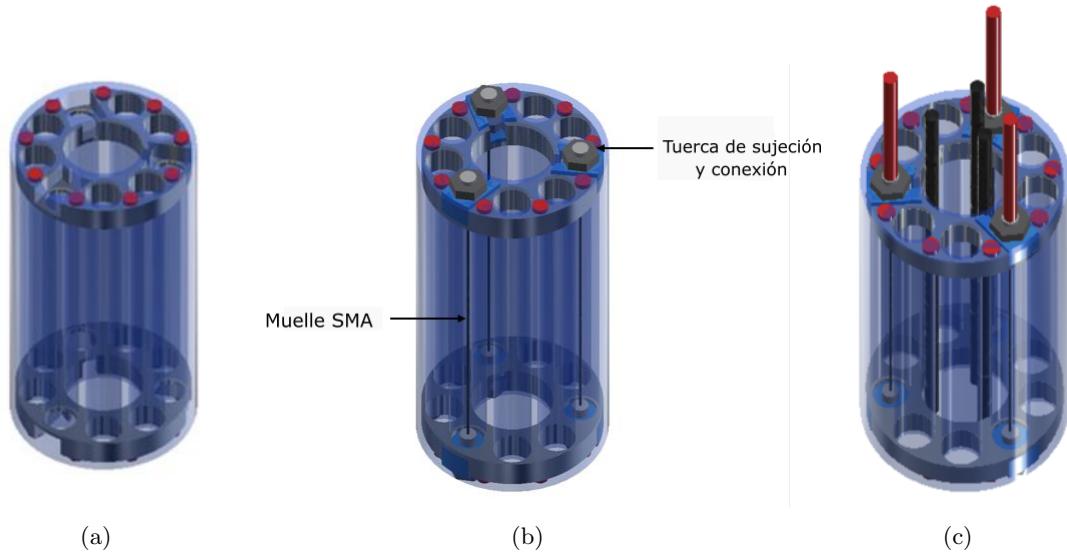


Figura 4: a) Segmento de silicona con cavidades interiores. b) Segmento con muelles. c) Conexión de los muelles a través de las distintas cavidades del segmento

Para realizar la flexión de un segmento, no se puede localizar el muelle en el eje central del segmento, puesto que tendería a contraerlo o flexionarlo de manera descontrolada. En lugar de ello el muelle se desplaza hacia el exterior del segmento, de manera que la fuerza de contracción del muelle provoque una flexión en un sentido siempre que sea activado. En este caso la flexión sería controlada, pero solo se podrían realizar movimientos que posicionasen el extremo de un segmento en posiciones que describirían un arco de circunferencia. Si en lugar de disponer un único muelle se colocan tres muelles por segmento separados un ángulo de 120 grados respecto del eje central del segmento como se aprecia en los ejemplos de la Figura 4, se pueden realizar contracciones de los muelles de manera alternativa o combinada, aumentando el rango de movimientos a una superficie similar a un casquete de esfera.

En cada segmento se disponen 9 cavidades desde la parte superior hasta la inferior. Solo tres de esas cavidades se encuentran ocupadas por muelles en cada uno de los segmentos, mientras que las otras permiten realizar las conexiones necesarias de los muelles que ocupan los segmentos inferiores con cada uno de los transistores. En la zona central de cada uno de los segmentos se dispone una cavidad central de mayor diámetro por la que también se conducen los cables de alimentación de los distintos muelles. La Figura 5 muestra cómo los cables de alimentación correspondientes a los muelles del último segmento circulan por el interior de los dos segmentos anteriores hasta llegar a los muelles correspondientes.

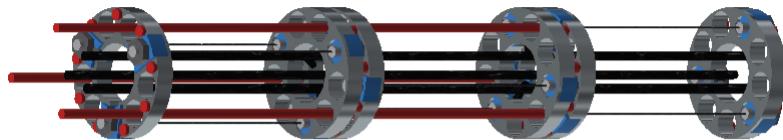


Figura 5: Cables de conexión recorriendo el interior de los segmentos de silicona

La unión entre los tres segmentos se realiza mediante imanes colocados en los discos rígidos de los extremos de cada segmento. Los imanes, destacados en rojo en las Figuras 4 y 5, permiten mantener el conjunto unido durante los movimientos de flexión y permiten separar los segmentos para acceder a cada uno de los muelles fácilmente. La manipulación de los muelles es necesaria para realizar su ajuste durante el montaje o para sustituirlos en caso de rotura.

Los movimientos del robot son capturados por un sistema de visión compuesto por dos cámaras situadas en dos laterales del robot. Se disponen marcas sobre la superficie del robot en el extremo de cada uno de los segmentos. Las cámaras capturan estas marcas y mediante la interpretación de los datos aportados por cada una de las imágenes se establece la posición de cada marca respecto a un sistema de referencia situado en la parte superior del conjunto. La disposición de la cámara se observa en la Figura 6, así como la necesidad de situar el robot sobre un fondo blanco que permita resaltar las marcas dispuestas sobre el robot.

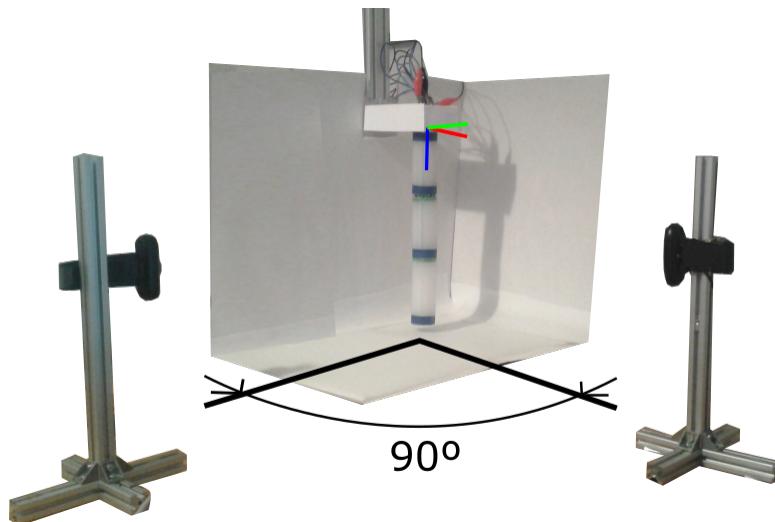


Figura 6: Disposición de las cámaras del sistema de visión

Los muelles dispuestos en el interior de los segmentos de silicona funcionan como actuadores todo-nada. En estado de reposo los muelles no efectúan ninguna flexión sobre los segmentos y cuando son activados ejercen toda la fuerza que pueden desarrollar, flexionando el segmento en el sentido correspondiente. Empleando este método de activación se puede conocer el conjunto de posiciones que pueden ser alcanzadas por el extremo libre del conjunto y la inclinación de los extremos de cada segmento. La relación entre los muelles activados y la posición que alcanza el extremo libre es lo que determina el control del robot. Se trata por tanto de un control el cadena abierta, en el que el sistema de visión realiza un seguimiento del movimiento y verifica que se alcanza la posición deseada.

La activación de los muelles se realiza mediante una interfaz de usuario que se muestra en la Figura 7. Se da la opción de activar los muelles de manera independiente mediante el menú *Desarrollo*, o seleccionar los puntos preestablecidos a los que se puede mover el extremo libre con el menú de *Usuario*. En el segundo caso se activan los muelles correspondientes para que el extremo libre alcance la posición seleccionada. Como se puede observar, la interfaz muestra además el movimiento del robot capturado por las cámaras. La superposición de puntos sobre las marcas de las imágenes capturadas permite verificar el seguimiento del movimiento y una tabla de datos muestra la posición X, Y y Z y la rotación en torno a los ejes X e Y del extremo libre del conjunto.



Figura 7: Selección de puntos preestablecidos mediante interfaz de usuario

El diseño del robot se ha realizado con el software de diseño Autodesk Inventor. El sistema de visión se ha implementado en Matlab, empleado algunas de las aplicaciones disponibles, como *Camera Calibrator* y funciones de los paquete *Image Processing* y *Computer Vision*. Para desarrollar la interfaz de usuario se empleó la herramienta de Matlab *App Designer*.

Palabras clave:

Robótica flexible, Robot continuo, Robot redundante, SMA.

Código unesco:

330412 DISPOSITIVOS DE CONTROL

330407 PERIFERICOS DE ORDENADORES

330713 DISPOSITIVOS DE GRABACION

331208 PROPIEDADES DE LOS MATERIALES

331102 INGENIERIA DE CONTROL

331210 PLASTICOS

330417 SISTEMAS EN TIEMPO REAL

Índice

1. Introducción	15
2. Estado del arte	16
3. Actuadores	20
3.1. Características SMA	20
3.2. Ventajas y desventajas frente a otros actuadores	22
4. Diseño	23
4.1. Requisitos	23
4.2. Consideraciones previas de los requisitos	23
4.2.1. Actuación con muelles de SMA	23
4.2.2. Composición en segmentos	25
4.2.3. Estructura de los segmentos	25
4.2.4. Elementos rígidos de los segmentos	25
4.2.5. Unión de los segmentos	26
4.3. Diseño y construcción	26
4.3.1. Discos	26
4.3.2. Estructura rígida	27
4.3.3. Estructura blanda	29
4.3.4. Conexiones	30
4.4. Muelles	32
4.4.1. Fabricación de muelles	32
4.4.2. Requisitos de los muelles	32
4.4.3. Proceso de fabricación	32
4.4.4. Desarrollo de los cálculos	35
4.5. Justificación del diámetro	36
4.6. Justificación de la longitud del segmento	37
4.7. Electrónica	40
5. Sistema de visión	42
5.1. Tratamiento de las imágenes	43
5.2. Especificaciones del sistema	44
6. Ensayos y resultados	46
6.1. Calibración inicial	46
6.2. Descripción de los ensayos	46
6.3. Análisis de los resultados	48
7. Interfaz y funcionamiento	50
7.1. Estado del robot	50
7.2. Manipulación del robot	51
8. Conclusiones y propuestas futuras	52

ANEXO I: Estudio económico

ANEXO II: Estudio de impacto y aplicaciones

ANEXO III: Estructura de descomposición del proyecto

ANEXO IV: Planificación temporal

ANEXO V: Planos

Índice de figuras

1.	Robot blando continuo	4
2.	Cable de SMA arrollado sobre una varilla roscada	5
3.	Alternancia entre las estructuras atómicas del Nitinol	5
4.	a) Segmento de silicona con cavidades interiores. b) Segmento con muelles. c) Conexión de los muelles a través de las distintas cavidades del segmento	6
5.	Cables de conexión recorriendo el interior de los segmentos de silicona	7
6.	Disposición de las cámaras del sistema de visión	7
7.	Selección de puntos preestablecidos mediante interfaz de usuario	8
8.	a) Robot de pintura ABB IRB 5500-22 b) Robot de paletizado KUKA KR Quantec c) Línea de industria automoción, Body in white con robots ABB	16
9.	Robot interactivo Nao	16
10.	Actuador blando (https://www.softroboticsinc.com/mgrip-cobot-kits)	17
11.	Robots bioinspirados: a) Oruga. b) Tentáculo. c) Pez	17
12.	Robots hiper-redundantes: a) Robot continuo para inspección de turbina de gas. b) Aplicación de robot continuo para inspección en plantas nucleares. c) Robot continuo accionado a presión	18
13.	Tentáculos actuados con SMA	19
14.	Configuraciones de un hilo de SMA.	20
15.	Fases del proceso de contracción del muelle.	20
16.	Relación entre temperatura y contracción de los actuadores	21
17.	Disposición de un muelle dentro del segmento de silicona.	23
18.	Disposición de los muelles dentro del segmento	24
19.	Rango de movimiento de un único segmento	24
20.	Rango movimientos de los tres segmentos	25
21.	Disco	26
22.	Disco con imanes y topes iniciales	27
23.	Estructura de varillas y discos	27
24.	Estructura con silicona	28
25.	Segmento sin topes	28
26.	Segmento con topes definitivos	29
27.	Segmento con muelles de SMA	29
28.	Disposición de los cables de alimentación en los segmentos	30
29.	Disposición de los cables de alimentación	31
30.	Varilla con extremos limados	33
31.	Fabricación del muelle: a) Extremo limado con tuerca. b) Cable de SMA fijo en el extremo. c) Cable arrollado sobre varilla roscada.	33
32.	Tratamiento térmico	34
33.	Segmento de silicona sin componentes rígidos	37
34.	Ensayo de longitud de segmento	37
35.	Ensayo de longitud de segmento	38
36.	a) Flexión controlada del segmento. b) Aparición de pliegues en la base del segmento. c) Segmento completamente flexionado con pliegues	39
37.	Ensayo segmento L=80 mm	39
38.	Esquema de conexiones	40
39.	Placa de conexiones con circuitos independientes para la activación de los muelles SMA	41
40.	Disposición de las cámaras del sistema de visión	42
41.	Imágenes de calibración	43

42.	Disposición de las marcas para el ensayo de precisión	44
43.	Ensayos	47
44.	Pliegues en el cuerpo de silicona durante los movimientos	48
45.	Posiciones del extremo libre	48
46.	Posiciones de extremo del primer segmento	49
47.	Interfaz de usuario	50
48.	Menús de a) Usuario y b) Desarrollo	51

Índice de cuadros

1.	Ensayo Logitec C210	45
2.	Enyaso Logitec C170	45

1. Introducción

A continuación se presenta la estructura del TFM. Se expondrán los distintos apartados que lo componen y una breve descripción del contenido de cada uno de ellos.

- *2. Estado del arte.* En este apartado se presenta una breve descripción de la evolución de la robótica y el estado de la robótica flexible en la actualidad. También se presentan ejemplos de robots continuos redundantes y sus aplicaciones.
- *3. Actuadores.* Este apartado expone las características de los actuadores de SMA empleados. Se explica su funcionamiento y se presenta una comparación con otros actuadores.
- *4. Diseño.* Inicialmente se detallan los requisitos que debe cumplir el diseño. Se expone una primera aproximación en la que se analizan los requisitos y por último se presenta el diseño del robot y su construcción. Dentro de este apartado se desarrollan sub-apartados en los que se presenta la fabricación de los muelles empleados como actuadores así como la electrónica necesaria para su accionamiento.
- *5. Sistema de visión.* En este apartado se presenta el sistema desarrollado para la captura de los movimientos del robot. Se analizan las funciones y herramientas empleadas y se detallan los ensayos realizados mediante los que se obtiene la precisión del sistema.
- *6. Ensayos y resultados.* Se presentan los ensayos realizados una vez construido el robot y los resultados obtenidos junto con su discusión.
- *7. Interfaz y funcionamiento.* En este punto se presenta la interfaz de usuario diseñada para interactuar con el robot y una explicación de las partes que la componen.
- *8. Conclusiones y propuestas futuras.* Por último se analizan el trabajo presentado a lo largo de todo el documento y se proponen diferentes desarrollos futuros.

2. Estado del arte

La robótica convencional ha sido empleada en industria desde sus orígenes en el movimiento y manipulación de cargas pesadas y herramientas. Los elementos que componen los robots industriales son robustos y resistentes a golpes y desgaste. Estos robots se emplean en la manipulación de pesadas cargas (paletizado) o el manejo de herramientas (industria del automóvil) como se puede observar en la Figura 8. También son comunes los robots tipo Delta o cartesiano en líneas de producción de objetos de menor peso como en el caso de la industria de la alimentación. En estos ámbitos los robots realizan operaciones a alta velocidad, lo que obliga a acotar un área de trabajo segura.

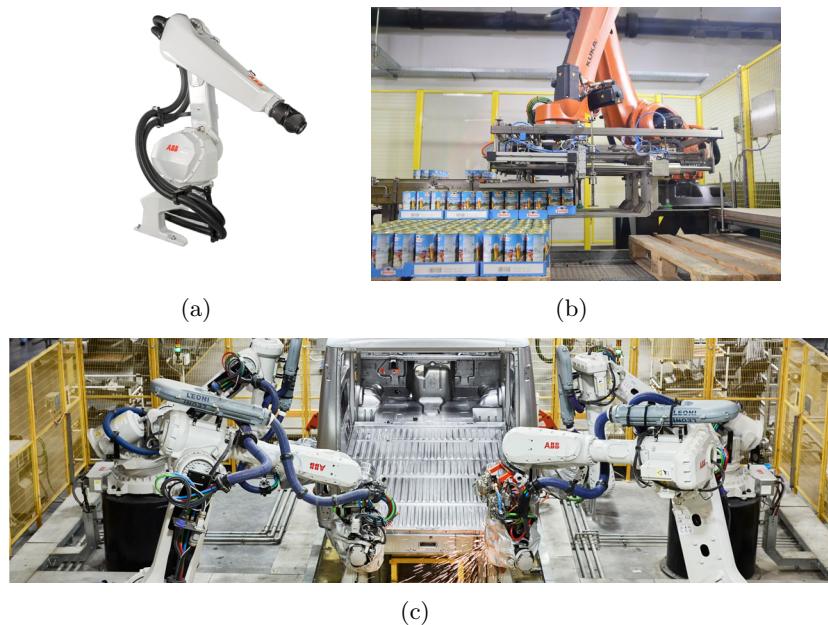


Figura 8: a) Robot de pintura ABB IRB 5500-22 b) Robot de paletizado KUKA KR Quantec c) Línea de industria automoción, Body in white con robots ABB

Con el paso del tiempo la robótica se ha extendido a otras áreas y aplicaciones fuera de la industria. Podemos encontrar vehículos autónomos, exoesqueletos destinados a rehabilitación[11] o robots interactivos destinados a terapias como Nao de Softbank Robotics (Figura 9), entre otros muchos.



Figura 9: Robot interactivo Nao

La robótica blanda se centra en la reducción o eliminación de los elementos rígido que componen los diseños. La eliminación de los elementos rígidos hace que los robots que pertenecen a esta línea de investigación no desarrollen fuerzas elevadas o presenten una velocidad como la que puede observarse en los robots industriales. Aunque se pueden encontrar algunas aplicaciones de robótica flexible aplicada a industria como la pinza mostrada en la Figura 10, en general la robótica blanda o flexible continúa con la tendencia de explorar aplicaciones fuera de los entornos de producción.



Figura 10: Actuador blando (<https://www.softroboticsinc.com/mgrip-cobot-kits>)

Existen desarrollos de robótica blanda enfocados a la rehabilitación como alguno de los ejemplos expuestos anteriormente. Un ejemplo de este tipo de robots flexibles es el guante flexible descrito en [24]. El hecho de reducir los elementos rígidos permite a este diseño adaptarse a la morfología de la mano adecuadamente, de manera que los movimientos resulten más naturales y efectivos. Continuando en el ámbito de la salud, se pueden encontrar otras aplicaciones de la robótica flexible. Implantes como el presentado en [6] demuestran cómo la robótica flexible integra en sus diseños materiales completamente distintos a los empleados hasta el momento.

En la robótica flexible destacan los desarrollos de robots bioinspirados. La idea de los robots que se incluyen en este grupo, es reproducir los movimientos de animales y la manera en que estos interactúan con su entorno. Diseños como el de la trompa de elefante [7] o el de la serpiente [8], muestran los primeros diseños de este tipo de robots bioinspirados, aunque no se acercaban aún a la idea de robot flexible. Actualmente los diseños de robots bioinspirados se centran como el resto de la robótica flexible en eliminar los elementos rígidos que componen los robots. Algunos ejemplos de como los robots bioinspirados reproducen el movimiento de los animales a los que emulan lo encontramos en la oruga [20] (Figura 11 (a)) o el pez robótico [17] (Figura 11 (b)).

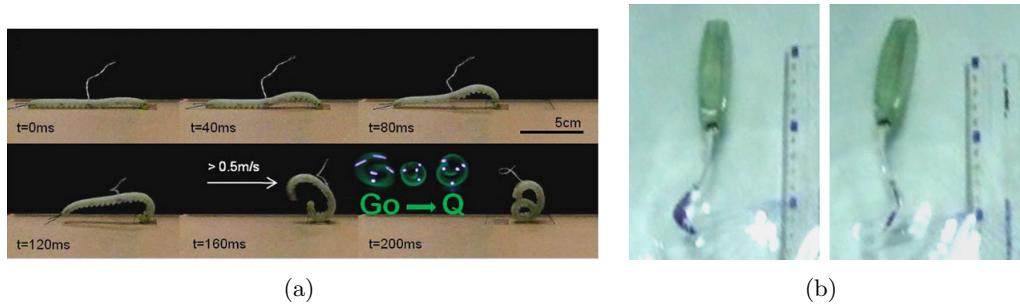


Figura 11: Robots bioinspirados: a) Oruga. b) Tentáculo. c) Pez

Como se puede observar, la robótica flexible está estrechamente relacionada con el empleo de materiales y actuadores poco convencionales. La necesidad de crear diseños compactos y en algunos casos compatibles con los humanos, hace que los actuadores convencionales como motores eléctricos o sistemas hidráulicos sean remplazados por otros actuadores más adecuados. Concretamente los dos últimos ejemplos muestran aplicaciones de los materiales con memoria de forma en diseños de robótica flexible. Este tipo de actuadores permite crear diseños compactos gracias a su flexibilidad y a la manera en que se pueden adaptar a las necesidades del diseño.

El robot que se presenta en este trabajo fin de máster se incluye dentro de la robótica blanda, pero también se encuentra dentro de los robots redundantes. En este grupo se incluyen aquellos robots que presentan un elevado número de grados de libertad, más de los necesario para determinar una configuración estable. Un robot no redundante puede disponer de hasta 6 grados de libertad con los que determina una posición y una orientación. Cada posición queda definida por tanto por una única configuración de los grados de libertad del robot. Un robot redundante puede alcanzar una determinada posición mediante muchas configuraciones diferentes de sus grados de libertad.

Ejemplos citados anteriormente como el de la trompa de elefante y la serpiente son robots hiper-redundantes, concretamente robots continuos hiper-redundantes. En [12] se presenta un análisis detallado de los robots hiper-redundantes. El amplio rango de movimientos de este tipo de robots, y las configuraciones que pueden adoptar los hacen ideales para tareas de inspección, como los presentados en la Figura 12 (a) y 12 (b), [13] [14] respectivamente.

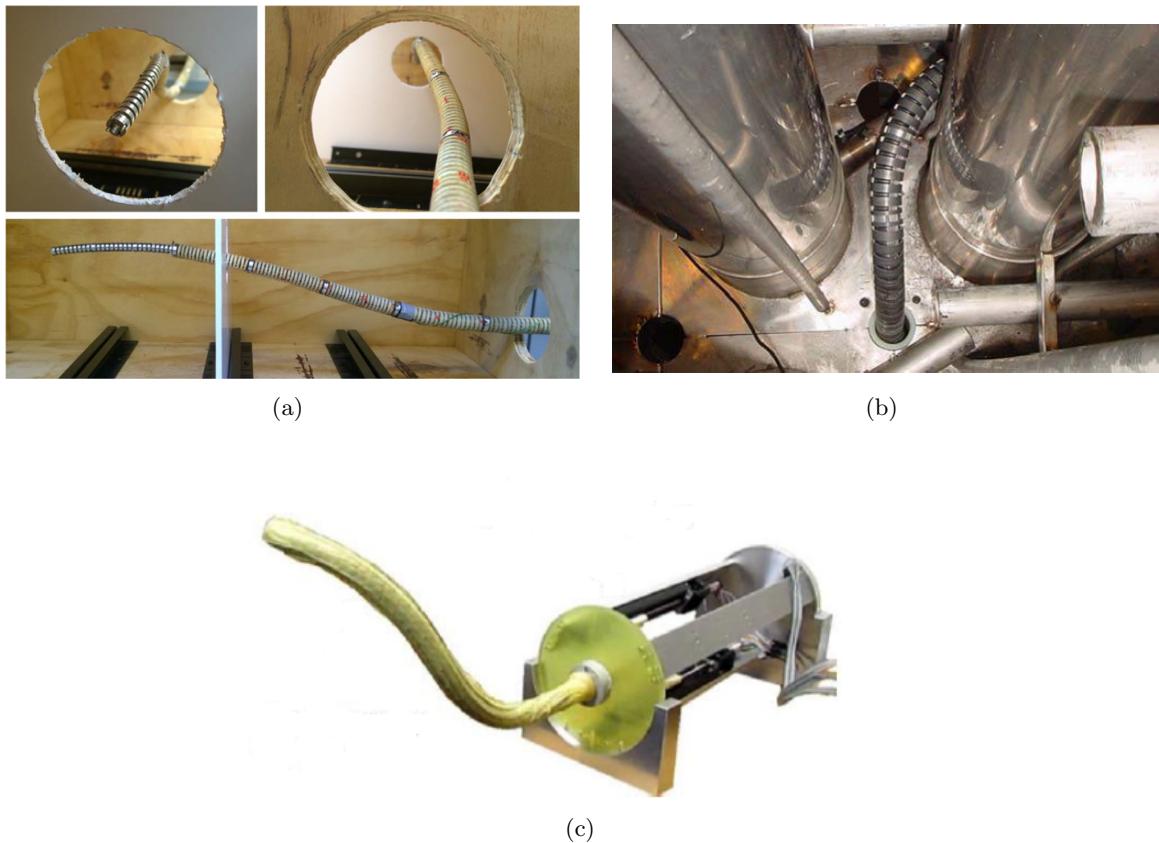


Figura 12: Robots hiper-redundantes: a) Robot continuo para inspección de turbina de gas. b) Aplicación de robot continuo para inspección en plantas nucleares. c) Robot continuo accionado a presión

El robot presentado en [13] es actuado mediante un sistema de cables accionados a través de motores. Este método de accionamiento es muy empleado por la robustez que aporta a los diseño y la precisión con la que pueden ser controlados sus movimientos. Sin embargo existen otros diseños como el expuesto en [15] accionado mediante un sistema de presión (Figura 12(c)). Estos robots continuos presentan un diseño robusto con componentes rígidos. Esto es necesario para desempeñar las tareas a las que están destinados, en entornos con temperaturas elevadas y elementos contra los que podría colisionar. Los sistemas de accionamiento de estos robot deben desarrollar la fuerza suficiente para mover todos sus componentes, por ello se recurre a cables accionados mediante motores eléctricos o sistemas de presión.

A continuación se presentan dos diseños que ponen en común la idea de la robótica flexible de desarrollar robots sin partes rígidas y la versatilidad que ofrecen los robots hiper-redundantes. Se trata de réplicas robóticas del un tentáculo de pulpo. Ambos diseños se encuentran actuados mediante actuadores SMA [21] [22]. Estos robots hiper-redundantes continuos presentados en la Figura 13 presenta una estructura blanda en la que se han reducido los elementos rígidos.

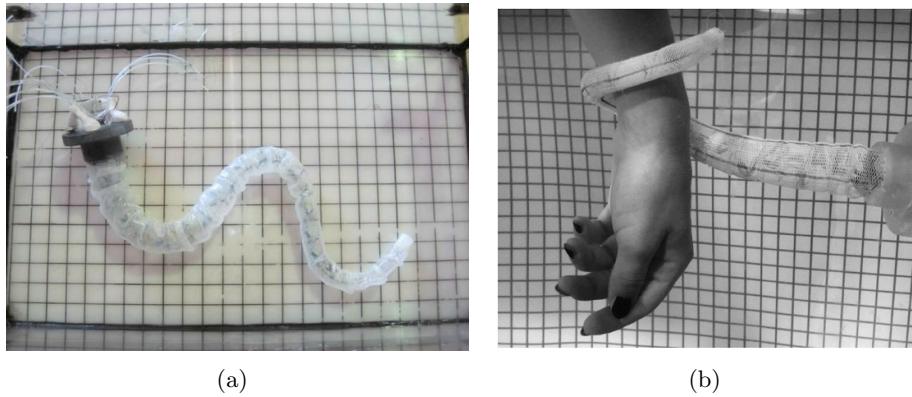


Figura 13: Tentáculos actuados con SMA

Estos robots se encuentran sumergidos en agua que ayuda por una parte a contrarrestar el efecto de la gravedad y por otro ayuda a la refrigeración de los cables de SMA, lo cuales elevan su temperatura durante su funcionamiento. En este caso los actuadores no necesitan realizar tanta fuerza como en el caso de los robots continuos presentados anteriormente. Se puede destacar también que la longitud de los tentáculos es menor a la de los robots de inspección y que el material del que se componen permite incluir a los tentáculos en el campo de la robótica flexible.

Por último es necesario destacar la dificultad que entraña el modelado de los robots hiper-redundantes continuos y flexibles. Por una parte, a diferencia de los robots hiper-redundantes continuos rígidos, los flexibles no cuentan con elementos discretos sobre los que situar inequívocamente sistemas de referencia que permitan conocer la posición del conjunto. Además los actuadores basados en aleaciones con memoria de forma presentan un comportamiento altamente no lineal por lo que su comportamiento es complicado de modelar. Debido a esto es necesario recurrir en ocasiones a la obtención de modelos mediante técnicas de inteligencia artificial como el entrenamiento de redes neuronales.

A pesar de las dificultades expuestas, los resultados que se a obtenido hasta el momento en el desarrollo de este tipo de robots son muy interesantes, por lo que se considera una buena opción seguir explorando las posibilidades dentro de este campo.

3. Actuadores

3.1. Características SMA

Los actuadores basados en aleaciones con memoria de forma o SMA por sus siglas en inglés (Shape Memory Alloy) son actuadores empleados en investigación pero poco extendidos en la industria. Existen diferentes aleaciones, pero la empleada en este proyecto es la que se conoce como Nitinol que consta de un 55 % de Níquel y un 45 % de Titanio. Estos actuadores se suelen presentar en forma de hilos o muelles, los cuales pueden recuperar su configuración inicial tras ser sometidos a una deformación. El caso más simple podría ser el representado en la Figura 14. Un hilo recto, configuración A, se dobla en diferentes partes para crear una configuración B. Sometiendo al hilo con la configuración B a estímulos térmicos se puede llegar a obtener de nuevo la configuración A. Un curioso ejemplo de utilización de los materiales con memoria de forma se puede encontrar en [1]. A continuación se realiza una explicación más detallada para el caso de los muelles de SMA, que son los empleados en el diseño



Figura 14: Configuraciones de un hilo de SMA.

El funcionamiento de los actuadores basados en aleaciones con memoria de forma se basa en la alternancia entre dos estructuras internas de la aleación, la estructura austenítica y la martensítica. La Figura 15 ilustra el proceso que se explica a continuación. Inicialmente la estructura interna del muelle en reposo (L1) es la estructura martensítica. Cuando el muelle se somete a una elongación (L2), extendiendo su longitud inicial, su estructura interna sigue siendo la estructura martensítica. Cuando se eleva la temperatura del muelle hasta una temperatura de activación, su estructura interna pasa de martensítica a austenítica, lo que significa una reorganización a nivel atómico y una cambio de forma a nivel macroscópico. En este momento es cuando el muelle intenta recuperar su longitud inicial (L1), pero en el caso de que el esfuerzo al que está sometido sea demasiado alto, solo podrá contraerse hasta una longitud intermedia (L3). Se dice que la disposición del muelle con longitud L1 ha sido memorizada por lo que el actuador tenderá a recuperar esta forma siempre que alcance la temperatura de activación.

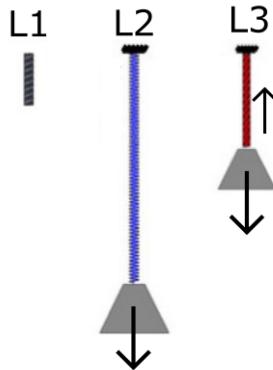


Figura 15: Fases del proceso de contracción del muelle.

Como se ha indicado en la explicación anterior, la temperatura es un factor determinante en el funcionamiento de este tipo de actuadores. La temperatura de activación puede alcanzarse sometiendo al material a una fuente directa de calor o mediante la circulación de corriente a través del actuador. El segundo método hace que el actuador alcance la temperatura de activación gracias al efecto Joule. Este método es el más empleado por su comodidad y la posibilidad de ejercer un control sobre la corriente que se hace pasar por el actuador, y es el empleado en este proyecto. La relación de la contracción que sufren estos actuadores con la temperatura a la que se encuentran se refleja en la gráfica de histéresis de la Figura 16.

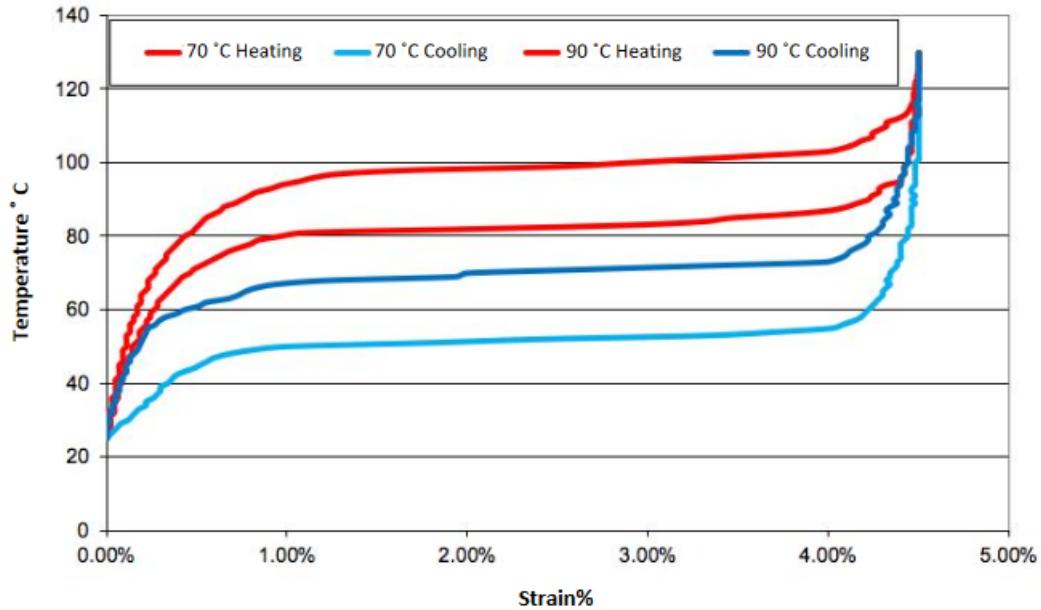


Figura 16: Relación entre temperatura y contracción de los actuadores

Esta relación cambia con las características, como el grosor del hilo empleado. En cuanto a la temperatura de activación, se pueden encontrar cables con una temperatura de activación desde 35° hasta 170°. Se puede encontrar esta información más detallada en las webs de los proveedores como **Dynalloy** (<https://www.dynalloy.com/index.php>) o **Smart Wires** (<https://smartwires.eu/index.php>) entre otros.

3.2. Ventajas y desventajas frente a otros actuadores

La ventaja de los actuadores basados en SMA frente a los actuadores convencionales, es la fuerza que pueden desarrollar en proporción a su reducido peso y el volumen. Este es el principal motivo por el que son empleados en robótica flexible como se ha indicado anteriormente. Los actuadores de SMA pueden alterar su forma inicial fácilmente sin perder sus capacidades. Gracias a esto pueden adaptarse a las configuraciones necesarias del diseño durante su funcionamiento. Su reducido volumen permite integrarlos fácilmente en pequeños espacios, obteniendo de esta manera diseños compactos.

Durante su funcionamiento no emiten ruido. Esto supone una ventaja en campos como la robótica médica donde se intenta crear un ambiente lo menos perturbador posible para el bienestar del paciente. La circunstancia opuesta la encontraríamos en los actuadores los sistemas de actuación hidráulicos que requieren equipos de tratamiento del aire que generan elevados niveles de ruido.

Por contra, los actuadores de SMA son altamente no lineales por lo que presentan una mayor complejidad en cuanto a su control. Sus características pueden variar en función de los procesos de fabricación a los que se hayan sometido y en algunas ocasiones con los ciclos de trabajo. Todo esto junto con la dependencia de la temperatura dificulta la obtención de un modelo por lo que en muchos casos es necesario realizar numerosos ensayos que requieren tiempo.

La fuerza que pueden desarrollar estos actuadores no puede rivalizar con la de los actuadores hidráulicos o los motores eléctricos. Además cabe señalar que al encontrarse menos extendidos, su precio puede ser más elevado frente a actuadores más convencionales. También son menos los fabricantes y empresas que comercian con estos actuadores por lo que en ocasiones es complicado llegar a adquirirlos.

4. Diseño

El diseño es una de las partes centrales de proyecto y por lo tanto en la que mayor tiempo se ha invertido. En este apartado se presenta la versión final del diseño. Primero se detallan los requisitos iniciales a partir de los cuales se comenzó el proceso de diseño y posteriormente la manera en que el diseño final cumple con dichos requisitos.

4.1. Requisitos

- El conjunto completo debe presentar unas dimensiones similares a las de los tentáculos presentados en el apartado *2. Estado del arte*.
- Debe constar de tres segmentos actuados de manera independiente con el objetivo de obtener un mayor rango de movimientos.
- Cada segmento debe alcanzar una inclinación de entre 30 y 40 grados en su extremo.
- Los actuadores que se empleen para mover el conjunto deben ser muelles de SMA.
- La estructura de los segmentos debe ser de silicona flexible.
- El sistema de unión entre los segmentos deberá posibilitar la manipulación de los actuadores cómodamente y su sustitución en caso de ser necesario.
- El montaje final debe poder efectuarse con facilidad de manera que el diseño sea replicable.

4.2. Consideraciones previas de los requisitos

4.2.1. Actuación con muelles de SMA

Dado que los muelles de SMA realizan fuerza a partir de su contracción es necesario convertir esta fuerza lineal en la flexión del segmento donde se encuentra el muelle. Para conseguir esta flexión se dispone el muelle en una cavidad que atraviesa el segmento cilíndrico de manera longitudinal. El hecho de integrar el muelle dentro del segmento permite obtener un diseño compacto. Para permitir el libre movimiento del muelle, la cavidad debe presentar un diámetro mayor al diámetro exterior del muelle. La contracción del muelle no se podría producir si este se encontrase rodeado de silicona. La cavidad no se encuentra en el centro del cilindro si no que está desplazada hacia la parte exterior del segmento.

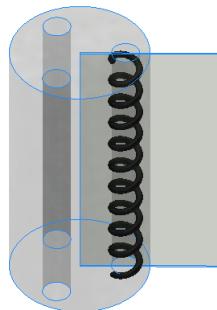


Figura 17: Disposición de un muelle dentro del segmento de silicona.

Con la configuración presentada en la Figura 17 se podría conseguir la flexión del segmento en torno a un único eje. Esto tendría como resultado un segmento con un único grado de libertad, mediante el cual solo se podría variar la posición en un plano. No se podrían obtener posiciones fuera del plano común al eje central del segmento y el eje central del muelle en reposo y la orientación del extremo podría cambiar solo dentro de este mismo plano. Para conseguir movilizar el segmento en más direcciones se disponen tres muelles en cada uno de los segmentos dispuestos como se indica en la Figura 18 (a). La actuación individual o combinada de los muelles separados 120 grados (Figura 18 (b)), permite flexionar el segmento en torno a múltiples ejes. Gracias a esta combinación cada segmento consta de 3 grados de libertad, 3 actuadores mediante los que se puede definir la posición de su extremo en un espacio tridimensional y dos rotaciones respecto a los ejes perpendiculares al eje central del segmento cuando se encuentra en reposo.

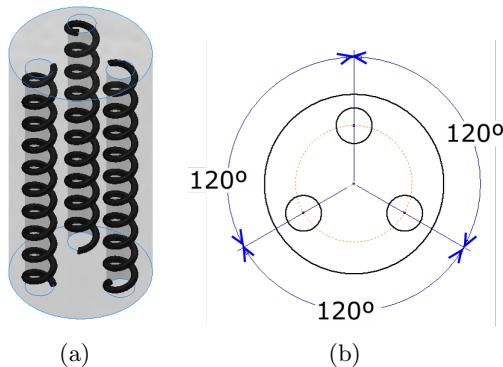


Figura 18: Disposición de los muelles dentro del segmento

Un único segmento actuado de esta manera puede posicionar su extremo en una superficie similar a un casquete de esfera. El radio de la esfera dependería directamente de la longitud del segmento como se muestra en la Figura 19. Como se ha indicado anteriormente, el extremo del segmento podría variar su posición en X, Y y Z y realizar rotaciones respecto de los ejes X y Y.

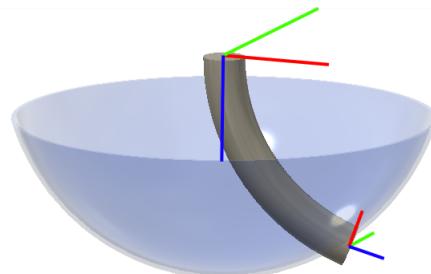


Figura 19: Rango de movimiento de un único segmento

4.2.2. Composición en segmentos

La composición en tres segmento amplía el rango de movimientos representado en la Figura 19. La concatenación de los movimientos de los distintos segmentos genera un rango de movimientos como el que se muestra a continuación.

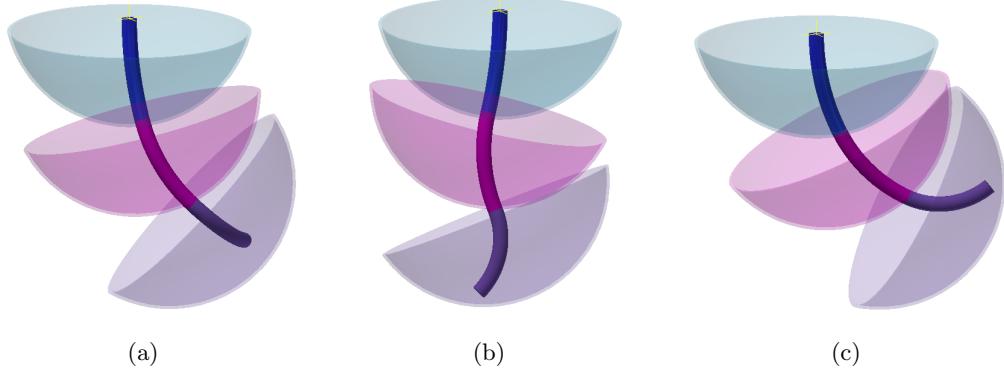


Figura 20: Rango movimientos de los tres segmentos

En este caso existen tres muelles por cada segmento, es decir, tres grados de libertad controlables. Puesto que el conjunto completo consta de tres segmentos, se obtienen 9 grados de libertad mediante los que se puede controlar la posición y la orientación del extremo libre. A pesar de incrementar el número de grados de libertad respecto a los que posee un único segmento, no es posible realizar una rotación respecto a eje Z. Dado que existen varios grados de libertad mediante los que controlar la misma posición, se puede afirmar que el diseño corresponde a un robot redundante, y puesto que los segmentos se disponen uno a continuación de otro, es un robot continuo. La Figura 20 muestra ejemplos de las configuraciones que podría alcanzar el robot y los rangos de movimientos de cada uno de los segmentos.

4.2.3. Estructura de los segmentos

Dado que cada segmento se actúa de manera independiente, los actuadores que flexionan cada segmento se extienden dentro de la longitud de cada uno de los segmentos. Esto quiere decir que los actuadores que mueven el segmento central empiezan y terminan en la parte superior e inferior de dicho segmento. Los cables de alimentación de los actuadores deben conectarse a la parte superior e inferior de cada uno de los actuadores, por los que deben disponerse cavidades por las que se puedan conducir dichos cables.

4.2.4. Elementos rígidos de los segmentos

Como se ha indicado anteriormente, la contracción de los muelles de SMA es la que produce la flexión de los segmentos. Para lograr esta contracción es necesario que los extremos de cada uno de los actuadores se encuentren debidamente asegurados en los extremos de cada segmento. Es necesario por tanto que exista un elemento rígido en el que sea posible realizar esta unión. Estos elementos se deben integrar dentro del cuerpo de silicona para lograr un diseño compacto.

4.2.5. Unión de los segmentos

El hecho de contar con tres segmentos que forman parte del conjunto, hace necesario incorporar un sistema de unión entre los segmentos. Este sistema de unión debe permitir el correcto montaje del conjunto así como su funcionamiento, es decir, la unión no se puede separar cuando se acciona el conjunto. Además se tiene en cuenta también la posibilidad de separar los segmentos cómodamente para poder sustituir los actuadores en caso de ser necesario. Los elementos seleccionados para realizar esta unión son imanes que se dispondrán en los extremos de cada uno de los segmentos.

4.3. Diseño y construcción

Para cumplir con todos los requisitos anteriores se han explorado varios diseños. A continuación se presenta el diseño seleccionado y se detalla su fabricación.

4.3.1. Discos

Los elementos principales del diseño son los elementos rígidos que se integran en el cuerpo de silicona. Se trata de discos impresos mediante impresora 3D en PLA dispuestos en los extremos de cada segmento. Estos discos determinan la posición de las cavidades en las que posteriormente se colocaran tanto los muelles de SMA como los cables de alimentación. Como se verá a continuación, estos discos forman parte del sistema de unión entre segmentos. También constituyen el soporte rígido necesario para anclar los extremos de los muelles de SMA de manera que la fuerza que genera su contracción flexione la silicona. Los detalles del diseño de los discos se pueden consultar en el *Anexo V: Planos*.

Cada disco presenta 9 agujeros pasantes de diámetro D1 por los que se introducirán varillas cilíndricas del mismo diámetro que conformarán las cavidades del cuerpo de silicona. Presentan también un orificio central de diámetro D2 a través del cual se dispondrán una varilla del mismo diámetro para crear una cavidad central. Los discos tienen 9 huecos en los que se introducen 9 imanes cilíndricos que conforman el sistema de unión. Se disponen también tres cavidades en los discos en las cuales se encargarán las piezas que fijaran los extremos de los muelles en sus posiciones (Topes).

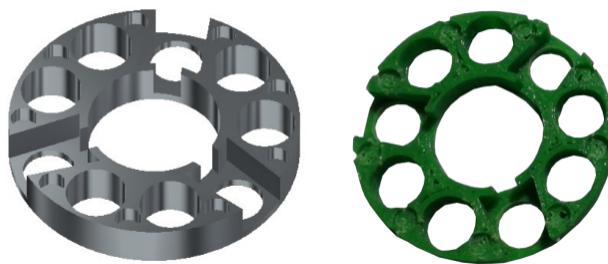


Figura 21: Disco

Los tres segmentos presentan el mismo montaje por lo que a continuación se presenta el montaje de un único segmento.

El proceso comienza con la colocación de los imanes y los topes en los discos. Los imanes deben quedar unidos al disco de manera que no se separen durante el funcionamiento del robot. Para asegurar esta unión se emplea pegamento. Por su parte los topes que se colocan inicialmente no deben quedar fijos, puesto que será necesario retirarlos más adelante. En la Figura 22 se puede observar el detalle de este montaje inicial. Cada segmento contiene dos discos con los elementos dispuestos como se ha indicado hasta el momento.

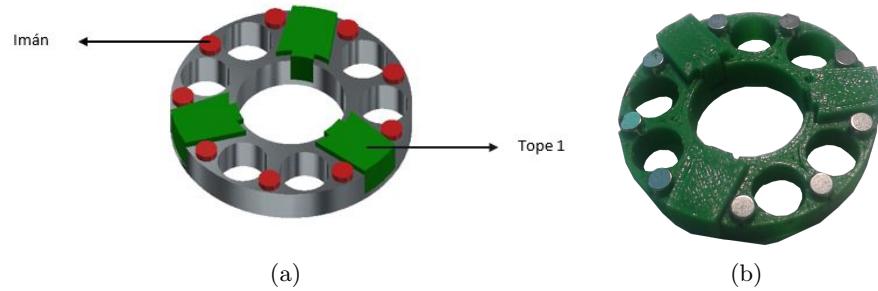


Figura 22: Disco con imanes y topes iniciales

4.3.2. Estructura rígida

A continuación se disponen las 9 varillas de diámetro D1 coincidiendo con los huecos de los discos, y la varilla central de diámetro D2. Los discos se sitúan en los extremos de las varillas de manera que los huecos para los topes en el disco superior e inferior coincidan en la misma vertical, como muestra la Figura 23. La longitud de las varillas se determina en el apartado 4.6. *Justificación de la longitud del segmento*.

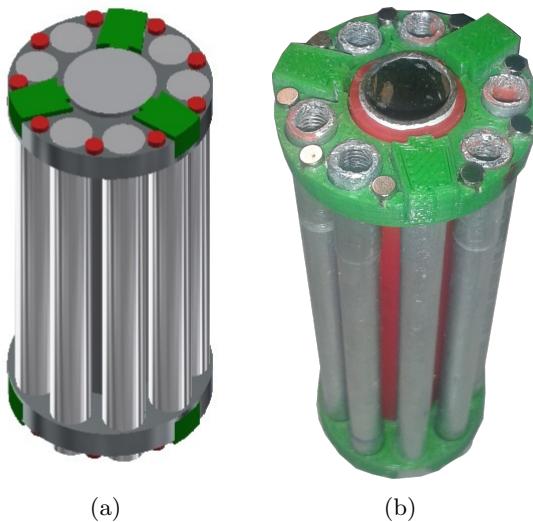


Figura 23: Estructura de varillas y discos

La estructura se introduce en un molde cilíndrico de diámetro interno D3 sellado por su parte inferior, donde posteriormente se vierte la silicona. La silicona empleada es silicona de platino translúcida, Platsil GEL-0030 (<https://www.feroca.com/es/platsil-silicona-de-platino-/690-platsil-gel-0030-silicona-de-platino-.html>). Se trata de una silicona blanda en dos partes para molde. La estructura debe quedar centrada en el molde, de manera que exista la misma distancia entre todos los puntos de la estructura y la cara interior del molde. La silicona debe cubrir por completo la estructura dentro del molde. Una vez seca la silicona, se retira el molde. La Figura 24 presenta la estructura cubierta de silicona una vez esta se ha curado.



Figura 24: Estructura con silicona

En el siguiente paso se retiran las varillas y los topes. Los topes que se colocaron inicialmente deben retirarse para poder retirar las varillas del interior del segmento de silicona. En aquellas posiciones donde no existan topes se retiran las varillas directamente. La Figura 25 muestra el segmento de silicona con los huecos longitudinales en un interior, y los discos y los imanes en el interior del cuerpo de silicona. Como se indica en la figura existe un espacio libre de silicona correspondiente a los topes retirados.

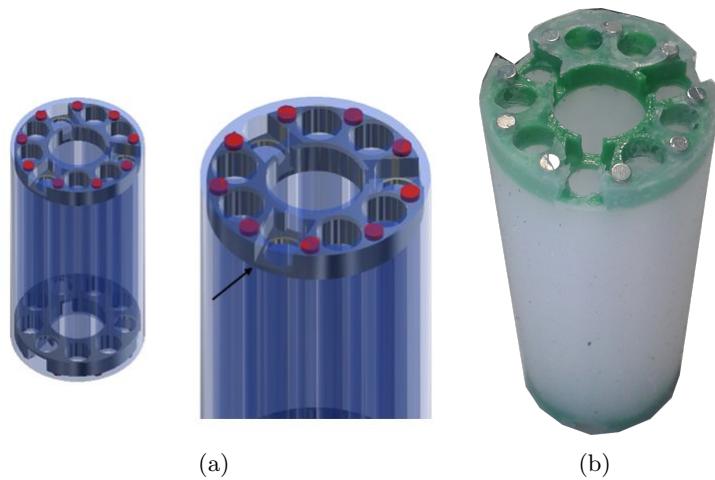


Figura 25: Segmento sin topes

4.3.3. Estructura blanda

Las posiciones en las que se encontraban los topes son las que alojan los muelles de SMA. Como se ha indicado anteriormente, los extremos de los muelles deben asegurarse a elementos rígidos. Para ello, unos nuevos topes se colocarán en el lugar de los primeros como se indica en la Figura 26.

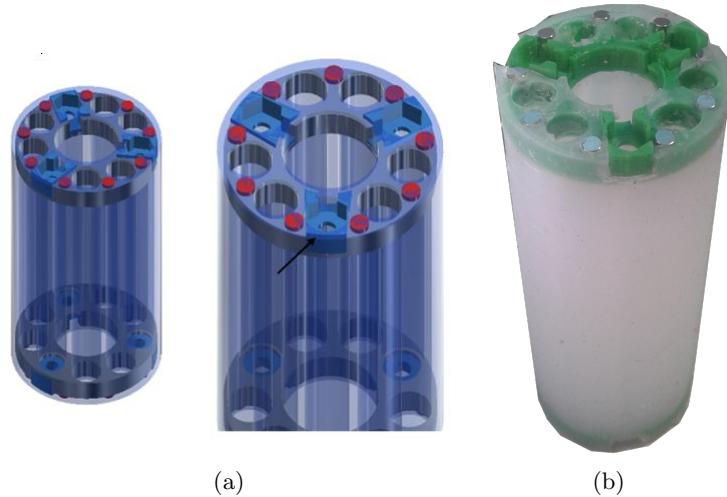


Figura 26: Segmento con topes definitivos

Esta sustitución es necesaria para poder disponer de las cavidades generadas por las varillas de diámetro D1 en el interior del segmento, y un diámetro D4 menor que D1 en los extremos del segmento. Los nuevos topes permiten fijar los extremos de los muelles a los elementos rígidos que son los discos como se detalla en la Figura 27 (la disposición de los muelles en el interior del segmento no es apreciable en el montaje). Los detalles de ambos tipos de topes se pueden consultar en *Anexo V: Planos*.

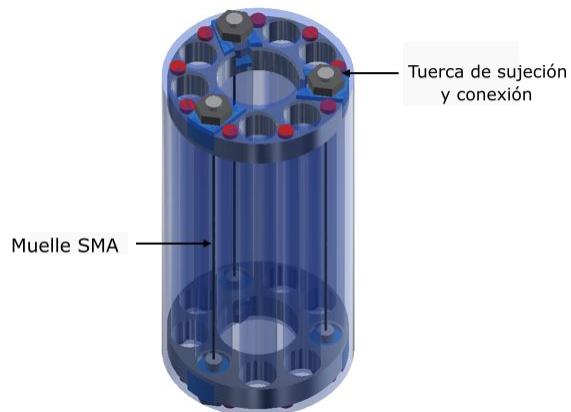


Figura 27: Segmento con muelles de SMA

4.3.4. Conexiones

Por último se unen los cables de alimentación, destacados en rojo y negro en la Figura 28, a cada uno de los muelles. Por la parte superior del segmento se une cada muelle de SMA a la fuente de alimentación, mientras que por la parte inferior retornan los cables desde cada muelle hasta el punto de conexión con el transistor. Los cables empleados para las últimas de las conexiones mencionadas se conducen por la cavidad central del segmento, hasta la parte superior. Los detalles de las conexiones eléctricas se pueden ver en el apartado 4.7. *Electrónica*.

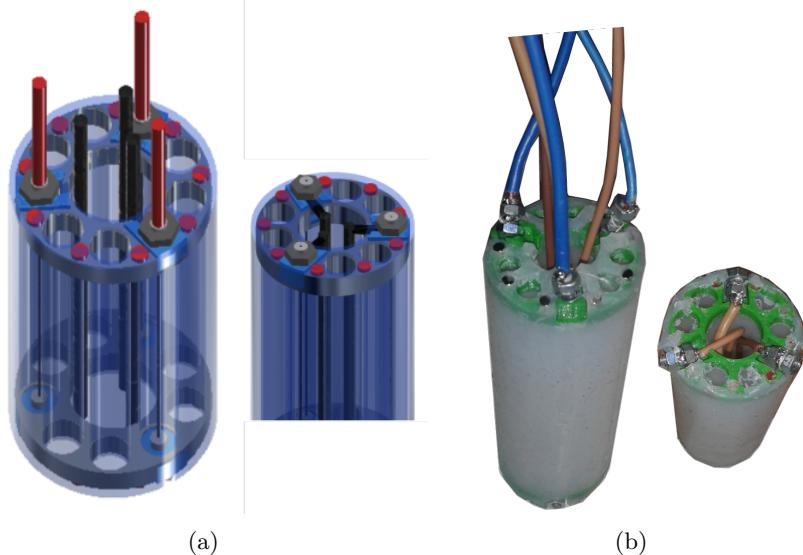


Figura 28: Disposición de los cables de alimentación en los segmentos

Llegado este punto cada segmento podría conectarse de manera independiente y funcionar. No obstante para ampliar el rango de movimientos se unen tres segmentos como se ha comentado anteriormente. La unión de los segmentos se realiza gracias a los imanes que se disponen en los extremos de cada uno de los segmentos. Es importante prestar atención a la posición relativa entre los segmentos. Los muelles de cada uno deben conectarse directamente con sus puntos de conexión, lo que obliga a conducir los cables de alimentación de manera ordenada por el interior de los segmentos de silicona.

La manera de realizar las conexiones es igual en los tres segmentos y se corresponde con la mostrada en la Figura 28. La única diferencia es la longitud de los cables de alimentación. En la Figura 29 se muestra la conexión del módulo inferior y como los cables de alimentación de los tres muelles de SMA recorren los dos segmentos superiores. Para mayor claridad se ha prescindido en esta figura de la representación del cuerpo de silicona.



Figura 29: Disposición de los cables de alimentación

Es necesario destacar que las posiciones que los muelles ocupan dentro de cada uno de los módulos se encuentren desfasadas 40 grados. Esto es necesario para asegurar que los cables de alimentación disponen de un paso libre de obstáculos hasta llegar a la parte superior del conjunto.

4.4. Muelles

4.4.1. Fabricación de muelles

Existen muelles de SMA que los distintos fabricantes ponen a disposición del consumidor. A pesar de ello se ha decidido fabricar los muelles a partir de cables de SMA. Existen varios motivos para ello:

- Los muelles de SMA de fabrica tiene un precio mayor a los cables de SMA.
- La fabricación permite obtener muelles con las características que más se aproximen a los requisitos.
- Se puede elevar el número de ensayos con un coste menor.

4.4.2. Requisitos de los muelles

Los muelles que actúan los distintos segmentos de silicona deben cumplir con dos requisitos principales. El primero de estos requisitos es que puedan realizar una contracción que permita flexionar los segmentos de silicona hasta la inclinación deseada. El segundo es que puedan desarrollar la fuerza necesaria para realizar dicha flexión.

La longitud que se necesita contraer el muelle está directamente relacionada con la longitud del propio segmento y con el ángulo que de desea inclinar el extremo del segmento. La longitud del segmento se discute en el apartado *4.6 Justificación del largo*, pero para presentar los cálculos de los muelles fabricados se adelanta que es de 80 mm. Por lo tanto el muelle tendrá que presentar una longitud de **80mm cuando el segmento se encuentre en reposo**. También es necesario indicar que para alcanzar la inclinación deseada de entre 30 y 40 grados de inclinación, es necesaria una contracción de entre 20 y 30 mm. Estos valores se obtiene del mismo ensayo en el que se analiza la longitud del segmento. Se establece un valor medio de **25 mm de contracción** para realizar los cálculos.

El cable de SMA seleccionado es un cable de Nitinol de un diámetro de 0.5 mm. Diferentes ensayos con cables de menor diámetro dieron resultados negativos en cuanto a la fuerza necesaria. No se han contemplado hilos de grosos mayores puesto que aumentarían el tamaño de los segmentos que componen el conjunto. Se selecciona una varilla roscada de métrica M3, que presenta un diámetro de **3 mm**. Este diámetro se lo suficientemente pequeño para poder integrar el muelle en el diseño y al mismo tiempo permite arrollar el cable de SMA. Cuanto menor es el diámetro de la varilla que se pretende arrollar el cable, más tensión se genera en el proceso. Esta tensión puede llegar a romper el cable. A continuación se presentan los cálculos para un muelle que cumpla con las características expuestas.

4.4.3. Proceso de fabricación

En este apartado se presenta el proceso que comienza con el cable de SMA y termina con el muelle. Para fabricar un muelle a partir de un cable de SMA, el primer paso es arrollar el cable de manera que se consiga la disposición en espiras. Para llevar a cabo este proceso se ha tomado como referencia el proceso explicado en [2]. En el método expuesto en el artículo de M Follador et all, el cable de SMA se arrolla sobre una varilla lisa y se emplean dos piezas tipo prensa en los extremos para asegurar el cable. En lugar de ello, se ha empleado una varilla roscada con los bordes limados como se puede observar en la Figura 30.



Figura 30: Varilla con extremos limados

Con los extremos de la varilla roscada limados se comienza el proceso de arrollar el cable. Para ello se comienza fijando el cable en uno de los extremos de la varilla con ayuda de una tuerca. Con un extremo del cable fijo se realiza el arrollamiento sobre la varilla. Finalmente se fija el extremo opuesto del cable en el extremo libre de la varilla igual que al inicio del proceso. Las imágenes de la Figura 31 muestran los pasos descritos.

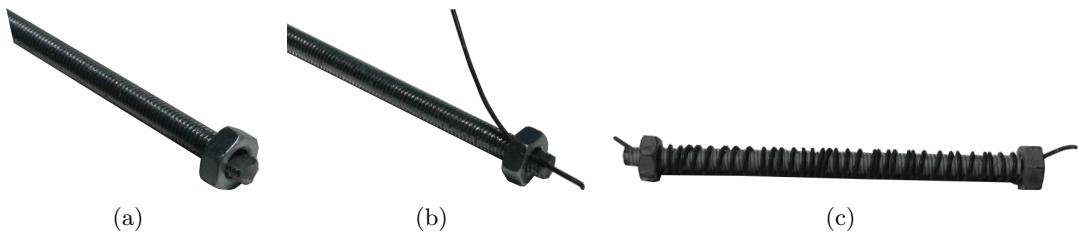


Figura 31: Fabricación del muelle: a) Extremo limado con tuerca. b) Cable de SMA fijo en el extremo. c) Cable arrollado sobre varilla roscada.

Con el cable arrollado sobre la varilla y sus extremos asegurados, se pasa al tratamiento térmico. Es necesario elevar la temperatura del cable de SMA hasta 500 grados para que este "memorice" la disposición en muelle [2]. La curva de calentamiento a la que se ha sometido el cable arrollado es la que se observa en la gráfica de la Figura 32.

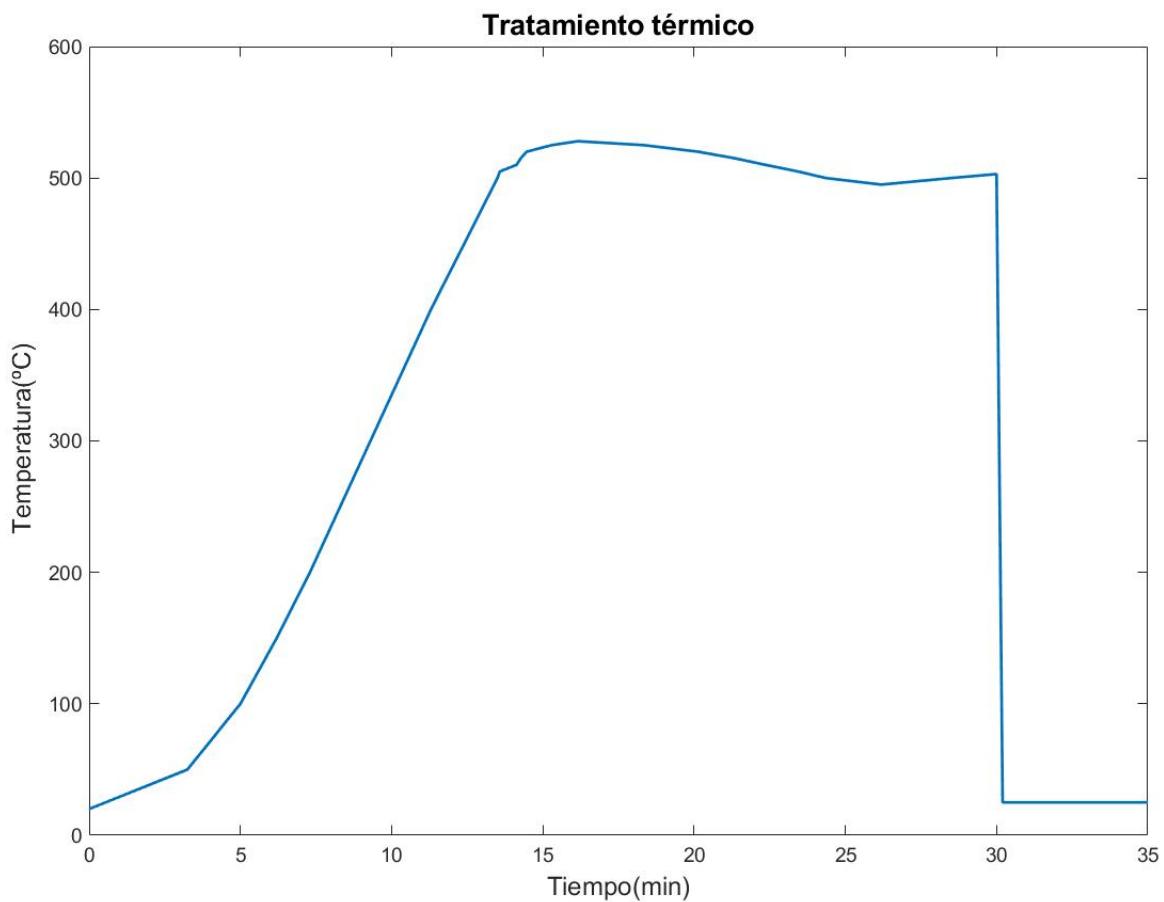


Figura 32: Tratamiento térmico

La curva de calentamiento presenta el tiempo que tarda en estabilizarse la temperatura en torno a los 500 °C. Cuando se alcanza la temperatura objetivo se mantiene 15 minutos para después enfriarlo a temperatura ambiente. Con este último proceso se concluye la fabricación de los muelles de SMA. Tras retirarlos de la varilla roscada puede montarse en el conjunto con las conexiones pertinentes.

4.4.4. Desarrollo de los cálculos

Las ecuaciones mediante las que se realizan los cálculos pueden encontrarse también en [2]:

$$F = \Delta x * K \quad (1)$$

$$K = \frac{G * d^4}{8 * D^3 * N} \quad (2)$$

donde

- $\Delta x = 25\text{mm}$ es la elongación del muelle.
- $F=981\text{ N}$ es la fuerza de elongación empleada. Es una aproximación experimental de la fuerza que realiza el segmento de silicona para retornar a su posición de reposo.
- K es la constante de elasticidad del muelle
- $G = 10,8 * 10^9 (\frac{N}{m^2})$, es el módulo de cizalladura del material con el que se fabrica el muelle (citar referencia)
- $d=0.5\text{ mm}$ es el diámetro del hilo con el que se fabrica el muelle
- $D=4\text{ mm}$ es el diámetro exterior del muelle
- N es el número de espiras del muelle

A partir de los parámetros establecidos, empleando la ecuación (9) se puede deducir que:

$$K = \frac{981}{25 * 10^{-3}} = 39240(\frac{N}{m}) \quad (3)$$

Con la constante de elasticidad obtenida y la ecuación (2) se puede calcular el número de espiras.

$$N = \frac{10,8 * 10^9 * 0,5^4}{8 * 4^3 * 39240} = 33,6 \rightarrow 34\text{espiras} \quad (4)$$

Según los cálculos expuestos, es necesario arrojar el cable de SMA sobre la varillas roscada, en 34 espiras. La longitud en la que deben extenderse estas 34 espiras es:

$$\Delta x = l - l_0 = 80 - l_0 = 25\text{mm} \rightarrow l_0 = 55\text{mm} \quad (5)$$

La longitud de cable empleada en la fabricación de este muelle es:

$$\pi * d_{med} = l_{deunaespira} \quad (6)$$

$$\pi * 3 \approx 9,5\text{mm} \quad (7)$$

Siendo d_{med} el diámetro medio de muelle, puesto que $D=4\text{ mm}$ y $d=0.5\text{ mm}$ ($4 - 2 * 0,5 = 3$). Por lo tanto la longitud del cable empleado en este muelle es:

$$9,5\text{ mm por espira} * 34\text{ espiras} = 323\text{ mm de cable} \quad (8)$$

4.5. Justificación del diámetro

Una vez establecidas las características del diseño y los distintos elementos que forman parte del conjunto, se detallan las dimensiones.

Dado que la estructura principal de los segmentos es el cuerpo de silicona y se pretende conseguir la máxima flexión posible, se decide fijar el grosor de las paredes en 2mm. Se entiende por paredes las zonas entre las cavidades y el exterior del cuerpo de silicona, o las cavidades periféricas y la cavidad central. Conseguir un espesor inferior a 2 mm en el proceso de fabricación es complicado puesto que los moldes no pueden ser alineados a la perfección. Además un espesor de pared muy pequeño podía suponer la destrucción del segmento ante pequeños cortes derivados de la manipulación del mismo. Por otra parte, cuanto mayor sea el espesor, más resistencia a la flexión existe por parte del segmento, lo que supone un mayor esfuerzo por parte de los muelles.

Otro de los factores determinantes es la fuerza que los imanes tienen que soportar. En estado de reposo, los imanes deben asegurar que los segmentos se encuentran unidos. En este caso la fuerza que deben soportar es la del peso de los segmentos que cuelgan de ellos. Cada segmento pesa alrededor de 50 g. Pero es durante el funcionamiento del conjunto cuando se generan fuerzas que tienden a separar los puntos de unión. Es por esto por lo que es necesario distribuir los puntos de unión sobre las superficies de contacto, de manera que el esfuerzo se reparta entre varios puntos y no se concentre en uno solo. Al mismo tiempo se debe asegurar que en caso de ser necesario, los segmentos pueden separarse cómodamente, sin dañar los elementos. Debido a esto los imanes no puede presentar una fuerza de unión demasiado grande.

Tras realizar distintas pruebas, con distinto número de imanes repartidos por la superficie de contacto entre los segmentos se concluyó que la mejor solución era distribuir pequeños imanes cilíndricos. El espacio seleccionado para localizar los imanes es el existente entre las cavidades de los segmentos. Los imanes de neodimio de 3mm de diámetro y 2 mm de altura poseen una fuerza de atracción de 252 g (<http://www.greenstuffworld.com/es/imanes-neodimio-n52/504-imanes-neodimio-3x2mm-50-unidades-n52.html>). Nueve de estos imanes distribuidos en la superficie de contacto entre los segmentos aseguran que los segmentos se encuentran unidos durante el funcionamiento del robot.

Como se explicó en el apartado de *4.4.1. Fabricación de muelles*, el diámetro exterior de los muelles de SMA que se emplean es de 4mm. Según esto, las cavidades que contienen los muelles de SMA deben presentar un diámetro mayor al de los muelles para asegurar la correcta contracción de los mismos. Se decide que las cavidades deben presentar un diámetro de 6 mm para asegurar el correcto funcionamiento de los muelles.

Todas las dimensiones expuestas anteriormente, se ven reflejadas en el diseño de los discos que se colocarán en los extremos de los segmentos. La justificación del diámetro de los segmentos viene dada por tanto por la dimensión de los discos. Hay que tener en cuenta que los discos quedan rodeados enteramente por silicona, por lo que al diámetro exterior del disco (33 mm) es necesario añadirle 2 mm correspondientes al grosor de las paredes exteriores, lo que hace un diámetro exterior de los segmentos de 35 mm.

4.6. Justificación de la longitud del segmento

Una vez expuesto el diseño y justificado el diámetro necesario, se determina la longitud que deben presentar los segmentos. Esta longitud debe ser un compromiso entre la inclinación que se desea obtener en el extremo libre de un segmento y la fuerza que pueden desarrollar los muelles de SMA. La manera de realizar el análisis es mediante la construcción de un segmento de las mismas características que el expuesto en los apartados anteriores, pero sin los elementos rígidos que lo componen. Únicamente se estudia un segmento de silicona con las cavidades correspondientes como se muestra en la Figura 33.



Figura 33: Segmento de silicona sin componentes rígidos

Este segmento de ensayo se dispone en el banco de pruebas de la misma manera que se colocará posteriormente el robot. El ensayo consiste en someter este segmento a las fuerzas de flexión que producen distintas masas. Para ello se introducen hilos por las cavidades de la misma manera que se dispondrán los muelles de SMA, tres hilos con una separación de 120 grados. Uno de los extremos de cada hilo quedará fijado a la parte inferior del segmento, mientras que el otro extremo saldrá por la parte superior del segmento. Dos de los hilos aseguran la posición de reposo del segmento y en el tercero se dispone una masa que flexiona el segmento. En función de la masa y la longitud del segmento se producirá una flexión del segmento, y el extremo libre presentará una inclinación determinada (Figura 34).

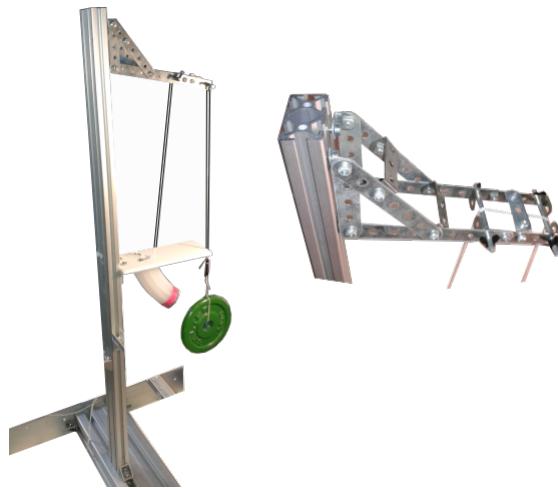


Figura 34: Ensayo de longitud de segmento

La variación de la longitud del segmento se consigue retirando una cantidad de silicona determinada para cada ensayo. Se trata por lo tanto de un ensayo destructivo. Las masas que producen la flexión van desde 0 a 1000 gramos a intervalos de 50 gramos. Cada segmento se ensaya con todas las masas tres veces, flexionando en cada ocasión en una orientación diferente del segmento. La repetición del ensayo en distintas direcciones del segmento permite minimizar los errores debidos a la fabricación del cuerpo de silicona o al corte para obtener las diferentes longitudes. De los tres ensayos realizados para cada longitud se obtienen los valores medios de la inclinación en el extremo que se presentan en la gráfica de la Figura 35.

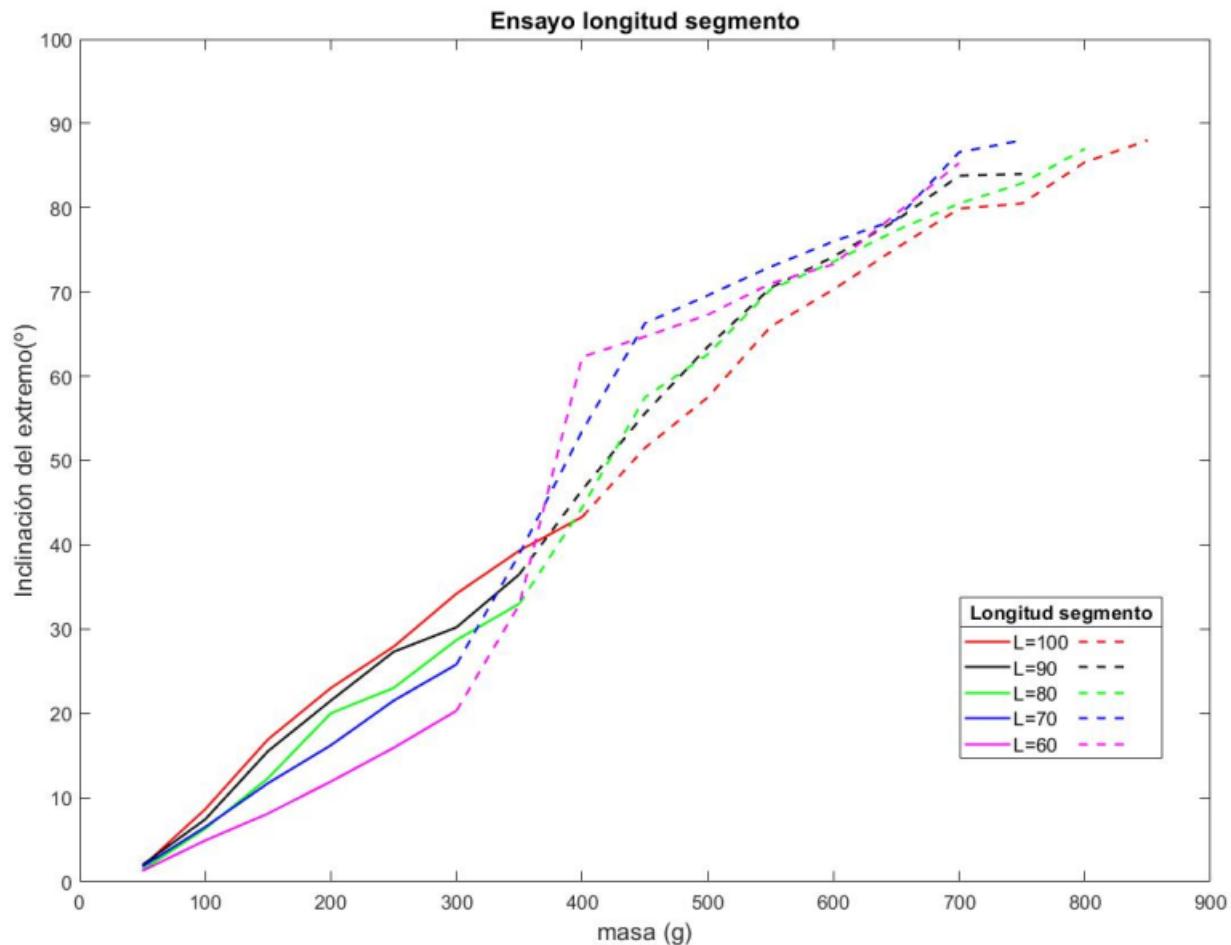


Figura 35: Ensayo de longitud de segmento

Tal como describe la gráfica de la Figura 35, las curvas relacionan la fuerza ejercida por la masa con la inclinación del extremo del segmento. Cada línea muestra una discontinuidad a partir de ciertos valores. Esta discontinuidad se corresponde con la aparición de pliegues en el segmento de silicona (Figura 36). Debido a estos pliegues, la relación entre la masa y la inclinación del extremos del segmento deja de ser progresiva y se produce un cambio brusco en la inclinación del segmento.

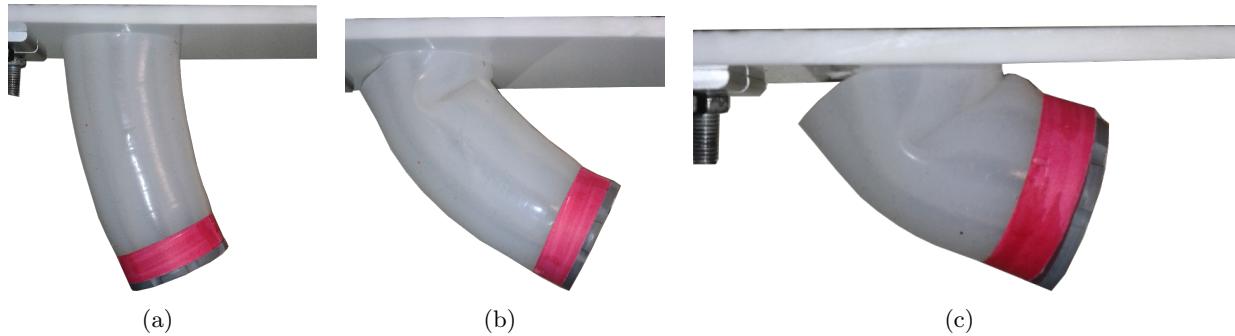


Figura 36: a) Flexión controlada del segmento. b) Aparición de pliegues en la base del segmento. c) Segmento completamente flexionado con pliegues

Por otra parte, para cada longitud de segmento, este alcanza un determinado valor de masa. Esto se debe a que la inclinación del extremo del segmento sobrepasa los 90 grados o se encuentra muy próximo a este valor, pero los pliegues que se generan no muestran un comportamiento relevante del segmento de silicona. Las longitudes del segmento ensayadas varían 10 mm entre ellas, desde los 100 mm hasta los 60 mm. Los ensayos realizados muestran que cuando se reduce la longitud del segmento los pliegues aparecen con fuerzas menores. Puesto que para el segmento de 60 mm, no se pueden alcanzar los 30 grados de inclinación con un comportamiento estable, no tiene sentido reducir la longitud del segmento.

Por lo tanto, según los datos presentados, el segmento de mínima longitud que puede alcanzar una inclinación de entre 30 y 40 grados, antes de la aparición de pliegues, es el de 80 mm de longitud. Para que el extremo de este segmento alcance la inclinación deseada es necesaria una masa de entre 300 y 400 gramos. El ensayo completo del segmento de 80 mm de longitud se detalla en la gráfica de la Figura 37.

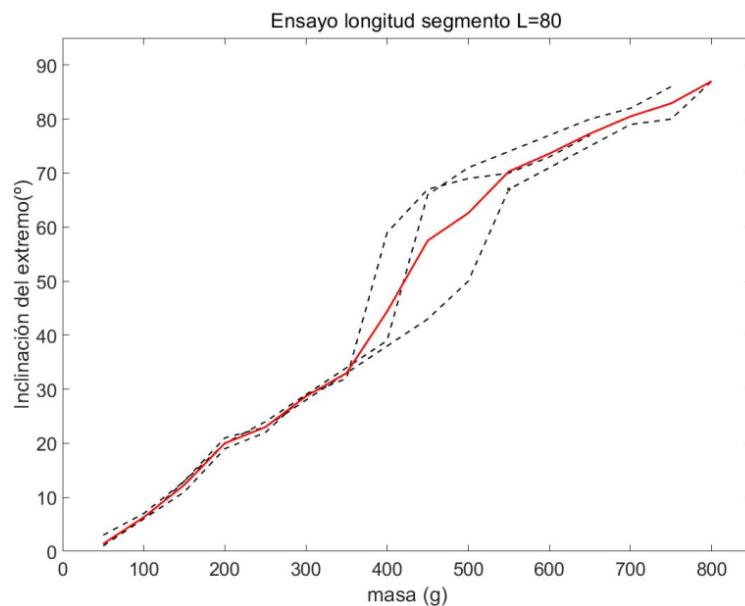


Figura 37: Ensayo segmento L=80 mm

4.7. Electrónica

A continuación se presenta el esquema de conexiones. Los elementos empleados son:

- Dos placas Arduino UNO
- 9 transistores mosfet IRF 540N
- 9 resistencias de 10 K
- 9 muelles de SMA
- Una fuente de alimentación de 12V y 18A

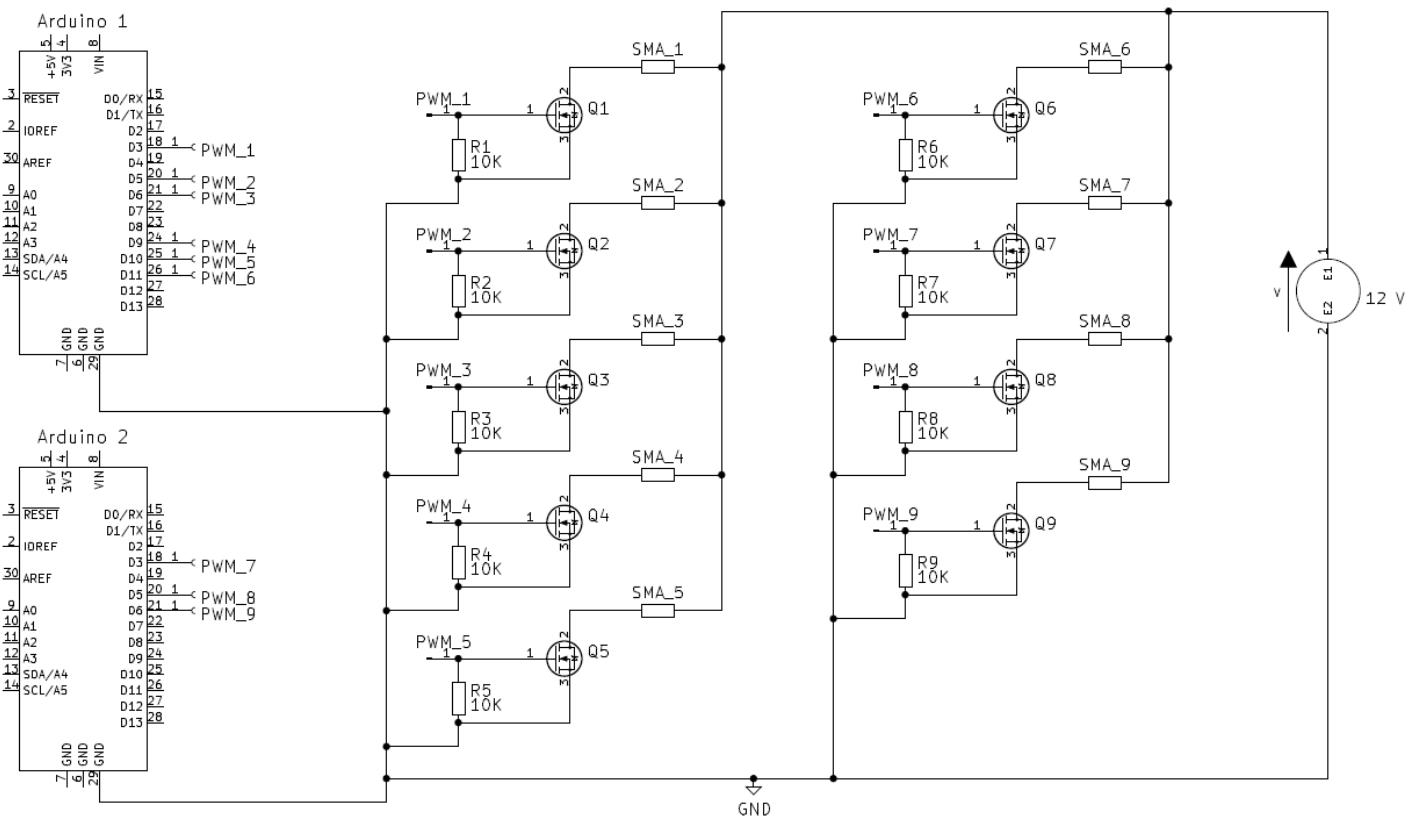


Figura 38: Esquema de conexiones

Como se aprecia en el esquema de la Figura 38 se emplea la misma estructura 9 veces. Cada conjunto de componentes necesario para activar el muelle de SMA se encuentra conectado a la fuente de alimentación. Es necesario destacar que para realizar la activación de cada muelle son necesarios en torno a 2 amperios de corriente y que únicamente se podrían activar hasta un máximo de 6 muelles en cada movimiento, dos por cada segmento. Con esto se termina que la fuente de alimentación capaz de entregar hasta 18 amperios es suficiente para alimentar el robot.

Existen diferentes métodos para realizar la activación de los actuadores SMA [9]. En este caso se emplean transistores mosfet conectados a la fuente de alimentación y controlados por una señal PWM [10] procedente de las placas Arduino Uno. Puesto que cada placa Arduino UNO solo posee 6 salidas PWM, es necesario emplear dos para poder controlar los 9 muelles de SMA. Las salidas PWM permiten modular el pulso de salida de manera que se pueda obtener un voltaje intermedio entre 0 y 5. Es necesario poder regular la salida de voltaje de la placa puesto que es la señal que controla el paso de corriente que activa cada uno de los muelles. La señal de salida de cada uno de los pines PWM procede de la programación implementada en el ordenador central.

Como se ha indicado anteriormente cada señal de activación de la PWM se conecta a la entrada del transformador mosfet. De esta manera se puede controlar la corriente que pasa desde la fuente al drenador. Esta corriente fuente- drenador, es la que circula por el muelle de SMA por lo que es la que se emplea para que el muelle alcance su temperatura de activación, 45° en el caso en el caso de cable empleado.

Todos estos elementos se han colocado en una placa de prototipado rápido en bloque independientes tal como se muestra en la Figura 39. Los muelles de SMA se colocan en las posiciones correspondientes dentro de los segmentos de silicona, tal como se explicó en el apartado *4.3. Diseño y construcción*.

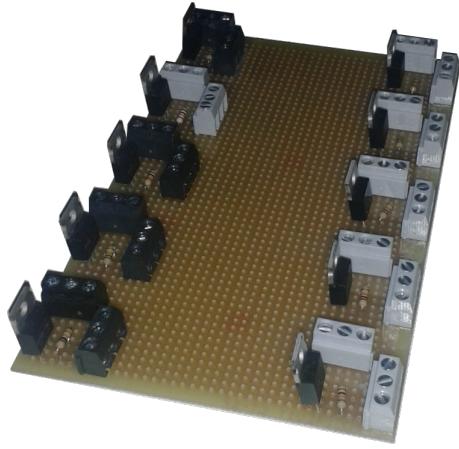


Figura 39: Placa de conexiones con circuitos independientes para la activación de los muelles SMA

5. Sistema de visión

En este punto el conjunto es capaz de moverse si se activan los muelles. Para saber si los movimientos que realiza el robot cumplen con las especificaciones iniciales, es necesario desarrollar un sistema capaz de medir la disposición de los distintos segmentos del robot y del extremo libre. Una de las ideas preliminares fue disponer sensores de flexión en las paredes exteriores del robot. De esta manera al producirse una flexión variarían las resistencias de dichos sensores. La interpretación de las resistencias haría posible determinar la configuración del robot. Esta idea fue descartada por varias razones. Una de ellas es que la disposición de estos sensores aportaría resistencia a la flexión de los segmentos. Por otra parte la interpretación de la variación de las resistencias sería compleja y no proporcionaría información sobre la posición de los extremos de los segmentos.

Como alternativa se decidió emplear un sistema de visión que capturara los movimientos del conjunto. Este tipo de sistema es empleado en entornos de rehabilitación [24], en los que se captura el movimiento de las extremidades del paciente, o en el control de robots bioinspirados como la medusa presentada en [23]. En el primero de los casos citados se emplea un dispositivo Kinect (RGB-D) que permite una reconstrucción tridimensional precisa de las extremidades del paciente que realiza la rehabilitación. En el segundo caso se emplea una cámara de alta velocidad mediante la que se captura la posición de marcas colocadas sobre el robot.

Al igual que en [23], se decide disponer marcas sobre el robot para calcular las posiciones que el conjunto es capaz de alcanzar. En el caso de la medusa los movimientos se producen en el plano por lo que únicamente se deben captar movimientos en X e Y. Una única cámara es suficiente para determinar la posición del robot. En el caso que se expone aquí, el robot puede realizar movimientos en tres dimensiones por lo que no sería suficiente emplear una única cámara. Se disponen por tanto dos cámaras de manera lateral al robot. Con esta disposición se obtienen dos perspectivas diferentes del robot, lo que también supone una ventaja frente a la reconstrucción que se podría realizar con un dispositivo RGB-D. Cada una de las cámaras captura el desplazamiento del robot en el plano correspondiente como se muestra en la Figura 40. Los datos que se obtienen de cada una de las cámaras se ponen en común para obtener la posición de las marcas respecto a un sistema de referencia situado en la parte superior del robot.

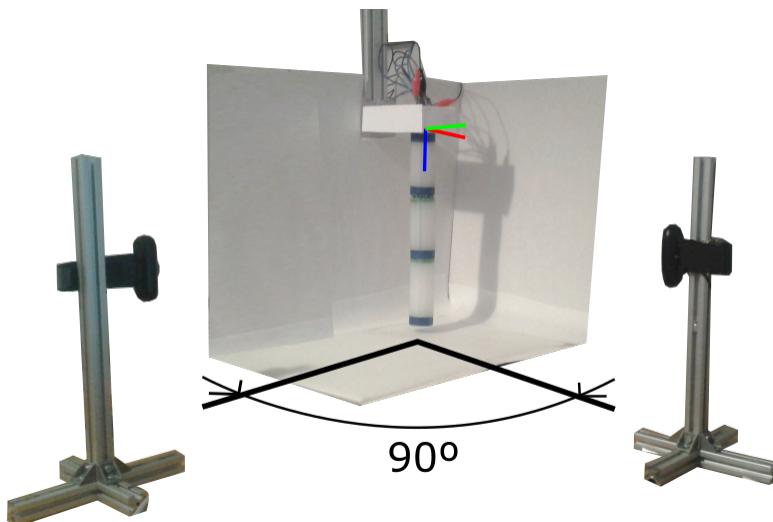


Figura 40: Disposición de las cámaras del sistema de visión

Las marcas que se disponen sobre el robot son anillos que rodean los extremos de los segmentos por lo que la inclinación de los segmentos produce una inclinación en las marcas. En las imágenes capturadas por las cámaras estos anillos son percibidos como rectángulos. Mediante el tratamiento de las imágenes es posible determinar la inclinación del eje mayor de rectángulo, y por tanto la inclinación del extremo del segmento. Este proceso no se podría llevar a cabo si se empleasen marcas circulares, puesto que no sería posible determinar la inclinación de un eje característico.

5.1. Tratamiento de las imágenes

El sistema de visión ha sido implementado en Matlab, empleando las distintas herramientas que el software pone a disposición del usuario. Inicialmente se empleó segmentación de las imágenes basándose en colores. Para ello se empleó la App de Matlab **Color threshold** (<https://www.mathworks.com/help/images/image-segmentation-using-the-color-threshold-app.html>). Este tipo segmentación daba resultados aceptables en los ensayos preliminares cuando la cámara se situaba a poca distancia del robot y las condiciones de iluminación eran adecuadas. Con el cambio de entorno y el aumento de la distancia de las cámaras, para captar el conjunto completo se comenzaron a detectar errores. Debido a ello se exploró otro método para la detección de las marcas.

La función empleada es ***detectMSERFeatures*** (<https://www.mathworks.com/help/vision/ref/detectmserfeatures.html>). Mediante esta función se obtienen regiones acotadas a partir de una imagen en escala de grises. Este método es menos sensible al cambio de luminosidad y a la distancia a la que se encuentran los elementos que se desean detectar. La estructura de datos que proporciona esta función incorpora datos como la inclinación del eje mayor de la elipse que envuelve la región de interés, por lo que no es necesario extraer información de las imágenes después de su segmentación como ocurría con la segmentación basada en escala de colores. Para mejorar la identificación de las marcas y evitar futuras modificaciones, se dispuso el robot frente a un fondo blanco y se iluminó la escena con focos de luz auxiliares además de la luz ambiente.

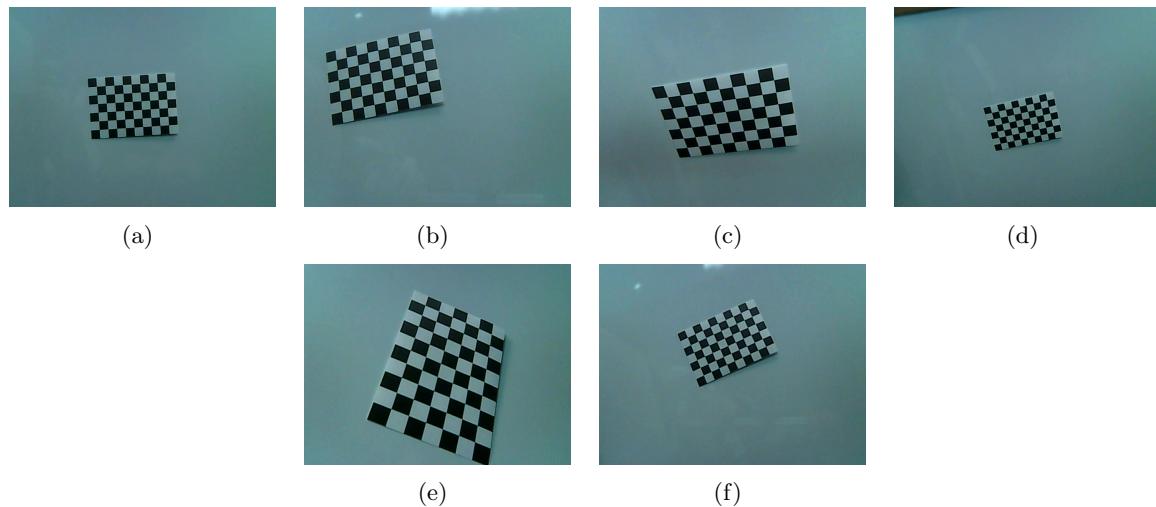


Figura 41: Imágenes de calibración

Una vez identificadas las marcas dispuestas en el robot es necesario determinar los parámetros de las cámaras que permiten transformar las dimensiones en píxeles capturadas por las cámaras en las dimensiones reales. Para ello se emplea la App de Matlab **Camera Calibration** (<https://www.mathworks.com/help/vision/ug/single-camera-calibrator-app.html>). Esta aplicación permite obtener los parámetros internos de la cámara a partir de un conjunto de imágenes de calibración. Tal como se muestra en la Figura 41 se trata de capturas de un recuadro de calibración desde distintas posiciones. Por otra parte se obtienen las matrices de transformación que permiten pasar de coordenadas de la imagen a coordenadas del mundo. Para ello es necesaria una última imagen del recuadro de calibración situado a la misma distancia a la que se ubicará posteriormente la cámara del robot. Introduciendo los parámetros de la cámara y la última imagen mencionada en la función **extrinsics()** (<https://www.mathworks.com/help/vision/ref/extrinsics.html>) se obtienen las matrices de traslación y rotación. Finalmente las coordenadas en píxeles obtenidas de cada una de las imágenes se transforman en coordenadas en mm a partir de la función **pointsToWorld()** (<https://www.mathworks.com/help/vision/ref/cameraparameters.pointstoworld.html>). El dato de la inclinación no necesita transformarse como las coordenadas de posición puesto que desde el inicio se proporciona la inclinación respecto a la horizontal. Si es necesario realizar su transformación de radianes a grados.

5.2. Especificaciones del sistema

Una vez expuesto el sistema de visión y explicado el proceso mediante el que se obtienen los datos, se procede a realizar una serie de ensayos mediante los que se detalla la precisión del sistema desarrollado. Las cámara empleadas no son del mismo modelo, por lo que las características de una no se corresponden con las de la otra. Se presentan los ensayos de ambas cámaras, teniendo en cuenta que el proceso de calibración descrito anteriormente se ha realizado previamente para cada una de ellas.

Los ensayos realizados consisten en la captura de imágenes en las que se disponen las marcas a identificar en posiciones conocidas. Tomando como referencia una de ellas, la de la parte superior de la imagen, se pretende determinar la exactitud con la que el sistema determina la posición de la otra. Se observa también la exactitud con la que se determina la inclinación de la marca. Se analizan 10 capturas de cada disposición de las marcas, variando 4 veces la disposición de las marcas (Figura 42).

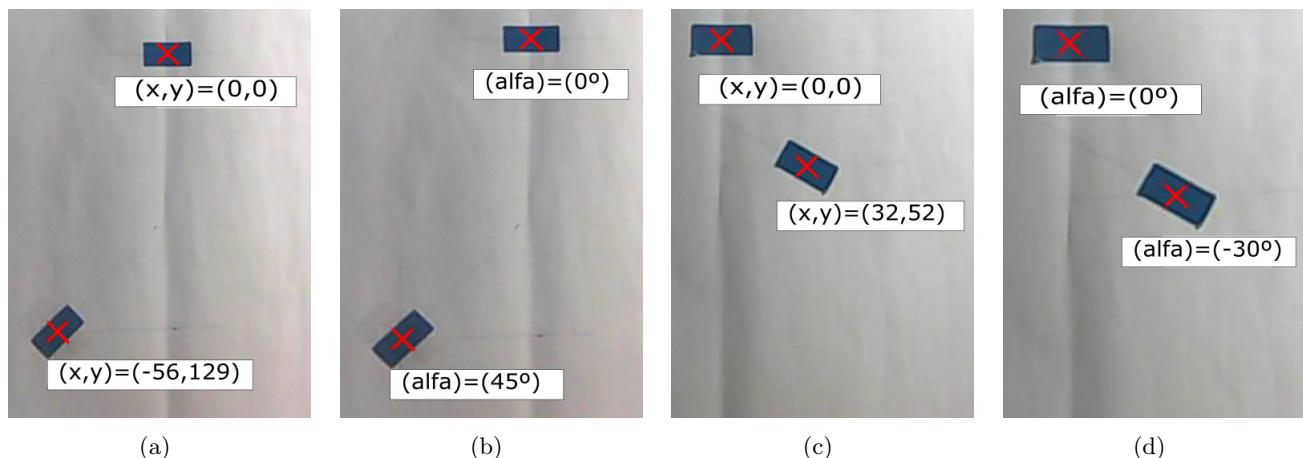


Figura 42: Disposición de las marcas para el ensayo de precisión

Las cámaras empleadas en el sistema de visión son:

- Cámara 1: WebCam Logitec C210. Resolución: 640x480
- Cámara 2: WebCam Logitec C170. Resolución: 640x480

En las Tablas 1 y 2 se muestran los resultados de los ensayos realizados

Imagen Imagen	Activación primer segmento		Inclinación real(°)	Posición medida (mm)		Inclinación medida(°)	Error posición (mm)		Error inclinación (°)
	x	y		x	y		x	y	
1	40	60	30	40,19	59,59	31,49	0,19	0,41	1,49
2	-70	70	20	-70,38	71,68	22,29	0,38	1,68	2,29
3	-55	130	45	-54,78	129,8	44,89	0,22	0,2	0,11
4	30	50	-30	30,28	50,29	-29,6	0,28	0,29	0,4
				Error medio posición		0,34	Error medio inclinación		0,62
				Desviación típica posición		0,50	Desviación típica inclinación		1,01

Cuadro 1: Ensayo Logitec C210

Imagen Imagen	Activación primer segmento		Inclinación real(°)	Posición medida (mm)		Inclinación medida(°)	Error posición (mm)		Error inclinación (°)
	x	y		x	y		x	y	
1	40	60	30	40,38	60,00	32,00	0,38	0	2,00
2	-70	70	20	-70,40	69,79	20,90	0,40	0,21	0,90
3	-55	130	45	-55,89	126,89	43,59	0,89	3,11	1,41
4	30	50	-30	33,09	49,89	-29,29	3,09	0,11	0,71
				Error medio posición		0,31	Error medio inclinación		1,16
				Desviación típica posición		1,31	Desviación típica inclinación		0,58

Cuadro 2: Enyaso Logitec C170

Como se puede apreciar la precisión del modelo C170 es inferior a la del modelo C210. Esto se traducirá posteriormente en la precisión con la que se localicen las marcas del robot durante su funcionamiento. A pesar del error existente en las medidas debido en gran parte a la calidad de las cámaras empleadas en el sistema de visión, se podrá realizar una distinción entre las distintas posiciones del robot. Esto se explicará con detalle en el siguiente apartado. En cuanto a la inclinación, no se podrá obtener un valor exacto pero si lo suficientemente aproximado como para saber si se cumplen las especificaciones iniciales.

6. Ensayos y resultados

OBSERVACIÓN: Hasta el momento se ha descrito el proceso de diseño y montaje y se ha presentado el sistema de visión empleado para realizar el seguimiento del robot durante su funcionamiento. Todos los desarrollos anteriores han sido enfocados para culminar en la construcción de un conjunto compuesto por tres segmentos, con tres muelles en el interior de cada uno de ellos. A pesar de la previsión en el momento de adquirir el material necesario, los distintos ensayos agotaron el cable de SMA disponible. Debido a ello no se han podido fabricar los muelles necesarios para completar la actuación de los tres segmentos proyectados. Por lo tanto, a partir de este momento se presenta el análisis realizado sobre dos segmentos en lugar de los tres descritos hasta el momento.

6.1. Calibración inicial

Durante la fase de ensayos se ajustaron distintos parámetros de los elementos descritos hasta el momento.

- Sistema de visión:

Se calibraron las cámaras a la distancia necesaria para capturar los movimientos del conjunto. También se experimentó con la iluminación del entorno del robot, para facilitar la identificación de las marcas.

- Muelles:

En los primeros ensayos se observó que los muelles fabricados con las características expuestas en el apartado 4.4. *Muelles*, no eran capaces de flexionar el segmento. Se decidió reducir el número de espiras de los mismos muelles, pasando de las 34 espiras iniciales para todos ellos, a 10 espiras en los muelles del primer segmento y 15 en los muelles del segundo segmento. El proceso llevado a cabo fue experimental, observando si se producía una flexión significativa al activar cada uno de los muelles.

Una vez realizadas las calibraciones iniciales se podía observar la respuesta del robot ante la contracción de los distintos muelles. Esto permitiría determinar el comportamiento del conjunto y su posterior control.

6.2. Descripción de los ensayos

Tal como se ha mencionado anteriormente, los actuadores SMA presentan variables en su funcionamiento que dificultan la obtención de un modelo. Existen diferentes estudios enfocados a la caracterización de estos actuadores [18] [19]. Este tipo de análisis permitiría un control posterior más preciso, pero excede el alcance del presente proyecto.

Para obtener el modelo completo del robot, sin necesidad de caracterizar los actuadores ni el comportamiento del cuerpo de silicona detalladamente, se pensó en recurrir a la herramienta de Matlab `textbf{textitSystem Identification}` (<https://www.mathworks.com/products/sysid.html>) . Esta herramienta ha sido empleada en casos similares con resultados positivos [16]. System Identification proporciona un modelo en base a los estímulos de entrada de un sistema y su respuesta, la salida. Para obtener un modelo mediante esta herramienta es necesario realizar numerosos ensayos con el dispositivo que se quiere modelar. Inicialmente se pretende analizar las propiedades de robot diseñado por lo que se decide simplificar el análisis en lugar de buscar un modelo del conjunto.

El punto de partida del análisis es tratar los muelles como actuadores todo-nada. De esta manera cada uno de ellos presentará dos estados: estado de relajación, en el que no realizan flexión sobre el segmento, y estado de contracción, en el que adquieren la forma "memorizada" en el proceso de fabricación y flexionan el segmento. No se contemplan por tanto posiciones intermedias donde los muelles recuperen el 30 o 50 % de su forma "memorizada". Mediante este análisis se pretende determinar el rango de movimientos aproximado que puede realizar el robot y la inclinación del extremo libre que se puede conseguir.

Es lógico pensar que mediante el sistema de accionamiento descrito, la contracción de un muelle sitúa el extremo del segmento en la misma posición siempre que sea activado dicho muelle. Cada segmentos consta de tres muelles por lo que la combinación de ellos establecerá las distintas posiciones que puede alcanzar el extremo de dicho segmento. Puesto que existen dos segmentos se pueden dar 49 posiciones diferentes. Estas posiciones son el resultado de combinar las 7 posiciones (contando la posición de reposo) que puede alcanzar el primer segmento al activar individualmente o de forma combinada sus muelles, con las 7 del segundo segmento. La Figura 43 muestra ejemplos del ensayo realizado.

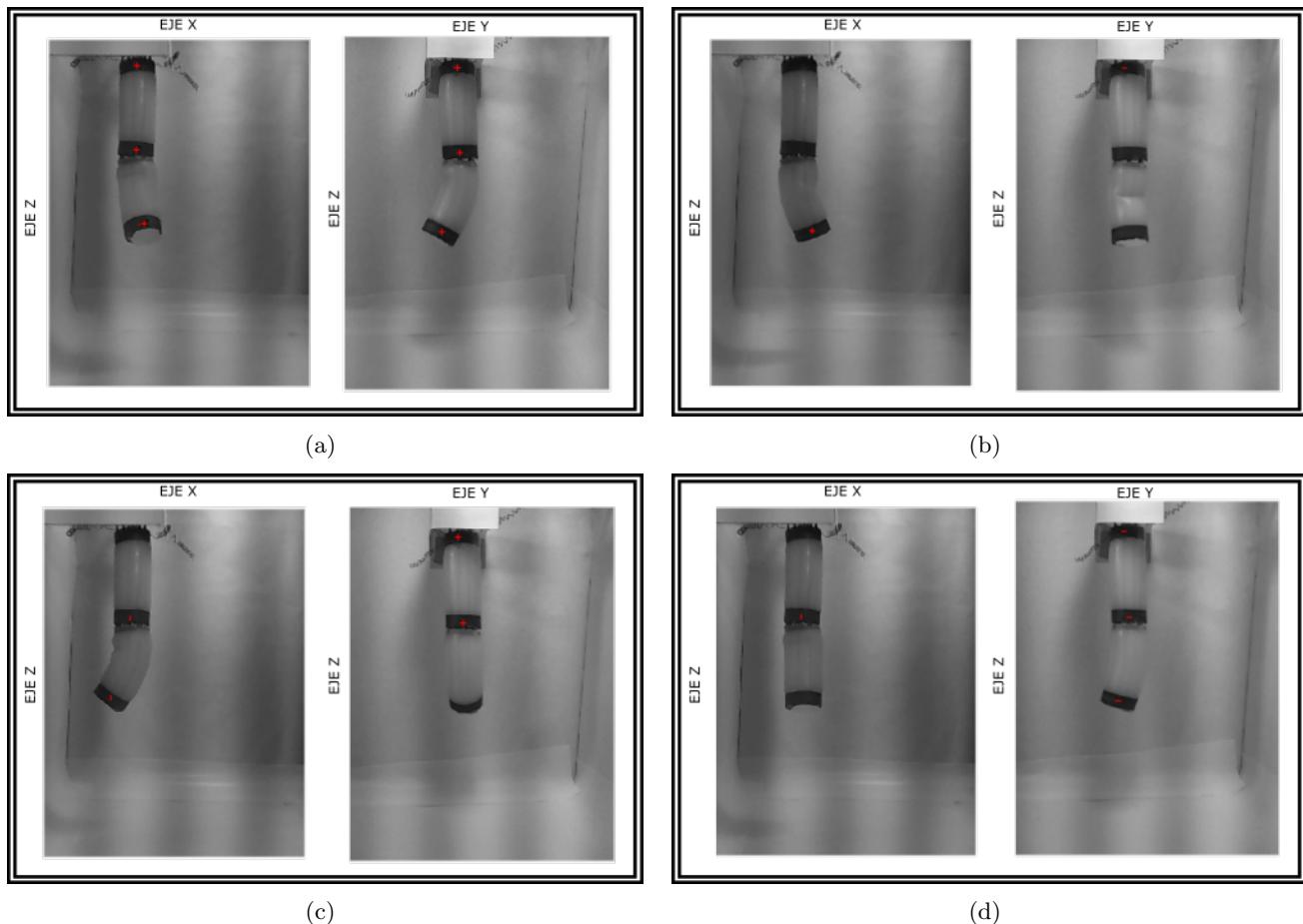


Figura 43: Ensayos

6.3. Análisis de los resultados

Inicialmente se destaca el ensayo mostrado en la Figura 44. Como se puede observar la activación de los muelles produce un pliegue en cuerpo de silicona en lugar de realizar una flexión uniforme del segmento. Este efecto fue analizado en ensayos anteriores y pone de manifiesto la dificultad de obtener un modelo fiable del robot presentado.

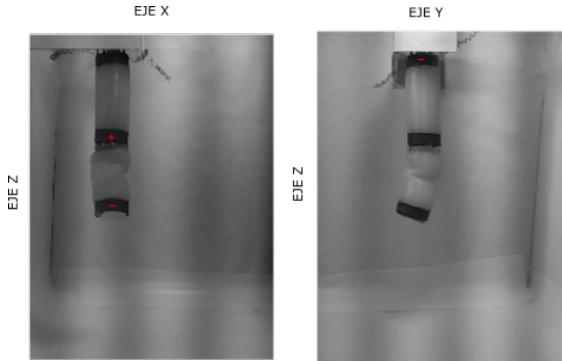


Figura 44: Pliegues en el cuerpo de silicona durante los movimientos

De todos los ensayos realizados según el procedimiento presentado en el apartado anterior, se obtienen las distintas posiciones del extremo libre que se muestran en la gráficas de la Figura 45.

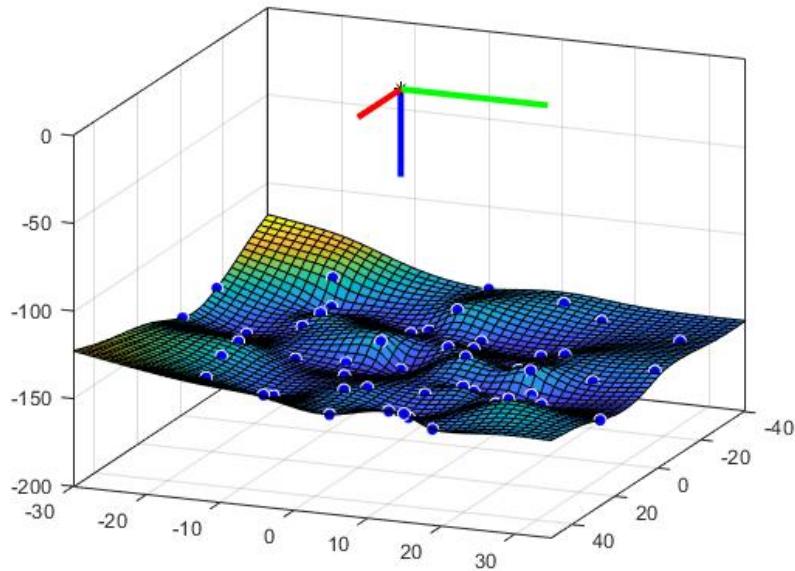


Figura 45: Posiciones del extremo libre

En el plano XY el extremo libre puede realizar un desplazamiento máximo de 40 mm en el sentido negativo del eje X y un desplazamiento máximo de 55 mm en positivo. En cuanto al eje Y el desplazamiento en el sentido negativo del eje puede llegar a los 30 mm mientras que en el sentido positivo alcanza 40 mm. Respecto al eje Z, estableciendo como cota mínima 160 mm que corresponden a la posición del

robot en reposo, la actuación de los muelles puede llegar a elevar el extremo libre hasta 135 mm, es decir, puede realizar un desplazamiento de 45 mm.

Se presenta además en la Figura 46 las 7 posiciones en las que se puede ubicar el extremo del primer segmento. Es necesario destacar que los muelles del primer segmento deben vencer la fuerza necesaria para flexionar dicho segmento y elevar también el segundo segmento. Debido a esto, como se puede apreciar en la Figura 46, el alcance del extremo del primer segmento es menor al del extremo libre del robot, realizado un desplazamiento de -8 y 9 mm en el eje X y de -3 y 10 mm en el eje Y. En el caso del primer segmento la cota inferior en el eje Z es 80 mm y el máximo desplazamiento que se observa de del 7 mm en sentido ascendente.

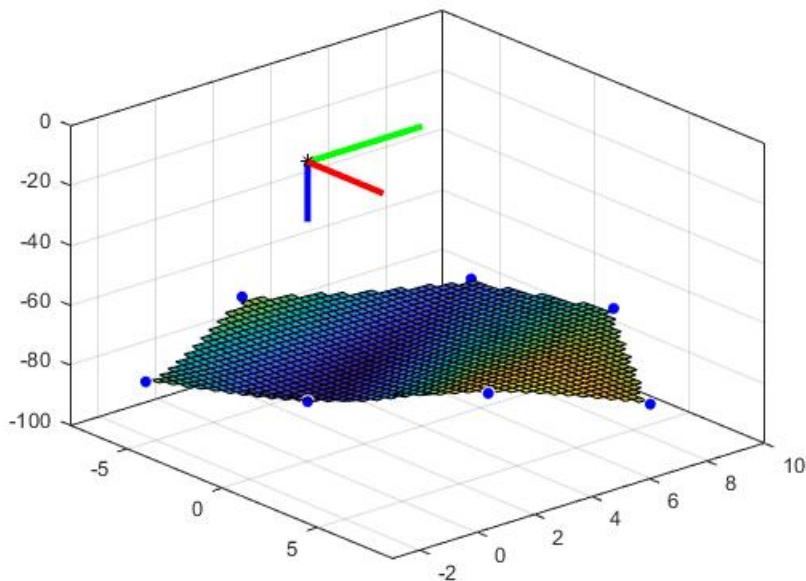


Figura 46: Posiciones de extremo del primer segmento

Como es lógico la inclinación que puede alcanzar el primer segmento es menor que la del segundo, presentando un ángulo máximo de 20 grados. El extremo del segundo segmento alcanza los 35 grados de inclinación con el primer segmento en posición de reposo.

Una vez determinadas las posiciones se genera una matriz que relaciona las posiciones en las que se puede localizar el extremo libre del robot con los muelles que es necesario accionar para moverlo a ese punto. El control realizado por tanto es un control en cadena abierta en el que las posiciones se encuentran predeterminadas.

Tal como representan las gráficas de los rango de movimientos, no se da una normalización del alcance en las distintas direcciones. Esto se debe a que los muelles incluidos en cada uno de los segmento no ejercen la misma fuerza al contraerse. Como se indicó anteriormente los actuadores basados en aleaciones con memoria de forma presentan un comportamiento difícil de controlar, a pesar de realizar calibraciones previas. A este efecto se suma el comportamiento de los cuerpos de silicona en los que como se indicó en la Figura 44 pueden aparecer pliegues que hagan variar la posición resultante.

7. Interfaz y funcionamiento

La interfaz pretende mostrar al usuario la información en tiempo real del estado del conjunto. A través de la interfaz el usuario también puede establecer las órdenes de movimientos que se desea que reproduzca el robot.

7.1. Estado del robot

Mediante la superposición de puntos sobre las imágenes capturadas por ambas cámaras, se puede verificar que el sistema de visión capture e interpreta correctamente las marcas dispuestas sobre el robot. Ambas imágenes son presentadas en la interfaz para poder realizar el seguimiento del robot desde ambos puntos de vista (Figura 47). La información sobre la posición de las marcas es presentada en la tabla de datos donde también se refleja la inclinación del extremo de cada uno de los segmentos.



Figura 47: Interfaz de usuario

7.2. Manipulación del robot

Para establecer las órdenes de movimiento se dispone de dos menús, el de *Usuario* y el de *Desarrollo*. Mediante el menú de *Usuario* (Figura 48 (a)) se puede seleccionar un punto de entre los 49 que el robot puede alcanzar. Una vez seleccionado, el botón *Mover* activa los muelles necesarios para llevar el extremo del robot al punto deseado. La relación entre el los puntos a los que se puede mover el robot y los muelles que es necesario activar se estableció en la matriz de posiciones mencionada en el apartado 6. *Ensayos*. El menú *Desarrollo* (Figura 48 (b)) permite seleccionar los muelles que se desea accionar de manera independiente.

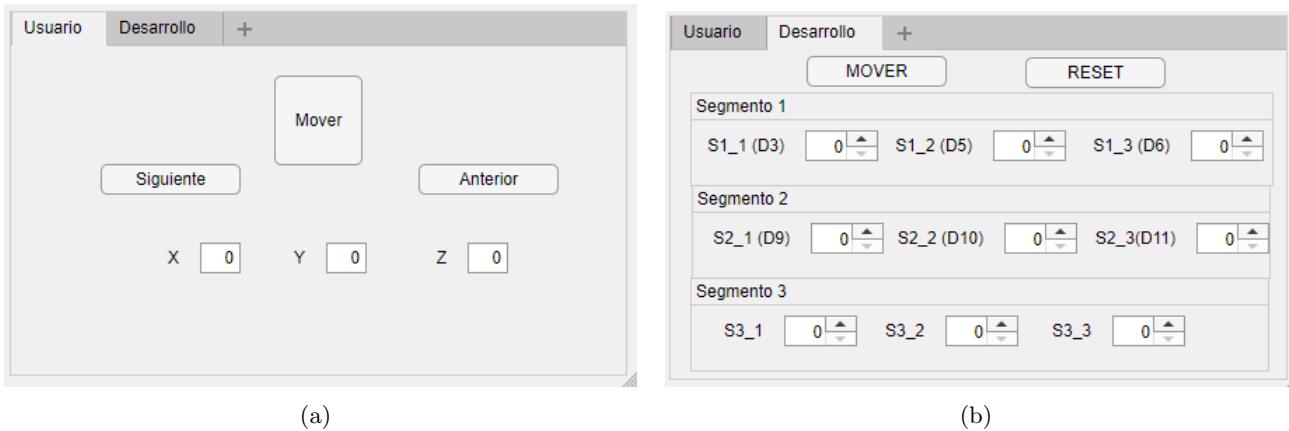


Figura 48: Menús de a) Usuario y b) Desarrollo

Dado que los puntos de destino son conocidos, la discrepancia que puede darse entre el punto seleccionado y la posición reflejada en la tabla de datos, será motivo del error cometido por el sistema de visión.

8. Conclusiones y propuestas futuras

Como es lógico la primera conclusión es que no se ha podido llevar a cabo de manera completa el diseño presentado. Naturalmente este es uno de los primeros aspectos que sería necesario concluir en futuros proyectos.

A lo largo del proyecto se han realizado ensayos para analizar cada uno de los componentes que forman parte del robot de forma experimental. Los segmentos de silicona presentan las dimensiones necesarias para poder ser actuados mediante los muelles de SMA. Por su parte la fabricación de los muelles de SMA ha permitido realizar diferentes ensayos, que no se podrían haber llevado a cabo si hubieran sido adquiridos directamente al fabricante. Los ensayos realizados mediante el sistema de visión reflejan las características del sistema desarrollado.

Lo que se pretende reflejar es que los procesos seguidos, a pesar de no haber culminado en el objetivo final deseado, han sido coherentes y justificados a lo largo de la elaboración del proyecto.

El empleo de los muelles de SMA como actuadores ha permitido desarrollar un diseño compacto y funcional. Se constata por tanto que son una buena elección frente a un sistema de cables accionados por motores. A pesar de que este tipo de accionamiento ha demostrado excelentes resultados como se reflejó en los ejemplos expuestos en el punto 2. *Estado del arte* un diseño como el presentado reduce número de elementos periféricos y sus dimensiones, haciendo posible explorar otras aplicaciones o las mismas pero en entornos con limitación de espacio.

El sistema de visión mediante el que se captura la posición presenta un error significativo en relación con el rango de movimientos que puede desarrollar el robot. Sin incorporar nuevos elementos que dificulten la flexión de los segmentos, la captura de movimientos mediante cámara parece ser el método más apropiado, pero sería necesario aumentar la precisión del sistema. Se propone explorar otros sistemas que permitan reconstruir los movimientos del conjunto como la reconstrucción en tres dimensiones mencionada en la introducción del punto 5. *Sistema de visión*.

El diseño presentado ha explorado la posibilidad de realizar un robot que consta de tres segmentos, pero se podría explorar la idea de incorporar nuevos segmentos o un diseño que permitiera cambiar el número de segmentos según las necesidades. De esta manera se podría controlar la longitud del robot y conseguir una mayor adaptación a la tarea que se pretende desarrollar. El sistema de unión mediante imanes podría ser empleado de igual manera en este hipotético diseño, pero si sería necesario explorar diferentes formas de realizar la alimentación de los muelles.

Como es natural, con la simple incorporación del tercer segmento sería necesario elaborar un modelo del robot con el fin de realizar un control preciso de sus movimientos. Sería interesante explorar la posibilidad de realizar contracciones parciales de los muelles en lugar de emplearlos como actuadores todo-nada, de manera que se pudiese posicionar el robot dentro de una superficie en lugar de en puntos discretos.

9. Bibliografía

Referencias

- [1] Jie Qi, Leah Buechley, "Animating paper using shape memory alloys", *Proceedings of the SIGCHI Conference on Human Factors in Computing Systems*, May 2012.
- [2] M Follador, M Cianchetti, A Arienti and C Laschi, "A general method for the design and fabrication of shape memory alloy active spring actuators", *IOP Publishing*, doi:10.1088/0964-1726/21/11/115029, Vol 21, Num 11, October 2012
- [3] Cebollada, S., Payá, L., Mayol, W., Reinoso, O., "Evaluation of clustering methods in compression of topological models and visual place recognition using global appearance descriptors", *Applied Sciences*, Vol 9, Num 3, 2019.
- [4] Payá, L., Amorós, F., Fernández, L., Reinoso, O. "Performance of global-appearance descriptors in map building and localization using omnidirectional vision. Sensors", Vol 14, Num 2, 2014.
- [5] Panagiotis Polygerinos, Zheng Wang, Kevin C. Galloway, Robert J. Wood, Conor J. Walsh, "Soft robotic glove for combined assistance and at-home rehabilitation", *Robotics and Autonomous Systems*, Vol 73, November 2015
- [6] Ellen T. Roche, Markus A. Horvath, Isaac Wamala, Ali Alazmani, Sang-Eun Song, et all, "Soft robotic sleeve supports heart function", *Science Translational Medicine*, doi: 10.1126/scitranslmed.aaf3925, Vol 9, January 2017.
- [7] Ian D. Walker and Michael W. Hannan, "A Novel 'Elephant's Trunk' Robot", *International Conference on Advanced Intelligent Mechatronics*, September 1999.
- [8] G. Migadis and K. J. Kyriakopoulos, "Desing and forward kinematic analysis of a robotic snake", *Intemational Conference on Robotics and Automation*, April 1997.
- [9] Mandru, D., Lungu, I., Noveanu, S., Tătar, O., "Shape memory alloy wires as actuators for a mini-robot", *International Conference on Automation, Quality and Testing, Robotics (AQTR)*, Vol 1, May 2010.
- [10] Bundhoo, V., Haslam, E., Birch, B., Park, E. J., "A shape memory alloy-based tendon-driven actuation system for biomimetic artificial fingers, part I: design and evaluation", *Robotica*, Vol 27, January 2009.
- [11] Destarac, M. A., Cena, C. E. G., Garcia, J., Espinoza, R., Saltaren, R. J. "ORTE: Robot for Upper Limb Rehabilitation. Biomechanical Analysis of Human Movements", *IEEE Latin America Transactions*, Vol 16, Num 6, 2018.
- [12] Barrio, A. M., Terrile, S., Barrientos, A., del Cerro, J., "Robots Hiper-Redundantes: Clasificación, Estado del Arte y Problemática.", *Revista Iberoamericana de Automática e Informática industrial*, Vol 15, Num 4, 2018.
- [13] Dong, X., Axinte, D., Palmer, D., Cobos, S., Raffles, M., Rabani, A., Kell, J., " Development of a slender continuum robotic system for on-wing inspection/repair of gas turbine engines", *Robotics and Computer-Integrated Manufacturing*, Vol 44, 2017.

- [14] Buckingham, Rob, and Andrew Graham, "Nuclear snake-arm robots." *Industrial Robot: An International Journal*, (2012).
- [15] Kim, Yong-Jae, et al. "Design of a tubular snake-like manipulator with stiffening capability by layer jamming." *IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems.*, 2012.
- [16] Dorin-Sabin Copaci, Antonio Flores-Caballero, Alvaro Villoslada, Dolores Blanco, "Modelado y simulación de actuadores SMA con caga variable", *XXXVI Jornadas de Automática*, Septiembre 2015.
- [17] Wang, Z., Hang, G., Li, J., Wang, Y., Xiao, K., "A micro-robot fish with embedded SMA wire actuated flexible biomimetic fin.", *Sensors and Actuators A: Physical*, Vol 144, Num 2, 2008.
- [18] Sushant M. Dutta and Fathi H. Ghorbel, "Differential Hysteresis Modeling of a Shape Memory Alloy Wire Actuator", *IEEE/ASME TRANSACTIONS ON MECHATRONICS*, doi:10.1109/TMECH.2005.844709, Vol 10, Num 2, April 2005
- [19] Kilicarslan, A., Song, G., Grigoriadis, K., "ANFIS based modeling and inverse control of a thin SMA wire", *Modeling, Signal Processing, and Control for Smart Structures*, Vol 6926, April 2008.
- [20] Huai-Ti Lin, Gary G Leisk and Barry Trimmer, "GoQBot: a caterpillar-inspired soft-bodied rolling robot", *IOP Publishing*, doi:10.1088/1748-3182/6/2/026007, Vol 6, Num 2, April 2011
- [21] M. Cianchetti, M. Follador, B. Mazzolai, P. Dario, and C. Laschi, "Design and development of a soft robotic octopus arm exploiting embodied intelligence", *IEEE International Conference on Robotics and Automation*, May 2012.
- [22] Laschi, C., Cianchetti, M., Mazzolai, B., Margheri, L., Follador, M., Dario, P., " Soft robot arm inspired by the octopus.", *Advanced Robotics*, Vol 26, Num 7, 2012.
- [23] Alex Villanueva, Colin Smith and Shashank Priya, "A biomimetic robotic jellyfish (Robojelly) actuated by shape memory alloy composite actuators", *IOP Publishing*, doi:10.1088/1748-3182/6/3/036004, Vol 6, Num3, August 2011.
- [24] Ma. Paz Velarde, Erika Perugachi, Dennis Romero, Angel D. Sappa, Boris X. Vintimilla, "Análisis del movimiento de las extremidades superiores aplicado a la rehabilitación física de una persona usando técnicas de visión artificial", *Revista Tecnológica ESPOL – RTE*, Vol 28, Num 1, Agosto 2015.
- [25] Álvarez Castrillo, Ignacio, "Análisis de la estabilidad en recta de un tren de cercanías", *TFM, Universidad Carlos III*, Septiembre 2019

ANEXO I: Estudio económico

En este anexo se desglosan por un lado los costes derivados del desarrollo del proyecto. Por un lado se presentan los costes materiales en los que se recogen los elementos que ha sido necesario adquirir para la fabricación del robot. Por otro lado los costes humanos, en los que se incluye el trabajo tanto del estudiante como de los tutores del proyecto. Por último se muestra una relación de los costes de los recursos tales como software o dispositivos empleados.

En cuanto a los costes materiales, en la tabla de *Presupuesto de material* se presenta una relación de los materiales que ha sido necesario adquirir de forma específica para el desarrollo del proyecto. Algunos de los materiales y componentes empleados no constan en la tabla ya que han sido obtenidos de excedentes de proyectos anteriores. La reutilización de material como los perfiles de aluminio, o dispositivos como las placas de control Arduino, permite reducir tanto los costes como el tiempo de desarrollo de los proyectos. Mantener en buen estado estos recursos durante el proyecto permite disminuir la cantidad de residuos generados.

Presupuesto de material			
Material	Coste unitario(€)	Cantidad	Total
Silicona Platsil GEL-0030	28	2	56
Cable SMA 0.5 mm	14,17	2	28,34
Componentes electrónicos			
Resistencias 10 K	0,1	10	1
Transistores IRF 540N	0,9	10	9
Placa de prototipado	5,75	1	5,75
Conectores de tres puertos	0,5	20	10
Tubería PVC para molde de silicona	3,69	2	7,38
Cámara	13,75	1	13,75
Total			184,75

Por su parte, el presupuesto que debería destinarse al pago de los recursos humanos necesarios para desarrollar el proyecto se detalla en la tabla *Presupuesto por horas de trabajo*. Como se ha indicado anteriormente se realizar una diferenciación entre en coste de emplear a la persona que desarrolla el proyecto, el alumno, y las personas que supervisan el proyecto. Según normativa de la universidad, el trabajo fin de máster corresponde a 12 créditos, estableciéndose entre 25 y 30 horas de dedicación por crédito. Esto supone un mínimo de 300 horas y un máximo de 360 horas de dedicación al proyecto por parte del alumno. Dado que desde el mes de octubre la elaboración del proyecto no ha coincidido en el tiempo con otras asignaturas se supone alcanzado el número máximo de horas de dedicación. Se supone un salario de 21000€ anuales para una persona con titulación de grado en ingeniería, titulación del alumno en el momento del desarrollo del proyecto.. Entre las personas que han supervisado el proyecto, se encuentra una estudiante de doctorado y un catedrático. Estableciendo el salario anual de un catedrático en 45.500€ anuales aproximadamente y la retribución que debería recibir una persona que realiza doctorado de investigación en 30000€ anuales se presenta la siguiente relación de costes.

Presupuesto por horas de trabajo			
	Coste por hora (€)	Horas	Total
Alumno	10,37	360	3735,18
Doctorando	14,82	80	1185,77
Catedrático	22,48	20	674,4
Total			5595,35

La última tabla, *Presupuesto por recursos y servicios*, presenta los costes de recursos y servicios empleados. Para realizar el cálculo del coste correspondiente a cada uno de los recursos se emplea la ecuación que se describe a continuación [25]:

$$C = (t/d) * p * u \quad (9)$$

donde :

- C: coste imputable (€)
- t: meses que se ha empleado el recurso
- d: meses que tarda en devaluarse el recurso
- p: valor de adquisición del recurso (€)
- u: porcentaje de utilización del recurso

Presupuesto por recursos y servicios					
Recurso	t	d	p	u	C
Ordenador personal	7	60	750	0,85	74,38
Software Matlab (licencia universitaria)	7	12	2000	85	991,67
Software Autodesk Inteventor (gratuito estudiantes)	7	12	0	85	0
Servicio de impresión 3D	0,1	60	1500	2	0,5
Total					1066,55

Poniendo en común los costes asociados a material, personal y recursos resulta el coste total del proyecto que se refleja en la tabla *Coste total*

Coste total	
Concepto	Coste (€)
Material	184,75
Personal	5595,35
Recursos y servicios	1066,55
Total	6846,65

ANEXO II: Estudio de impacto y aplicaciones

Impacto económico

El desarrollo de un robot continuo redundante de elementos rígidos conlleva el mecanizado de las piezas que lo componen que solo pueden emplearse en dicho robot. Al presentar un cuerpo de silicona y unas pocas piezas rígidas obtenidas con impresión 3D se reduce tanto el tiempo de mecanizado como el coste de los elementos que componen el robot. El elemento principal, la silicona, tiene un menor coste que las piezas rígidas mecanizadas y puede ser empleada en desarrollos diferentes.

Impacto medioambiental

Por una parte el empleo de actuadores basados en aleaciones con memoria de forma suponen una reducción del residuo que puede generarse al desecharlos, frente a un motor eléctrico por ejemplo. Por su parte la silicona, no presenta la posibilidad de reciclaje como el metal. Los residuos metálicos pueden fundirse para crear nuevos elementos, mientras que la acumulación de plásticos es un problema que sigue en aumento. En este caso se podría explorar la utilización de materiales biodegradables que presentasen características similares a las que presenta la silicona.

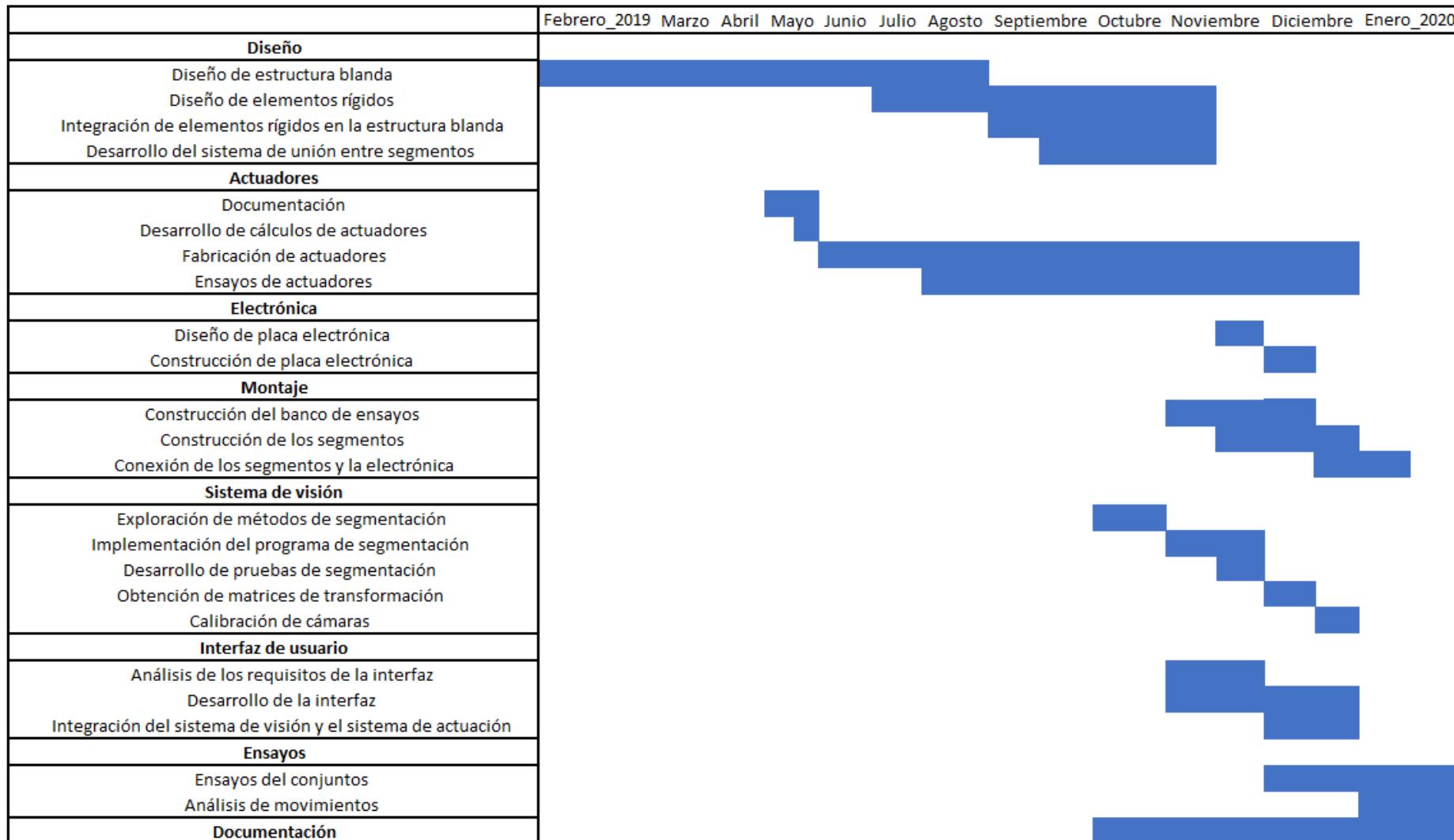
Aplicaciones

Como se ha indicado anteriormente, la versatilidad de movimientos que presenta el robot diseñado lo hace apto para tareas de inspección de cavidades, como sucede con otros diseños de robots continuos redundantes. El hecho de presentar una estructura blanda puede ser un inconveniente para desarrollar tareas en ambientes industriales por la posibilidad de entrar en contacto con elementos cortantes o abrasivos. En cambio esta estructura blanca y su velocidad de movimiento lenta, favorecen su aproximación a las personas puesto que no representaría peligro alguno. Las aplicaciones podrían orientarse en el ámbito de la medicina o en el de la veterinaria.

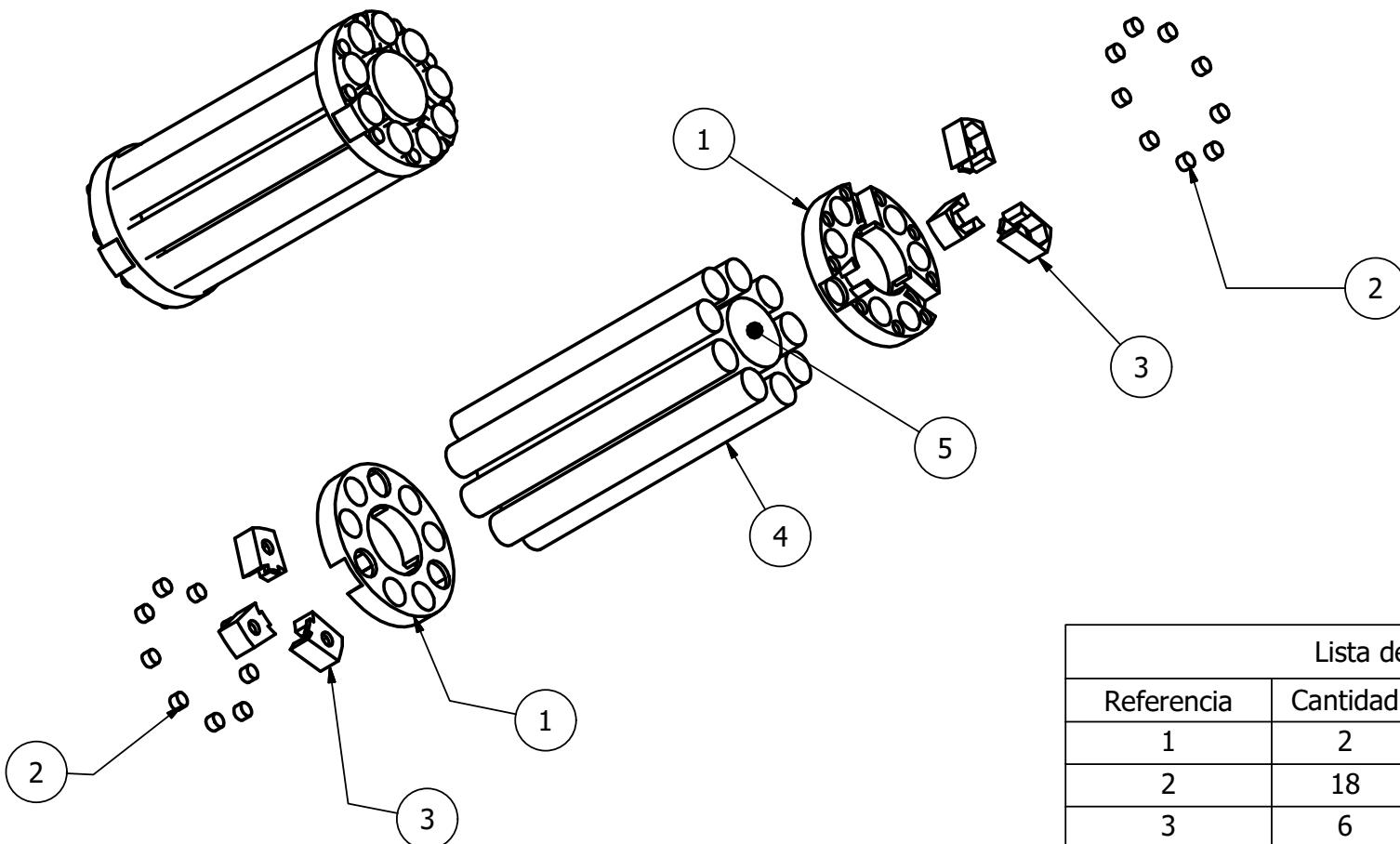
ANEXO III: Estructura de descomposición del proyecto



ANEXO IV: Planificación temporal



ANEXO V: Planos



Lista de partes		
Referencia	Cantidad	Descripción
1	2	Disco rígido
2	18	Imán
3	6	Tope 1 / Tope 2
4	9	Varilla
5	1	Varilla central

Autor: Miguel Guzmán

Universidad Politécnica de Madrid

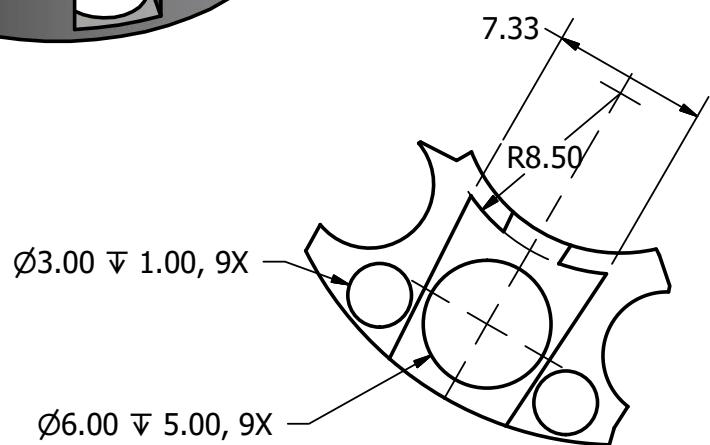
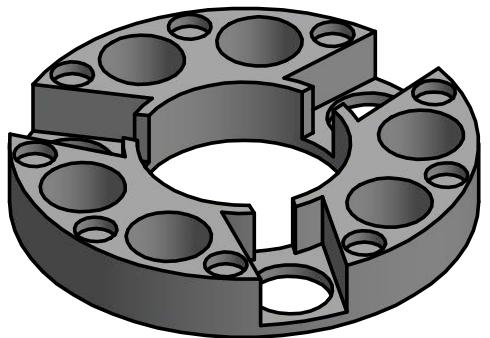
Escala: 1 / 1.3

A4

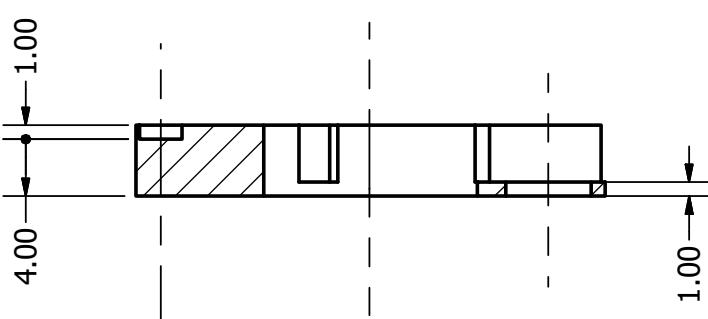
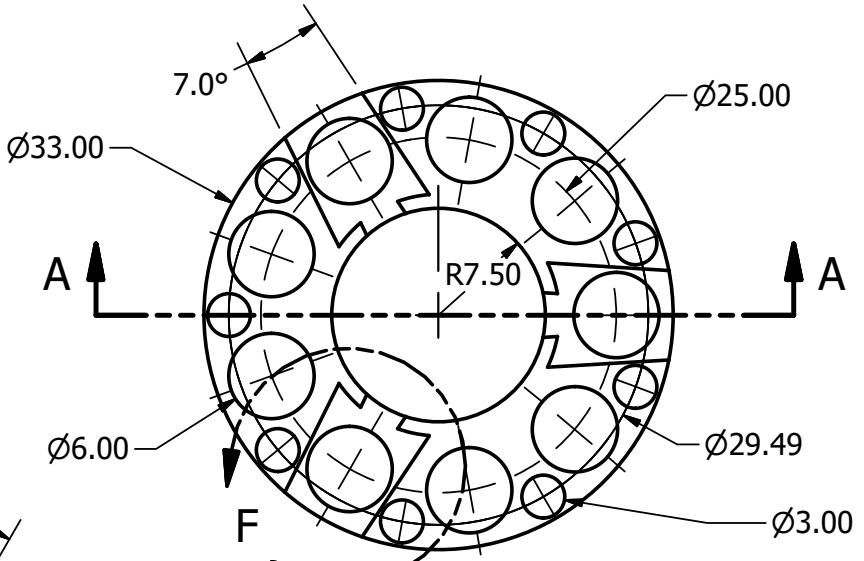
Título:
Segmento explosionado

Parte: Lista de partes

Nº 1/4



Detalle F
Escala 3 : 1



Autor: Miguel Guzmán

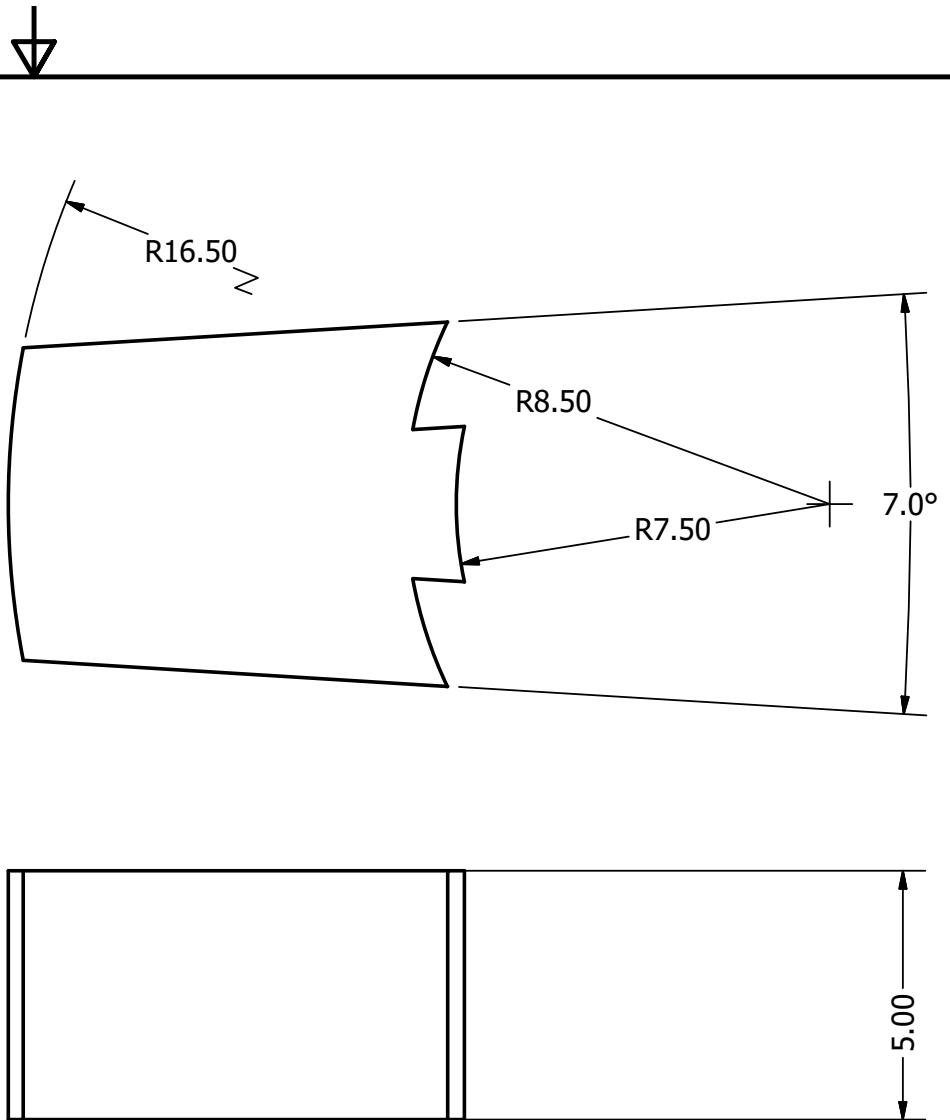
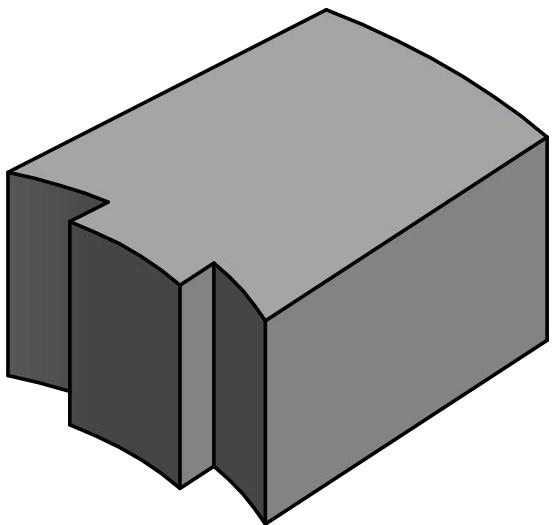
Universidad Politécnica de Madrid

Escala: 2 : 1 Unidades: mm A4

Título:
Segmento - Disco rígido

Parte: 1

Nº 2/4



Autor: Miguel Guzmán

Universidad Politécnica de Madrid

Escala: 7 : 1

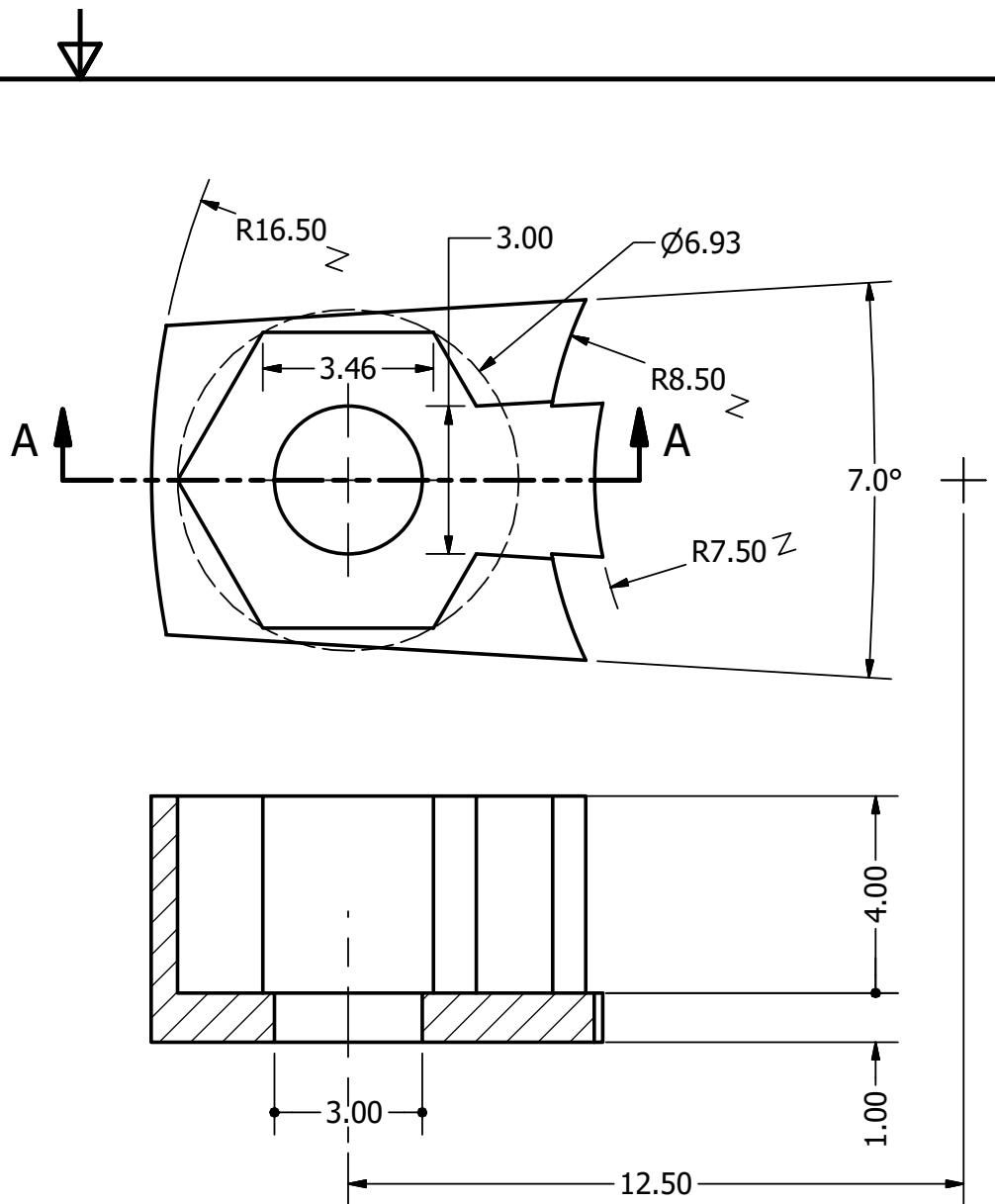
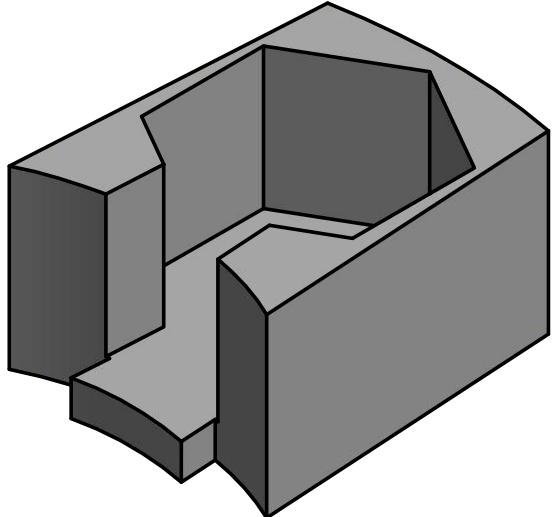
Unidades: mm

A4

Título:
Segmento-Tope 1

Parte: 3.1

Nº 3/4



Autor: Miguel Guzmán

Universidad Politécnica de Madrid

Escala: 7 : 1 Unidades: mm A4

Título:
Tope

Parte: 3.2

Nº 4/4