POLITÉCNICA

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

Alejandro Jiménez Alcalde

05 TRABAJO FIN DE GRADO

INDUSTRIALES

TRABAJO FIN DE GRADO

ROBOT BLANDO BIOINSPIRADO EN UNA ESTRELLA DE MAR ACTUADO MEDIANTE ALEACIONES CON MEMORIA DE FORMA (SMA)

TRABAJO FIN DE GRADO PARA LA OBTENCIÓN DEL TÍTULO DE GRADUADO EN INGENIERÍA EN TECNOLOGÍAS INDUSTRIALES

FEBRERO 2021

Alejandro Jiménez Alcalde

DIRECTOR DEL TRABAJO FIN DE GRADO:
Antonio Barrientos Cruz

CONSULTOR DEL TRABAJO FIN DE GRADO:
Silvia Terrile

INDUSTRIALES
ETSII | UPM

POLITÉCNICA

"La clave de tu futuro está escondida en tu vida diaria"

Pierre Bonnard

Agradecimientos

Poder concluir una etapa, significa poder comenzar otra nueva en una vida cambiante. La escuela y la vida me ha enseñado algo muy difícil de valorar y es la capacidad de persistencia ante las adversidades, y no ha sido menos en este proyecto.

En primer lugar, me gustaría agradecer a mi familia por hacerme ser quien soy y creer en lo que creo. Sin ellos, nada habría sido posible ya que su confianza incondicional me ha permitido venir a Madrid pese a todo.

Por otro lado, agradezco a Silvia Terrile por su apoyo y paciencia en todo el trabajo fin de grado, pese a los constantes problemas surgidos. Mención también a mi tutor Antonio Barrientos por haber confiado en mí en este proyecto y ser una inspiración y uno de los mejores docentes que he conocido en mi vida.

Para finalizar y no por ello menos importante, agradecer a todos aquellos que estuvieron en mi camino para llegar a ser quien soy, en especial a ella que supo ayudarme y calmarme en los peores momentos. También me gustaría agradecer a todos aquellos que desde arriba nos cuidan y nos guían.

¡Muchas gracias a todos de corazón!

Resumen

La robótica bioinspirada, base de este proyecto, resulta muy útil para el estudio de la fauna y explotar al máximo la capacidad de mimetización en el entorno. Esto, unido con el empleo de los actuadores SMA (Shape Memory Alloy- Aleaciones con memoria de forma) da lugar a la posibilidad de la creación de los robots blandos, los cuales tienen la capacidad de adaptarse al entorno siendo más flexibles y alcanzando así lugares inaccesibles para robots rígidos.

En este trabajo, se empleará SMA como método de actuación, que significa un menor coste y peso frente a su principal competidor, los actuadores neumáticos. Además, es reseñable la mayor simplicidad de actuación de estos.

El robot desarrollado, una estrella de mar de cinco extremidades, tiene un actuador por cada pata, cada uno controlado de manera independiente. La combinación de estos diferentes actuadores según patrones de marcha permite el movimiento.

La estructura del robot se realizó mediante un molde diseñado con el programa CAD Inventor en el que se vierte la silicona elegida, que presenta justo el término medio entre flexibilidad y ligereza.

Como resultado principal de este proyecto se ha podido realizar el movimiento de una estrella robótica con diferentes patrones de marcha y analizar la velocidad alcanzada por la misma.

Abstract

Bio-inspired robotics, the basis of this project, is very useful for studying the fauna and exploiting the ability to imitate the environment. This robotics field, and the development of SMA (Shape Memory Alloy), make possible the creation of soft robots. Soft robots can adapt their shape to the environment by being more flexible and thus reach areas that rigid robots cannot.

In this project, the robot’s actions will be based on the SMA actuator, which reduces both the weight and the cost of the design compared to its main competitor, pneumatic actuator. Furthermore, it is worth noting the greater simplicity of its actuation.

The developed robot, a five-limbed starfish, present actuator controlling each leg independently. The combination of these different actuators allows the movement.

The structure of this robot was made using a mold on which silicone is poured designed in the Autodesk Inventor Software. The silicone represents a good balance between flexibility and lightness.

As the main result of this project, it has been possible to realize and analyze the movement of a robotic starfish and the speed it reaches.

Resumen Ejecutivo

El desarrollo de este proyecto se ha centrado en la creación de un robot blando bioinspirado, que sea capaz de mimetizarse con entornos de la naturaleza. Para ello se ha tratado de basarse en animales reales y estudiar sus movimientos, de modo que puedan ser imitados. La introducción de materiales blandos permite que se acceda a lugares diferentes a los conseguidos con estructuras menos flexibles. Esto unido a las SMA supone una mejor adaptabilidad con estas articulaciones no rígidas, en lugar de motores convencionales u otros actuadores.

Las SMA (Shape Memory Alloys- Aleaciones con memoria de forma), también conocidas como materiales inteligentes, son normalmente formados por una aleación de Níquel – Titanio, de aquí el nombre comercial Nitinol. Estas, mediante transformaciones austenítico-martensíticas, adquieren mayor resistencia y rigidez. El paso de un estado a otro se realiza superando un umbral de temperatura. Este valor de temperatura depende del método de fabricación del material, siendo en este caso de 45ºC. Sin embargo, el material al bajar de estas temperaturas disminuye su resistencia y aumenta la flexibilidad. Esta combinación de estados permitirá realizar los actuadores, los cuales son encontrados de múltiples maneras, desde cables, pasando por muelles hasta estructuras más complejas. Por otro lado, para que la SMA memorice la forma deseada, es necesario llevarla a altas temperaturas cercanas a los 400ºC, impidiendo el movimiento, ya que tenderá inicialmente a volver la forma previa. En la imagen se ve un actuador de SMA en forma de muelle que, tras ser calentado, realiza una contracción.

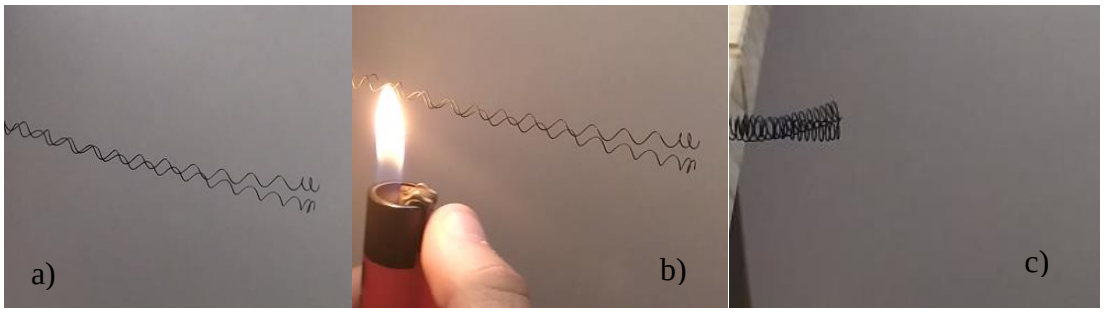


Figura 1. Proceso de cambio de forma de una SMA de Nitinol. a) Estado de baja temperatura, siendo la SMA flexible y con una forma no memorizada. b) Proceso de calentamiento de la SMA mediante llama directa. c) Estado final de la SMA superado el umbral de temperatura y con la forma de muelle memorizada

Este proyecto tratará, mediante los actuadores anteriores, de realizar una estrella de mar bioinspirada blanda. Esta contará con diez muelles (dos para cada pata de la estrella) cuya activación es diseñada de manera independiente cada uno. Mediante patrones de

movimiento, se tratará de obtener una combinación de señales que sea óptima para lograr el desplazamiento de la misma.

Inicialmente, se diseña una estrella de cinco extremidades mediante el programa CAD Inventor. Una vez creado el modelo, se procede a la impresión 3D del molde de PLA (Ácido Poliláctico) que da lugar a la estrella. Sobre este molde se vierte silicona epoxi que permite obtener la flexibilidad típica de un robot soft. Esta silicona es de Feroca y en concreto ha sido elegida la Silastic 3438. Se valoró el uso de otras siliconas epoxi más flexibles, las cuales podían suponer un problema para el desplazamiento del robot. Las dimensiones de la estrella de mar robótica son de un diámetro de 18 cm, ya que se he creado con un patrón concéntrico, y de 0.5cm de ancho. De manera lógica, el molde tiene una dimensión algo superior y un ángulo de desmoldeo de 5º. Todas las dimensiones han sido previamente seleccionadas mediante la creación previa de una pata individual la cual es conectada con un actuador SMA para comprobar la viabilidad de las dimensiones.

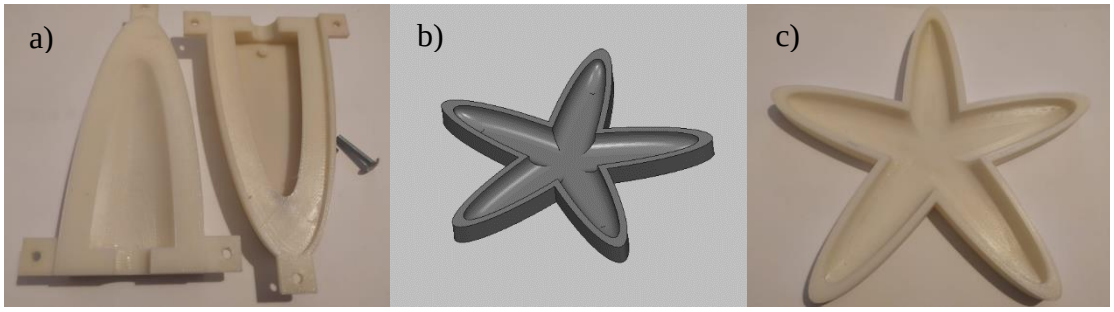


Figura 2. a) Molde creado para creación de una extremidad con la que se realizan pruebas. b) Captura de pantalla del programa CAD Inventor, en la cual se aprecia el molde de la estrella. c) Molde de PLA real, tras la impresión.

En cada una de las patas de la estrella de mar irá colocado un par de muelles como el mostrado en la figura 1. Esta es la forma del actuador elegida entre otras posibilidades usadas con SMA. Entre estas se puede valorar el empleo de cables de nitinol en paralelo que se doblen al ser calentados y cuya forma memorizada sea curva. Sin embargo, estos últimos no tienen la capacidad de contracción necesaria para soportar el peso y la oposición de la silicona.

Para la creación de los actuadores se han empleado diferentes métodos y así realizar una comparativa del más efectivo. Esta efectividad depende del número de ciclos que es capaz de realizar la transformación. La forma ha sido dada mediante el enrollamiento del cable de SMA en torno a un tornillo mellado en los extremos, por donde se fijará el cable para impedir el movimiento con ayuda de tuercas.

El calentamiento necesario para actuar los muelles se realiza mediante impulsos eléctricos. Estos impulsos son controlados mediante una placa Arduino Uno y un sistema electrónico de potencia. Con un circuito eléctrico como el mostrado en la figura 3 podemos variar los valores de una señal PWM que regule la intensidad encargada de

calentar el muelle. En este caso se realizan aproximaciones mediante un potenciómetro, aunque posteriormente el valor necesario es controlado mediante código. Con ayuda de este método se puede ver la velocidad de reacción de los muelles en función de la intensidad, siendo esta medida con un multímetro.

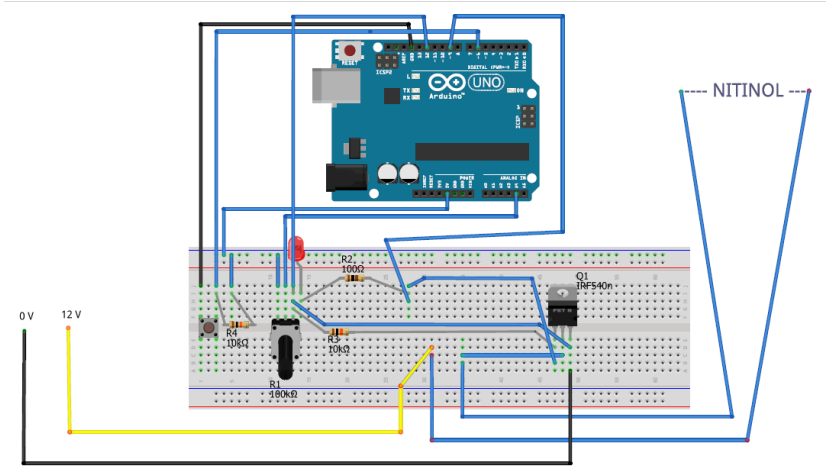


Figura 3. Esquema de circuito electrónico de actuación.

Figura 4. Gráfica Intensidad (A)-Tiempo (s) en la contracción de un muelle de SMA.

Tras seleccionar un valor de amperaje adecuado se diseña una PCB que contenga los elementos necesarios para activar cada una de las patas y sea activada mediante señales Arduino y alimentada por una fuente de alimentación de 12V.

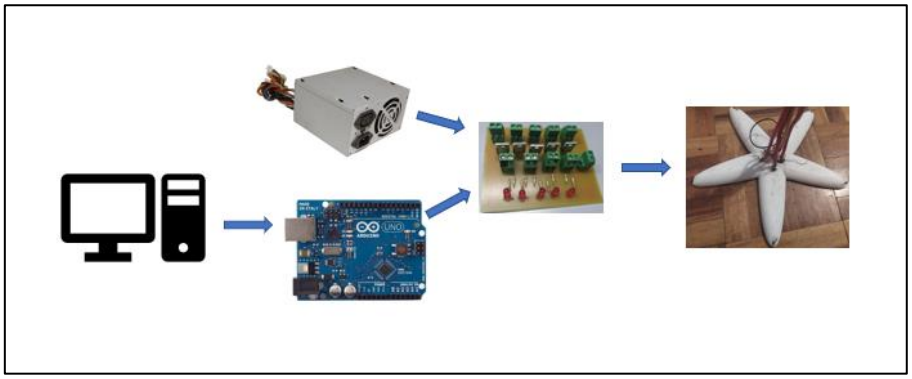


Figura 5. Esquema de funcionamiento y conexionado, en el cual se puede apreciar la placa Arduino UNO, una fuente de alimentación y la placa PCB diseñada.

Los actuadores son colocados tal y como se muestra en la siguiente figura. En los extremos de las patas se coloca una grapa que impida que se suelte la SMA y además fije un cable de retorno que va a tierra en la fuente de alimentación. En el centro de la estrella se concentran los cables que son llevados a la placa PCB.

Figura 6. A izquierda, Parte inferior de la estrella de mar con los actuadores visibles junto a cables de retorno. A derecha, Detalle de unión del cuerpo de la estrella con el cableado y SMA.

En cuanto a código, se ha diseñado mediante la interfaz de Arduino, un patrón de movimiento que permita la actuación del robot. Para poder conseguir movimientos con desplazamientos efectivos hay que diseñar este patrón atendiendo a dos cuestiones fundamentales: las fuerzas de rozamiento y el centro de masas. La fuerza de rozamiento debe ser empleada justo cuando se quiera inhabilitar el movimiento para fijar la estrella en procesos de estriado o cuando se quiera levantar alguna extremidad sin retroceder. Por otro lado, el desplazamiento se produce cuando el centro de masas consigue moverse mediante la combinación de los actuadores.

Atendiendo a esto, y tras realizar diferentes pruebas con otras combinaciones, se llega a la conclusión de que el mejor patrón de movimiento es el expresado en la figura 7.

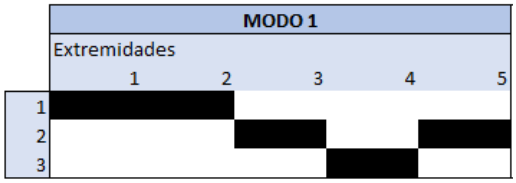


Figura 7. Esquema de orden de activación de las extremidades para conseguir movimientos.

En la siguiente secuencia de imágenes, obtenidas de videos de ensayos, podemos apreciar el sistema real en funcionamiento realizando el patrón diseñado y explicado anteriormente. En la primera imagen se levantan las dos primeras extremidades traseras. Una vez estas están activadas, se procede al calentamiento de las dos adyacentes tal como se ve en el esquema. Finalmente, se activa la pata frontal hasta mantener todas activadas. El proceso de relajación se hace en el mismo orden, manteniendo corrientes de menor intensidad por los cables que no deben bajar. Cabe reseñar que la forma de enviar las señales es muy importante por la integridad del robot, ya que enviar mucha intensidad de forma mantenida puede dar lugar a quemado de piezas o cables. Por ello

en este proyecto se abarcan varias formas de actuación mediante pulsos, pulsos duales o con de manera continua (aunque produce problemas).

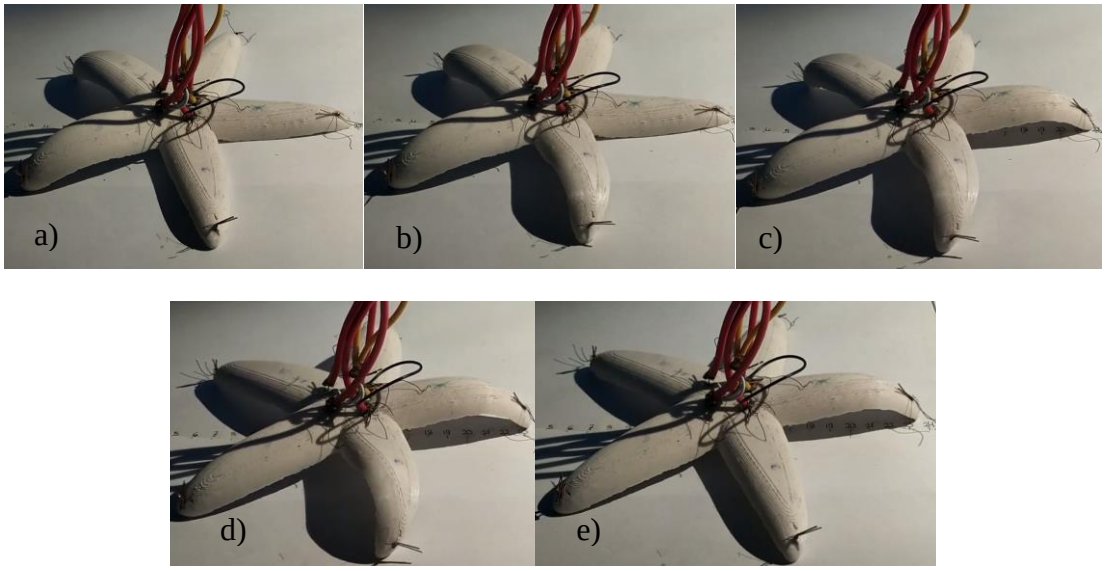


Figura 8. Robot real realizando el patrón de movimiento en cada una de las fases. a) Primer paso del patrón, activación de las dos extremidades traseras. b) Segundo paso del patrón, levantamiento de las dos extremidades adyacentes a las anteriores. c) Tercer paso del patrón, levantamiento de la extremidad delantera. d) Etapa de enfriamiento y bajada de las dos patas traseras. e) Etapa de relación de las dos patas intermedias.

Otras formas de actuación, suponen peores resultados, aunque en ocasiones pueden ser más simples. En este trabajo, también se estudia la posibilidad de avanzar mediante la actuación de una o dos patas únicamente y aprovechar el arrastre para avanzar.

Los resultados de movimiento se pueden ver en las siguiente grafica de tiempo desplazamiento. La velocidad media de este robot es de 1.8 cm/min, con el principal detractor de la fase de enfriamiento, siendo este dependiente del entorno al basarse en convección natural. Basándonos en esto, se podrá mimetizar en el entorno y cumplir el objetivo de un robot bioinspirado.

Figura 9. Desplazamiento de la extremidad delantera de la estrella de mar robótica bioinspirada.

Motivación

El uso de los robots articulados es algo ampliamente conocido en la actualidad, sin embargo, no ocurre lo mismo con los robots blandos. Acostumbrados a ver estos robots blandos habitualmente actuados hidráulicamente, neumáticamente o mediante motores, surge otra variante que cambia por completo el concepto de actuador convencional y es el uso de las SMA.

La SMA (*Shape Memory Alloys-Aleación con Memoria de Forma*) es un material conocido como inteligente por la capacidad de variar su forma a una previamente aprendida mediante la variación de la temperatura. Esto está fundamentado por las transformaciones austenítico-martensíticas. Por lo tanto, se trata de aprovechar esta característica para crear actuadores que se apliquen a robots blandos, ya que estas SMA a temperatura ambiente es flexible y moldeable.

En la actualidad la robótica soft está siendo ampliamente investigada por multitud de organismos y universidades, y se está explorando nuevas formas de actuación diferentes a las convencionales como neumáticas o motores. A raíz de esto, surgió la oportunidad, mediante el departamento de Automática y Robótica de la Escuela Técnica Superior de Ingenieros Industriales de la Universidad Politécnica de Madrid, de llevar a cabo un proyecto de desarrollo de un robot bioinspirado. Este grupo trabaja con robótica soft basada en SMA donde se ha trabajado en paralelo con un proyecto de medusa.

La estrella de mar que se trata en este proyecto supone todo un reto ante la posibilidad de trabajar con unos actuadores poco empleados hasta hoy y que sin embargo están en pleno crecimiento e investigación. Este tipo de actuación es totalmente distinto a lo conocido convencionalmente, lo cual supone una motivación extra, el conocer nuevas posibilidades de actuación robótica.

Muchos de los desarrollos de robots soft son bioinspirados, y por lo tanto podrían mimetizarse en un entorno natural y equiparse con diferentes sensores para permitir la medición de varios parámetros ambientales

Objetivos del proyecto

El objetivo de este proyecto es el completo diseño de un robot blando bioinspirado en una estrella de mar y su actuación mediante actuadores SMA, en concreto muelles de Nitinol.

En este proyecto se han fijado diferentes objetivos independientes para la realización del mismo:

- Adquirir las capacidades para la manipulación de Nitinol mediante aporte térmico y eléctrico.
- Creación de un circuito electrónico, para el control de la potencia aportada a cada actuador.
- Diseño de patrones de movimientos de la Estrella de Mar basándose en otros robots blandos similares, y el estudio del método más eficaz en cada medio. Para ello se deben tener en cuenta el calor aportado por cada amperaje en cada actuador y el tiempo sobre el que se encuentra sometido.
- Programación del robot con ayuda de una placa Arduino UNO.
- Diseño mediante el programa Inventor de Autodesk del molde sobre el que se vierte la silicona que dará forma al robot.
- Implantación de los actuadores y puesta en marcha del robot.

Desarrollo y metodología

Para cumplir con los objetivos a largo plazo se realizó una división en pequeños objetivos con los que alcanzar el objetivo principal de la construcción del robot. Esto fue posible con la realización de un diagrama de Gantt y con la descomposición del proyecto en paquetes de trabajo. Sin embargo, los plazos se vieron modificados debido a la imposibilidad de presentar el proyecto en el año previsto por motivos académicos. Por otro lado, al trabajar con materiales tan novedosos se tuvieron que realizar muchos ensayos con Nitinol, lo que conllevó a la necesidad de realizar más compras al extranjero que se traducen en más tiempo de envío.

En primer lugar, se lleva a cabo una fase de investigación y recopilación de información para abordar los temas del proyecto. Esto se basó principalmente en el estudio de otros robots similares antecesores blandos, ya sean actuados de una manera u otra. Además, esta investigación también se centró en aquellos que fuesen bioinspirados. Por otro lado, el uso del Nitinol como actuador se traduce como la utilización de un material poco usual, aunque en constante crecimiento, lo que conlleva a búsqueda de información que explique sus características y como beneficiarse de ella para realizar los actuadores necesario para el desarrollo de la estrella de mar.

A continuación, se hace la elección de silicona con la que realizar la estructura del robot y el diseño de dicha estructura. Para ello, se utiliza como apoyo el uso de programas CAD para la impresión en 3D de un molde que de forma a este robot. Todo esto es posible debido a un proceso de abastecimiento de suministros constante durante todas las fases del proyecto, que en este caso se basa en elementos para la impresión y diferentes siliconas. La variedad de las siliconas se emplea para el estudio experimental de las características del material en cuanto a elasticidad y la resistencia a la fuerza sometida por el uso del actuador.

Tras esto, se construye el robot y los actuadores que se introducen en él, lo que permite la realización de la parte electrónica. El diseño electrónico trata de resolver el desafío de aportación determinados voltajes y amperajes controlados con los que se realizan pruebas que determinen el funcionamiento del robot.

Finalmente, se diseña el patrón de movimiento óptimo para el movimiento del robot en cada circunstancia con el apoyo de una interfaz de Arduino con todas las posibilidades que esto conlleva.

Palabras clave

SMA, Shape Memory Alloy, Materiales Inteligentes, Nitinol, Robots Bioinspirados, Robótica Soft, Robótica Blanda.

Códigos Unesco

330416 DISEÑO LÓGICO

330602 APLICACIONES ELÉCTRICAS

330412 DISPOSITIVOS DE CONTROL

330703 DISEÑO DE CIRCUITOS

Índice de Contenido

1. Estado del arte 19
1.1. Robótica Soft 19
1.1.1. Robots neumáticos 20
1.1.2. Gusano actuado neumáticamente. 21
1.1.3. Robot acuático actuado neumáticamente 21
1.1.4. Estrella de mar actuada neumáticamente 22
1.2. Robots Soft con SMA 23
1.2.1. Gusano rodante robótico. 23
1.2.2. Robot Lombriz 24
1.2.3. Robots acuáticos 25
1.4. Robots bioinspirados en las estrellas de mar. 27
1.3.1. Estrella de mar actuada mediante SMS. 27
1.3.2 Estrella de mar actuada mediante SMA en forma de muelle. 29
1.3.3. Estrella de mar actuada mediante otros métodos 31
1.4. Comparación entre SMA y actuadores neumáticos 32
1.5. SMA (Shape Memory Alloys – Aleaciónes con Memoria de Forma) 33
1.5.1. Propiedades del Nitinol como SMA 33
1.5.2. Procesos de memoria de forma 36
1.4.3. Historia del Nitinol 37
1.5.4. Aplicaciones del Nitinol 38
1.5.5. Muelle actuador 40
1.5.6. Otro método de actuador 40
2. Diseño del robot 42
2.1. Diseño del robot. 42
2.2. Actuadores 46
2.2.1. Muelle como actuador 46
2.3. Sistema electrónico y de potencia 50
2.4. Programación y adaptación del robot 52
3. Actuación del robot 56
3.1. Experimentos 57
3.1.1. Elección de patrones de movimiento 57
3.1.2. Mantenimiento de todas las patas juntas a la vez 58

3.1.3. Arrastre con dos patas 58
3.2. Análisis de evolución de las mejoras en la estructura 59
3.2.1. Primer método: cables en extremos e impulsos constantes 59
3.2.2. Segundo método: implementación de cable de retorno. 60
3.2.3. Tercer método: Cambio de cables SMA 61
3.2.4. Cuarto método: Sustitución de los cables a tierra 62
3.3. Análisis de la evolución de las mejoras del código 62
4. Resultados 67
5. Conclusiones y líneas futuras 72
5.1. Líneas futuras 73
6. Planificación 74
7. Presupuesto 77
8. Abreviaturas y glosario 79
9. Bibliografía 80
10. Índice de Figuras 84

1. Estado del arte

1.1. Robótica Soft

Los robots blandos son aquellos que se caracterizan por el empleo como base, un material flexible y elástico tal como la silicona. Estos tienen múltiples aplicaciones que aprovechan estas ventajas aportadas por la elasticidad del material usado. Estos materiales son compuestos con aquellos cuyo módulo se encuentra entre los valores de materiales biológicos blandos. De este modo los blandos más comunes son los robots accionados de manera neumática e hidráulica, sin embargo, la utilización de SMA en la robótica ha ido aumentando de manera progresiva hasta día de hoy. [1] [2]. Realizando una comparación de robots blandos contra duros se pueden destacar ciertas ventajas e inconvenientes. En cuanto a las ventajas, se puede resaltar la infinidad de grados de libertad posibles, lo cual implica en una gran destreza de movimiento, todo esto facilitado por la elasticidad de los materiales empleados. Además, es destacable la gran adaptabilidad al entorno, lo que hace resaltar la importancia de los robots bioinspirados. Por otro lado, las desventajas en comparación con los robots no blandos residen en el difícil manejo, la baja precisión y la baja capacidad de carga. [2]

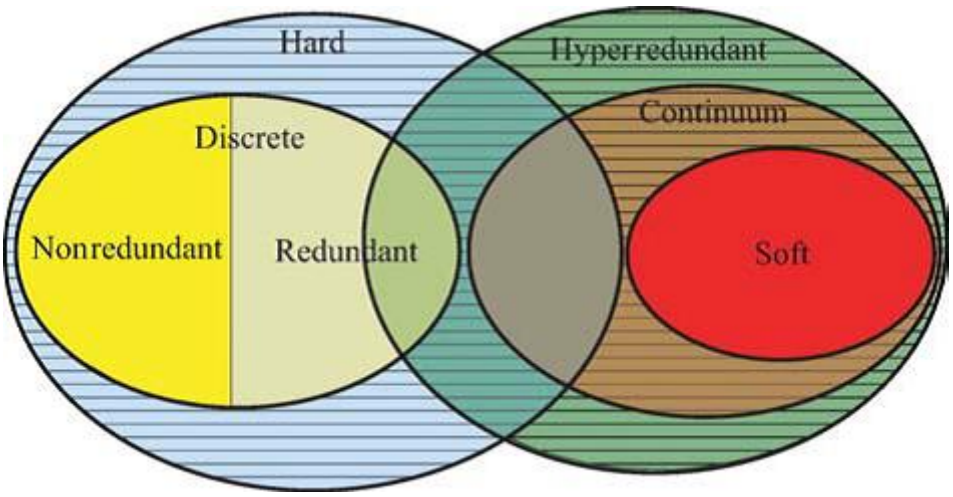


Figura 10. Esquema de la robotica en función de propiedades de uso. [2]

En cuanto al empleo de robots blandos se pueden observar multitud de campos además de los bioinspirados. Estos pueden ser robots hiperredundantes, grippers, robots de aplicación médica…

En conclusión, la robótica soft bioinspirada, permite la adaptación de un robot a entornos impredecibles de manera simple, además de no resultar invasiva para el medio ambiente por su capacidad de mimetización. Sin embargo, esta actuación como se explicará, se asemejará a los robots reales y podrán, saltar, reptar, andar, nadar…

A continuación se analiza el estado del arte de los dos modos de actuación que se han tomado en cuenta para este proyecto, el neumático y las SMA, de cada uno se presentan

las ventajas, las desventajas y algunos prototipos significativos que emplean estas tecnologías.

1.1.1. Robots neumáticos.

Los actuadores neumáticos representan actualmente la principal fuente de control en campos industriales. Estos consisten en la aplicación de aire a presión superior a la exterior, alrededor de orden de los 7 bares, lo que implica un movimiento de un pistón. El principal motivo de esta amplia utilización es bajo coste y la simplicidad en su uso. [3]

En la robótica blanda los actuadores neumáticos son muy empleados y en concreto los músculos neumáticos, también conocidos como PAMs por sus siglas en inglés (Pneumatics Artificial Muscles) basados principalmente en el inflamiento y desinflamiento de las vejigas.

Un ejemplo de robot bioinspirado Soft actuado mediante músculos neumáticos es el presentado en 2013 por Emanuele Guglielmino, Isuru Godage, Letizia Zullo y Darwin G. Caldwell. En este se estudia el comportamiento de un tentáculo de un pulpo y su interacción en un ecosistema. Para este proyecto se necesitó la colaboración tanto de ingenieros mecánicos como eléctricos. La complejidad de esto se basa en los infinitos grados de libertad de estas extremidades al estar invertebrados. Se crearon placas electrónicas flexibles para la implantación de las mismas en el robot [4]

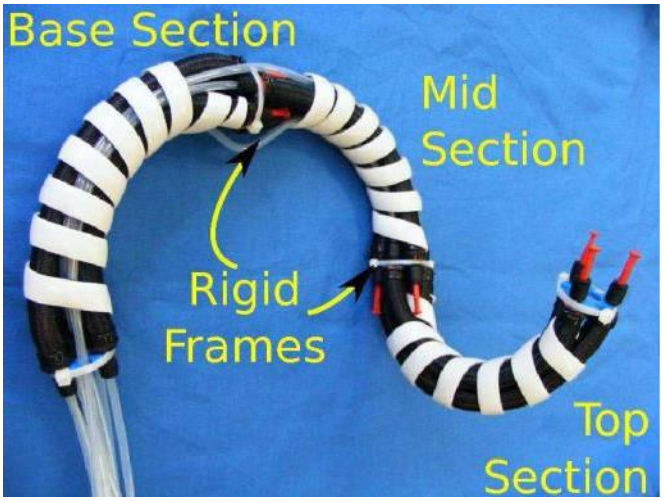


Figura 11. Tercera versión del proyecto presentado en IROS, Tentáculo robótico bioinspirado en un pulpo, actuado mediante PAMs.

Continuando con otro robot blando neumático bioinspirado también destacan otros sin la necesidad de usar PAMs. La gran utilidad y versatilidad de la silicona significa una gran importancia que además permite adoptar formas nuevas que se adapten a cualquier elemento como la RBO Hand 2. Esta se forma mediante silicona y moldes como los actuadores anteriores, sin embargo, aparece un actuador como PneuFlex. Los PneuFlex son unos actuadores diseñados en 2013 destacados por el bajo precio y la no toxicidad

del material usado. Se basan en el mismo principio neumático de inflamiento con la diferencia de que estos están limitados en dirección del aire lo que prohíben una elongación. Cabe destacar las 31 posiciones que posee este robot. [5]

Es de significativa importancia el resaltar la importancia y el esperanzador futuro de los actuadores neumáticos en el campo de la medicina sobre todo en el mundo de las prótesis artificiales. [6] [7]

Figura 12. Múltiples movimientos del neumático RBO Hand 2. [5]

1.1.2. Gusano actuado neumáticamente.

Un ejemplo de robot bioinspirado, cuyo comportamiento es similar al de un animal, es el PISRob. Este robot, está accionado neumáticamente mediante tres actuadores. Uno en cada extremidad y otro central. Los actuadores de los extremos se utilizan para restarle rozamiento y así al contraer el actuador central poder deslizar el cuerpo sobre el suelo. Además, este diseño permite la mimetización en el entorno ya que permite la escalada y desplazamiento por ramas. En la imagen se observa este robot realizando el desplazamiento y se aprecia los tres componentes neumáticos. [8]

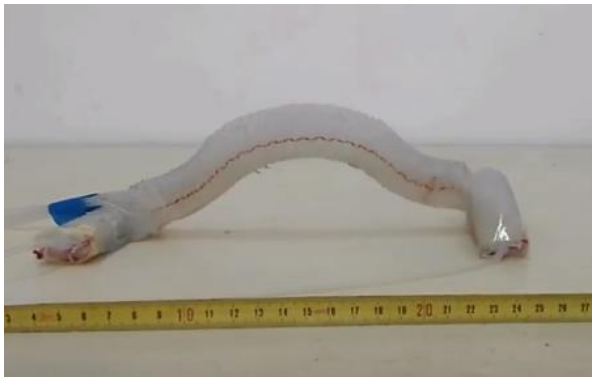


Figura 13. PISRob realizando movimiento típico de gusanos. [8]

1.1.3. Robot acuático actuado neumáticamente

Ejemplificando un robot bioinspirado cuya actuación sea neumática se pueden apreciar entre otros, medusas. En el ejemplo aportado, la medusa es diseñada mediante un molde en CAD sobre el cual se vierte silicona el mismo modo que este proyecto. Como se aprecia en la figura 14 el control se realiza mediante la inyección de aire en el interior

de la medusa y mediante la expansión y contracción realiza el movimiento necesario. Este actuador conocido como SPC (Soft Pneumatic Composite) fue diseñado por la Universidad de Harvard y se encuentra embebido dentro del robot blando. De este modo, la medusa conseguirá el objetivo de mimetización con el entorno. [9]

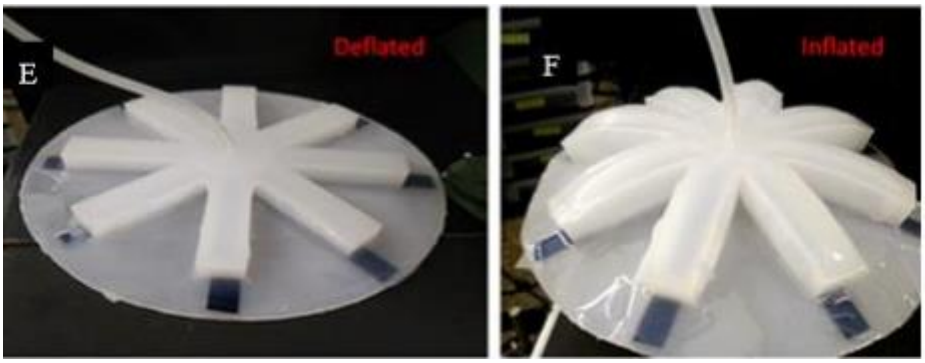


Figura 14. Robot Medusa actuado neumáticamente en el momento de desinflado e inflado. [9]

1.1.4. Estrella de mar actuada neumáticamente.

Uno de los robots más populares relativos a los robots blandos, entendidos como aquellos hechos con polímeros elastómeros, es el realizado por la Universidad de Harvard. Estos realizaron esto para obtener cuatro fines: compresión con generación de aire de manera sencilla, un robot medioambientalmente benigno, que el robot fuese ligero en cuanto a peso y que pueda realizar movimientos rápidos. [10]

Este robot, que se puede observar en la figura 15, tiene estructura de cuadrúpedo teniendo en cada una de estas patas un control independiente debido a un actuador independiente en cada caso. Estos actuadores están conectados por tubos que conducirán el aire hasta las vejigas. Además, tendrá otro actuador más en el centro del cuerpo del robot que facilitará el movimiento debido al desplazamiento del centro de masas. En consecuencia y como ocurre con robots bioinspirados en estrellas de mar anteriores realizando un patrón de movimiento adecuado se consiguen desplazamientos efectivos de hasta 4 cm por secuencia. Otra función de este robot a destacar es la capacidad para traspasar pequeñas barraras por debajo de las mismas. [10]

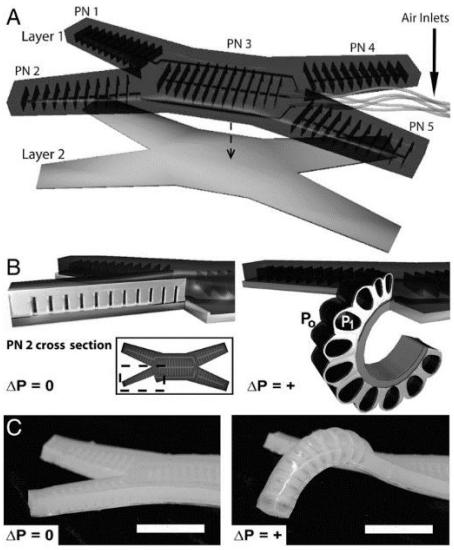


Figura 15. Representación esquemática del robot cuadrúpedo bioinspirado en una estrella de mar y método de doblado. [10]

1.2. Robots Soft con SMA

1.2.1. Gusano rodante robótico

El principal objetivo de los robots blandos bioinspirados es el adaptar los comportamientos del mundo animal no basados en articulaciones como piernas. La aparición de GoQBot surge por Huai-Ti Lin, Gary G. Leisk y Barry Trimmer inspirados en ciertos gusanos que no se desplazan de la manera habitual. Estos invertebrados utilizan la fuerza de la gravedad y el impulso generado por su cuerpo para rodar en determinados ambientes y terrenos. Por ejemplo, en terrenos lodosos estos animales no pueden nadar como hacen de manera habitual por lo que utilizan unas pequeñas piernas para encoger su cuerpo y desenvolverse como se puede ver en la Figura 16, donde se aprecia una larva de la familia de los Crambidae realizando estos movimientos. Esta oruga utiliza este método de desplazamiento cuando percibe un golpe en sus alrededores. [11]

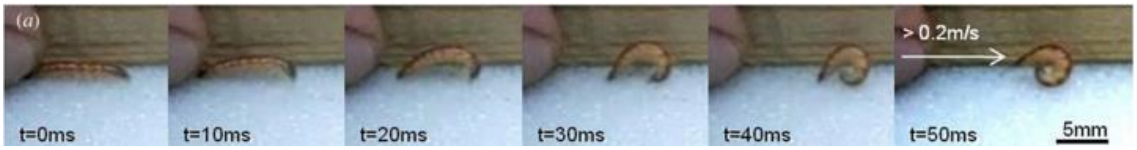


Figura 16. Secuencia de desplazamiento de una oruga de la familia de las Crambidae. [11]

Este robot también tiene la posibilidad de desplazamiento de manera convencional mediante la introducción de dos actuadores de SMA situados en medio cuerpo cada uno. Para el diseño de este se ha tenido en cuenta a la hora de realizar el cuerpo de silicona que debe tener cavidades para los actuadores y para el cableado ya que estos

actuadores están formados por dos cables de Nitinol que atraviesan el cuerpo entero y además deben estar conectados por corriente eléctrica para poder ser utilizados. Esta silicona se ha desarrollado en un molde impreso en 3D diseñado previamente en CAD. Este robot también tiene implantado un mecanismo que facilite el desplazamiento efectivo con el deslizamiento de las extremidades en determinados momentos. [11]

El sistema de control se realiza con estimulaciones de corrientes moduladas de control. Tras esto se lleva a cabo un trabajo empírico para comprobar la relación que tiene el control de los dos actuadores y el diseño de los patrones de movimiento. Aquí se van variando tiempos de actuación del pulso modular de frecuencia (PWM) y la potencia aportada. [11]

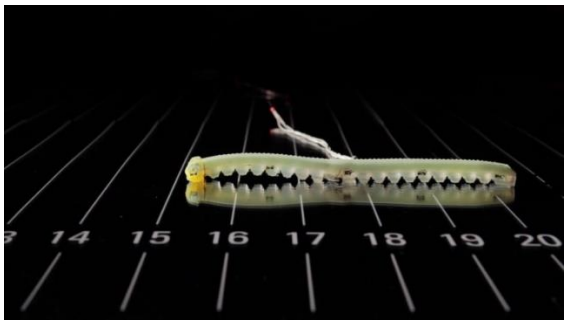


Figura 17. GoQBot en realización de pruebas de movimiento. [11]

1.2.2. Robot Lombriz.

Como estudio de las lombrices surgió la idea de este micro-robot bioinspirado cuyo fin es imitar el movimiento de estas. El movimiento de una lombriz se basa en movimientos ondulatorios de sus músculos, con patrones de contracción y estirado, lo que supone un problema para la adaptación a un robot ya que tiene que tener una longitud variable. Para esto se diseña un módulo que sea capaz de estirarse un 60% y encogerse un 25% y actuador que propicie estas limitaciones, y además este módulo debe asemejarse cuando se asocie con otros al cuerpo de una lombriz. Mediante el uso de Nitinol como actuador en forma de muelle atado a dos discos de latón en los extremos de cada módulo se pueden conseguir estas características. Utilizando el efecto Joule para el calentamiento de la SMA se consiguen los cambios de fase y el desplazamiento propio del material. Por otro lado, el módulo debe estar constituido por silicona que soporte la flexibilidad necesaria para el movimiento. [12]

En concreto este micro-robot está formado por cuatro módulos, lo que significan unos cinco discos de latón. Se diseña un molde de nylon con la forma de todos estos módulos y con una cavidad interior, para posteriormente verter la silicona. [12]

En cuanto al control, se diseña un sistema de cuatro pulsos modulares, es decir, uno por módulo, y que se encuentren desfasados entre ellos 320ms. Esta frecuencia utiliza el valor típico de 0.5 Hz. Estos pulsos transmiten una corriente a las SMA como se muestra en la tabla I. Este robot sería capaz de desplazarse aprovechando también la fuerza de rozamiento entre la silicona y el suelo, pero adicionalmente se le colocaron

pequeñas y finas piernas metálicas para que estas se hincasen con cada desplazamiento en terrenos como el terciopelo. Esto mejora considerablemente el enganche. [12]

Tabla I. Velocidad del robot lombriz. [12]

Frecuencia (mHz)	Duración corriente del pico (ms)	Corriente (mA)	Energía por cada módulo	Velocidad de medida (mm/s)
162	670	433	0.44	0.11
250	480	500	0.42	0.17
470	320	600	0.40	0.22

Figura 18. (Izquierda) Módulo de lombriz con SMA en forma de muelle y dos discos de latón. (Derecha) Cuerpo del Robot lombriz conectado por cables en uno de los extremos. [12]

1.2.3. Robots acuáticos

El empleo de SMA para robots acuáticos tiene un gran protagonismo debido a las cualidades de este material a la hora de retornar a la estructura martensítica. El actuador al estar sumergido hace que la disipación de calor sea superior que, si estuviera en el aire, lo que significa que se realizan movimientos notablemente más rápidos. Esta gran ventaja se encuentra contrarrestada debido a que, en el proceso de calentamiento, se necesita un mayor aporte energético, que queda reflejado en los hercios con los que se realizan los pulsos modular de control, normalmente asciende en torno a 1 Hz del que tendría al estar al aire libre.

Como robots bioinspirados acuáticos y actuados por SMA se pueden destacar dos muy importantes. Por un lado, tenemos, *Robojelly*, acrónimo del inglés *robot* y *jelly(gelatina)*. Este proyecto desarrollado por Alex Villanueva, Colin Smith y Shashank Priya está basado en los estímulos motores de una medusa en el mar, en particula en la *Aurelia Aurita*. Un factor importante para poder desarrollar este robot era la fuerza de propulsión de la SMA que permitiese el movimiento de la medusa cuando esta se encuentra sumergida. Esto implica que debe tener una densidad apropiada el material elástico para que se facilite el movimiento y unas dimensiones precisas. En cuanto al actuador empleado, se ha desarrollado un mecanismo basado en la colocación de un muelle de SMA junto con un muelle de acero, todo ello rodeado por silicona,

como se puede ver en la figura 19. De este modo cuando se realiza una contracción de la SMA por corriente eléctrica de manera rápida, *Robojelly* se impulsará en el agua. Y en estado de relajación el muelle de hacer y la silicona ayudaran a retornar a la SMA al estado inicial. [13]

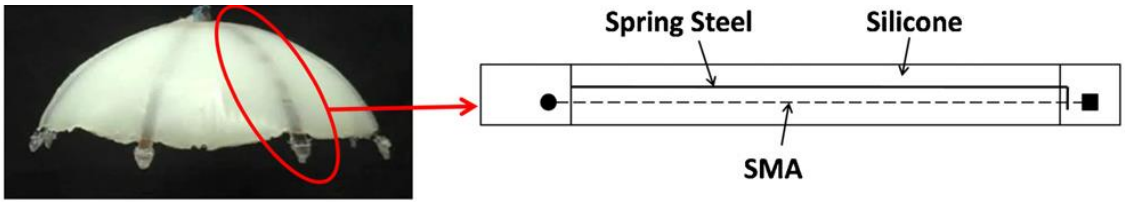


Figura 19. Esquema de un actuador BISMAC en Robojelly. [13]

Por otro lado, está el iTuna, desarrollado por Claudio Rossi, docente del Centro de Automatización y Robótica de la Universidad Politécnica de Madrid. En este caso la SMA imita el movimiento ondulatorio de aleteo de un pez sumergido en el agua nadando. Para conseguir esto, se programa de manera que las contracciones de SMA alcancen de manera consecutiva diferentes estados de contracción tan y como se indica en la figura 20. Para cada una de las pseudoarticulaciones se colocan dos cables de SMA con una memoria de forma en posición austenítica opuesta, que permita que la cola se doble tanto a derecha como a izquierda. Además, en el extremo se coloca una aleta para que esta sea la propulsora del movimiento. [14]

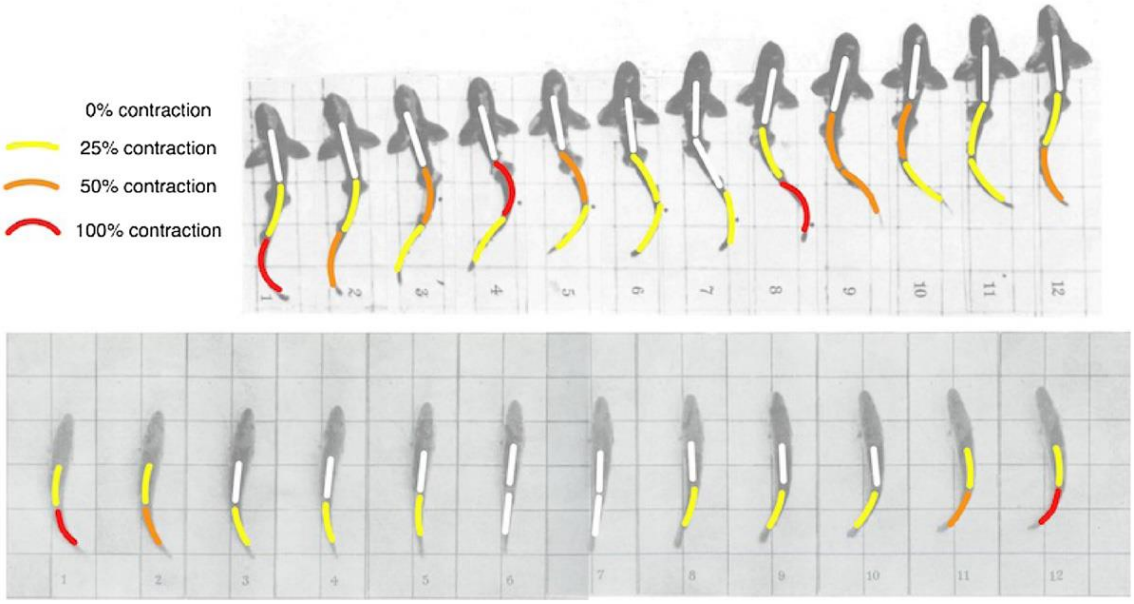


Figura 20. Movimiento ondulatorio de iTuna con los diferentes actuadores de SMA y el porcentaje de contracción del mismo. [14]

1.4. Robots bioinspirados en las estrellas de mar.

Las estrellas de mar hechas como robots blandos y SMAs se pueden encontrar principalmente de dos modos. Por un lado, están las fabricadas mediante una pequeña estructura modular conocida como SMS (Smart Modular Structure) y por otro lado aplicando directamente esta SMA en forma de muelle. Ambas comparten gran parte de las virtudes del trabajo con SMA en cuanto a control se refiere, sin embargo, las principales diferencias nos las encontramos en la implementación de los cables de SMA y en la habituación al terreno ya sea agua o tierra.

1.3.1. Estrella de mar actuada mediante SMS.

Este tipo de robot blando trata de imitar movimientos de una estrella de mar mediante el movimiento de los tentáculos. Para ello emplea un sistema basado en las SMAs con la utilidad de que estos trabajen varios y simultáneamente en cada pata de la estrella. Esto se consigue con un actuador llamado SMS (Smart Modular Structure). [15]

Los SMS son unos actuadores diseñados a raíz de utilización de SMAs dispuestos de manera paralela y en el mismo plano. Estos deben tener el mismo patrón de diseño y el mismo entrenamiento para que todos a la hora de ser actuados trabajen simultáneamente y aporten mayor fuerza al movimiento. La principal desventaja de estos actuadores es la dificultad en la elaboración de estos ya que deben tener un proceso muy preciso. [15]

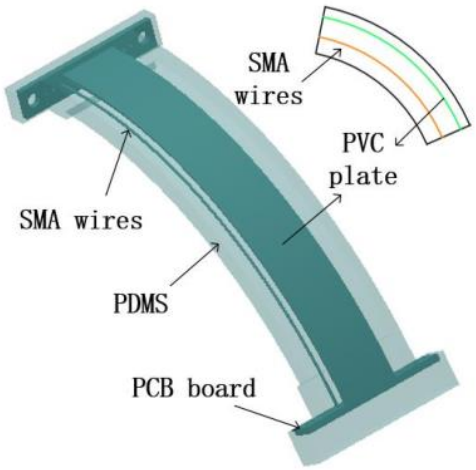


Figura 21. Actuador SMS y sus componentes. [16]

El inicio de la fabricación de estos dispositivos se lleva a cabo mediante la soldadura de estos cables de SMA con dos placas PCB (Printed Circuit Board), una en cada extremo, que permitan la conducción de la misma corriente por cada uno de los cables y de manera controlada. Tras esto se conectan los cables que alimentarán los cables de SMA y se creará mediante impresión 3D un molde que tendrá la forma de la pata y sobre el que irá el dispositivo creado con una lámina de PVC encima. Esta lámina tiene la función de retornar la forma recta de las SMA al ser deformados, y como tiene poca resistencia frente a las SMA en forma austenítica se deforma levemente. Una vez obtenido el molde se vierte la silicona a usar, en este caso PDMS, también conocido

como polidimetilsiloxano o dimeticona, hasta la mitad del volumen de este para que tras realizar el proceso de secado se introduzca la placa PCB con los cables y se vierta la parte restante de silicona. [15] De este modo se consigue aislar los cables y la placa, lo que significa una mejora en la utilización en agua y no evita la utilización fuera de ella. En la figura 21 podemos ver un esquema de un SMS (Smart Modular Structure). [16]

La estrella se obtiene conectando cinco actuadores SMS unidos mediante una placa de forma pentagonal, por la cual atraviesan los cables que se conectan a los PCBs de cada pata. Estos cables serán los que suministrarán la corriente eléctrica que controlará este robot. Mediante un control de esta se diseñan los patrones de movimiento, en los que se tiene en cuenta el tiempo de enfriamiento y calentamiento, la fuerza de la SMA, el medio sobre el cual se quiera trabajar y el rozamiento. El patrón de movimiento es el que se observa en la figura 22. Una de llamativa información que aporta la gráfica es que el desplazamiento no es lineal si se asemeja a ninguna función. Esto es debido a que el proceso de movimiento conlleva dos movimientos como en las figuras (a) se observa, lo que desencadena en que el desplazamiento resulta considerable en el momento que las patas que primero se mueven empiezan a bajar, lo que explica que en la gráfica hay un punto en el que aumenta el desplazamiento. [15]

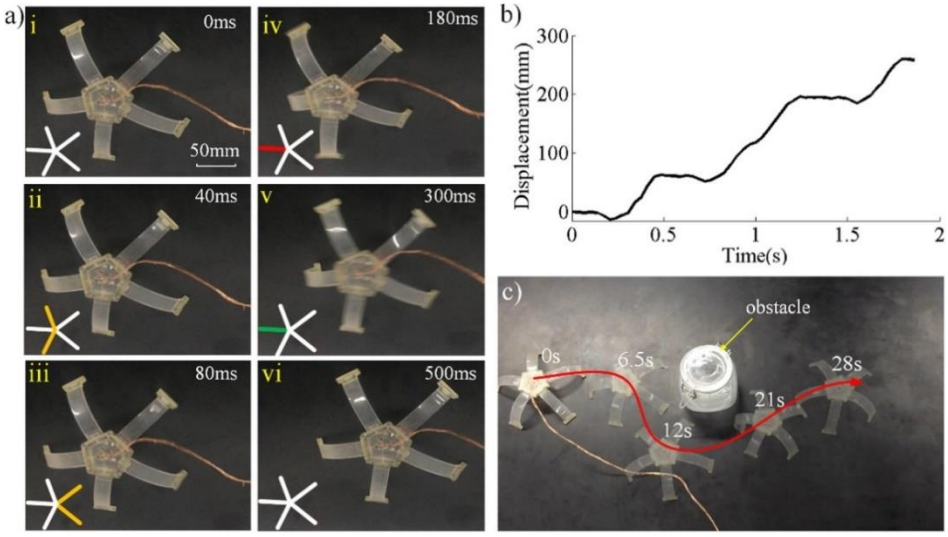


Figura 22. (a) Patrón de movimiento de una estrella de mar formada por SMS. (b)Gráfica desplazamiento/tiempo de la estrella de mar robótica. (c)Robot en movimiento superando obstáculos. [15]

Esta estrella también tiene la virtud de que en el agua aumenta las direcciones y acciones posibles que realizar. La desventaja es el aumento de la fuerza que debe ejercer el actuador, lo cual se soluciona mediante la trasmisión de un pulso modular con mayor frecuencia, cercana a los 2 Hz. Con esto, y teniendo en cuenta que pueden utilizarse más actuadores simultáneamente, que conllevaría aún a más aporte de potencia, se programan patrones de movimiento para realizar una rotación en el agua, elevaciones sobre el fondo e incluso subir a la superficie. La diferencia entre estos dos últimos es el uso de diferentes valores de potencia ya que en el último se requiere mayor velocidad de movimiento. [15]

1.3.2 Estrella de mar actuada mediante SMA en forma de muelle.

Los robots actuados por SMA en forma de muelle tiene la principal característica de la necesidad de un muelle bien diseñado y entrenado para soportar el mayor número de ciclos sin deformación. Esto puede ser una desventaja frente a los actuadores SMS ya que la memoria guardada la llevan a cabo varios cables frente a que una actuación mediante muelles significa que el esfuerzo lo hará solo un cable. Frente a esto, tiene la principal virtud de que puede soportar cargas mayores, que dependen del diámetro del cable y la calidad.

Basándose, como anteriormente en los movimientos de las patas de las estrellas de más y de los tentáculos de los pulpos, se intenta mediante muelles realizar un robot bioinspirado que asemeje los movimientos de estos animales.

La realización de este robot, se lleva a cabo mediante silicona para el cuerpo. Esta se vierte sobre un molde previamente impreso en 3D en función de las dimensiones de la estrella y se deja reposar para que se realice el curado. Por otro lado, se debe realizar el entrenamiento de la SMA, normalmente Nitinol, en hornos de alta temperatura. Una vez obtenidos estos muelles son colocados teniendo en cuenta la medida de las extremidades del robot y de la contracción necesaria. Además, estos son fijados en el extremo y en el centro para evitar un funcionamiento incorrecto. [17] Respecto a los actuados con SMS se observa que en este caso el cuerpo es completamente de silicona, y los otros tienen una placa central no hecha de silicona.

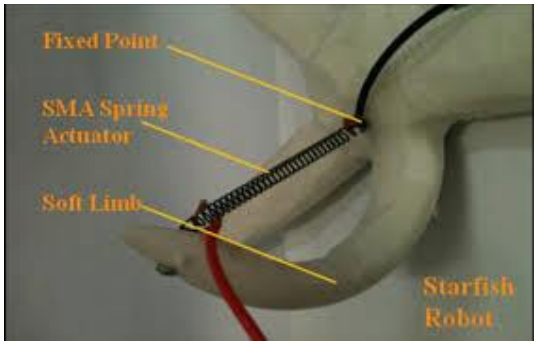


Figura 23. Tentáculo de una estrella de mar robótica actuada por una SMA. [17]

Una vez se obtiene el cuerpo se estudia el movimiento de la estrella teniendo en cuenta las fricciones y los centros de gravedad. Para que este robot se mueva se deben realizar movimientos que gracias a energía elástica de los muelles desplacen el centro de gravedad de la estrella. Esto último es la cuestión principal, ya que, al desplazar el centro de masas, que al ser el robot simétrico estará en el centro geométrico aproximadamente, es cuando el robot se mueve. Esto se puede observar en la siguiente figura 24 mediante un esquema. En primer lugar, se desplaza el centro de gravedad (b), tras esto se estabiliza esta nueva posición desplazada. Finalmente, se aprovecha la

energía elástica de las patas traseras para conseguir bajar el cuerpo hasta el reposo consiguiente un pequeño desplazamiento. [18]

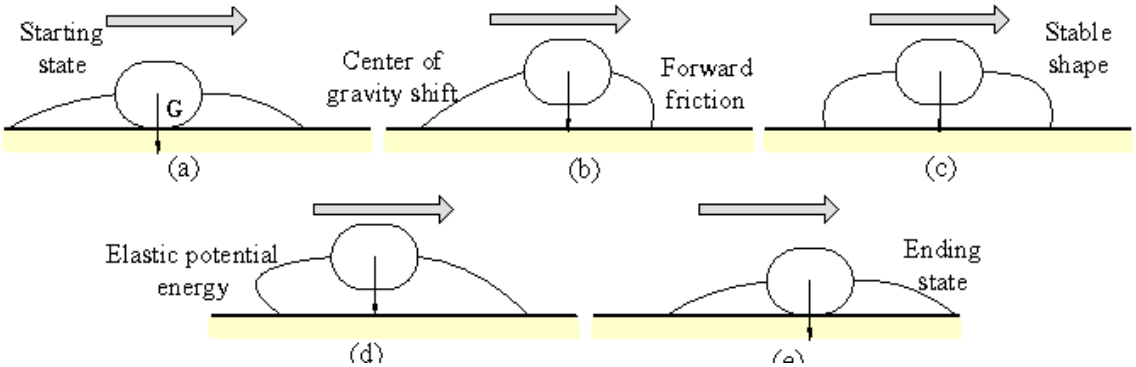


Figura 24. Metodología de desplazamiento de robots articulados mediante elementos blandos. [18]

Estos robots con múltiples articulaciones han sido estudiados variando el número de estos siendo más complejo cuanto más se aumenta el número, aunque mejoran los resultados. Para cada uno de estos, se le diseñan patrones de movimiento distintos. Según un estudio experimental presentado en la conferencia internacional IROS, fijando los parámetros de los diámetros del cable y del muelle, se estudia el desplazamiento efectivo de cada robot, desde una articulación hasta cinco. Los patrones de movimiento se ven reflejados en la figura 25, con los cuales se observa que cuantas más articulaciones, en este caso se estudia un máximo de cinco, mayor será este desplazamiento por unidad de tiempo. Cada uno de los recuadros equivale a un impulso eléctrico de una señal modulada. [18]

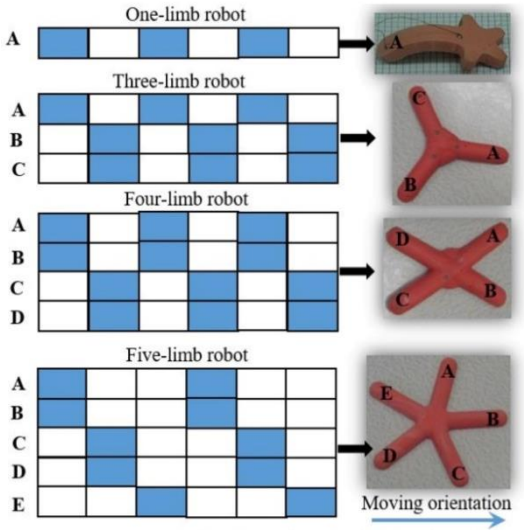


Figura 25. Patrones de movimientos de un robot blando articulado por muelles de SMA simulando una estrella de mar. [18]

Otra estrella de mar actuada mediante SMA considerada en este proyecto es la creada por la Universidad Tecnológica y de Ciencia de China en colaboración con la Escuela Aeroespacial y mecánica de Nanyang. Esta destaca por los excelentes resultados de la

misma. Los resultados han sido tomados en diferentes terrenos siendo llamativa la gran mejoría en terrenos arenosos.

En cuanto a patrón de movimiento emplea el mismo que en el caso anterior, aunque también crea uno para evitar obstáculos. Adicionalmente a la secuencia de movimiento, se crea un patrón para que la estrella baje rodando por terrenos inclinados mediante la contracción de las patas. [19]

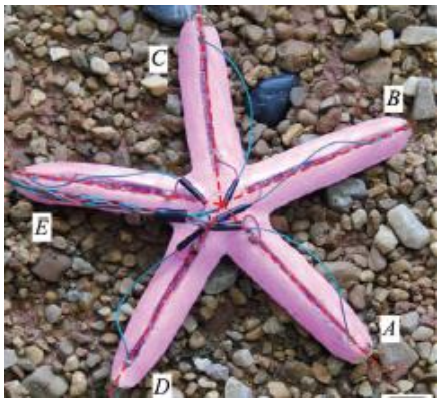


Figura 26. Estrella de mar actuada mediante SMA de la Universidad Ciencias y Tecnología de China. Las letras visibles representan el nombre dado a cada extremidad. [19]

1.3.3. Estrella de mar actuada mediante otros métodos.

No solo existen robots blandos actuados neumáticamente o mediante SMA. En la Universidad de Diponegoro, Semarang, Indonesia se ha creado un robot bioinspirado en una estrella de mar cuadrúpeda actuada mediante servomotores controlado por Arduino.

En esta estrella se crea un molde de la misma manera que en las anteriores, mediante impresión 3D, donde se tiene en cuenta la posición del servomotor. Por un lado, se crea el cuerpo de la estrella y por otro lado las patas que tendrán la articulación blanda. Además, se le añaden unas aletas superficiales para mejorar la fricción. [20]

Este robot es capaz de mover las extremidades independientemente, lo que permite el movimiento realizando secuencias ondulatorias. Además, es capaz de soportar cargas de hasta 350 gr. [20]

Figura 27. Estrella de mar cuadrúpeda actuada mediante servomotores. [20]

1.4. Comparación entre SMA y actuadores neumáticos

Los robots bioinspirados hasta ahora explicados, neumáticos y actuados por SMA tienen diferencias reseñables a la hora de elegir aplicación.

En torno a la SMA, cabe destacar come ventajas el peso del material actuador que es inferior al que supone una cámara neumática. Por otro lado, los precios de estos materiales inteligentes son actualmente inferiores y se encuentran en tendencia a la baja.

La utilización de SMA para la implementación en el campo de la robótica, supone una alternativa interesante que queda reflejada en la figura 28 en la que podemos ver la buena proporción de poder-fuerza con el peso del actuador. La SMA además de ser el tipo de menor peso es el segundo de mayor fuerza por detrás de los actuadores hidráulicos. [21]

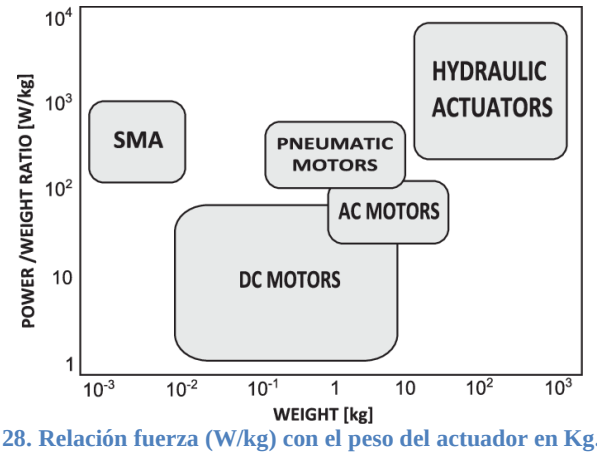


Figura 28. Relación fuerza (W/kg) con el peso del actuador en Kg. [21]

En cuanto a complejidad de utilización, el sistema de actuación de los materiales inteligentes es relativamente simple al basarse a un sistema electrónico de potencia que controle la intensidad aportada al cable. Por otro lado, los sistemas neumáticos tienen la necesidad de utilizar cámaras e inyectores de presión, lo que supone una mayor complejidad.

Como desventajas de estas SMA, destaca la difícil implantación en sistemas reales por la variabilidad de temperaturas, lo que puede suponer una diferencia de respuesta grande entre lo teórico y lo real. Sin embargo, cada día se está más cerca de superar estas dificultades con números equipos a nivel mundial trabajando con estos actuadores.

Esto justifica la preferencia de SMA, en lugar del empleo de actuadores neumáticos para este proyecto. En la tabla II se puede observar un pequeño resumen de los motivos explicados en comparación con estas dos modalidades de actuación.

Tabla II. Actuadores SMA vs Actuadores neumáticos.

	SMA	Neumáticos
Peso	X	
Economía	X	
Sencillez Actuación	X	
Durabilidad		X
Dimensiones	X	
Estabilidad		X
Versatilidad	X	X
Limpieza	X	X
Ambientes Inflamables	X	

1.5. SMA (Shape Memory Alloys – Aleaciónes con Memoria de Forma)

1.5.1. Propiedades del Nitinol como SMA

Las propiedades mecánicas de este material son muy interesantes y con muchos campos de aplicación. Existen distintas aleaciones con memoria de forma entre la que más destaca es el nitinol. El Nitinol es el nombre comercial de una aleación de Níquel y Titanio con entre un 55-57% del primero. Como toda aleación metálica, consta de un diagrama de fases visible en la figura 29, donde se observa que existe un compuesto intermedio formado por TiNi el cual es llamado Nitinol. [22].

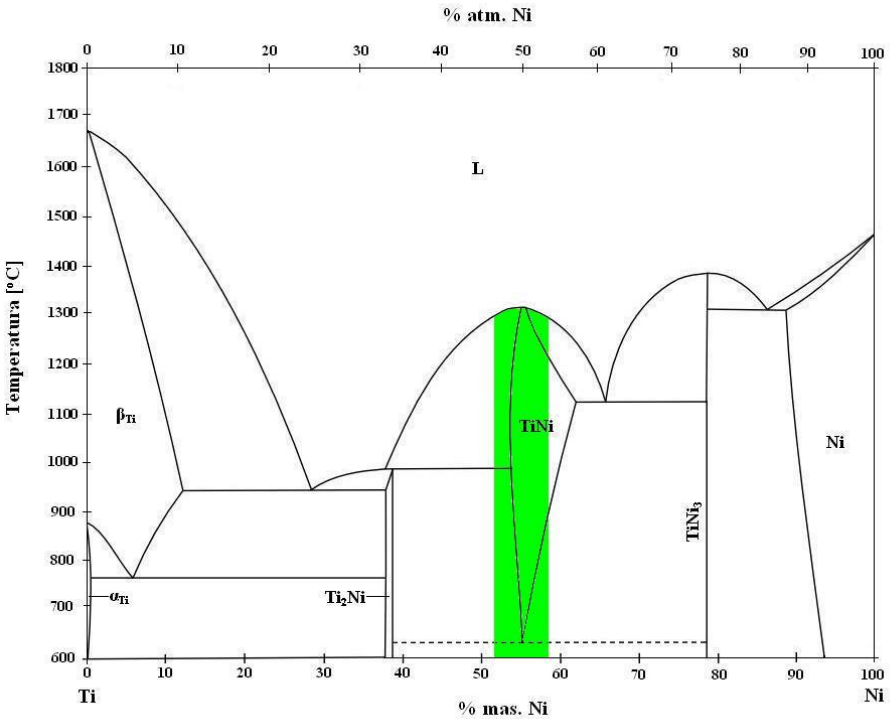


Figura 29. Diagrama de fases del Nitinol. [22]

Las propiedades de esta aleación son variantes con la temperatura al pasar de estados martensíticos a austeníticos siendo esta su característica fundamental. Se pueden identificar tres fases distintas: martensita emparejada (twinned martensite), martensita entrelazada (detwinned martensite) y austenita. [23] En primer lugar, se tiene la martensita estable que al ser calentada a cierta temperatura se transforma en austenita.

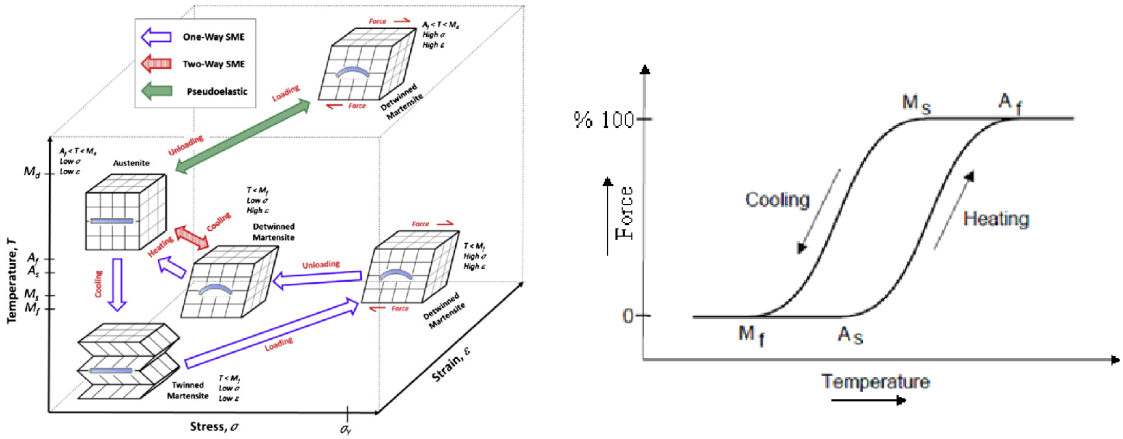


Figura 30. A la izquierda transformación de las fases de nitinol. A la derecha, curva de histéresis del Nitinol [23]

Este proceso comienza cuando la temperatura supera la temperatura As (Austenite Start) y finaliza cuando se completa la transformación, y no varían más las propiedades del nitinol, al superar Af (Austenite Finish). Uno de los cambios más significativos que se pueden observar entre otros es el cambio de forma ya que al alcanzar la fase austenítica se recupera la forma original. Cuando la aleación está en este estado alcanza unas características diferentes que hace que soporte grandes cargas sin deformar, es decir, tiene un límite elástico bastante alto. Por otro lado, al comenzar el enfriamiento, comienza la transformación a fase martensítica, cuando la temperatura disminuye por debajo de Ms, y finaliza quedando finalmente en martensítica, cuando alcanza Mf. En la figura 30 adjunta se puede ver un pequeño esquema del proceso de transformación. Con esto se refleja la característica principal conocida como pseudoelasticidad, ya que se puede deformar en frío y al calentar cambia de forma con altas propiedades de rigidez. Todo este proceso de enfriamiento-calentamiento presenta una curva de histéresis. [23]

La aleación formada por NiTi, en cuanto a la estructura cristalográfica, tiene la forma B2 en la forma austenítica. Esto es que se forma con una estructura cubica centrada en el centro estando el átomo de níquel en el centro de la red y en los vértices ocho átomos de titanio. Por otro lado, la forma martensítica, al producirse el cambio de fase se transforma en una estructura rómbica más compleja. Esto se debe a la reordenación de los átomos del material para conseguir la estructura más estable. En este caso se debe principalmente a dos procesos, por un lado, la deformación de la red cristalina y por otro a un proceso de cizalladura invariante. En la figura 31 se observa cómo cambia la posición de los átomos del nitinol con la temperatura. Además, se puede observar como la martensita cambia con la carga aplicada quedando representada como martensita deformada. [23]

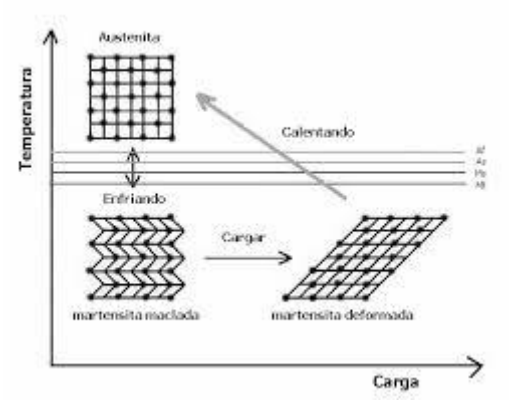


Figura 31. Cambio de forma cristalográfica del NiTi [23]

Otra de las propiedades con determinadas formas es la capacidad de amortiguamiento del material, es decir, la capacidad de absorber energía. Al conseguir dar forma de muelle al material puede actuar como si de un muelle se tratase. [24] Esto se debe a que esta capacidad de absorción resulta más pronunciada en fase martensítica.

Tabla III: Propiedades del Nitinol comercial. [23]

Propiedad	Unidad	Valores	
		Fase Martensítica	Fase Austenítica
Resistencia a la corrosión	-	≈300	
Densidad	Kg/m^3	6450 – 6500	
Resistencia eléctrica	μΩ cm	76-80	82 – 100
Capacidad calórica específica	J/kg K	836.8	836.8
Conducción térmica	W/m K	8.6 – 10	18
Coeficiente de expansión térmica	$m/m\ K^{-1}$	6.6×10^{-6}	11.0×10^{-6}
Tensión máxima de rotura	MPa	895	
Módulo de Young's	GPa	28-41	75-83
Límite elástico	Mpa	70-140	195-690
Coeficiente de Poisson's	-	0.33	
Susceptibilidad magnética	μemu g	2.5	3.8

Además de estas propiedades físicas, también destacan ciertas propiedades químicas como puede ser la biocompatibilidad debido a su excelente comportamiento frente a trabajos corrosivos. Todo esto, junto con una buena citotoxicidad, es decir que pese a poder ser tóxicos los componentes del Nitinol, juntos no presentan peligro por toxicidad para las células humanas. Por ello consiguen que el Nitinol tenga unas importantes y variadas aplicaciones médicas. [24] El titanio por procesos químicos, es el que hace que la toxicidad sea nula frente a otras aleaciones usadas como el NiCo o NiCr. [25]

Por otro lado, cabe resaltar las capacidades eléctricas y térmicas, tanto la conducción como capacidad calórica, que hacen que en el campo de la robótica puedan ser accionados sin necesidad de aplicar fuego, tan solo con corriente eléctrica.

1.5.2. Procesos de memoria de forma

Para poder calentar el Nitinol se tiene que tener en cuenta el fin buscado, ya que se puede obtener la forma previamente memorizada o se puede definir una forma austenítica para memorizar, aunque esto último requiere de más calentamiento.

Conseguir la transformación del nitinol martensítico al nitinol austenítico sencillamente se necesita un calentamiento que traspase la temperatura de As, aumentando esta velocidad de transformación cuanto más cercana está este valor de Af. Una vez alcanzado este valor la transformación se llevará a cabo a la misma velocidad ya que la forma cristalina es alcanzada. Este calentamiento se puede llevar a cabo de múltiples maneras, sin embargo, es importante para alcanzar la forma deseada que este calentamiento se realice lo más equitativo posible, es decir, que el gradiente de temperaturas entre distintos puntos del material sea el mínimo posible. Esto no solo es importante para la forma, también es necesario para que la estructura cristalográfica se vea lo menos alterada posible, ya que, si para alcanzar en cierto punto As otro debe ser calentado considerablemente por encima de Af, este último punto puede ser contraproducente. La primera idea para aportar calor al material que es pensada, es mediante un foco caliente, pudiendo ser esto una llama o mediante un horno. Mediante una llama tiene un defecto observado de manera experimental y es el pobre control de la temperatura y de la llama ya que tiene un gradiente de temperatura muy variado desde el foco (llama azul) hasta el exterior. Esto desencadena en un aporte muy superior a Af y a un calentamiento muy variado entre diferentes puntos del material.

Otra opción de calentamiento con mejores resultados es la utilización de corriente eléctrica basándose en la Ley de Ohm. Debido a la resistencia eléctrica del nitinol, al pasar cierto amperaje, el material desprende energía en forma calórica. El principal problema de este método es que se obtienen malos resultados para grandes dimensiones de material, por ejemplo, en alambres muy largos. Esto se debe a la necesidad de alto amperaje, que en ocasiones puede ser peligroso o muy costoso en proporción con pequeños proyectos. [26]

En general, se puede utilizar cualquier forma de aporte de calor, aunque las dos anteriores suelen ser las más empleadas siendo la última de ellas la utilizada para este proyecto, sin embargo, cabe resaltar también la aportación de aire a alta temperatura, método que puede resultar algo costoso económica y energéticamente, o la utilización de agua a alta temperatura. Estos dos métodos suelen ser utilizados en situaciones donde pueden quedar como consecuencia de otro proceso o residuos estas características, por ejemplo, utilizando agua colindante a algún proceso de combustión donde puede esta alcanzar la temperatura deseada. [26]

La necesidad de dar una forma al alambre en forma austenítica es un requerimiento casi seguro, pero es algo complejo. Esto se debe a que el calentamiento debe ser preciso para conseguir una buena calidad y que aguante el mayor número de ciclos posibles sin perder la memoria. Además, la temperatura debe ser muy superior que la anteriormente utilizada. Este proceso es conocido como Entrenamiento de SMA y teóricamente se

debe elevar la temperatura hasta 500º desde unos 10 hasta unos 25 minutos aproximadamente, por ello este proceso se debe realizar en un horno de metalurgia. Es de resaltar que es factor vital el diámetro o espesor de material a tratar. Un factor que no ha sido tomado en cuenta es que cuando se produce el calentamiento, el material retornará a la forma memorizada previamente, lo que supone que la forma dada deseada de memorizar nueva, será alterada. Por ello este proceso es más complejo ya que el material debe estar fijado con la nueva forma para que al producirse este calentamiento no se deforme. Para conseguir que esto no se deforme se tiene que trabajar con materiales que resistan altas temperaturas y a su vez sean difíciles de deformar, además hay que tener en cuenta de que una vez dada la forma al material, este no va a poder ser manipulado por las altas temperaturas que alcanza. [26]

Un método para alcanzar estas temperaturas, diferentes al horno metalúrgico es la utilización de una corriente eléctrica elevada que consiga alcanzar estos valores de temperatura. Esta corriente debe estar cerca de unos 6A, pero conlleva peligros para el manipulado del material. Por otro lado, teniendo en cuenta propiedades de los materiales metálicos se puede hacer un tratamiento equivalente a menor temperatura, es decir, se puede calentar a temperaturas cercanas a los 250º, algo medio factible en uso doméstico, pero este deberá ser tratado durante 1 hora aproximadamente. Tras esto el enfriamiento más utilizado es por convección de aire libre, no es necesario aplicar ningún método especial para mejorar los resultados.

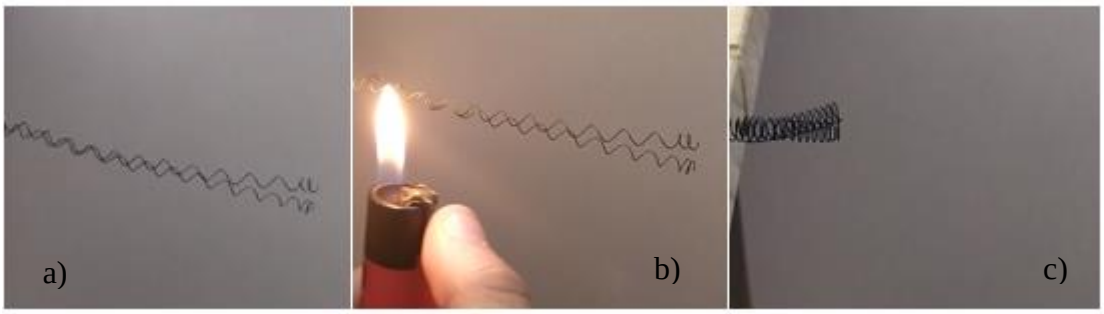


Figura 32. Proceso de cambio de forma de una SMA de Nitinol. a) Estado de baja temperatura, siendo la SMA flexible y con una forma no memorizada. b) Proceso de calentamiento de la SMA mediante llama directa. c) Estado final de la SMA superado el umbral de temperatura y con la forma de muelle memorizada

1.4.3. Historia del Nitinol

Los primeros pasos en materiales con memoria de forma se llevaron a cabo en 1932 por Arne Olander, aunque estos no fueron con Nitinol. En este caso se empezó a experimentar con una aleación de Cadmio y Oro. [27]

En la década de los 50 se realizó un estudio para implementación de la aleación de Cadmio y Oro en un ensayo de rayos X, por los investigadores L.C. Chang and T.A. Read de la Universidad de Columbia en Estados Unidos. Este estudió no resultó exitoso debido al elevado coste del material que hacía este fuese inviable económicamente. Sin embargo, esto haría que aumentase el interés mundial en estos materiales de memoria de forma como se demostró más adelante en la Feria Mundial de Ciencia que se realizó en 1958 en Bruselas. En esta convención se desarrolló la habilidad del material para

cambiar de forma de manera cíclica en función de transformaciones moleculares martesiticas-austeníticas. [27]

No será hasta 1961 cuando se empiece a utilizar la aleación de níquel al 55% y titanio al 45% por un grupo de investigadores de la armada de Estados Unidos dirigidos por William Beuhler. Este descubrimiento fue el motivo que bautizó a este material con el nombre de NITINOL ya que NI representa al níquel, el TI al titanio y el NOL que son los acrónimos del laboratorio de la armada de Estados Unidos (Naval Ordenance Laboratory). [28] Como resultado de estas investigaciones se descubrió el enorme potencial de este material para el ámbito de la ingeniería y de la industria ya que no era toxico para el ser humano y resultaba ser relativamente barato. Finalmente, en 1970 comienzan a aparecer las primeras aplicaciones a partir de la transformación del material con forma de alambres, discos, muelles… [27] [28]

1.5.4. Aplicaciones del Nitinol

Durante los últimos 20 años se han realizado muchos ensayos para perfeccionar el funcionamiento del material de manera exitosa, aumentando rápidamente los dominios de aplicación. Nuevos sistemas de estos son desarrollados basados en los actuadores SMA. Entre los campos de aplicación más destacados se puede señalar la biomedicina, la robótica, el automovilismo, la mecánica, la industria… En la figura 33 se observa mediante un diagrama de sectores las patentes en cada sector y los artículos, resultando destacable el campo biomédico con cerca del 61% del total, dato muy significativo. [23]

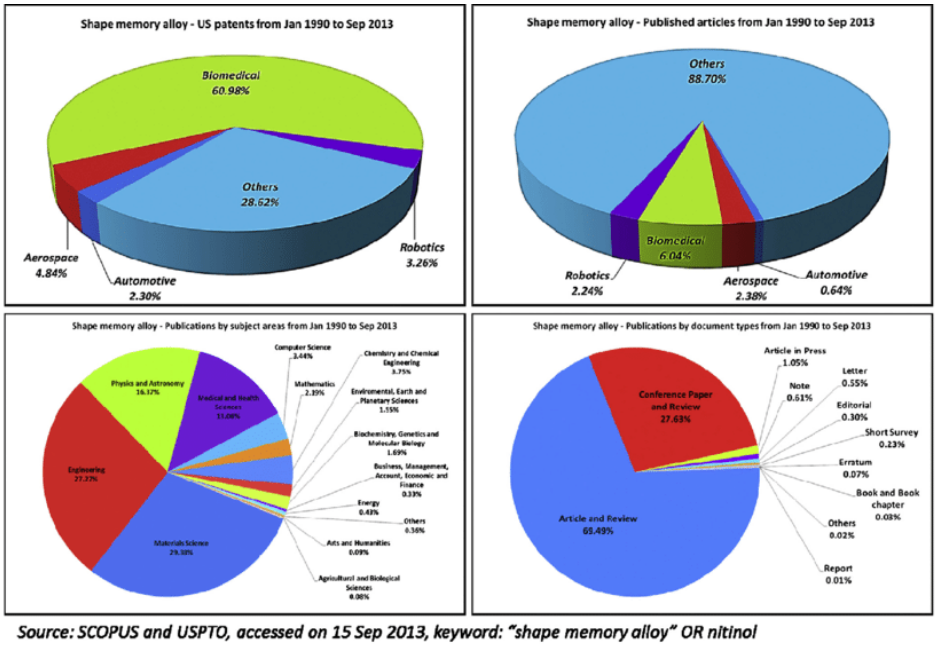


Figura 33. Patentes en Estados Unidos y Publicaciones desde enero de 1993 hasta 2013. [23]

En los 10 últimos años, es cuando realmente se han dedicado proyectos principalmente a este material, resultando estos muy originales. Este hecho ha resultado vital para aumentar el interés mundial en este material y para que aumenten considerablemente los

proyectos específicos sobre este. En la actualidad existe una tendencia al alza en cuanto a patentes, y se puede ver refeljado ya que existen mas 20.000 patentes sobre SMAs en todo el mundo. En la figura 34 se puede ver esta tendecia en Estados Unidos donde se explica que todo este crecimeto es debido a las propiedades de estos materiales, principalmente a la biocompatibilidad. [22]

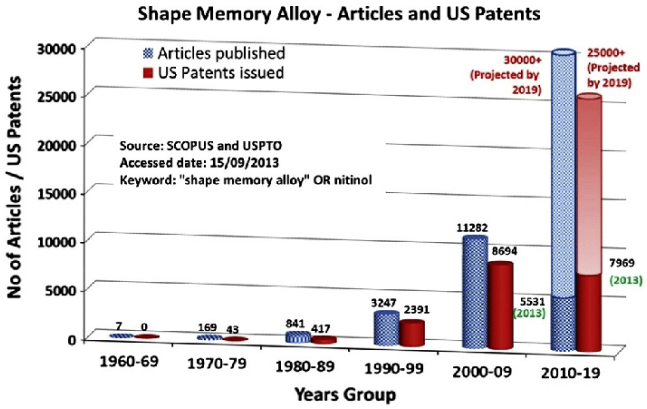


Figura 34. Patentes y artículos publicados por década en EEUU. [23]

Respecto a otras aplicaciones, podemos destacar la de la odontología por el elevado uso de este material en los aparatos de corrección bucal entre otras funcionalidades. La biocompatibilidad de esta aleación de níquel y titanio hace que sea mucho más efectiva que el acero en el campo de la medicina. Además, las características adicionales del nitinol como la capacidad elástica, dinámica y térmica lo hacen óptimo para nuevas aplicaciones. [29]

La implementación del nitinol al mercado tecnológico tuvo gran trascendencia dentro de la industria, lo que desencadenó en la experimentación con este material. Uno de los fines más buscados teniendo en cuenta las propiedades del mismo fue el desarrollo de motores de calor utilizando los cambios de forma. [28]

La “Thermobile” es una maquina que consta de dos ruedas de diferente tamaño unidas por una cinta o alambre de nitinol. Realizando una cierta malipulación en la forma austenítica del material que las une se pueden realizar movimientos rotatorios entre las ruedas gracias al deslizamiento del alambre. Para que esto ocurra se debe aportar calor a la ruedas situada en la parte inferior que suele ser la de menor diametro. Con esto como base se han llegado a desarrollar avances de distintos modos, uno de ellos es aumentando el tamaño y la distancia de las ruedas. Otro de ellos y de gran importancia es la necesidad de realizar los cambios de fase martensítica-austenítica de manera veloz y por ello empiezan a colocar enfriadores, como agua con hielo, en la rueda de mayor

calibre. Una “Thermobile” específica del Instituto de Tecnologías Innovadoras (ITI) construida por 32 cables de nitinol consiguió que el mecanismo estuviese a 132 rpm durante 1 año y medio sin producirse ningún fallo. A raíz de esto se llevaron a cabo investigaciones para la implementación en barcos colocando la rueda inferior sobre el agua como motor. [28]

1.5.5. Muelle actuador

Las SMAs en forma de muelles tienen una principal ventaja y es la posibilidad de ajustar un mayor número de parámetros en comparación con otros actuadores, que dependen del método de entrenamiento, el tipo de NiTi o la propia forma del muelle entre otros. [21]

Uno de los principales inconvenientes en la dificultad para realizar el entrenamiento de la SMA a alta temperatura de forma manual, ya que es difícil que al calentar el muelle este no pierda su forma y retorne a su forma original. Para ello se pueden realizar distintos mecanismos entre los que encontramos el siguiente. Se trata de un instrumento de aluminio que actúa como si de una pinza se tratase y que es cerrado mediante la acción de tornillos. Estos aprietan un núcleo circular de acero sobre el que se encontrara la SMA. Además, este instrumento de aluminio tiene dos variantes, una fija el cable de nitinol y el otro tiene un mecanismo de giro para ir enrollando de manera precisa el cable sobre el núcleo de acero. Tras esto son fijados los extremos y se le aporta el calor suficiente para realizar el entrenamiento de SMA. [21]

Existe un método de análisis de estos muelles llamado “Análisis de muelles enfrentados” que es empleado para otras aplicaciones con mayores solicitaciones. [30]

1.5.6. Otro método de actuador

Como en todo mecanismo se necesita algo que lo accione, por ello el nitinol en sus aplicaciones toma el papel del actuador gracias a sus beneficios y propiedades. Sin embargo, el nitinol puede adoptar varias formas que resultan útiles empleando cada una de ellas en determinadas condiciones en función de la utilidad o necesidad requerida. La principal utilidad de estos es en estructuras blandas debido a la capacidad para realizar movimientos complejos gracias a la flexibilidad tanto del nitinol como del material blando. [31] Esto permite torsiones, doblados y movimientos complejos.

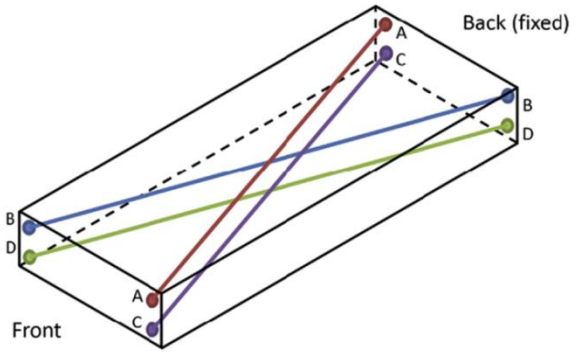


Figura 28. Actuador rotatorio de Nitinol. [31]

Uno de los actuadores más novedosos y con gran futuro en múltiples aplicaciones, consiste en una estructura blanda que permite una gran variedad de movimientos. Esta ha sido desarrollada en Seúl (Corea del Sur) por varias universidades entre la que se encuentra la *Seoul National University*. En la figura 34 se observa un esquema de este mecanismo con cuatro actuadores, aunque hay variantes de este diseño con solo dos, quitando así grados de libertad de movimiento, ya que no serían necesarios en cierta aplicación. Este método de actuador tiene tres posibles variantes de movimientos basados entre la utilización del nitinol. Por un lado, si se busca un doblado puro del material se debe aplicar corriente eléctrica con la finalidad de calentar los alambres A y B. Esta combinación consigue el doblado hacia arriba, sin embargo, si queremos el movimiento opuesto solo se debe aplicar la corriente en C y D. Otro de los movimientos es el rotatorio, basado en la activación de los cables que se encuentran opuestos físicamente, es decir, A y D o la combinación B y C, siendo el primero de ellos en el sentido negativo, opuesto al movimiento a las agujas de un reloj, y el segundo en el sentido de las agujas de un reloj. Como última variante de movimiento de este actuador basta con activar solo uno de los cuatro cables de nitinol. Además, en función de las dimensiones del cableado, de la resistencia del material usado (normalmente PDMS), las características del nitinol y el entrenamiento realizado, entre otros factores, se puede calcular matemáticamente el desplazamiento obtenido con cada tipo de movimiento. En la ecuación 1.1 puede verse la obtención de la localización del punto O, que se encuentra entre A y B y en la expresión 4.2 obtenemos el ángulo de giro del doblado. [31]

$$O = A + \frac{(C-A)\cdot(B-A)}{(B-A)\cdot(B-A)}(B-A) \tag{1.1}$$

$$\varphi_{doblado} = cos^{-1}\frac{\overrightarrow{OC}\cdot(0,0,-1)}{\|\overrightarrow{OC}\|\cdot\|(0,0,-1)\|} \tag{1.2}$$

Por otro lado, las ecuaciones de giro se pueden reflejar como el vector de A a B por vector unitario en el sentido de A a B todo ello dividido por el producto de ambos en módulo. [31]

$$\varphi_{giro} = \frac{\overrightarrow{AB}\cdot(1,0,0)}{\|\overrightarrow{AB}\|\cdot\|(1,0,0)\|} \tag{1.3}$$

Con este actuador se pueden conseguir robots bioinspirados gracias a la multitud de grados de libertad posibles, como por ejemplo los tentáculos de un pulpo.

2. Diseño del robot

Una de las estrellas de mar tomadas como inspiración es la Asteria Forbesi. Esta normalmente tiene 5 brazos y llega a crecer hasta los 15cm, valor cercano al de la estrella robótica de este proyecto. [32]

La estructura morfológica de esta estrella por la parte inferior unos pequeños tentáculos tal y como se puede observar en la siguiente figura con los que realiza el desplazamiento. Esto ha servido como inspiración para la colocación de los muelles en esta posición.

Figura 29. Asterias Forbesi parte inferior tomada del Instagram @frotscience.

2.1. Diseño del robot.

Para llevar a cabo el diseño del robot se ha tenido que preseleccionar el tipo de robot blando, que se trata de una estrella como la explicada. En este caso, la estrella tiene cinco extremidades, cosa que ha sido respetada. Además, con ayuda de otros proyectos similares, se sabe que la adición de extremidades puede suponer dificultades. Por lo tanto, se busca una combinación de complejidad y efectividad adecuada A partir de la quinta pata los resultados dejan de ser favorables por el aumento de peso para iguales o menores desplazamientos. Con la ayuda de un estudio realizado por Shixin Mao, Erbao Dong, Hu Jin, Min Xu y K. H. Low en *Locomotion and Gait Analysis of Multi-limb Soft Robots Driven by Smart Actuators*, se llega a la conclusión que se obtendrán mejoras considerables de movimiento hasta la quinta extremidad pese a que la curva de su trayectoria es más irregular como se puede ver en la figura 37. Aquí se puede observar que para que el robot se desplace en torno a dos centímetros deben pasar algo más de 60 segundos. [18]

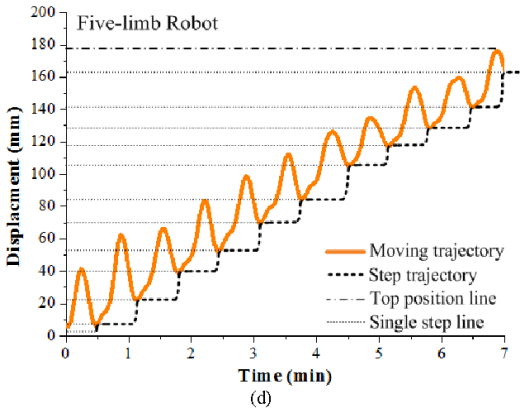


Figura 30. Gráfica de movimiento de una estrella de mar de cinco extremidades.

Una vez fijado el número de extremidades se procede a la creación de un molde sobre el cual se vierta silicona y que aporte la forma querida al robot. Para ello, ha sido utilizado el programa informático CAD Autodesk Inventor. En este momento, se necesita el conocimiento de los requerimientos dimensionales de la estrella ya que en función del tamaño se podrá trabajar con distinto calibre de SMA, lo que traducido es, que al aumentar el diámetro de nuestro cable de nitinol, mayor será la fuerza que esta ejercerá en la contracción a muelle y por lo tanto también podrá ser mayor el espesor de la silicona y la dimensión del robot. Respecto a la silicona hay que resaltar la posibilidad de elección entre dos tipos de siliconas epoxi, sin embargo, se eligió la de mayor densidad y menor flexibilidad, lo que significa menor rozamiento que la otra, esta es vendida como silicona *silastic 3483*. En la siguiente gráfica se puede observar la comparación de ambas. Esta, necesita un periodo de curado de 24h frente a la otra que tardaba unas cuantas horas. Esta mayor densidad, pese a aportar mayor firmeza, implicaba la necesidad de aportar mayores corrientes en los cables. Pese a que las características dadas por el fabricante de la silicona indicaban que la de mayor densidad era mejor, se realizó un prototipo con la de menor densidad. Este fue descartado debido a que era demasiado blanda.

Tabla IV. Propiedades de las posibles siliconas a emplear

Propiedades	3483 Estándar	ECOFLEX 00-30
Color	Blanco	Translúcida
Tiempo de desmoldeo a 23 ºC (horas)	24	4
Dureza Shore A	13	0-30
Viscosidad de la Mezcla mPa.s	17.000	7.000
Alargamiento a la Rotura %	600	900
Resistencia al Desgarro kN/m	25	62
Peso Específico a 25 ºC	1,2	1,07
Contracción Lineal %	0,2-0,4	0,001

Para realizar estas pruebas, en primer lugar, se ha desarrollado una extremidad solitaria sobre la cual realizar experimentos con los dos cables posibles de trabajo. Estos cables

serán de 0.3mm y de 0.5mm de diámetro. Con ello se llegó a la conclusión de que un 0.5 mm de diámetro tenía fuerza suficiente para comprimir la pata, pero necesitaba más voltaje. Por otro lado, se comprobó que con el espesor inicial diseñado de 2,5 cm el cable de diámetro inferior no tenía suficiente fuerza para realizar la compresión del muelle.

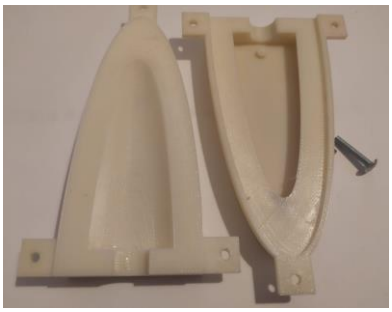


Figura 31. Molde de silicona empleado para la creación de la extremidad solitaria de pruebas de fuerza.

Inicialmente, se diseñó el molde como se observa en las figuras, optando por un molde cerrado, en lugar de uno abierto debido a los mejores acabados de este tipo. Además, se crearon cierres al molde, de métrica 4, para introducir tornillos que asegurasen el perfecto acoplamiento. Este mismo fin, tenía la tapa con forma de la estrella y los ángulos de desmoldeo.

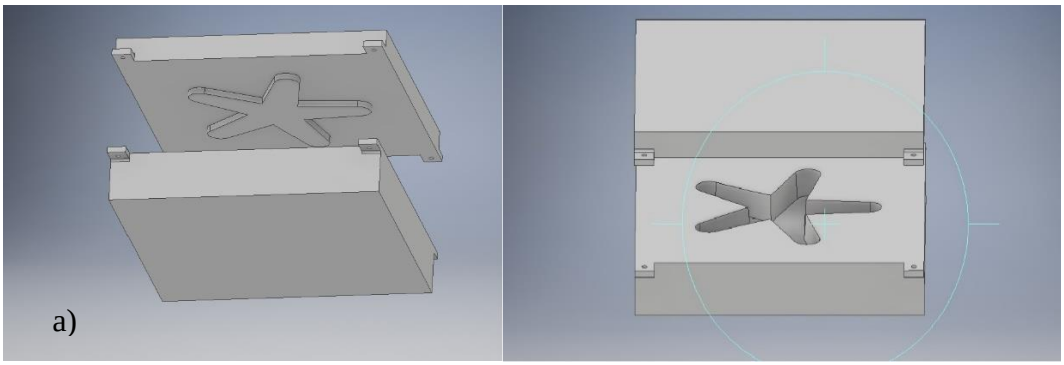


Figura 32. Diseño CAD del molde inicial diseñado para la estrella de mar. a) Vista del programa Inventor, apreciando el acople de la tapa superior. b) Vista del programa Inventor

Finalmente, se rechazó este tipo de molde por dos motivos fundamentales. En primer lugar, el tamaño de la estrella es inferior al que podría hacerse con otro tipo de molde ya que hay que tener en cuenta el espacio adicional para las solapas de atornillado y tenemos un espacio limitado por la impresora 3D. En segundo lugar, el aporte de material es superior que, con un molde más ajustado a las especificaciones, lo que supones un ahorro de dinero y tiempo de impresión. Por ellos, se determinó que el molde a emplear sería de curado al aire sin necesidad de tapadera y vaciando el contenido que no sea necesario. El resultado se puede observar en la figura 40 a) y en la figura 40 b), siendo la primera de ellas una captura del programa CAD y la segunda del resultado real impreso.

Las dimensiones de la estrella se han elegido en consecuencia con otros proyectos de este tipo y teniendo en cuenta estrellas reales. Para la creación se utilizó un patrón

concéntrico circular de 18 cm interno, es decir, la parte ya extraíble. En cuanto a grosor, que es la profundidad del molde, es de 0.7 cm, aunque posteriormente se realiza un vaciado y una reducción de estos 0.7cm hasta los 0.5cm. Es también importante la medida de cada extremidad de la estrella. Tomada esta desde el vértice hasta el punto de unión con el centro y las adyacentes tiene un valor de 7 cm y respecto al ancho, este varía desde el vértice, donde seria mínimo, hasta casi 3 cm, en la unión con el centro.

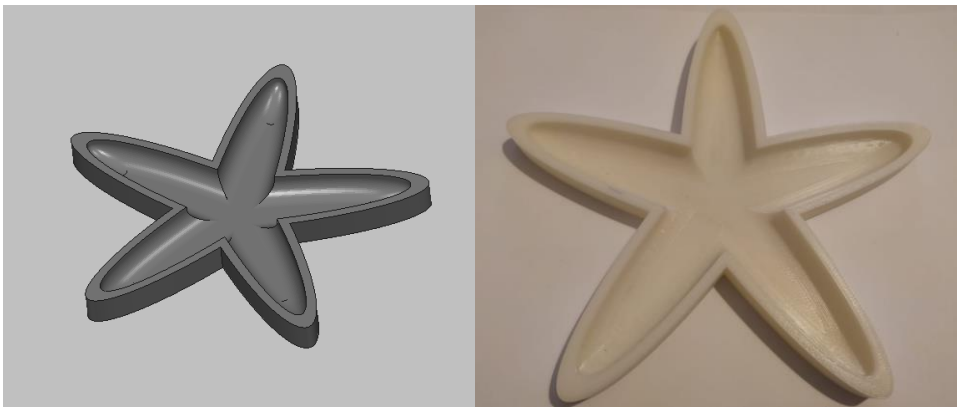


Figura 33. a) Captura del molde definitivo. b) Molde real impreso en 3D

Tras tener el modelo impreso en su totalidad se realiza el vertido de la silicona epoxi. Este tipo de silicona escogida tiene un proceso de utilización específicamente estipulado. En primer lugar, se debe realizar el vertido de un agente de curado determinado por el fabricante, que actúa como un catalizador y en las cantidades precisas, es decir, un 5% en peso del total, en relación con la propia silicona. Esta silicona es propia de la marca Feroca y en concreto ha sido elegido la Silastic 3483 con el catalizador estándar. Esto se traduce en un tiempo de desmoldeo de 24 horas. Entre otras propiedades se caracteriza por una menor elasticidad y mayor rigidez, todo dentro de la flexibilidad requerida. Más información se puede encontrar en la página web de la empresa.

Un día después del vertido de la mezcla de silicona con el catalizador se realiza el desmoldeo con cuidado por si alguna parte aún no ha finalizado el proceso. Esta situación se debe a las distintas atmosferas en la que se encuentra cada parte de la estrella. En este caso, la estrella al pertenecer a un molde en abierto la parte que se encuentra expuesta al aire realizara un curado más rápido que el que se encuentre en el interior. Teniendo en cuenta esta situación, se realiza el desmoldeo aplicado pequeños golpes que faciliten la salida, cosa que también estará facilitada por el ángulo de desmoldeo de 5º que se aplicó en el diseño del CAD. Es recomendable no aplicar ningún esfuerzo a la pieza en otras 24 horas para que termine el proceso completo.

Una vez la pieza ha sido extraída y lista para su manipulación se aplica unos retoques para mejorar el funcionamiento. Un ejemplo de ellos es el realizado en este proyecto, que es el vaciado del interior de la estrella, cosa que se podía haber hecho mediante otra pieza adicional para el moldeo. Sin embargo, se optó por el vaciado manual. De este

modo, la resistencia que proporciona la silicona será inferior al aplicar la fuerza de contracción con el muelle de nitinol.

En este proyecto, también se barajó la opción de realizar el circuito dentro del propio robot blando. Esto se podría hacer depositando el muelle de nitinol, como actuador, en una fase intermedia curado, es decir, en primer lugar, se vierte la mezcla de silicona hasta la mitad del relleno del molde y se esperan las 24 horas de curado, tras esto, se deposita el actuador y se vuelve a verter, con precaución para evitar el movimiento del mismo, la silicona. Finalmente, se obtendría este material de manera interna.

Otro modo de conseguir esto también sería como otra fase del modo adicional tras el vaciado. Esta consistiría en depositar el cable de nitinol cuando el robot este hueco y volver a verter silicona actuando la propia figura obtenida inicial como molde. Esta opción supone que en cualquier proyecto futuro podría aplicarse esta nueva versión del robot para poder, por ejemplo, ser sumergido.

Este método supondría mayor impedimento para realizar el movimiento al tener un proceso de relajación más lento. Durante la etapa de estiramiento del muelle este disiparía calor de manera más lenta.

2.2. Actuadores

Para este proyecto, se ha optado por un muelle como actuador ante la posibilidad de optar por cables en paralelo u otras formas. Esto es así debido a que un muelle permite una compresión en menor espacio y para el estiramiento se emplea la propia morfología de la estrella. Por otro lado, los cables en paralelo en esta aplicación supondrían una mayor complejidad para la incorporación, al necesitar un sistema de estirado y otro de compresión.

2.2.1. Muelle como actuador

Para la realización del muelle de SMA se deben tener en cuenta distintos factores relacionados con la finalidad y el tipo de trabajo que este va a realizar, esto determinará los factores geométricos que el muelle tendrá. Debido a la dificultad de los modelos termodinámicos por la no linealidad de la transformación de las SMAs se deben usar métodos de computación microscópicos y macroscópicos. Los principales parámetros a tener en cuenta en un cable de nitinol son dos: el diámetro del cable y la longitud. El primero de estos parámetros se relaciona con la fuerza máxima que puede soportar el cable en forma austenítica. Por otro lado, el segundo de estos, la longitud del cable, es el encargado de aportar la resistencia máxima que opone el cable para ser desplazado. Sin embargo, no sólo son dos parámetros en un muelle: el diámetro del cable (d), el diámetro del muelle (D), el número de espiras (n) y el ángulo de inclinación entre espiras (α). En la figura 42 se puede ver un esquema de estos parámetros. [33] En el proyecto se eligió un muelle de longitud de 1.36 cm (al ser creado) de manera experimental que finalmente será mayor. Por otro lado, el D (diámetro mayor) está fijado por la métrica del tornillo empleado para el guardado de la memoria de forma, de

0.43 cm. Inicialmente, el ángulo de las espiras está fijado en estado relajado es de 3º, mientras que el número de espiras es de 20. Sin embargo, con el paso de los ciclos estos valores cambian al tener pequeños defectos en el empleo. Es decir, al conectar los muelles en la estrella, la forma relajada tendrá otros valores y la forma contraída, al tener una fuerza que se opone (silicona de la estrella) no se comprimirá de manera ideal.

Figura 34. Muelle actuador tras su proceso de dado de forma.

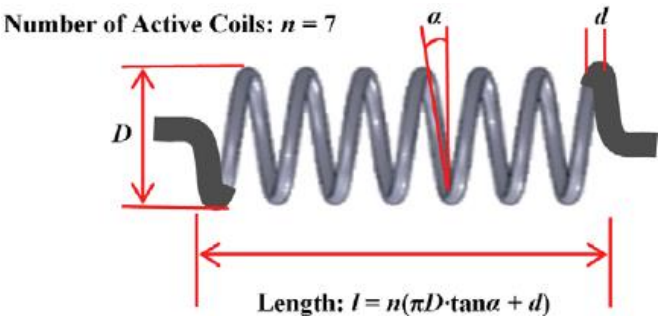


Figura 35. Geometría de un muelle de SMA con parámetros importantes. [33]

Las ecuaciones utilizadas para muelles convencionales no tienen en cuenta que el nitinol puede deformarse por encima del 6% de su esfuerzo cortante en su estado normal y luego volver al estado normal, por lo tanto, estas ecuaciones quedan limitadas debido a la elasticidad de las SMAs. En la figura 43 se refleja la diferencia entre 39(a), que representa, con una gráfica fuerza-deformación, el comportamiento de un muelle de SMA y su curva no lineal a bajas temperaturas en comparación con un muelle convencional (39.b). Se puede observar cómo hasta no alcanzar altos valores de deformación la gráfica no alcanza la linealidad para valores de temperatura inferiores a de transformación martensítica final. [33]

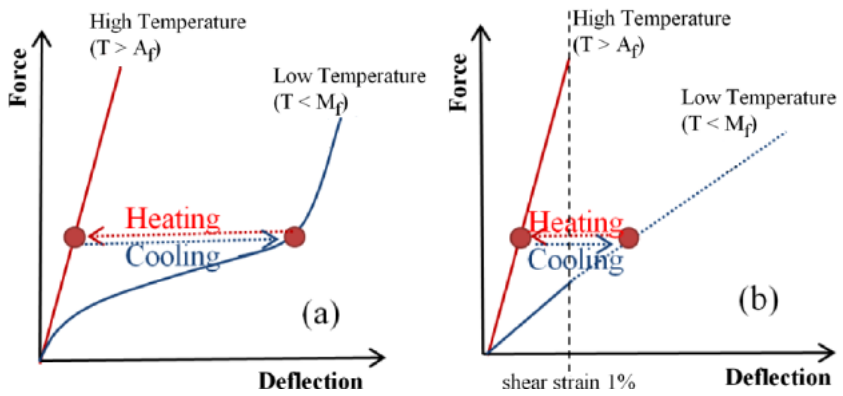


Figura 36. Curvas de Fuerza-Deformación de un muelle de SMA (a) y de un muelle convencional (b) ante la misma carga. [33]

El comportamiento de un muelle de manera matemática puede ser representado por diferentes ecuaciones y para ello se observa la figura 44. En esta T representa el momento de torsión, la fuerza axial es F_A, la fuerza cortante es F_S y M es el momento de flexión. En la figura la fuerza ejercida en N es axial descendente del cuerpo libre colgado siendo este el muelle. En un muelle convencional de acero las ecuaciones que relacionan la deformación con esta fuerza de son representadas mediante la ecuación lineal, ya que los valores del ángulo entre espiras (α), el momento de flexión y los esfuerzos son despreciables. En esta expresión G representa modulo cortante. [33]

$$F = \frac{Gd^4}{8D^3n}\delta \tag{2.1}$$

Sin embargo, para largas deformaciones, en un muelle de SMA se empiezan a tener en cuenta estos valores anteriormente despreciados. Estas largas deformaciones suelen ser para valores de índices de muelle entre 4 y 12. El índice de muelle es el cociente entre el diámetro exterior del muelle *D* y el diámetro del cable usado. Otra ecuación de gran importancia es la que relaciona la fuerza y la deformación con la reducción diámetro en largas elongaciones. En la imagen 44 se puede apreciar el significado de Df y Di de las ecuaciones siguientes, siendo Di el diámetro del muelle previo a la deformación y Df tras esta. [33] Es importante resaltar que los valores son distintos a los del anterior calculo al estar ahora en condiciones de trabajo y con solicitaciones diferentes. (2.2)

$$\delta = \frac{8FD_f{}^3n}{d^4 \cdot \cos(\alpha_f)}\left(\frac{cos^2(\alpha_f)}{G} + \frac{2cos^2(\alpha_f)}{E}\right) = \frac{8F(3.2*10^{-3})^3 20}{(0.3*10^{-3})^4}\left(\frac{cos(40)}{11*10^9} + \frac{2cos(40)}{30*10^9}\right)$$

$$D_f = Di\left(\frac{cos(\alpha_f)}{cos(\alpha_i)}\right) = 4\left(\frac{cos(40)}{cos(15)}\right) = 3.2\text{mm} \tag{2.3}$$

En las ecuaciones 2.2 y 2.3, los subíndices indican el tiempo en el cual se ha ensayado el muelle, siendo *i* el estado inicial y *f* tras la deformación de elongación, E es el módulo de Young cuyo valor es conocido por ser el doble del incremento en una unidad del coeficiente de Poisson por el módulo de cizalladura G. [33] A estas expresiones se les suman otras sobre el comportamiento del muelle en determinadas condiciones como

podemos ver en "*Engineering design framework for a shape memory alloy coil spring actuator using a static two-state mode"* de *"Smart Materials and Structures"*. [33]

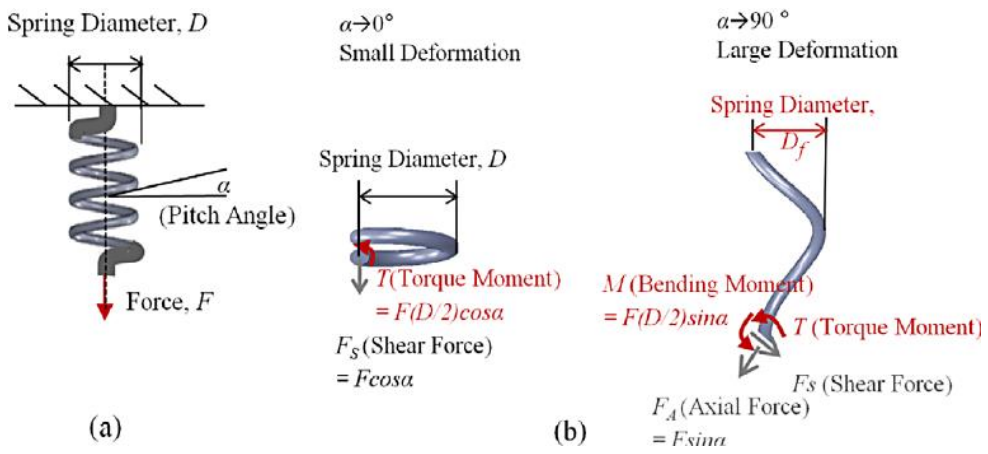


Figura 37. Comportamiento de un muelle frente a una carga axial. [33]

Es importante resaltar que los datos calculados son aproximaciones a la situación con un muelle ideal, que mantuviese la memoria sin pérdidas. En la realidad, durante el paso de los ciclos, se el muelle pierde efectividad y es compensada esta recortando la longitud de muelle total, quedándonos solo con la parte efectiva

En este proyecto, para realizar el actuador de nitinol, se ha utilizado un tornillo mellado por los extremos y dos tuercas. En este tornillo se enrollará el cable de nitinol con la máxima precisión posible. Un punto bastante favorable, es utilizar los pasos de este tornillo para que sean utilizados como carril para el cable. Esto es posible debido a que se utilizarán cables de 0.3 y 0.5 mm de diámetro, que caben sobre los pasos del tornillo.

Tras ser enrollado el material, se apretarán las tuercas, una en cada extremo. De este modo, como muestra la figura 45, se limitará prácticamente el movimiento del cable consiguiendo así que memorice la forma helicoidal.

Figura 38. Tornillo enrollado por un cable de nitinol y fijado con dos extremos por dos tuercas de la misma métrica.

A continuación, se procede al aporte de calor hasta temperaturas de austenización y al mantenimiento en dicha temperatura cierto tiempo. Estas temperaturas y estancias vienen indicadas en las instrucciones de uso del fabricante y depende de la composición

y grosor como ha sido explicado anteriormente. Las temperaturas y estancias suelen ser de unos 400-500ºC y por encima de los 15 minutos respectivamente.

En este proyecto el calentamiento se ha llevado a cabo de tres maneras distintas.

La forma más casera ha sido realizada mediante la aplicación de calor de un fogón casero de cocina durante 40 minutos. La ventaja de este modo es la posibilidad de ver durante el comienzo del tratamiento cómo reacciona la SMA al aplicar calor. El cable intenta retornar a su forma memorizada, pero al estar imposibilitado el movimiento no consigue terminar el proceso y comienza el nuevo guardado de memoria.

Otra forma que también tiene resultado favorables es mediante un horno de joyería que se encuentra en el Centro de Automática y Robótica. La desventaja de este método es la imposibilidad de observar el proceso de calentamiento del material. Este horno tarda unos 10 minutos en alcanzar 500º C, que es la temperatura de trabajo. Tras esto, se deposita el tornillo enrollado por el cable durante 15 minutos.

La otra manera realizada en este proyecto ha sido con la colaboración del Departamento de Metalurgia de la Universidad Politécnica de Madrid. Aquí, introducimos nuestro mecanismo de moldeo en un horno cristalográfico durante 15 minutos. Este método es el más lento, ya que se necesitan cerca de hora y media para realizar este calentamiento.

Finalmente, se decidió la forma más casera debido a que el tercer modo requería mucho tiempo y gasto. Además de tener que solicitar el horno demasiadas veces al departamento para poder realizar múltiples pruebas. Pese a ser algo inicialmente ilógico, el método casero dio mejores resultados empíricamente, aunque el método de horno de joyería también se obtienen resultado apropiados.

Debido a problemas logísticos, se han tenido dificultades en la distribución del mismo material por falta de existencias de las empresas distribuidoras. Al trabajar con muchos tipos de SMA se ha podido realizar una comparativa de diámetros y fuerza ejercida por el muelle.

2.3. Sistema electrónico y de potencia

El sistema electrónico se basa en una actuación por una placa de Arduino UNO. Esto es posible debido a la capacidad de suministrar cinco salidas PWM con las cuales se realiza la activación del robot. Además, debido al escaso voltaje que suministra el Arduino se necesita un aporte adicional de energía, que será alimentado por una fuente de alimentación de mínimo 12V aproximadamente.

Debido a esto, se necesita un manejo de esta energía. Inicialmente se barajó la posibilidad de introducir una placa feather de cuatro salidas para simplificar el control y el sistema de potencia. Sin embargo, esto no es posible debido a la necesidad de añadir otra salida, cuya única solución escogiendo este mecanismo, era la adición de un sistema electrónico para una única extremidad, cosa que dificultaría el ajuste final.

Para comenzar con el desarrollo de un sistema eléctrico se emplearon circuitos eléctricos como el de la figura 46. En la figura se pueden observar distintos elementos electrónicos, entre ellos se encuentra un potenciómetro, un transistor MOSFET 540N, tres resistencias, un led y un botón, además del nitinol, Arduino y la fuente de alimentación. El potenciómetro es relativamente opcional, ya que sirve como resistencia variable para que mediante un multímetro se controle el amperaje y velocidades de reacción del nitinol. El led se usa simplemente como testigo para saber en qué momentos hay circulación de corriente. El MOSFET es de tipo irf540 con polarización N, se utiliza para conmutar las señales y así controlar el voltaje que entra en el nitinol. Adicionalmente, se introdujo un botón como se observa en la figura para que este al ser pulsado active la señal. Aunque también se hizo de manera computacional siendo programado al pulsar cierto botón del computador.

En la figura también se pueden ver las conexiones básicas con el Arduino, que son las de salida de señales digitales con señal PWM (~) y la señal a tierra.

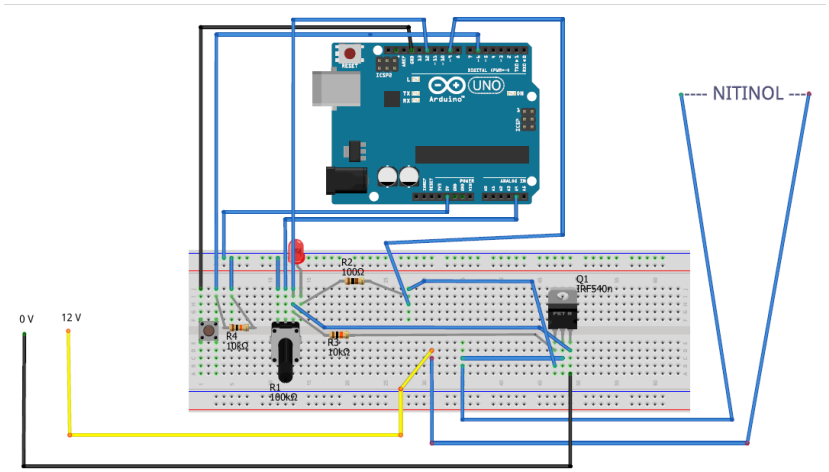


Figura 39. Esquema básico de uso de nitinol mediante actuación eléctrica controlada por un Arduino.

En definitiva, se aplican cinco circuitos similares al anterior, al tener cinco patas, como se puede ver en la figura 47. En este, se detalla cada conexión y la adición de las bornas o clemas (llamadas J en el esquema) para el cableado. Esto se realiza de este modo ya que cada actuador es independiente de los otros a la hora de realizar un patrón de marcha.

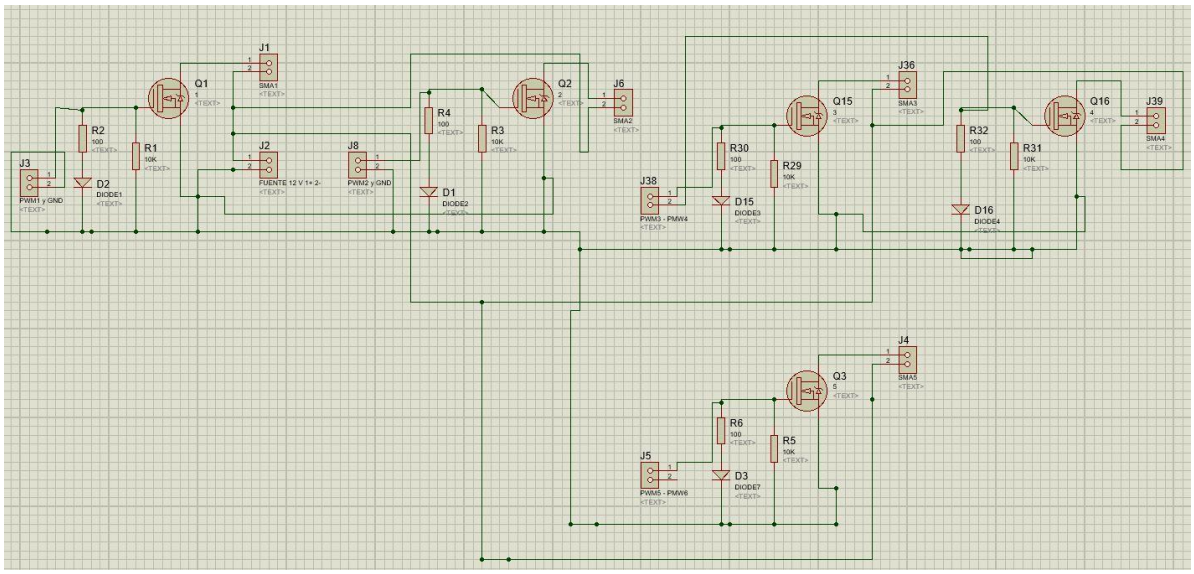


Figura 40. Circuito diseñado para el robot blando mediante las cinco salidas a nitinol.

2.4. Programación y adaptación del robot

La actuación de cada extremidad cómo se ha explicado anteriormente se ha logrado con un circuito electrónico similar al anterior. El desarrollo ha sido realizado con una PCB con los componentes necesarios. Esta es diseñada mediante una maqueta realizada a ordenador y posteriormente impresa y usada como molde, tal y como se observa en la figura 48.

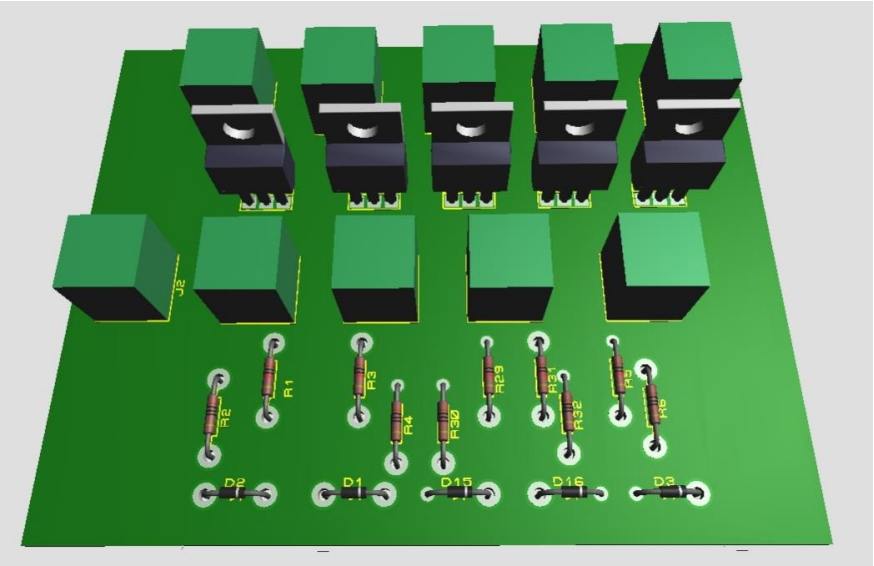


Figura 41. Maqueta 3D de la PCB diseñada para el control del robot blando.

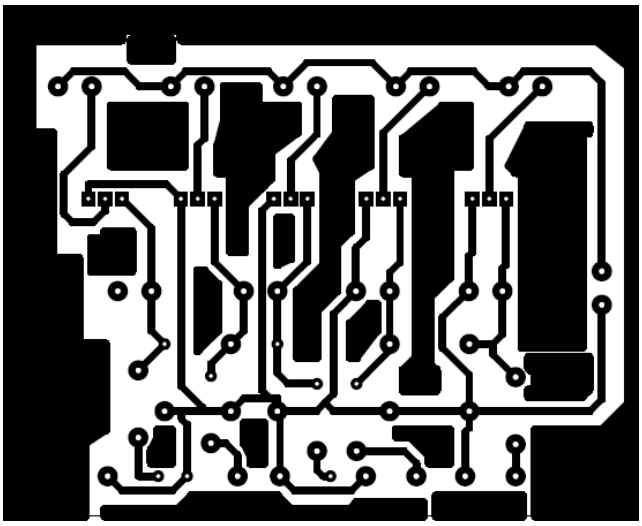


Figura 42. Pista de la PCB para posterior impresión y creación de la misma.

En esta figura se pueden ver las distintas conexiones del circuito electrónico. Una vez obtenido el molde para la impresión de la figura 49, se implementa en una placa fotosensibles específica para creaciones PCB, que posteriormente recibirá un ataque químico para obtener el resultado final.

Tras esto se incorporan los dispositivos y son soldados apropiadamente en los agujeros que previamente han sido realizados con ayuda de un taladro de broca fina. Este circuito es diseñado de manera que tiene una toma común de tierra entre todos los dispositivos, esta razón implica que un error en la conexión de los 12V significa la ruptura de los transistores MOSFET y la posterior sustitución desoldándolos y soldando los nuevos. Esto también es inevitable si se da un uso excesivo de los mismos o una sobrecarga de voltaje. Por ellos, esto se ha tenido que realizar varias veces con una soldadora de mano y con líquido flux que ayude a no estropear el circuito en la PCB. En la figura siguiente se puede observar el resultado final de esta PCB con las distintas 5 salidas de la estrella de mar. Además, se decidió implementar estos leds que servían como testigos y eliminar el potenciómetro tras las pruebas realizando un control mediante la programación en el código de ARDUINO.

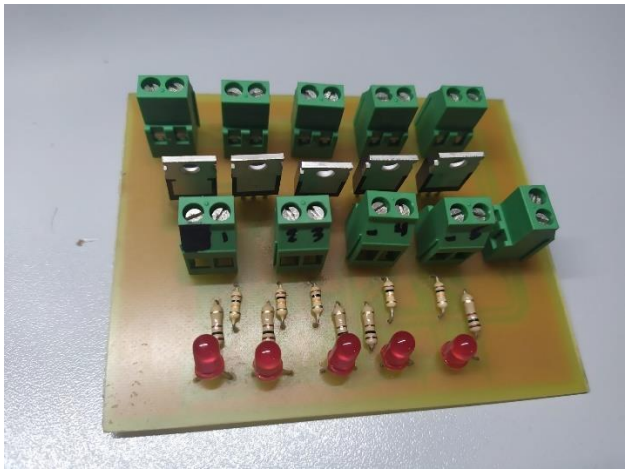


Figura 43. PCB desarrollada para el control de la estrella.

El enganche de las patas se ha realizado de dos maneras dependiendo del avance del proyecto. En primer lugar, se unió cada una de las extremidades del cable de nitinol mediante pinzas de cocodrilo, conectados al cableado con la PCB. Esto se realiza porque la pinza limita el movimiento de SMA cosa que es muy problemática. Al aumentar el amperaje, y con ello la temperatura, el muelle se irá formando, y supondrá una contracción del cable, y aquí es donde la pinza limita esa contracción en los extremos, para que estos no se separen de la estructura de la estrella.

Figura 44. Conexiones iniciales del SMA a la estrella mediante pinzas de cocodrilo que limitan el desplazamiento.

Una vez alcanzando el proyecto un estado de avance considerable, se plantea una estructura estrella-cableado definitiva. Inicialmente, se eliminan los cables con pinza cocodrilo para meter unos nuevos con mayor espesor y que permitan alcanzar mayores temperaturas sin pequeños quemados. El detalle de la unión del actuador con la estrella, al quitar las pinzas de cocodrilo se valoran dos opciones, utilizar pequeñas piezas metálicas tubulares que son comprimidas para sellar la SMA o una grapa que atrape el cable y la SMA. Finalmente se opta la segunda opción por la facilidad de manipulación para el cambio de SMA o cables.

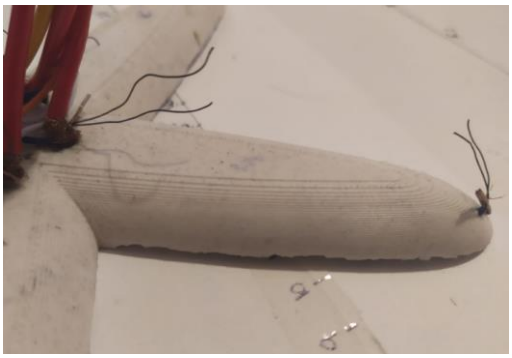


Figura 45. Detalle de unión de las extremidades de la estrella mediante una grapa conductora que atrape el actuador y el cableado.

Tras realizar varias pruebas como se analizarán se realizan pequeñas mejoras. En primer lugar, se ha realizado un retorno en cada extremidad de la estrella, para ello se ha empleado un pequeño cable que se uniese en el extremo con la SMA y con un cable de tierra en el centro de la estrella. Además, para reducir el peso que puede suponer tener diez cables en la estrella, cinco con voltajes y cinco a tierra, se eliminan cuatro de los unidos a tierra, ya que se puede emplear con un cable común. Esto es posible debido a la morfología de diseño de la PCB.

Figura 46. Detalle del cable de retorno situado en la parte inferior de las extremidades.

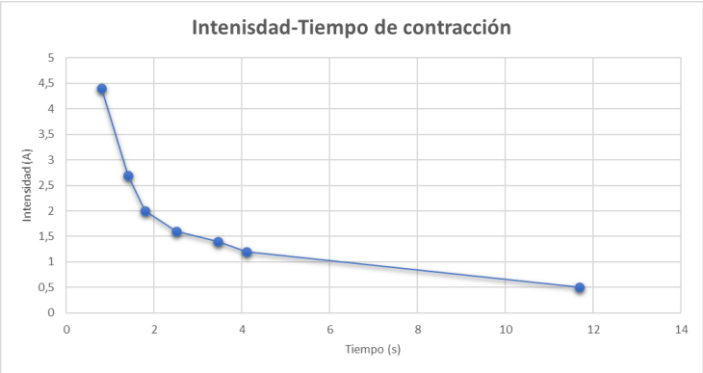
3. Actuación del robot

El control del robot como ha sido explicado anteriormente se realizará mediante la emisión de señales por parte de una placa Arduino UNO. Estas señales son de PWM para poder controlar la tensión suministrada de la fuente de alimentación. Además, de manera experimental se ha observado que el nitinol trabaja mejor con este tipo de señales antes que con continuas.

La utilización de las señales de pulso modular permite que desaparezca el potenciómetro para controlar la intensidad que se encargara de aportar energía calórica al nitinol. Para ello se conectan los pinchos de salida marcados con "~" con la PCB en los bornes de entrada. Además, la PCB también tiene una entrada en una de los bornes conectada a tierra.

La realización del código de Arduino se ha desarrollado de manera secuencial, empezando por el control de una pata a diferentes velocidades. Posteriormente se procede al trabajo con varias extremidades secuenciales y simultáneas, y así estudiar la reacción de la fuente a este estado de tensión. Finalmente, se crea un código que permita realizar maniobras de movimiento mediante la actuación en el nitinol. Esto se consigue de manera semiexperimental con patrones de movimiento conocidos y mediante la aplicación de diferentes tiempos en la actuación del voltaje. El movimiento debe ser personalizado en cada dirección ya que cada cable por motivos de pequeñas irregularidades no se comporta igual en cada extremidad.

El código está escrito en la aplicación por defecto de Arduino, Arduino IDE. El modo de trabajo es poder enviarle una orden a través del ordenador y esta sea trasmitida mediante el serial de Arduino. También se crea la señal de PWM mediante una constante que puede variar desde 0 hasta 254, siendo 0 nula y 254 una señal constante, que se traduce en velocidad de reacción del nitinol por la mayor intensidad de corriente. El objetivo es que a través del actuador de nitinol circulen en torno a 2.5 A, aunque se verá que en determinados casos habrá que trabajar con mayor o menor amperaje. Además, este valor depende del tipo de muelle. En la siguiente figura se puede observar la variación de la velocidad de contracción con el amperaje suministrado a un muelle de 0.3mm.



Intensidad (A)	Tiempo(s)
0,5	11,68
1,2	4,1
1,4	3,45
1,6	2,5
2	1,8
2,7	1,4
4,4	0,8

Figura 47. Gráfica y tabla de la relación intensidad-tiempo en un muelle de nitinol de 0.3mm.

3.1. Experimentos

3.1.1. Elección de patrones de movimiento

Para la elección de los patrones de movimiento se ha tenido en cuenta proyectos anteriores y básicamente se ha tratado de comprobar los resultados de los mismos. En definitiva, podemos encontrar dos tipos de ordenes de ejecución como se aprecia en la siguiente figura. En el modo 1 se realiza un proceso ya explicado anteriormente y que obtiene mejores resultados. En este, inicialmente se mueven las extremidades 1 y 2, y una vez estas están contraídas se realiza el mismo proceso para 3 y 5, patas adyacentes a las anteriores. Finalmente se realiza la contracción de la última extremidad, la 4. Teóricamente, el proceso es sencillo sin embargo hay que tener en cuenta los tiempos de calentamiento y enfriamiento de cada uno de estos estados. Durante la activación de 3 y 5, 1 y 2 deben estar activados y por lo tanto tener una corriente que los mantenga arriba de una manera u otra. Del mismo modo se procede para el levantamiento de la pata número 4, ya que 1, 2, 3 y 4 deben estar activados. Esto ha sido bautizado como proceso de calentamiento. Seguidamente a este proceso, se encuentra con el control del enfriamiento. El orden de bajada de las extremidades se realiza de manera secuencial y similar al de la subida, con la diferencia de que no se puede controlar la velocidad con la que la SMA es enfriado. Para ello, se utilizan corrientes que mantengan activas todas las extremidades excepto las que se necesitan bajar. Un ejemplo de este es la circulación de corriente por 3, 4, y 5 mientras que 1 y 2 se enfrían por convección natural.

Por otro lado, el modo dos se realiza de manera análoga variando el orden de movimiento. Este proceso es más útil para otro tipo de estrellas explicadas anteriormente. En este robot, al realizar simulaciones de este modo, los resultados fueron nulos o incluso negativos, por lo que se rechazó esta opción.

Todos estos procesos sirven para poder avanzar en el sentido deseado obteniendo un juego útil entre rozamiento y centro de masas. Durante las dos primeras etapas del proceso de calentamiento se desea desplazar el centro de masas a la vez que disminuir el rozamiento para que la extremidad que realiza el último movimiento sea capaz de arrastrar la estrella a su paso. Del mismo modo durante el enfriamiento, 1 y 2 bajan en pares, para fijar mayor rozamiento y conseguir que al relajarse las siguientes patas no retroceda el robot.

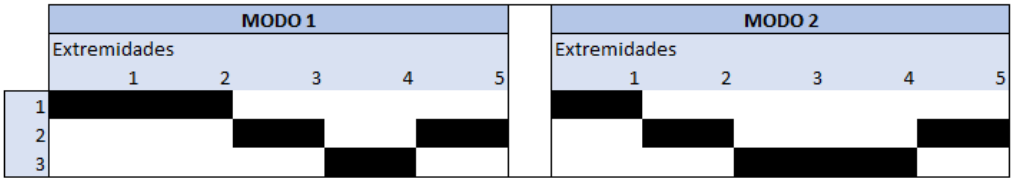


Figura 48. Posibles patrones de movimiento analizados. El Modo 1 a la izquierda mostrando el orden es con el levantamiento de dos extremidades de inicio. El modo 2 a la derecha con levantamiento de una extremidad inicialmente.

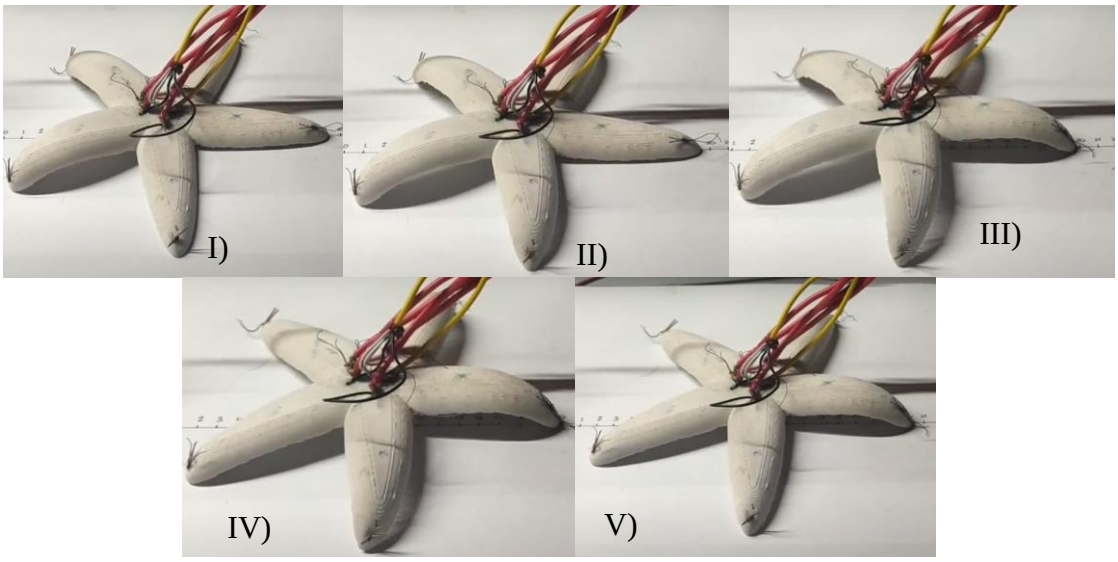


Figura 49. Patrón de movimiento real en la estrella

3.1.2. Mantenimiento de todas las patas juntas a la vez

Aunque se ha visto en la figura anterior, la estrella tiene la capacidad de sostenerse en pie por la fuerza ejercida en todos los muelles a la vez. Esto es importante para poder realizar el movimiento. Para ello se ha enviado de manera secuencial pequeños impulsos que activen todas las patas a la vez y una vez todas están alzadas, se mantiene una corriente pequeña que mantenga la temperatura de estos muelles. En otros proyectos similares usan esto para evitar obstáculos.

Con esto se puede explicar la importancia del peso del cableado. Al soportar tanto amperaje no se pueden utilizar cables típicos de ARDUINO, ya que no soportan tanta temperatura y acaban fundiéndose, motivo por el cual este trabajo ha resultado problemático. Para evitar esta situación, se ha comprado cable de 3mm con mayor recubrimiento que permita soportar temperaturas de entorno 70ºC. La problemática de este asunto es el mayor peso de estos últimos y la necesidad de inclinarlos hacia el sentido de movimiento para restarle papel a esto.

3.1.3. Arrastre con dos patas

Otra posibilidad es aprovechar el pequeño avance que supone la contracción de patas independientes, tal y como se ve con otros modelos. Estos modelos simplemente no tenían la posibilidad de realizar patrones lógicos debido a la ausencia de extremidades. Tras saber esta posibilidad se procede a analizar la viabilidad de este.

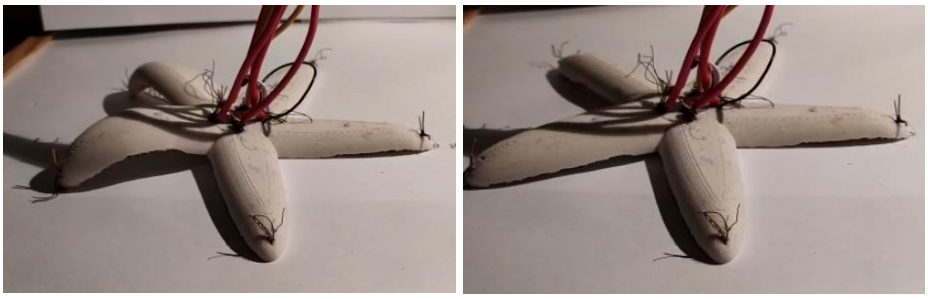


Figura 50. Secuencia de desplazamiento mediante arrastre de dos patas.

3.2. Análisis de evolución de las mejoras en la estructura

3.2.1. Primer método: cables en extremos e impulsos constantes

En primer lugar, este proyecto se planteó para realizar el movimiento de la estrella con los cables unidos en los extremos y en el centro y con un cable de nitinol de alta temperatura suministrado desde Alemania.

El patrón utilizado se eligió entre los dos anteriores mediante el envío de impulsos independientes y empíricamente ver el desarrollo y avance, aunque seguidamente fue comprobado esto mismo con código completo. Además, para añadir velocidad y aprovechando la posibilidad que la fuente de alimentación elegida, con amperaje máximo de 12A, se trató de enviar impulsos simultáneos. Con ello se consigue un movimiento más uniforme y más veloz al no tener tiempos de espera entre impulsos, es decir, mientras la extremidad 2 se activa, la uno ha pasado a desactivarse por lo que se necesita luego volver a calentarla un poco para que no decaiga en la totalidad.

Con este método se observó un desplazamiento considerablemente rápido respecto a otros proyectos, sin embargo, este era muy irregular. En ocasiones por ciclo, que son en este caso unos 40s, podía avanzar en las mejores condiciones unos 2cm. Metodológicamente hablando, este proceso se produce que mientras 1 y 2 la intensidad les llega de la misma manera y simultáneamente. Posteriormente, se realiza lo mismo con 3y 5, con la diferencia de que cuando estos son activados, 1 y 2 también lo son, lo que significa que tenemos 4 MOSFETs funcionando a alta potencia. Tras esto ocurre lo mismo al añadir la última extremidad. En la siguiente imagen se aprecia cómo era la morfología y la contracción de los muelles que da lugar al avance.

Figura 51. Método de análisis 1 con pinzas de cocodrilo e impulsos constantes.

Las ventajas ya explicadas son la velocidad de este y la simplicidad de programación al ser esta muy lógica. En cuanto a desventajas, hay que tener en cuenta la variabilidad de resultados llegan en ocasiones por motivos de temperaturas o corrientes de aire externas. También cabe destacar la fragilidad del circuito a estas corrientes, ya que esto ha causado muchos problemas por sobrecalentamiento de MOSFET, al funcionar durante mucho tiempo aumentando su temperatura. Además, también ha llegado a estropear Arduinos.

En definitiva, la constante aparición de problemas hace que las desventajas sean superiores a las importantes ventajas que este sistema tiene.

Como otra variante a este es la utilización de pequeños topes creados mediante soldadura tal y como se ve en la imagen, eliminando así el peso de las pinzas en el centro de la estrella. Como contra posición de eso, nos encontramos que el nitinol, al deformarse a alta temperatura, la soldadura se suelta del cable.

3.2.2. Segundo método: implementación de cable de retorno.

Del mismo modo que ha estado funcionando en el proceso anterior en cuanto a código se procede al análisis de movimiento. La variante es la implementación de un cable pequeño de Arduino que pesase poco en la parte inferior y que no añadiese mucha oposición a la contracción.

El cable empleado para este análisis es la misma SMA de 0.3mm a 70ºC. Sin embargo, surge un problema con el mismo ya que debido a las iteraciones acaba perdiendo memoria y se acabaron las existencias tanto en el departamento como en la empresa suministradora.

Cabe resaltar la gran desventaja también del cable de retorno a estas temperaturas ya que se produce un calentamiento del muelle que esta colindante a este cable y produce fundido. Al fundirse el recubrimiento del cable se cortocircuita el sistema dejando inoperativa la SMA al no circular corriente por ella. Lo que unido a lo ya explicado del suministro induce a la posibilidad de utilizar un SMA con menor temperatura.

En cuanto a resultados son muy similares a los anteriores, pero sin datos relevantes obtenidos debido a la imposibilidad de toma de datos por la rápida inutilización de la SMA.

3.2.3. Tercer método: Cambio de cables SMA

Tras la adquisición de destinas SMA se valoró la utilización de una de mayor diámetro y otro del mismo con temperatura de austenización de 45ºC. El primero de ellos, permitía una velocidad y calidad de compresión muy alta sin embargo la fuerza que ejerce la silicona para el estiramiento del muelle no era la suficiente y este se quedaba siempre en la forma comprimida, lo que hacía imposible trabajar con ese muelle.

Por otro lado, se experimentó con el de menor temperatura de austenización y los resultados fueron totalmente contrarios al anterior analizado. El muelle no tenía fuerza de compresión suficiente para comprimir la extremidad de la estrella. Además, se debe de tener precaución con el amperaje suministrado ya que un aumento del mismo puede hacer que la temperatura aumente por encima de los 50º y pasar a la fase de memoria de la SMA y al estar con cargas guarde la forma errónea.

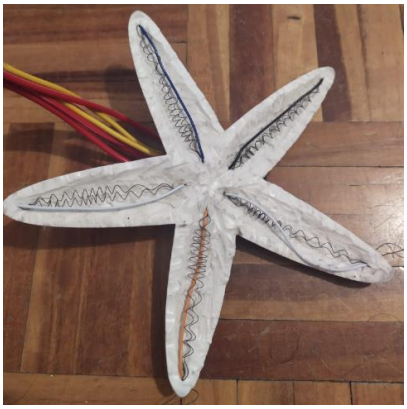


Figura 52. Parte inferior de la estrella con actuador doble en forma de muelle visible.

Sin embargo, se ha probado la posibilidad de aplicar dos muelles por extremidad como se ve en la figura anterior 59, para aumentar su fuerza de compresión. Cabe resaltar la en este caso la silicona si tiene la fuerza suficiente para la descompresión de ambos muelles. Los resultados son positivos para la compresión al sí tener capacidad para vencer al esfuerzo de la silicona y posibilitar el avance del proyecto con los nuevos muelles de SMA.

Ante este avance se produce un nuevo contratiempo y es el exceso de carga en el centro de la estrella al tener todas las pinzas de cocodrilo y los cables semi-fundidos apoyados. Esto implica un desplazamiento prácticamente nulo al realizar el patrón movimiento teórico.

La SMA nuevo tiene una ventaja muy importante, ya que al trabajar con menores temperaturas evita el fundido del cable de retorno y evitar casi en la totalidad este problema de cortocircuito. Esto es en casi su totalidad ya que en las zonas que atraviesa la silicona la disipación de calor es inferior lo que produce un aumento de la

temperatura de la SMA en esa parte que si está en contacto con el cable si acaba produciendo fundido.

3.2.4. Cuarto método: Sustitución de los cables a tierra

Como continuación del método anterior se ha buscado una forma de reducción de peso en el centro de la estrella. Esta solución ha resultado ser por partida doble. En primer lugar, se ha sustituido el cable fino, que aportaba problemas de temperatura, que iba unido al centro de la estrella por otro de mayor diámetro, como ya ha sido explicado. Tras esto se eliminan los cables con pinza de cocodrilo que iban a tierra por un único cable ya que todos estos tenían una toma de tierra común. Respecto a la unión del cableado con la estructura del robot se ha utilizado pequeñas grapas por su bajo peso que siendo presionadas pueden limitar el desplazamiento del cable durante su contracción. La principal ventaja de esta solución es que debido a la multitud de problemas que ocasionan estas SMA por perdida de memoria (al igual que todos los de mercado), permite una sustitución rápida y sencilla, sin necesidad de utilizar otras juntas costosas y difíciles de eliminar como se había planteado inicialmente.

Este método es el que se ha utilizado de manera definitiva para los siguientes análisis en fase de uso. Debido a imposibilidad de otros métodos y a los buenos resultados experimentales que se analizarán posteriormente.

3.3. Análisis de la evolución de las mejoras del código

Inicialmente se intenta desarrollar un modelo de programación por el cual se envíe la señal de manera simultánea a ambas patas, pero como ya ha sido explicado, los problemas de sobrecalentamiento han dado lugar a que esto no sea una opción real, ni viable. Pese a los inconvenientes también han sido desarrollada pruebas como ultima variante con el objetivo de valorar las virtudes de este método. Cabe resaltar que se realiza de manera última para que en caso de rotura por exceso de potencia en los elementos electrónicos no quede por examinar el método seguro.

Para este se aprovechaba la señal del serial de Arduino y asociamos una tecla a un ciclo de movimiento. De este modo se haría el patrón de movimiento teórico, llegando a activar cinco a la vez. En la figura 60. se aprecia un esquema del código explicando cómo se envía la señal de manera teórica. Al pulsar la letra p se realiza la activación del proceso, la intensidad viene definida por el valor *val* y el tiempo de subida y bajada se calcula de forma experimental y tiene un valor de 3s.

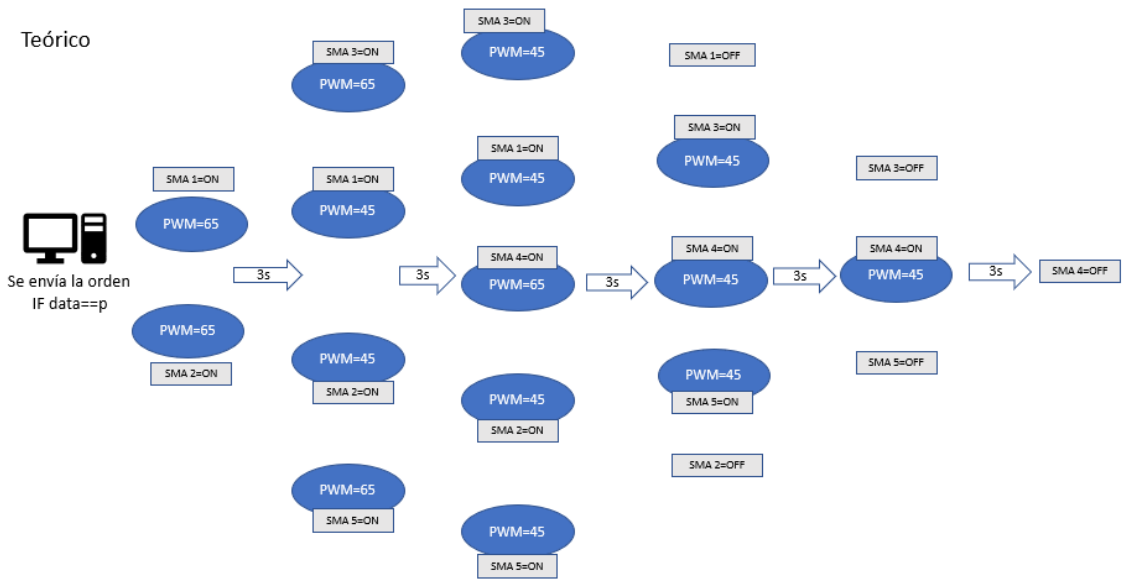


Figura 53. Esquema de código siguiendo el patrón teórico.

Sin embargo, los resultados no son los apropiados por las diferencias de temperaturas a las que finalmente se someten y a la sobrecarga de los cables. Acaban reduciendo la vida útil de los muelles y estropeando el sistema electrónico de potencia. El desplazamiento es nulo al no hacer bien el patrón real.

Tras este ensayo se contempla la posibilidad de enviar las señales de control mediante impulsos que eviten el sobrecalentamiento y reducir así un problema. Para ello se analizan dos opciones: enviar por impulsos pares de cables o enviar por impulsos extremidades individuales.

Los impulsos por extremidades individuales han sido el centro de estudio en este proyecto, debido a la infinidad de problemas técnicos causados por los otros procesos. En la imagen siguiente se aprecia un esquema simple con los tres primeros pasos de este patrón explicado anteriormente. Se aprecia como durante 0.4 segundos, se realiza el primer envío de señales a las dos primeras patas, que se reintroducen en un bucle que hace que se repita durante 15 veces. De manera sucesiva se realiza el mismo proceso para las patas 2 y 3, con impulsos en este caso de mayor cantidad de tiempo activo para compensar el mayor tiempo inactivo. Este tiempo que no emite intensidad a estas extremidades se explica por la necesidad de mantener contraídos los muelles anteriores de 4 y 5 y por ello se envían durante pequeños periodos de tiempo impulsos. Mediante este sistema, se continúa realizando lo mismo para la última extremidad enviando pequeñas señales, en este caso, a las otras 4.

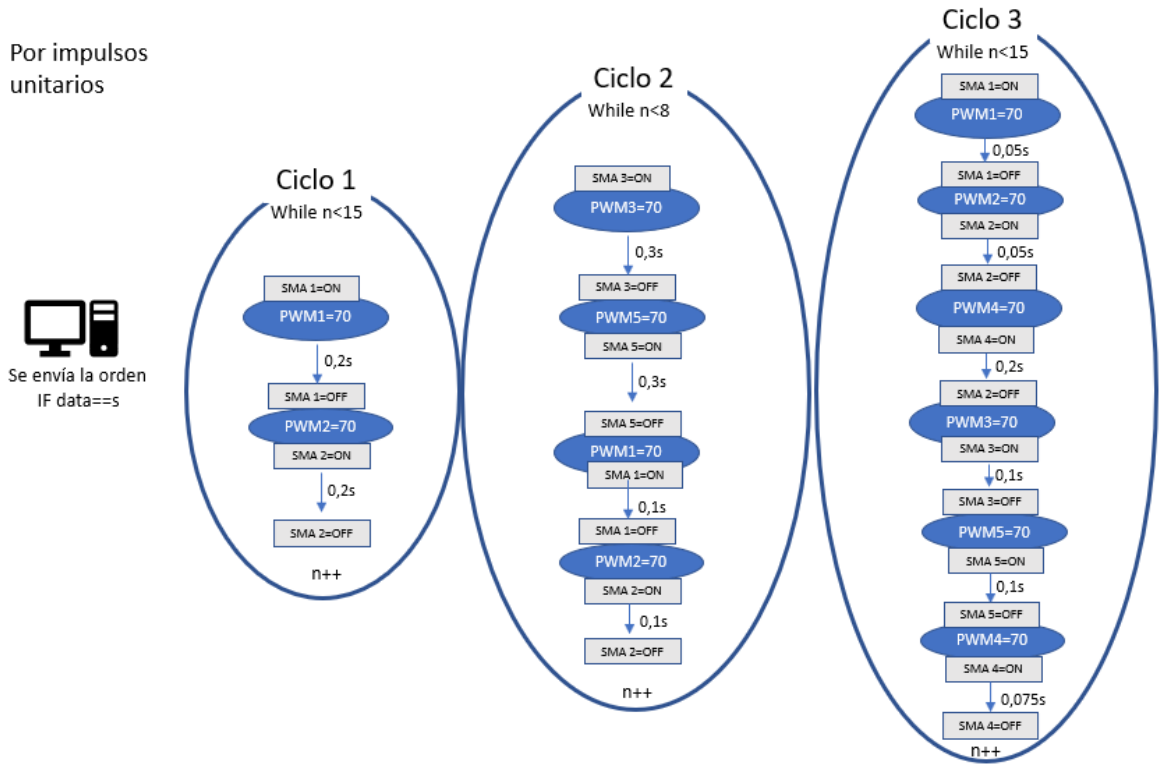


Figura 54. Esquema de funcionamiento del proceso de levantamiento de las patas.

Como método definitivo, han sido desarrolladas diferentes combinaciones experimentales para obtener la forma óptima de avance. Para ello se ha ido variando los ciclos dentro del *while* (n), los tiempos del *delay* y las intensidades transmitidas en cada momento.

En la primera tabla de movimientos se observa como los valores aportados en el buble *while* son todos iguales, para poder obtener resultados posteriores que permitan recortar tiempos. En cuento los valores de tiempo, son aproximaciones de ensayos hechos de manera independiente. Tras esto, se aprecia olor a quemado por los cables al estar expuestos demasiado tiempo a altas intensidades, lo que da lugar a reparaciones del cableado y reducir este valor de pwm en el código. Los cables sustituidos son los colindantes con los muelles de nitinol, es decir, los de retorno.

	n (ciclos)	I(pwm)	time(ms)	time2(ms)	time3(ms)	total time(ms)
Fase 1	20	70	400	0	0	8000
Fase 2	20	70	200	600	0	16000
Fase 3	20	70	100	200	275	11500
Fase 4	20	70	0	200	75	5500
Fase 5	20	70	0	0	100	2000
						43000

Figura 55. Primera tabla de variables para movimientos.

En la imagen anterior se muestra el código empleado con las diferentes variables estudiadas, donde time(ms), time2(ms) y time3(ms), representan las extremidades del primer, segundo y tercer movimiento. En cada cambio realizado se actualiza esta tabla para examinar de este modo el movimiento como varía en función de esto, además de

obtener una aproximación del tiempo total del ciclo, que será algo más que el expresado al no tener en cuenta el enfriamiento de la última extremidad.

	n (ciclos)	I(pwm)	time(ms)	time2(ms)	time3(ms)	total time(ms)
Fase 1	20	55	400	0	0	8000
Fase 2	20	55	200	600	0	16000
Fase 3	20	55	100	200	275	11500
Fase 4	20	60	0	200	75	5500
Fase 5	20	55	0	0	100	2000
						43000

Figura 56. Segunda tabla de variables para movimientos.

Una vez obtenidos resultados favorables, en cuanto a intensidad, reduciendo el valor del pwm a 55, se procede a obtener la forma óptima de tiempos en los cuales realizar los ciclos. En primer lugar, se reduce el valor de la primera fase de levantamiento pasando de realizar 20 ciclos a 15. De esta manera ya se gana dos segundos de tiempo.

	n (ciclos)	I(pwm)	time(ms)	time2(ms)	time3(ms)	total time(ms)
Fase 1	15	55	400	0	0	6000
Fase 2	20	55	200	600	0	16000
Fase 3	20	55	100	200	275	11500
Fase 4	20	60	0	200	75	5500
Fase 5	20	55	0	0	100	2000
						41000

Figura 57. Tercera tabla de variables para movimientos.

En la tercera tabla se reflejan los cambios anteriores y se da pie a la reducción de los sucesivos pasos.

	n (ciclos)	I(pwm)	time(ms)	time2(ms)	time3(ms)	total time(ms)
Fase 1	15	55	400	0	0	6000
Fase 2	10	55	200	600	0	8000
Fase 3	15	55	100	200	275	8625
Fase 4	20	60	0	200	75	5500
Fase 5	20	55	0	0	100	2000
						30125

Figura 58. Cuarta tabla de variables para movimientos.

Con esta reducción del número de ciclos se pueden deducir varias cosas. Rápidamente. llama la atención la reducción de más de 10 segundos al variar el número de ciclos de la fase dos y tres. Por otro lado, es resaltable que estos valores a simple vista no guardan relación ninguna con lo que serían valores teóricos, es decir, de la fase dos se debería de reducir de manera aproximada lo mismo que la fase uno, sin embargo, esta ha disminuido el doble. Esto se debe al factor real de los cables, muy lejos de un comportamiento ideal, de manera empírica, los cables de la extremidad de la fase 2, (2 y 3), funcionan mejor que los anteriores. Estas diferencias pueden deberse a muchos motivos, desde la forma y tiempos de creación de los muelles, hasta la conexión de los mismos con el cableado, pasando por el número de ciclos y por la distancia de los mismos.

	n (ciclos)	I(pwm)	time(ms)	time2(ms)	time3(ms)	total time(ms)
Fase 1	15	55	400	0	0	6000
Fase 2	8	55	200	600	0	6400
Fase 3	15	55	100	200	275	8625
Fase 4	20	60	0	200	75	5500
Fase 5	20	55	0	0	100	2000
						28525

Figura 59. Quinta tabla de variables para movimientos.

Finalmente, tras esta última variación del código de control se obtiene un resultado más cercano posible con este nitinol, donde los tiempos de subida se intentan suceder lo más precisamente posible de manera que no haya puntos muertos entre fases donde se puede llegar a perder mucho tiempo. Es de importancia el insistir de que el tiempo es muy dependiente de la temperatura del ambiente ya que el proceso de enfriamiento no es controlable mediante código. Por ello, las fases cuatro y cinco de código son llamativamente más largas en relación con los procesos a realizar. Por ejemplo, el número de ciclos de la fase cuatro es n=20, destacadamente mayor que las fases anteriores, para poder hacer tiempo a la relajación de los muelles primeros. Esta descompensación de tiempo también se intenta igualar con una bajada de tiempos activos en estos procesos hasta valores bajos, para facilitar también ciclos posteriores.

Tras tener listo el código del programa para el robot bioinspirado se procede a la puesta en marcha del mismo y a la toma de datos de desplazamientos. Para la toma de datos se ha diseñado una mesa de trabajo donde, la estrella es apoyada sobre una tabla de madera para realizar los movimientos. La tabla tiene fijados encima papeles reglados en centímetros sobre los que se medirán los avances de la estrella. La ventaja de este modo es la posibilidad de realizar marcas en el propio papel para poder realizar un estudio detallado de los movimientos.

4. Resultados

En primer lugar, se toman datos de desplazamiento tomando como referencia el avance de la extremidad delantera. La anotación de estos valores en cm se diferencia en cinco segundos desde el inicio, y el periodo de funcionamiento es variable, cercano a los tres minutos. En las siguientes graficas se aprecian dos ensayos diferentes siendo los valores en segundos y centímetros, en el eje x e y respectivamente

Figura 60. Desplazamiento en primer ensayo en extremidad delantera.

Figura 61. Desplazamiento en segundo ensayo en extremidad delantera.

En estas gráficas se aprecia como los desplazamientos en ambos ensayos tienen valores similares y las diferencias se deben a los diferentes factores explicados entre los que cabe destacar la temperatura y las corrientes de aire del entorno. Por otro lado, como aspecto a destacar, es que el momento en el cual se realiza el mayor desplazamiento, está muy localizado. Este se produce en el momento que se estira la extremidad. Durante el calentamiento de este muelle el desplazamiento suele ser nulo o incluso negativo, ya que las otras patas ejercen fuerza sobre la superficie lo que produce que no pueda retroceder al contraerse. Sin embargo, al estirarse la última pata, como las otras se encuentran en estado relajado induciendo a mayor contacto y por lo tanto mayor rozamiento, se puede apreciar aquí el avance.

En cuanto al tiempo por ciclo, se aprecia una diferencia significativa a la teórica por el enfriamiento no controlado. Ha pasado de tardar unos 30 segundos a valores en torno a 45. Por ello posteriormente se valorará disminuir este tiempo con recortes en calentamientos, es decir la etapa controlable. En ambas figuras se producen cuatro ciclos de desplazamiento, pese a que en la primera el periodo de estudio es 20 segundos mayor.

De manera lógica, se entiende que este desplazamiento no es lo mismo en cada extremidad, al contraerse y estirarse en momentos diferentes del ciclo. Por ello, del mismo modo se realiza un ensayo con una de las extremidades que realizan la primera contracción. Estas funcionaran de manera inversa a las anteriores, pese a que el desplazamiento total efectivo sea el mismo. En la figura 69 se aprecia que ahora la contracción se realiza en los primeros instantes del ciclo y por lo tanto el desplazamiento es mayor durante esos instantes. De la misma manera el estiramiento supone un retroceso o avance nulo. Estos datos son tomados trazando líneas rectas desde el punto inicial hasta donde se encuentre el vértice de la estrella, por lo tanto, se explican estos retrocesos a los 40 segundos, momentos de relajación. Aquí ya se aprecia la diferencia con la extremidad delantera.

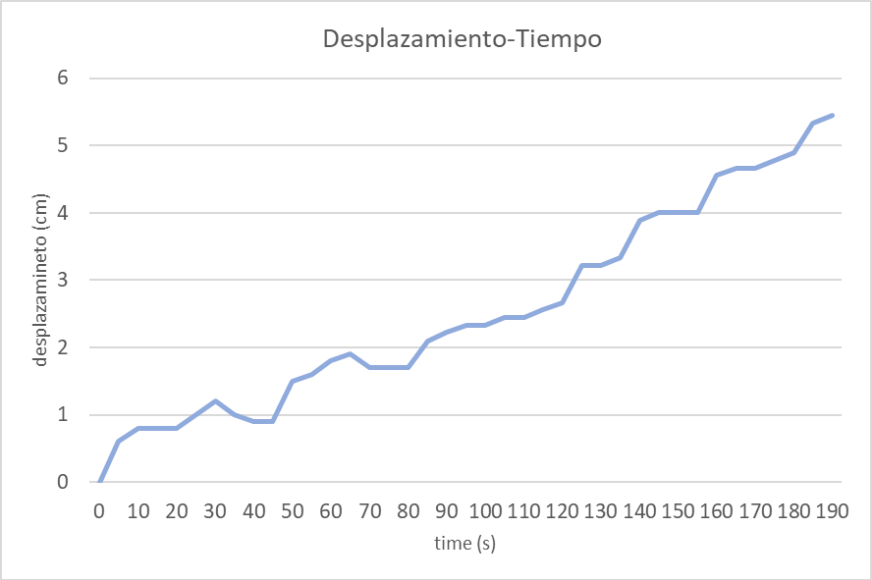


Figura 62. Desplazamiento relativo desde el punto inicial de la extremidad trasera

También, se ha decidido obtener un desplazamiento efectivo entre el punto inicial y el final del movimiento y para poder realizar un análisis en periodos de 5s, se trazan perpendiculares sobre una recta que una estos puntos iniciales y finales. Esto esta explicado ya que la estrella al realizar el movimiento no tiene un movimiento uniforme de la patas. Las patas traseras tienen un momento de zigzag, siendo durante la contracción, la dirección hacia el centro de la estrella y el estiramiento del mismo modo, pero debido al rozamiento también se desplaza de manera lineal. En la extremidad delantera esto no ocurría ya que el sentido de avance era el mismo que el del vector del muelle. En la gráfica 66 se puede apreciar esta aproximación lineal del movimiento.

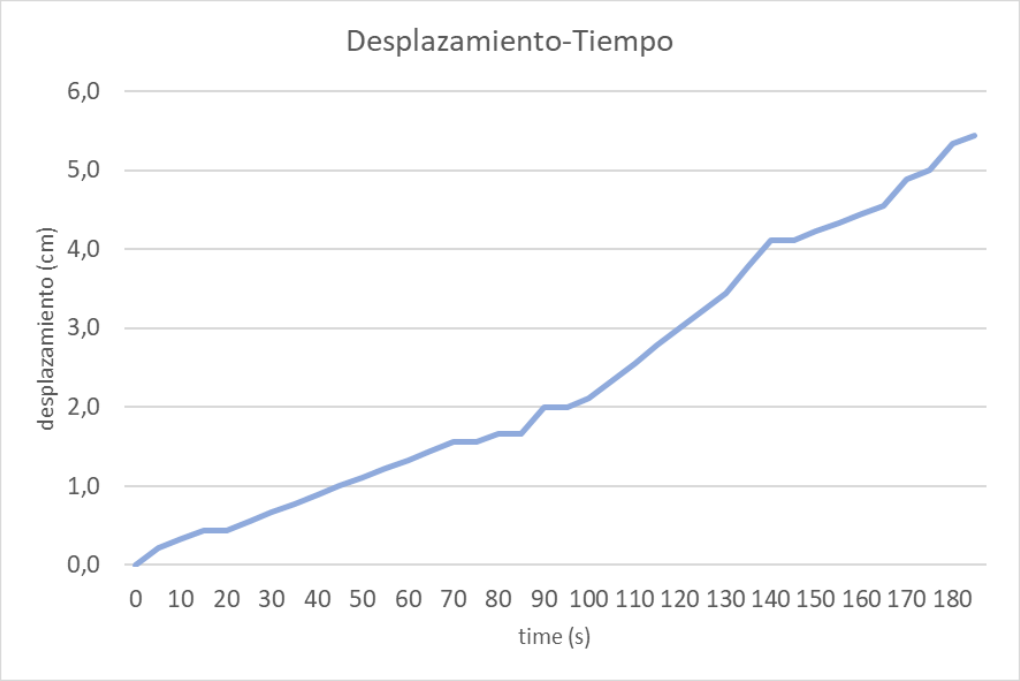


Figura 63. Desplazamiento efectivo perpendicular sobre una recta que une el punto inicial y final de la extremidad trasera

Es llamativo como en esta última figura se guarda un poco más la linealidad que en las anteriores debido a que los desplazamientos se producen en diagonal y la proyección sobre la recta supone menor distancia.

Los impulsos por pares tratan de reducir el sobrecalentamiento de 5 cables a la vez, sin embargo, también funcionará con impulsos a la hora de activación distintos pares. Un ejemplo más claro de este se da de este modo: se activa y se desactiva el par 1-2 con una determinada frecuencia, tras esto, se hace lo mismo con el par 3-5, es decir, se contraen 3-5 y cuando estos se desactivan lo hacen 1-2, durante un periodo n de ciclos. En el siguiente código se expresa mejor. El valor de n indica el número de ciclos que se produce con la frecuencia expresada por los *delays* dados en milisegundos. El valor de la intensidad se controla con un *analogWrite* como el término *Val*.

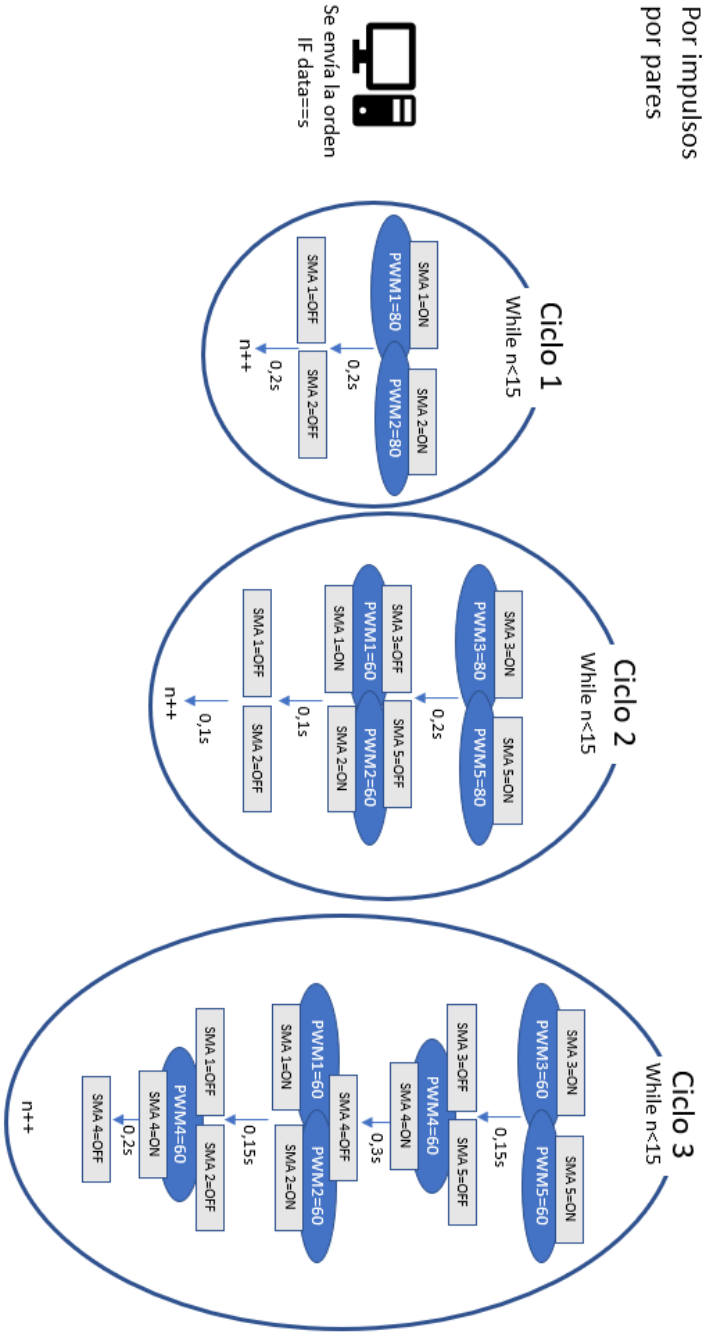


Figura 64. Esquema de funcionamiento mediante señales a pares.

Con este método de control por pares, se pueden conseguir resultados mejores que mediante impulsos individuales, dependiendo de los materiales que compongan el robot. Esta estrella robótica tiene el inconveniente de la oposición que supone el peso, lo que implica que los cables empleados son menores y más sensibles a las temperaturas. Por lo tanto, el control por pares no es una solución para este robot en concreto al no aportar cierta durabilidad de uso. Sin embargo, se ha realizado un pequeño análisis de desplazamiento efectivo para realizar una comparación.

El resultado de esta comparación es una velocidad de calentamiento de muelles muy superior, al ser expuestos a altas temperaturas de manera simultánea. Esto supone una

mayor aportación de potencia por la batería y a paradas repentinas en su uso. Por otro lado, al tener menos tiempo de enfriamiento en cada ciclo, empiezan a producirse pequeños quemados. Ya explicada esta mayor velocidad de calentamiento, vuelve a surgir el problema del enfriamiento no controlado. El desplazamiento efectivo de este modo, es similar, aunque da más problemas durante su ejecución y el tiempo se reduce unos 5 segundos en comparación con el anterior sistema.

Tras este, se diseña un modo por pares de máxima explotación del sistema al que se la ha dado el nombre de modo rápido. Este se basa en mayor utilización de la intensidad posible y reducción de número de ciclos. El periodo teórico ahora es de 25s siendo el problema de nuevo el enfriamiento. Esto hace que no sea rentable este método ya que el valor experimental del ciclo es de unos 35s. Es lógico también la consecuencia de quemado y sobrecarga de los transistores del circuito electrónico. Además, en la figura 72, se aprecia que el desplazamiento tampoco tiene unos valores lógicos en función del estado del ciclo.

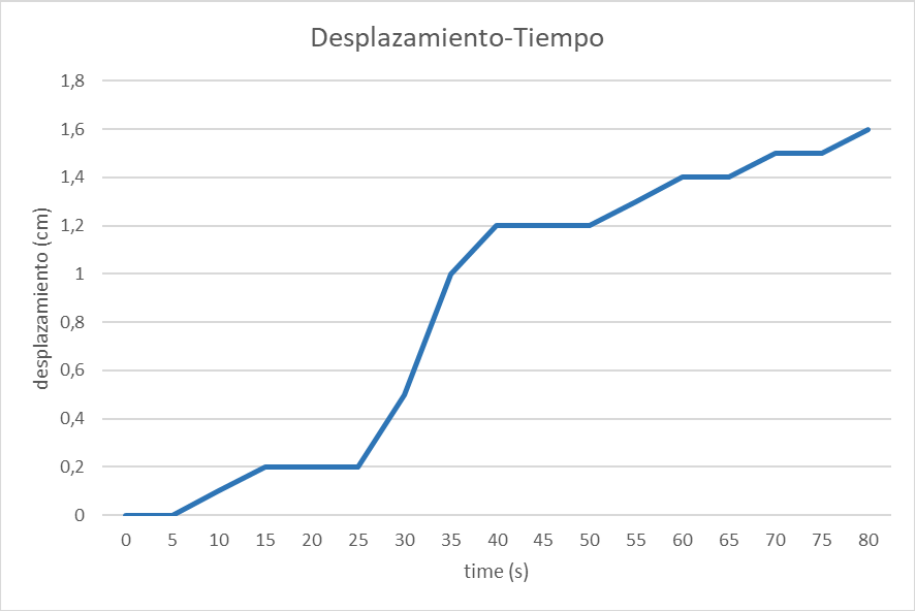


Figura 65. Desplazamiento de dos ciclos del modo rápido.

5. Conclusiones y líneas futuras

Este robot bioinspirado tiene su geometría basada en las estrellas de mar, Asteroidea. Sin embargo, los desplazamientos de este animal no se realizan del mismo modo que lo hace el robot. Los movimientos se realizan por parte del animal mediante pequeñas patas situadas en la parte inferior del cuerpo, mientras que el robot bioinspirado lo hace con cinco actuadores SMA, uno por cada extremidad.

Pese a las diferencias explicadas, no supondría un problema para cumplir uno de los objetivos de este tipo de robots, la mimetización. Con un buen diseño para una aplicación real, la estrella robótica podrá pasar desapercibido entre los animales y no resultar invasivo.

Uno de los principales problemas para desarrollar este proyecto, fue la dificultad de manejo las SMA, al no venir con una forma memorizada. Por eso, se ha aprendido a cómo tratar este material para conseguir que memorice las formas deseadas, en este caso muelles. Para esto, se ha solicitado apoyo al departamento de metalurgia de la Escuela Técnica de Ingenieros al poder aportar información y hornos con los que realizar pruebas iniciales. Por lo tanto, se puede afirmar que no es algo difícil de tratar con precisión. Además, la utilización de manera continuada hace que la forma memorizada se vaya deformando, lo cual implica constantes sustituciones de muelles. Esta estrella ha empleado dos tiempos de diámetros de SMA, 0.5mm y 0.3mm. Finalmente, se opta por el último de ellos, al tener menor temperatura umbral de transformación, con la contraposición de la necesidad de tener dos muelles por actuador para conseguir obtener mayores fuerzas.

La actuación de esta SMA se realiza mediante la aplicación de Arduino gracias a su sencillo manejo con el cual poder realizar pruebas con constantes cambios. Estas pruebas han supuesto gran parte del proyecto por la delicadeza del sistema al depender de muchas variables difícilmente controlables. Por ello, el patrón implementado en el código ha tenido muchas variantes para dar con la clave, en cada muelle.

Hablando de estas variables que han supuesto problemas, se puede destacar dos: el peso y las fuerzas de rozamiento. El peso, resultó ser todo un desafío ya que la viabilidad en los movimientos de la estrella iba directamente relacionada con el peso de la misma y del cableado. Por otro lado, el cableado debía tener la capacidad de aguantar altas temperaturas, lo que supone un aumento del recubrimiento. Por otro lado, el rozamiento con un buen diseño de estrella y de patrón de movimiento puede ser solucionado, aunque lógicamente para ello también se necesita un peso óptimo.

Uno de los precedentes, de estrellas de mar robóticas son aquellas actuadas neumáticamente. Estas tienen una ventaja fundamental frente a las diseñadas con nitinol, y es la posibilidad de acelerar una de las fases del movimiento, la relajación. Sin embargo, para la SMA en este proyecto se optó por un enfriamiento natural de los muelles, lo que supone mayor tiempo. Respecto a precedentes de SMA, se han obtenido resultados de velocidades similares de 1.8 cm/min.

Este proyecto también ha servido para poder estudiar las ventajas de estos actuadores, respecto a otros más convencionales como son los neumáticos o por motores. Sin embargo, al tener como objetivo un robot soft, estos últimos tienden a ser descartados. La SMA permite una adaptabilidad al cuerpo del robot en este caso de silicona lo que permite aprovechar esta flexibilidad del nitinol a bajas temperaturas. Una de las ventajas fundamentales es su bajo peso y coste frente a los neumáticos que tienden a ser más costosos por necesitar más elementos para su actuación.

La posibilidad de adaptación de sensores para la recogida de datos permite darle aplicación a este robot.

5.1. Líneas futuras

Haciendo un balance total del proyecto teniendo en cuenta las limitaciones que este tiene se plantean las siguientes líneas futuras.

- Diseñar un nuevo modelo de menor peso, recortando este en el cableado o con la silicona.
- Crear un diseño de estrella submarina que será fácilmente obtenible con el aislamiento de cableados y de la SMA. Esto se consigue, mediante la implantación de la SMA con el proceso de curado de la silicona.
- Para la línea anterior hay que tener en cuenta un problema a solucionar fundamental, y es la mejora del control de estos actuadores, ya sea con mayor cantidad de ciclos de deformación o con formas de memorización más precisas y simples.
- Una vez obtenidos modelos de este robot bioinspirado más veloces se podría obtener un código de mayor complejidad que permita pasar por encima obstáculos o incluso la implantación de un sensor que los evite. Es decir, darle mayor autonomía al diseño.
- Otra línea de investigación es el estudio de viabilidad de añadir una parte rígida en el centro de la estrella para que no tenga tanto rozamiento con el suelo, por un lado y, además, oriente las estrellas. En detracción a esto, se necesitará una SMA con mayor fuerza.
- Con respecto a los Soft Robots, se puede investigar para la creación de otros robots bioinspirados y estudiar su implantación en la naturaleza.
- Posibilidad de sensorizar la estrella para la medición de diferentes variables

Respecto al control, se podría investigar entorno la implementación de un sistema, que mediante PIDs, sea capaz de regular el estado de contracción la SMA y por lo tanto de las extremidades. La dificultad de esto, se encuentra en la toma de datos de temperaturas, posiciones, velocidades…

6. Planificación

En este epígrafe valoraremos como se ha llevado a cabo la planificación tanto temporal como en su descomposición por tareas.

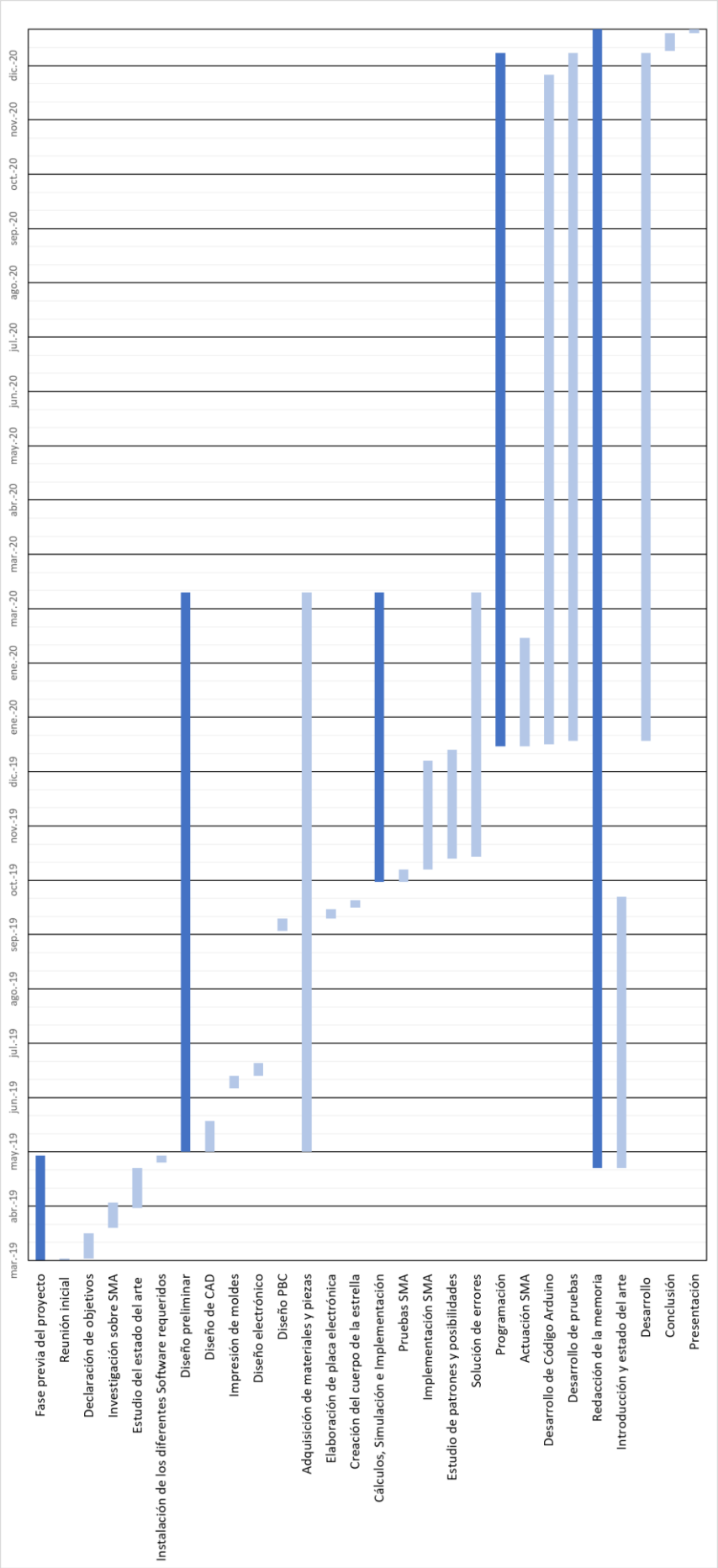
El proyecto aquí expuesto ha tenido una planificación previa al inicio de las fases de construcción de diseño. Aquí tuvo mucha relevancia la enorme cantidad de documentos necesarios para comprender el uso del nitinol como material para construcción de robots.

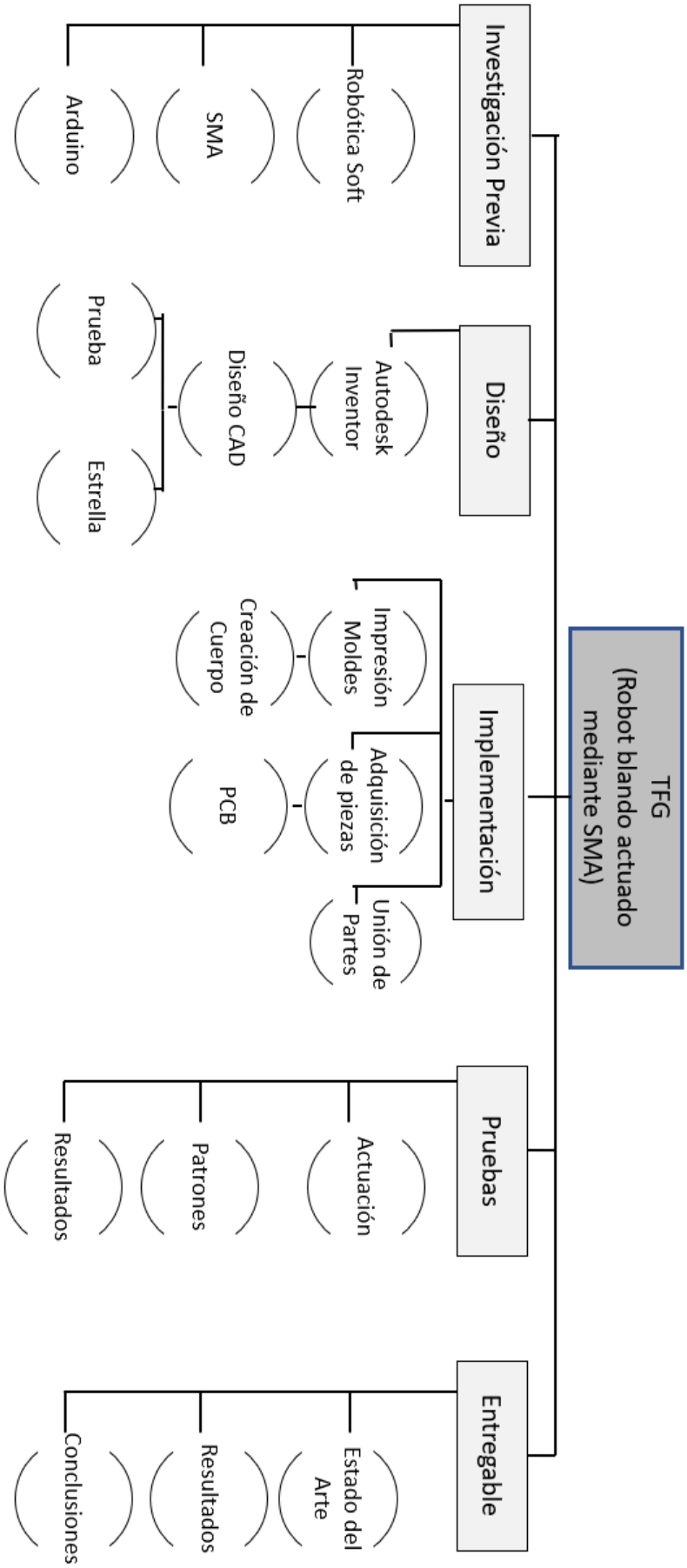
En mi caso, me encontraba en la situación de doce asignaturas para poder acabar el grado de Ingeniería en Tecnologías Industriales, por eso fue el motivo de buscar TFG en el curso de 2018-2019. Esto también supuso que buscase pronto el proyecto para poder acabarlo en el plazo de presentación de julio o septiembre de 2019, el cual era mi objetivo inicial. De este modo tendría tiempo suficiente para dedicárselo a las asignaturas y al proyecto.

Finalmente, toda la planificación de presentar proyecto ese año se vio frustrada debido a que suspendí una asignatura del primer cuatrimestre, el cual fue uno de los motivos del primer aplazamiento de plazos iniciales.

Otro factor a valorar es la dificultad para obtener el material inteligente ya que no existe fabricante nacional con el que abaratar costes y reducir tiempo de envío, teniendo que recurrir a un mercado internacional, europeo y no europeo. Pese a que hay muchas empresas dedicadas al nitinol, algunas de ellas eran americanas lo que suponía que en costes de exportación suponía un gran incremento del precio del robot. Por otro lado, las empresas europeas dieron problemas por la escasa producción de este material o la necesidad de compras en grandes cantidades.

La aparición del COVID-19 también supuso un tiempo muerto extra al no tener el material durante el confinamiento.


mar.-19
abr.-19
may.-19
jun.-19
jul.-19
ago.-19
sep.-19
oct.-19
nov.-19
dic.-19
ene.-20
ene.-20
mar.-20
mar.-20
abr.-20
may.-20
jun.-20
jul.-20
ago.-20
sep.-20
oct.-20
nov.-20
dic.-20
Fase previa del proyecto
Reunión inicial
Declaración de objetivos
Investigación sobre SMA
Estudio del estado del arte
Instalación de los diferentes Software requeridos
Diseño preliminar
Diseño de CAD
Impresión de moldes
Diseño electrónico
Diseño PBC
Adquisición de materiales y piezas
Elaboración de placa electrónica
Creación del cuerpo de la estrella
Cálculos, Simulación e Implementación
Pruebas SMA
Implementación SMA
Estudio de patrones y posibilidades
Solución de errores
Programación
Actuación SMA
Desarrollo de Código Arduino
Desarrollo de pruebas
Redacción de la memoria
Introducción y estado del arte
Desarrollo
Conclusión
Presentación


TFG
(Robot blando actuado mediante SMA)
Investigación Previa
Robótica Soft
SMA
Arduino
Diseño
Autodesk Inventor
Diseño CAD
Prueba
Estrella
Implementación
Impresión Moldes
Adquisición de piezas
Unión de Partes
Creación de Cuerpo
PCB
Pruebas
Actuación
Patrones
Resultados
Entregable
Estado del Arte
Resultados
Conclusiones

7. Presupuesto

El desarrollo económico de este proyecto se divide en dos partes fundamentales: recursos humanos y recursos materiales.

En la parte de recursos humanos, se han valorado las horas invertidas por parte del personal en el desarrollo del proyecto. También se debe de tener en cuenta los periodos de vacaciones y los no operativos. En estos últimos se debe tener en cuenta gran parte del periodo de estado de alarma estatal, periodos de exámenes y periodos de espera de envíos.

Un TFG (Trabajo de Fin de Grado) tiene un valor de 12 ECTS, lo que supone unas 27 horas de trabajo por crédito. Esto da como resultado unas 324 horas de inversión. Sin embargo, por los múltiples problemas surgidos durante el desarrollo del proyecto el número de horas asciende hasta las 370 horas repartidas durante el periodo expresado en el diagrama de Gantt.

Se ha supuesto el salario medio de un recién graduado de 12.49€/h al que además hay que incluirle la cuota de la patronal del 30%..

Recursos Humanos			
Concepto	Coste(€/h)	Horas	Total (€)
Sueldo anual	12,49*1.3=16.24	370	6007.69

Por otro lado, en cuanto a recursos materiales vamos a diferenciar aquellos amortizables y aquellos que no lo son.

Recursos materiales	Coste Unitario (€)	Cantidad	Total (€)
Silicona	28	1	28,00
Cable 2 A	1,5	2	3,00
Cable SMA D=0,5mm	6,17	2	12,34
Cable SMA D=0,3mm	6	8	48,00
Fuente de Alimentación	30	1	30,00
IRF 540 N	1,2	20	24,00
Resistencia 10K	0,1	16	1,60
Resistencia 100	0,1	16	1,60
Leds	0,15	16	2,40
Placa	3,25	1	3,25
Pinzas cocodrilo	1	10	10,00
Arduino UNO	10	3	30,00
Jumpers	8	1	8,00
Soldador	11	1	11,00
PLA Impresora 3D	20	1	20,00
			233,19

Costes Amortizables	Coste Unitario (€)	Amortizaciones	Total Anual (€)
Ordenador	1200	0,125	150,00
Autodesk Inventor/mensual	345	1	345,00
Software Microsoft Office	299	0,2	59,80
Impresora 3D	4000	0,1	400,00
Horno	250	0,1	25,00
			979,80

Finalmente, suponiendo un periodo de realización de 1 año para tener en cuenta el coste amortizado se calcula el precio total. Además, calcula el precio con el IVA en España del 21%.

Coste Humano	Coste Material	Costes Amortizables	Coste total	Con IVA
6007.69	233,19	979,80	7220.69	8737.02

El precio total es de OCHO MIL SETECIENTOS TREINTA Y SIETE euros.

8. Abreviaturas y glosario

SMA (Shape Memory Alloy): Aleaciones con memoria de forma, son aquellas que son deformables en frio y tras calentarlos son capaces de volver a su forma anterior, previamente memorizada. Este fenómeno se debe a cambios en la estructura cristalográfica.

Robot Blando: es aquel que ha sido creado mediante materiales adaptables y por lo tanto flexibles.

MOSFET: elemento electrónico de potencia que sirve para conmutar o amplificar señales. En inglés Metal Oxide Semiconductor Field Effect Transistor.

Robot Bioinspirado: es aquel robot diseñado tomando como referencia factores biológicos, normalmente animales. De este modo, pueden mimetizarse con la naturaleza.

PLA: material plástico empleado como “tinta” para la impresión 3D.

Nitinol: aleación de Níquel -Titanio conocido por ser la principal SMA.

PCB: del ingles, Printed Circuit Board. Placa conductora con un circuito impreso, altamente utilizado en aplicaciones electrónicas.

PWM: del inglés, Pulse-Width Modulation. La modulación por ancho de pulsos de una señal es una técnica para modificar el ciclo de trabajo de una señal y cambiar los valores medios de la misma.

Flux: liquido empleado para facilitar la soldadura, ya que hace que se concentre el calor en la zona deseada.

CAD: del inglés, Computer-Aided Desing (Diseño asistido por computadora). Se conoce por la herramienta empleada para el diseño por computador.

9. Bibliografía

[1] D. Rus y M. T. Tolley, «Design, fabrication and control of soft robots,» *Nature,* vol. 521, pp. 467-475, 2015.

[2] D. Trivedi, C. D. Rahn, W. M. Kier y I. D. Walker, «Soft robotics: Biological inspiration, state of the art, and future research,» *Applied Bionics and Biomechanics,* vol. 5, nº 3, pp. 99-117, Diciembre 2008.

[3] H. Ali, S. Noor, S. M. Bashi y M. Hamiruce Marhaban, «A Review of Pneumatic Actuators (Modeling and Control),» *Australian Journal of Basic and Applied Sciences,* vol. 3, nº 2, pp. 440-454, Enero 2009.

[4] I. G. L. Z. a. D. G. C. E. Guglielmino, «A pragmatic bio-inspired approach to the design of octopus-inspired arms,» de *IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems*, Tokyo, 2013.

[5] R. Deimel y O. Brock, «A Novel Type of Compliant and Underactuated Robotic Hand for Dexterous Grasping,» *The International Journal of Robotics Research,* vol. 35, pp. 161-185, Agosto 2015.

[6] H. Herr y R. Kornbluh, «New horizons for orthotic and prosthetic technology: artificial muscle for ambulation,» *Proceedings of SPIEs Smart Structures and Materials,* vol. 5385, nº 2004, pp. 1-9, 2004.

[7] G. Andrikopoulos, G. Nikolakopoulos y S. Manesis, «A Survey on Applications of Pneumatic Artificial Muscles,» de *19th Mediterranean Conference on Control and Automation*, Corfu, Grecia, 2011.

[8] M. S. Y. Z. M. L. H. Z. a. Y. G. R. Xie, «PISRob: A Pneumatic Soft Robot for Locomoting Like an Inchworm,» de *2018 IEEE International Conference on Robotics and Automation (ICRA)*, Brisbane, 2018.

[9] A. Joshi, A. Kulkarni y Y. Tadesse, «FludoJelly: Experimental Study on Jellyfish-Like Soft Robot Enabled by Soft Pneumatic Composite (SPC),» *robotics MDPI,* p. 20, 15 July 2019.

[10] R. F. Shepherda, F. Ilievski, W. Choi, S. A. Morin, A. A. Stokes, A. D. Mazzeo, X. Chen, M. Wang y G. M. Whitesides, «Multigait soft robot,» *PNAS,* p. 4, Agosto 2011.

[11] H.-T. Lin, G. Leisk y B. Trimmer, «GoQBot: a caterpillar-inspired soft-bodied rolling robot,» *BIOINSPIRATION & BIOMIMETICS,* vol. 6, nº 026007, p. 14, Abril 2011.

[12] A. Menciassi, S. Gorini, G. Pernorio y P. Dario, «A SMA Actuated Artificial Earthworm,» de *IEEE International Conference on Robotics and Automation*, New Orleans, 2004.

[13] A. Villanueva, C. Smith y S. Priya, «A biomimetic robotic jellyfish (Robojelly) actuated by shape memory alloy composite actuators,» *BIOINSPIRATION & BIOMIMETICS,* vol. 6, p. 16, Agosto 2011.

[14] J. C. C. a. A. B. C Rossi, «Bending continuous structures with SMAs: a novel robotic fish design,» *BIOINSPIRATION & BIOMIMETICS,* vol. 6, p. 15, Noviembre 2011.

[15] H. Jin, E. Dong, M. Xu, C. Liu, G. Alici y Y. Jie, «robots, Soft and smart modular structures actuated by shape memory alloy (SMA) wires as tentacles of soft,» *Smart Materials and Structures,* vol. 25, nº 085026, p. 10, Junio 2016.

[16] Y. Zhou, H. Jin, C. Liu, E. Dong, M. Xu, Yang y Yie, «A novel biomimetic jellyfish robot based on a soft and smart modular structure (SMS),» *IEEE International Conference on Robotics and Biomimetics (ROBIO),* pp. 708-713, 2016.

[17] S. Mao, E. Dong, S. Zhang, M. Xu y J. Yang, «A New Soft Bionic Starfish Robot with Multi-gaits,» de *2013 IEEE/ASME International Conference on Advanced Intelligent Mechatronics (AIM)*, Wollongong, Australia, Julio.

[18] S. Mao, E. Dong, H. Jin, M. Xu y K. H. Low, «Locomotion and gait analysis of multi-limb soft robots driven by smart actuators,» *obots driven by smart actuators,* pp. 2438-2444, 2016.

[19] S. Mao, E. Dong, H. Jin, M. Xu, S. Zhang, J. Yang y K. H. Low, «Gait Study and Pattern Generation of a Starfish-Like Soft Robot with Flexible Rays Actuated by SMAs,» *Journal of Bionic Engineering,* vol. 3, pp. 400-411, 2014.

[20] M. Munadi, M. Ariyanto, J. D. Setiawan y M. F. A. Ayubi, «Development of a Low-Cost Quadrupedal Starfish Soft Robot,» de *International Conference on Information Technology, Computer, and Electrical Engineering (ICITACEE)*, Semarang, Indonesia, 2018.

[21] M. Follador, M. Cianchetti, A. Arienti y C. Laschi, «A general method for the design and fabrication of shape memory alloy active spring actuators,» *Smart Materials and Structures,* vol. 21, p. 115029, August 2012.

[22] Doomgiver, Mayo 2012. [En línea]. Available: https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Binary_phase_diagram_of_NiTI_(nitinol).JPG.

[23] J. M. Jani, M. Leary, A. Subic y M. A. Gibson, «A review of shape memory alloy research, applications and opportunities.,» *Elsevier,* nº 56, pp. 1078-1113, 2014.

[24] A. Arnedo, «Materiales con memoria de forma, el Nitinol,» Junio 2016. [En línea]. Available: https://www.seas.es/blog/diseno_mecanico/materiales-con-memoria-de-forma-el-nitinol/.

[25] A. Gómez López y F. Díaz del Castillo R., Nitinol un biomaterial con memoria de forma, UNAM, Ed., Cuautitlán: Departamento de Ingeniaria , 2011.

[26] L. Case, Z. Kreiner, J. Redmond y B. Trease, «Shape Memory Alloy Training Tutorial,» 2004.

[27] J. H. M. H. y. M. A. Macías, «Monografias.com,» 14 11 2010. [En línea]. Available: https://www.monografias.com/trabajos82/nitinol-metal-inteligente/nitinol-metal-inteligente2.shtml.

[28] [En línea]. Available: https://www.imagesco.com/articles/nitinol/02.html.

[29] A. R. P. a. D. S. Thomas W. Duerig y ckel, «Medical Plastics and Biomaterials,» Marzo 1997.

[30] J. Ma, H. Huang y J. Huang, «Characteristics Analysis and Testing of SMA Spring Actuator,» *Hindawi Publishing Corporation,* vol. 2013, nº 823594,, Septiembre 2013.

[31] H. Rodrigue, W. Wang, B. Bhandari, M.-W. Han y S.-H. Ahn, «SMA-based smart soft composite structure capable of multiple modes,» *Elsevier,* pp. 152-158, Agosto 2015.

[32] F. A. Aldrich, A comparative study of the identification characters of Asterias forbesi and A. vulgaris (Echinodermata: Asteroidea), Department of Limnology, Academy of Natural Sciences of Philadelphia, 1956.

[33] S.-M. An, J. Ryu, M. Cho y K.-J. Cho, «Engineering design framework for a shape memory alloy coil spring actuator using a static two-state model,» *SMART MATERIALS AND STRUCTURES,* vol. 21, Abril 2012.

[34] Martinez, R. V., C. R. Fish, X. Chen y G. M. Whitesides, «Elastomeric Origami: Programmable Paper-Elastomer Composites as Pneumatic Actuators,» *Advanced Functional Materials,* vol. 22, nº 7, p. 1376–1384, 2012.

[35] R. Niiyama, A. Nagakubo y Y. Kuniyoshi, «Mowgli: A Bipedal Jumping and Landing Robot with an Artificial Musculoskeletal System,» de *IEEE International Conference on Robotics and Automation*, Roma, Italy, 2007.

[36] G. URIBE, Ortodoncia: Teoría y Clinica. Comparación para investigaciones biológicas, 2 ed., Medellín.

[37] Stoeckel, «Nitinol Medical Devices and Implants,» *We Are Nitinol,* pp. 81-88, 2000.

[38] R. V. C. R. F. X. C. a. G. M. Martinez, «Elastomeric Origami: Programmable Paper-Elastomer Composites as Pneumatic Actuators,» *Advanced Functional Materials,* vol. 22, nº 7, p. 1376–1384., 2012.

[39] F. Daerden y D. Lefeber, «Pneumatic Artificial Muscles: actuators for robotics and automation,» *European Journal of Mechanical and Environmental Engineering,* Marzo 2002.

[40] N. Saga, T. Nakamura y K. Yaegashi, «Mathematical Model of Pneumatic Artificial Muscle Reinforced by Straight Fibers,» *Journal of Intelligent Material Systems and Structures,* vol.

18, nº 10.1177/1045389X06063462, pp. 175-180, Febrero 2007.

[41] F. Daerden y D. Lefeber, «The Concept and Design of Pleated Pneumatic Artificial Muscles,» *International Journal of Fluid Power,* vol. 2, nº 10.1080/14399776.2001.10781119, Enero 2001.

[42] D. Buckley, 1998. [En línea]. Available: http://davidbuckley.net/DB/ShadBiped.htm.

[43] A. Hildebrandt, O. Sawodny, R. Neumann y A. Hartmann, «Cascaded control concept of a robot with two degrees of freedom driven by four artificial pneumatic muscle actuators,» de *American Control Conference*, Portland, EEUU, 2005.

[44] G. Andrikopoulos y S. Manesis, «A Study of the Behavior of Pneumatic Artificial Muscles in Industrial Applications Controlled by Programmable Logic Controllers,» de *2010 International Congress on Computer Applications and Computational Science*, Singapur, 2010.

[45] A. Lizoain, «Fabricación y caracterización de aleaciones de Ti-Ni con porosidad controlada,» pp. 9-47.

10. Índice de Figuras

Figura 1. Proceso de cambio de forma de una SMA de Nitinol. a) Estado de baja temperatura, siendo la SMA flexible y con una forma no memorizada. b) Proceso de calentamiento de la SMA mediante llama directa. c) Estado final de la SMA superado el umbral de temperatura y con la forma de muelle memorizada 7
Figura 2. a) Molde creado para creación de una extremidad con la que se realizan pruebas. b) Captura de pantalla del programa CAD Inventor, en la cual se aprecia el molde de la estrella. c) Molde de PLA real, tras la impresión. 8
Figura 3. Esquema de circuito electrónico de actuación. 9
Figura 4. Gráfica Intensidad (A)-Tiempo (s) en la contracción de un muelle de SMA. 9
Figura 5. Esquema de funcionamiento y conexionado, en el cual se puede apreciar la placa Arduino UNO, una fuente de alimentación y la placa PCB diseñada. 9
Figura 6. A izquierda, Parte inferior de la estrella de mar con los actuadores visibles junto a cables de retorno. A derecha, Detalle de unión del cuerpo de la estrella con el cableado y SMA. 10
Figura 7. Esquema de orden de activación de las extremidades para conseguir movimientos. 10
Figura 8. Robot real realizando el patrón de movimiento en cada una de las fases. a) Primer paso del patrón, activación de las dos extremidades traseras. b) Segundo paso del patrón, levantamiento de las dos extremidades adyacentes a las anteriores. c) Tercer paso del patrón, levantamiento de la extremidad delantera. d) Etapa de enfriamiento y bajada de las dos patas traseras. e) Etapa de relación de las dos patas intermedias. 11
Figura 9. Desplazamiento de la extremidad delantera de la estrella de mar robótica bioinspirada. 11
Figura 10. Esquema de la robotica en función de propiedades de uso. [2] 19
Figura 11. Tercera versión del proyecto presentado en IROS, Tentáculo robótico bioinspirado en un pulpo, actuado mediante PAMs. 20
Figura 12. Múltiples movimientos del neumático RBO Hand 2. [5] 21
Figura 13. PISRob realizando movimiento típico de gusanos. [8] 21
Figura 14. Robot Medusa actuado neumáticamente en el momento de desinflado e inflado. [9] 22
Figura 15. Representación esquemática del robot cuadrúpedo bioinspirado en una estrella de mar y método de doblado. [10] 23
Figura 16. Secuencia de desplazamiento de una oruga de la familia de las Crambidae. [11] 23
Figura 17. GoQBot en realización de pruebas de movimiento. [11] 24
Figura 18. (Izquierda) Módulo de lombriz con SMA en forma de muelle y dos discos de latón. (Derecha) Cuerpo del Robot lombriz conectado por cables en uno de los extremos. [12] 25
Figura 19. Esquema de un actuador BISMAC en Robojelly. [13] 26
Figura 20. Movimiento ondulatorio de iTuna con los diferentes actuadores de SMA y el porcentaje de contracción del mismo. [14] 26
Figura 21. Actuador SMS y sus componentes. [16] 27

Figura 22. (a) Patrón de movimiento de una estrella de mar formada por SMS. (b)Gráfica desplazamiento/tiempo de la estrella de mar robótica. (c)Robot en movimiento superando obstáculos. [15] 28
Figura 23. Tentáculo de una estrella de mar robótica actuada por una SMA. [17] 29
Figura 24. Metodología de desplazamiento de robots articulados mediante elementos blandos. [18] 30
Figura 25. Patrones de movimientos de un robot blando articulado por muelles de SMA simulando una estrella de mar. [18] 30
Figura 26. Estrella de mar actuada mediante SMA de la Universidad Ciencias y Tecnología de China. Las letras visibles representan el nombre dado a cada extremidad. [19] 31
Figura 27. Estrella de mar cuadrúpeda actuada mediante servomotores. [20] 31
Figura 34. Actuador rotatorio de Nitinol. [31] 40
Figura 36. Asterias Forbesi parte inferior tomada del Instagram @frotscience. 42
Figura 37. Gráfica de movimiento de una estrella de mar de cinco extremidades. 43
Figura 38. Molde de silicona empleado para la creación de la extremidad solitaria de pruebas de fuerza. 44
Figura 39. Diseño CAD del molde inicial diseñado para la estrella de mar. a) Vista del programa Inventor, apreciando el acople de la tapa superior. b) Vista del programa Inventor 44
Figura 40. a) Captura del molde definitivo. b) Molde real impreso en 3D 45
Figura 41. Muelle actuador tras su proceso de dado de forma. 47
Figura 42. Geometría de un muelle de SMA con parámetros importantes. [33] 47
Figura 43. Curvas de Fuerza-Deformación de un muelle de SMA (a) y de un muelle convencional (b) ante la misma carga. [33] 48
Figura 44. Comportamiento de un muelle frente a una carga axial. [33] 49
Figura 45. Tornillo enrollado por un cable de nitinol y fijado con dos extremos por dos tuercas de la misma métrica. 49
Figura 46. Esquema básico de uso de nitinol mediante actuación eléctrica controlada por un Arduino. 51
Figura 47. Circuito diseñado para el robot blando mediante las cinco salidas a nitinol. 52
Figura 48. Maqueta 3D de la PCB diseñada para el control del robot blando. 52
Figura 49. Pista de la PCB para posterior impresión y creación de la misma. 53
Figura 50. PCB desarrollada para el control de la estrella. 53
Figura 51. Conexiones iniciales del SMA a la estrella mediante pinzas de cocodrilo que limitan el desplazamiento. 54
Figura 52. Detalle de unión de las extremidades de la estrella mediante una grapa conductora que atrape el actuador y el cableado. 54
Figura 53. Detalle del cable de retorno situado en la parte inferior de las extremidades. 55
Figura 54. Gráfica y tabla de la relación intensidad-tiempo en un muelle de nitinol de 0.3mm. 56

Figura 55. Posibles patrones de movimiento analizados. El Modo 1 a la izquierda mostrando el orden es con el levantamiento de dos extremidades de inicio. El modo 2 a la derecha con levantamiento de una extremidad inicialmente. 57
Figura 56. Patrón de movimiento real en la estrella 58
Figura 57. Secuencia de desplazamiento mediante arrastre de dos patas. 59
Figura 58. Método de análisis 1 con pinzas de cocodrilo e impulsos constantes. 60
Figura 59. Parte inferior de la estrella con actuador doble en forma de muelle visible. 61
Figura 60. Esquema de código siguiendo el patrón teórico. 63
Figura 61. Esquema de funcionamiento del proceso de levantamiento de las patas. 64
Figura 62. Primera tabla de variables para movimientos. 64
Figura 63. Segunda tabla de variables para movimientos. 65
Figura 64. Tercera tabla de variables para movimientos. 65
Figura 65. Cuarta tabla de variables para movimientos. 65
Figura 66. Quinta tabla de variables para movimientos. 66
Figura 67. Desplazamiento en primer ensayo en extremidad delantera. 67
Figura 68. Desplazamiento en segundo ensayo en extremidad delantera. 67
Figura 69. Desplazamiento relativo desde el punto inicial de la extremidad trasera 68
Figura 70. Desplazamiento efectivo perpendicular sobre una recta que une el punto inicial y final de la extremidad trasera 69
Figura 71. Esquema de funcionamiento mediante señales a pares. 70
Figura 72. Desplazamiento de dos ciclos del modo rápido. 71