

Grado Universitario en Electrónica Industrial y Automática

Curso académico 2018-2019

*Trabajo Fin de Grado*

# “Estudio y análisis de diferentes actuadores basados en SMA”

---

César Carrasco León

Tutor:

Dorin Sabin Copaci

Leganés, 2 de Julio de 2019



*[Incluir en el caso del interés de su publicación en el archivo abierto]*

Esta obra se encuentra sujeta a la licencia Creative Commons **Reconocimiento – No Comercial – Sin Obra Derivada**



## RESUMEN

La aleación de memoria de forma o shape memory alloy (SMA) es una aleación capaz de recordar su memoria de forma después de realizar una deformación aparentemente plástica gracias a un calentamiento sobre su superficie, la más destacada es la aleación de níquel y titanio. Pueden utilizarse como alternativa a los actuadores convencionales gracias a las siguientes características: peso bajo (permite realizar grandes fuerzas con cierta limitación), pequeño tamaño, coste económico menor y actuación sin ruido. El principal problema es su comportamiento no lineal teniendo un difícil control.

El objetivo de este trabajo es la realización de un banco de pruebas para actuadores basados en SMA, la realización de experimentos y su análisis mediante comparaciones. Para obtener una eficiencia óptima se ha realizado el estudio de actuadores basados en SMA con diferentes características y configuraciones frente a diferentes señales de referencia, y en función de sus características desplazará ciertas cargas manteniendo los mismos parámetros de control.

Se ha realizado el diseño, fabricación y montaje de un banco de pruebas para actuadores basados en SMA donde se llevarán a cabo todos nuestros experimentos cumpliendo las siguientes especificaciones: conectar hasta 4 actuadores simultáneamente, longitudes hasta 1,2m, pesos hasta 10 kg., realizar múltiples configuraciones como puede ser añadir un ventilador, una fácil conexión, y donde se pueden implementar, probar y analizar diferentes algoritmos de control. Para su diseño se ha utilizado el software SolidEdge®.

Las pruebas han sido realizadas con diferentes hilos de SMA variando: dimensiones, diámetros, número de hilos, fundas y la temperatura de activación. Entre las configuraciones que modifican su comportamiento destacan la funda Bowden y la ventilación. Para llevar a cabo los experimentos y su análisis nos ayudamos del software Matlab Simulink® junto a la programación anteriormente realizada por el grupo de investigación RoboticsLab de la UC3M.

Finalmente, se analizan los resultados sacando las conclusiones pertinentes para un comportamiento óptimo en función de los diferentes actuadores y configuraciones. Se recomienda el uso de actuadores basados en SMA de alta temperatura de activación (90°C), y si hubiera que añadir alguna configuración se añadiría la funda Bowden.

**Palabras clave:** actuador; SMA; banco de pruebas; control.



## **AGRADECIMIENTOS**

Gracias a todas las personas que me han ayudado y apoyado en todo mi periodo universitario.

A mi familia por su apoyo constante. A mis padres por su paciencia, comprensión y esfuerzo. A mi hermano por el apoyo diario. A Irene por permanecer a mi lado tanto tiempo. Sé que cada lágrima derramada mía por los malos momentos también ha sido de ellos, gracias. A mi tía Maribel, a José Antonio y a mis primos. A los amigos de Leganés, los 7, pero en especial a César y Rodrigo por ser un gran apoyo. A todos los compañeros de la carrera. A todos ellos les agradezco que hayan sabido sufrir a mi lado y aguantar mis malos momentos, y pese a ello seguir animándome.

A mi tutor Dorin Sabin Copaci por permitirme realizar este proyecto, por su simpatía, ayuda y apoyo. Gracias por guiarme y ayudarme en cada parte de la realización del objetivo. Gracias también a Janeth.

Quiero hacer una mención especial a Laura, sé que saldrás adelante, has luchado mucho por todo lo conseguido y esto será un bache que modificará la forma de apreciar la vida, todo saldrá bien. Muchísimo ánimo.

Gracias por todo abuelo, sin ti nada de esto hubiese sido posible, todo esto va por ti. Eras, eres y serás mi ejemplo para seguir.

# ÍNDICE GENERAL

RESUMEN .....	III
AGRADECIMIENTOS.....	V
ÍNDICE GENERAL.....	VI
ÍNDICE DE FIGURAS .....	X
ÍNDICE DE TABLAS .....	XIII
ABREVIATURAS.....	XIV
CAPITULO 1 .....	1
INTRODUCCIÓN .....	1
1.1 Motivación. ....	1
1.2 Objetivo.....	2
1.3 Antecedentes y resultados esperados. ....	3
1.4 Estructura del documento.....	3
CAPITULO 2 .....	5
ESTADO DEL ARTE .....	5
2.1 Historia. ....	5
2.2 Banco de prueba de actuadores. ....	5
Bancos de prueba UC3M.....	6
Banco de pruebas ferromagnético.....	9
Banco de pruebas UPV.....	10
CAPITULO 3 .....	11
ALEACIONES CON MEMORIA DE FORMA.....	11
3.1 Historia. ....	11
3.2 Propiedades.....	12
3.3 Aplicaciones.....	17
3.4 Ventajas y desventajas generales sobre SMA.....	19

3.5 Actuadores basados SMA.....	20
3.5.1 Control de actuadores basados en SMA. ....	22
3.5.2 Dynalloy SMA. ....	23
3.5.3 Ventajas y desventajas de actuadores basados en SMA. ....	25
3.5.4 Aplicaciones de SMA en el campo de la robótica. ....	25
CAPÍTULO 4 .....	27
SOFTWARES Y EQUIPO EMPLEADO.....	27
4.1 SolidEdge®.....	27
4.2 Matlab®.....	27
4.2.1 Simulink®.....	27
4.3 Impresora 3D.....	28
CAPÍTULO 5 .....	30
REALIZACIÓN Y FUNCIONAMIENTO DEL BANCO DE PRUEBAS .....	30
5.1 Diseño pieza actuadores fijos.....	30
5.2 Diseño pieza actuadores carrito.....	31
5.3 Diseño pieza polea. ....	33
5.4 Diseño tornillos. ....	34
5.5 Montaje y conexión de elementos.....	35
CAPÍTULO 6 .....	38
CONFIGURACION DE ACTUADORES SMA.....	38
CAPÍTULO 7 .....	41
RESULTADOS .....	41
7.1 Actuator de alta temperatura (90°C) vs actuator de baja temperatura (60°C).....	41
7.2 Actuator de alta temperatura (90°C) vs actuator de alta temperatura (95°C) con silicona. .....	44
7.3 Actuator de alta temperatura (95°C) con silicona y 3 kg vs actuator de alta temperatura (95°C) con silicona y 1 kg.....	46

7.4 Actuador de baja temperatura (55°C) con funda Bowden y 3 kg vs actuador de baja temperatura (55°C) con funda Bowden y 2 kg.....	48
7.5 Actuador de alta temperatura (90°C) vs actuador de alta temperatura (90°C) con ventilación.....	50
7.6 Actuador de alta temperatura (90°C) con ventilación vs actuador de alta temperatura (90°C) con ventilación y funda Bowden. ....	52
7.7 Actuador de alta temperatura (90°C) con funda Bowden vs actuador de alta temperatura (90°C) con funda Bowden y ventilación. ....	54
7.8 Actuador de baja temperatura (60°C) vs actuador de baja temperatura (60°C) con ventilación y funda Bowden.....	57
7.9 Actuador de baja temperatura (60°C) con funda Bowden y ventilación vs actuador de alta temperatura (90°C) con funda Bowden y ventilación.....	59
7.10 Tres actuadores de alta temperatura (90°C) en fundas separadas vs tres actuadores de baja temperatura (60°C) en fundas separadas. ....	61
CAPÍTULO 8 .....	64
PLANIFICACIÓN .....	64
CAPÍTULO 9 .....	66
ENTORNO SOCIO-ECONÓMICO.....	66
9.1 Presupuesto. ....	66
9.1.1 Mano de obra.....	66
9.1.2 Material.....	66
9.1.3 Software.....	67
9.1.4 Gastos indirectos.....	67
9.1.5 Amortización .....	68
9.1.6 Coste total .....	68
9.2 Impacto socio-económico.....	69
CAPÍTULO 10 .....	70
MARCO REGULADOR.....	70
CAPÍTULO 11 .....	72



CONCLUSIÓN Y TRABAJOS FUTUROS .....	72
11.1 Conclusión .....	72
11.2 Trabajos futuros. ....	74
ANEXO: PLANOS .....	77
BIBLIOGRAFIA.....	78

## ÍNDICE DE FIGURAS

Fig. 2.1: Banco de pruebas UC3M parte superior [11].....	6
Fig. 2.2: Banco de pruebas UC3M parte lateral [11].....	7
Fig. 2.3: Esquema general banco de pruebas a mejorar.....	7
Fig. 2.4: Pieza 1 sujeción actuador.....	7
Fig. 2.5: Pieza 2 extremo actuador vista superior.....	8
Fig. 2.6: Pieza 2 extremo actuador vista lateral.....	8
Fig. 2.7: Pieza 3 vista lateral.....	9
Fig. 2.8: Banco de pruebas ferromagnético [12].....	9
Fig. 2.9: Banco de pruebas UPV soporte superior fijo [13].....	10
Fig. 2.10: Banco de pruebas UPV con soporte inferior fijo [13].....	10
Fig. 3.1: Memoria de simple forma y de doble forma [18].....	13
Fig. 3.2: Curva de histéresis de las propiedades del SMA en la transformación [21].....	14
Fig. 3.3: Fases del SMA y su modificación con la temperatura [22].....	15
Fig. 3.4: Comparación de actuadores basados en SMA con el resto de los actuadores [26].....	21
Fig. 3.5: Sistema óseo y muscular de ala robot murciélago [35].....	26
Fig. 3.6: Sistema de actuación muscular antagonista usando SMA como bíceps y tríceps [35].....	26
Fig. 3.7: Medusas robotizadas [36].....	26
Fig. 4.1: Impresión de piezas.....	29
Fig. 4.2: Impresión de piezas vista lateral.....	29
Fig. 5.1: Pieza actuadores fijos sin tornillos.....	30
Fig. 5.2: Pieza actuadores fijos con tornillos.....	31
Fig. 5.3: Base del carrito.....	31
Fig. 5.4: Tapa de la base del carrito.....	32
Fig. 5.5: Carrito sin tornillos.....	32
Fig. 5.6: Carrito con tornillos.....	33
Fig. 5.7: Conjunto de piezas carrito completas sin tapa.....	33
Fig. 5.8: Conjunto de piezas carrito completa con tapa.....	33
Fig. 5.9: Base polea.....	34
Fig. 5.10: Rueda de polea.....	34
Fig. 5.11: Tornillo con agujero y longitud 25mm.....	35
Fig. 5.12: Tornillo con agujero y longitud 40 mm.....	35

Fig. 5.13: Banco de pruebas completo [42].	36
Fig. 5.14: Controlador PWM.	36
Fig. 5.15: Etapa de potencia.	37
Fig. 6.1: Esquema básico control PID actuador.	39
Fig. 6.2: Diseño del actuador en funda Bowden [41].	40
Fig. 7.1: Respuesta escalón: SMA alta temperatura vs SMA baja temperatura.	42
Fig. 7.2: Respuesta escalón PWM: SMA alta temperatura vs SMA baja temperatura.	43
Fig. 7.3: Respuesta escalón PWM: SMA alta temperatura vs SMA baja temperatura (Aumento de la Fig. 7.2)	43
Fig. 7.4: Respuesta sinusoidal: SMA alta temperatura vs SMA baja temperatura.	44
Fig. 7.5: Respuesta escalón: SMA alta temperatura vs SMA alta temperatura con silicona.	45
Fig. 7.6: Respuesta escalón PWM: SMA alta temperatura vs SMA alta temperatura con silicona.	46
Fig. 7.7: Respuesta escalón: SMA alta temperatura con silicona y 3 kg vs SMA alta temperatura con silicona y 1kg.	47
Fig. 7.8: Respuesta escalón PWM: SMA alta temperatura con silicona y 3 kg vs SMA alta temperatura con silicona y 1kg.	47
Fig. 7.9: Respuesta escalón PWM: SMA alta temperatura con silicona y 3 kg vs SMA alta temperatura con silicona y 1kg. (Aumentando la Fig. 7.8)	48
Fig. 7.10: Respuesta escalón: SMA baja temperatura con funda Bowden y 3 kg vs SMA baja temperatura con funda Bowden y 2kg.	49
Fig. 7.11: Respuesta escalón PWM: SMA baja temperatura con funda Bowden y 3 kg vs SMA baja temperatura con funda Bowden y 2kg.	49
Fig. 7.12: Respuesta escalón: SMA alta temperatura vs SMA alta temperatura con ventilación.	51
Fig. 7.13: Respuesta escalón PWM: SMA alta temperatura vs SMA alta temperatura con ventilación.	51
Fig. 7.14: Respuesta sinusoidal: SMA alta temperatura vs SMA alta temperatura con ventilación.	52
Fig. 7.15: Respuesta escalón: SMA alta temperatura con ventilación vs SMA alta temperatura con ventilación y funda Bowden.	53
Fig. 7.16: Respuesta escalón PWM: SMA alta temperatura con ventilación vs SMA alta temperatura con ventilación y funda Bowden.	53

Fig. 7.17: Respuesta sinusoidal: SMA alta temperatura con ventilación vs SMA alta temperatura con ventilación y funda Bowden. ....	54
Fig. 7.18: Respuesta escalón: SMA alta temperatura con funda Bowden vs SMA alta temperatura con ventilación y funda Bowden. ....	55
Fig. 7.19: Respuesta escalón PWM: SMA alta temperatura con funda Bowden vs SMA alta temperatura con ventilación y funda Bowden. ....	56
Fig. 7.20: Respuesta escalón PWM: SMA alta temperatura con funda Bowden vs SMA alta temperatura con ventilación y funda Bowden (Aumentando la Fig. 7.19).....	56
Fig. 7.21: Respuesta sinusoidal: SMA alta temperatura con funda Bowden vs SMA alta temperatura con ventilación y funda Bowden. ....	57
Fig. 7.22: Respuesta escalón: SMA baja temperatura vs SMA baja temperatura con ventilación y funda Bowden. ....	58
Fig. 7.23: Respuesta escalón PWM: SMA baja temperatura vs SMA baja temperatura con ventilación y funda Bowden.....	59
Fig. 7.24: Respuesta escalón: SMA baja temperatura con ventilación y funda Bowden vs SMA alta temperatura con ventilación y funda Bowden. ....	60
Fig. 7.25: Respuesta escalón PWM: SMA baja temperatura con ventilación y funda Bowden vs SMA alta temperatura con ventilación y funda Bowden .....	61
Fig. 7.26: Respuesta escalón: 3 SMA alta temperatura en fundas separadas vs 3 SMA baja temperatura en fundas separadas. ....	62
Fig. 7.27: Respuesta escalón PWM: 3 SMA alta temperatura en fundas separadas vs 3 SMA baja temperatura en fundas separadas. ....	63
Fig. 7.28: Respuesta sinusoidal: 3 SMA alta temperatura en fundas separadas vs 3 SMA baja temperatura en fundas separadas. ....	63
Fig. 8.1: Planificación.....	64

## ÍNDICE DE TABLAS

TABLA 5.1: CONEXIÓN DE PINES. ....	37
TABLA 6.1: VALORES CONTROLADOR PID. ....	38
TABLA 6.2: CARACTERÍSTICAS SMA SEGÚN SU DIÁMETRO Y TEMPERATURA. ....	40
TABLA 9.1: COSTE MANO DE OBRA. ....	66
TABLA 9.2: COSTE DE MATERIALES. ....	67
TABLA 9.3: COSTE SOFTWARE. ....	67
TABLA 9.4: COSTE GASTOS INDIRECTOS. ....	68
TABLA 9.5: COSTE AMORTIZACIÓN. ....	68
TABLA 9.6: COSTE TOTAL DEL PROYECTO. ....	68
TABLA 11.1: COMPARACIÓN TIEMPO DE RESPUESTA EN FASE DE CALENTAMIENTO EN ACTUADORES BASADOS EN SMA. ....	73
TABLA 11.2: COMPARACIÓN TIEMPO DE RESPUESTA EN FASE DE ENFRIAMIENTO EN ACTUADORES BASADOS EN SMA. ....	73
TABLA 11.3: COMPARACIÓN DE CONSUMO DE ENERGÍA DE ACTUADORES BASADOS EN SMA. .....	74

## ABREVIATURAS

3D	Three Dimensional (Tres dimensiones)
ADN	Ácido Desoxirribonucleico
CAD	Computer Aided Design (Diseño asistido por computadora)
FDM	Fused Deposition Modeling (Modelado por deposición fundida)
LVDT	Linear Variable Differential Transformer (Transductor diferencial de variación lineal)
MOSFET	Metal Oxide Semiconductor Field Effect Transistor (Transistor de efecto de campo metal óxido semiconductor)
PD	Proporcional-Derivativo
PI	Proporcional-Integral
PID	Proporcional Integral Derivativo
PLA	Ácido poli láctico
PTFE	Politetrafluoroetileno
PWM	Pulse Width Modulation (Modulación por ancho de pulso)
SI	Sistema Internacional
SMA	Shape Memory Alloy (Aleación de memoria de forma)
T <sup>a</sup>	Temperatura
UC3M	Universidad Carlos III de Madrid
UPV	Universidad Politécnica de Valencia



# CAPITULO 1

## INTRODUCCIÓN

La investigación es uno de los principales ejes de nuestro presente y futuro. Durante los últimos años se ha desarrollado un crecimiento explosivo gracias a los avances en la computación, los sensores, la electrónica y los softwares [1]. Logra transformar la forma de vida y de trabajo. Hoy en día estas investigaciones logran incorporar productos mejorando los trabajos y permitir que formen parte de nuestra vida cotidiana.

En este trabajo nos centraremos en la realización de un banco de pruebas donde se van a realizar pruebas de diferentes configuraciones de actuadores basados SMA y su correspondiente análisis. Se pretende modificar la utilización del SMA en defecto de actuadores convencionales para algunos proyectos.

Un ejemplo de uso de estos tipos de actuadores es la robótica de rehabilitación, concretamente en exoesqueletos, debido a que es una de las líneas de investigación de nuestra universidad en el grupo de RoboticsLab [2] [3]. Sería un gran fracaso no avanzar en tener una mayor calidad de vida en aquellas personas que lo necesitan: “Entre las tecnologías más prometedoras se considera que las terapias robotizadas con exoesqueletos son muy beneficiosas para la rehabilitación de pacientes que requieren tratamientos repetitivos para la reeducación de los movimientos perdidos” [4].

Nos centraremos en el estudio de diferentes tipos de actuadores basados en SMA, que nos permitiría elegir la mejor opción de este tipo de actuadores en función de la aplicación como una posible alternativa de los actuadores convencionales.

### **1.1 Motivación.**

La investigación de actuadores basados en SMA indica una sustitución para algunos proyectos en los cuales los convencionales no son tan efectivos, como puede suceder por el peso o el espacio. Para realizar dicho estudio se debe realizar un banco de pruebas y posteriormente analizar los resultados obtenidos en función de unos algoritmos de control.

Existen multitud de aplicaciones de este tipo de actuadores, pero por falta de investigación y desconocimiento de su funcionamiento no es posible llevarlo a cabo. Es un tema en



desarrollo, debido a que no es tan avanzado como otros sectores en los que se aplican multitud de mecanismos de automatización y robóticos [5]. Es un avance prioritario, la ayuda y la cooperación a mejorar la vida de las personas es algo imprescindible que debe formar parte de todos los seres humanos.

Como se ha comentado anteriormente, dicho proyecto puede formar parte de una de las líneas de investigación de la robótica de rehabilitación del grupo RoboticsLab de la UC3M [2].

## **1.2 Objetivo.**

El objetivo de este trabajo es estudiar y analizar los comportamientos de actuadores, para ello debemos realizar un banco de pruebas y diferentes experimentos. Haremos diversas comparaciones de actuadores basados en SMA frente a señales de referencia modificando las características propias del actuador y configuraciones que modificarán su comportamiento, pero manteniendo los parámetros de control. Buscaremos las mejores alternativas junto a las ventajas y desventajas en cada caso.

Debemos diseñar y modelar diferentes piezas que completarán el banco de pruebas donde desarrollaremos todos los experimentos. Para su realización nos hemos ayudado del programa SolidEdge® y de una impresora 3D. Posteriormente se ha realizado su montaje. Nos permitirá una conexión de hasta 4 hilos en paralelo, una longitud hasta 1,2 m., añadir peso, distintas configuraciones como pueden ser hilos en funda Bowden o un enfriamiento forzado con un ventilador y una gran fiabilidad.

Se ha variado entre diferentes actuadores añadiendo materiales que logran modificar su comportamiento, las diferencias han sido: la temperatura de activación de los hilos, la señal de referencia, el uso y el no uso de fundas, la realización con un solo hilo o varios a la vez, las diferentes cubiertas, el peso ejercido, etc.

El estudio junto a las comparaciones de estos se ha desarrollado en el software Matlab Simulink® junto a la programación anteriormente realizada por el grupo de investigación RoboticsLab de la UC3M [2].

### **1.3 Antecedentes y resultados esperados.**

Para la realización de este estudio nos hemos basado en un banco de pruebas del grupo de investigación de la UC3M realizado por Caballero y otros (2014). Dicho banco tenía varios problemas cómo la realización de las pruebas de una longitud determinada de 27 cm., la mala conexión de los actuadores basados en SMA y una carga máxima de 1 kg.

En este caso, con la realización del nuevo banco todos los problemas han sido resueltos favorablemente permitiendo pruebas de mayores longitudes, mayor peso, mayor número de actuadores y una mejor conexión. Nos proporcionará una mejora en los experimentos con unos desplazamientos más exactos.

Para la realización de los experimentos y poder obtener una lectura precisa de los movimientos de los actuadores se ha usado un programa en Matlab Simulink® realizado por el grupo de investigación de RoboticsLab UC3M [2].

Se espera ampliar conocimiento y destreza sobre los softwares SolidEdge® y Matlab Simulink®, una investigación sobre las mejoras del banco de pruebas y actuadores basados en SMA y un análisis exhaustivo mediante comparaciones de las pruebas realizadas de diferentes actuadores SMA con distintas configuraciones. En ellas se analizará el comportamiento en la fase de calentamiento, enfriamiento y consumo de energía siguiendo una señal de referencia. Nos permitirá una selección precisa de qué actuador SMA utilizar en cada caso dependiendo de las preferencias buscadas.

### **1.4 Estructura del documento.**

A continuación, se hará una breve descripción de todos los temas que se desarrollan en cada capítulo.

En el **primer capítulo** se desarrolla una **introducción** sobre la importancia de la investigación en nuestra sociedad, la motivación que se ha llevado a cabo para realizar este proyecto, el objetivo, los antecedentes, los resultados esperados y la estructura del documento.

En el **segundo capítulo** encontramos el **estado del arte**, es decir, la información del tema estudiado hasta este momento. En este caso se ha realizado sobre el banco de pruebas para actuadores de SMA.

En el **tercer capítulo** se presenta las aleaciones de **SMA**. Se ha hecho hincapié al tratarse del actuador que se estudia en este trabajo de fin de grado. Su historia, propiedades, aplicaciones, ventajas, desventajas, y los actuadores junto a su complicado control. Se ha complementado con aspectos estudiados en la actualidad.

En el **cuarto capítulo** vemos una breve explicación sobre los **softwares** y el **equipo empleado** para la elaboración de las distintas pruebas.

En el **quinto capítulo** se realiza el diseño de cada una de las **piezas** que conforman el **banco de pruebas**.

En el **sexto capítulo** tenemos las **configuraciones y características** empleadas para la realización de los experimentos de los actuadores basados en SMA.

En el **séptimo capítulo** se desarrollan las comparaciones de las **pruebas** realizadas. Se detallan los diferentes tipos de materiales utilizados y se realiza un análisis de los datos obtenidos en las gráficas mediante los diferentes experimentos.

En el **octavo capítulo** podemos observar la **planificación** semanal y una breve explicación de cada una de las fases llevadas a cabo.

En el **noveno capítulo** se recoge el **entorno socio-económico** analizando el presupuesto que ha supuesto la elaboración de este proyecto y su impacto socio-económico.

En el **décimo capítulo** tenemos el **marco regulador** donde se analizará la legislación, las normas, los peligros y las precauciones que se han tenido en cuenta para la realización de este proyecto y posteriores usos de actuadores basados en SMA.

En el **undécimo capítulo** visualizaremos las principales **conclusiones** y los **trabajos futuros** del proyecto desarrollado.

## CAPITULO 2

### ESTADO DEL ARTE

Para el estudio de un trabajo de tal envergadura se debe conocer la información previa relacionada. En este capítulo solo se han tenido en cuenta los bancos de prueba, debido a que en el siguiente capítulo se tratarán los aspectos relacionados con el SMA.

Hoy en día, antes de implementar un actuador en un dispositivo u otro sistema debemos tener en cuenta el análisis previo de cualquier sistema mediante simulaciones, estas se realizarán probablemente en un banco de pruebas. De esta manera, se puede comprobar si, en este caso el actuador, cumple los requisitos necesarios para ser implementado dentro de un sistema.

#### **2.1 Historia.**

A lo largo de toda la historia, la ciencia y la tecnología han ido ligadas [6]. Sin sus avances seríamos incapaces de entender, explicar, controlar y transformar el mundo actual.

La mayoría de los descubrimientos se han desarrollado gracias a investigaciones y estudios de unos experimentos realizados logrando mejorar la vida de las personas. Los bancos de prueba no son más que el conjunto de objetos donde se desarrollan estos experimentos permitiéndonos realizar pruebas con las mismas condiciones cuanto queramos.

Existen infinidad de bancos de pruebas, debido a que, para cada experimento dependiendo del estudio a realizar, es posible desarrollarse en uno diferente. Algunos ejemplos sobre el estudio y el diseño de bancos de pruebas en relación con la docencia son:

- Banco de pruebas de flujo presurizado de PVC que determina las pérdidas de carga de las tuberías [7].
- Banco de pruebas de transformadores eléctricos [8].

#### **2.2 Banco de prueba de actuadores.**

Existen empresas dedicadas a realizar bancos de pruebas a medida para los requerimientos de los clientes, entre ellos están los bancos de pruebas de actuadores. No

podemos acceder a ellos por los derechos pertenecientes a dicha empresa, pero en la actualidad se realizan avances constantemente [9].

### **Bancos de prueba UC3M.**

En la UC3M de Madrid se han desarrollado diferentes bancos de pruebas para actuadores basados en SMA con carga variable, teniendo similitud al desarrollado en este proyecto. Nos permite modificar los hilos de SMA, los componentes que lo rodean y la carga aplicada sobre ellos. Podemos medir el desplazamiento con un sensor, y posteriormente ver y analizar los resultados en un ordenador [10].

- 1) El primer banco de pruebas es muy complejo y específico [10] ]. Consta de un sistema ARCP, software de control que nos permite relacionar la ingeniería de control y los sistemas informáticos en tiempo real (Fig. 2.1 y Fig. 2.2). Permite enviar, recibir, guardar y editar datos a través de este software tanto de la parte del transmisor como del receptor.

El principal problema es la mínima variación de características para realizar las pruebas como puede ser la longitud de los hilos, la implementación de un sistema de ventilación o el peso máximo de 1 kg.

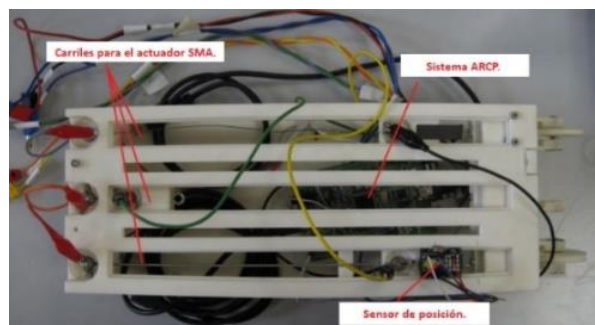


Fig. 2.1: Banco de pruebas UC3M parte superior [11].

Consta de tornillos en los lados para conectar los extremos del hilo SMA teniendo que permanecer tenso para apreciar el movimiento. En los tornillos (zona donde se encuentran los extremos del actuador) se aplica la tensión requerida, por lo que aumentará la temperatura produciendo el movimiento del actuador.

El encargado de medir los movimientos que se producen en el actuador gracias al desplazamiento de un imán en la parte móvil es un sensor de posición de efecto Hall. Estos datos son proporcionados al ordenador mediante la conexión del sistema ARCP.

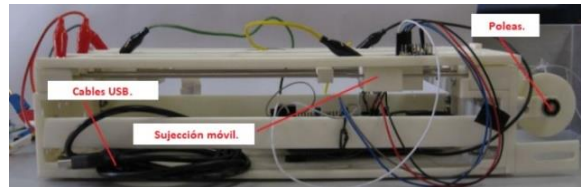


Fig. 2.2: Banco de pruebas UC3M parte lateral [11].

- 2) El siguiente banco de pruebas (Fig. 2.3) es el modelo anterior al desarrollado en este proyecto, todas sus piezas fueron realizadas gracias a una impresora 3D. Se han realizado múltiples mejoras para realizar un correcto estudio sobre los actuadores y sus configuraciones.

En primer lugar, observamos un dibujo sencillo sobre los componentes que lo forman. Todos, excepto las pesas, estarán sobre un perfil ranurado de aluminio en forma de T.

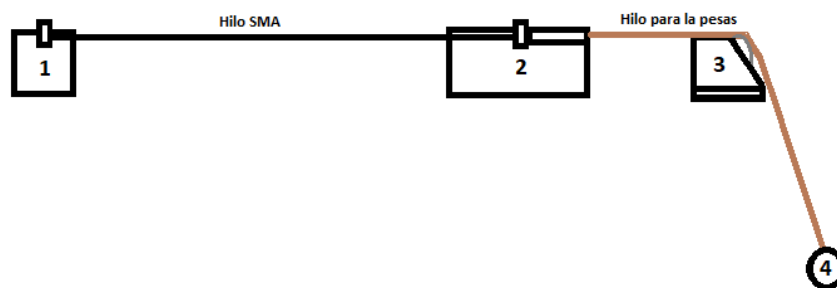


Fig. 2.3: Esquema general banco de pruebas a mejorar.

- La pieza 1 es la base que servirá como sujeción de los actuadores y en la que se emitirá cierta tensión (Fig. 2.4).



Fig. 2.4: Pieza 1 sujeción actuador.

Los tornillos nos permiten la fijación al perfil ranurado e introducir los actuadores, deben permanecer tensos y se podrá introducir la tensión gracias a las pinzas de cocodrilo (Fig. 2.4). Las pinzas de cocodrilo deben situarse al principio y al final del actuador.

El principal problema es la medición de un solo actuador, su sujeción y el contacto con la pieza, una vez que está calentado puede llegar a fundirla.

- En la pieza número 2 se introduce el otro extremo del actuador, concretamente en el carrito que nos proporcionará los datos del movimiento del actuador gracias a una lámina de imán (de color negro) situada en él y a un sensor de posición de efecto Hall NSE5310 sobre la tapa superior (Fig. 2.5). Se han insertado dos barras de metal para insertar el carrito y permitir una movilidad sencilla por la contracción y el estiramiento del actuador.

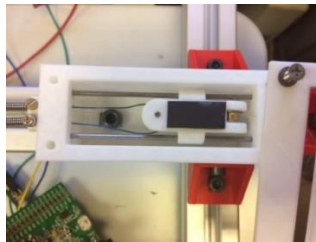


Fig. 2.5: Pieza 2 extremo actuador vista superior.

La distancia entre el imán y el sensor debe ser de 1 mm en función del datasheet del fabricante. Podemos cerrar completamente el interior con una tapa gracias a los tornillos de las esquinas (Fig. 2.6).

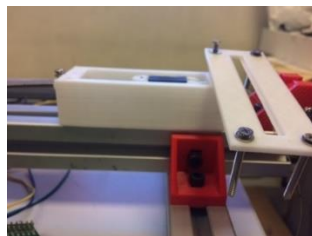


Fig. 2.6: Pieza 2 extremo actuador vista lateral.

- En la pieza 3 se ha realizado una base y una polea para que pueda levantar cierta masa si así se desea (Fig. 2.7). En la pieza 2 y en el carrito se ha diseñado un agujero para introducir un hilo. Permite realizar pruebas reales con masas.



Fig. 2.7: Pieza 3 vista lateral.

- La pieza 4 son las pesas que se pueden añadir a nuestro banco de pruebas, ayudando a analizar los actuadores con una determinada fuerza simulando un proceso real.

### **Banco de pruebas ferromagnético.**

Patentado para la caracterización de activadores basados en materiales ferromagnéticos con memoria de forma el cual es bastante más complejo que el que se pretende realizar. Dicha patente consiste en 3 módulos distintos (10, 20 y 30) con una base inferior (40) (Fig. 2.8) [12]:

Es un circuito magnético con una muestra del material con memoria de forma, un núcleo magnético y unas bobinas. Tiene múltiples sensores y se pueden aplicar cargas sobre el material. Consta de un sistema generador de ondas mecánicas para evaluar la ayuda acústica del material.

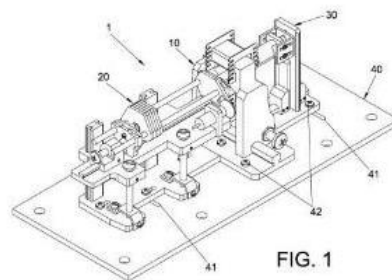


Fig. 2.8: Banco de pruebas ferromagnético [12] .

Permite la evaluación simultánea de los componentes de un actuador con memoria de forma.



### **Banco de pruebas UPV.**

En la Universidad Politécnica de Valencia (UPV) se ha desarrollado el diseño y control de actuadores basados en SMA [13]. En ambos casos el actuador se contraerá gracias a una fuente de alimentación produciéndose el efecto Joule.

- 1) La primera plataforma desarrolla el control permitiendo seleccionar la estrategia más adecuada (Fig. 2.9). El soporte superior es fijo encontrándose el actuador suspendido en el aire. El extremo inferior está unido a un núcleo con un sensor de posición lineal LVDT, en dicho extremo se proporcionará una tensión. Se ha realizado para una longitud constante 75 mm. Las señales se pueden controlar mediante el ordenador gracias a una tarjeta de datos 6025E de National Instruments de 12 bits.

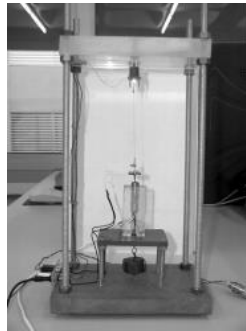


Fig. 2.9: Banco de pruebas UPV soporte superior fijo [13].

En este caso se ha realizado una prueba para un actuador de 0,15 mm de diámetro y una pesa de 60 gramos.

- 2) La segunda plataforma tiene el hilo inferior fijo en la base del dispositivo mientras que en la parte superior hay una lámina metálica sujetando el otro extremo del actuador (Fig. 2.10). La longitud del hilo debe ser constante, cuando se contrae se produce una flexión de la lámina. Se comunica con el ordenador mediante una tarjeta PCI-GPIB enviando los datos tomados por las galgas extensiométricas.

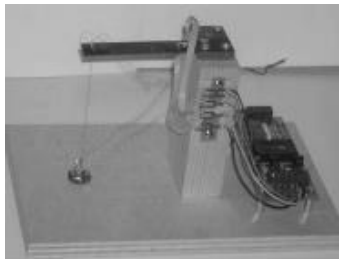


Fig. 2.10: Banco de pruebas UPV con soporte inferior fijo [13].

## CAPITULO 3

### ALEACIONES CON MEMORIA DE FORMA

Existen diversas clases de materiales inteligentes: cerámicas con memoria de forma (SMCs), polímeros con memoria de forma (SMPs), aleaciones ferromagnéticas con memoria de forma (FSMAs) y el centro de este estudio, aleaciones con memoria de forma (SMA) [14].

El nitinol es un material SMA de una aleación de titanio y níquel. Su estructura interna permite recordar su forma original y recuperarla si ha existido un cambio en la misma. Son interesantes en varias aplicaciones reales, pero destacan en la medicina y la electrónica, permitiendo realizar una respuesta a un estímulo dado. Podemos encontrarlo en el campo de la odontología en los brackets, en la robótica en músculos por su semejanza o en medicina en prótesis cardiovasculares [15].

Pretenden ser una alternativa a los actuadores convencionales en los campos de la hidráulica, la neumática y los sistemas de motor.

#### **3.1 Historia.**

Las SMA se descubrieron en 1932 gracias al físico sueco Arne Ölander con una aleación de oro y cadmio, produciendo un movimiento que permitía cierta utilidad [16]. En 1938, Greninger y Mooradian observaron en una aleación cobre-zinc la aparición y desaparición de la fase martensita con el cambio de temperatura. En 1950, L.C. Chang y T.A. Read, en la Universidad de Columbia (Nueva York), estudiaron la estructura cristalina y sus cambios mediante rayos X de una aleación oro-cadmio, no se pudo comercializar debido al elevado precio y la toxicidad de sus elementos [16].

Este último estudio supuso un cambio en las investigaciones de las aleaciones, ahora se buscaba abaratar los costes y la corrosión. En 1962, en el Naval Ordnance Laboratory (E.E.U.U), buscando una aleación no corrosiva para embarcaciones y misiles se observó el efecto de la aleación de níquel y titanio. Su descubridor fue William J. Buehler, ingeniero metalúrgico encargado de desarrollar aleaciones para el cono delantero de los misiles Polaris [17]. Estas aleaciones debían soportar grandes condiciones para poder atravesar la atmósfera terrestre [17]. Pese a desarrollar la aleación níquel-titanio no pudo

observar sus propiedades hasta que accidentalmente se le cayó una muestra, se dio cuenta que, dependiendo de la temperatura de esta, sonaba de una forma u otra. El sonido era diferente en función de la temperatura, por lo que pensó que la estructura de la aleación variaba. Los primeros meses probó la resistencia a la fatiga doblando tiras de nitinol, estirándolas y doblándolas a temperatura ambiente sin romperse [17].

En una de las reuniones que desarrollaban para analizar el desarrollo de los proyectos Buehler no pudo asistir, enviando a Raymond C. Wiley, uno de sus asistentes. En esta reunión, Wiley mostró la pieza de nitinol (SMA), todos los asistentes querían tocarlo para ver las propiedades. Al llegar a David S. Muzzey, fumador de pipa, se le ocurrió la brillante idea de aplicar calor con su mechero a la tira de nitinol. Comenzó a estirarse en una forma lineal y posteriormente, al enfriarse, recuperó la forma original, por lo que pudieron apreciar su sorprendente memoria de forma [17].

Generó un gran interés al ser una aleación segura, poco costosa y con buena relación deformación-recuperación. El SMA es conocido como nitinol combinando las letras de Nickel, Titanium y Naval Ordnance Laboratory. A partir de este descubrimiento, entre los años 1963 y 1973, se desarrollaron investigaciones de nuevas aleaciones con capacidades de memoria de forma, el estudio de su comportamiento, y sus posibles aplicaciones [17]. Se comercializaron aleaciones con láminas, alambres, cintas...comenzando a estar presente en multitud de aplicaciones comerciales.

Se realizó un estudio sobre el efecto de memoria de forma (SME) para explicar el por qué pese a ser materiales convencionales, tienen un límite de elasticidad que al superarse hace que se deforme plásticamente.

### **3.2 Propiedades.**

Los SMA tienen dos efectos con memoria de forma: efecto de memoria de una forma y efecto de memoria de dos formas. Ambos se mueven entre dos estados cristalinos sólidos llamados austenita y martensita. A temperaturas bajas toma la forma de la martensita, siendo suave, de plástico y fácil de modelar mientras que a temperaturas más altas se transforma en austenita, siendo un material duro y difícil de deformar. Es parecido a la estructura que toma el agua cuando pasa de hielo a líquido [18].

La memoria de una forma también se conoce como unidireccional, mientras que la de dos formas será bidireccional (Fig. 3.1). La unidireccional solo recuerda una forma a alta temperatura, siempre y cuando se haya completado la fase austenítica. La bidireccional es el efecto del material que recuerda dos formas diferentes, una a baja temperatura y otra a alta temperatura.

En este último caso, tenemos que realizar un entrenamiento para recordar su forma. El entrenamiento consiste en mejorar el uso normal de la aleación mediante tensiones internas en el material. Existen diferentes métodos de entrenamiento para que recuerde la forma a alta temperatura (solo para la memoria de forma bidireccional), la de baja temperatura y las formas intermedias (solo para la memoria de forma bidireccional). Se da una transformación termoelástica sin difusión. Existen diferentes métodos de entrenamiento, uno de ellos consiste en repetir varias veces los mismos movimientos a diferentes temperaturas, al hacer lo mismo de forma cíclica permite al material recordar todas sus formas. Si se calienta por encima de cierto punto, perderá el efecto de memoria bidireccional [19].

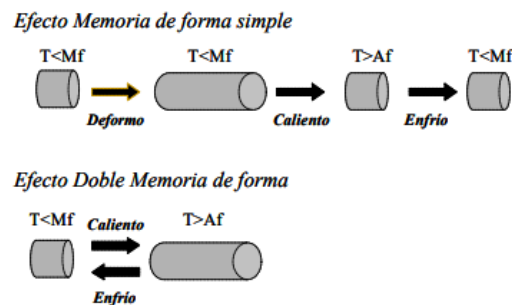


Fig. 3.1: Memoria de simple forma y de doble forma [18].

La fibra de nitinol de una sola memoria de forma permite una deformación de hasta un 8%-10% en casos muy extremos, en el caso de tener dos memorias de forma, la deformación extrema de cada una de ellas es del 5%. No es recomendable en ambos casos superar el 5% debido a que sufriría cierta fatiga [20]. Si se encuentra en frío o por debajo de la temperatura de transformación, el límite elástico estará bajo, permitiendo que se pueda deformar con facilidad y mantener su nueva forma. Calentar el material supone introducir corriente eléctrica, transformando el calor en movimiento mecánico, produciendo un cambio en su estructura cristalina recuperando la forma inicial del material. La relación temperatura-deformación dependerá del diámetro o grosor del material.

La estructura cristalina suele presentar una transformación martensítica termoplástica entre la fase de martensita y de austenita debido a la temperatura. En este caso, el material se transformará en la fase martensítica por debajo de una tensión crítica proporcional a la temperatura de transformación. La Fig. 3.2 explica las diferentes estructuras que puede tomar en función de la temperatura y la longitud del material [19].

$M_s$  es la temperatura inicial de la transformación martensítica.

$M_f$  es la temperatura a la cual se completa la transición a martensita al enfriarse.

Durante el calentamiento,  $A_s$  y  $A_f$ , son las temperaturas en las que comienza y termina la transformación de martensita a austenita.

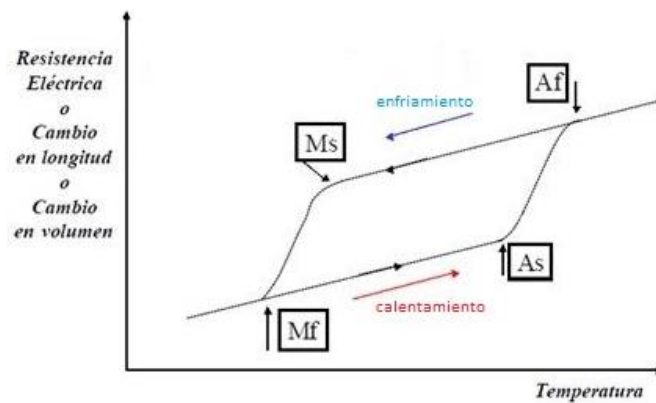


Fig. 3.2: Curva de histéresis de las propiedades del SMA en la transformación [21].

Si tenemos un hilo de SMA a alta temperatura y dejamos que se enfríe, a partir de la temperatura  $M_s$  comenzará la fase martensítica terminando cuando la temperatura sea inferior a  $M_f$ . En este momento, nuestro hilo tendrá una estructura completa martensítica en la que ha modificado su estructura, pero no su forma. Ahora podemos deformar el material aplicando una tensión que puede ser efectuada con las manos. Con el material deformado y una temperatura inferior a  $M_f$ , le sometemos un calentamiento. Comenzará la transformación en austenita una vez sobrepasada la temperatura  $A_s$ . Una vez superada la temperatura  $A_f$  terminará la fase siendo toda la estructura austenítica, recuperando la forma original del material, es decir, la anterior a su deformación a baja temperatura (Fig. 3.3) [19].

Si queremos repetir el proceso solo habrá que dejar enfriar el material y hacer lo anteriormente comentado. No es posible que recupere una forma impuesta por nosotros

en la fase martensítica. La transformación de martensita a austenita depende de la temperatura aplicada, no del tiempo [19].

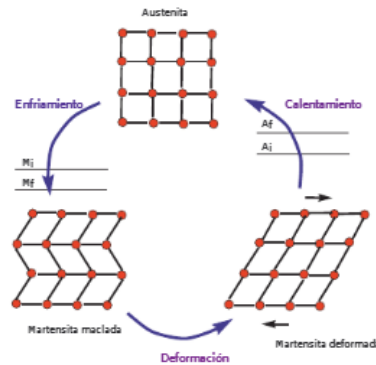


Fig. 3.3: Fases del SMA y su modificación con la temperatura [22].

En la fase de martensita a baja temperatura no hay cambio exterior de forma o volumen, pero sí varía su estructura atómica (maclado). Una vez que ejercemos una tensión se produce una deformación dando lugar al desplazamiento de las fronteras de los átomos, las regiones crecerán a costa de sus vecinos (desmaclado), se puede observar porque varía su forma exterior. Al calentar el material recupera la forma externa e interna, está en fase austenítica. Una vez que disminuye la temperatura volvemos a la fase de martensita.

La velocidad de respuesta para volver a su forma natural mediante la temperatura es variable, depende del grosor del material a deformar y la temperatura ambiente. En comparación con otros materiales, se contrae rápido.

Tiene naturaleza no magnética, biocompatibilidad, alta resistencia a la corrosión, gran ductilidad y maleabilidad. Es un material capaz de levantar miles de veces su propio peso moviéndose suave y lentamente, parecido a un músculo real [21].

Tienen súperelasticidad, es decir, se recupera frente a grandes deformaciones. Tiene gran flexibilidad debido a la transformación de la fase interna a alta temperatura transformando mediante tensión la martensita en austenita. Cada átomo retiene a su átomo vecino durante la transformación. No necesita cambios constantes de temperatura para desarrollar este proceso. La temperatura de trabajo debe ser superior a la temperatura de transformación martensítica del material, cualquier temperatura que entre en ese rango tendrá súperelasticidad [19].

Puede cambiar de forma con una simple aplicación de fuerza o tensión deformante, volverá a su figura original cuando la fuerza aplicada es nula y se aplica cierta temperatura. Requiere fuerzas grandes para tener una determinada deformación, pero permite deformaciones de gran magnitud y reversibles. Si la tensión aplicada sobre el material excede cierto límite, el material dejará de tener súperelasticidad dejándose de comportar como un material con memoria de forma como se puede comprobar en la Fig. 3.2.

El límite de elasticidad es inferior a las aleaciones de acero convencional, pero algunas composiciones de SMA tienen una resistencia mayor a la del plástico y aluminio. Puede llegar a tener un límite elástico de 500 MPa, mientras que el aluminio en lámina tiene un límite elástico de 140 MPa, cobre 160 MPa, hierro 180 MPa y latón 380 MPa [16].

Si el material tiene memoria de una forma se debe aplicar una contrafuerza o temperatura para recuperar forma original, si es memoria de dos formas este problema estará solucionado en parte. Tiene fatiga estructural, es decir, al realizar procesos cíclicos mecánicos y térmicos sobre una misma estructura puede desarrollar una acumulación de grietas perdiendo su memoria de forma y/o características superelásticas. Su vida útil depende de la contrafuerza que desarrolla en cada ciclo, puede trabajar en rangos extremos de hasta un 8%-10% de su longitud teniendo una durabilidad mínima, pero es recomendable no superar el 5% para no sufrir una fatiga estructural. Si es menor al 5% puede soportar millones de ciclos [20].

Se puede fabricar SMA casi a cualquier tamaño y forma, se suele fabricar por fundición, usando fusión por arco de vacío o fusión por inducción [23]. Estas técnicas especializadas se utilizan para mantener las impurezas mínimas y asegurar que los metales están bien mezclados. Se desarrolla en lingotes laminados en caliente en secciones más largas, convirtiéndolas posteriormente en hilo [23].

La forma recordada se produce al estar entre temperaturas de 400°C y 500°C durante 30 minutos, se desarrolla mientras está caliente y enfriándolo rápidamente con agua o aire.

La encontraremos de diferentes formas según su elaboración [18]:

- Trabajo en frío: no ha sufrido el tratamiento térmico final. No tiene las propiedades propias de los SMA, se las debe suministrar el usuario.

- Recocido: ha sido tratado para obtener todas sus propiedades. Se puede bobinar sin tener una forma predeterminada.
- Shape set annealed (conjunto recocido de formas): se ha especificado la forma que debe tener. Para ello se ha sometido durante un tiempo el tratamiento anterior para que recuerde la forma.

Su mecanizado se puede producir en torno, fresado y rectificado, pero se desgastará la herramienta siendo lo más recomendado el mecanizado con carburo. Otras opciones son el mecanizado por láser o cortarlo mediante chorro de agua. Es una aleación difícil de soldar debido a la fragilidad intermetálica en la zona a soldar, la soldadura por láser o plasma son las mejores opciones. Se suelda en vacío o en atmósfera inerte debido a la reactividad del titanio, por lo que es un material abrasivo. Requiere un tratamiento térmico posterior para tener todas sus propiedades, pero la zona soldada no presentará propiedades superelásticas. Otra opción es usar una unión mecánica como grapas o pinzas [18].

Normalmente el fabricante añade a la forma final un óxido en la superficie, teniendo la posibilidad de poder añadir otros recubrimientos. En alambres, el acabado suele ser óxido marrón o negro.

### **3.3 Aplicaciones.**

Se desarrolla en aplicaciones que necesitan propiedades súper elásticas o un efecto de forma imprescindible. Podemos obtener grandes deformaciones o fuerzas, pero no es posible las dos a la vez.

Dependiendo de la forma en la que se quiere aplicar su utilización variará. Podemos tener una acción simple en la que se estira en frío y al calentarse toma la dirección contraria a la deformación. Puede ayudarse de un muelle, con baja temperatura el muelle estira el SMA, pero al calentarse recupera la forma original dilatando el muelle y almacenando energía para cuando no se aplique calor. La acción doble consiste en tener dos SMA opuestos enfriándose y calentándose [19].

El principal problema actual es el costo del SMA y su desarrollo, pese a ser un material relativamente barato. Se plantea abaratar el coste en los próximos años para producir en masa diseños y aplicaciones [16]. No se ha logrado obtener todo lo esperado de ellos por



el solapamiento del desarrollo de las aleaciones y su introducción en el mercado, siendo costos mayores del esperado para poder cubrir los gastos. El hecho de pretender sustituir algunos dispositivos por otros materiales no ha resultado posible por su precio. El marketing y los productores no han operado correctamente para su venta, es un producto nuevo, desconocido en muchos sectores y sin la confianza de los clientes. En el futuro se deben trabajar múltiples aspectos para poder ser utilizado en más productos [18].

Tenemos múltiples aplicaciones que utilizan materiales desarrollados con SMA, destacando [16]:

- Aeronaves: concretamente en el diseño de la boquilla del ventilador de área variable de aviones y naves espaciales. Permite que los motores a reacción sean más silenciosos y eficientes. En 2.005 y 2.006 Boeing realizó pruebas exitosas.
- Vehículos de lanzamiento: gracias a la histéresis puede disipar energía y amortiguar las vibraciones.
- Sector automovilístico: en actuadores de coches reemplazando actuadores motorizados pesados para abrir y cerrar la ventilación de la escotilla liberando el aire desde el maletero. En el control de los cierres de protección de las luces de niebla. Aunque el mayor éxito actual ha sido una válvula para el control de presión en la transmisión automática de Mercedes Benz, tiene un control del fluido de la transmisión en el calentamiento del motor.
- Robótica: permite crear robots ligeros debido a su similitud con los músculos humanos. Se ha realizado una mano protésica simulando los movimientos humanos, pero tiene cierta ineficiencia energética siendo los tiempos de respuesta lentos. Para el movimiento de los dedos se utiliza el efecto de memoria de forma (SME).
- Estructuras de obra civil: puentes o edificios que dentro del hormigón incorporan cables de SMA, es conocido como hormigón armado reforzado inteligente. Permite amortiguar vibraciones, adaptarse a las condiciones del entorno, detectar grietas en su interior y contraerse tomando la forma inicial cerrando así la fisura producida.
- Abrazaderas de todo tipo de piezas: se pliega la pieza ocupando poco tamaño, una vez introducido en algún orificio pequeño se procede a calentar, recuperando la

forma original. Destaca su uso en los acoplamientos de tuberías. Se realiza introduciendo en frío la junta de SMA entre dos tubos, una vez conectado se calienta tomando su tamaño natural y quedando totalmente sellado. Es una gran ventaja para las uniones en las que es difícil/ peligroso soldar o utilizar bridas.

- Telecomunicaciones: para la estabilización de la imagen óptica en teléfonos inteligentes. Se utiliza en las antenas de los teléfonos móviles, aunque está en desuso debido a las nuevas tecnologías.
- Medicina: dispositivos de fijación con motivo de la realización de una osteotomía (corte en huesos) que se ha desarrollado en cirugía ortopédica. En endoscopia para la realización de la biopsia. En stents para descongestionar arterias obstruidas. En prótesis cardiovasculares son micro bombas que reemplazan las funciones del corazón o de los riñones [15]. También es utilizado como cables de guía, siendo un hilo metálico largo y delgado, introduciéndolo a través de orificios del cuerpo junto a dispositivos terapéuticos o de diagnóstico.
- Odontología: en aparatos dentales para ejercer una fuerza de movimiento constante sobre los dientes con motivo de tener una correcta colocación. Son conocidos como brackets y resisten una gran cantidad de reajustes [15].
- Montura de gafas: se utiliza por la super elasticidad permitiendo absorber grandes deformaciones sin romperse [24].

Otros ejemplos son sujetadores ajustables con aros, cabeza de palos de golf, conectores eléctricos, paneles solares, etc. [24].

### **3.4 Ventajas y desventajas generales sobre SMA.**

Ventajas.

- Superelasticidad.
- Simplicidad.
- Bajo ruido.
- Fabricación a diferentes formas y tamaños.
- Amortiguamiento.

- Relación fuerza-peso [21].
- Multitud aplicaciones.
- Resistencia a la corrosión [21].

#### Desventajas

- Alto costo de fabricación e investigación [18].
- Abrasivo.
- Baja eficiencia energética [21].
- Fatiga estructural.
- Baja velocidad [21].
- Control inexacto.

### **3.5 Actuadores basados SMA.**

Los actuadores basados en SMA pueden tener diferentes formas según su aplicación. Pueden ser rectos sometidos a tensión ejerciendo fuerzas grandes con pequeños movimientos lineales. Los elementos helicoidales de actuadores SMA tienen movimientos lineales grandes y fuerzas pequeñas o rotaciones grandes y pequeños pares. Las barras de torsión de actuadores SMA tienen rotaciones grandes y pares pequeños [19].

El actuador al calentarse se contrae y al enfriarse se dilata, lo contrario de lo que sucede con un metal estándar. Se produce un movimiento térmico (movimiento aleatorio de las moléculas en función de la temperatura) 100 veces mayor que los metales normales. Nos permite volver a su forma original una vez alcanzada la temperatura de transición.

Se accionan mediante corriente eléctrica gracias al calentamiento producido por el efecto Joule. Parte de la energía cinética de los electrones se transforma en calor por los choques producidos en el material por el que circula, esto se transforma en trabajo mecánico. Se desactivan por la transferencia de calor al ambiente, de momento no existe otra forma de enfriamiento en el grupo de investigación. La actuación del SMA tiene un tiempo de actuación rápido y un tiempo de desactivación muy lento. Se ha intentado mejorar el

tiempo de desactivación con la ayuda de un material conductor para manipular la velocidad de la transferencia de calor al ambiente, consigue reducir el tiempo de activación, pero debe administrarse mayor corriente. La baja velocidad de enfriamiento produce una reducción en el ancho de banda. Bergamasco diseñó un motor para reducir la velocidad gracias a dos muelles de nitinol con una configuración push-pull y se han utilizado alambres de sección rectangular con aceite para mejorar la transferencia de calor al tener mayor superficie, pero para la mayoría de las utilidades estos procedimientos no son aplicables [25].

Como se ha comentado anteriormente, está en desarrollo y tiene un gran futuro, pero se deben realizar más investigaciones y abaratar los precios. Las ventajas de los actuadores basados en SMA es el tamaño, la facilidad de deformarse y la fuerza de actuación en relación con su peso.

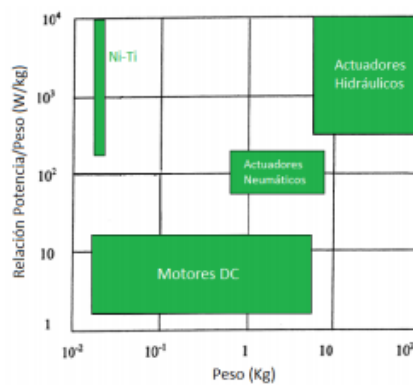


Fig. 3.4: Comparación de actuadores basados en SMA con el resto de los actuadores [26].

Los actuadores convencionales como los motores eléctricos, cilindros hidráulicos y neumáticos tienen limitación debido a su peso y complejidad [27]. Los motores eléctricos trabajan a grandes velocidades y producen un par pequeño siendo costoso generar una potencia necesaria [27]. Los cilindros hidráulicos y neumáticos son mejores que los motores eléctricos, pero necesitan distintos materiales como tubos, bombas o válvulas para mantener el fluido de trabajo, por lo que son complejos [27]. Los actuadores basados en SMA tienen la gran ventaja de tener buena relación de potencia para su peso, reduciendo el tamaño de los generadores considerablemente manteniendo la salida (Fig. 3.4).

### **3.5.1 Control de actuadores basados en SMA.**

Hoy día el control en los actuadores es muy inexacto [28], por eso para muchas aplicaciones con necesidad de control preciso es difícil su uso. El mecanismo utilizado para el control es térmico, depende de la temperatura externa y de las pérdidas térmicas del material [19].

Es difícil de controlar la energía suministrada en los cambios de fase del material, pues su impedancia varía. Como se explicó anteriormente, se pueden desarrollar 4 cambios de fase produciendo histéresis (Fig. 3.2). El control debe realizarse en las trayectorias tridimensionales de temperatura, tensión y deformación [19].

Se han realizado diversos estudios sobre los controles clásicos de PI (Proporcional-Integral), PD (Proporcional-Derivativo) y PID (Proporcional Integral Derivativo).

En 1997, Troisfontaine, estudió el control PI con realimentación de temperatura. Grant D. y Hayward V., en ese mismo año, realizaron el control con dos actuadores antagonistas gracias a fibras con un patrón helicoidal, superando la deformación y la velocidad de actuación conocida hasta este momento [25]. El control con señal de realimentación tenía un error de posicionamiento debido al nivel de corriente.

En 1998, Ikuta usó un sistema de control PID con una señal de salida modulada por ancho de pulso (PWM) [25]. La señal de realimentación era la resistencia eléctrica de la fibra de SMA variando según su estado de transformación. Kuribayashi diseñó un actuador con dos alambres de nitinol, desarrolló un modelo matemático para el sistema de control y el mecanismo de actuación. H. Meier y L. Oelschlaeger mejoraron los modelos termodinámicos del material [25]. Lograron simular el comportamiento del nitinol de forma precisa y realizar simulaciones en tiempo real. Aseguraron la estabilidad del ciclo de histéresis a lo largo de varios experimentos [25].

Pese a ello, todos los experimentos realizados no lograron el control esperado, por lo que hoy día sigue siendo un problema no resuelto.

En la UPV, se ha desarrollado un estudio sobre el control en lazo cerrado. Se controla tanto su contracción como su relajación con una precisión entorno a la micra. Las dos plataformas para realizar los experimentos son las Fig. 2.9 y Fig. 2.10 [13]. Las señales recogidas han sido tratadas en un ordenador para poder las conclusiones pertinentes. El

mejor controlador para un hilo de nitinol de 75 mm de longitud y 0,15 mm de diámetro ha sido un controlador PI con antiwindrup (es decir, una vez que la entrada está saturada no seguirá integrando) [13].

Con este método el control de la estructura es cercano a 4  $\mu\text{m}$ . Si se inserta en el lazo cerrado de control una red neuronal entrenada off line con características de una histéresis inversa, el error de posición está entre las 2-3  $\mu\text{m}$  [13]. Estas conclusiones son para una longitud y unas características específicas no conocidas del hilo de nitinol.

En nuestro caso hemos desarrollado el estudio con las mismas características ambientales, térmicas y de control para diferentes tipos de actuadores basados en SMA. Cada uno tendrá unas propiedades y características dependiendo del material, a ello se les añadirán diferentes configuraciones para actuar de una forma u otra.

Los músculos SMA se modelan como resistencias simples por lo que es fácil su desarrollo [27]. El problema es su control no lineal, por lo que si sobrepasa la temperatura  $A_s$  es todo o nada, no hay término medio. La respuesta es muy sensible a los cambios de temperatura, impredecible a voltajes bajos y no se pueden utilizar controles convencionales [29]. En los últimos años se están realizando investigaciones para los músculos artificiales de manos robóticas, las cuales deben tener un control preciso.

Al depender de los cambios de temperatura y no solo de la energía eléctrica tenemos la posibilidad de reutilizar el calor disipado. Se han obtenido niveles aceptables de control gracias a variables dependientes del material y de las condiciones ambientales [30].

### **3.5.2 Dynalloy SMA.**

Dynalloy Inc. es un fabricante de SMA diseñado especialmente para utilizarse como actuadores. Cuenta con más de 25 años de experiencia. Su nombre comercial es Flexinol™ diferenciándolo de materiales SMA con distintas propiedades [31]. Proporciona un movimiento parecido a un solenoide o a un motor durante muchos ciclos. Puede usarse con alta repetibilidad, por lo que debe ser bastante fiable.

Estos alambres de diámetro pequeño pueden contraerse desde un 2% hasta un 5% de la longitud del cable de trabajo [32]. Lo hará de forma similar a los músculos cuando están “activos”, y se relajará cuando están “desactivados” [27]. Su activación sucede cuando se produce un cambio de temperatura del propio hilo, en este caso se ha accionado

calentándolo gracias a una fuente de alimentación dando lugar al efecto Joule, hace que pase corriente eléctrica a través del actuador que se transformará en térmica y posteriormente en trabajo mecánico. Su desactivación se produce a temperatura ambiente, es decir, siempre que no se encuentre activado. El tiempo de enfriamiento requiere ciertos segundos, no es muy rápido, pero lo más difícil es su control. El enfriamiento depende del diámetro y la temperatura en la que se encuentre.

Recomiendan a nuevos usuarios familiarizarse con el producto con motivo de su compleja estructura y pedir ayuda a usuarios con experiencia para realizar un correcto uso. Con este método, es posible ayudar a reinventar técnicas existentes invirtiendo ese tiempo en su mejora, otro aspecto importante es tener garantías legales para la protección de ideas propias. La reducción del tiempo de investigación y desarrollo permite poder lanzar un nuevo proyecto.

Tiene una gran cantidad de aplicaciones. Puede producir un movimiento físico a velocidad moderada en un espacio pequeño, es capaz de absorber energía y volver a su estado natural. En la página web podemos ver todas las aplicaciones desarrolladas hasta el momento: electrónica, accesorios, medicina, automoción... [15]. Tienen hilos de nitinol de varios diámetros desde 0,025mm hasta 0,51mm [32]. Cada hilo es posible encontrarlo a diferentes temperaturas de activación, destacan la alta temperatura (90°C o 170°C) y a baja temperatura (55°C, 65°C o 70°C) [31]. Las características de cada material están especificadas: el diámetro, la resistencia, la fuerza soportada, la fuerza de deformación en frío, la corriente soportada, el tiempo de enfriamiento a alta y a baja temperatura [32].

Si la tensión y consecuentemente la temperatura es demasiado alta producirá una tensión permanente. Al estar relacionada la temperatura con la densidad de corriente que circula a través del cable se debe tener cuidado de calentar y manipular el cable del actuador.

Los diámetros de 0,025 mm hasta 0,51 mm pueden soportar fuerzas de masas desde 0,0089 kg hasta 3,56 kg, pero dependerá de la temperatura de activación [32].

Dynalloy proporciona para la venta diferentes equipos y accesorios para realizar experimentos. Destaca un test de longitud con características muy limitadas y un temporizador [33].

### **3.5.3 Ventajas y desventajas de actuadores basados en SMA.**

#### Ventajas

- Alternativa a motores eléctricos [27].
- Ahorro de masa y volumen [27].
- Grandes fuerzas a pequeñas deformaciones [19].
- Dispositivos baratos en comparación a otro tipo de actuadores [27].
- Actuación silenciosa sin vibraciones [27].
- Pueden actuar como sensores gracias a su resistencia eléctrica y el cambio de fase.
- Mayor fiabilidad al no autolimitarse con sus despliegues máximo y mínimo.
- Disminuye la complejidad de sistemas robóticos.

#### Desventajas:

- Gran pérdida de energía por disipación térmica.
- Deformaciones pequeñas comparado con otros actuadores.
- Operan en un ancho de banda pequeño, es decir, son dispositivos lentos [27].
- No son controlados al ser un fenómeno no lineal.
- Baja elongación neta, sobre un 2%-5% de estiramiento sin causar ningún daño en el mismo [32].

### **3.5.4 Aplicaciones de SMA en el campo de la robótica.**

Tienen un gran uso debido a los actuadores musculares artificiales o músculos inteligentes gracias al movimiento producido por su comportamiento [34]. Se han desarrollado músculos de robots inspirados en la naturaleza para reproducir trayectorias de animales. Es una tecnología innovadora para solucionar problemas que los humanos no hemos sido capaces de resolver, pero sí la naturaleza.

En 2009, Yang y Seelecke, describe el proceso de fabricación de un robot murciélago que utiliza SMA como actuadores y articulaciones flexibles. Dotan al robot una alta



flexibilidad en las alas, pero no logra realizar el movimiento real debido a sus 24 articulaciones independientes y la membrana que une a todas ellas (Fig. 3.5 y Fig. 3.6).

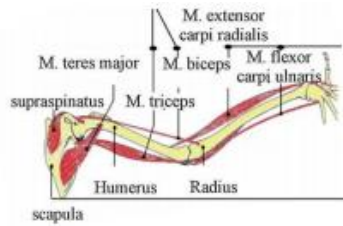


Fig. 3.5: Sistema óseo y muscular de ala robot murciélago [35].

A diferencia de pájaros e insectos los murciélagos tienen la opción de capturar el aire y general un apoyo [35].

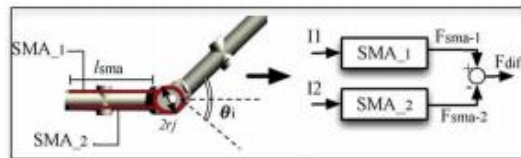


Fig. 3.6: Sistema de actuación muscular antagonista usando SMA como bíceps y tríceps [35].

Se logró implementar una estrategia de control de fuerza no lineal, una respuesta rápida del controlador de fuerza y estimar la fuerza ejercida en función de la resistencia y la intensidad aplicada. [35]

Otro ejemplo es la creación de medusas robóticas impulsadas por un músculo de SMA (Fig. 3.7) desarrollado por US Navy con la colaboración de la Universidad de Texas [36]. La idea es crear una red de medusas nadando por el océano para proporcionar datos interesantes para diferentes investigaciones.



Fig. 3.7: Medusas robotizadas [36].

Recogen energía para sobrevivir y navegar durante años gracias a partículas de platino que actúan como catalizadores, siendo una mezcla de combustible de hidrógeno y oxígeno [36]. Gracias a la multitud de sensores incorporados se puede monitorear su estado de energía, su posición por control remoto y los datos de las señales necesarias. Logra simular el movimiento de las medusas reales.

## CAPÍTULO 4

### SOFTWARES Y EQUIPO EMPLEADO

Se comentarán brevemente los softwares empleados para llevar a cabo el proyecto y el equipo usado para la realización del banco de pruebas.

#### 4.1 SolidEdge®.

Es un programa de diseño para ordenador que permite un buen desarrollo y una gran flexibilidad de modelado [37]. Para realizar el banco de pruebas he necesitado un programa CAD que me permita realizar el diseño deseado y posteriormente imprimirlo en formato 3D [38].

Concretamente he utilizado el programa SolidEdge® al estar anteriormente familiarizado con él. Permite modelar sólidos, crear ensamblajes, acotar dibujos y acceder con facilidad a diversos planos de las figuras realizadas.

#### 4.2 Matlab®.

Matlab® es un programa software libre para un sistema de cómputo integrado con un lenguaje alto de programación. Permite realizar funciones, manipulación de matrices, representación de datos e implementación de algoritmos. Es muy usado por universidades, centros de investigación y desarrollo [39].

Permite procesar señales, imágenes, sistemas de control, pruebas y medidas teniendo en cuenta la facilidad y la rapidez de tener una solución antes que programas similares.

##### 4.2.1 Simulink®.

Matlab dispone de una herramienta adicional llamada Simulink® en la que se pueden realizar bloques con multitud de controles. Es una simulación de sistemas o modelos con abstracción de los fenómenos físicos a estudiar. Destacan algunos temas como el procesamiento de señales para telecomunicaciones, control, robótica o biomedicina.

Permite guardar datos externos, realizar un entorno gráfico interactivo, analizarlo y simular cualquier sistema, bien sea en tiempo continuo o discreto. Es posible desarrollar algoritmos y personalizar los gráficos.

Podemos construir un modelo a partir de elementos básicos como integradores, servomotores, entradas de señales, control de los parámetros PID y el análisis de los resultados obtenidos mediante la simulación.

### **4.3 Impresora 3D.**

El fenómeno producido en la actualidad con las impresoras 3D no significa que su desarrollo se haya producido recientemente. Fue un invento de 1983 desarrollado por el ingeniero Chuck Hall. En la década de los 80 muchas empresas se sumaron a la carrera de la fabricación aditiva mediante impresoras 3D. Suponía una mejora de los productos, realizaba piezas en menor tiempo que las máquinas de la época ahorrando tiempo y costes. En los 90 continuó su desarrollo, surgieron aplicaciones CAD para trabajar en el diseño por ordenador y convertirlo en materia física.

La comercialización de las impresoras 3D no llegó hasta 2006, pero fue en 2007 cuando el precio de una impresora 3D pudo encontrarse por debajo de los 10.000 dólares. En 2009 caducó la patente de la tecnología FDM lo que propició que múltiples empresas entraran al mercado y disminuyeran los precios. A partir de ese momento se desarrollaron proyectos por todo el mundo como prótesis, órganos, casas, coches, aviones...

En nuestro caso, se ha utilizado para la realización de un banco de pruebas con piezas anteriormente diseñadas mediante el programa SolidEdge®. Para ello se han guardado en formato stl, formato común para imprimir cualquier tipo de archivo 3D.

Para imprimir se ha hecho uso del programa Repertier host al estar instalado anteriormente en un ordenador de la universidad. Es un programa fácil de usar en el que se pueden realizar escalas, rotar, duplicar las piezas a diseñar, modificar la temperatura del extrusor y de la cama, cambiar la velocidad de impresión e incluso ver la coordenada en la que se encuentra imprimiendo.

La Fig. 4.1 es un ejemplo de la impresión de una de nuestras piezas en 3D con filamento PLA.

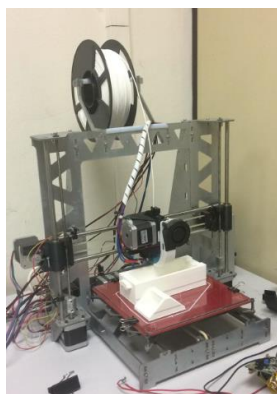


Fig. 4.1: Impresión de piezas.

Se puede apreciar en la Fig. 4.2 un pequeño movimiento hacia la derecha de las piezas por un problema que suele ser común en dicha impresora. Una vez que está imprimiendo realiza este movimiento sin motivo, en este caso el problema no ha sido mayor y se decidió no volver a imprimir las figuras. Al haber diseñado agujeros en sentido vertical este movimiento hizo que no se pudiera introducir la totalidad de los tornillos, para ello se ha hecho uso de un taladro con broca para quitar el filamento no deseado.

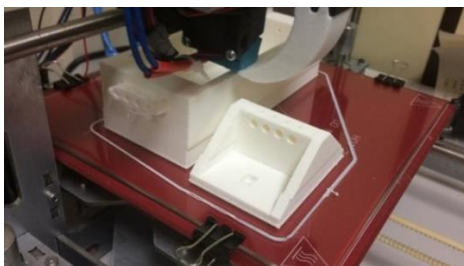


Fig. 4.2: Impresión de piezas vista lateral.

## CAPÍTULO 5

### REALIZACIÓN Y FUNCIONAMIENTO DEL BANCO DE PRUEBAS

Como se ha comentado anteriormente, el diseño de todas las piezas se ha realizado gracias al programa SolidEdge®. Para ello nos hemos basado en el banco de pruebas anteriormente comentado el cual no tiene ninguna patente. Se han modificado tamaños y se han añadido múltiples mejoras subsanando los errores encontrados. Todas las piezas están sujetas a una base de perfil de aluminio en forma de T. El actuador debe mantener la misma altura en todos sus puntos, no puede encontrarse girado o roscado en ningún punto teniendo especial cuidado en los extremos.

Cumplirá las siguientes especificaciones: conectar hasta 4 actuadores simultáneamente, longitudes hasta 1,2m, peso deseado hasta 10 kg, añadir configuraciones como puede ser un ventilador, fácil conexión, implementación de algoritmos no lineales y gran fiabilidad.

#### 5.1 Diseño pieza actuadores fijos.

Es una pieza encargada de sujetar los actuadores (Fig. 5.1). Se sitúa en uno de los extremos, encargado de sujetar, tensar y poder alimentar a los actuadores gracias a la fuente de alimentación. Consta de 6 agujeros pasantes: dos para fijarse al perfil de aluminio e impedir cualquier movimiento de la pieza y el resto para introducir los tornillos en los que se sujetarán los actuadores.

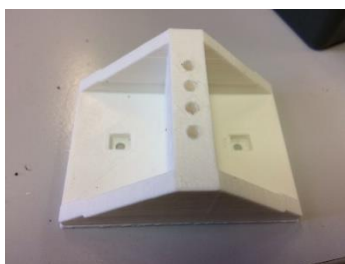


Fig. 5.1: Pieza actuadores fijos sin tornillos.

Los tornillos son de métrica 3 y altura 40 mm para atravesar completamente la pieza. En la cabeza del tornillo se debe situar una tuerca introduciéndose por la parte inferior de la pieza. Al introducir la tuerca junto al tornillo quedará sujeto gracias a la silueta de la tuerca diseñada en la parte inferior de la pieza. En la parte superior se sitúan dos tuercas

dejando el agujero del tornillo (situado a aproximadamente 30-33 mm de la cabeza) entre ellas, se introducirá fácilmente el actuador tensándolo gracias al tornillo y sus correspondientes tuercas como se puede ver en la Fig. 5.2.

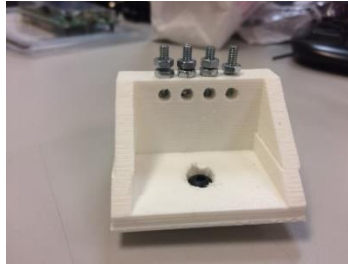


Fig. 5.2: Pieza actuadores fijos con tornillos.

### **5.2 Diseño pieza actuadores carrito.**

Pese a trabajar como una sola pieza, se divide en 3: base, tapa y carrito. En el interior de la base se situará el carrito, mientras que en la parte superior se situará la tapa.

La base del carrito es una pieza hueca interiormente, sin parte superior, y con una franja en uno de los extremos para que pueda sobresalir la lámina de imán como se aprecia en la Fig. 5.3. Consta de un total de 19 agujeros: 4 de ellos no pasantes pero el resto sí. Los agujeros no pasantes son para situar la tapa en la parte superior. En cuanto a los pasantes: 2 en la parte inferior para fijarse al perfil de aluminio ranurado, 4 para introducir los actuadores, 4 justo en la entrada superior de los actuadores para comprobar que realmente el teflón está en la posición adecuada (podría quemar la pieza al estar en contacto a alta temperatura), 4 para introducir unas barras sobre las que se sitúa el carrito y, por último, un agujero para introducir un hilo sobre el que tendremos las pesas.



Fig. 5.3: Base del carrito.

La tapa es la mitad de la parte superior de la base, se crea para poder realizar la lectura de la posición del imán mediante el sensor de posición, está situada en la parte contraria a la entrada del actuador. Tiene 4 agujeros para fijarse sobre su base. Se ha diseñado una ranura en sentido longitudinal con un laminado de inferior grosor en los laterales en el

centro de la pieza, para insertar el sensor y estar a 1 mm. del imán, distancia a la que se debe realizar la lectura (Fig. 5.4).

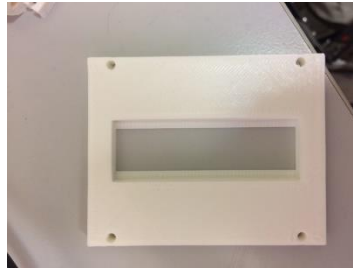


Fig. 5.4: Tapa de la base del carrito.

Por último, el carrito va insertado mediante unas barras en la base para que se pueda desplazar, permaneciendo la tapa en la mitad de su recorrido. La lámina de imán sobre el que se realiza la lectura de los desplazamientos está a 1 mm del sensor de posición y debe realizar el mismo movimiento que el carrito, es decir, seguir el movimiento del actuador, por lo que debe situarse en la parte superior del carrito. El imán utilizado es lo suficientemente largo para recorrer el desplazamiento completo del carrito, cuando se encuentre en el extremo contrario a la entrada de los actuadores debe sobresalir fuera de la base. Consta de 7 agujeros pasantes: 2 para introducir las barras y recorrer todo el desplazamiento de la base, 4 para introducir los tornillos en los que se sujetan los actuadores y uno para introducir el hilo con dirección a la polea (Fig. 5.5). Estos últimos 4 tornillos siguen la misma lógica que los tornillos que sujetan el otro extremo de los actuadores, la única diferencia es la altura, en este caso es de 25 mm. con su correspondiente agujero (a una distancia de la cabeza de 16-19 mm) como se observa en la Fig. 5.6.



Fig. 5.5: Carrito sin tornillos.

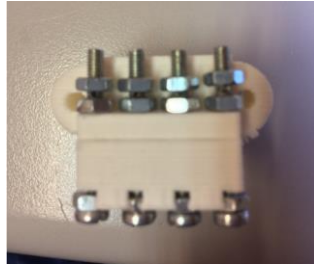


Fig. 5.6: Carrito con tornillos.

Podemos apreciar cómo queda el conjunto de todas las piezas junto a los tornillos en las Fig. 5.7 y Fig. 5.8.



Fig. 5.7: Conjunto de piezas carrito completas sin tapa



Fig. 5.8: Conjunto de piezas carrito completa con tapa.

### 5.3 Diseño pieza polea.

Para realizar la polea se han tenido que diseñar 2 piezas: la base y la rueda de polea.

La base consta de 3 agujeros pasantes: uno para sujetar la pieza en el perfil de aluminio y 3 para poder introducir una barra sobre la que sujetará la rueda de la polea. Tiene una base y dos paredes, el resto es hueco para que pueda circular correctamente la rueda de polea (Fig. 5.9).



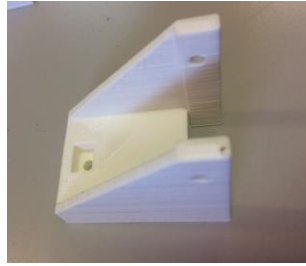


Fig. 5.9: Base polea.

La rueda de polea tiene un agujero en el centro, en él se insertará la barra y será el punto sobre el que se deslice (Fig. 5.10).



Fig. 5.10: Rueda de polea.

Mediante un hilo sujeto a la pieza del carrito que pasa por la rueda de polea podremos colocar distintos pesos cuando sea necesario. Estas pesas ejercerán una fuerza sobre el actuador, estarán colocadas en sentido vertical, es decir, perpendicular al banco de pruebas.

#### **5.4 Diseño tornillos.**

El diseño ha sido difícil por la búsqueda de un material que encajara a la perfección con las indicaciones. No debe permitir que se realice un movimiento una vez que el actuador esté fijo, sostener las piezas fácilmente y resistir cierta fuerza para la sujeción de los hilos SMA. Al no encontrar ningún material previamente diseñado o en el mercado, se decidió crearlo mediante unos tornillos y tuercas.



Fig. 5.11: Tornillo con agujero y longitud 25mm.

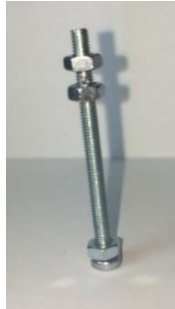


Fig. 5.12: Tornillo con agujero y longitud 40 mm.

La realización del agujero en los tornillos ha sido bastante compleja. Se ha realizado a pulso con un taladro Dremel haciendo un agujero de 1,5 mm en un tornillo de métrica 3 y a una distancia determinada de la cabeza. Se han realizado un total de 12 tornillos, 6 con una altura de 40mm (Fig. 5.12) y el resto de 25 mm (Fig. 5.11), se han creado más de los necesarios por si sucediera cualquier problema. Anteriormente se ha explicado el funcionamiento de estos. Los diseños de las piezas anteriores se han basado en dichos tornillos debido a que eran el principal problema para resolver resultandos imprescindibles.

### **5.5 Montaje y conexión de elementos.**

Todas las piezas nombradas anteriormente están sujetas y ajustadas a una base realizada con perfil de aluminio en forma de T, es posible modificar sus posiciones con facilidad aflojando los tornillos de sujeción. En la Fig. 5.13 se puede observar el diseño completo del banco de pruebas.

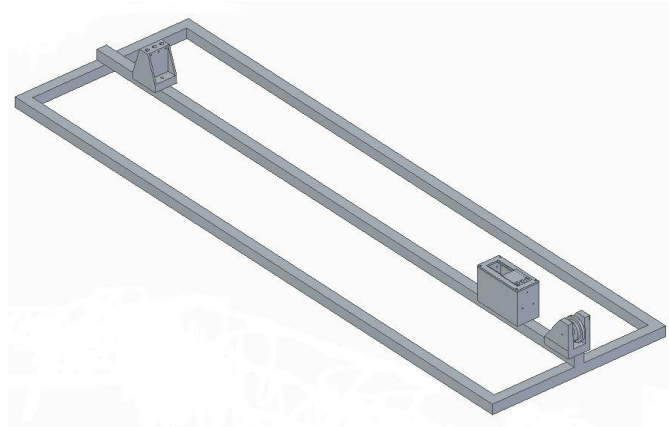


Fig. 5.13: Banco de pruebas completo [42].

Un extremo de los actuadores irá conectado en la pieza de la Fig. 5.8, mientras que el otro se conectará a la pieza de la Fig. 5.2 de forma tensa. Una vez que el actuador se encuentre conectado se podrán añadir diferentes cargas si así se desea.

Para realizar las simulaciones de los actuadores hemos añadido a nuestro banco de pruebas una fuente de alimentación para poder implementar cierta tensión, una etapa de potencia con transistor MOSFET, un sensor de posición de efecto Hall NSE-5310 y un controlador PWM basado en el kit STM23F4. Todo ello ha sido proporcionado por el grupo de investigación RoboticsLab [2]. El sensor de posición de efecto Hall NSE-5310 nos permite una lectura del movimiento con una resolución de  $0,48\mu\text{m}$ . producido en el actuador mediante un imán sobre el carrito, situado en la tapa del carrito.

Los dos puertos USB del controlador PWM (Fig. 5.14) estarán conectados directamente al ordenador para poder intercambiar datos como la señal de referencia o la posición en todo momento del actuador.



Fig. 5.14: Controlador PWM.

Las dos salidas de la etapa de potencia (Fig. 5.15) estarán conectadas a la fuente de tensión, mientras que el conector de electrónica polarizado serán las pinzas de cocodrilo conectadas en los extremos del actuador o en los tornillos que realizan su sujeción como sucedía en la Fig. 2.4. Todo ello proporciona un calor gracias al efecto Joule, pasando corriente eléctrica a través de él y posteriormente transformándose en energía térmica y con ello en mecánica.



Fig. 5.15: Etapa de potencia.

El programa utilizado del software Matlab® para la conexión de los elementos, referencias y lectura de datos ha sido desarrollado por el grupo de investigación RoboticsLab de la UC3M [2]. Permite modificar los valores de referencia que debe seguir nuestro actuador y los parámetros de control. Nos permite conocer todos los datos junto a sus gráficas para analizar el comportamiento.

Los pines conectados entre los subsistemas electrónicos son los de la TABLA 5.1.

TABLA 5.1: CONEXIÓN DE PINES.

Subsistema electrónico	Pin		Subsistema electrónico	Pin
Sensor de posición	8 (GND)	conectado a	Controlador PWM	1 interior
Sensor de posición	12	conectado a	Controlador PWM	10 exterior
Sensor de posición	13	conectado a	Controlador PWM	10 interior
Sensor de posición	18 (5V)	conectado a	Controlador PWM	2 interior
Etapa de potencia	6 (GND)	conectado a	Controlador PWM	1 exterior
Etapa de potencia	5 (5V)	conectado a	Controlador PWM	2 exterior
Etapa de potencia	1	conectado a	Controlador PWM	14 exterior
Etapa de potencia	2	conectado a	Controlador PWM	22 interior

«RoboticsLab» RoboticsLab UC3M.

## CAPÍTULO 6

### CONFIGURACION DE ACTUADORES SMA

Para la realización de los experimentos se han implantado en todos los casos los mismos parámetros del controlador PID y la misma temperatura ambiental, 22 °C, pese a depender de factores no controlados al estar en un laboratorio con personal. Para no deteriorar el banco de pruebas por la temperatura de los actuadores se ha añadido PTFE (teflón o politetrafluoroetileno) en las partes que están en contacto. El controlador PID en tiempo discreto se utiliza para enviar la señal PWM  $I(z)$  al actuador siguiendo la siguiente ecuación:

$$I(z) = \frac{Y(z)}{U(z)} = [K_p + \frac{K_i}{1-z^{-1}} + K_d(1 - z^{-1})] E(z) \quad (6.1)$$

$Y(z)$  salida del sistema.

$U(z)$  entrada del sistema.

$K_p$  ganancia proporcional.

$K_i$  ganancia integral.

$K_d$  ganancia derivativa.

$E(z)$  error entre la referencia y la salida.

Los valores del controlador PID se han determinado mediante pruebas sobre los actuadores, las ganancias elegidas han sido las mostradas en la TABLA 6.1.

TABLA 6.1: VALORES CONTROLADOR PID.

Ganancia	Kp	Ki	Kd
Valor	0,24	0	0.1

La longitud mínima de los actuadores es de 1,08m, se recomienda trabajar no superando un 5% de su longitud para no sufrir fatiga estructural, pero en nuestro caso no se superará el 3% de su capacidad [32]. Los experimentos se realizan con el fin de seguir una señal de referencia escalón y sinusoidal con parámetros determinados. El valor de una unidad será 0,48  $\mu\text{m}$ , siendo la amplitud máxima empleada de 60.000 unidades, es decir, una contracción máxima del actuador de SMA de 28,8 mm, por debajo de la máxima permitida siendo el límite 54mm, por lo que no tendremos ningún problema. Dicho valor ha sido seleccionado teniendo en cuenta la longitud máxima deslizable del carrito sobre

su base. Se analiza la señal de control (PWM) en la señal escalón, siendo de gran importancia al ser directamente proporcional al consumo de energía e influye notoriamente en su vida útil y en los posibles daños del sistema si es muy oscilante. El esquema principal del conjunto es el mostrado en la Fig. 6.1.

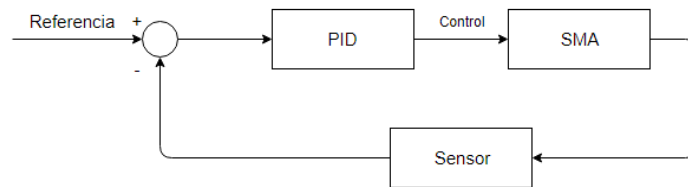


Fig. 6.1: Esquema básico control PID actuador.

Los actuadores de SMA son de distintos diámetros, temperaturas de activación y fuerzas teniendo en cuenta las siguientes configuraciones:

- Actuador simple.
- Actuador con silicona. Material comprado en el cual viene el actuador junto a la silicona [40].
- Actuador con ventilación. El sistema de ventilación consiste en un tubo de silicona de 8 mm. en el que se inserta el actuador y un pequeño ventilador. El extremo del tubo de silicona junto al actuador es insertado en el ventilador. El ventilador funciona gracias a su conexión con la etapa de potencia y al controlador PWM. El ventilador produce una limitación de alimentación una vez conectado al circuito, por lo que el voltaje empleado en este caso será menor.
- Actuador con funda Bowden (Fig. 6.2). Es un cable flexible compuesto de una funda de nylon que en su interior tiene un cable metálico en forma de espiral, un pequeño tubo de PTFE, una unidad de terminación para tensar el actuador y el hilo de SMA. La funda Bowden permite guiar al actuador por su recorrido, y gracias al metal puede disipar más rápido el calor disminuyendo el tiempo de enfriamiento y recuperar antes su posición inicial. El tubo de PTFE permite aislar el actuador de la funda metálica, permitiendo superar temperaturas de 250 °C. La terminación permite conectar un extremo y tensar el actuador para poder comprobar el movimiento que se produce en consecuencia del efecto Joule, son dos piezas atornilladas entre sí pasando el actuador por su interior.

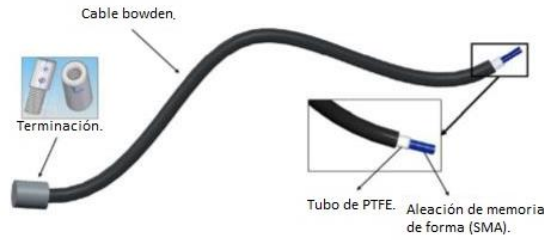


Fig. 6.2: Diseño del actuador en funda Bowden [41].

- Actuador con Bowden y ventilador. Se han realizado pruebas con el cable Bowden en el interior del tubo de silicona para que se realice a su vez la ventilación. Se produce una limitación de voltaje debido a la conexión del ventilador al circuito.

Según los diámetros de los actuadores utilizados tendrá distintos valores de resistencia óhmica, fuerza nominal y tiempo de enfriamiento mínimo necesario (TABLA 6.2). Para los actuadores de 0,51 mm. con silicona de  $T^a$  95°C y  $T^a$  55°C no hay información concreta publicada.

TABLA 6.2: CARACTERÍSTICAS SMA SEGÚN SU DIÁMETRO Y TEMPERATURA.

Diámetro (mm)	Resistencia óhmica ( $\Omega/m$ )	Fuerza nominal máxima (N)	Temperatura (°C)	Tiempo de enfriamiento (s)	Intensidad de contracción (A)
0,38	8,3	20,04	90	8,8	2,25
0,51	4,3	35,6	90	14	4
0,51	4,3	35,6	60	16,8	4

«Flexinol® Actuator Wire Technical and Design Data» Dynalloy Inc.

## CAPÍTULO 7

### RESULTADOS

En este apartado se analizarán los resultados de las pruebas desarrolladas en el laboratorio de la UC3M para elegir el actuador más adecuado en cada uno de los casos. Cada una de las pruebas se ha realizado un total de 5 veces para seleccionar y analizar aquellas que sean más fiables y no tengan comportamientos extraños. El análisis se realiza gracias a un sensor de efecto Hall midiendo con una precisión de  $0,48 \mu\text{m}$  y una fuente de alimentación que nos proporcionará el accionamiento del actuador. Se produce al calentar el actuador gracias al efecto Joule, pasando corriente eléctrica a través de él y posteriormente transformándose en energía térmica y con ello en mecánica.

Tendremos dos señales de referencia, una de tipo escalón y otra sinusoidal. El valor de una unidad de amplitud será  $0,48 \mu\text{m}$ .

La señal de referencia de tipo escalón es un patrón de dos escalones que debe seguir nuestro actuador: el primero de  $30.000$  de amplitud de  $10$  a  $20$  segundos y el segundo de  $60.000$  de amplitud durante otros  $10$  segundos. En los casos que la señal de referencia se vea modificada se explicará en dicho apartado. También se analizará el consumo de energía en esta etapa.

Para algunos actuadores dependiendo de su configuración y características se ha desarrollado una señal de referencia de tipo sinusoidal de amplitud  $\pm 30.000$  unidades con un offset de  $30.000$  unidades (desplazamiento total de  $28,8\text{mm}$ ), con una frecuencia de  $0,0207$  Hz. Para aquellos casos en los que la señal de referencia sinusoidal sea modificada será detallado en dicho apartado.

A continuación, se mostrará una comparación de todas las pruebas desarrolladas:

#### **7.1 Actuador de alta temperatura ( $90^{\circ}\text{C}$ ) vs actuador de baja temperatura ( $60^{\circ}\text{C}$ ).**

Se ha utilizado un hilo de activación a  $90^{\circ}\text{C}$  y un hilo de activación a  $60^{\circ}\text{C}$ . En ambos casos el diámetro de es de  $0,51\text{mm}$ , la longitud de  $1,08$  m, la fuerza ejercida de  $29,4$  N ( $3$  kg de masa) en sentido vertical y sin ningún material añadido. La fuente de alimentación del sistema tendrá una tensión de  $15,15$  V, pese a que con los parámetros anteriores debe



alimentar a 18,6 V ambos actuadores no ha sido posible por la fuente de tensión proporcionada.

Como se puede apreciar en la Fig. 7.1 al comienzo ambos actuadores basados en SMA tienen un comportamiento similar, pero el actuador de baja temperatura tiene un comportamiento complicado en su calentamiento (contracción del hilo) al comenzar ambos escalones. En cuanto a la etapa de recuperación se puede observar cómo es mejor el actuador de alta temperatura como consecuencia de tener una mayor temperatura de activación el tiempo de enfriamiento será menor. Para llegar a la distancia de 10.000 unidades (4,8 mm) el actuador basado en SMA de baja temperatura necesita 15 segundos más.

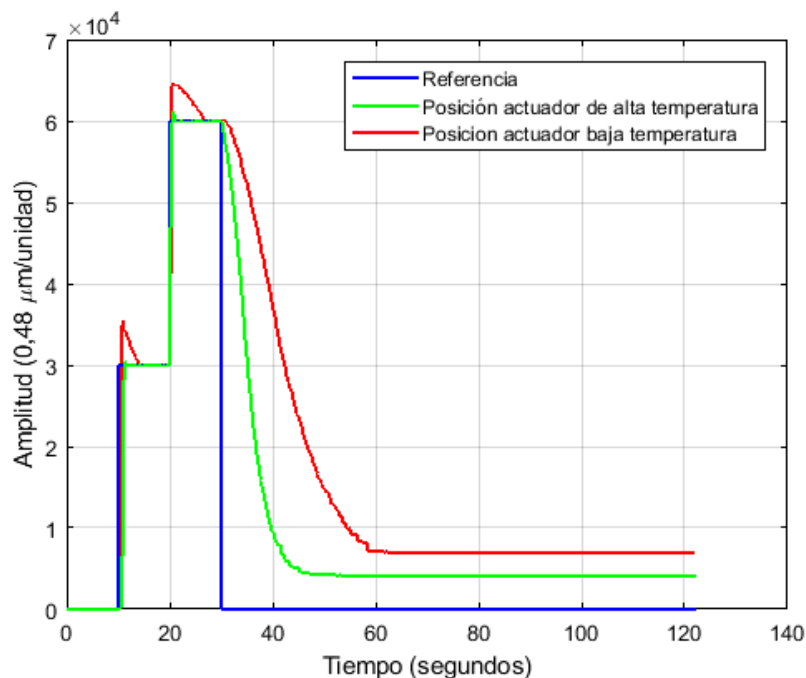


Fig. 7.1: Respuesta escalón: SMA alta temperatura vs SMA baja temperatura.

En términos de consumo de energía comparamos ambas señales en la gráfica de la Fig. 7.2 pudiendo ver cómo el área del actuador basado en SMA de baja temperatura es menor, lo que implica menor consumo de energía. Esto se debe a la necesidad de menor temperatura de activación proporcionada por la fuente de alimentación.

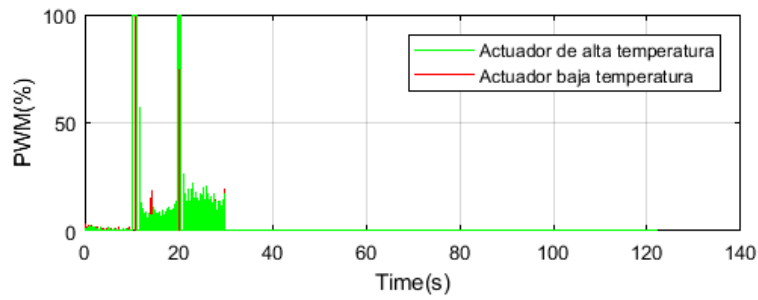


Fig. 7.2: Respuesta escalón PWM: SMA alta temperatura vs SMA baja temperatura.

En la siguiente gráfica Fig. 7.3 se observa mejor que el área del actuador de baja temperatura es inferior.

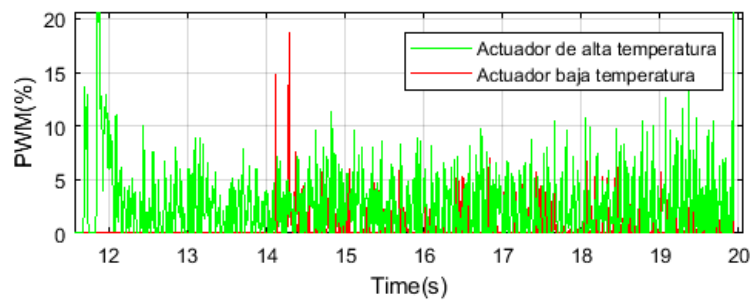


Fig. 7.3: Respuesta escalón PWM: SMA alta temperatura vs SMA baja temperatura (Aumento de la Fig. 7.2)

En la gráfica de la Fig. 7.4 sucede como en la respuesta escalón, tiene un mayor control y un menor tiempo de enfriamiento el actuador basado en SMA de alta temperatura. En este caso el actuador basado en SMA de baja temperatura necesitará 10 segundos más para llegar a la misma posición en la fase de enfriamiento.

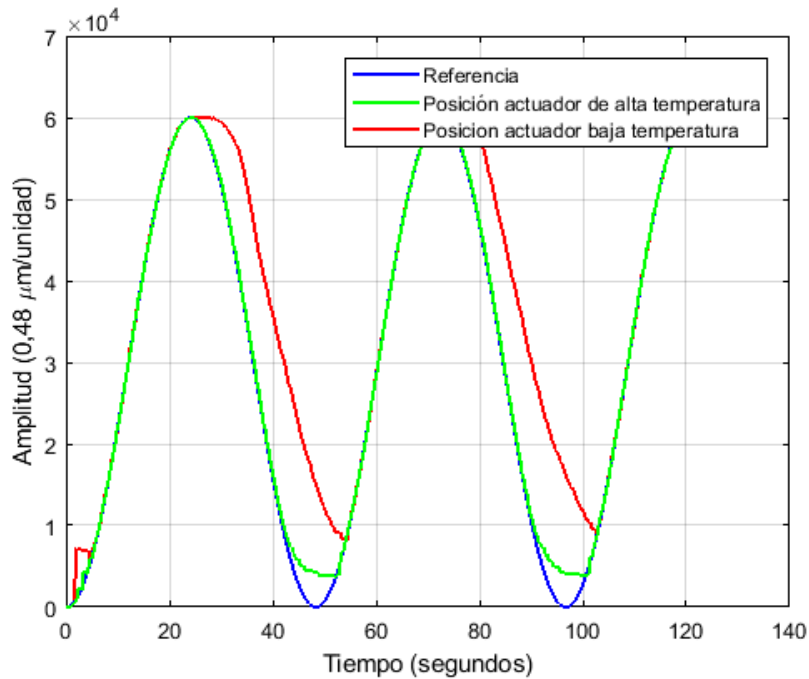


Fig. 7.4: Respuesta sinusoidal: SMA alta temperatura vs SMA baja temperatura.

## 7.2 Actuador de alta temperatura (90°C) vs actuador de alta temperatura (95°C) con silicona.

Se ha utilizado un hilo de activación a 90°C y otro actuador a 95°C, uno de ellos tiene una funda de silicona de la empresa Dynalloy Inc.. En ambos casos el diámetro de es de 0,51mm, la longitud de 1,08 m y la fuerza ejercida de 29,4N en sentido vertical. La fuente de alimentación que alimentará el actuador sin silicona será con una tensión de 15,15 V, sin embargo, para el actuador con silicona se ha suministrado una tensión de 20V gracias a una nueva fuente de tensión suministrada con la que se ha podido desarrollar esta prueba. Se debe proporcionar una tensión mínima de 18,57 V en ambos casos.

En este caso el patrón de referencia son dos escalones. Para el actuador sin silicona será un escalón de 30.000 de amplitud del sensor de 10 a 20 segundos y el segundo de 60.000 de amplitud durante otros 10 segundos. Pero para el actuador con silicona el último escalón tendrá una amplitud de 50.000 unidades, debido a que el diámetro de la silicona tiene un desplazamiento máximo menor.

Como se puede apreciar en la Fig. 7.5 el actuador sin silicona toma un comportamiento perfecto en su totalidad, excepto en la fase de enfriamiento. El actuador con silicona tiene un peor comportamiento observando el calentamiento en el primer escalón, sin embargo,

teniendo en cuenta la referencia para su segundo escalón no tiene este defecto lo cual sucede una vez que el actuador y la silicona se encuentran ambas a cierta temperatura.

El actuador al estar rodeado de una funda de silicona, la cual no disipa calor, es más complicado reducir la temperatura y consecuentemente el tiempo de enfriamiento será mayor. Para recuperar su posición y llegar a la distancia de 4,8 mm el actuador con silicona tarda 25 segundos más. Una vez que han pasado 90 segundos desde su enfriamiento toman valores similares, pero aun así el actuador sin silicona estará 0,12 mm más próximo a la referencia.

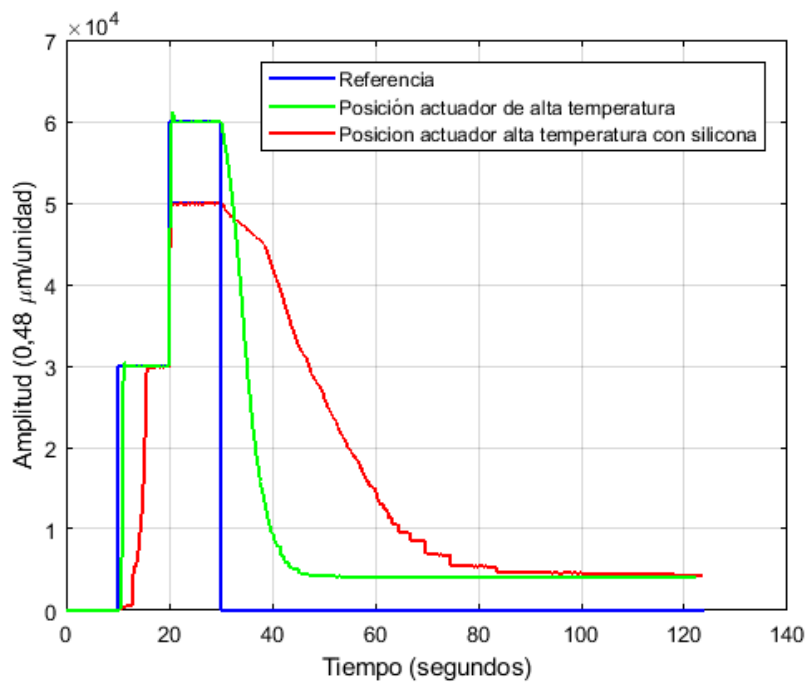


Fig. 7.5: Respuesta escalón: SMA alta temperatura vs SMA alta temperatura con silicona.

En términos de consumo de energía, comparando ambas señales en la gráfica de la Fig. 7.6 vemos que el área del actuador basado SMA de alta temperatura con silicona es mayor, lo que implica un mayor consumo de energía. Pese a tener la misma temperatura de activación el estar rodeado de silicona, la cual es aislante, y sin estar en contacto directo con la temperatura ambiente hace que se necesite una mayor energía para llegar a un mismo punto.

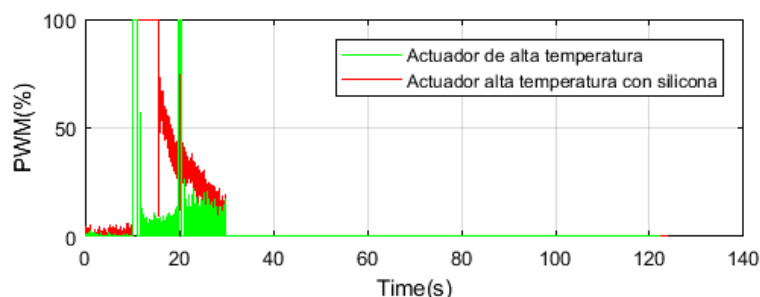


Fig. 7.6: Respuesta escalón PWM: SMA alta temperatura vs SMA alta temperatura con silicona.

No se ha podido realizar la referencia sinusoidal para el actuador con silicona por los continuos movimientos para seguir la señal de referencia, hace que el actuador tome altas temperaturas continuamente sin tener tiempo de enfriamiento, en consecuencia, el actuador se romperá.

### 7.3 Actuador de alta temperatura (95°C) con silicona y 3 kg vs actuador de alta temperatura (95°C) con silicona y 1 kg.

Se han utilizado dos hilos de activación a 95°C. En ambos casos el diámetro de es de 0,51mm y una longitud de 1,08 m. La fuerza ejercida para el primer actuador es de 29,4 N y para el segundo de 9,8 N. La fuente de alimentación alimentará el sistema con una tensión de 20 V, en este caso ha sido proporcionada una fuente de alimentación de 30V. En ambos casos el voltaje mínimo que se debe administrar es de 18,6 V.

En este caso el patrón de referencia son dos escalones. El primer escalón de 30.000 unidades de amplitud del sensor de 10 a 20 segundos y el segundo, debido al diámetro de la silicona, tendrá una amplitud de 50.000 unidades.

Existe una gran diferencia de su comportamiento con motivo de la fuerza a ejercer. La contracción del actuador con más masa necesita un tiempo mayor para calentar y contraer el actuador, por lo que es más sencillo con la masa de 1 kg. (Fig. 7.7).

En cuanto a la recuperación, las pesas ejercen una fuerza en el sentido de la forma original del actuador afectando de manera positiva, por lo que tener una masa mayor resulta mejor. Para llegar a una contracción de 29.500 unidades (14,16 mm.) en el proceso de calentamiento el actuador con mayor peso tarda 2 segundos más. Para el enfriamiento en 20.000 unidades (9,6 mm), el actuador de baja temperatura necesita 31 segundos más (Fig. 7.7).

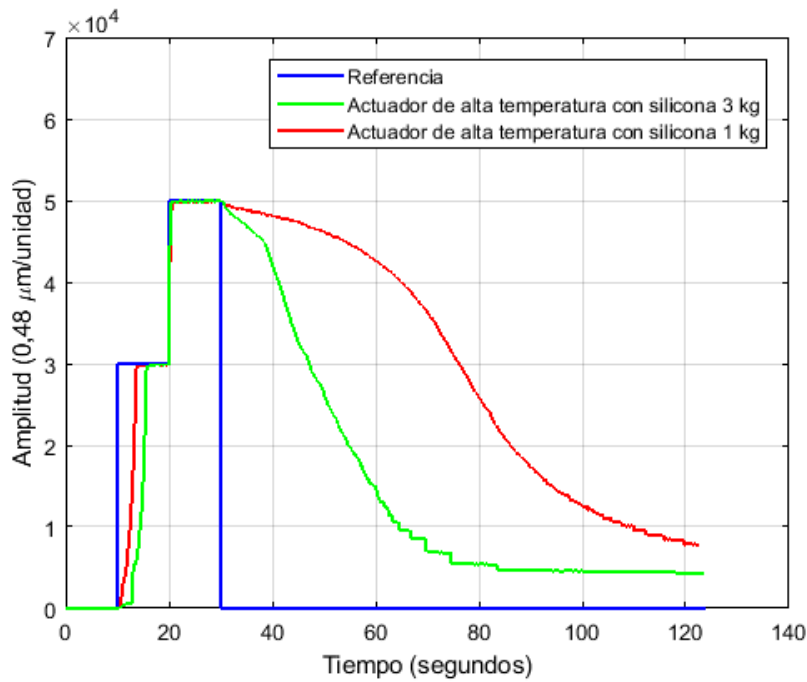


Fig. 7.7: Respuesta escalón: SMA alta temperatura con silicona y 3 kg vs SMA alta temperatura con silicona y 1kg.

En términos de consumo de energía ambas son muy parecidas (Fig. 7.8). Para poder llegar al primer escalón consume más energía el actuador con mayor peso, una vez calentado el actuador mantiene una línea constante sin necesidad de suministrar tanta energía para el segundo escalón. Sin embargo, el actuador de menor peso tiene un menor gasto de energía para desarrollar el primer escalón, pero un mayor gasto para el segundo. Para la realización del primer escalón tiene un mayor gasto el de mayor esfuerzo, pero para el segundo escalón tiene mayor gasto de energía la masa de 1 kg. El área del actuador de mayor peso no es mayor en la figura, pero para lograr llegar a la referencia del primer escalón el actuador de mayor masa ha estado al 100% durante 5,5 segundos, lo que implica tener menor área, pero mayor consumo en esta franja de tiempo (Fig. 7.9).

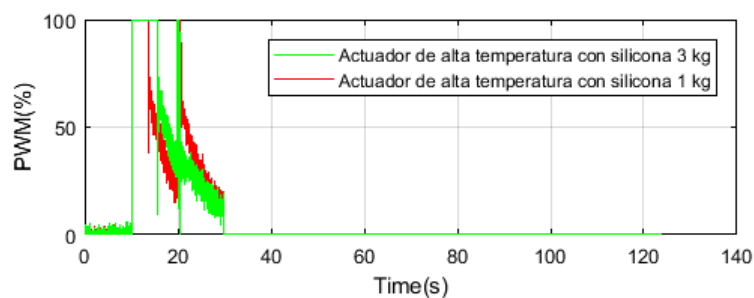


Fig. 7.8: Respuesta escalón PWM: SMA alta temperatura con silicona y 3 kg vs SMA alta temperatura con silicona y 1kg.

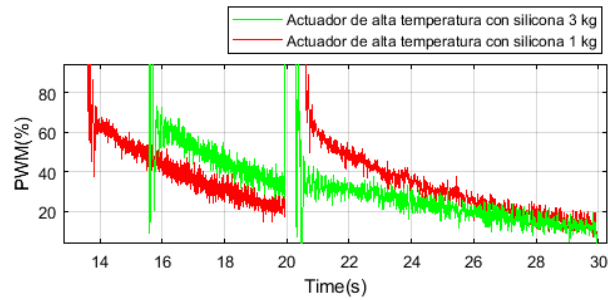


Fig. 7.9: Respuesta escalón PWM: SMA alta temperatura con silicona y 3 kg vs SMA alta temperatura con silicona y 1kg. (Aumentando la Fig. 7.8)

#### 7.4 Actuador de baja temperatura (55°C) con funda Bowden y 3 kg vs actuador de baja temperatura (55°C) con funda Bowden y 2 kg.

Se han utilizado dos hilos de activación a 55°C. En ambos casos el diámetro es de 0,51mm, la longitud de 1,08 m y una funda Bowden. La fuerza ejercida será para una masa de 3 kg y 2 kg en sentido vertical. Al actuador de baja temperatura se ha suministrado una tensión de 8V. No existe ninguna tabla del fabricante sobre actuadores con activación a 55°C, por lo que con motivo de ser un actuador nuevo se han realizado diferentes pruebas para comprobar el voltaje adecuado sin que sufra ningún daño.

Para estos actuadores tenemos una referencia de un solo escalón con una ganancia de 35.000 unidades durante un tiempo indeterminado, una vez que esté próximo a este punto sin contraerse, la ganancia será de 0 unidades.

El actuador con mayor peso ha logrado su máximo con una amplitud de 34.750 a los 127 segundos, manteniéndose así durante más de 20 segundos. El actuador con 2 kg ha logrado 34.930 unidades a los 404 segundos manteniéndose así durante más de 20 segundos (Fig. 7.10).

El actuador con menor peso tiene mejor comportamiento, es más rápido y es capaz de llegar a la referencia marcada. En la etapa de enfriamiento el actuador con mayor masa tiene un mejor enfriamiento debido a la fuerza ejercida en sentido de su posición a recuperar. Con 2 kg tiene un comportamiento bastante más lento fruto de la fuerza ejercida por las masas y el sobrecalentamiento del actuador. Para poder llegar a una amplitud de 20.000 unidades (9,6 mm) desde que su referencia es de 0 unidades ha sido de 189 segundos para la masa de 3 kg y 441 segundos para la masa de 2 kg.

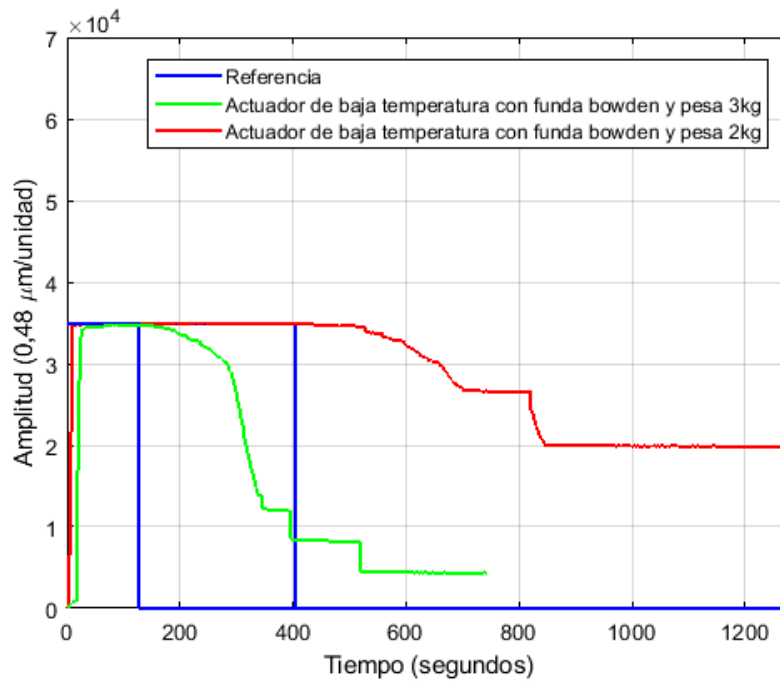


Fig. 7.10: Respuesta escalón: SMA baja temperatura con funda Bowden y 3 kg vs SMA baja temperatura con funda Bowden y 2kg.

Como es normal, al estar más tiempo en funcionamiento para lograr llegar a la referencia, el actuador de bajo peso tendrá un mayor consumo de energía en su totalidad (Fig. 7.11). Pero comparando las franjas en las que los ambos han estado activos, el actuador con mayor peso necesita mayor energía para poder desarrollar la contracción del actuador. El actuador con mayor peso se encuentra al 100% durante más de 60 segundos. Para mantener la contracción del actuador con menor peso y aproximarse a la referencia se ha desarrollado un consumo de energía prácticamente constante.

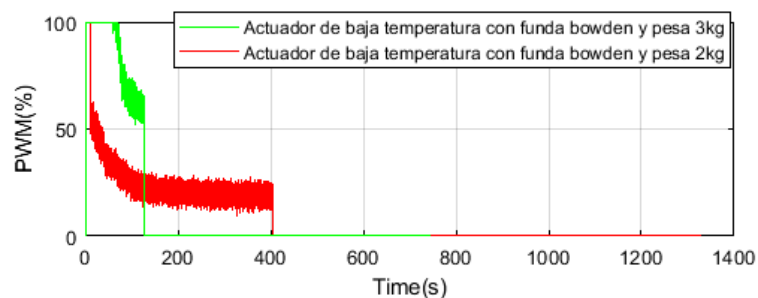


Fig. 7.11: Respuesta escalón PWM: SMA baja temperatura con funda Bowden y 3 kg vs SMA baja temperatura con funda Bowden y 2kg.

No se ha desarrollado la señal sinusoidal debido a que por el tiempo de enfriamiento no permite desarrollar la onda sinusoidal manteniéndose a alta temperatura constantemente produciendo daños irreparables.



### **7.5 Actuador de alta temperatura (90°C) vs actuador de alta temperatura (90°C) con ventilación.**

Se han utilizado dos hilos de activación a 90°C. En ambos casos el diámetro es de 0,51mm, la longitud de 1,08 m y la fuerza ejercida de 29,4 N en sentido vertical. La fuente de alimentación emitirá al sistema una tensión de 15,15 V para el actuador sin ventilación y 11,5 V al actuador con ventilación. Los parámetros calculados dicen que se debe alimentar a con una tensión de 18,6 V para ambos actuadores, pero no ha sido posible por la fuente de tensión utilizada. El descenso del voltaje en el caso del uso del ventilador se produce por una limitación al conectarlo al circuito.

Los dos actuadores tienen una gran similitud en el proceso de calentamiento, pero se puede apreciar en la Fig. 7.12 cómo es mejor el actuador sin ventilación tanto en la fase de calentamiento como enfriamiento, hay que tener en cuenta que el ventilador también está activado en las fases de calentamiento. La gran diferencia se produce en el enfriamiento y con la temperatura de estabilización, teniendo una diferencia entre ambas de 1,2mm desfavorable para el actuador con ventilación. El cable con ventilación no está en toda su longitud en contacto con el aire a temperatura ambiente, sino que se encuentra insertado en un tubo de silicona y en su extremo un pequeño ventilador realizando el enfriamiento en toda la superficie. Pese a que el ventilador ha logrado conseguir reducir la temperatura en el interior del tubo, no ha influido igual que la temperatura ambiente necesitando un mayor tiempo para lograrlo.

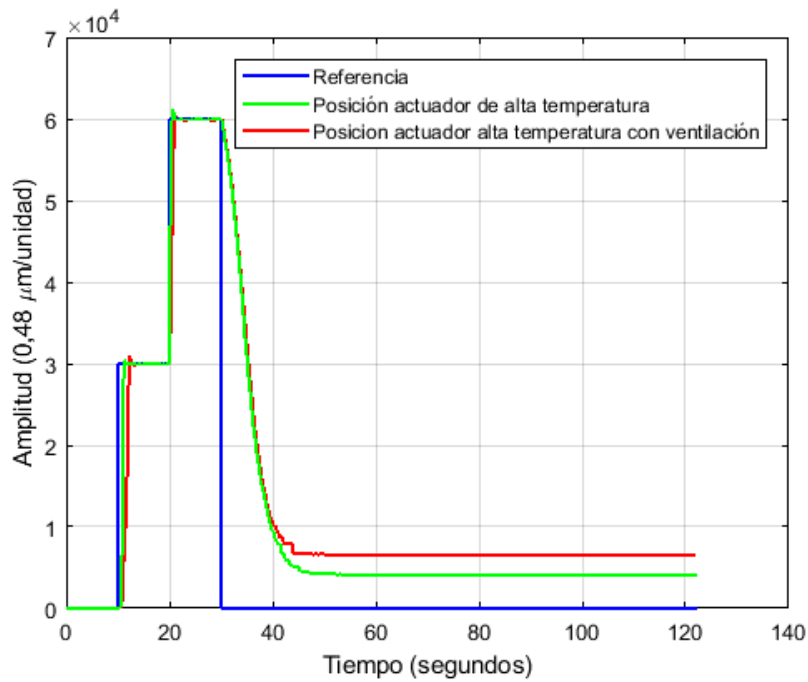


Fig. 7.12: Respuesta escalón: SMA alta temperatura vs SMA alta temperatura con ventilación.

Podemos comprobar como el actuador con ventilación necesita mayor energía, ocupando más área en la gráfica de la Fig. 7.13. Necesita una mayor temperatura debido a la continua ventilación sobre el actuador haciendo que disminuya constantemente la temperatura con la necesidad de aplicar más energía para lograr la referencia.

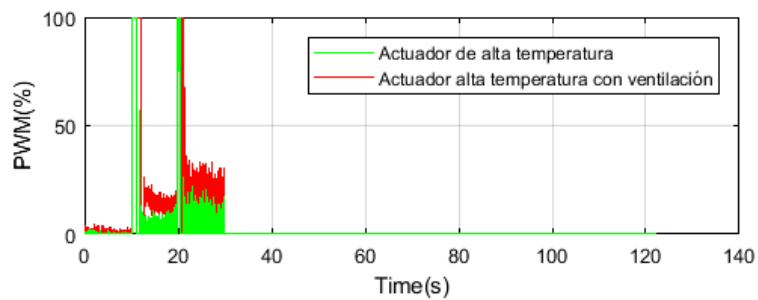


Fig. 7.13: Respuesta escalón PWM: SMA alta temperatura vs SMA alta temperatura con ventilación.

Ambos tienen un comportamiento muy parecido, pese a tener mejor comportamiento el actuador sin ventilación (Fig. 7.14). Es más complicado realizar un mejor comportamiento en la fase de calentamiento cuando se tiene activado un ventilador. Al igual que sucedía en el caso de la señal escalón, se produce un mejor enfriamiento y en menor tiempo a temperatura ambiente durante toda su longitud.

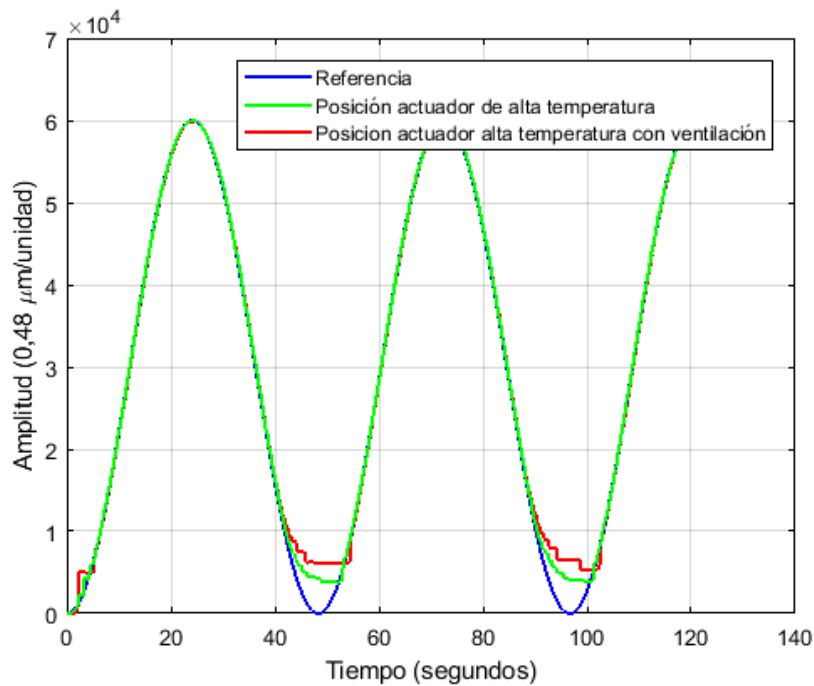


Fig. 7.14: Respuesta sinusoidal: SMA alta temperatura vs SMA alta temperatura con ventilación.

### 7.6 Actuador de alta temperatura (90°C) con ventilación vs actuador de alta temperatura (90°C) con ventilación y funda Bowden.

Se ha utilizado un hilo de activación a 90°C y un hilo de activación a 60°C. En ambos casos el diámetro es de 0,51mm y la longitud de 1,08 m. La fuente alimenta el sistema con una tensión de 11,5 V. Con los cálculos realizados debe alimentarse con un voltaje de 18,6 V, no ha sido posible por la limitación al conectar al circuito el ventilador.

Para el actuador con ventilación la fuerza ejercida será para una masa de 3 kg en sentido vertical, para el actuador con ventilación y funda Bowden es de 1 kg en sentido vertical. No ha sido posible realizar la prueba con 3 kg porque el hilo estaba tan tenso que se rompía al intentar levantarlo, pero si se ponía menos tenso no sucedía nada.

La fuerza ejercida en cada uno de los casos no es la misma influyendo en la alimentación de los actuadores. La funda Bowden, como se explicó anteriormente, tiene en su interior un tubo de PTFE. El actuador con funda Bowden y ventilación tiene peor comportamiento por la transmisión de calor al estar en contacto con el tubo de PTFE y la funda Bowden pese a tener una masa de 2 kg inferior.

En un primer momento como se observa en la Fig. 7.15, el enfriamiento es mejor en la funda Bowden y ventilación debido a la disipación de calor al estar en contacto con ellos.

Posteriormente, tiene una respuesta más lenta para recuperar su forma inicial por lo mismo. La acumulación del calor en el tubo Bowden ayuda en la primera etapa de enfriamiento al ser mayor la diferencia de temperatura entre el tubo Bowden y la temperatura ambiente, una vez que ambas temperaturas están próximas, la respuesta es más lenta debido a que tiene que enfriar la funda Bowden y el actuador. Por esta razón, a partir de los 40 segundos de enfriamiento, actúa mejor sin la funda Bowden.

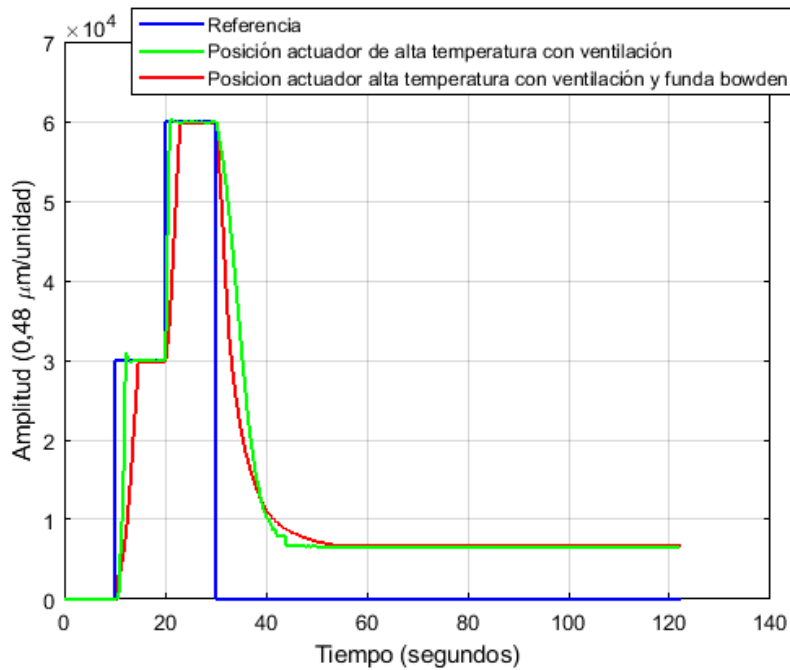


Fig. 7.15: Respuesta escalón: SMA alta temperatura con ventilación vs SMA alta temperatura con ventilación y funda Bowden.

Como se ha comentado anteriormente, se transmite calor al tubo PTFE y a la funda Bowden por lo que se debe consumir mayor energía para poder llegar a la misma referencia (Fig. 7.16).

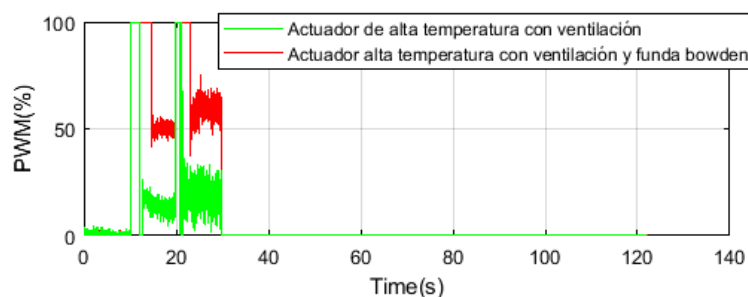


Fig. 7.16: Respuesta escalón PWM: SMA alta temperatura con ventilación vs SMA alta temperatura con ventilación y funda Bowden.

En este caso, podemos apreciar como la respuesta del ventilador junto a la funda Bowden necesita mayor tiempo de enfriamiento pese a tener más masa, como consecuencia del calor transmitido a la propia funda Bowden (Fig. 7.17). Para llegar a la longitud de 4,8 mm, el actuador con ventilador y funda Bowden necesita 9 segundos más.

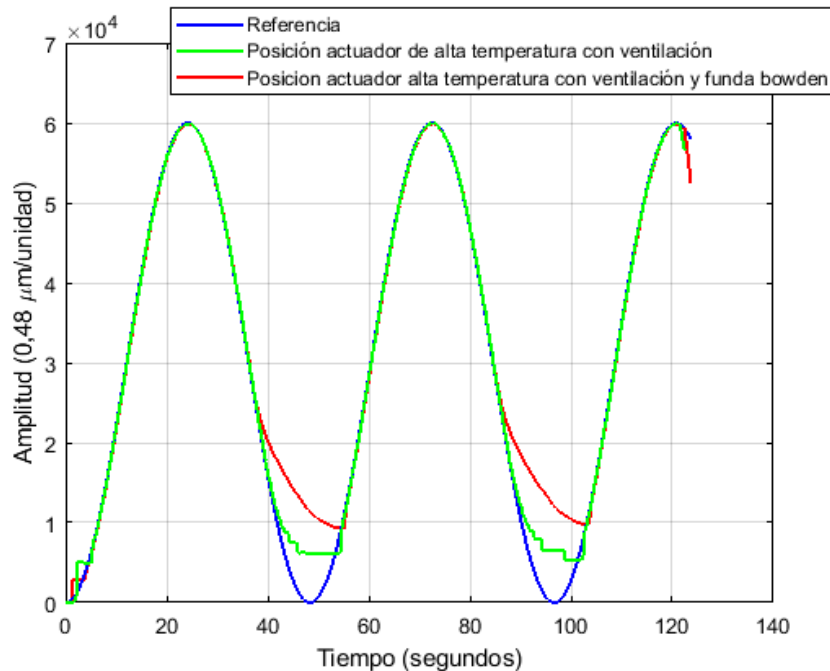


Fig. 7.17: Respuesta sinusoidal: SMA alta temperatura con ventilación vs SMA alta temperatura con ventilación y funda Bowden.

### 7.7 Actuador de alta temperatura (90°C) con funda Bowden vs actuador de alta temperatura (90°C) con funda Bowden y ventilación.

Se han utilizado dos hilos de activación a 90°C. En ambos casos el diámetro es de 0,38 mm, longitud de 1,08 m y funda Bowden. La fuente de alimentación alimentará el sistema con una tensión de 15,15 V para actuador sin ventilación y de 11,5 V para el actuador con ello. Los parámetros indican que se debe alimentar a 20,17 V ambos actuadores, no ha sido posible por la fuente de tensión utilizada y el empleo del ventilador.

Para el actuador de baja temperatura la fuerza máxima ejercida posible es de 20,04 N. Se ha propuesto en ambas pruebas una masa de 1 kg con una fuerza de 9,8 N en sentido vertical. Se ha decidido no optar por 2 kg debido a que sería una fuerza próxima a la máxima recomendada.

El control en ambos casos es muy similar siendo mínimamente mejor el actuador con ventilación hasta la llegada del primer escalón (menos de medio segundo mejor) y peor hasta la referencia del segundo (menos de medio segundo peor) como vemos en la Fig. 7.18.

En cuanto al enfriamiento, tiene un mejor comportamiento mínimamente el actuador sin ventilación gracias a la transmisión de calor a la funda Bowden y estar en contacto con el ambiente en toda su longitud. Mientras que con ventilación la funda Bowden está en contacto con un tubo de silicona el cual está insertado en un extremo al ventilador teniendo que enfriar el actuador y la funda Bowden. Con ventilador tiene un retraso de enfriamiento de 0,4 segundos aproximadamente en una amplitud de 10.000 unidades (4,8 mm).

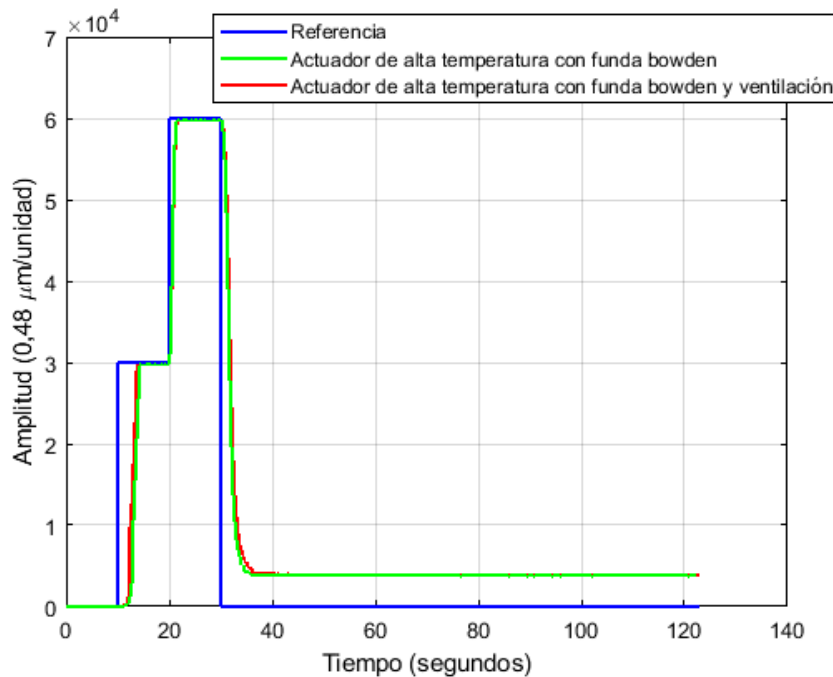


Fig. 7.18: Respuesta escalón: SMA alta temperatura con funda Bowden vs SMA alta temperatura con ventilación y funda Bowden.

En la Fig. 7.19 parece que el área predominante es de color verde, pero podemos comprobar en la Fig. 7.20 que se debe a que está superpuesto encima del color rojo. En este caso el consumo de energía es muy parecido, siendo mayor para el actuador con funda Bowden y ventilación debido a que el ventilador está activo durante todo el proceso, también durante el calentamiento del actuador.

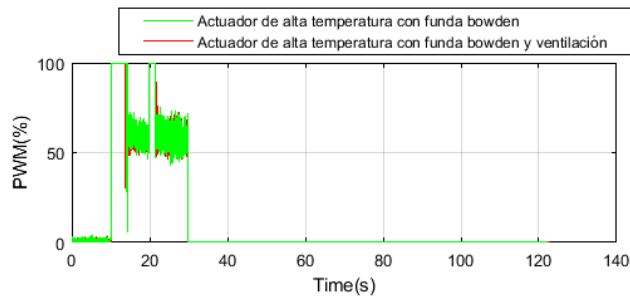


Fig. 7.19: Respuesta escalón PWM: SMA alta temperatura con funda Bowden vs SMA alta temperatura con ventilación y funda Bowden.

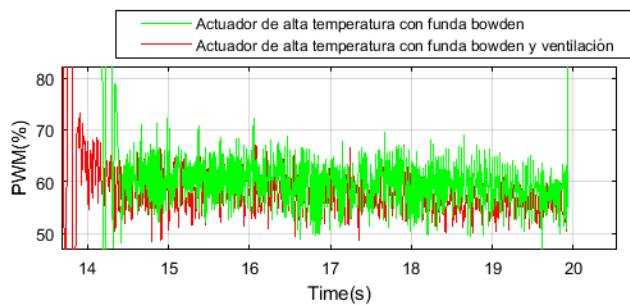


Fig. 7.20: Respuesta escalón PWM: SMA alta temperatura con funda Bowden vs SMA alta temperatura con ventilación y funda Bowden (Aumentando la Fig. 7.19).

Comparando dichas figuras con las gráficas del apartado anterior los actuadores de menor diámetro tienen un mejor comportamiento con funda Bowden y ventilación. Un mayor consumo el diámetro de mayor temperatura debido a que su enfriamiento se produce en menor tiempo teniendo que emitir un calor constante para que poder llegar a la señal de referencia.

El comportamiento en ambos casos es casi idéntico (Fig. 7.21). Sufre un mejor comportamiento en el calentamiento el actuador con funda Bowden al no encontrarse continuamente enfriándose con el ventilador generando variaciones constantes de aire. Sin ventilación el actuador se encuentra a temperatura ambiente, pero es constante y es su temperatura de reposo. Una vez que se produce la etapa de enfriamiento tienen comportamientos similares, la diferencia es una vez que se debe volver a contraer volviendo a suceder lo anteriormente explicado.

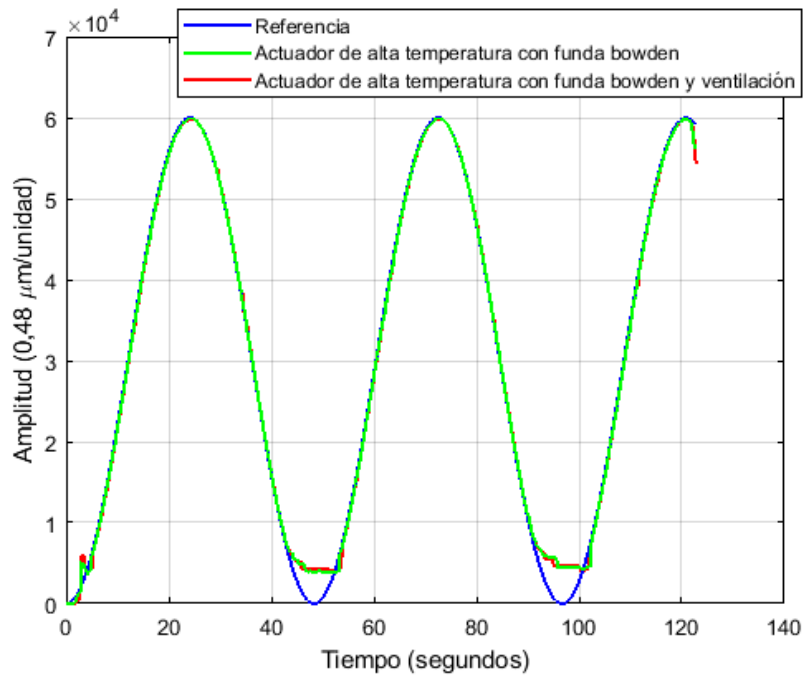


Fig. 7.21: Respuesta sinusoidal: SMA alta temperatura con funda Bowden vs SMA alta temperatura con ventilación y funda Bowden.

### 7.8 Actuador de baja temperatura (60°C) vs actuador de baja temperatura (60°C) con ventilación y funda Bowden.

Se han utilizado dos hilos de activación a 60°C. En ambos casos el diámetro de es de 0,51mm y longitud de 1,08 m. La fuente de alimentación alimentará el sistema con una tensión de 15,15 V para el actuador de baja temperatura sin funda Bowden, y de 11,5 V para el actuador con ventilación, debido a la limitación que se produce al conectarlo al circuito. Pese a que se debe alimentar a 18,6V ambos actuadores no ha sido posible por la fuente de tensión utilizada y el empleo del ventilador.

Para el actuador de baja temperatura la fuerza ejercida de 29,4N en sentido vertical (3 kg.), mientras que para el actuador con ventilación y funda Bowden es de 1 kg en sentido vertical. No ha sido posible realizar la prueba con 3 kg al tener comportamientos extraños como romper el hilo o no realizar ningún movimiento.

Como se puede apreciar en la Fig. 7.22 el comportamiento hasta llegar al primer escalón es mejor el actuador con ventilador y funda Bowden, pero en líneas generales tiene un mejor comportamiento el actuador de baja temperatura simple. Una vez que ha llegado a una amplitud de 3.200 unidades (1,536 mm) el actuador con funda Bowden y ventilación



no desarrolla ningún tipo de contracción pese a que se sigue suministrando energía como se verá posteriormente. Esto sucede porque la temperatura de activación es relativamente baja, se suministra calor continuamente a la funda Bowden y se está administrando enfriamiento continuamente mediante el ventilador.

En la etapa de enfriamiento, pese a que el actuador con funda Bowden y ventilación parten de un punto más próximo a la referencia es más lento. La energía suministrada sin realizar cualquier tipo de contracción en el actuador se ha transformado en una alta temperatura del actuador, la funda Bowden y el tubo PTFE, por lo que será necesario un mayor tiempo de enfriamiento mediante la ventilación.

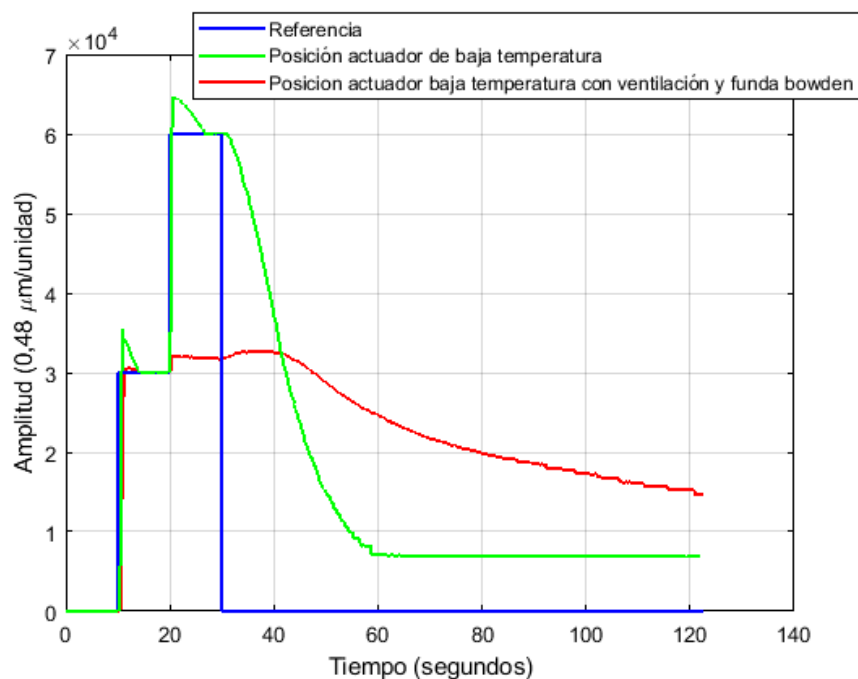


Fig. 7.22: Respuesta escalón: SMA baja temperatura vs SMA baja temperatura con ventilación y funda Bowden.

Podemos comprobar como el actuador con ventilación y funda Bowden necesita mayor energía (Fig. 7.23). Necesita una mayor temperatura debido a que se está produciendo una continua ventilación sobre el actuador y un continuo cambio de temperatura con la funda Bowden y el tubo de PTFE, lo que hace que disminuya constantemente la temperatura con la necesidad de aplicar más energía para lograr la referencia. Comprobamos como en el segundo escalón, para el tiempo comprendido entre 20 – 30 segundos se está aplicando el 100% del suministro de energía, pero pese a ello no se ha logrado contraer el actuador con ventilación y funda Bowden.

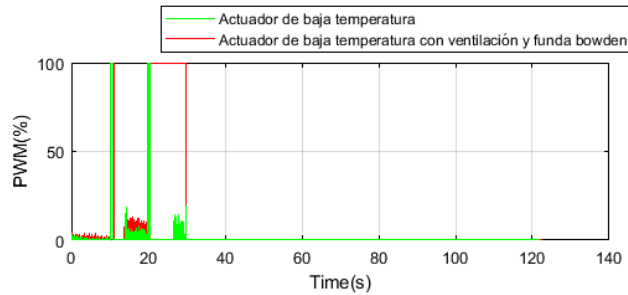


Fig. 7.23: Respuesta escalón PWM: SMA baja temperatura vs SMA baja temperatura con ventilación y funda Bowden

No se ha podido realizar la señal sinusoidal para el actuador de baja temperatura con ventilación y funda Bowden porque los movimientos constantes de la amplitud  $\pm 30.000$  unidades con un offset de 30.000 unidades causan grandes daños en el actuador. Tampoco se ha logrado suministrar energía para poder desplazar el actuador a más de 32.000 unidades, por lo que no ha sido posible realizar dicha prueba.

### 7.9 Actuador de baja temperatura (60°C) con funda Bowden y ventilación vs actuador de alta temperatura (90°C) con funda Bowden y ventilación.

Se ha utilizado un hilo de activación a 60°C y otro actuador con activación a 90°C. En ambos casos el diámetro de es de 0,51mm, la longitud de 1,08 m y la masa será de 1 kg en sentido vertical. Se alimentarán ambos actuadores con una tensión de 11,5 V, esta limitación se produce por la conexión del ventilador en el circuito, pese que debería ser de 18,6 V.

Los actuadores con funda Bowden y ventilación tiene peor comportamiento en la fase de calentamiento por la transmisión de calor al estar en contacto con el tubo de PTFE y la funda Bowden (Fig. 7.24). En este caso, el actuador con activación tiene un mejor comportamiento hasta la llegada del primer escalón (30.000 unidades aproximadamente). Esto ha sido posible porque no se ha necesitado tanta temperatura, en el caso del actuador de alta temperatura se ha suministrado una tensión la cual ha transmitido parte del calor hacia la funda Bowden y el tubo PTFE mientras se producía la ventilación. En el caso de baja temperatura también, pero al ser inferior su activación se ha transmitido menos. Una vez que ha llegado al primer escalón, el mejor comportamiento ha sido del actuador de activación a alta temperatura. Todo el calor aportado mediante el efecto Joule hacia el actuador a baja temperatura ha sido transmitido a la funda Bowden y enfriado por el

ventilador, por lo que no ha sido posible que se produzca un movimiento siguiendo la referencia fruto de la baja temperatura de activación y la limitación de la alimentación.

Una vez que se produce la etapa de enfriamiento, el actuador de baja temperatura está a una temperatura alta tanto en el actuador como en la funda Bowden siendo complicado su enfriamiento al haber estado desarrollando un calentamiento a máxima potencia para llegar a la posición esperada (Fig. 7.24). Sin embargo, para el actuador de activación a alta temperatura, el enfriamiento ha sido más rápido al estar en contacto con la funda Bowden y con ventilación pudiendo disminuir rápidamente parte de ese calor. En este caso la funda Bowden y el actuador no han llegado a temperaturas tan altas debido a que no se ha administrado un calentamiento a máxima potencia ya que ha llegado fácilmente a la referencia de 60.000 unidades.

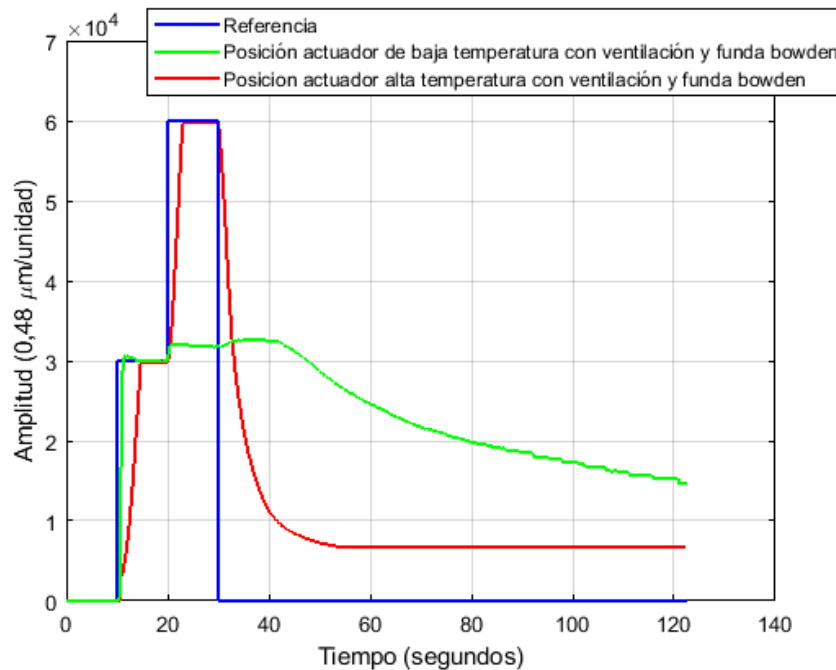


Fig. 7.24: Respuesta escalón: SMA baja temperatura con ventilación y funda Bowden vs SMA alta temperatura con ventilación y funda Bowden.

En términos de consumo de energía, comparamos ambas señales en la gráfica de la Fig. 7.25 pudiendo ver como el área del actuador basado en SMA de alta temperatura es mayor, implicando un mayor consumo de energía. Durante el primer escalón se ha suministrado más energía para lograr llegar al punto de referencia. Hay que destacar que, durante el segundo escalón pese a ser el área del actuador de alta temperatura mayor, el

suministro de energía durante el periodo de 20 segundos a 30 es del 100% para el actuador de baja temperatura.

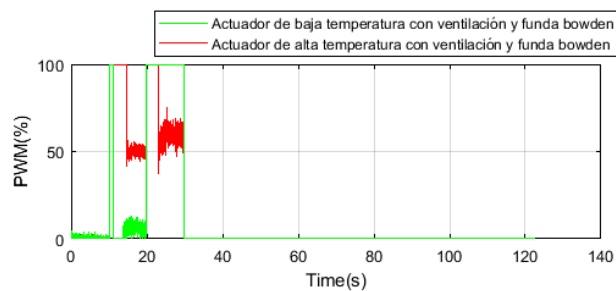


Fig. 7.25: Respuesta escalón PWM: SMA baja temperatura con ventilación y funda Bowden vs SMA alta temperatura con ventilación y funda Bowden

No se ha podido realizar la señal sinusoidal para el actuador de baja temperatura con ventilación y funda Bowden porque los movimientos constantes de la amplitud  $\pm 30.000$  unidades con un offset de 30.000 unidades causan grandes daños en el actuador.

### **7.10 Tres actuadores de alta temperatura (90°C) en fundas separadas vs tres actuadores de baja temperatura (60°C) en fundas separadas.**

Se han utilizado 3 hilos de activación a 90°C y 3 hilos de activación a 60°C. En ambos casos el diámetro es de 0,51mm, la longitud de 1,08 m, la fuerza ejercida de 29,4 N para una masa de 3 kg en sentido vertical. Cada actuador por separado va introducido en un tubo de PTFE, pero a su vez los 3 actuadores de la misma T<sup>a</sup> de activación irán dentro de otro tubo PTFE de mayor diámetro, por lo que estarán en un mismo tubo en fundas separadas. La fuente alimentará el sistema con una tensión de 15,15 V, pese a que con los parámetros ideales debe alimentar a 18,6 V ambos actuadores no ha sido posible por la fuente de tensión utilizada.

Al igual que sucedía en la comparación simple de un actuador de alta temperatura vs actuador de baja temperatura tiene un comportamiento similar a la hora del calentamiento. Podemos apreciar que en ambos escalones los actuadores de baja temperatura tardan sobre 1,5 segundos menos en calentarse (Fig. 7.26). Sucede gracias a su temperatura de activación, pero también tienen un pico una vez que ha llegado a cada escalón como consecuencia de la poca diferencia de temperatura que se debe suministrar para llegar al punto de referencia.

En cuanto a la etapa de recuperación se puede observar cómo mejora el actuador de alta temperatura, tener una mayor temperatura de activación implica que el tiempo de enfriamiento será menor al tener mayor diferencia de temperatura con el ambiente (Fig. 7.26). En el caso de la comparación simple entre baja y alta temperatura la diferencia era considerable, por lo que con 3 cables con dos fundas de PTFE la diferencia es mucho mayor. Se ha desarrollado una prueba para poder medir el comportamiento del enfriamiento de los 3 actuadores de baja temperatura, para 30.000 unidades ha necesitado 241 segundos, mientras que el actuador de alta temperatura ha necesitado 3 segundos.

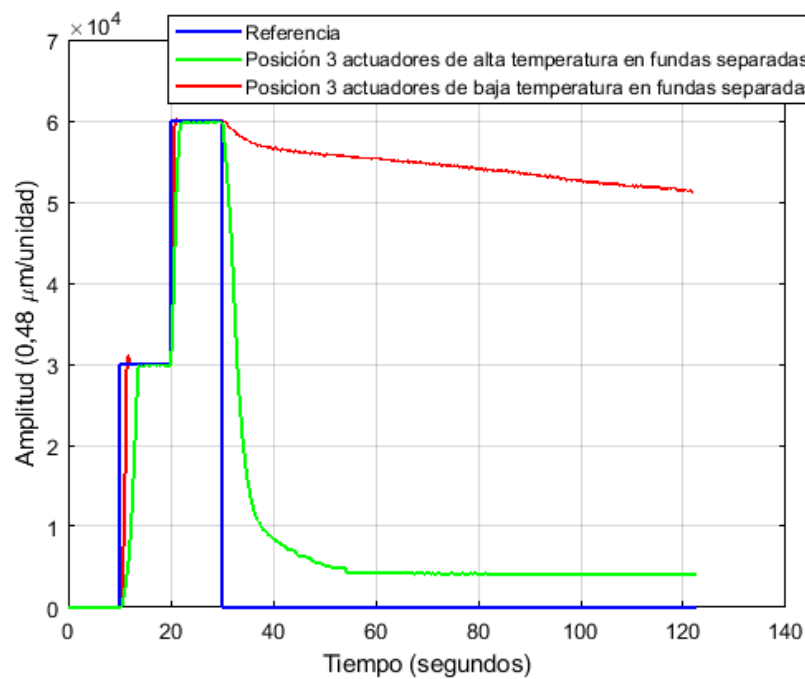


Fig. 7.26: Respuesta escalón: 3 SMA alta temperatura en fundas separadas vs 3 SMA baja temperatura en fundas separadas.

En términos de consumo de energía comparamos ambas señales en la gráfica de la Fig. 7.27 pudiendo ver como el área del actuador basado en SMA de alta temperatura es mayor, implicando un mayor consumo de energía. Esto se debe a la necesaria temperatura de activación (es mayor) mediante el efecto de Joule.

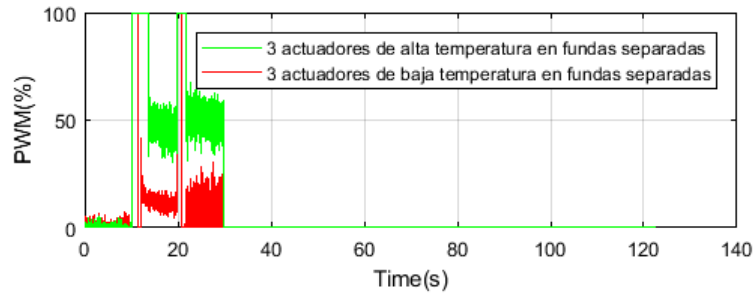


Fig. 7.27: Respuesta escalón PWM: 3 SMA alta temperatura en fundas separadas vs 3 SMA baja temperatura en fundas separadas.

Al igual que sucede ante la señal escalón, el principal problema de los actuadores de baja temperatura es el tiempo de enfriamiento. Observamos como el comportamiento es preciso en ambos actuadores cuando se trata de calentar, pero a la hora de enfriar es muy distinto, los actuadores de baja temperatura no pueden volver a la posición inicial desarrollando su máximo enfriamiento en 57.000 unidades de amplitud (Fig. 7.28).

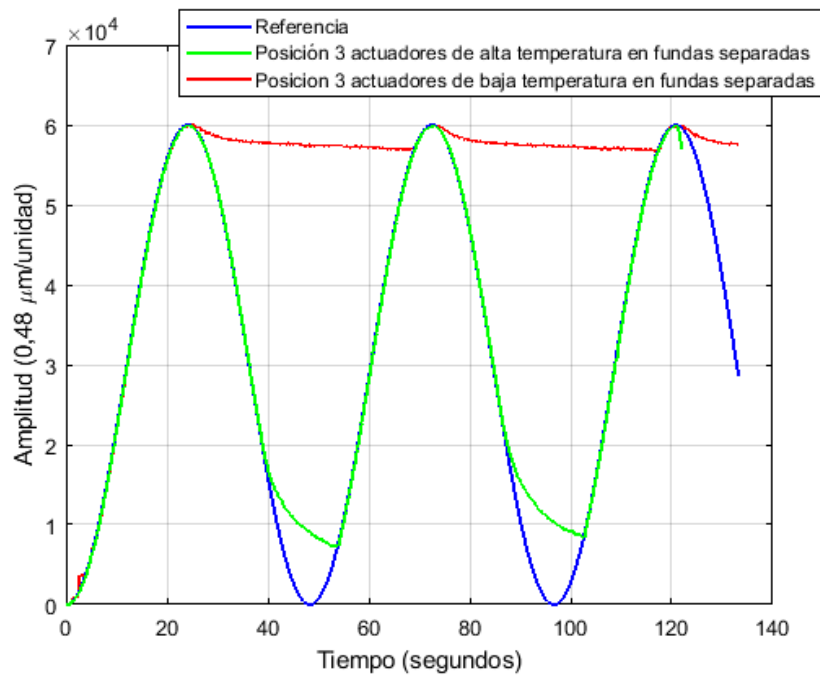


Fig. 7.28: Respuesta sinusoidal: 3 SMA alta temperatura en fundas separadas vs 3 SMA baja temperatura en fundas separadas.

## CAPÍTULO 8

### PLANIFICACIÓN

Una buena planificación estimada del proyecto nos permitirá dar fiabilidad a su realización. Para su elaboración se han seguido diferentes fases, las cuales podrán observarse en el diagrama de la Fig. 8.1 con su correspondiente explicación.

Nº	Nombre de la actividad	ENERO	FEBRERO		MARZO		ABRIL		MAYO	
		15 - 31	1 - 15	15 - 28	1 - 15	15 - 31	1 - 15	15 - 30	1 - 15	15 - 31
1	1. Fase de inicio.									
2	1.1 Búsqueda de información.									
3	1.2 Estado del arte.									
4	2. Estudio y diseño de banco de pruebas.									
5	2.1 Estudio y mejoras a desarrollar.									
6	2.2 Realización del diseño.									
7	2.3 Montaje.									
8	3. Pruebas.									
9	3.1 Realización de pruebas.									
10	3.2 Análisis de resultados.									
11	4. Redacción del documento.									

Fig. 8.1: Planificación.

#### 1. Fase de inicio.

Etapa para familiarizarse con el estudio a realizar. Se debe conocer todo sobre el SMA, los bancos de pruebas existentes para el estudio y las investigaciones desarrolladas. La búsqueda de información y el estado del arte son la base de este proyecto.

#### 2. Estudio y diseño de banco de pruebas.

Una vez conocidos los aspectos anteriores se estudian las mejoras sobre los bancos de pruebas teniendo en cuenta el estado del arte. Para llevar a cabo la realización de las pruebas con sus características se desarrolla un diseño específico para cada pieza teniendo en cuenta su correspondiente uso y colocación.

El diseño de las piezas se realiza gracias al programa SolidEdge®. Una vez diseñadas, se procede al montaje completo comprobando su funcionamiento, si no es correcto, se debe volver a realizar hasta cumplir las condiciones.

#### 3. Pruebas.

Las simulaciones de los actuadores basados en SMA son desarrolladas gracias a nuestro banco de pruebas, una fuente de alimentación, una etapa de potencia con transistor

MOSFET, un sensor de posición de efecto Hall NSE-5310, un controlador PWM basado en el kit STM23F4 y el software Matlab® instalado en nuestro ordenador. El programa utilizado para la conexión de todos los elementos, las referencias y la lectura de datos ha sido desarrollada por el grupo de investigación RoboticsLab de la UC3M [2]. Todo ello nos proporciona unas gráficas para analizar el comportamiento de cada actuador con sus correspondientes características.

#### **4. Redacción del documento.**

Para la realización de la memoria se tienen en cuenta todos los aspectos que se han llevado a cabo a lo largo del proyecto, teniendo en cuenta las guías del trabajo de fin de grado de la UC3M [43].



## CAPÍTULO 9

### ENTORNO SOCIO-ECONÓMICO

En este capítulo se analizará tanto el presupuesto del desarrollo del proyecto como el impacto socio-económico.

#### 9.1 Presupuesto.

Se ha distinguido en varios apartados siendo estos: la mano de obra, el coste del material según si pertenece a los experimentos respecto al SMA o a la fabricación del banco de pruebas, el software, los gastos indirectos y los costes de amortización.

##### 9.1.1 Mano de obra.

El precio de la mano de obra para un Ingeniero Electrónico Industrial y Automático se ha supuesto de 15 €/hora, mientras que para un Doctor Ingeniero se ha supuesto de 30 €/hora [44]. Estos datos se basan en la media anual cobrada en España entre el número de horas trabajadas. Podemos ver el coste de la mano de obra en la TABLA 9.1.

TABLA 9.1: COSTE MANO DE OBRA.

Descripción	Unidad	Cantidad	Precio	Precio total
Documentación y estado del arte	Horas	36	15 €/hora	540 €
Diseño	Horas	28	15 €/hora	420 €
Realización de tornillos	Horas	4	15 €/hora	60 €
Realización y montaje	Horas	23	15 €/hora	345 €
Realización de pruebas	Horas	91	15 €/hora	1.365 €
Redacción del documento	Horas	127	15 €/hora	1.905 €
Tutor: Dorin Sabin Copaci	Horas	15	30 €/hora	450 €
			<b>Coste total</b>	<b>5.085 €</b>

##### 9.1.2 Material.

Se han realizado dos subdivisiones como se puede observar en la TABLA 9.2 según si el material tiene relación con el actuador basado en SMA o con el banco de pruebas [45].

TABLA 9.2: COSTE DE MATERIALES.

Descripción	Unidad	Cantidad	Precio	Precio total
En relación al actuador SMA				375,1 €
Hilo de Ø 0,51 mm y 95 °C	Metros	15,6	6 €/metro	93,6 €
Hilo de Ø 0,51 mm y 60 °C	Metros	13,2	10 €/metro	132 €
Hilo de Ø 0,38 mm y 95 °C	Metros	1,2	6 €/metro	7,2 €
Hilo de Ø 0,38 mm y 55 °C	Metros	1,2	10 €/metro	120 €
Silicona	Metros	3	0,95 €/metro	2,9 €
Teflón	Metros	7,2	1,75 €/metro	12,6 €
Funda bowden	Metros	2	3,40 €/metro	6,8 €
En relación al banco de pruebas				105 €
Perfil ranurado de aluminio en T	Metros	4	12,75 €/metro	51 €
Filamento pla	Metros	133	0,06 €/metro	8 €
Etapa de potencia	Unidades	1	14 €	14 €
Controlador PWM	Unidades	1	18 €	18 €
Sensor de posición NSE 5310	Unidades	1	6 €	6 €
Resto de elementos			8 €	8 €
			<b>Coste total</b>	<b>480,1 €</b>

### 9.1.3 Software.

Las licencias de los softwares utilizados forman parte de la UC3M de Madrid, por lo que pueden acceder a ello todas las personas relacionadas con la universidad. Existe la opción de hacer uso de la licencia en las aulas de la universidad y en los ordenadores propios, por lo que el coste del software es de 0 € (TABLA 9.3).

TABLA 9.3: COSTE SOFTWARE.

Descripción	Unidad	Cantidad	Precio	Precio total
Solid Edge®	Licencia	2	0 €	0 €
Repertier Host	Licencia	1	0 €	0 €
Matlab Simulink®	Licencia	2	0 €	0 €
			<b>Coste total</b>	<b>0 €</b>

### 9.1.4 Gastos indirectos.

Se tienen en cuenta los gastos indirectos de la realización de todo el proyecto, así como la electricidad consumida (ordenadores, iluminación, fuentes de alimentación, etc.) o el internet. El precio del KW/hora es una aproximación teniendo en cuenta el precio diurno y nocturno [46]. El precio del consumo de internet al día es una aproximación suponiendo un coste mensual de 43,2 €. Como no es posible tener en cuenta las horas completas de consumo de internet se ha contado como 1 hora si en el periodo de ese tiempo se ha utilizado en algún momento. Todo ello lo podemos observar en la TABLA 9.4.

TABLA 9.4: COSTE GASTOS INDIRECTOS.

Descripción	Unidad	Cantidad	Precio	Precio total
Electricidad	Horas	448	0,1553 KW/hora	69,6 €
Internet	Horas	206	0,06 €/hora	12,4 €
			<b>Coste total</b>	<b>82 €</b>

### 9.1.5 Amortización

En cuanto a la amortización se han tenido en cuenta los equipos más importantes utilizados, es decir, ordenadores, fuente de alimentación e impresora 3D (TABLA 9.5). Para ello nos hemos basado en la Ley 27/2014, de 27 noviembre, del Impuesto de Sociedades publicada en el BOE núm. 288, de 28 noviembre de 2014. Esta ley dice que los equipos electrónicos se pueden amortizar en un máximo de 10 años, con un coeficiente lineal máximo del 20% y en un mínimo de 5 años y los equipos para procesos de información se pueden amortizar en un máximo de 8 años, con un coeficiente lineal máximo del 25% y un mínimo de 4 años.

TABLA 9.5: COSTE AMORTIZACIÓN.

Descripción	Coste equipo	Coefficiente de amortización	Amortización al mes	Tiempo usado (meses)	Precio total
Ordenador universidad	292 €	25%	6,08 €	5	30 €
Ordenador propio	419 €	25%	8,70 €	5	44 €
Fuente de alimentación	285,80 €	20%	4,80 €	2	10 €
Impresora 3D	213 €	20%	3,55 €	2	7 €
				<b>Coste total</b>	<b>91 €</b>

### 9.1.6 Coste total

En este apartado podremos comprobar el precio de todo el proyecto (TABLA 9.6).

TABLA 9.6: COSTE TOTAL DEL PROYECTO.

Capítulo	Concepto	Precio
7.1.1	Mano de obra	5.085 €
7.1.2	Material	480,1 €
7.1.3	Software	0 €
7.1.4	Gastos indirectos	82 €
7.1.5	Amortización	91 €
<b>Total</b>		<b>5.738,1 €</b>
<b>IVA (21%)</b>		<b>1.205,00 €</b>
<b>Coste del proyecto</b>		<b>6.943,10 €</b>

## **9.2 Impacto socio-económico.**

Debido a no poder realizar un impacto socio-económico sobre el estudio y análisis de los actuadores basados en SMA, se realizará un análisis social y económico de la influencia de estos actuadores en detrimento de los actuadores convencionales hidráulicos, neumáticos y eléctricos.

En primer lugar, atenderemos el impacto social teniendo una reducción en cuanto al impacto ambiental, debido a la necesidad de utilizar un menor número de materiales para realizar un trabajo. Los actuadores convencionales necesitan para su realización diferentes materiales como motores, bombas, válvulas, tubos, etc., mientras que el actuador basado en SMA necesita solamente su propia composición, la aleación de níquel y titanio [27]. El principal problema de los actuadores convencionales es la limitación de su utilización por su peso, tamaño y complejidad. El actuador basado en SMA tiene un pequeño tamaño y peso, pese a tener un control complejo. Es capaz de reducir el tamaño de los generadores convencionales manteniendo la misma salida, reducirá así el gasto de energía eléctrica.

En cuanto al hecho económico, hoy día es negativo. El solapamiento del desarrollo de las aleaciones y su introducción en el mercado han supuesto un coste superior al esperado intentando cubrir los gastos a corto plazo causados por su investigación, pese a ser relativamente baratos no se han podido implementar en algunos proyectos [18]. Sin embargo, se espera abaratar en los próximos años e introducirlos en la fabricación en masa de diseños y aplicaciones de actuadores. El precio de un actuador basado en SMA es menor que un actuador convencional, pese a ello, para algunos productos y proyectos es indispensable hacer uso de actuadores convencionales por fiabilidad y control o desconocimiento de los actuadores basados en SMA.

El impacto socio-económico actual es negativo al ser un producto nuevo, desconocido en muchos sectores y con un precio elevado al esperado, pese a mejorar el impacto medioambiental no ha contado con la confianza de clientes particulares ni grandes empresas. Sin embargo, se espera que en el futuro este impacto sea positivo, sucederá cuando tengan mayor fiabilidad, un control de posición y precios menores para su fabricación en masa.

## CAPÍTULO 10

### MARCO REGULADOR

Desarrollaremos el análisis de la legislación aplicable a los actuadores basados en SMA y las licencias necesarias para llevar a cabo los diseños y pruebas realizadas.

Debemos conocer la legislación actual de Europa y concretamente de España, hay que guiarse por los marcos reguladores del país donde se ha realizado dicho proyecto. En el Boletín Oficial del Estado u otras páginas oficiales de normativas no se ha encontrado ninguna ley ni normativa sobre el control de SMA o sobre bancos de pruebas de actuadores basados en SMA. Para llevar a cabo todas las pruebas se ha tenido en cuenta en todo momento el documento de prevención de riesgos laborales de UC3M [47].

No existe ninguna norma o ley que regule el estudio, investigación o uso del SMA. Las normas sobre SMA han sido encontradas en Aenor, formando parte de la Asociación Española de Normalización y Certificado desde el año 1986 según la Ley 191/1964, de 24 de diciembre, de Asociaciones. La única posibilidad de acceder completamente a la normativa publicada por Aenor es comprar dichas normas por un valor de 42,71€ cada una de ellas, por ello solo se han podido comentar los aspectos con acceso gratuito.

Las normas F2516-14 y D2516-18 de métodos de pruebas estándar para pruebas de tensión de materiales súper elásticos de níquel-titanio proporcionan información sobre la resistencia y ductilidad sobre materiales bajo esfuerzos de tracción uniaxiales [48] [49]. Cubre los valores de la tensión específica para determinar la resistencia superior, inferior, el alargamiento residual, la resistencia a la tracción y la elongación. Los valores indicados en unidades del SI se consideran estándar y esta norma no acepta otras unidades de medida [48] [49]. No aborda los problemas de seguridad por su uso, es responsabilidad del usuario establecer prácticas adecuadas de seguridad y salud y determinar las limitaciones reglamentarias antes de su uso [48] [49].

Se recomienda no tocar el actuador basado en SMA mientras se está aplicando una tensión o cuando se haya finalizado de aplicarla. Se debe apagar la fuente de alimentación y esperar unos segundos para que pueda enfriarse el hilo. Tocar el actuador introduciéndole tensión o nada más apagar la fuente puede suponer quemaduras producidas por la temperatura alcanzada, entre las más empleadas en este caso será una temperatura mínima de 60°C si es baja T<sup>a</sup> o 90°C si es a alta T<sup>a</sup>, dependiendo de su T<sup>a</sup> de activación.

Se recomienda el uso de un extensómetro para cables con un diámetro superior a 0,2 mm con un método de prueba diseñado para ejercer una tensión en el material llegando hasta un 6% de tensión y luego descargar el material a un valor menor de 7 MPa antes de ser desechado [50]. Debe tener una medición de tensión precisa, un agarre seguro para el cable y una respuesta precisa [50].

La normativa para fuentes de alimentación se basa en las normas UNE-EN 61558-1:2007 y UNE-EN 61558-2-1:2007. En ellos se abarca la seguridad de los transformadores de potencia, fuentes de alimentación de baja tensión, bobinas de inductancia y productos análogos. Se verán los temas de seguridad eléctrica, térmica y mecánica [51].

La fuente de alimentación usada proporciona un rango de tensión de salida de 0 a 15,15 voltios, aunque en alguna prueba también se ha facilitado una de 0 a 30V. La salida está totalmente protegida contra cortocircuitos, es posible ajustar fácilmente tanto los parámetros de tensión de salida como los de intensidad máxima. El equipo debe estar conectado a tensiones no peligrosas respecto al potencial de tierra [52]. Al utilizar tensiones menores a 60 voltios en continua o 30 de valor eficaz en alterna no se considera potencialmente peligroso [52]. Las precauciones para seguir son: no se debe obstruir el sistema de ventilación, no colocar o exponer el equipo en instalaciones húmedas o mojadas, usarlo con ropa seca y zapatos de goma garantizando el aislamiento, y no realizar ninguna reparación sin estar cualificado para ello [52].

La normativa de uso de software legal es una obligación que debe garantizar el cumplimiento de las restricciones legales existentes en materia jurídica [53]. La legislación que regula la propiedad del software es fundamentalmente el Texto Refundido de la Ley de la Propiedad Intelectual, aprobada por el Real Decreto Legislativo 1/1996, de 12 de abril [53]. Para los softwares utilizados, es decir, Matlab®, Solid Edge® y Repertier Host es necesario contar con una licencia que permita el uso y el acceso a algunas herramientas proporcionadas. Para ello, se ha hecho uso de la licencia de la UC3M y las licencias académicas gratuitas proporcionadas por la universidad para poder trabajar los alumnos desde ordenadores personales. Existen licencias que abarcan más herramientas, en este caso no ha sido necesario debido a que serían de ámbito profesional. Para finalizar, hay que destacar que en relación con el banco de pruebas creado no se va a realizar ninguna patente.

## CAPÍTULO 11

### CONCLUSIÓN Y TRABAJOS FUTUROS

En dicho capítulo tenemos las conclusiones de nuestro trabajo y los posibles futuros trabajos relacionados. Los aspectos más importantes han sido el desarrollo del banco de pruebas y el estudio y análisis de los actuadores basados en SMA.

#### 11.1 Conclusión

Se ha realizado un banco de pruebas que cumple con las mejoras y requerimientos propuestos. Nos permite realizar pruebas con diferentes actuadores, y configuraciones para modificar su comportamiento y analizar de forma fiable sus movimientos. Los hilos se deben de colocar en los extremos para ejercer cierta tensión gracias a una fuente de alimentación.

Para realizar el análisis de los actuadores basados en SMA ha sido imprescindible el banco de pruebas realizado. En él se han desarrollado los experimentos con distintas configuraciones y referencias con una lectura del movimiento producido en el actuador con una resolución de  $0,48\mu\text{m}$ . Una vez realizadas las pruebas haremos diversas comparaciones analizando el comportamiento según la señal de referencia escalón y/o sinusoidal. Gracias a las distintas gráficas de los datos obtenidos analizaremos:

- El comportamiento del actuador una vez que se ha emitido corriente eléctrica convirtiéndose en térmica mediante el efecto Joule y posteriormente en mecánica en forma de contracción del hilo, es decir, nos permite comprobar el movimiento del actuador en la fase de calentamiento (TABLA 11.1).
- La etapa de enfriamiento se realiza una vez que se ha dejado de emitir una tensión, el actuador debe relajarse e intentar tomar la forma original. Para ello debe enfriarse gracias a diferentes métodos como la transferencia de calor a la funda Bowden, al enfriamiento mediante el aire con un ventilador o simplemente con la temperatura ambiente (TABLA 11.2).
- Las señales de respuesta de control PWM nos ayudará a conocer el consumo de energía de nuestro actuador en la etapa anterior, debido a que en la etapa de enfriamiento no hay consumo. Será la energía necesaria emitida por la fuente de

alimentación para llegar a la referencia cuando el actuador se debe contraer, es decir, cuando se está emitiendo la tensión necesaria. Cuando el actuador recupera la forma original, es decir, cuando no se le aplica cierta tensión, la señal de respuesta es 0, debido a que la fuente de alimentación estará inactiva (TABLA 11.3).

En cuanto a las comparaciones de las pruebas realizadas con los actuadores SMA podremos seleccionar la mejor opción dependiendo de las condiciones buscadas en las siguientes tablas:

TABLA 11.1: COMPARACIÓN TIEMPO DE RESPUESTA EN FASE DE CALENTAMIENTO EN ACTUADORES BASADOS EN SMA.

	Mejor tiempo en fase de calentamiento
Alta T <sup>a</sup> (90°C) vs baja T <sup>a</sup> (60°C)	Alta T <sup>a</sup> (90°C)
Alta T <sup>a</sup> (90°C) vs alta T <sup>a</sup> (95°C) con silicona	Alta T <sup>a</sup> (90°C)
Alta T <sup>a</sup> (95°C) con silicona 3 kg vs alta T <sup>a</sup> (95°C) con silicona 1 kg	Alta T <sup>a</sup> (95°C) con silicona 1 kg
Baja T <sup>a</sup> (55°C) con bowden y 3 kg vs Baja T <sup>a</sup> (55°C) con bowden y 2 kg	Baja T <sup>a</sup> (55°C) con bowden y 2 kg
Alta T <sup>a</sup> (90°C) vs alta T <sup>a</sup> (90°C) con ventilación	Alta T <sup>a</sup> (90°C)
Alta T <sup>a</sup> (90°C) con ventilación vs alta T <sup>a</sup> (90°C) con bowden y ventilación	Alta T <sup>a</sup> (90°C) con ventilación
Alta T <sup>a</sup> (90°C) con bowden vs alta T <sup>a</sup> (90°C) con bowden y ventilación	Muy parecido
Baja T <sup>a</sup> (60°C) vs baja T <sup>a</sup> (60°C) con bowden y ventilación	Baja T <sup>a</sup> (60°C)
Baja T <sup>a</sup> (60°C) con bowden y ventilación vs alta T <sup>a</sup> (90°C) con bowden y ventilación	Alta T <sup>a</sup> (90°C) con bowden y ventilación
3 actuadores 90°C en fundas separadas vs 3 actuadores 60°C en fundas separadas	Baja T <sup>a</sup> (60°C) en fundas separadas

TABLA 11.2: COMPARACIÓN TIEMPO DE RESPUESTA EN FASE DE ENFRIAMIENTO EN ACTUADORES BASADOS EN SMA.

	Mejor enfriamiento
Alta T <sup>a</sup> (90°C) vs baja T <sup>a</sup> (60°C)	Alta T <sup>a</sup> (90°C)
Alta T <sup>a</sup> (90°C) vs alta T <sup>a</sup> (95°C) con silicona	Alta T <sup>a</sup> (90°C)
Alta T <sup>a</sup> (95°C) con silicona 3 kg vs alta T <sup>a</sup> (95°C) con silicona 1 kg	Alta T <sup>a</sup> (95°C) con silicona 3 kg
Baja T <sup>a</sup> (55°C) con bowden y 3 kg vs Baja T <sup>a</sup> (55°C) con bowden y 2 kg	Baja T <sup>a</sup> (55°C) con bowden y 3 kg
Alta T <sup>a</sup> (90°C) vs alta T <sup>a</sup> (90°C) con ventilación	Alta T <sup>a</sup> (90°C)
Alta T <sup>a</sup> (90°C) con ventilación vs alta T <sup>a</sup> (90°C) con bowden y ventilación	Alta T <sup>a</sup> (90°C) con ventilación
Alta T <sup>a</sup> (90°C) con bowden vs alta T <sup>a</sup> (90°C) con bowden y ventilación	Alta T <sup>a</sup> (90°C) con bowden
Baja T <sup>a</sup> (60°C) vs baja T <sup>a</sup> (60°C) con bowden y ventilación	Baja T <sup>a</sup> (60°C)
Baja T <sup>a</sup> (60°C) con bowden y ventilación vs alta T <sup>a</sup> (90°C) con bowden y ventilación	Alta T <sup>a</sup> (90°C) con bowden y ventilación
3 actuadores 90°C en fundas separadas vs 3 actuadores 60°C en fundas separadas	Alta T <sup>a</sup> (90°C) en fundas separadas



TABLA 11.3: COMPARACIÓN DE CONSUMO DE ENERGÍA DE ACTUADORES BASADOS EN SMA.

	Menor consumo de energía
Alta T <sup>a</sup> (90°C) vs baja T <sup>a</sup> (60°C)	Baja T <sup>a</sup> (60°C)
Alta T <sup>a</sup> (90°C) vs alta T <sup>a</sup> (95°C) con silicona	Alta T <sup>a</sup> (90°C)
Alta T <sup>a</sup> (95°C) con silicona 3 kg vs alta T <sup>a</sup> (95°C) con silicona 1 kg	Alta T <sup>a</sup> (95°C) con silicona 1 kg
Baja T <sup>a</sup> (55°C) con bowden y 3 kg vs Baja T <sup>a</sup> (55°C) con bowden y 2 kg	Baja T <sup>a</sup> (55°C) con bowden y 2 kg
Alta T <sup>a</sup> (90°C) vs alta T <sup>a</sup> (90°C) con ventilación	Alta T <sup>a</sup> (90°C)
Alta T <sup>a</sup> (90°C) con ventilación vs alta T <sup>a</sup> (90°C) con bowden y ventilación	Alta T <sup>a</sup> (90°C) con bowden y ventilación
Alta T <sup>a</sup> (90°C) con bowden vs alta T <sup>a</sup> (90°C) con bowden y ventilación	Alta T <sup>a</sup> (90°C) con bowden
Baja T <sup>a</sup> (60°C) vs baja T <sup>a</sup> (60°C) con bowden y ventilación	Baja T <sup>a</sup> (60°C)
Baja T <sup>a</sup> (60°C) con bowden y ventilación vs alta T <sup>a</sup> (90°C) con bowden y ventilación	Baja T <sup>a</sup> (60°C) con bowden y ventilación
3 actuadores 90°C en fundas separadas vs 3 actuadores 60°C en fundas separadas	Baja T <sup>a</sup> (60°C) en fundas separadas

Podemos decir que los actuadores con alta temperatura de activación tienen un mejor comportamiento, aunque tienen mayor consumo de energía, pero en este caso debe ser solo un actuador sin ningún tipo de material adicional. En caso de pensar si el comportamiento del actuador mejorará si se añade un conducto de ventilación es falso, debido a que este conducto necesita una silicona sobre el actuador y solamente podrá enfriarse por un extremo, mientras que, si no, se intercambiará calor en toda su longitud con la temperatura ambiente siendo más favorable. No se recomienda la funda Bowden con ventilación a no ser que se compare solo con la ventilación, pero sí se recomienda aplicar la funda Bowden sin ninguna configuración añadida.

En caso de aplicar 3 cables en fundas separadas dependerá si se busca un mejor comportamiento a la hora de contraerse (baja T<sup>a</sup> de activación), a la hora de enfriarse (alta T<sup>a</sup>) o a la hora del consumo de energía (baja T<sup>a</sup>).

## 11.2 Trabajos futuros.

Nuestro banco de pruebas nos permitirá analizar otros actuadores o configuraciones con diferentes pesos. Si deseamos analizar otros comportamientos podremos añadir sensores a nuestro banco de pruebas, un ejemplo sería analizar el consumo de corriente de cada actuador mediante un sensor de corriente.

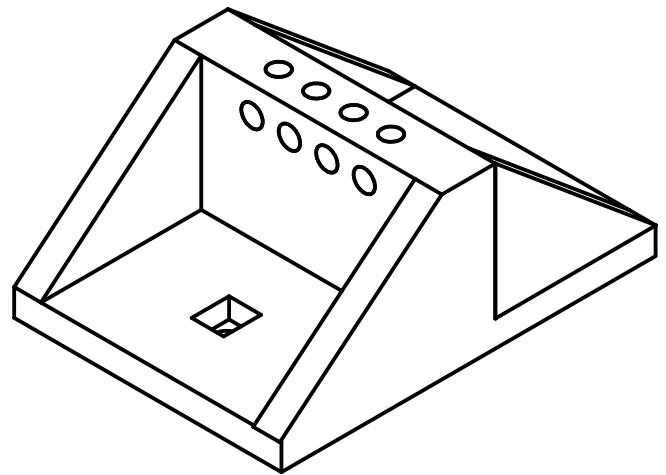
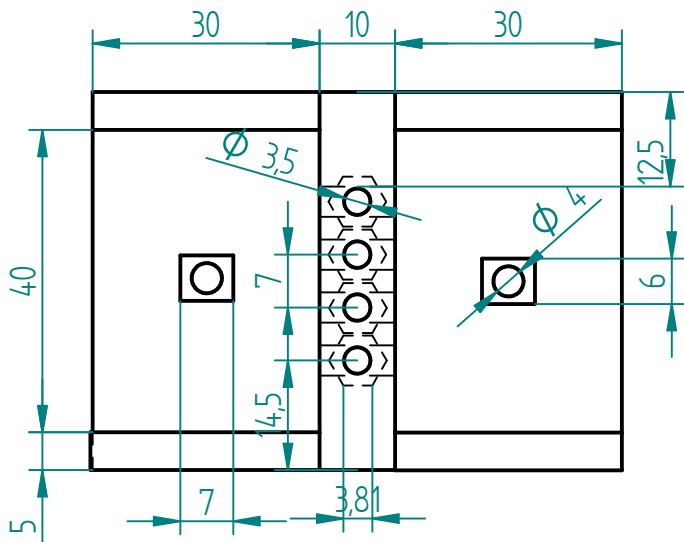
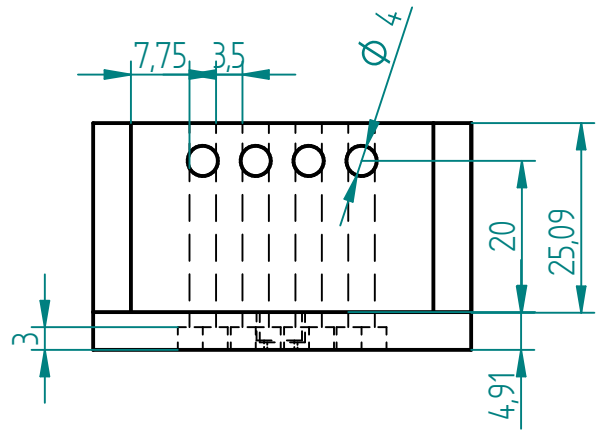
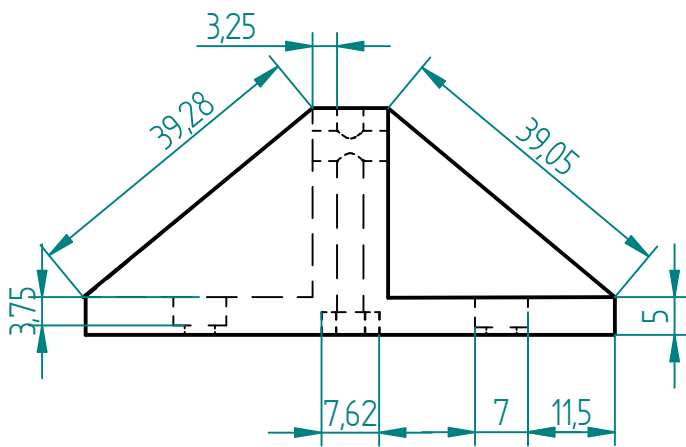
Gracias al análisis desarrollado se podrán realizar aplicaciones de actuadores SMA en dispositivos reales, para ello se debe comprobar qué tipo de actuador y configuración se debe usar en cada caso teniendo en cuenta lo que deseamos, es decir, si nos conviene tener


mayor o menor contracción, el tiempo de la fase de calentamiento, enfriamiento o consumo de energía. Nos servirá como guía para la selección del actuador. Puede formar parte de una de las líneas de investigación que se llevan a cabo en el grupo de RoboticsLab de la UC3M, es decir, la robótica de rehabilitación [2].

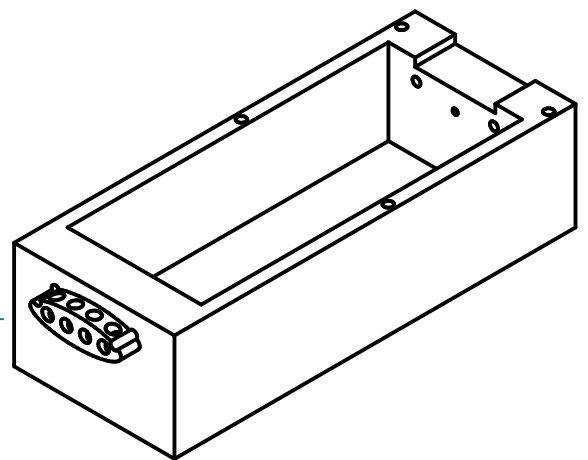
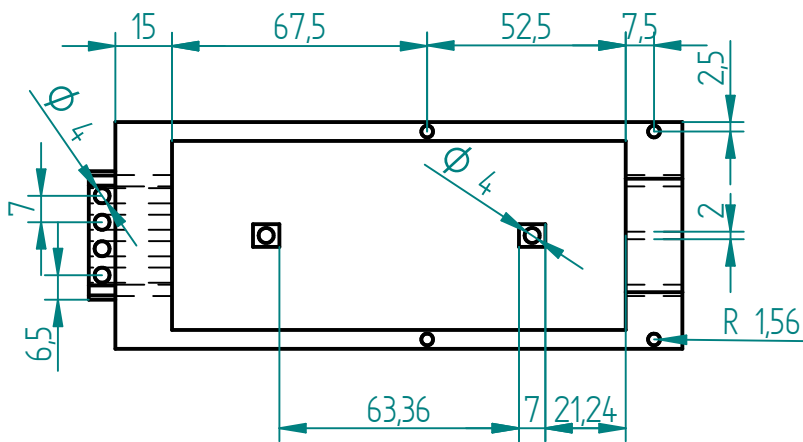
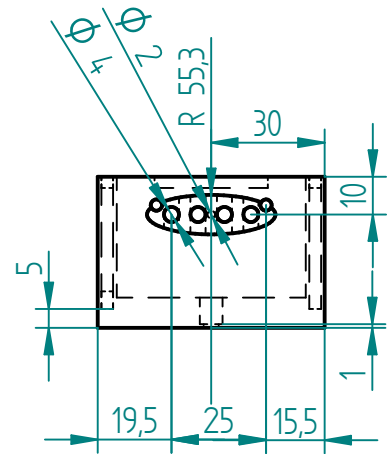
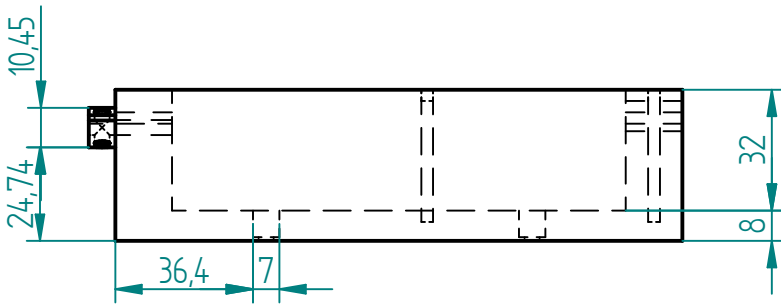



## **ANEXO: PLANOS**

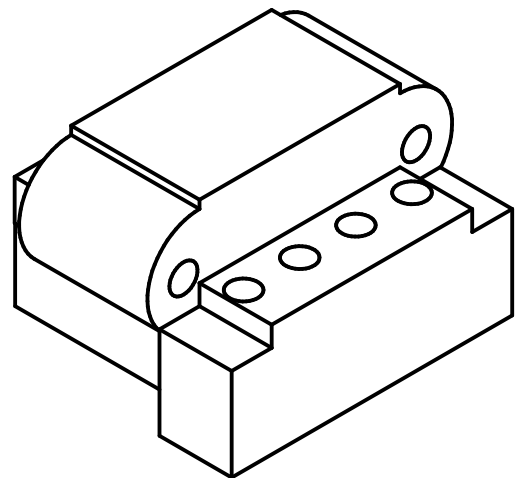
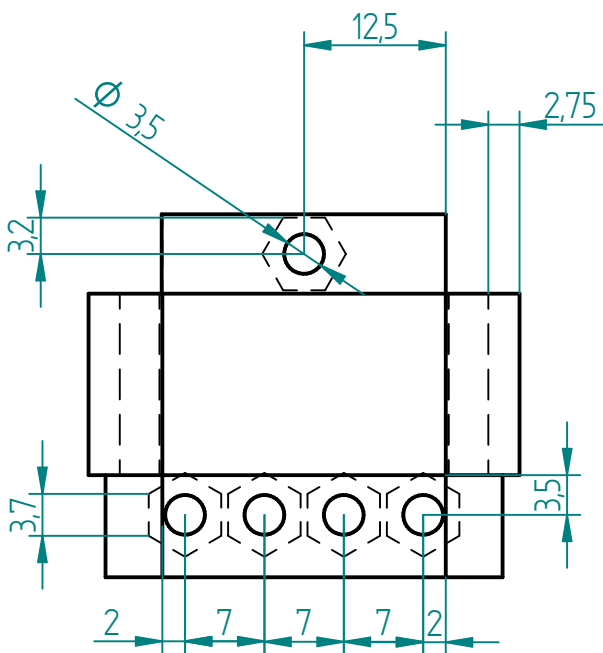
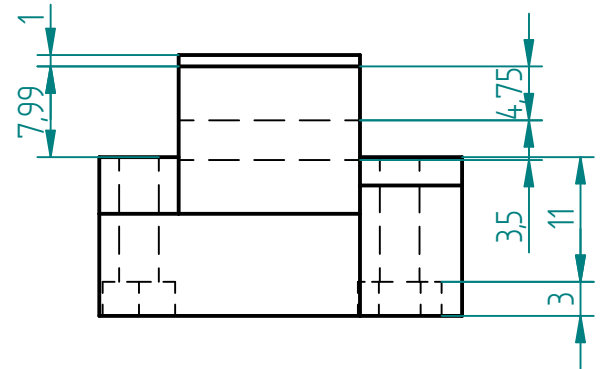
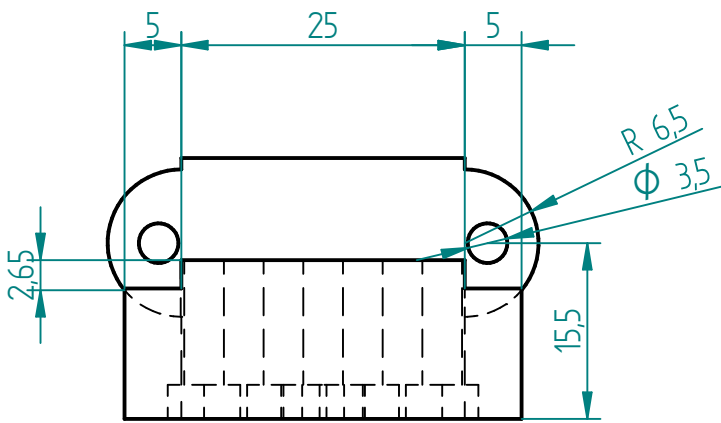
A continuación, se mostrarán los planos de todas las piezas diseñadas para la realización del banco de pruebas.




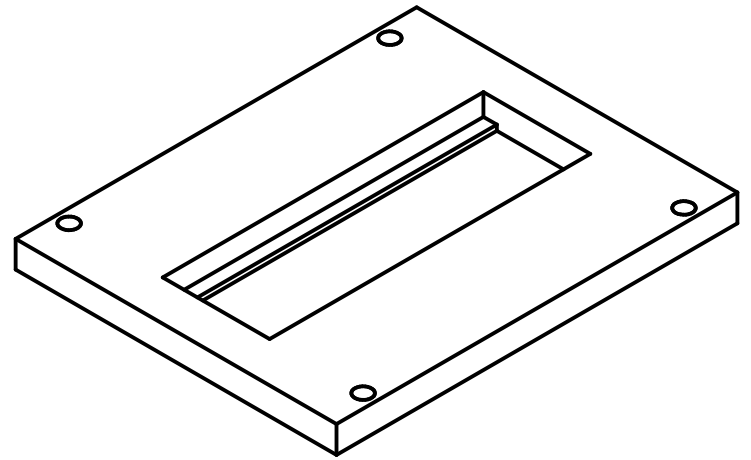
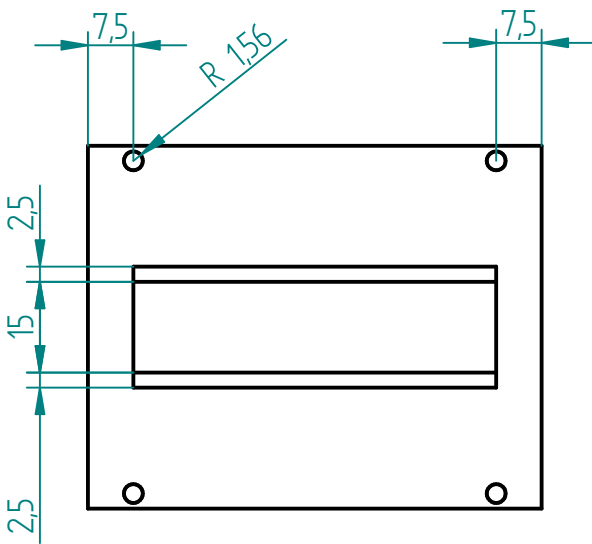
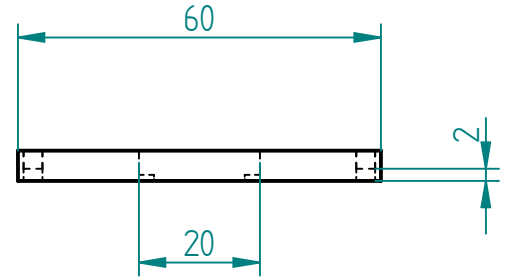
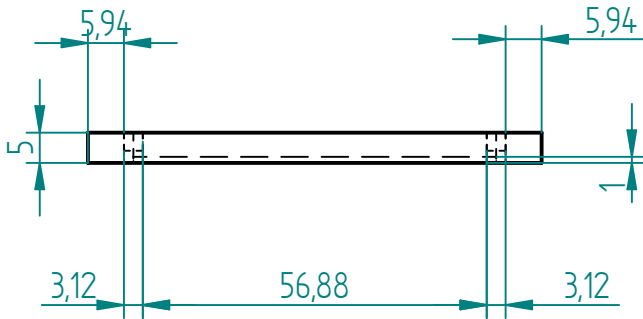
	Nº unidades: 1	Observaciones	 Universidad Carlos III de Madrid	Universidad Carlos III de Madrid
Título: Pieza 1 base				
Autor: César Carrasco León				
Escala: 1:1	Designación: Base actuadores			
			Plano nº: 1	




Nº unidades: 1		Observaciones	 Universidad Carlos III de Madrid	Universidad Carlos III de Madrid
Título: Pieza 2 base				
Autor: César Carrasco León				
Escala: 1:2	Designación: Base del carrito	Plano nº: 2		

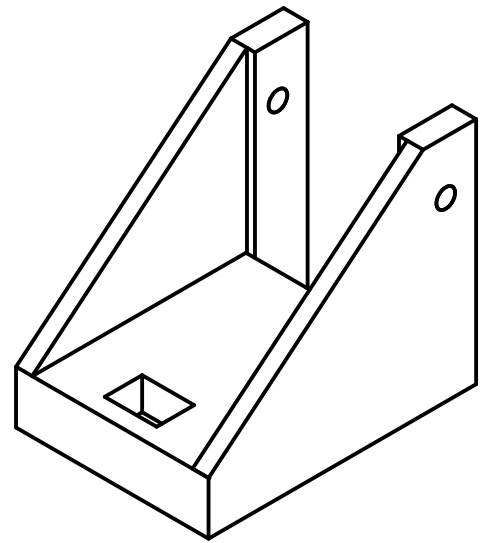
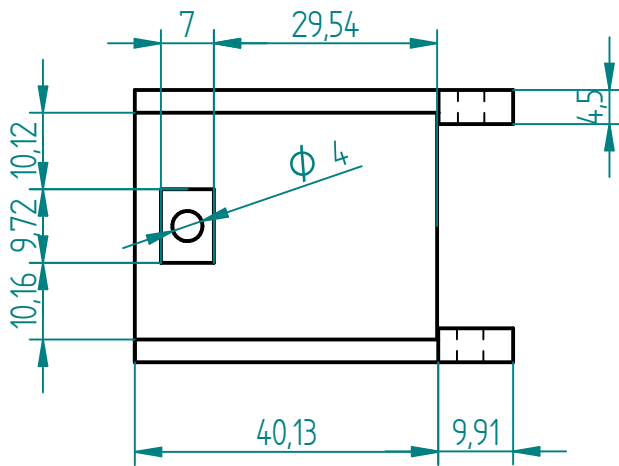
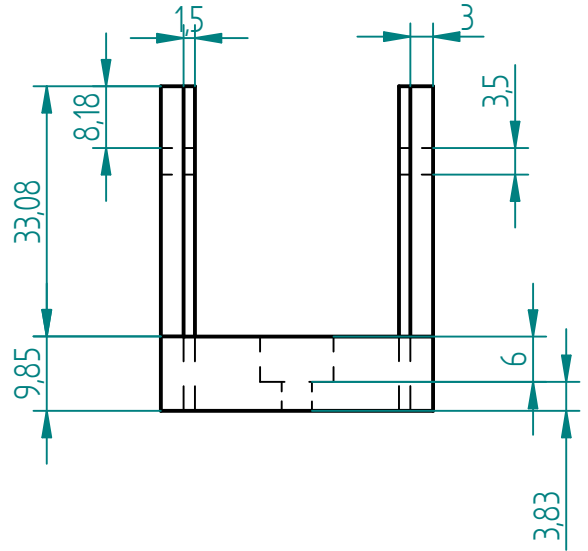
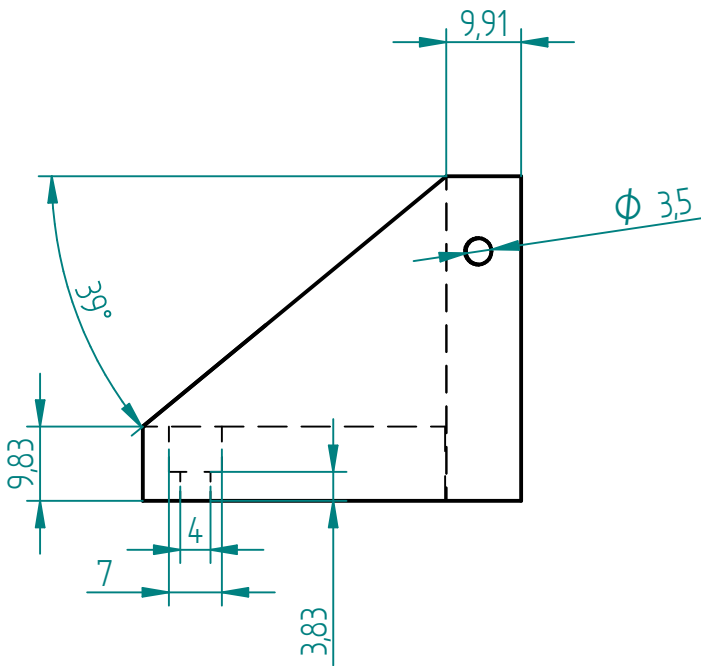



Nº unidades: 1		Observaciones	 Universidad <b>Carlos III</b> de Madrid	Universidad Carlos III de Madrid
Título: Pieza 2 carrito				
Autor: César Carrasco León				
Escala: 1,5:1	Designación: Carrito	Plano nº: 3		

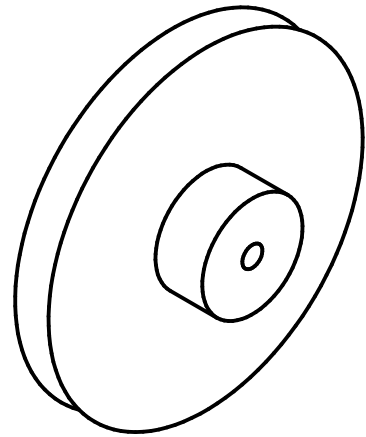
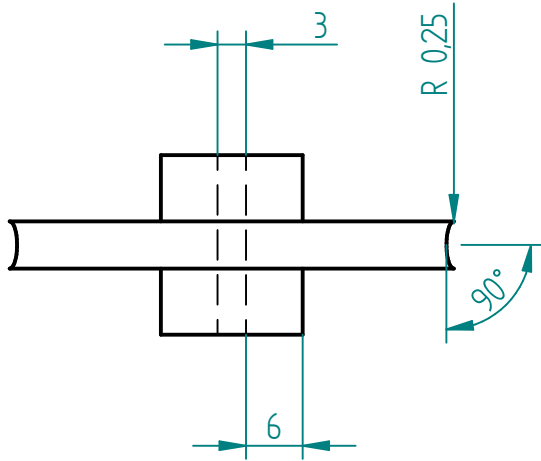
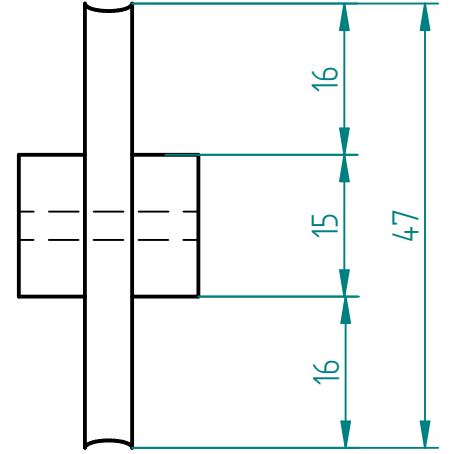
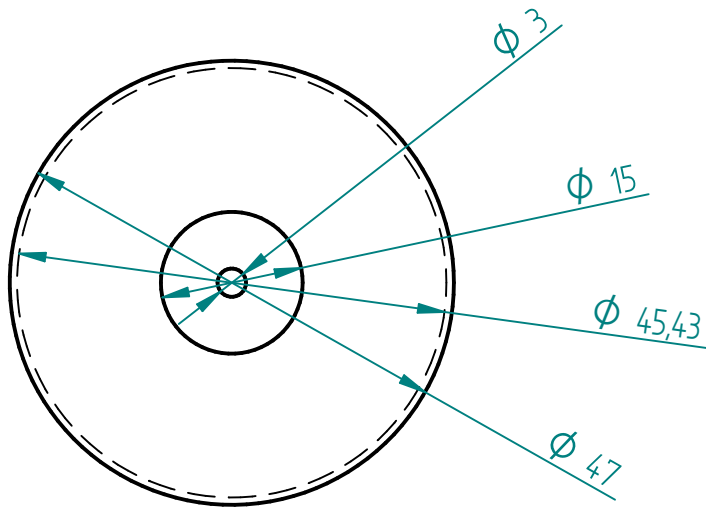



Nº unidades: 1		Observaciones	 Universidad Carlos III de Madrid	Universidad Carlos III de Madrid
Título: Pieza 2 tapadera				
Autor: César Carrasco León				
Escala: 1:1,25	Designación: Tapadera	Plano nº: 4		





	Nº unidades: 1	Observaciones	 Universidad Carlos III de Madrid	Universidad Carlos III de Madrid
Título: Pieza 3 base para polea				
Autor: César Carrasco León				
Escala: 1:1	Designación: Base para polea	Plano nº: 5		



Nº unidades: 1		Observaciones	 Universidad <b>Carlos III</b> de Madrid	Universidad Carlos III de Madrid
Título: Pieza 3 rueda de polea				
Autor: César Carrasco León				
Escala: 1,25:1	Designación: Rueda de polea	Plano nº: 6		

## BIBLIOGRAFIA

- [1] A. O. Baturone, *Robótica: Manipuladores y robots móviles*, 1ª ed. Barcelona: Marcombo, 2005.
- [2] «RoboticsLab,» RoboticsLab UC3M, [En línea]. Available: <http://roboticslab.uc3m.es/roboticslab/>. [Último acceso: 2019 Febrero 10].
- [3] C. G. Valdivia, A. B. Ortega, M. O. Salazar y H. A. Rivera, «Modelado y simulación de un robot terapéutico para la rehabilitación de miembros inferiores,» *Revista Ingeniería biomédica*, vol. 7, nº 14, 2013.
- [4] D. S. d. Cerro, «Desarrollo de un exoesqueleto de rehabilitación para miembro superior basado en SMA,» Artículo de Tesis doctoral, Dpto. Robótica, Universidad Carlos III de Madrid, España, 2018. [En línea]. Available: <https://www.researchgate.net/publication/325903831>.
- [5] M. Salichs, M. Malfaz y J. Gorostiza, «Toma de Decisiones en la Robótica,» *Revista Iberoamericana de Automática e Informática industrial RIAI*, vol. 7, nº 4, pp. 5-16, 2010.
- [6] J. N. Jover, *La ciencia y la tecnología como procesos sociales. Lo que la educación no debería olvidar*, 1ª ed. Ciudad de la Habana: Felix Varela, 1999.
- [7] A. M. Herrera y A. P. Castiblanco, «Banco de pruebas para fluidos, construcción, pruebas y simulación,» Proyecto Mecatrónico, Dpto. de ingeniería mecatrónica, Universidad piloto de Colombia, Bogotá, Colombia, 11 mayo 2014. [En línea]. Available: [https://www.researchgate.net/profile/Edwin\\_Prieto\\_Castiblanco/publication/273257919](https://www.researchgate.net/profile/Edwin_Prieto_Castiblanco/publication/273257919).
- [8] R. R. Martínez, «Diseño y construcción de un banco de pruebas de transformadores eléctricos con fines docentes,» Tesis Doctoral, Dpto. de Eléctrica, Instituto superior metalúrgico de Moa, Moa, Cuba, 2018. [En línea]. Available: <http://ninive.ismm.edu.cu/bitstream/handle/123456789/1776/Rodríguezmartínez.pdf>.
- [9] L. Instruments, «Bancos de prueba industriales y de laboratorio,» Lenz Instruments, [En línea]. Available: <https://lenz-instruments.com/es/servicio/bancos-de-tests-y-ensayos/>. [Último acceso: 5 febrero 2019].

- [10] D. S. Copaci, A. F. Caballero, A. V. Peciña y D. B. Rojas, «Modelado y simulación de actuadores SMA con carga variable,» presentada en XXXVI Jornadas de Automática, Bilbao, septiembre 2015. [En línea]. Available: <https://www.ehu.eus/documents/3444171/4484748/13.pdf>.
- [11] A. F. Caballero, «Sistema avanzado de prototipado rápido para control en exoesqueletos y dispositivos mecatrónicos,» Tesis doctoral, Dpto. de Ingeniería de Sistemas y Automática, Universidad Carlos III de Madrid, Leganés, 2014. [En línea]. Available: <https://e-archivo.uc3m.es/handle/10016/20665#preview>.
- [12] E. G. Armada, R. B. Monsalve y J. P. Puerta, «Banco de pruebas para la caracterización de actuadores basados en materiales ferromagnéticos con memoria de forma». España Patente P201031057, 12 julio 2012.
- [13] E. Asua, V. Etxebarria y A. G. Arribas, «Diseño y control de actuadores basados en materiales con memoria de forma,» Dpto. de Electricidad y Electrónica, Facultad de Ciencia y Tecnología de la Universidad del País Vasco, Bizkaia, España , 2007. [En línea]. Available: <http://intranet.ceautomatica.es/old/actividades/jornadas/XXVIII/documentos/1771-Jornadas2007.pdf>.
- [14] A. Arnedo, «Materiales con memoria de forma, el Nitinol,» Blog SEAS, [En línea]. Available: [https://www.seas.es/blog/disenio\\_mecanico/materiales-con-memoria-de-forma-el-nitinol/](https://www.seas.es/blog/disenio_mecanico/materiales-con-memoria-de-forma-el-nitinol/). [Último acceso: 21 febrero 2019].
- [15] F. D. d. C. Rodríguez, «Nitinol, un biomaterial con memoria de forma,» Lecturas de ingeniería, Dpto. Ingeniería, Facultad de estudios superiores Cuautitlán, Cuautitlán, México, 2011. [En línea]. Available: [http://olimpia.cuautitlan2.unam.mx/pagina\\_ingenieria/mecanica/mat/mat\\_mec/m6/Nitinol\\_un%20biomaterial.pdf](http://olimpia.cuautitlan2.unam.mx/pagina_ingenieria/mecanica/mat/mat_mec/m6/Nitinol_un%20biomaterial.pdf).
- [16] «Aleación de memoria de forma,» HiSoUR, [En línea]. Available: <https://www.hisour.com/es/shape-memory-alloy-42847/>. [Último acceso: 24 febrero 2019].

- [17] A. Varela, «Nitinol: un material con memoria de forma,» Divulgadores, [En línea]. Available: <https://divulgadores.com/nitinol-un-material-con-memoria-de-forma/>. [Último acceso: 1 marzo 2019].
- [18] S. d. I. Flor, «Aleaciones con memoria de forma,» Tesis doctoral, Dpto. de resistencia de materiales y estructuras en la ingeniería, Universidad Politécnica de Cataluña, Barcelona, España, 1999. [En línea]. Available: <https://www.tdx.cat/bitstream/handle/10803/6863/06Sfl06de14.pdf>.
- [19] L. Moreno, M. Muñoz, S. Garrido y D. Blanco, «Materiales inteligentes: aleaciones con memoria de forma (SMA),» *Revista de la Real Academia de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales*, septiembre 2009.
- [20] «Alambres musculares,» Yo Robot WordPress, [En línea]. Available: <https://yorobot.wordpress.com/2006/10/08/alambres-musculares/>. [Último acceso: 1 marzo 2019].
- [21] G. Ginés, «Introducción a las aleaciones con memoria de forma: el nitinol,» Adquisición de datos, [En línea]. Available: <https://adquisiciondedatos.wordpress.com/2013/11/12/introsma/>. [Último acceso: 21 febrero 2019].
- [22] P. P. Núñez-Polo, «Nitinol: un material hecho de ciencia,» ISQCH Moléculas a reacción, [En línea]. Available: <https://isqch.wordpress.com/2016/12/05/nitinol-un-material-magico-hecho-de-ciencia/>. [Último acceso: 1 marzo 2019].
- [23] A. Tyler, «Materiales con memoria de forma (SMA),» Prezi, [En línea]. Available: <https://prezi.com/hco5z7uuio9c/materiales-con-memoria-de-forma-sma/>. [Último acceso: 21 febrero 2019].
- [24] «Materiales con memoria de forma: qué son y para qué sirven,» Termiser protecciones, [En línea]. Available: <http://termiserprotecciones.com/materiales-memoria-forma-sirven/>. [Último acceso: 24 febrero 2019].
- [25] A. C. Sánchez, «Estudio e implementación de actuadores basados en aleaciones SMA,» Proyecto fin de carrera, Dpto. Ingeniería de Sistemas y Automática, Universidad Carlos

III de Madrid, Madrid, España, octubre 2010. [En línea]. Available: <https://e-archivo.uc3m.es/handle/10016/10085>.

- [26] G. M. Martínez, «Control de posición usando Shape Memory Alloy (SMA). Diseño y construcción de una plataforma de experimentación para comparativa con motores DC,» Trabajo fin de grado, Dpto. Ingeniería Industrial, Universidad Politécnica de Cartagena, Cartagena, España, 2014. [En línea]. Available: <http://repositorio.upct.es/handle/10317/4294>.
- [27] A. Gómez y C. Restrepo, «Cables musculares,» *Revista EIA*, nº 4, pp. 103-111, 2005.
- [28] M. Hernando, «Control de un actuador basado en SMA's,» Trabajo de Curso de Regulación Automática II, Dpto. Electrónica, Automática e Informática Industrial, Escuela Universitaria de Ingeniería Técnica Industrial de Madrid, Madrid, España, 2003-2004. [En línea]. Available: <http://www.elai.upm.es/webantigua/spain/Asignaturas/Servos/TrabajosDeCurso/trabajo1.pdf>.
- [29] A. V. Peciña, «Diseño y aplicación de un actuador SMA en el control de manos robóticas,» Tesis de Licenciatura, Dpto. Ingeniería de Sistemas y Automática, Universidad Carlos III de Madrid, Madrid, España, 2010 enero. [En línea]. Available: <https://e-archivo.uc3m.es/handle/10016/10484>.
- [30] E. J. Carletti, «Músculos de alambre/ Alambre termo contraíble,» *Robots Argentina*, [En línea]. Available: [http://robots-argentina.com.ar/Actuadores\\_musculosalambre.htm](http://robots-argentina.com.ar/Actuadores_musculosalambre.htm). [Último acceso: 6 marzo 2019].
- [31] «Dynalloy, Inc. Makers of Dynamic Alloys,» Dynalloy Inc., [En línea]. Available: <http://www.dynalloy.com>. [Último acceso: 27 febrero 2019].
- [32] «Flexinol® Actuator Wire Technical and Design Data,» Dynalloy Inc., [En línea]. Available: [http://www.dynalloy.com/tech\\_data\\_wire.php](http://www.dynalloy.com/tech_data_wire.php). [Último acceso: 27 febrero 2019].
- [33] «Flexinol,» Dynalloy Inc., [En línea]. Available: <http://www.ehag.ch/PDF-Files/Dynalloy/HP-Dynalloy.pdf>. [Último acceso: 27 febrero 2019].

- [34] S. Medina, «Aleaciones con memoria de forma,» Icono Fecyt, [En línea]. Available: [https://icono.fecyt.es/sites/default/files/filepublicaciones/bvt\\_mat\\_n1.pdf](https://icono.fecyt.es/sites/default/files/filepublicaciones/bvt_mat_n1.pdf). [Último acceso: 10 marzo 2019].
- [35] J. Colorado, A. Barrientos y C. Rossi, «Músculos Inteligentes en Robots Biológicamente Inspirados: Modelado, Control y Actuación,» *Revista Iberoamericana de Automática e Informática Industrial*, vol. 8, nº 4, pp. 385-396, 2011.
- [36] «Robot jellyfish,» Off Grid Energy Independence, [En línea]. Available: <https://www.offgridenergyindependence.com/articles/1667/robot-jellyfish>. [Último acceso: 7 marzo 2019].
- [37] «Solid Edge 2.019,» Solid Edge Siemens, [En línea]. Available: <https://solidedge.siemens.com/es/>. [Último acceso: 17 marzo 2019].
- [38] «Solid Edge,» Prismacim, [En línea]. Available: <https://prismacim.com/soluciones/solid-edge/>. [Último acceso: 17 marzo 2019].
- [39] «Matlab,» Mathworks, [En línea]. Available: <https://es.mathworks.com/products/matlab.html>. [Último acceso: 17 marzo 2019].
- [40] J. A. Guadalupe, D. Copaci, D. S. d. Cerro, L. Moreno y D. Blanco, «Banco de pruebas para actuadores basados en aleaciones con memoria de forma,» *Jornadas Nacionales de Robótica*, 2019.
- [41] «SmartFlex®,» Saesgetters, [En línea]. Available: [https://www.saesgetters.com/sites/default/files/SmartFlex%20Brochure\\_2.pdf](https://www.saesgetters.com/sites/default/files/SmartFlex%20Brochure_2.pdf) (. [Último acceso: 27 abril 2019].
- [42] D. S. Copaci, «Non-linear actuators and simulation tools for rehabilitation devices,» Tesis doctoral, Dpto. de Ingeniería de Sistemas y Automática, Universidad Carlos III de Madrid, Leganés, España, 2018. [En línea]. Available: <https://e-archivo.uc3m.es/handle/10016/26362>.
- [43] «Trabajo Fin de Grado UC3M: Escribir el TFG,» Biblioteca uc3m, [En línea]. Available: <http://uc3m.libguides.com/TFG/escribir>. [Último acceso: 28 mayo 2019].

- [44] «Salarios para empleos de Ingeniero/a Electrónico/a en España,» Indeed, [En línea]. Available: <https://www.indeed.es/salaries/Ingeniero/a-electr%C3%B3nico/a-Salaries>. [Último acceso: 6 abril 2019].
- [45] «PLA Basic natural bobina 1kg,» Filament2print, [En línea]. Available: [https://filament2print.com/es/pla-basic/704-pla-basic-natural.html?gclid=EAlaIQobChMIh423092t4glVmvhRCh1SdwthEAQYASABEgJAC\\_D\\_BwE](https://filament2print.com/es/pla-basic/704-pla-basic-natural.html?gclid=EAlaIQobChMIh423092t4glVmvhRCh1SdwthEAQYASABEgJAC_D_BwE). [Último acceso: 26 marzo 2019].
- [46] «Precio Luz y Tarifas,» Comparador de luz, [En línea]. Available: <https://comparadorluz.com/tarifas/precio-kwh>. [Último acceso: 26 marzo 2019].
- [47] «Prevención de Riesgos Laborales,» Portal Universidad Carlos III de Madrid, [En línea]. Available: [http://portal.uc3m.es/portal/page/portal/laboratorios/prevencion\\_riesgos\\_laborales/representacion](http://portal.uc3m.es/portal/page/portal/laboratorios/prevencion_riesgos_laborales/representacion). [Último acceso: 20 abril 2019].
- [48] «F2516-14,» Aenor, [En línea]. Available: <https://www.aenor.com/normas-y-libros/buscador-de-normas/ASTM?c=090429>. [Último acceso: 20 abril 2019].
- [49] «F2516-18,» Aenor, [En línea]. Available: <https://www.aenor.com/normas-y-libros/buscador-de-normas/ASTM?c=101596>. [Último acceso: 22 abril 2019].
- [50] «ASTM F2316-14 Tensile Testing Nitinol Wire,» Instron, [En línea]. Available: <https://www.instron.com.br/pt-br/testing-solutions/by-material/biomaterials/simple-cyclic/astm-f2516>. [Último acceso: 21 abril 2019].
- [51] «UNE-EN 61558-2-1,» UNE AENOR, [En línea]. Available: <https://www.une.org/encuentra-tu-norma/busca-tu-norma/norma/?c=N0039706>. [Último acceso: 27 abril 2019].
- [52] «FA-363C FUENTES DE ALIMENTACIÓN,» Promax, [En línea]. Available: <http://www.promax.es/downloads/manuals/Spanish/FA-363C.pdf>. [Último acceso: 27 abril 2019].
- [53] «Normativa corporativa de software legal,» Incibe, [En línea]. Available: [https://www.incibe.es/extfrontinteco/img/File/empresas/dosieres/proteccion\\_puesto\\_](https://www.incibe.es/extfrontinteco/img/File/empresas/dosieres/proteccion_puesto_)



trabajo/proteccion\_puesto\_trabajo\_normativa\_corporativa\_de\_software\_legal.pdf.

[Último acceso: 27 abril 2019].