



Universidad  
Politécnica  
de Cartagena



**industriales**  
etsii UPCT

# Control de posición usando Shape Memory Alloy (SMA). Diseño y construcción de una plataforma de experimentación para comparativa con motores DC



**Titulación:** Ingeniería Industrial  
**Alumno/a:** Ginés Moreno Martínez  
**Director/a/s:** Miguel Almonacid Kroeger  
Julio José Ibarrola Lacalle

Cartagena, 15 de Julio de 2014

## Agradecimientos

En primer lugar quiero agradecer a mis padres, Miguel y Encarna, el haberme permitido estudiar lo que he querido. Agradecer a mi hermana Mari todo su apoyo durante todos estos años y a mi hermano Manolo también el estar ahí y el poder facilitarme algunas herramientas que he necesitado en el montaje de la plataforma de experimentación.

No me puedo olvidar de dar las gracias a Julio José Ibarrola y a Miguel Almonacid, ya que la relación con ellos siempre ha sido muy buena, me han ayudado en todo lo posible y han estado siempre que ha sido necesario aportando sus conocimientos y consejos. Gracias a otros profesores del departamento, como José Manuel Cano, por su interés en el proyecto y muchas gracias a Pablo, técnico de laboratorio, que siempre ha estado disponible para suministrarme el material que he requerido o realizar los pedidos de materiales necesarios para el proyecto.

Durante todo el desarrollo del presente proyecto, numerosas personas o empresas han contribuido, de una u otra forma, a que esto sea posible. Aunque es probable que me deje a alguien, me gustaría dar las gracias a:

- Pablo, compañero de mi hermano, por aportar el metacrilato de 2 mm de grosor de la parte superior de la plataforma.
- Empresas fabricantes y distribuidoras de componentes electrónicos a nivel internacional, como Texas Instrument, Analog Devices, Maxim Integrated, Microchip Technology y ST Microelectronics, por sus muestras o samples gratuitos de gran parte de los componentes electrónicos utilizados en el presente proyecto.
- Hierros y Aluminios Hermanos Sánchez, de Mula, por proporcionarme los pequeños trozos de perfiles de aluminio utilizados para la construcción del cubo que aísla al sensor de temperatura.

Por último, agradecer a todos mis amigos su apoyo, el saber escucharme y sobre todo los ratos de entretenimiento y desconexión, siempre necesarios en trabajos de este tipo.



## Resumen

En diferentes campos de la ingeniería, sobretodo en el ámbito médico, se está avanzando en el desarrollo y la investigación de nuevos actuadores o herramientas, menos incisivos, con más posibilidades de movimiento y con más control y precisión. Esto demanda la aplicación de tecnologías específicas con unas características particulares.

Materiales como los Shape Memory Alloy (SMA) presentan unas características que los hacen adecuados para trabajar como actuadores en dispositivos en los que se requiere ejercer una gran fuerza en comparación con su peso y tamaño, por ejemplo un cable SMA de 1 mm de diámetro puede desplazar una masa de hasta 15 kg.

En el presente proyecto se va a realizar un estudio en profundidad del estado del arte, para poder enfocar mejor este proyecto y poder situarlo dentro de un marco adecuado. También se va a llevar a cabo el estudio de este tipo de materiales comparándolos con actuadores tradicionales, e intentando desarrollar mejoras en los esquemas de control de posición de los SMA.

Para cumplir con estos propósitos se construye una plataforma de experimentación en la que incluir todos los actuadores, los elementos de sensorización y todos los circuitos electrónicos acondicionadores de la señal. Con todos estos elementos se lleva a cabo un estudio comparativo de los cables SMA contra motores DC y se implementan algunos controles de posición de los cables SMA basados en diferentes señales de realimentación, como son la intensidad y en el cambio de temperatura de los cables SMA en cada momento.

Con todos los estudios que se han realizado en este proyecto, se ha pretendido obtener conclusiones que sirvan como base a investigaciones y futuros productos basados en aleaciones con memoria de forma (SMA).



# Índice General

Agradecimientos.....	i
Resumen .....	iii
Índice General.....	v
Índice de Tablas .....	ix
Índice de Figuras.....	xi
<b>Capítulo 1: INTRODUCCIÓN.....</b>	<b>1</b>
1.1.- MOTIVACION Y ORIGEN DEL PROYECTO.....	3
1.2.- OBJETIVOS DEL PROYECTO .....	3
1.3.- DOCUMENTACION DEL PROYECTO. CD-ROM .....	4
<b>Capítulo 2: ALEACIONES CON MEMORIA DE FORMA (SMA).....</b>	<b>5</b>
2.1.- DESCRIPCION DE LOS SMA .....	7
2.2.- MATERIALES CON MEMORIA DE FORMA.....	7
2.3.- HISTORIA DE LOS SMA.....	7
2.4.- FASES DE LOS SMA .....	8
2.4.1.- TRANSFORMACION MARTENSITICA. PERSPECTIVA MICROSCOPICA .....	9
2.4.2.- TRANSFORMACION MARTENSITICA. PERSPECTIVA MACROSCOPICA .....	11
2.5.- PROPIEDADES DE LOS SMA.....	12
2.5.1.- EFECTO MEMORIA DE FORMA SIMPLE .....	12
2.5.2.- MEMORIA DE FORMA DOBLE. ENTRENAMIENTO DE UN SMA .....	13
2.5.3.- SUPERELASTICIDAD .....	14
2.6.- SMAs. EL NITINOL .....	17
2.6.1.- ALEACIONES COMERCIALES .....	17
2.6.2.- FABRICACION DE LAS ALEACIONES DE NI-TI.....	18
2.7.- ACTUADORES SMA: VENTAJAS Y DESVENTAJAS .....	19
2.8.- MI ALEACIÓN ESCOGIDA.....	21
<b>Capítulo 3: ESTADO DEL ARTE.....</b>	<b>25</b>
3.1.- INTRODUCCION.....	27
3.2.- USOS EN EL CAMPO DE LA MEDICINA .....	27
3.3.- USO COMO ACTUADORES .....	30
3.3.1.- ACTUADORES COMERCIALES.....	31
3.3.2.- INVESTIGACIONES SOBRE EL CONTROL .....	32
3.3.3.- ROBOTICA.....	38
3.4.- OTRAS APLICACIONES .....	40
3.5.- CONCLUSIONES.....	40
<b>Capítulo 4: CONSTRUCCIÓN DE LA PLATAFORMA DE EXPERIMENTACIÓN.....</b>	<b>43</b>
4.1.- ESTRUCTURA PRINCIPAL.....	45
4.2.- ARDUINO .....	47
4.3.- BATERIA Y MEDIDOR DE VOLTAJE.....	48
4.4.- SISTEMA SMA-MOTOR PARA MOVIMIENTO ANGULAR.....	50
4.4.1.- CÁLCULOS CABLE-PLETINA. DESPLAZAMIENTO.....	54
4.4.2.- CIRCUITO AMPLIFICADOR PARA EL SMA1 .....	57
4.4.3.- CIRCUITO DE CONTROL DEL MOTOR1 DC.....	58

4.4.4.- CIRCUITO POTENCIOMETRO .....	59
4.4.5.- SENSOR DE TEMPERATURA Y CIRCUITO DE ACONDICIONAMIENTO .....	59
4.4.6.- SENSOR DE INTENSIDAD Y CIRCUITO DE ACONDICIONAMIENTO .....	66
<b>4.5.- SISTEMA SMA-MOTOR PARA MOVIMIENTO LINEAL.....</b>	<b>67</b>
4.5.1.- CIRCUITO AMPLIFICADOR PARA EL SMA2 .....	73
4.5.2.- CIRCUITO DE CONTROL DEL MOTOR PASO A PASO .....	74
4.5.3.- CIRCUITO DE CONTROL DEL MOTOR2 DC.....	76
4.5.4.- CIRCUITO DEL POTENCIOMETRO SLIDER.....	77
<b>4.6.- ELEMENTOS AUXILIARES .....</b>	<b>78</b>

## **Capítulo 5: IDENTIFICACIÓN DE MODELOS Y CONTROL SIMULADO .....**

<b>5.1.- INTRODUCCIÓN.....</b>	<b>81</b>
<b>5.2.- IDENTIFICACIÓN DE MODELOS DEL SISTEMA.....</b>	<b>83</b>
5.2.1.- IDENTIFICACIÓN PARA EL MOTOR1 DC.....	83
5.2.3.- IDENTIFICACIÓN PARA EL MOTOR2 DC.....	92
5.2.4.- IDENTIFICACIÓN PARA EL SMA2.....	95
<b>5.3.- SINTONÍA Y CONTROL SIMULADO .....</b>	<b>97</b>
5.3.1.- SINTONÍA DE PIDs POR ZIEGLER-NICHOLS .....	97
5.3.2.- SINTONÍA Y SIMULACIÓN PARA EL MOTOR1 DC .....	98
5.3.3.- SINTONÍA Y SIMULACIÓN PARA EL SMA1 .....	100
5.3.4.- SINTONÍA Y SIMULACIÓN PARA EL MOTOR2 DC.....	103
5.3.5.- SINTONÍA Y SIMULACIÓN PARA EL SMA2 .....	105

## **Capítulo 6: CONTROL DE LA PLATAFORMA DE EXPERIMENTACIÓN.....**

<b>6.1.- CONTROL DE POSICIÓN .....</b>	<b>111</b>
6.1.1.- ELECCIÓN DE REFERENCIAS .....	111
6.1.2.- CONTROL DEL MOTOR1 DC .....	113
6.1.3.- CONTROL DEL SMA1 .....	116
6.1.4.- CONTROL DEL MOTOR2 DC .....	118
6.1.5.- CONTROL DEL SMA2 .....	121
<b>6.2.- CONTROL DE POSICIÓN DEL SMA1 CON TEMPERATURA.....</b>	<b>123</b>
<b>6.3.- CONTROL DE POSICIÓN DEL SMA1 CON INTENSIDAD .....</b>	<b>126</b>

## **Capítulo 7: COMPARATIVAS FINALES.....**

<b>7.1.- COMPARATIVA SMAs - MOTORES DC.....</b>	<b>133</b>
7.1.1.- COMPARATIVA SMA1 VS MOTOR1 DC.....	133
7.1.2.- COMPARATIVA SMA2 VS MOTOR2 DC.....	135
<b>7.2.- FRECUENCIA MÁXIMA DE FUNCIONAMIENTO.....</b>	<b>137</b>
<b>7.3.- CONSUMOS DE POTENCIA .....</b>	<b>139</b>

## **Capítulo 8: RESOLUCIÓN DE PROBLEMAS, CONCLUSIONES Y DESARROLLOS.....**

<b>8.1.- RESOLUCIÓN DE PROBLEMAS .....</b>	<b>143</b>
<b>8.2.- CONCLUSIONES.....</b>	<b>144</b>
<b>8.3.- DESARROLLOS FUTUROS .....</b>	<b>147</b>

## **Capítulo 9: BIBLIOGRAFÍA .....**

<b>ANEXOS</b> .....	157
<b>A.- PROCEDIMIENTOS A SEGUIR EN NUESTRA PLATAFORMA</b> .....	159
A.1.- PRIMERA CONEXIÓN DE ARDUINO AL PC Y MATLAB.....	159
A.2.- PROTOCOLO DE ACTUACIÓN. CONEXIÓN DE NUESTRA PLATAFORMA A MATLAB. ....	160
A.3.- PROCEDIMIENTOS PARA DESMONTAR LA PARTE SUPERIOR DE LA PLATAFORMA .....	161
A.4.- CARGA DE LA BATERÍA.....	162
<b>B.- SOFTWARE UTILIZADO</b> .....	163
B.1.- SOLIDWORKS .....	163
B.2.- ORCAD .....	163
B.3.- MATLAB .....	165
B.4.- PROGRAMAS (SCRIPTS) DESARROLLADOS .....	166
B.4.1.- InicioArduino.m .....	166
B.4.2.- Analogica.m.....	167
B.4.3.- EscalonMotor.m.....	167
B.4.4.- EscalonSMA.m .....	168
B.4.5.- PIDMotor.m.....	170
B.4.6.- PIDSMA.m .....	173
<b>C.- PLANO DE CONEXIONES ELÉCTRICAS</b> .....	177





## Índice de Tablas

Tabla 2.1 – Aleaciones comerciales con memoria de forma.....	17
Tabla 2.2 – Ventajas y Desventajas de las aleaciones Ni-Ti .....	17
Tabla 2.3 – Propiedades físicas del Flexinol .....	21
Tabla 2.4 – Características del flexinol para sus diferentes diámetros de comercialización .....	22
Tabla 4.1 – Obtención de valores de K para el muelle1.....	53
Tabla 4.2 – Amplificadores de precisión obtenidos para el circuito de la termopila .....	62
Tabla 4.3 – Obtención de valores de K para el muelle2.....	72
Tabla 5.1 – Efectos de los parámetros del PID en la dinámica del sistema. ....	97
Tabla 5.2 - Parámetros recomendados para el PID según el método de Ziegler-Nichols.....	98
Tabla 5.3 – Parámetros de los controladores obtenidos para el motor1 DC.....	99
Tabla 5.4 - Parámetros de los controladores obtenidos para el SMA1. ....	101
Tabla 5.5 - Parámetros de los controladores obtenidos para el motor2 DC. ....	103
Tabla 5.6 - Parámetros de los controladores obtenidos para el SMA2 .....	105
Tabla 7.1 – Valores del valor cuadrático medio del error para el SMA1 y el motor1 DC .....	135
Tabla 7.2 – Valores del valor cuadrático medio del error para el SMA2 y el motor2 DC .....	137
Tabla 7.3 – Comparativa de Potencia media, máxima e I. máxima entre SMA1 y motor1 DC. ....	140
Tabla 7.4 - Comparativa de Potencia media, máxima e I. máxima entre SMA2 y motor2 DC..	140
Tabla 8.1 – Ventajas y desventajas del uso de SMA o Motores DC como actuadores .....	146
Tabla A.1 – Módulos activados con cada uno de los interruptores de la plataforma .....	160



## Índice de Figuras

Fig. 2.1 - Tipos de materiales con memoria de forma.....	7
Fig. 2.2 - Transformación de austenita a martensita en dos dimensiones .....	9
Fig. 2.3 - Acomodación de la estructura cristalina por deslizamiento y maclado.....	10
Fig. 2.4 - Transformación Martensítica. Deslizamiento y maclado .....	10
Fig. 2.5 - Estructuras cristalinas de aleaciones con memoria de forma.....	11
Fig. 2.6 - Ciclo de histéresis. Calentamiento y enfriamiento.....	11
Fig. 2.7 - Efecto memoria de forma simple [11].....	13
Fig. 2.8 - Efecto memoria de forma doble [11] .....	13
Fig. 2.9 - Influencia de la tensión en el ciclo de histéresis [3] .....	14
Fig. 2.10 - Variación de las temperaturas características con la tensión .....	15
Fig. 2.11 - Superelasticidad en aleaciones con memoria de forma .....	15
Fig. 2.12 - Curvas tensión/deformación en martensita y austenita.....	16
Fig. 2.13 - Diagrama de fases del NiTi ampliado .....	18
Fig. 2.14 - Variación de la temperatura Ms con la composición química .....	18
Fig. 2.15 - Diferentes configuraciones de trabajo de actuadores SMA.....	19
Fig. 2.16 - Configuración SMA-muelle.....	23
Fig. 2.17 - Curvas Temperatura/Deformación de la hoja de características del Flexinol .....	24
Fig. 3.1 - Filtro sanguíneo de nitinol del Dr. Morris.....	27
Fig. 3.2 - Dispositivo de nitinol para cerrar los defectos septales del corazón [24].....	28
Fig. 3.3 - Stent auto-expandible fabricado en nitinol.....	28
Fig. 3.4 - Dispositivos de nitinol para la recuperación ósea .....	29
Fig. 3.5 - Espaciadores de columna vertebral de flexinol [23] .....	29
Fig. 3.6 - Comparación de actuadores SMA con el resto de actuadores .....	30
Fig. 3.7 - Sistema frangibolt de nitinol para liberar una carga .....	31
Fig. 3.8 - Array de válvulas de nitinol para la síntesis del ADN .....	32
Fig. 3.9 - Rmin y Rmax en relación a la resistencia eléctrica y a la temperatura de operación ..	33
Fig. 3.10 - Esquema de control propuesto con resistencia eléctrica y posición .....	33
Fig. 3.11 - Comparación de respuestas entre ambos controladores (posición y temperatura) .	34
Fig. 3.12 - Comparativa de sistemas refrigerantes en cables de flexinol de distintos diámetros36	
Fig. 3.13 - Curvas resistencia/deformación para varios valores de tensión y temperatura .....	37
Fig. 3.14 - Prótesis de mano, con cables de nitinol formando pequeños segmentos .....	39
Fig. 3.15 - Pequeño robot “Batbot” movido por cables SMA .....	39
Fig. 4.1 - Pequeña plataforma de experimentación realizada por Ramírez [1] .....	45
Fig. 4.2 - Diseño preliminar de la plataforma de experimentación en Solidworks .....	46
Fig. 4.3 - Placas de metacrilato y herramientas de corte.....	46
Fig. 4.4 - Estructura de la plataforma montada y detalle de las uniones atornilladas.....	47
Fig. 4.5 - Placa Arduino UNO R3 versión SMD usada en nuestra plataforma .....	47
Fig. 4.6 - Batería nueva, de 3,2 Ah, y anterior, de 1,2 Ah.....	48
Fig. 4.7 - Esquema del voltímetro implementado para medir la carga de la batería.....	49
Fig. 4.8 - Voltímetro inicial (izquierda) y voltímetro adquirido finalmente (derecha) .....	50
Fig. 4.9 - Cable de Flexinol de 100 $\mu$ m utilizado en nuestra plataforma de experimentación ...	50
Fig. 4.10 - Motor1 DC: servo motor Futaba S3003 utilizado en nuestra plataforma.....	51
Fig. 4.11 - Engranaje grande (a) y pequeño (b) para el sistema de desplazamiento angular .....	51
Fig. 4.12 - Eje grande y eje pequeño para el sistema de desplazamiento angular .....	52
Fig. 4.13 - Anterior pletina metálica y nueva pletina de metacrilato.....	52
Fig. 4.14 - Pesos usados para obtener la constante K del muelle .....	53

Fig. 4.15 - Muelle usado para el sistema de desplazamiento angular .....	54
Fig. 4.16 - Sistema SMA-muelle / motor1 DC para desplazamiento angular .....	54
Fig. 4.17 - Giro en el engranaje grande .....	55
Fig. 4.18 - Esquema electrónico del circuito de amplificación para el SMA1 .....	57
Fig. 4.19 - Implementación en un PCB del circuito de amplificación del SMA1.....	58
Fig. 4.20 - Esquema electrónico e implementación del circuito de control del motor1 DC .....	58
Fig. 4.21 - Circuito regulador de tensión del potenciómetro.....	59
Fig. 4.22 - Sensor Piroeléctrico D203B y circuito equivalente .....	60
Fig. 4.23 - Termopilas TS118-3, circuito equivalente y esquema interno de termopares .....	61
Fig. 4.24 - Esquema electrónico del circuito de acondicionamiento de señal de la termopila... 63	
Fig. 4.25 – Efecto del filtro paso bajo en la señal de temperatura de la termopila .....	63
Fig. 4.26 - Implementación en PCB del circuito de acondicionamiento de la termopila .....	64
Fig. 4.27 - Medidas del cubo, perfil de aluminio y cubo acabado para albergar la termopila.... 65	
Fig. 4.28 - Imagen de nuestra plataforma de experimentación con la cámara termográfica .... 65	
Fig. 4.29 - Variación de la temperatura con el desplazamiento.....	66
Fig. 4.30 - Esquema electrónico de conexión del sensor de intensidad y PCB .....	67
Fig. 4.31 - Motor Maxon DC de 3,2 W.....	68
Fig. 4.32 - Motores Thomson paso a paso unipolares .....	68
Fig. 4.33 - Rueda, cojinete extraído y superficie interior estriada para fijar el movimiento .....	69
Fig. 4.34 - Montaje del motor paso a paso en nuestro sistema de desplazamiento lineal .....	69
Fig. 4.35 - Motor2 DC: motor DC Sony.....	70
Fig. 4.36 - Carro para poder realizar la medida de desplazamiento lineal.....	70
Fig. 4.37 - Montaje del motor2 DC con el husillo en nuestro sistema de desplazamiento lineal71	
Fig. 4.38 - Detalle del enganche del SMA al tornillo y su paso por una de las poleas .....	71
Fig. 4.39 - Muelle usado en el sistema de desplazamiento lineal.....	72
Fig. 4.40 - Sistema SMA2-muelle / Motor2 DC para desplazamiento lineal .....	72
Fig. 4.41 - Esquema eléctrico del circuito amplificador para el SMA2 .....	73
Fig. 4.42 - Implementación en PCB del circuito amplificador del SMA2.....	73
Fig. 4.43 - Esquema eléctrico y cables del motor paso a paso.....	74
Fig. 4.44 - Secuencia en onda para motores paso a paso .....	74
Fig. 4.45 - Esquema electrónico para aumentar la frecuencia del motor paso a paso.....	75
Fig. 4.46 - Implementación en PCB de los circuitos para el control del motor paso a paso .....	76
Fig. 4.47 - Esquema electrónico del circuito de control del motor2 DC .....	76
Fig. 4.48 - Implementación en PCB del circuito de control del motor2 DC.....	77
Fig. 4.49 - Esquema electrónico de las conexiones del potenciómetro slider .....	77
Fig. 4.50 - Detalle de la unión del potenciómetro con el carro e implementación en un PCB ... 78	
Fig. 4.51 - Imagen en planta de nuestra plataforma de experimentación .....	79
Fig. 4.52 - Patas de goma y embellecedor para el borde inferior de la plataforma .....	79
Fig. 4.53 - Vista posterior de la plataforma de experimentación para SMA.....	80
Fig. 4.54 - Perspectiva general de nuestra plataforma de experimentación acabada.....	80
Fig. 5.1 - Sistema motor1 DC – muelle.....	84
Fig. 5.2 - Respuesta del motor1 DC ante dos entradas escalón iguales.....	86
Fig. 5.3 - Respuesta en velocidad del motor1 DC ante dos entradas escalón iguales .....	86
Fig. 5.4 - Validación en Simulink de la función de transferencia del motor1 DC .....	87
Fig. 5.5 - Comparación de la respuesta del modelo obtenido con la respuesta del motor1 DC. 88	
Fig. 5.6 - Respuesta del SMA1 ante dos entradas escalón iguales.....	88
Fig. 5.7 - Esquema en Simulink para verificar la f.t. de primer orden del SMA1 .....	89
Fig. 5.8 - Comparación de respuesta del modelo de primer orden del SMA con su respuesta.. 90	
Fig. 5.9 - Esquema en simulink para la validación del modelo de segundo orden del SMA1..... 91	
Fig. 5.10 - Comparación del modelo de segundo orden del SMA1 con su respuesta real..... 91	

Fig. 5.11 - Respuesta del motor2 DC ante dos entradas escalón iguales.....	92
Fig. 5.12 - Respuesta en velocidad del motor2 DC ante dos entradas escalón iguales .....	93
Fig. 5.13 - Esquema de simulink para validar el modelo obtenido del motor2 DC.....	94
Fig. 5.14 - Comparación del modelo de primer orden del motor2 DC con su respuesta .....	94
Fig. 5.15 - Respuesta del SMA2 ante dos entradas escalón iguales.....	95
Fig. 5.16 - Esquema en simulink para la validación del modelo de segundo orden del SMA2 ...	96
Fig. 5.17 - Comparación del modelo de segundo orden del SMA2 con su respuesta.....	96
Fig. 5.18 - Ejemplo de curva para obtener los parámetros de Ziegler-Nichols.....	98
Fig. 5.19 - Recta tangente para obtener los parámetros de Ziegler-Nichols en el motor1 DC... 98	
Fig. 5.20 - Esquema en simulink para ajuste de un controlador adecuado para el motor1 DC.. 99	
Fig. 5.21 - Respuesta Simulada para control de posición en el motor1 DC .....	100
Fig. 5.22 - Recta tangente para obtener los parámetros de Ziegler-Nichols en el SMA1 .....	101
Fig. 5.23 - Esquema en simulink para el ajuste de un controlador adecuado para el SMA1 ....	101
Fig. 5.24 - Respuesta Simulada para el SMA1 con los valores obtenidos por Ziegler-Nichols.. 102	
Fig. 5.25 - Respuesta Simulada para control de posición en el SMA1 .....	102
Fig. 5.26 - Recta tangente para obtener los parámetros de Ziegler-Nichols en el motor2 DC. 103	
Fig. 5.27 - Diagrama de bloques en simulink para ajuste del controlador para el motor2 DC. 104	
Fig. 5.28 - Respuesta Simulada para control de posición en el motor2 DC .....	104
Fig. 5.29 - Recta tangente para obtener los parámetros de Ziegler-Nichols en el SMA2 .....	105
Fig. 5.30 - Diagrama de bloques en simulink para ajuste del controlador para el SMA2 .....	106
Fig. 5.31 - Respuesta Simulada para el SMA2 con los valores obtenidos por Ziegler-Nichols.. 106	
Fig. 5.32 - Respuesta Simulada para control de posición en el SMA2 .....	107
Fig. 6.1 - Señales de entrada (referencias) para el movimiento angular .....	111
Fig. 6.2 - Señales de entrada (referencias) para el movimiento lineal.....	112
Fig. 6.3 - Control de posición del motor1 DC sin zona muerta .....	113
Fig. 6.4 - Control de posición del motor1 DC con zona muerta ante referencia de escalones. 114	
Fig. 6.5 - Control de posición del motor1 DC con zona muerta ante referencia de rampas..... 114	
Fig. 6.6 - Control del motor1 DC con reducción de zona muerta ante referencia escalones ... 115	
Fig. 6.7 - Control del motor1 DC con reducción de zona muerta ante referencia rampas .....	115
Fig. 6.8 - Control del motor1 DC con reducción de la zona muerta ante entrada senoidal..... 116	
Fig. 6.9 - Control de posición del SMA1 ante referencia de escalones .....	117
Fig. 6.10 - Control de posición del SMA1 ante entradas tipo rampa .....	117
Fig. 6.11 - Control de posición del SMA1 ante referencia senoidal .....	118
Fig. 6.12 - Control de posición del motor2 DC sin zona muerta .....	119
Fig. 6.13 - Control de posición del motor2 DC con zona muerta .....	119
Fig. 6.14 - Control del motor2 DC con reducción de zona muerta ante referencia escalones . 119	
Fig. 6.15 - Control del motor2 DC con reducción de zona muerta ante referencia de rampas 120	
Fig. 6.16 - Control del motor2 DC con reducción de zona muerta ante referencia senoidal ... 121	
Fig. 6.17 - Control de posición del SMA2 ante referencia de escalones .....	122
Fig. 6.18 - Control de posición del SMA2 ante referencia de rampas.....	122
Fig. 6.19 - Control de posición del SMA2 ante referencia senoidal .....	123
Fig. 6.20 - Relación Temperatura/Desplazamiento para entrada escalón de 2,45 V.....	124
Fig. 6.21 - Diagrama de Bloques para el control a través de la temperatura del SMA .....	124
Fig. 6.22 - Respuesta del sistema para el control realimentado con Temperatura .....	125
Fig. 6.23 - Control de Temperatura en el cable SMA .....	125
Fig. 6.24 - Relación no lineal entre Temperatura y desplazamiento del SMA .....	126
Fig. 6.25 - Intensidad instantánea y media, cada 100 muestras, que pasa por el cable SMA1 127	
Fig. 6.26 - Relación Intensidad/Desplazamiento para entradas tipo escalón .....	127
Fig. 6.27 - Diagrama de Bloques para el control a través de la intensidad del cable SMA1 .....	128
Fig. 6.28 - Respuesta del sistema para el control realimentado con Intensidad .....	128

Fig. 6.29 - Control de Intensidad en el cable SMA1 .....	129
Fig.7.1 - Comparativa de control de posición angular entre el SMA1 y el motor1 DC ante referencia de escalones .....	133
Fig.7.2 - Comparativa de control de posición angular entre el SMA1 y el motor1 DC ante referencia de rampas.....	133
Fig.7.3 - Comparativa de control de posición angular entre el SMA1 y el motor1 DC ante referencia senoidal .....	134
Fig. 7.4 - Comparativa de control de posición angular entre el SMA2 y el motor DC lineal ante estradas escalón .....	135
Fig. 7.5 - Comparativa de control de posición angular entre el SMA2 y el motor DC lineal ante estradas rampa .....	136
Fig. 7.6 - Comparativa de control de posición angular entre el SMA2 y el motor DC lineal ante estrada senoidal.....	136
Fig. 7.7 - Control de posición del SMA1 ante entrada senoidal de 1,2 Hz .....	137
Fig. 7.8 - Control de posición del SMA1 ante entrada senoidal de 1,5 Hz .....	138
Fig. 7.9 - Control de posición del motor1 DC ante entrada senoidal de 2 Hz .....	138
Fig.7.10 - Tensión, Intensidad y Consumo de Potencia para control de posición en el SMA1 ante entradas escalón .....	139
Fig. 8.1 - Varilla roscada para evitar el pandeo de la placa superior de metacrilato .....	143
Fig. 8.2 - Pinza de disección laparoscópica, usada para agarre de tejidos en cirugía .....	147
Fig. A.1 - Plataforma de experimentación abierta, para realizar tareas de manipulación .....	161
Fig. B.1 - Software de diseño 3D Solidworks .....	163
Fig. B.2 - Software de diseño electrónico Cadence Orcad .....	163
Fig. B.3 - Componentes electrónicos creados de la librería ginesmm.olb .....	164
Fig. B.4 - Software Matlab para adquisición de datos y programación .....	165

# Capítulo 1: INTRODUCCIÓN

Presentación del proyecto, objetivos  
marcados y descripción del mismo.





## 1.1.- MOTIVACION Y ORIGEN DEL PROYECTO

En diferentes campos de la ingeniería, sobretodo en el ámbito médico, se está avanzando en el desarrollo y la investigación de nuevos actuadores o herramientas, menos incisivos, con más posibilidades de movimiento y con más control y precisión. Esto demanda la aplicación de tecnologías específicas con unas características particulares.

Materiales como los Shape Memory Alloy (SMA) presentan unas características que los hacen adecuados para trabajar como actuadores en dispositivos en los que se requiere ejercer una gran fuerza en comparación con su peso y tamaño. Las características de estos materiales se describen, de forma más detallada, posteriormente [véase capítulo 2].

Debido a este hecho, el departamento de Ingeniería de sistemas y automática de la Universidad Politécnica de Cartagena decide apostar por el estudio de este tipo de materiales comparándolos con actuadores tradicionales, e intentando desarrollar sistemas de control más eficientes y específicos con los que poder obtener buenos resultados y encontrar nuevas aplicaciones de estos materiales en la industria.

En este departamento el estudio de este tipo de materiales se inició con un proyecto anterior, llevado a cabo por Guillermo Ramírez Martínez [1]. Este proyecto inicial cubrió los siguientes objetivos:

- a) Estudio de las características de los cables SMA de la aleación comercial Flexinol (Ni-Ti).
- b) Realización de circuitos para la activación/desactivación de estos cables.
- c) Diseño de una pequeña plataforma de experimentación.
- d) Comparación de un cable SMA con un motor. Ajustando los parámetros de un controlador para un control de posición angular con los dos actuadores.

Después de que se realizara un análisis de estos actuadores para comprobar su viabilidad desde el punto de vista del control automático en aplicaciones patentables, el Departamento de Ingeniería de Sistemas y Automática pretende seguir avanzando en esta dirección, creando una plataforma de experimentación más completa y realizando de nuevo pruebas de control de posición que nos permitan desarrollar estudios técnicos para el uso de estos cables SMA como actuadores.

## 1.2.- OBJETIVOS DEL PROYECTO

Teniendo como base el proyecto anteriormente mencionado, se han fijado para el presente proyecto una serie de objetivos principales. En primer lugar, el desarrollo de un estado del arte del uso de los SMA como actuadores con profundidad suficiente como para poder enmarcar los resultados de este trabajo, con el estudio del envío de un artículo de investigación a una revista especializada. Tras esto construir una plataforma de pruebas para realizar una identificación de sistemas y una posterior comparativa de los resultados de control de posición obtenidos con los cables SMA, frente al control con los motores DC, usando diferentes sensores en la realimentación, con el fin de obtener unas claras conclusiones. Para cumplir con estos objetivos se van a realizar una serie de procedimientos o tareas:

- 1) Estudio del estado del arte, incluyendo las investigaciones de mayor trascendencia.
- 2) Creación de una nueva plataforma de experimentación para realizar toda la instalación y pruebas a realizar y que solucione los problemas de la anterior plataforma, tales como: derivaciones de corriente, falta de espacio... [véase capítulo 4].
- 3) Realizar el montaje anterior en la nueva plataforma, mejorando todos los circuitos que se habían realizado y las conexiones.
- 4) Comprobar la viabilidad de la instalación de sensores de Temperatura e Intensidad en los cables SMA.
- 5) Creación de todos los circuitos acondicionadores de señal necesarios para estos sensores, así como otros circuitos para control motores, alimentación...
- 6) Montaje de otro esquema de cables SMA con el que poder realizar una comparativa de estos con un motor para desplazamiento lineal.
- 7) Identificación de las funciones de Transferencia de cables y motores para así poder ajustar unos parámetros adecuados en los controladores que vamos a programar.
- 8) Realización y optimización de controladores basados en la señal de posición de los SMA. Realizar un estudio de viabilidad sobre el control de posición a través de variables del cable, como son su temperatura y la intensidad que circula por él.
- 9) Comparativa de los resultados obtenidos entre cables y motores DC, obteniendo una serie de conclusiones que servirán de base a investigaciones o desarrollos de productos posteriores.

### 1.3.- DOCUMENTACION DEL PROYECTO. CD-ROM

El proyecto queda perfectamente documentado en los 9 capítulos y anexos que conforman esta memoria descriptiva, donde se recoge todo el marco teórico, todas las pruebas y conclusiones obtenidas, cumpliendo así con los objetivos anteriormente expuestos. Con la presente memoria se adjunta un CD-ROM en el que se incluyen principalmente los siguientes archivos:

- Memoria del presente proyecto, tanto en formato Word como pdf.
- Artículos e Investigaciones que conforman tanto el fundamento teórico de los actuadores como el estado del arte.
- Hojas de características (datasheets) de cada uno de los componentes usados en el presente proyecto.
- Diseño de los circuitos electrónicos implementados y del plano de conexiones eléctricas en formato Orcad.
- Script desarrollados en Matlab para el envío de señales, la adquisición de datos y el desarrollo de los controladores de cada uno de los actuadores que conforman nuestra plataforma de experimentación.
- Todas las gráficas que aparecen en el presente proyecto, en formato .fig de Matlab.
- Todas las fotos y algún video de muestra de nuestra plataforma de experimentación.

# Capítulo 2: ALEACIONES CON MEMORIA DE FORMA (SMA)

---

Propiedades y características de las aleaciones SMA



## 2.1.- DESCRIPCION DE LOS SMA

Las aleaciones con memoria de forma o SMA (Shape Memory Alloy), son aleaciones metálicas que después de una deformación, aparentemente plástica, vuelven a su forma original cuando son sometidas a un calentamiento. Se puede decir que tienen la habilidad de “recordar” o retener la forma o el tamaño que tenían antes de la deformación, cuando se aumenta su temperatura. Esta habilidad es debida a un proceso de transformación de fase entre dos estructuras cristalinas, la fase de temperatura más alta conocida como austenita y la de menor temperatura conocida como martensita. Este fenómeno es conocido como “efecto memoria”. Esta y otras propiedades se muestran con mayor detalle en los próximos apartados de este capítulo.

## 2.2.- MATERIALES CON MEMORIA DE FORMA

Los SMAs no son los únicos materiales que poseen la propiedad de memoria de forma. Existen otros tipos de materiales que poseen esta propiedad, cuyas diferencias radican en su forma de activación (efectos térmicos o campos magnéticos) y en los rangos de sus propiedades:

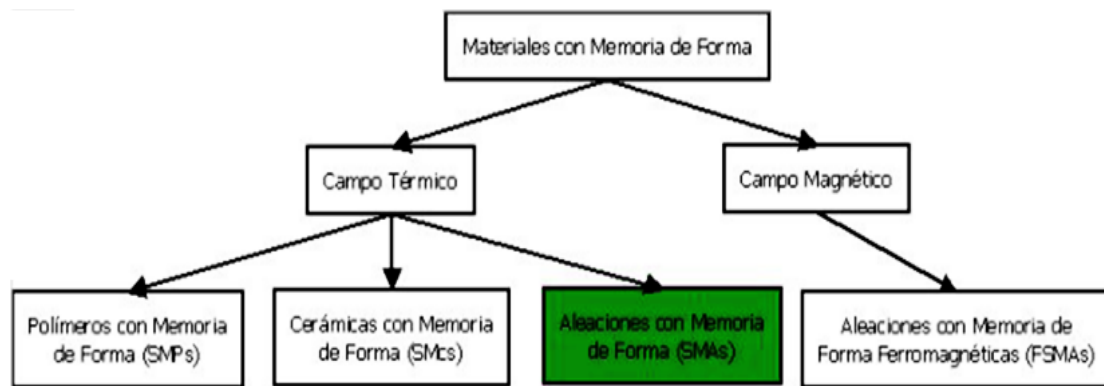


Fig. 2.1 – Tipos de materiales con memoria de forma

No vamos a entrar en detalle sobre los diferentes tipos de materiales que poseen este efecto memoria de forma [2], pero si viene bien conocer la existencia de otros materiales con esta propiedad. En este proyecto sólo nos vamos a centrar en las aleaciones con memoria de forma, ya que presentan unas propiedades más interesantes para nuestro ámbito de aplicación, como pueden ser: una mayor ductilidad, resistencia a la corrosión, biocompatibilidad...

## 2.3.- HISTORIA DE LOS SMA

Los primeros pasos en el descubrimiento del efecto memoria de forma datan de 1932, cuando A. Olander descubre el efecto superelástico en una aleación Au-Cd en 1932 [3]. Años más tarde, en 1938, Greninger y Mooradian [4] observan la aparición y desaparición de la fase martensita, a medida que decrece y crece la temperatura en una aleación de Cu-Zn.

Los fundamentos del efecto memoria gobernado por el comportamiento termoelástico de la martensita se explican en 1949 por Kurdjumov y Khandros [5]. Fruto de estos primeros estudios, es la investigación que desarrollan Chang y Read en 1951, en la Universidad de Columbia de Nueva York, al utilizar Rayos X para estudiar el motivo de tan extraño comportamiento y poder demostrar que se podía usar el efecto memoria de forma para realizar trabajo [6].

Pero no es hasta 1962, cuando se produce el descubrimiento más importante en estas aleaciones, cuando Buehler y sus colaboradores, en el Naval Ordnance Laboratory (ahora Naval Surface Warfare Center), desarrollan una aleación de níquel y titanio (NiTi) con un efecto memoria de forma aun más acusado que el descubierto anteriormente con otras aleaciones y que se denomina como Nitinol (derivado de Nickel Titanium Naval Ordnance Laboratory) [7]. El descubrimiento de Buehler abre una gran puerta a la investigación en la búsqueda de nuevas aleaciones con capacidades de memoria de forma (Cobre-zinc, Cobre-Titanio, Cobre-Aluminio-Níquel...), así como al estudio de su comportamiento mecánico y sus posibles aplicaciones. Pese a todos los avances que se realizan en el descubrimiento de nuevas aleaciones metálicas con estas propiedades, el Nitinol se mantiene como la aleación más comercial y más extendida debido a su buena estabilidad al ciclado, biocompatibilidad, resistencia a la corrosión y capacidad de recuperar grandes deformaciones.

## 2.4.- FASES DE LOS SMA

En los SMA, el mecanismo de memoria de forma está basado en una reversible transformación de estado sólido desde la fase de alta temperatura austenita y la fase de baja temperatura martensita. Esta fase de transición es también conocida como transformación martensítica.

Hay dos tipos de transformaciones martensíticas: las termoelásticas y las no termoelásticas [8]. La diferencia principal entre ellas es la histéresis que producen. Mientras que en las no termoelásticas existe un cambio grande de volumen produciendo histéresis muy anchas que dificultan la transformación, en las termoelásticas no se produce ese cambio de volumen siendo la histéresis más pequeña. En el caso de los SMAs la transformación de fase es termoelástica lo que implica que:

- Pueden ser inducidas por cambio de temperatura o por tensión aplicada al material, modificando la energía libre del mismo.
- Y que una vez que los cristales se han nucleado crecen en una relación proporcional a la tasa de enfriamiento o a la tasa de incremento de la tensión aplicada [3].

En términos de aplicaciones prácticas, un material SMA puede estar en 3 diferentes fases de estructura cristalina que son, martensita, austenita y una fase de martensita inducida por el sometimiento a estrés del material. A baja temperatura la aleación se encuentra en su fase de martensita, en esta, es débil, maleable y puede estirarse fácilmente. Una vez calentada, la aleación se contrae y revierte a su fase de austenita, donde comienza a endurecerse y a volverse más rígida. La fuerza aplicada al SMA induce al estado de martensita si la aleación se encuentra en su fase de austenita y una fuerza externa es aplicada. Si esta fuerza deja de ser aplicada, el material vuelve a su fase de austenita. Este efecto es conocido como superelasticidad y será visto, en profundidad, en el apartado 2.5.3 de este mismo capítulo.

### 2.4.1.- TRANSFORMACION MARTENSITICA. PERSPECTIVA MICROSCOPICA

Antes de ver la transformación martensítica desde el punto de vista microscópico debemos conocer los dos tipos de transformaciones de estado que se pueden dar en los sólidos. Siendo estas de difusión y de desplazamiento [9]:

- Las *transformaciones por difusión* son aquellas en las que solo se puede formar una nueva fase moviéndose los átomos a distancias relativamente grandes. La nueva fase es de diferente composición química que la matriz de la que se forma. La evolución de este tipo de transformación depende del tiempo y la temperatura.
- Las *transformaciones por desplazamiento* no requieren un amplio rango de movimientos y los átomos se reordenan para llegar a una nueva estructura cristalina más estable sin cambiar la naturaleza química de la matriz. Dado que no es necesaria una migración atómica, estas transformaciones por desplazamiento generalmente son independientes del tiempo. El movimiento de la interfase, entre las dos fases, es tremendamente rápido. Se suelen llamar transformaciones atérmicas, dado que la cantidad de nueva fase creada usualmente depende solo de la temperatura y no de la cantidad de tiempo a esa temperatura.

Las transformaciones martensíticas son generalmente de este segundo tipo, y se forman enfriando desde una fase a alta temperatura llamada fase madre o austenita. Los términos de martensita y austenita originalmente se referían solo a fases de aceros, sin embargo se ha extendido el término refiriéndose no solo al material sino al tipo de transformación. En estas transformaciones hay una histéresis asociada y un rango de temperatura en que coexisten austenita y martensita.

De forma resumida, la principal característica de la martensita es que se forma enfriando. Con una fracción de volumen de martensita que aumenta a medida que la temperatura se reduce, pero con una fracción de volumen independiente del tiempo y que hereda la composición y la ordenación atómica de la fase madre.

Desde el punto de vista cristalográfico, la transformación de austenita a martensita puede explicarse separada en dos partes: deformación de la red cristalina y cizalladura invariante de la red y, aunque cristalográficamente este proceso es más complicado, podemos hacer una aproximación cualitativa en dos dimensiones bastante simple.

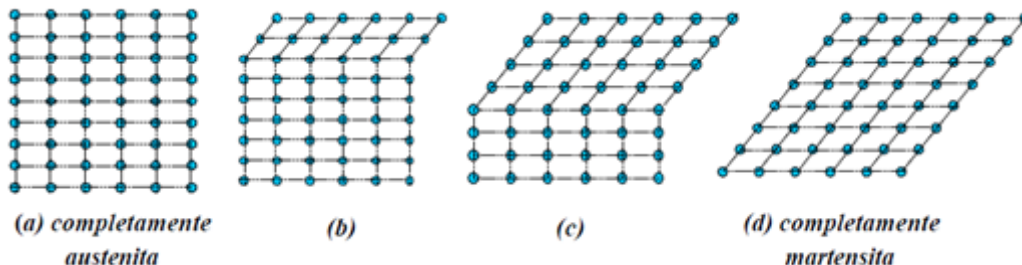


Fig. 2.2 – Transformación de austenita a martensita en dos dimensiones

La primera parte: deformación de la red cristalina, consiste en todos los movimientos atómicos necesarios para producir la nueva estructura a partir de la antigua. En la figura 2.2 se



esquematiza la estructura austenita en el diagrama (a), y la progresión hacia una estructura totalmente martensita se reproduce de (b) a (d). A medida que la interfase avanza, cada capa de átomos se desplaza tan solo una pequeña distancia. Como resultado final de esos pequeños movimientos coordinados se obtiene la nueva estructura martensítica.

La segunda parte de la transformación martensítica, cizalladura invariante de la red, es un paso de acomodación: la estructura martensítica producida por el paso anterior es de diferente forma, y frecuentemente volumen, que la austenita circundante. La martensita de los aceros implica un cambio de volumen y forma, mientras que aleaciones con memoria de forma, como por ejemplo Ni-Ti, básicamente tienen solo cambio de forma.

Tanto la forma de la nueva fase, como la austenita circundante, deben ser alteradas para acomodarse a una nueva estructura. Hay dos mecanismos generales por los cuales esto puede pasar: por deslizamiento (figura 2.3 a) o por maclado (figura 2.3 b). En ambos casos, cada celda individual, o paralelogramo, tiene la nueva estructura martensítica pero la forma en conjunto es la de la austenita original.

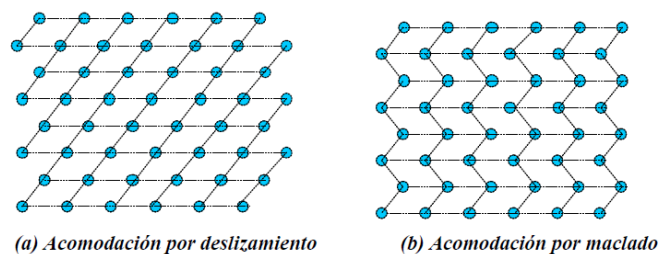


Fig. 2.3 – Acomodación de la estructura cristalina por deslizamiento y maclado

El deslizamiento es un proceso permanente y es un mecanismo común en la mayoría de martensitas. El maclado es incapaz de acomodar cambios de volumen pero puede acomodar cambios de forma en un modo reversible. Para que la memoria de forma ocurra de un modo significativo, se requiere que la acomodación sea completamente reversible, es decir, el maclado debe ser el proceso de acomodación predominante.

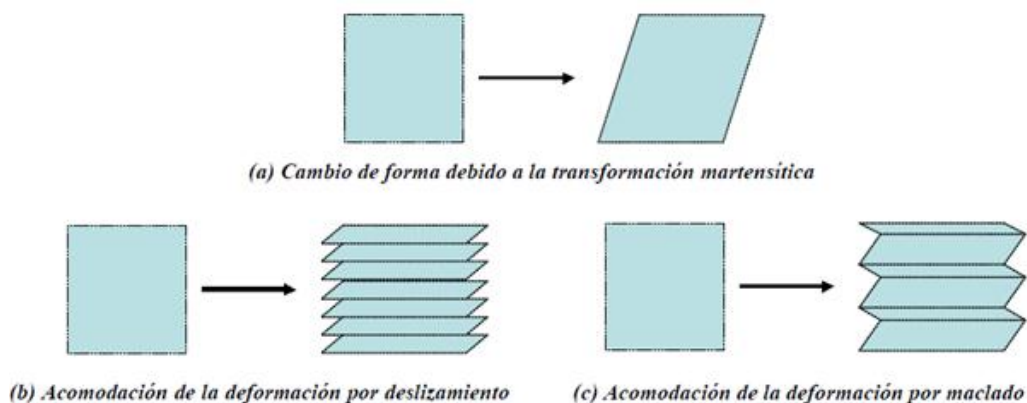


Fig. 2.4 – Transformación Martensítica. Deslizamiento y maclado

En nuestra aleación de Ni-Ti, los átomos de Ni y Ti se hallan en sitios muy específicos (figura 2.5 b). Durante la transformación martensítica, cómo se ha explicado anteriormente, la martensita adquiere la misma ordenación que la austenita, lo que se conoce como ordenación heredada. Hay que hacer notar que la estructura mostrada en las figuras a y b tienen una simetría centrada en el cuerpo (la a es una cúbica centrada en el cuerpo BCC, mientras que la b no es técnicamente una BCC pero se llama B2 o CsCl). Las Aleaciones con memoria de forma se

basan generalmente en una simetría BCC, menos frecuentemente en la estructura B2, y algunas con una ordenación aún más compleja llamada DO3, también basada en la simetría BCC. El caso de Ni-Ti corresponde a una estructura B2, donde los distintos átomos se distribuyen en la red cúbica consiguiendo la máxima separación posible (átomos de Ni en verde y de Ti en azul).

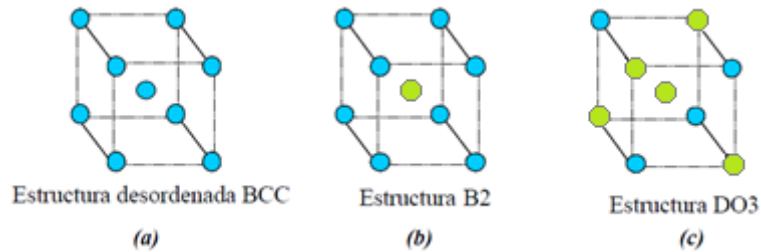


Fig. 2.5 – Estructuras cristalinas de aleaciones con memoria de forma

No vamos a entrar en detalle en todos los cambios microscópicos que se producen [9] ya que no forma parte de los objetivos de este proyecto.

### 2.4.2.- TRANSFORMACION MARTENSITICA. PERSPECTIVA MACROSCOPICA

Desde un punto de vista macroscópico, prácticamente todas las propiedades físicas de la austenita y martensita son diferentes, y por ello a medida que se atraviesa el punto de transformación mediante una variación de las temperaturas, aparecen una variedad de cambios en las propiedades significativas. El proceso de transformación de martensita a austenita y viceversa lo podemos ver en la figura 2.6 del ciclo de histéresis. Esta transformación está caracterizada por 4 temperaturas o pequeños rangos de temperatura, denominadas temperaturas características o temperaturas de transformación:

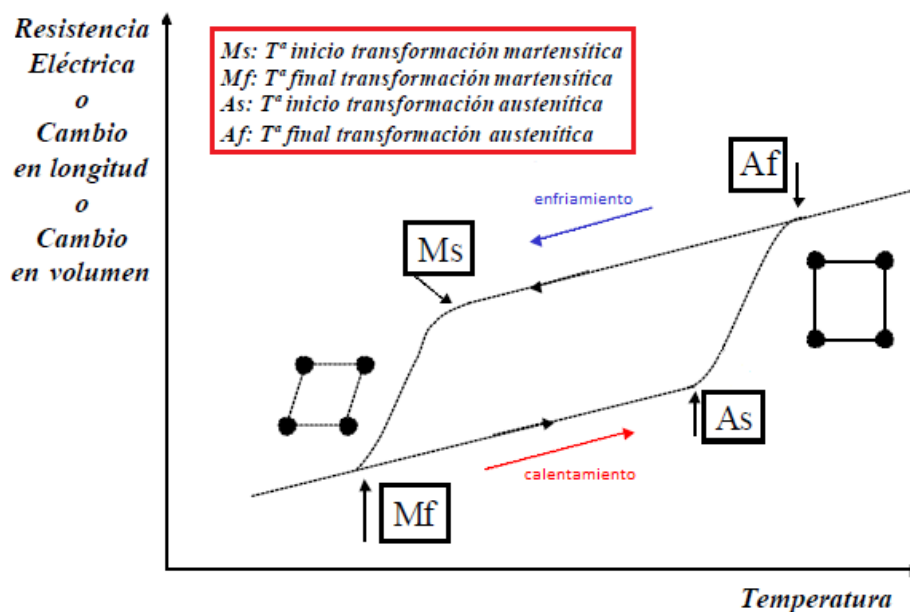


Fig. 2.6 – Ciclo de histéresis. Calentamiento y enfriamiento.

En el proceso de enfriamiento, la primera de estas temperaturas es la temperatura de inicio de la transformación martensítica ( $M_s$ ), a partir de la cual se empieza a formar martensita por temperatura. Esta transformación termina, a medida que decrece la temperatura, a una temperatura cercana a  $M_f$  o temperatura final de la transformación martensítica. El siguiente conjunto de temperaturas características de transformación lo forman la temperatura de inicio de la transformación austenítica ( $A_s$ ) y la final de esta transformación austenítica ( $A_f$ ). La formación de la fase austenita comienza a medida que la aleación, en el proceso de calentamiento, alcanza la temperatura  $A_s$ . Se comienza a formar entonces una estructura cúbica centrada en las caras, rígida y dura, que se termina de formar alrededor de  $A_f$ . Cuando el elemento se calienta más allá de  $A_f$ , la deformación se recupera completamente obteniendo el efecto memoria de forma. Los procesos de transformación de austenita a martensita y viceversa, siguen diferentes caminos como consecuencia de la histéresis de la transformación.

En el rango donde la fase de austenita y martensita coexisten podemos definir como pico de austenita ( $A_p$ ) y pico de martensita ( $M_p$ ) a aquella temperatura donde el 50 % del material ya se ha transformado. En estas fases intermedias la no linealidad y la histéresis están influidas por la composición del SMA, el proceso y el número de ciclos. Valores típicos del ancho de histeresis en materiales con memoria de forma suelen ser de 20 a 40°C. Durante las transiciones de fases muchas de las propiedades de los SMAs varían [5]. Estas incluyen el módulo de elasticidad, la resistencia eléctrica, capacidad calorífica y conductividad térmica.

## 2.5.- PROPIEDADES DE LOS SMA

Las propiedades más significativas de los SMAs son básicamente dos [10], y se basan en las dos formas de producirse la transformación martensítica: el efecto memoria de forma y la superelasticidad. Podemos encontrar otras propiedades pero todas derivan de estas dos anteriores.

### 2.5.1.- EFECTO MEMORIA DE FORMA SIMPLE

El efecto memoria de forma simple es la capacidad que tiene el material para deformarse mediante un esfuerzo aplicado y recuperar posteriormente su forma original con un simple calentamiento, que puede llevarse a cabo de diferentes formas [3]. Este proceso tiene la capacidad de generar fuerza o movimiento y es la base de los actuadores SMA. La recuperación de la forma y las altas fuerzas generadas como resultado de la transformación de la fase a austenita pueden ser usadas para realizar un trabajo o como actuador. Este efecto memoria lo podemos ver y explicar en la figura 2.7, usando un modelo de estructura cristalina de 2 dimensiones y una curva que refleje la tensión, la deformación y la temperatura.

Viendo la figura 2.7, puede verse como estando el material en la fase de austenita si disminuimos la temperatura por debajo de  $M_f$  (zona 4), bajo una tensión nula, se produce una transformación martensítica completa pero sin deformación macroscópica (martensita maclada). La martensita en este estado es altamente maleable y tiene un límite elástico muy bajo. Después podemos ver que aplicando una fuerza externa a la martensita (zona 1), el material se deforma plásticamente. Tras dejar de aplicar esta tensión (zona 2) nos queda un estado totalmente martensítico con una deformación pseudoelástica recuperable (martensita maclada). Si aplicamos demasiada tensión se puede llegar a provocar la fractura del material.

Si después calentamos el material, al llegar a la temperatura  $A_s$ , la fase austenita comienza a formarse y el material empieza a contraerse (zona 3). La completa recuperación de forma se da cuando llegamos a superar la temperatura  $A_f$ , donde el material está por completo en la fase de austenita de nuevo.

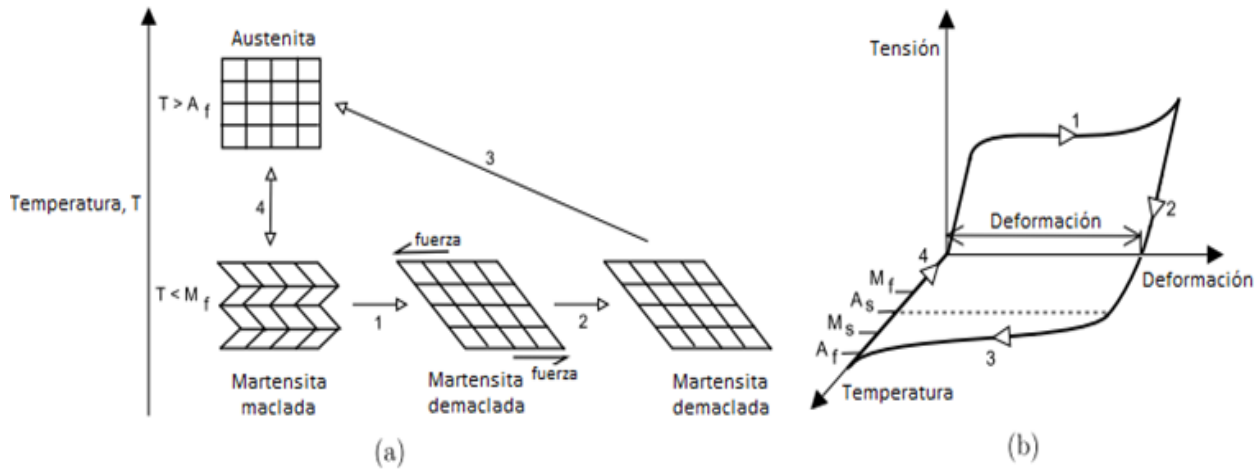


Fig. 2.7 – Efecto memoria de forma simple [11]

Este proceso se denomina memoria de forma simple porque el material solo “recuerda” la forma que tiene en el estado austénico, es decir, no habrá otro cambio de forma enfriando por debajo de  $M_f$ , que es lo que ocurre en el efecto memoria de forma doble. Además, es necesario deformar otra vez el material en el estado martensítico para reactivar el ciclo del efecto memoria. Este efecto puede repetirse durante muchos ciclos, siguiendo el proceso descrito anteriormente.

### 2.5.2.- MEMORIA DE FORMA DOBLE. ENTRENAMIENTO DE UN SMA

El efecto de memoria de forma doble se basa en la memorización tanto de la forma en caliente como de la forma en frío. En contraposición con el efecto de memoria de forma simple, nunca es necesario aplicar unas fuerzas externas para pasar de una forma a otra. Los cambios de forma se hacen únicamente gracias a cambios de temperatura.

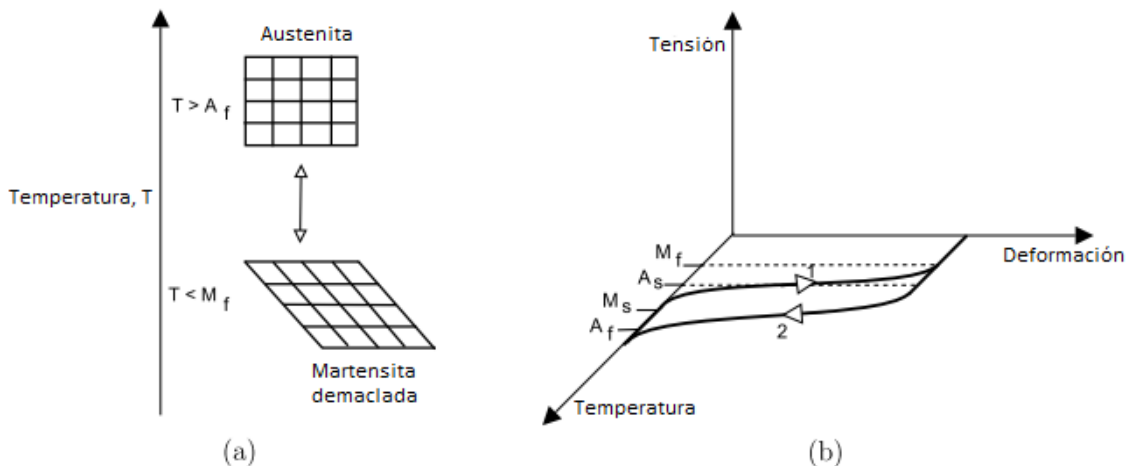


Fig. 2.8 – Efecto memoria de forma doble [11]

Mediante el modelo de estructura cristalina en 2D y las curvas de tensión, deformación y temperatura de la figura 2.8, podemos explicar este doble efecto. Como puede verse hay una transformación directa entre austenita y martensita demaada, como podemos ver en a). En la curva b) podemos ver una de las características principales de esta doble memoria de forma y es que el material se deforme sin aplicar ninguna tensión sobre él cuando se produce la transformación de austenita a martensita.

El efecto memoria de forma doble no es una característica intrínseca de las aleaciones con memoria de forma, sino que se consigue a partir de diferentes tratamientos termomecánicos. Estos tratamientos, llamados de entrenamiento o de educación, consisten en la repetición de ciclos termomecánicos en fase austenítica que van creando una microestructura “orientada”. A esta microestructura está asociado un campo de tensiones internas, específico del entrenamiento aplicado al material [12]. Este campo de tensiones orienta las variantes de martensita que se forman durante un enfriamiento sin aplicar tensión.

De forma general, y sin extendernos en el tema, pues queda fuera del ámbito del presente proyecto, existen dos tipos de procesos de entrenamiento, en los que se engloban todos los métodos existentes [9]:

- Procesos de entrenamiento pasivo: se provoca la aparición de martensita inducida por tensión, proceso explicado en el apartado siguiente.
- Procesos de entrenamiento activo: donde la martensita que se forma es sólo por efecto térmico.

### 2.5.3.- SUPERELASTICIDAD

Como se ha explicado anteriormente la formación de martensita es un proceso termoelástico, lo que significa que el descenso de temperatura entre  $M_s$  y  $M_f$  implica el crecimiento de las placas de martensita que existían y la nucleación de nuevas. En sentido contrario, cuando la temperatura aumenta, las placas recién nucleadas desaparecen y las otras decrecen poco a poco, revirtiendo todas en fase austenita.

Un descenso en temperatura es equivalente a un crecimiento de la tensión, ambos estabilizan la martensita. Es decir que bajo tensión nula, la martensita se forma al enfriar por debajo de  $M_s$ . Sin embargo, si le aplicamos una carga, la martensita puede empezar a formarse por encima de  $M_s$ . En este caso, la martensita que se forma se llama **martensita inducida por tensión**. Hay una temperatura máxima para que se pueda producir la formación de la martensita inducida, denominada  $M_d$ .

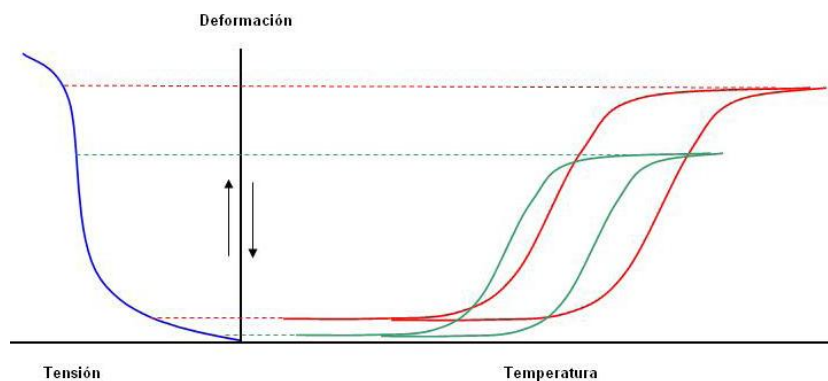


Fig. 2.9 – Influencia de la tensión en el ciclo de histéresis [3]

En la figura 2.9 podemos ver cómo para una carga, histéresis verde, el SMA poseerá unas temperaturas características particulares. Si ahora cargamos el material con una mayor tensión, histéresis roja, éste se deformará más y necesitará una mayor energía para activarse, por lo que aumentan las temperaturas características. Por lo que podemos afirmar que por encima de  $M_s$  la tensión requerida para producir martensita inducida incrementa al incrementar la temperatura. De hecho la variación en la tensión necesaria para producir martensita inducida incrementa linealmente con la temperatura por encima de  $M_s$ .

Todas las temperaturas de la transformación, como hemos visto, están afectadas por la tensión del mismo modo, se necesita más energía para la activación de un SMA cuanto más tensión necesite. Si representamos esta relación en un gráfico tensión temperatura, denominado gráfico tensión temperatura crítico, se observa cómo las 4 temperaturas cambian con el nivel de tensión (figura 2.10). Podemos ver como esta relación es bastante lineal, aunque  $A_s$  y  $A_f$  se comporten de manera no lineal ante bajos niveles de tensión:

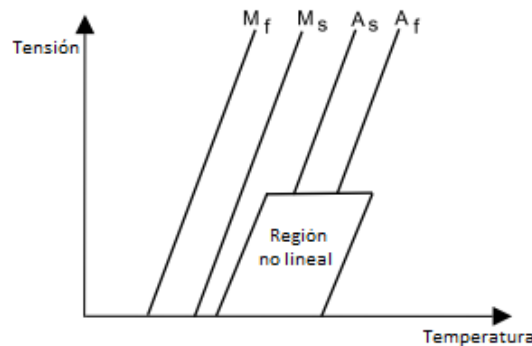


Fig. 2.10 – Variación de las temperaturas características con la tensión

La **superelasticidad**, también conocida como “pseudoelasticidad”, es la capacidad que tiene el SMA para inducir una transformación martensítica mediante una tensión tras la cual vuelve a su estado inicial, transformando la martensita producida en austenita. Tiene la capacidad de almacenar energía. La superelasticidad ocurre en el rango de temperatura que va desde  $A_f$  hasta  $M_d$ . En este rango de temperaturas, la martensita puede llegar a ser estable al aplicar una cierta tensión, pero vuelve a ser inestable al dejar de aplicar la tensión. A una temperatura mayor a  $M_d$ , si se aplica una tensión a un SMA, ya no se induce martensita sino que el material se deforma plásticamente.

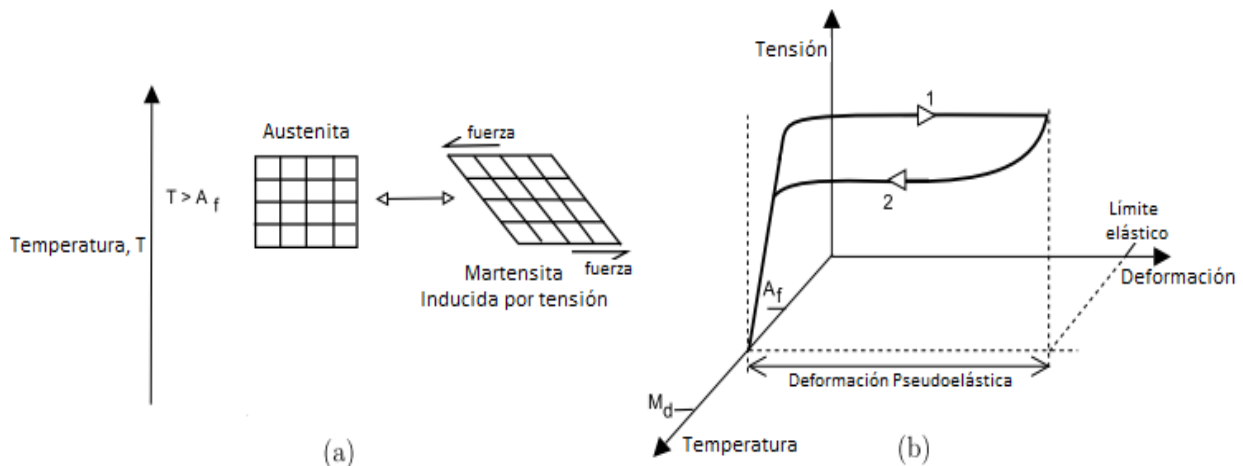


Fig. 2.11 – Superelasticidad en aleaciones con memoria de forma

En la figura 2.11 podemos ver el modelo de estructura cristalina en 2D y las curvas de tensión, deformación y temperatura donde podemos ver la propiedad de superelasticidad. Como podemos ver no se necesita cambio en la temperatura para que se produzca este fenómeno, por lo tanto la deformación característica solo puede ser explicada mediante el plano de tensión y deformación, como vemos en la figura 2.11 (b). En la figura la zona 1 corresponde a la formación de martensita inducida por tensión, mientras que cuando dejamos de aplicar la tensión, en la zona 2, la martensita inducida se vuelve inestable y se transforma en austenita. Las tensiones de formación y de transformación de la martensita no son las mismas debido a la existencia de la histéresis.

Se pueden remarcar algunos puntos fundamentales o peculiaridades de la **relación tensión-deformación** de estas aleaciones. La relación tensión deformación es altamente dependiente de la temperatura, deformación y condición de carga del material [9].

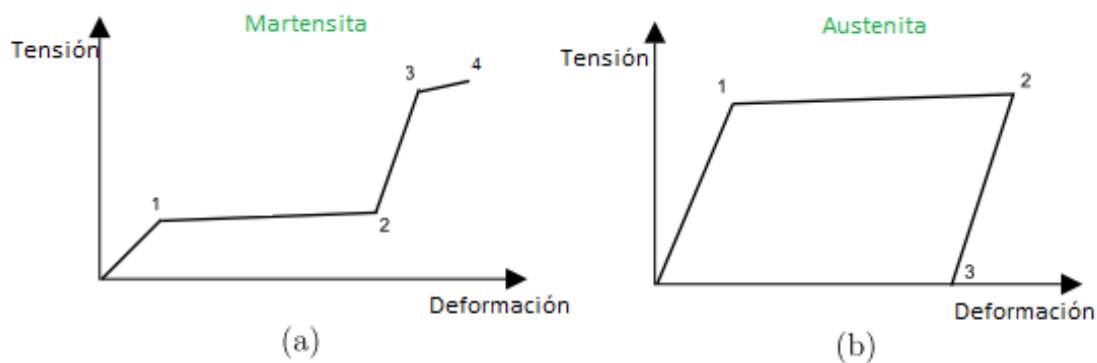


Fig. 2.12 – Curvas tensión/deformación en martensita y austenita

En la figura 2.12 (a) podemos ver que cuando una fuerza externa es aplicada en el SMA cuando se encuentra en su fase de martensita, el material se deforma elásticamente hasta el punto 1. Si la fuerza que se aplica en la fase de martensita supera el límite elástico, el material entrará en una fase de deformación no elástica que permitirá una gran deformación en el material (zona 1-2). La martensita será recuperable hasta que la fuerza llegue al punto 2. Sin embargo, si la fuerza aplicada supera este límite, se romperán las uniones atómicas del material, provocando una deformación plástica permanente (zona 2-3 y 3-4). La deformación a partir de la cual ocurre esto en el nitinol es del 8%. Muchas aplicaciones restringen este límite hasta el 4%.

En la figura 2.12 (b) para la fase de austenita sin embargo existe un límite elástico superior comparado con la martensita. Inicialmente el SMA se comporta elásticamente, hasta que la fuerza excede la longitud de límite elástico (punto 1). A partir de este punto, la deformación plástica causa un estiramiento irre recuperable (zonas 1-2 y 2-3).

## 2.6.- SMAs. EL NITINOL

### 2.6.1.- ALEACIONES COMERCIALES

De las aleaciones con memoria de forma, sólo unas pocas han sido desarrolladas comercialmente, como las de Ni-Ti, Ni-Ti-X (donde X es un elemento ternario) y Cu-Zn-Al. En la actualidad, el 90% de las nuevas aplicaciones se basan en Ni-Ti, Ni-Ti-Cu y Ni-Ti-Nb. Otras aleaciones como CuAlNi o FeMnSi han comenzado a introducirse en el mercado. En la tabla 2.1 se muestra una comparación entre algunas de las principales aleaciones SMA:

<i>Aleación</i>	<i>composición</i>	<i>Rango de temperaturas (°C)</i>	<i>Histéresis (°C)</i>
Ag-Cd	44/49 at %Cd	-190 a -50	15
Au-Cd	46,5/50 at % Cd	30 a 100	15
Cu-Al-Ni	14/14,5 at %Al; 3/4,5 wt% Ni	-140 a 100	35
Cu-Sn	15 at % Sn	-120 a 30	
Cu-Zn	38,5/41,5 wt % Zn	-180 a -10	10
In-Ti	18/23 at % Ti	60 a 100	4
Ni-Al	36/38 at % Ti	-180 a 100	10
Ni-Ti	49/51 at % Ni	-50 a 110	30
Fe-Pt	25 at % Pt	-130	4
Mn-Cu	5/35 at % Cu	-250 a 180	24
Fe-Mn-Si	32 wt%Mn; 6 wt% Si	-200 a 150	100

Tabla 2.1 – Aleaciones comerciales con memoria de forma

Al añadir nuevos elementos o variar la composición de estos, en las aleaciones, podemos conseguir nuevas propiedades que dependerán de nuestras necesidades [9]. Propiedades que nos pueden interesar variar serían:

1. Mejorar el rango de temperatura que soportan las aleaciones. Por ejemplo, las aleaciones de Ni-Ti soportan unos 100°C, algunas aleaciones con Pt podrían soportar hasta 1000°C.
2. Variar el ancho de histéresis. Por ejemplo, las aleaciones binarias Ni-Ti tienen un ancho de histéresis de entre 25°C y 40°C. Si se añade Niobio y un determinado tratamiento termomecánico, podemos conseguir ensanchar el ancho de histéresis hasta 150°C.

A pesar de todas las investigaciones en busca de nuevas aleaciones con memoria de forma, las únicas aleaciones comerciales en la actualidad siguen siendo las Ni-Ti y las de base Cu. Las más usadas, las de Ni-Ti, presentan las siguientes ventajas e inconvenientes comparadas con las aleaciones de base Cu:

VENTAJAS	DESVENTAJAS
- Mayor capacidad de memoria (un 8% mientras que sólo un 4-5% en las de base Cu).	- Son más caras y más difíciles de mecanizar
- Tienen mayor resistividad eléctrica (activación eléctrica más simple), pueden ser aleadas y extruidas con facilidad.	- El ciclo de histéresis de las aleaciones Ni-Ti suele ser muy pronunciado (grandes cambios en la deformación con pequeños cambios de T), lo que dificulta la aplicación para control proporcional.
- Mejor resistencia a la corrosión.	
- Son mucho más estables térmicamente.	
- Tienen un mayor rango de posibles temperaturas de transformación.	

Tabla 2.2 – Ventajas y Desventajas de las aleaciones Ni-Ti



## 2.6.2.- FABRICACION DE LAS ALEACIONES DE NI-TI

Para asegurar la calidad y consistencia de los materiales fabricados con Nitinol se deben conocer y entender los procesos seguidos para obtener este material y los efectos que tiene en las propiedades y formas finales [9]. Todos los componentes compuestos por nitinol (alambres, tubos, flejes, barras, láminas...) siguen los mismos pasos de fabricación:

### Paso1. Método de aleado:

Se trata de un proceso que requiere mucho cuidado ya que la obtención de las propiedades que caracterizan al Nitinol no se consigue con cualquier combinación de sus elementos. Para poder obtener un SMA de Ni-Ti nos tendremos que mover en un rango entre 49 y 52 % atómico de Ni [13]. Salir de este rango implicaría la formación de diferentes compuestos provocando la pérdida parcial de las propiedades de los SMAs, como podemos ver en el trozo del diagrama de fases del Ni-Ti que se muestra en la figura 2.13. Con referencia a este diagrama vemos que a temperaturas bajas, el rango estequiométrico de NiTi es muy estrecho, y consecuentemente el material contiene, a menudo, precipitados de una segunda fase intermetálica. Si se requiere más información respecto al diagrama de fases del Ni-Ti [13].

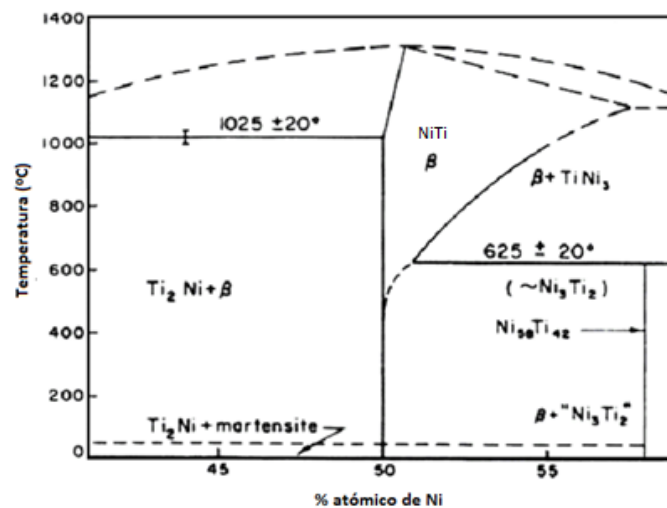


Fig. 2.13 – Diagrama de fases del NiTi ampliado

Dentro del rango de composiciones en el cual el compuesto NiTi existe a temperatura ambiente, la temperatura  $M_s$  (comienzo de la fase martensita) depende fuertemente de la composición química del material, como se puede ver en la siguiente gráfica:

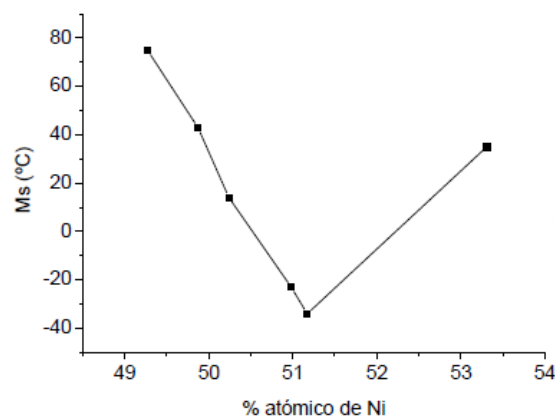


Fig. 2.14 – Variación de la temperatura  $M_s$  con la composición química

Por tanto, en nuestra aleación cualquier contaminante significaría cambiar la aleación y probablemente desecharla, lo que implica que los materiales aleados deben estar muy bien mezclados para asegurar homogeneidad y uniformidad. Esta mezcla se suele hacer en horno de vacío o atmósfera inerte. Los más usados son Aleado en vacío por inducción (VIM) y realeado en vacío por arco (VAR) con el que se consigue la mayor pureza posible en la aleación.

### Paso 2. Refino de la estructura en caliente:

Se refina la microestructura mediante una deformación adicional. La microestructura de la aleación recién obtenida tiene muy poca ductilidad y ha de ser trabajada en caliente. Dependiendo de la forma final el tratamiento puede ser distinto: extrusión, laminado en barra o lámina, forjado. Las temperaturas suelen estar entre 600°C y 800°C.

### Paso 3. Acabado final en frío:

Para conseguir las propiedades mecánicas y físicas deseadas en la mayoría de las aplicaciones, es necesario realizar un trabajado en frío en varios pasos (los más comunes son laminado en frío y extrusionado). Con el trabajo en frío se obtiene la forma final, el acabado superficial final, una microestructura refinada y las propiedades mecánicas deseadas.

### Paso 4. Tratamiento térmico final:

En muchas aplicaciones, el Nitinol todavía no presenta las propiedades deseables tras el trabajado en frío. Es por ello que requiere un tratamiento térmico final, entre 450-550°C.

## 2.7.- ACTUADORES SMA: VENTAJAS Y DESVENTAJAS

Un SMA puede funcionar como actuador realizando un trabajo contrario a una fuerza. Al calentarse, el SMA usa el efecto memoria de forma simple para generar fuerza y movimiento, fuerza que puede ser usada para usar a los SMA como actuadores. Los actuadores SMA se pueden presentar en varios formatos, incluyéndose muelles helicoidales, alambres, tubos de torsión... Dependiendo de la función que realicen como actuadores se pueden dividir en dos grupos según realicen un trabajo lineal o de revolución. Los SMA pueden ser usados de distinta manera en un mismo sistema como puede verse en la figura 2.15.

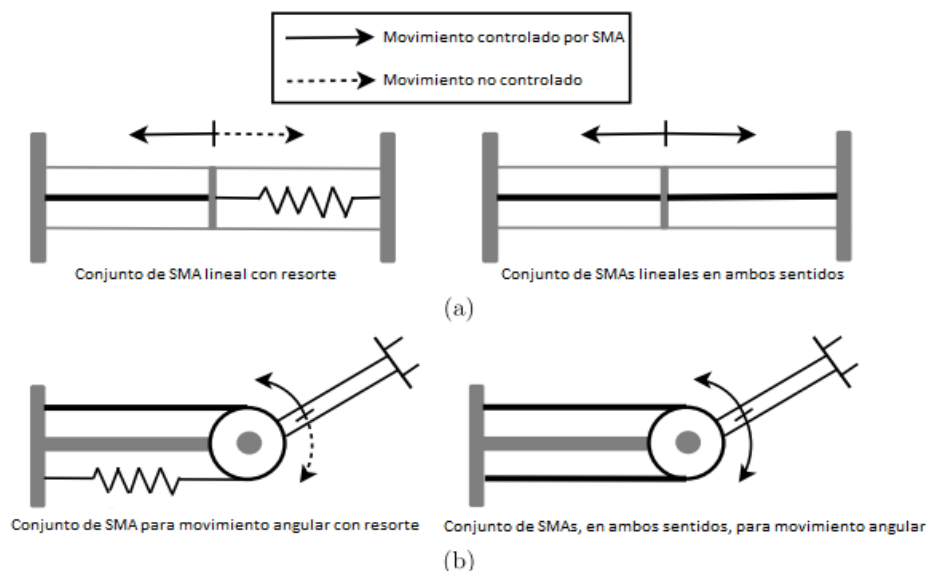


Fig. 2.15 – Diferentes configuraciones de trabajo de actuadores SMA

Debido a que los SMA utilizan el efecto memoria de forma simple para crear movimiento y sólo pueden contraerse, es necesario proveer una fuerza de retroceso que permita devolver al SMA a su posición neutral para que pueda aprovecharse como actuador. Esto puede hacerse usando un peso muerto, un muelle que este ejerciendo su fuerza en el sentido contrario del SMA, o incluso otro SMA que actúe al contrario, como puede verse en la figura 2.15. En el actuador SMA que funcione con un muelle en sentido contrario, solo el SMA será calentado y enfriado, así, el efecto de histéresis tiene una muy significativa influencia en la realización del control. Usando un SMA en contra de otro se puede reducir el efecto de histéresis al enfriar uno, mientras el otro se calienta. Otra de las ventajas que tiene usar un muelle en sentido contrario al SMA es que se puede realizar un control de posición angular y obtener un mayor rango de trabajo debido a que el muelle ayuda a devolver el SMA a su estado neutro.

En el presente proyecto se van a obtener las ventajas e inconvenientes de usar actuadores SMA frente al uso de actuadores convencionales, aunque en la actualidad ya se han demostrado algunas ventajas e inconvenientes, de carácter general, sobre el uso de cables SMA. Estas **ventajas** son:

1. Elevada relación fuerza–peso comparados con otros actuadores [14].
2. Simplicidad mecánica: Un actuador SMA solo usa la fuerza de contracción y ésta puede ser accionada directamente por una corriente eléctrica.
3. Fácil miniaturización, debido a su pequeño tamaño y a su actuación directa [11].
4. Limpieza, bajo ruido y alta biocompatibilidad [15], perfectos para aplicaciones de biotecnología o médicas.

Dentro de estas ventajas generales, el nitinol tiene otras ventajas que hacen que se destaque de otros materiales SMA. Estas incluyen una mayor ductilidad, mayor movimiento de recuperación, excelente resistencia a la corrosión, temperaturas de transformación estables y no son excesivamente costosos.

Aunque sus ventajas son muy numerosas, los SMAs también poseen algunos **inconvenientes** como:

1. Baja eficiencia energética, en torno al 10% basada en el ciclo de Carnot [11].
2. Degradación y fatiga: El rendimiento a lo largo del tiempo, la durabilidad y la fiabilidad dependen de numerosos factores incluyendo la máxima temperatura que se alcance, la tensión, la deformación y el número de ciclos trabajado.
3. Baja velocidad de respuesta: debido a sus restricciones de enfriamiento y calentamiento y a su ciclo térmico de histéresis [15].
4. Control impreciso: El largo ciclo de histéresis, así como sus características no lineales en sus fases de transformación, hacen difícil controlar de manera precisa a los SMA [14].

## 2.8.- MI ALEACIÓN ESCOGIDA

Respecto a las aleaciones comerciales que tenemos en la actualidad, ya se han comentado en el apartado 2.6.1 las ventajas que ofrece la aleación de Ni-Ti frente a las demás, por ello es la elegida en nuestro proyecto. Esta aleación de Ni-Ti también fue usada en el proyecto anterior [1] que se llevo a cabo en este mismo departamento. En concreto se ha adquirido nitinol con el nombre comercial flexinol, de la casa DINALLOY, INC. La aleación viene suministrada en forma de hilo o cable con distintos diámetros cuyos valores van desde los 0,025 mm a los 0,51 mm.

De todos los tamaños comerciales disponibles, en el proyecto anterior se usaron los de 150µm y 100µm de diámetro. De este proyecto anterior, en el departamento se disponía de algún excedente de cable por lo que, para ahorrar costes, se decide trabajar con estos tamaños. También debemos tener en cuenta que cuanto más grosor tiene el cable, mayor es la energía a suministrarle para su activación [1]. En nuestro caso cómo se pretende montar una plataforma autónoma de experimentación, cuya alimentación es aportada por una pequeña batería, cuanto menos energía se necesite para la activación del cable, pues mucho mejor. Por este motivo se decide usar el cable de flexinol de 100µm. Se valoró la posibilidad de adquirir cables de dimensiones más pequeñas pero debido a una menor resistencia mecánica y a que estamos limitando la fuerza que podemos ejercer, como podemos ver en la tabla 2.4, se decidió que el de 100 µm era el idóneo para nuestro proyecto.

A continuación se muestran las propiedades físicas y eléctricas de la aleación de nitinol adquirida, en unidades del sistema internacional:

PROPIEDAD	VALOR
Densidad	6,45 g/cm <sup>3</sup>
Calor Específico	0,2 cal/g*°C
Punto de Fusión	1300 °C
Calor latente de la Transformación	5,78 cal/g
Conductividad Térmica	0,18 W/cm*°C
Coeficiente de Expansión Térmica	
- Martensita	6,6x10 <sup>-6</sup> /°C
- Austenita	11x10 <sup>-6</sup> /°C
Resistividad Eléctrica (Aprox.)	
- Martensita	80 micro-ohms*cm
- Austenita	100 micro-ohm*cm

Tabla 2.3 – Propiedades físicas del Flexinol

Como podemos ver en la tabla 2.3, la densidad del flexinol es alta debido a la concentración de aproximadamente un 50% de níquel. La adición de titanio disminuye la densidad a 6540 Kg/m<sup>3</sup>, aunque sigue siendo elevada y muy próxima a la del acero (7850 kg/m<sup>3</sup>). En nuestra plataforma de experimentación vamos a usar dos cables de flexinol con un diámetro de 0,1 mm y de longitudes 24 cm y 48 cm, por tanto podemos calcular el peso de ambos cables:

Siendo:

$$S = \pi * \left(\frac{d}{2}\right)^2$$

$$V = S * l$$

$$m = \rho * V$$

S = sección del cable      V = volumen del cable  
 m = masa del cable      d = diámetro=0,01 cm  
 l = longitud = 30 cm      ρ=densidad=6,45g/cm<sup>3</sup>

Calculamos, y nos queda para el SMA de 24 cm:

$$S = 7,854 \cdot 10^{-5} \text{ cm}^2$$

$$V = 1,885 \cdot 10^{-3} \text{ cm}^3$$

$$m = 12,2 \text{ mg}$$

Y para el SMA de 48 cm:

$$S = 7,854 \cdot 10^{-5} \text{ cm}^2$$

$$V = 3,77 \cdot 10^{-3} \text{ cm}^3$$

$$m = 24,3 \text{ mg}$$

Como podemos ver, prácticamente la masa que nos suponen nuestros cables de flexinol es despreciable. Así se demuestra una de las ventajas de estos materiales como actuadores, pudiéndose reducir en un gran factor el peso y las dimensiones de un sistema de accionamiento.

Un dato que podemos ver en la tabla 2.3 es la conductividad térmica de la aleación, que es de  $18 \text{ W/m}^{\circ\text{C}}$ , parecida a la del acero inoxidable ( $14\text{-}15 \text{ W/m}^{\circ\text{C}}$ ). Por lo tanto su capacidad para conducir el calor se puede considerar buena. En el proceso de calentamiento, cuando se contrae el material, se puede garantizar una buena velocidad de calentamiento que conseguiremos haciendo pasar por él una corriente eléctrica. Se puede usar corriente continua, corriente alterna o corriente modulada por ancho de pulso (PWM) para accionar el flexinol. La ventaja de usar corriente alterna o PWM es que el actuador se calienta de forma más uniforme, por lo que usaremos señales PWM. Hay que tener mucho cuidado con no sobrecalentar en exceso el actuador, ya que puede deformarse permanentemente. En la tabla 2.4 se recogen los valores recomendados de corriente para los diferentes diámetros de flexinol.

Diámetro (mm)	Resistencia ( $\Omega/\text{m}$ )	Máxima fuerza que pueden mover (g)	Corriente aprox. Para contracción en 1 seg. (mA)	Tiempo de enfriamiento para cables LT $70^{\circ}\text{C}$ (seg.)	Tiempo de enfriamiento para cables HT $90^{\circ}\text{C}$ (seg.)
0,025	1425	8,9	45	0,18	0,15
0,038	890	20	55	0,24	0,2
0,05	500	36	85	0,4	0,3
0,076	232	80	150	0,8	0,7
0,1	126	143	200	1,1	0,9
0,13	75	223	320	1,6	1,4
0,15	55	321	410	2	1,7
0,2	29	570	660	3,2	2,7
0,25	18,5	891	1050	5,4	4,5
0,31	12,2	1280	1500	8,1	6,8
0,38	8,3	2250	2250	10,5	8,8
0,51	4,3	3560	4000	16,8	14

Tabla 2.4 – Características del flexinol para sus diferentes diámetros de comercialización

En el proceso de calentamiento el factor limitador no es la velocidad a la que este ocurre sino el esfuerzo generado por un movimiento tan rápido. Si el cable de Nitinol está unido a una carga, la inercia de la misma puede suponer un sobreesfuerzo para el cable, dañándose en el proceso. Para realizar contracciones muy rápidas, la fuerza de inercia debe

mantenerse baja y la corriente aplicarse en forma de picos elevados y cortos. Con este método el fabricante nos dice que pueden alcanzarse los 100 °C en 1 ms. En ciertas aplicaciones puede ser necesario calentar rápidamente el alambre y mantenerlo activo durante cierto tiempo. Para esto, la corriente de activación debe tener dos fases: un pulso corto de corriente elevada para contraer el actuador y una corriente menor para mantenerlo caliente sin sobrecalentarlo. Para aplicar este método es necesario conocer o poder estimar la temperatura del cable, acción que intentaremos realizar y explicar mediante la introducción de un sensor, que queda explicado en el apartado 4.4.5.

Un dato importante es el tiempo de enfriamiento del cable de nitinol. Este tiempo está directamente relacionado con la fuerza que produce y el diámetro. Debido a que nosotros no tenemos que realizar grandes fuerzas, nuestros cables tienen un diámetro pequeño, lo que garantiza rápidos enfriamientos (transformación martensítica rápida) del orden de 1,1 seg como podemos ver en la tabla 2.4, por lo tanto en principio de estos tiempos de enfriamiento no nos vamos a preocupar. Si necesitáramos aplicar más fuerza, se pueden usar varios cables de pequeño diámetro o cables mas grandes donde tendríamos que usar algún sistema disipador de calor para reducir sus largos tiempos de enfriamiento, cómo unir el cable con algún material de alta conductividad térmica o empleo de refrigerantes líquidos, no vamos a entrar en el tema ya que no forma parte de este proyecto, y ya hay otros estudios al respecto [16].

Si durante el enfriamiento del Flexinol no se ejerce una fuerza contraria a la dirección de la contracción del material, la deformación sufrida durante esta fase es muy pequeña y por lo tanto la contracción durante la fase de calentamiento también se ve reducida. Para solucionar esto se ha de ejercer una fuerza recuperadora mientras el alambre se enfría. Normalmente es ejercida sobre el cable de forma constante, y en la fase de enfriamiento de cada ciclo esta fuerza alarga el alambre. Hasta cierto punto, cuanto mayor sea la fuerza reseteadora mayor será la deformación que puede obtenerse. La fuerza del actuador así como la fuerza reseteadora necesaria para estirar el alambre a su tamaño original dependen de la sección del material. Una de las opciones para ejercer la fuerza reseteadora es mediante un muelle sujeto a uno de los extremos del alambre, como se ha podido ver en el apartado 2.7 de este presente capítulo. La fuerza ejercida por el muelle durante el calentamiento no es significativa, y en la fase de enfriamiento esta fuerza hace que el alambre recupere su forma original. Dynalloy asegura una deformación del 3% - 4% para la configuración de SMA simple con resorte (figura 2.16). Por razones de diseño esta es la opción escogida para ejercer la fuerza reseteadora en nuestra plataforma de experimentación.

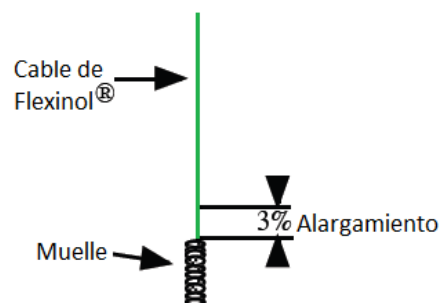


Fig. 2.16 – Configuración SMA-muelle

La resistencia de cualquier cable de flexinol es muy pequeña, en nuestro caso para el de 100  $\mu\text{m}$  su valor es de 126  $\Omega/\text{m}$ , como podemos ver en la tabla 2.4. Una resistencia baja,

garantiza, para nuestros cables (de 24 y 48 cm), un consumo reducido de potencia que podemos cuantificar, de forma teórica, mediante:

$$P = I^2 * R * l$$

Siendo:

I = intensidad por el cable = 0,2 A

R = resistencia del cable 100 $\mu$ m = 126  $\Omega$ /m

l = longitud del cable = 0,3 m

Nos queda, para el flexinol de 24 cm  $\rightarrow P = 0,2^2 * 126 * 0,24 \rightarrow \boxed{P = 1,21 \text{ W}}$

Y para el cable de flexinol de 48 cm  $\rightarrow \boxed{P = 2,42 \text{ W}}$

En las hojas de características del flexinol, que podemos ver en la web o en el CD-ROM adjunto al proyecto, se nos muestran más datos y nuevas gráficas, cómo la figura 2.17 con la gráfica temperatura-deformación para las dos aleaciones con diferente umbral de temperatura entre las fases austenítica y martensítica de 70°C y 90°C. De la gráfica se puede identificar el comportamiento poco lineal del material. El control de la deformación del cable a través de la corriente eléctrica (calor) es difícil de conseguir, pues la regulación de la temperatura se trata de un proceso lento. De esta gráfica se deduce que el control debe ser muy preciso e intentar trabajar en la zona plana de la gráfica durante el calentamiento o el enfriamiento.

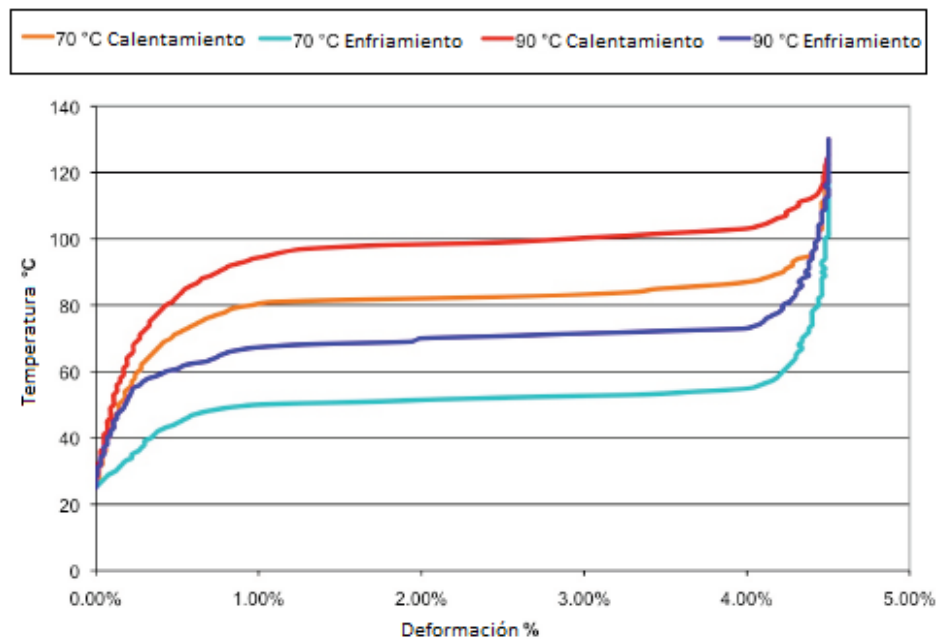


Fig. 2.17 – Curvas Temperatura/Deformación de la hoja de características del Flexinol

---

## Capítulo 3: ESTADO DEL ARTE

---

Estudios y aplicaciones del Nitinol.





## 3.1.- INTRODUCCION

Desde su descubrimiento, en 1959 [17], el nitinol ha ido ganando en usos y aplicaciones aunque su introducción en el mercado fue muy lenta, debido principalmente a los problemas iniciales en su manufactura, a su elevado precio y a no disponer de unos planes de marketing adecuados, pues no se tenía claro el perfil de cliente que demandaba el producto. Uno de los problemas más graves que se tuvieron inicialmente fue la difícil homogeneidad de los distintos lotes de nitinol que se fabricaban, lo que suponía un obstáculo para su comercialización [28].

Tras refinarse el proceso de manufactura, gracias a la utilización de técnicas de fabricación mejoradas, el uso del nitinol en aplicaciones comerciales se vio incrementado a lo largo de las décadas de 1970 y 1980. El nitinol comenzó a utilizarse cada vez en más productos, apareciendo dispositivos basados en este material en medicina, ingeniería aeroespacial, automoción, automática, productos de consumo...

## 3.2.- USOS EN EL CAMPO DE LA MEDICINA

El nitinol ha encontrado su mayor uso en aplicaciones biomédicas debido a sus buenas propiedades mecánicas, químicas (resistente a la corrosión, disolución y descomposición) y biológicas (es biocompatible, no es citotóxico, no es carcinógeno...). Todo esto implica que puede actuar con sistemas biológicos para tratar, aumentar o sustituir algún tejido, órgano o función del organismo y con una respuesta apropiada del propio individuo a tratar [21]. Las aplicaciones biomédicas del nitinol se pueden dividir en diferentes campos: cirugía vascular, ortopedia, odontología... [22].

Uno de los campos de la medicina en los que más ha influido el uso del nitinol es en la **cirugía cardiovascular**. El Dr. Morris Simon patentó en 1989 un filtro sanguíneo que puede colocarse en las venas para retener coágulos de sangre sin necesidad de cirugía [18]. A los alambres que componen el filtro del Dr. Simon se les da una forma de champiñón con una temperatura de transformación algo por debajo de la temperatura corporal. A continuación se enfrían y se estiran muy por debajo de la temperatura corporal. El dispositivo se introduce en la vena a través de un catéter, y al calentarse, gracias a la temperatura del cuerpo, el dispositivo recupera su forma de champiñón y se sujeta a las paredes de la vena. El filtro captura los coágulos y los retiene hasta que se disuelven de forma natural. En la figura 3.1 puede verse como el filtro cambia de forma según se produce su calentamiento:

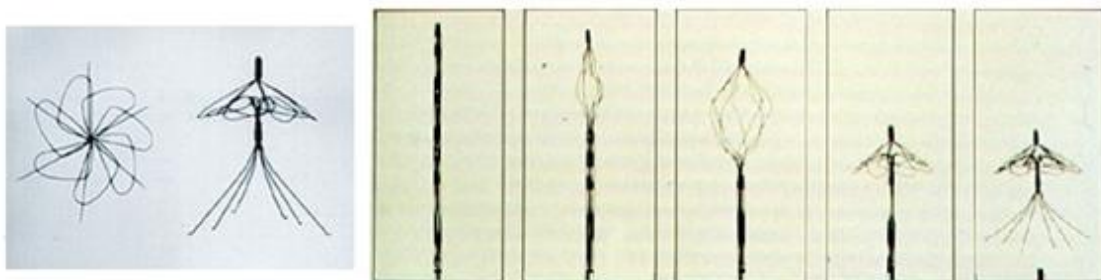


Fig. 3.1 – Filtro sanguíneo de nitinol del Dr. Morris

Otros dispositivos son los que se utilizan para cerrar los defectos septales. Defectos que se caracterizan por la presencia de un orificio en la pared entre las dos partes (derecha e izquierda) del corazón. El método quirúrgico para solucionarlo es muy invasivo y peligroso. Existe un dispositivo, fabricado de Cables de SMA y de una membrana de poliuretano impermeable (figura 3.2.a), que permite usar una técnica muy poco invasiva para solucionar este defecto. El procedimiento de inserción del dispositivo se compone de tres pasos (figura 3.2.b): el posicionamiento del catéter con el dispositivo a través de la vena cava superior, la colocación de la punta del catéter y la liberación de la mitad del dispositivo (1), y por último, la liberación de las restantes parte del dispositivo (2 Y 3). De acuerdo con la tipología del dispositivo, tanto el efecto de memoria de forma como el efecto pseudoelástico son utilizados [23].

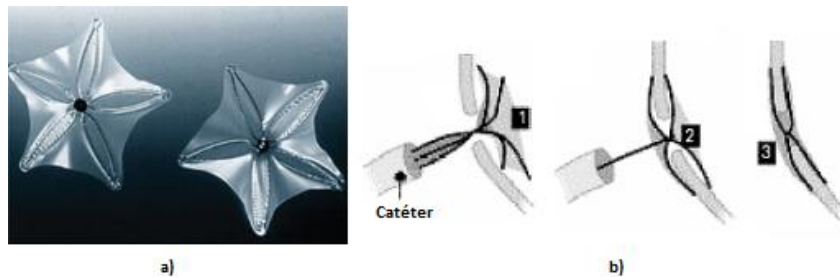


Fig. 3.2 – Dispositivo de nitinol para cerrar los defectos septales del corazón [24]

El nitinol se emplea con frecuencia para fabricar stents coronarios auto-expandibles (figura 3.3). Los stents, son prótesis tubulares destinadas a restablecer la capacidad de flujo en conductos corporales afectados de estenosis (estrechamiento). Son insertados con la ayuda de un catéter que mantiene el dispositivo a una temperatura por debajo de  $A_s$ , en fase martensítica, hasta el momento del despliegue. Cuando el stent sale del catéter es calentado por el medio fisiológico y cambia de forma, manteniendo las arterias abiertas cuando se encuentran obstruidas, y así normalizar la circulación sanguínea. [25][23].

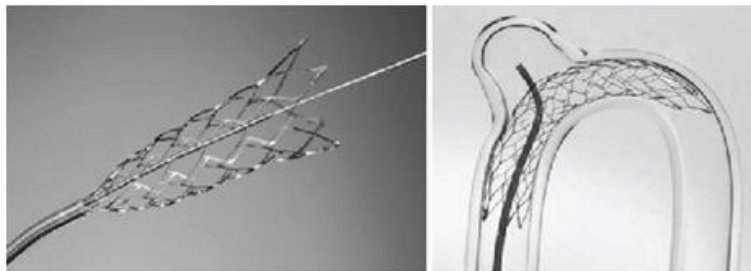


Fig. 3.3 – Stent auto-expandible fabricado en nitinol

La Catheter Research Corporation de Indianápolis también comercializa un catéter dirigit para la colocación de microinstrumentos médicos, medicamentos y electrodos en los vasos sanguíneos. La punta del catéter está hecha de nitinol y es controlada electrónicamente.

Otro de los usos que se le da al nitinol se da en el campo de la **cirugía ortopédica** y consiste en su utilización para juntar partes de huesos fracturados, con grapas de fijación ósea (figura 3.4.a) [26]. En frío, es decir en estado martensítico, la grapa está deformada, está abierta, y se inserta en ambos lados de la fractura sin aplicar fuerza. Por el calor del cuerpo, la grapa vuelve a tener su forma inicial austenítica, de modo que se cierra y junta así las dos partes del hueso fracturado. Las propiedades pseudoelásticas de la grapa permiten una fuerza

constante en las superficies del hueso en contacto. Existe otro dispositivo parecido a estas grapas, denominado Anchor de Mitek Surgical Products [16], que se usa para curar roturas de ligamentos y tendones. Este se implanta con cirugía menor, a través de pequeñas incisiones en el cuerpo. El dispositivo consiste en una pequeña ancla que se engancha a los huesos y que puede verse en la figura 3.4.b. El dispositivo se introduce a través de las incisiones en forma comprimida, y gracias a la temperatura corporal se calienta y recupera su forma de ancla.



Fig. 3.4 – Dispositivos de nitinol para la recuperación ósea

Otra aplicación importante en cirugía ortopédica son las placas de osteosíntesis [27]. Éstas se fijan con tornillos al hueso en ambos lados de la fractura. El hueso se repara más rápidamente cuando las caras de fractura están sometidas a tensiones de compresión continuas. Utilizando nitinol, una compresión de este tipo está asegurada por el retorno del material a su forma original. También existen espaciadores para cirugía de columna vertebral de nitinol (figura 3.5). Se utilizan para abrazar las vértebras. El disco se inserta deformado por compresión, una vez en el interior del cuerpo, cambia de forma por efecto del calor y se vuelve más circular [27].



Fig. 3.5 – Espaciadores de columna vertebral de flexinol [23]

El nitinol se emplea también para el tratamiento de la escoliosis, una inclinación y torsión de la columna vertebral. En los casos más graves de esta afección se requiere una cirugía en la que se atornilla una barra rígida (varilla de Harrington [27]) a las vértebras para mantener la columna rígida. Usando nitinol se puede aplicar una fuerza correctiva durante varias semanas, obteniéndose una corrección mejor ya que se modifica tanto la inclinación como la torsión de la columna [23].

La **odontología** es otro de los campos donde hay muchas aplicaciones de las aleaciones con memoria de forma. Implantes orales e hilos de ortodoncia son dos de los ejemplos más comunes. Los alambres de nitinol tienen una tensión de recuperación diez veces mayor que la del acero inoxidable y un módulo elástico pequeño, lo que hace que solo un alambre de nitinol sea necesario para la mayoría de los procedimientos de enderezamiento de dientes [16]. Estos hilos de ortodoncia de NiTi permiten aplicar cargas débiles y casi constantes aprovechando el comportamiento superelástico de estas aleaciones [27].

El nitinol, como podemos ver, tiene muchos **usos** y muy **variados** en biomedicina, usándose como instrumento para la extracción de objetos de órganos humanos, evitando los riesgos de usar instrumentos grandes y rígidos en zonas muy delicadas [28]. También se usa en placas intracraneales, para estrangulamiento de las trompas de Falopio, en extirpaciones de colon [5], como prótesis para la reconstrucción del ligamento cruzado de la rodilla [26], como dispositivo micro-administrador de fármacos implantable en el cuerpo humano [61]...

Existen unas aleaciones de NiTi de estructura interna porosa que se vienen utilizando desde los años 90s en diferentes procedimientos ortopédicos y maxilofaciales. Uno de los factores clave para la buena osteointegración es su capilaridad. Este factor permite la penetración de la médula del hueso en la estructura interna del implante. Esto ocasiona un buen anclaje tejido-implante, así como permite la circulación de fluidos. Otro factor positivo son las propiedades mecánicas del material, mucho más parecidas a las del propio hueso que la aleación maciza [27].

### 3.3.- USO COMO ACTUADORES

El uso del nitinol en actuadores tiene un gran potencial aunque en la actualidad no está muy extendido. La mayor parte de la producción anual de nitinol es utilizada en dispositivos superelásticos, como antenas para teléfonos móviles, monturas para gafas y dispositivos médicos [19]. El uso de estas aleaciones en el campo de los actuadores está motivado, entre otras razones, por la capacidad que tienen estas aleaciones de entregar una fuerza de actuación muy alta, equivalente a la de los actuadores hidráulicos, en relación a su bajo peso [20]. Su tamaño es considerablemente inferior al de los demás actuadores utilizados hoy en día, lo que los hace ideales para aplicaciones de miniaturización.

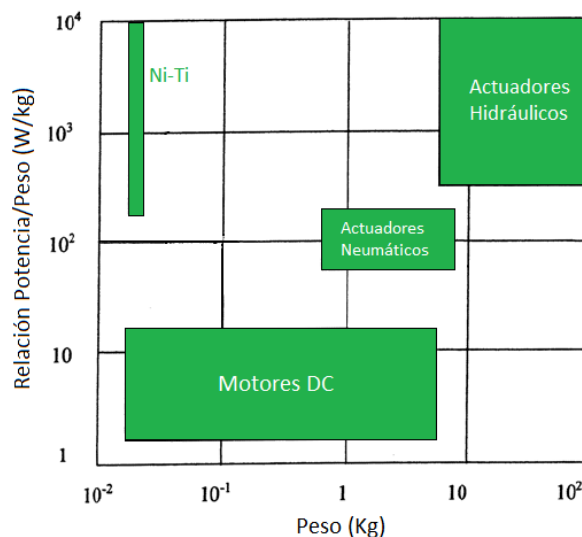


Fig. 3.6 – Comparación de actuadores SMA con el resto de actuadores

Los actuadores convencionales, como los motores eléctricos y los cilindros hidráulicos y neumáticos, provocan grandes limitaciones provocadas por su peso y complejidad para ser manipulados. Los motores eléctricos trabajan a grandes velocidades y producen pequeño par, así que requieren la adaptación de sistemas de reducción para generar la potencia necesaria para una tarea específica. Esto incrementa el peso y la complejidad para configurar un sistema,

además de elevar la fricción y el ruido. Los actuadores hidráulicos y neumáticos son mucho más livianos que los motores eléctricos, sin embargo, requieren de bombas, tubos y válvulas para manejar el fluido de trabajo, lo que lleva casi siempre a sistemas más complejos. Estas configuraciones mecánicas tienden a generar mucho ruido y a presentar fugas que entorpecen su funcionamiento, además de trabajar a velocidades más bajas. La figura 3.6 muestra claramente que los actuadores de nitinol pueden reducir el tamaño de los generadores de movimiento, por lo menos dos o tres veces su magnitud mientras mantienen la misma relación de salida [30]. Todas estas ventajas despiertan interés en la investigación y estudio de la aleación de nitinol y su aplicación como sistema accionamiento.

### 3.3.1.- ACTUADORES COMERCIALES

El nitinol se ha usado en algunos dispositivos comerciales. Uno de estos primeros dispositivos fue un conector para líneas hidráulicas que consistía en un tubo de nitinol pretensado que se contrae y puede sujetar firmemente los dos extremos de un tubo. Este dispositivo fue comercializado en 1969 por la Corporación Raychem bajo el nombre Cryofit y fue usado para el acoplo de las líneas hidráulicas del caza F- 14 [29]. La empresa Beta Phase también tiene patentados unos conectores eléctricos de NiTi que cuando son calentados adoptan una forma predeterminada, ejerciendo una fuerza que abre o cierra las conexiones eléctricas entre componentes [18].

El nitinol también ha tenido aplicaciones en la industria del automóvil, como por ejemplo: un dispositivo para el control de la presión y viscosidad del aceite con la temperatura [15], pequeñas válvulas para impedir el paso del fuel en los inyectores de los motores diesel [29]...

También en la industria aeroespacial se le han dado varias aplicaciones al nitinol. Entre ellas se encuentra el Frangibolt (figura 3.7), un sistema de liberación que utiliza la fuerza generada por la contracción de un cilindro de nitinol para romper un tornillo y de esta manera liberar una carga. La sonda Clementine utilizó este sistema para la liberación de sus paneles solares. También se usó un dispositivo de flexinol para medir la acumulación de polvo en los paneles solares del Sojourner rover que fue lanzado a Marte en 1997 [31].



Fig. 3.7 – Sistema frangibolt de nitinol para liberar una carga

Otra de las aplicaciones en la que se usó el nitinol fue en motores térmicos. El principio de funcionamiento de estos motores se basa en el cambio de estado del nitinol cuando pasa por dos baños de agua, uno caliente y el otro frío. El agua caliente contrae el nitinol mientras que el agua fría lo expande. Algunas investigaciones apuntan, mediante esta técnica, a la idea de aprovechar el calor residual de un proceso para sacar electricidad mediante el uso de SMAs

[59]. La fuerza y el par resultantes provocan el movimiento del motor. Para ser prácticos, estos motores deberían proporcionar cientos de kilovatios, pero en la práctica nos pueden aportar del orden de un kilovatio [18]. Debido a estos los problemas de baja potencia y al elevado precio de estos motores térmicos, estos han encontrado su mayor uso en juguetes como el Thermobile de ITI [18]. También se han usado cables de nitinol en otros juguetes para el movimiento de partes móviles como alas o patas.

Uno de los primeros actuadores basados en el uso del nitinol fue una especie de bisagra para abrir las ventanas de los invernaderos cuando la temperatura dentro de los mismos alcanza valores demasiado elevados [18]. Sin embargo esta aplicación era poco práctica debido a que variaba la fuerza que había que ejercer para abrir un mecanismo expuesto a las inclemencias del tiempo.

En cuanto a uso doméstico tenemos varios dispositivos en los que se usa nitinol como actuador. Existe una válvula de nitinol para cafeteras que se abre permitiendo el paso del agua hacia los granos de café cuando esta alcanza una temperatura predeterminada [18]. También se comercializa un dispositivo anti-quemaduras para duchas. Si el agua alcanza una temperatura peligrosa, la válvula se cierra impidiendo el paso del agua. También, el Laboratorio Batelle Columbus de Ohio ha desarrollado un aspersor antiincendios en el que la contracción de un elemento de nitinol, usado como un sensor de temperatura, libera el agua [29]. Además este aspersor puede apagarse una vez sofocado el incendio, gracias al doble efecto de memoria de forma, que fue explicado en el apartado 2.5.2.

Como se ha comentado anteriormente, el nitinol es especialmente útil en dispositivos miniaturizados debido a que puede ser activado por una corriente eléctrica, a su bajo peso y a que sus principales características como la memoria de forma y la superelasticidad, se mantienen a pequeña escala. Esto supone que puedan fabricarse una gran variedad de dispositivos miniaturizados como interruptores, microposicionadores o sistemas micro-robóticos. Se han desarrollado productos como el array de válvulas de la figura 3.8. Los cuatro actuadores de nitinol están formados en un substrato de silicio de 1 cm por 1.4 cm y operan a una potencia de 0.25 W. Este dispositivo se usa por ejemplo en la síntesis de ADN [19].

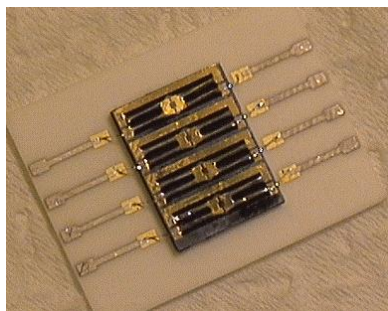


Fig. 3.8 – Array de válvulas de nitinol para la síntesis del ADN

### 3.3.2.- INVESTIGACIONES SOBRE EL CONTROL

Ya se han comentado en el apartado 1.4 y en el anterior, las principales ventajas que aporta el uso de este material. Para realizar las pruebas en nuestra plataforma de experimentación y conducir la investigación en la dirección correcta, es necesario conocer los problemas existentes e inconvenientes de un sistema de accionamiento basado en nitinol. Para ello se analizan estudios teóricos, investigaciones y prototipos realizados para conocer las

principales características de diferentes sistemas, su control y todas sus limitaciones. En los últimos años se ha incrementado mucho el número de artículos y estudios sobre los materiales con memoria de forma y en concreto sobre el nitinol, por lo que no podemos pretender dar a conocer todos los estudios e investigaciones, pero aquellos más relevantes, ya que nos darán una idea del momento actual en que nos encontramos y de los resultados obtenidos por otros investigadores.

Las mayores investigaciones en cuanto al control de los SMAs como actuadores comenzaron en la década de los 80s. Así, Hirose et ál. [32], en 1985, diseñaron un actuador que empleaba una configuración para los elementos SMA llamada  $\xi$ -array. En esta configuración los cables SMA están dispuestos mecánicamente en paralelo pero eléctricamente en serie, lo que incrementa el valor absoluto de la resistencia eléctrica. Esta configuración también fue utilizada por Ikuta et ál. [33], en 1988, en el desarrollo de un servomotor basado en el uso de dos SMAs antagonistas. Para el control se usó un controlador PID con una señal de salida PWM, que toma el valor de la **resistencia eléctrica como realimentación**, ya que esta varía con el porcentaje de austenita en la aleación, y por tanto varía con la temperatura (figura 3.9). Con este servomotor se fabricó un endoscopio activo.

Un par de años después, de nuevo, Ikuta et ál. [52] implementaron un esquema de control, mostrado en la figura 3.10, que combinaba realimentación de la resistencia eléctrica y realimentación de posición y permitía controlar la rigidez y la medida de fuerza del SMA sin necesidad de un sensor de fuerza. Con este esquema se construyó un micro-actuador con forma de pinza.

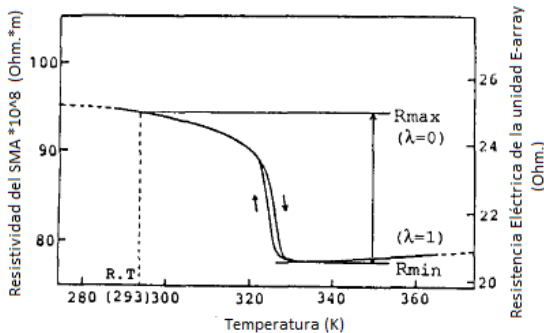


Fig. 3.9 - Definición de  $R_{min}$  y  $R_{max}$  en relación a la resistencia eléctrica y a la temperatura de operación

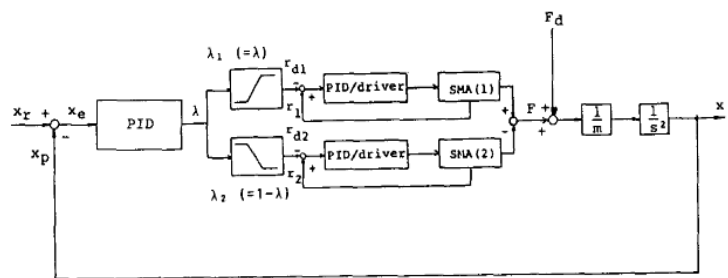


Fig. 3.10 - Esquema de control propuesto con combinación de resistencia eléctrica y realimentación de posición

Aunque en las investigaciones anteriores se validó la eficacia de realimentar con la resistencia eléctrica del nitinol, hay otros estudios como el que realizaron Asua et ál. [34] de la UPV/EHU en el que se indica que no se puede hacer un control preciso realimentando con la resistencia del cable a no ser que se usen métodos de control más avanzados, ya que esta varía no linealmente debido a la transformación martensítica del cable. Esta ambigüedad intentará ser tratada en nuestro proyecto posteriormente.

Otro controlador propuesto para el control de SMA, fue un **PID modificado** propuesto por Reynaerts y Van Brussel [37] en 1991, que utiliza un modelo de histéresis que pone la rotación del actuador frente a la potencia de entrada y con ello estima la potencia necesaria para mantener el actuador en una posición determinada. Como señal de realimentación se usa la posición angular del actuador, proporcionada por un sensor de efecto hall montado en la articulación. Además, el controlador tiene una limitación de potencia para evitar quemar el material. Aunque cabe resaltar que la respuesta obtenida con este control no es todo lo precisa que debería, debido a la no linealidad del nitinol.



Más tarde, en 1997, Troisfontaine et ál. [63] estudiaron un controlador PI que incluía dos técnicas de control en lazo cerrado: una con realimentación a través de la posición y otra basada en una **realimentación con temperatura**. La medida de temperatura se realizaba en un cable de 100  $\mu\text{m}$  con un termopar pegado a él por una pasta térmica. Este método tenía algunos inconvenientes, como problemas de retraso en la señal de medida de la temperatura, y que debido a variaciones en la temperatura ambiente podía variar la posición de salida. Hay que tener en cuenta que las pruebas solo se realizaron para un escalón de referencia y partiendo siempre desde la temperatura ambiente, por lo que en el apartado 6.2 se intentará realizar un control realimentado por temperatura que pueda resultar satisfactorio.

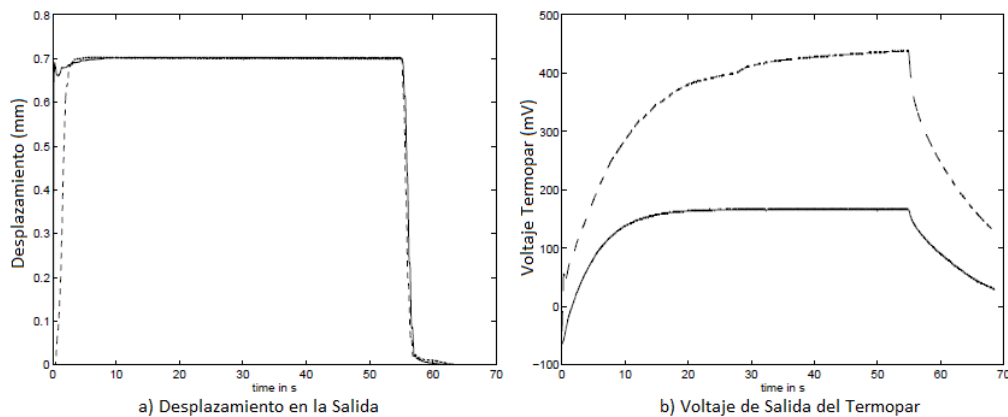


Fig. 3.11 - Comparación de las respuestas entre ambos controladores (posición y temperatura) para el mismo desplazamiento

Otra opción para controlar un actuador SMA es utilizar un control en lazo abierto que use un **modelo matemático** de simulación del comportamiento del material. Muchos investigadores, como Aernoudt, Kuribayashi [19]... han realizado estudios orientados a la obtención de un modelo matemático.

Uno de los modelos más completos que hay es el publicado por Meier y Oelschlaeger en 2004 [64]. Este modelo toma en consideración parámetros como: corrientes variables, cargas variables como muelles, coeficientes de transferencia de calor, influencia del esfuerzo en las temperaturas de transformación, la expansión térmica, la elongación elástica, la resistencia óhmica y la geometría. Con todo esto, obtienen un modelo de gran calidad y precisión con el que se ha podido simular el comportamiento del nitinol de manera precisa y poder realizar simulaciones en tiempo real, para crear algoritmos futuros de control de actuadores. Unos años después, en 2008, Jayender et ál. [48], describen un nuevo y completo modelo para actuadores SMA, que consta de 3 ecuaciones y está basado en la física del proceso. Con este modelo desarrollaron también unos controladores proporcionales para controlar la deformación en un actuador SMA.

A pesar de los buenos resultados en el control del nitinol y de su alta relación fuerza peso y accionamiento silencioso, su respuesta es relativamente lenta, estando limitada por la velocidad a la que el SMA puede ser **calentado y enfriado**.

Así Russell y Gorbet [46], en 1995, describen un desarrollo novedoso de un actuador SMA básico en el que se permite un calentamiento rápido sin dañarlo por sobrecalentamiento, se media su temperatura máxima con un sensor de temperatura infrarroja para asegurar que no se dañaba el SMA. El enfriamiento se mejoraba con la ayuda de un disipador de calor móvil. Si la temperatura del alambre SMA puede ser medida, entonces largas corrientes pueden ser aplicadas al alambre produciendo un rápido movimiento del actuador sin el peligro del

sobrecalentamiento. El cable también se enfriará más rápido sino se sobrecalienta. La velocidad de operación mejora considerablemente frente a la misma configuración del actuador sin ningún disipador de calor.

Más tarde, en 2004, Featherstone y Teh [47] [49] obtuvieron otro método para una mayor rapidez en el calentamiento eléctrico de elementos de SMA sin riesgo de sobrecalentamiento. Este método está basado en la variación de la resistencia del SMA entre las fases de martensita y austenita. Se relacionan estos valores de resistencia con los característicos de temperatura y siempre que la resistencia medida se corresponda a una temperatura menor a la de seguridad, una corriente de calentamiento de gran tamaño se puede aplicar. Si la resistencia se encuentra fuera de este rango entonces la corriente debe reducirse a un valor que no sobrepase el límite superior seguro y sobrecaliente el SMA. Con este método de calentamiento rápido, y en ausencia de carga, se duplica la velocidad máxima del actuador, comparado con la que se obtenía aplicando el valor de corriente de calentamiento seguro de las hojas de características. A pesar de esto, la exactitud de seguimiento es baja (debido a grandes ciclos límite), y se sobrecargan los cables SMA.

Unos años más tarde, los mismos autores [45], presentaron una nueva arquitectura de control para un rápido y preciso control de fuerza y posición de dos pares de cables antagonistas SMA. Esta arquitectura consta de: un controlador PID modo diferencial, un mecanismo anti-holgura, un mecanismo de rápido calentamiento y un mecanismo anti-sobrecarga. Demostraron que la respuesta en lazo cerrado es rápida y precisa, incluso en la presencia de grandes perturbaciones. También se vio que la velocidad de seguimiento de la posición del controlador de dos lazos (fuerza y posición) no es tan rápida como la velocidad de seguimiento de solamente de la fuerza.

El calentamiento en el nitinol se produce rápidamente, el problema está en su baja velocidad de enfriamiento, sobre todo para cables o muelles de nitinol de mayores grosores. La relación de enfriamiento es proporcional a la relación entre la superficie del material y su capacidad calorífica. Además, la velocidad de enfriamiento depende mucho del método de refrigeración empleado, como podemos ver en la hoja de características del flexinol y en la figura 3.12. Uno de los estudios más completos sobre el enfriamiento en el nitinol fue el realizado por Hashimoto et ál. [65], en 1985. En esta investigación se realizaron varias pruebas de refrigeración con un alambre de nitinol de 0.8 mm de diámetro empleando varios métodos de refrigeración como el enfriamiento en aire, ventilación, enfriamiento con agua y disipadores de calor, mostrando que el mejor rendimiento se obtiene mediante el uso de disipadores, con una relación de enfriamiento de 21 °C/s.

Otros autores se han enfrentado al problema de la baja velocidad de enfriamiento del nitinol, que reduce el ancho de banda del mismo. Bergamasco et ál. [41], en 1989, diseñaron un motor lineal que utiliza como elementos activos dos muelles de nitinol en una configuración push-pull. Este sistema emplea un circuito de enfriamiento activo por agua y lograron frecuencias de funcionamiento de entre 1 Hz y 2 Hz, mayores que lo que se había conseguido hasta entonces.

Años después, Reynaerts y Brussel [37] propusieron un sistema de accionamiento para manos robóticas miniaturizado que consistía en cables de sección rectangular, para mejorar la transferencia de calor, al tener mayor superficie, y que conducen un sistema de poleas y sometido a la tensión de un muelle, prototipo similar al propuesto por Andrés Cano [5], donde la refrigeración se llevo a cabo mediante aceite. Con este actuador lograron frecuencias de

funcionamiento por encima de los 2 Hz, pudiendo aumentarse mediante el uso de otros refrigerantes.

Algunos investigadores como Rediniotis y Lagoudas [42] demostraron que pueden obtenerse frecuencias de funcionamiento superiores a 20 Hz al utilizar actuadores SMA consistentes en una fina capa del material, de unas 6  $\mu\text{m}$  de grosor y dejaron una puerta abierta a la obtención de anchos de banda de entre 50 Hz y 100 Hz utilizando refrigeración activa y haciendo que el SMA no realice una transformación de fase completa, lo que puede ser útil para algunas aplicaciones.

González-Quijano et ál. [51], en 2011, realizó un estudio de la mejora de la respuesta de frecuencia y el consumo de energía, realizando una comparativa para varios tamaños de cables y en varios sistemas de refrigeración.

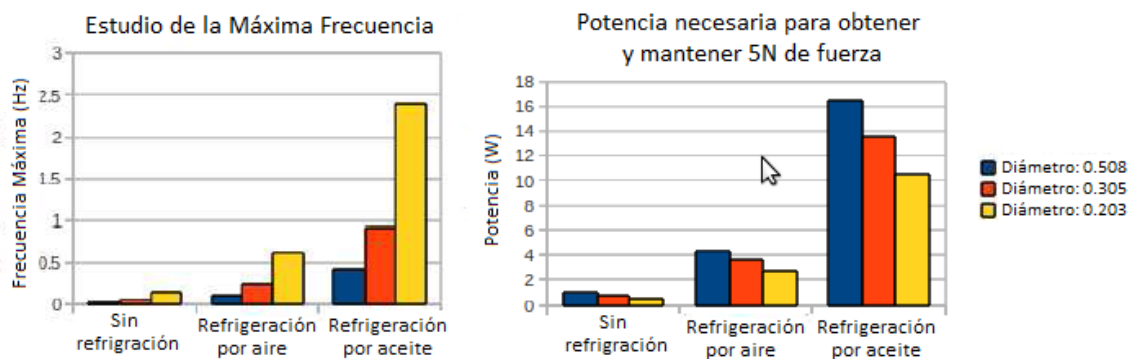


Fig. 3.12 – Comparativa de diferentes sistemas refrigerantes en cables de flexinol de distintos diámetros

Demuestra que es posible aumentar la respuesta en frecuencia, con sistemas de enfriamiento, aunque esto aumenta el peso y tamaño del actuador, perdiendo su principal ventaja y teniendo un impacto significativo en el consumo de energía. Sin embargo, la alta relación fuerza-peso los hace una solución a tener en cuenta en algunos casos.

Esta alta relación fuerza-peso es usada por Mosley et ál. [43] en 1999. En este artículo se presenta un actuador formado por 48 cables SMA mecánicamente montados en paralelo formando un poderoso músculo. El nuevo actuador puede levantar 45 Kg, unas 300 veces su peso. Este actuador fue probado en diferentes experimentos en lazo abierto con diferentes pesos y diferentes entradas, como escalón, rampa, senoidal, media senoidal, y sus características dinámicas fueron evaluadas. De especial importancia es la imprevisibilidad de la respuesta del actuador cuando son aplicados bajos voltajes. Esto sugiere un posible comportamiento caótico del actuador, que potencialmente causa problemas en el control en tareas finas y de alta precisión.

Esta impredecibilidad del material ante voltajes bajos, la dificultad de controlar el dispositivo debido a su dinámica no lineal y la elevada dependencia de la respuesta del sistema con los cambios de temperatura hace que los controladores convencionales no sean del todo válidos para tareas de alta precisión [30]. Debido a estos problemas, en algunas aplicaciones se tiene que hacer uso de algunas técnicas de control algo más avanzadas. Así, Grant y Hayward [35] [36], en 1997, usaron un control de estructura variable (VSC) con modulación discreta de corriente. Controlaban un pequeño actuador formado por un par de actuadores de nitinol antagonistas compuestos por múltiples fibras organizadas helicoidalmente. El control usaba la

señal de posición como realimentación, y ajustaba el valor de la corriente según esa posición. Se logró diseñar un control preciso con una baja complejidad relativa.

En 2004, Elahinia et ál. [44] construyeron una especie de brazo elevador con un cable SMA con una estructura de control bastante precisa. El controlador estaba basado en error de posición, y la tensión deseada en el cable es computada por una estructura de control variable PI.

Song [54], en 2007, colocó un cable de nitinol roscado en un rotor que al calentarse eléctricamente lo hacía girar. Realizó un control deslizante con tres componentes: un control estándar PD, un feedforward con corriente parcial y un término robusto que incrementaba la estabilidad y precisión. Los experimentos demostraron el funcionamiento del motor y una buena precisión del control. En 2013, Chaitanya y Dhanalakshmi [60], realizaron pruebas de control en una pinza actuada por SMA. Se obtuvo un modelo con técnicas de identificación y se usaba un control deslizante PI-PD para que la pinza pueda seguir diferentes trayectorias de forma precisa, como señal de realimentación usaron un sensor de desplazamiento sin contacto que media la apertura de la pinza. Algunos otros autores como Lan et ál. [55] trabajaron también con el nitinol como sistema de accionamiento de una pinza para manipular objetos. En este caso, fabricaron una micropinza de dos dedos actuada por un cable de nitinol, que conseguía un amplio rango de apertura y fuerza en un espacio reducido. Esta pinza conseguía agarrar y soltar en dos segundos.

En los últimos años, técnicas de control más avanzadas para sistemas no lineales han sido desarrolladas, cómo controles de lógica borrosa o redes neuronales. Ahn y Nguyen [50] 2006, presenta un nuevo desarrollo de un sistema de control de posición del SMA mediante el uso de un controlador PID difuso auto-tuning. Este algoritmo de control es utilizado por el ajuste de los parámetros del controlador PID integrando de este modo inferencia difusa y produciendo un controlador PID adaptativo que puede ser utilizado para mejorar el rendimiento de control de sistemas no lineales. La demostración experimental mostró que este nuevo controlador podría compensar el fenómeno de histéresis de accionadores SMA. Este controlador fue comparado con el convencional controlador PID sin sintonización difusa y realizó un mejor desempeño.

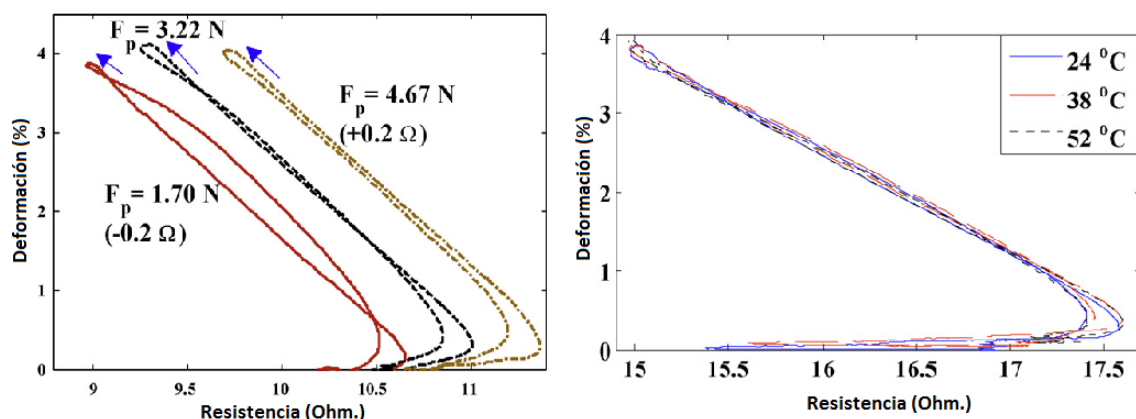


Fig. 3.13 – Curvas resistencia/deformación para varios valores de pretensado del cable y temperatura

Con la implementación de otro PID difuso, Lan y Fan [62], consiguieron un error absoluto menor del 3%. Obtenían la deformación del cable a través de la medida de la resistencia en el SMA y consiguieron montar un control preciso con la propia resistencia del

cable que responde bien a entrada escalón y trayectoria senoidal. También relacionaron la resistencia del cable con la fuerza que podía producir y vieron que las histéresis se podían reducir pretensando el cable con una mayor fuerza, como se puede ver en la figura 3.13.

También existen desarrollos basados en redes neuronales, como el propuesto por Asua et ál. [34], que proponía una red neuronal entrenada para implementar la histéresis inversa que combinaron con un control tipo PI con antiwindup. Demostraron que de esta manera se pueden obtener precisiones cercanas a la micra. Además este controlador no requiere señales de control elevadas por lo que se tiene un sistema más fiable y el nitinol sufre una degradación menor. Nikdel et ál. [56], este mismo año, compararon el comportamiento de un controlador de estructura variable con el de un modelo predictivo neuronal para un actuador rotativo SMA. Tuvieron en cuenta la histéresis y el comportamiento con la transferencia de calor... A pesar de que los dos controladores siguen de forma satisfactoria la referencia, el modelo predictivo tiene un mejor comportamiento.

### 3.3.3.- ROBOTICA

A pesar de todas las ventajas del nitinol comentadas anteriormente (alta relación fuerza-peso, silencioso...), su alcance en aplicaciones de robótica no está claro, principalmente debido a su respuesta de baja frecuencia y a su alto consumo de energía. Además, las altas no-linealidades y dependencia de la temperatura en su dinámica crea la necesidad de sistemas de control complejos para algunas aplicaciones.

En los últimos años se están llevando a cabo muchas investigaciones acerca del uso de actuadores de Nitinol como músculos artificiales para manos robóticas. Cambiar SMA por motores DC, para el uso de prótesis robóticas, resulta muy ventajoso debido a su bajo peso, su ausencia de ruido, fuerza y bajo precio. Muchos autores han propuesto algunos diseños de músculos para manos robóticas hechos de aleaciones con memoria de forma [16].

Por ejemplo, DeLaurentis et ál. [38] fabricaron un prototipo de dedo ligero de aluminio para manos robóticas que usa alambres de nitinol como músculos. Estos alambres están embebidos en los dedos. También, Adrianesis y Tzes [58] realizaron un estudio sobre una prótesis de mano de fibra de plástico reforzado accionada con cables SMAs.

Recientemente se han propuesto algunos diseños de actuadores para manos robóticas que permiten diseñar manos con un gran número de grados de libertad sin que el control de las mismas sea demasiado complejo. Así, O'Toole [69], en su tesis de 2011, propuso un diseño para una prótesis robótica que consta de varios bloques de cables SMA en paralelo, lo que permite incrementar la fuerza de generación sin comprometer el rendimiento dinámico. Estos cables SMA son los encargados de reproducir las típicas fuerzas y contracciones asociadas al dedo humano. Un nuevo enfoque para el control es desarrollado, con lo cual un controlador adaptativo es desarrollado y sintonizado usando los principios termo-mecánicos de operación de los SMA. Los resultados mostraron que esta configuración de SMA es adecuada para aplicaciones de prótesis y posee una buena eficiencia energética. El mayor inconveniente de estos sistemas es la complejidad de la parte mecánica, debido a su configuración en pequeños segmentos de nitinol.

Aunque no es propiamente una prótesis o mano robótica, Bizdoaca et ál. [53], presentaron una estructura de tentáculo robótico actuada por SMA. Este tentáculo robótico contiene 4 actuadores SMA y una articulación esférica. Se presentó un modelo matemático y

se probaron varios controladores PI, PD y PID. Esta estructura tentáculo SMA representa una solución interesante para los robots de pintar o robots designados para trabajar en espacios peligrosos. Desafortunadamente su tiempo de respuesta tiene una fuerte dependencia de la temperatura ambiente.

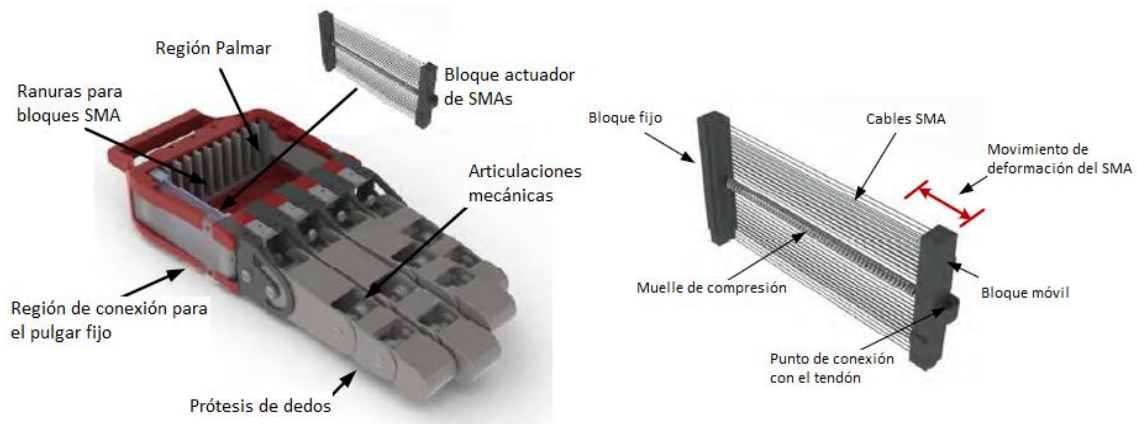


Fig. 3.14 – Prótesis de mano, con cables de nitinol formando pequeños segmentos en paralelo

Otra aplicación interesante para tareas de manipulación o movimiento es lugares peligrosos o donde se tenga poco espacio, fue la llevada a cabo por Lai et ál. [57]. Diseñaron un actuador que puede rotar dos ejes perpendiculares donde cada eje está actuado por un par de cables SMA. El manipulador mide 14 x 14 mm y puede girar cada par de ejes  $\pm 40^\circ$ . Se puede ampliar el giro cambiando los muelles de precarga de cada cable.

En el campo de la robótica, con el nitinol se han llevado a cabo varios desarrollos de pequeños robots. Un ejemplo de ello es el pequeño robot hexápodo GJ-M [39] y similares [40], que utilizan alambres de Nitinol como músculos para generar el movimiento de las patas. Esto les permite tener un bajo peso y un movimiento rápido y silencioso. Otro de estos pequeños robots, pero bastante más complejo, fue el llevado a cabo por Colorado [68] en 2012. Realizó un murciélago robótico actuado por SMA, denominado Batbot, que fue diseñado con parámetros morfológicos muy similares a los descritos por un murciélago real. Los SMAs fueron usados como bíceps y tríceps de sus alas, haciendo las veces de músculos artificiales. Formuló modelos matemáticos de la cinemática, dinámica de las alas... y efectuó un buen y preciso control de vuelo del dispositivo. En la siguiente figura podemos ver las partes de las que consta dicho robot, aunque le faltan las alas de membrana de silicona.

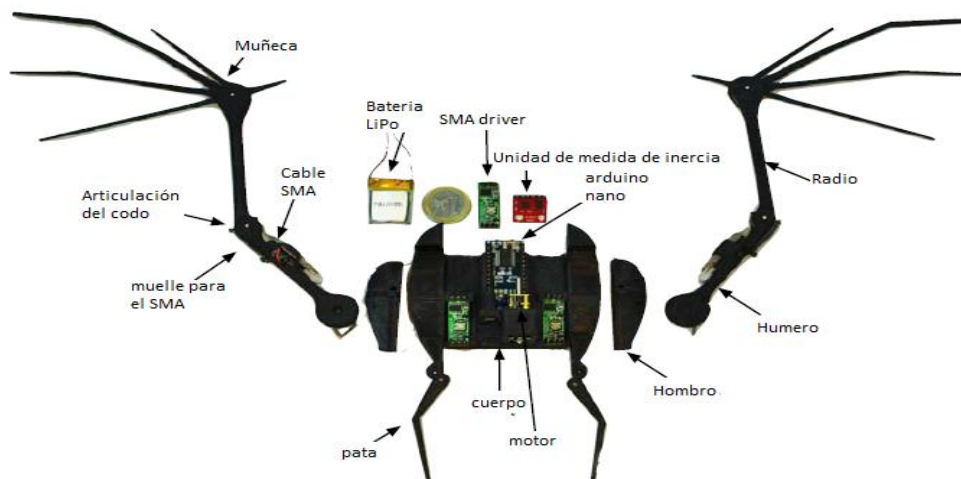


Fig. 3.15 – Pequeño robot “Batbot” movido por cables SMA

### 3.4.- OTRAS APLICACIONES

Aunque no es ámbito de aplicación en nuestro proyecto, si debemos conocer que existen otras aplicaciones del nitinol que no están relacionadas con el ámbito médico o con el uso de este como actuador. Estas aplicaciones representan un alto porcentaje en la producción anual de nitinol. Una de ellas es el uso del nitinol en la fabricación de monturas de gafas [29], ya que ofrece ventajas, como hacer a las monturas más duraderas, resistentes a la corrosión, y hace que puedan recuperar su forma si se introducen en agua caliente.

Otra de las aplicaciones más importantes del nitinol es para su uso como antenas retractables en teléfonos móviles [15]. Estas antenas de Ni-Ti ofrecen mayor durabilidad y recobran su forma cuando los esfuerzos de flexión son eliminados. Este efecto superelástico ayuda a evitar retorcimiento y deformación, extendiendo la vida de la antena. Un revestimiento de poliuretano se añade normalmente para mejorar la antena estéticamente.

El Ni-Ti se encuentra en algunos productos de consumo, por ejemplo, algunos cables de refuerzo de los sujetadores está fabricados de nitinol [29]. Estos cables ofrecen mayor confort que los convencionales de acero, ya que su módulo elástico es menor. Otra ventaja adicional es el hecho de que debido a su superelasticidad, estos cables son resistentes a deformaciones permanentes que pueden producirse en los diferentes ciclos de lavado y secado que se llevan a cabo en la vida del material.

Otro ámbito donde se llevan a cabo muchas investigaciones para el uso del nitinol es en el campo de las estructuras. En este ámbito, se aprovechan las propiedades del nitinol para fines muy diferentes, por ejemplo se han usado cables de nitinol para amortiguar vibraciones mecánicas de bajas frecuencias (0-20 Hz) [8], también se han usado en recubrimientos de cilindros y columnas reforzadas de hormigón para incrementar la fuerza de pico y la ductilidad sin degradación de la resistencia a flexión [66], e incluso se han realizado controles de posición del extremo de una viga mediante cables SMA incrustados en su interior y se ha demostrado la validez de este método [67].

### 3.5.- CONCLUSIONES

Con todos los estudios y aplicaciones analizadas se ha pretendido dar a conocer los factores fundamentales a tener en cuenta para el diseño de cualquier tipo de actuador SMA y conocer donde nos encontramos actualmente para poder ver en que líneas podemos enfocar nuestra investigación y experimentos de control.

Como se ha comentado, el uso de actuadores SMA posee numerosas ventajas por lo que en ciertas aplicaciones, como medicina, puede resultar conveniente el sustituir clásicos actuadores como motores DC por cables SMA. En capítulos posteriores intentaremos comparar las prestaciones y respuesta de los cables SMA con motores DC tanto para el desplazamiento angular como lineal.

En cuanto al control en cables de nitinol se han visto numerosos controladores y diferentes esquemas de control dependiendo de las necesidades de cada actuador. En el control se puede seguir avanzando en nuevas técnicas que minimicen las no linealidades y en probar diferentes sistemas de realimentación con la medida de distintas variables físicas del

cable, como temperatura, intensidad, resistencia, fuerza... En este proyecto se introducen algunos nuevos métodos de sensorización para ver si se pueden conseguir precisos sistemas de control que puedan ser de utilidad en ciertas aplicaciones. La realimentación con la medida de temperatura del cable es un tema en el que ciertos autores han trabajado aunque por el momento no de forma satisfactoria, incluso como hemos visto algunos autores dicen que no es posible debido a no linealidades y al gran problema de conseguir medir la temperatura en cables con un diámetro tan pequeño. Estas ambigüedades serán tratadas y se implementarán nuevos tipos de control, para sacar conclusiones que aclaren estos temas.

En cuanto al estudio del comportamiento termodinámico del sistema, se ha hecho hincapié en la velocidad de enfriamiento y desarrollado sistemas nuevos de refrigeración que logran reducir este tiempo. En este proyecto no usaremos refrigeración y veremos si este tiempo de enfriamiento nos dificulta o no las tareas de control. Lo que si se va a realizar, para minimizar este tiempo, es la elección de unos cables de nitinol de pequeño diámetro (100  $\mu\text{m}$ ) cuyo enfriamiento se realiza de forma más rápida que con cables de mayores grosores. Para mejorar también este enfriamiento, se precargan los cables con muelles, lo que hace que recuperen más rápidamente a su forma inicial.

Como hemos visto el nitinol se usa en múltiples ámbitos en el mundo actual: medicina, industria, robótica, productos de consumo... En los próximos años conforme vaya avanzando la tecnología y se refinen las técnicas de fabricación de dispositivos de nitinol de pequeño tamaño, la escala se verá progresivamente reducida y surgirán nuevos microactuadores cuyos sensores y electrónica añadida sean de bajo peso y nulo ruido para no perder las mayores ventajas de los SMA.

Con todo lo tratado en este capítulo y los resultados y conclusiones, que se esperan obtener en esta investigación, se va a tener una completa guía que va a servir de base para nuevos desarrollos de actuadores, sistemas robóticos o sistemas de control basados en nitinol.





# Capítulo 4: CONSTRUCCIÓN DE LA PLATAFORMA DE EXPERIMENTACIÓN

Diseño e implementación de todo el hardware necesario.



## 4.1.- ESTRUCTURA PRINCIPAL

Como se ha comentado, en el capítulo 1.1, el estudio de los SMA en el departamento de Ingeniería de sistemas y automática, de la Universidad Politécnica de Cartagena, se inició con el proyecto de Guillermo Ramírez [1]. En él, se acabó construyendo una pequeña plataforma de pruebas para comparar el control de posición angular de un SMA frente a un servo motor. Dicha plataforma presentaba algunos inconvenientes, tales como:

- 1) Problemas relacionados con las “masas” o “tierras”. Estos se presentaban a menudo al realizar pruebas con los SMA. En ocasiones saltaba una chispa y se rompía la junta del cable con el tornillo o al intentar accionar el SMA no se obtenía respuesta. Todos estos fallos son síntomas inequívocos de que se producían derivaciones, al estar fabricada de metal la plataforma.
- 2) Falta de espacio para la instalación de nuevos sensores, circuitos electrónicos y de nuevas configuraciones, como la de comparación de un SMA con un motor lineal.
- 3) Poca altura de la plataforma. No se puede introducir la mano para tareas de manipulación, tales como, reparaciones rápidas o sujeción de algún cable suelto. Para inspeccionar los circuitos hay que desmontar siempre la parte de arriba.

Por todos los problemas anteriores se decidió fabricar una nueva plataforma de pruebas o experimentación.

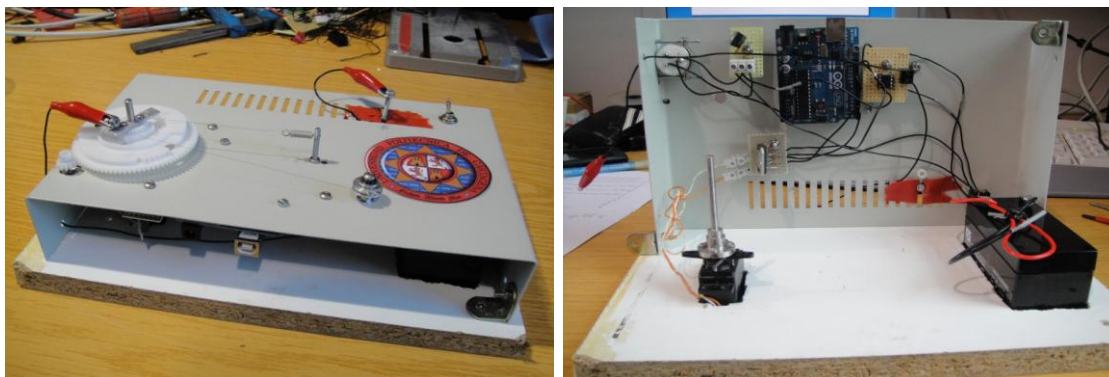


Fig. 4.1 – Pequeña plataforma de experimentación realizada por Ramírez [1]

Esta nueva plataforma de pruebas debía realizarse de un material no conductor y lo suficientemente robusto como para soportar todos los componentes, y sin ser demasiado frágil para que soportase bien los cortes y taladros que se le iban a practicar. Con todas estas especificaciones se decidió que un material idóneo para su fabricación sería el Polimetacrilato de metilo (PMMA), o simplemente metacrilato.

Tras la elección del material, se deben tener claros los montajes y circuitos que va a albergar nuestra plataforma para poder dimensionarla correctamente. Deberíamos albergar el montaje anterior realizado por Guillermo (figura 4.1), otro montaje para la comparativa del SMA con el motor lineal y dejar algo más de espacio para futuros desarrollos. También se tuvo en cuenta una altura interior que nos permitiera poder introducir la mano para realizar pequeñas tareas de manipulación de forma más cómoda. Con todo esto se realizó un primer

croquis con el software Solidworks, y se decidió que las dimensiones (en mm) debían ser aproximadamente las siguientes:

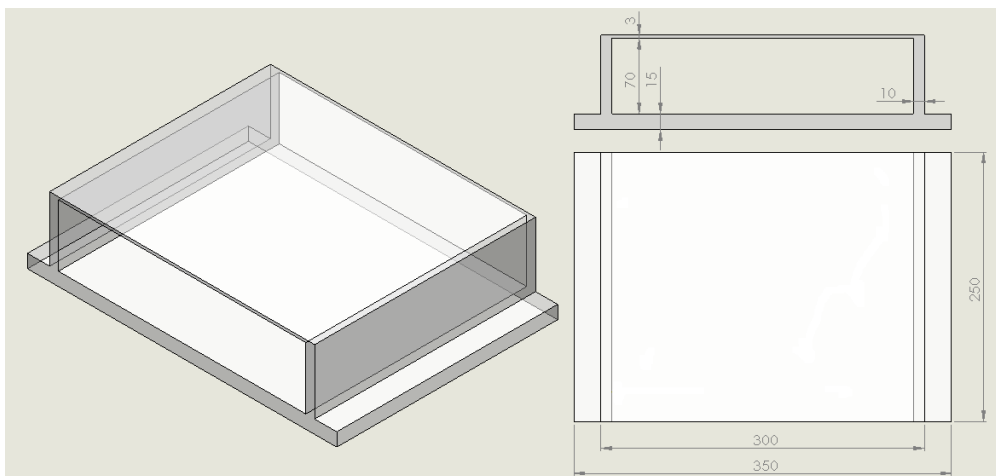


Fig. 4.2 – Diseño preliminar de la plataforma de experimentación en Solidworks

Con estos datos se pidió presupuesto a varias empresas dedicadas a trabajar con este material. Ningún presupuesto fue lo asequible que se esperaba, por lo que a fin de abaratar costes se buscó por el laboratorio una placa de metacrilato que estaba inservible de un proyecto anterior. Se encontró esta placa y se vio que estaba en buenas condiciones (figura 4.3 superior izquierda). Su grosor era de 12 mm por lo que no coincidía exactamente con el inicialmente pensado, pero debido a que no había mucha diferencia con el grosor de diseño, se utilizó para la base y las paredes laterales. Más tarde, a través de una tercera persona, ajena a la realización del proyecto, se nos cedió otra placa de 2 mm de grosor (figura 4.3 inferior izquierda) que aunque algo más fina de lo que queríamos nos podría valer para la parte superior de la plataforma. Al haber encontrado estas placas, de 12 y 2 mm, los grosores inicialmente pensados no van a ser los finales de nuestra plataforma, aunque si se van a respetar todas las demás dimensiones iniciales (figura 4.2).

Con esto, marcamos el tamaño de cada pieza en el metacrilato y nos disponemos a cortarlo. La placa de 2 mm se pudo cortar con una sierra de hierro en cambio para la gruesa se tuvo que usar una sierra de calar (figura 4.3 derecha) e ir añadiendo agua haciendo las veces de refrigerante y eliminador de viruta (taladrina). Si no se añadía agua, se calentaba demasiado el metacrilato y volvía a pegarse sobre la junta. Una vez cortadas, al no quedar todo lo rectas que se deseaba, con una multiherramienta se lijaron y rectificaron, quedando las placas con un mejor acabado.



Fig. 4.3 – Placas de metacrilato y herramientas de corte

Tras tener las piezas cortadas solo quedaba el unir las, lo que se realizó con pequeñas escuadras de acero y tornillos, tuercas y arandelas de 4 mm. Con esto ya se quedó nuestra estructura de metacrilato totalmente acabada y lista para albergar todos nuestros montajes, tal y como podemos ver en la siguiente imagen:

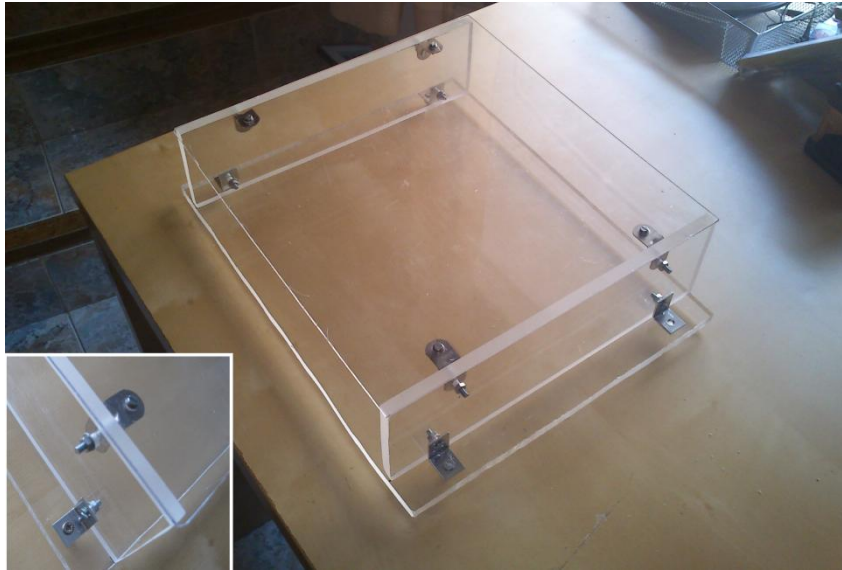


Fig. 4.4 – Estructura de la plataforma montada y detalle de las uniones atornilladas

## 4.2.- ARDUINO

Para las pruebas en nuestros sistemas se hace necesaria una tarjeta de adquisición de datos que recoja la información de los sensores y administre las señales correspondientes a los actuadores. Para esto se ha usado la tarjeta Arduino UNO R3 como tarjeta adquisición de datos ya que nos ofrece numerosas ventajas cómo: su bajo coste, sus pequeñas dimensiones, el poder usar salidas PWM (moduladas por ancho de pulso)... [1].

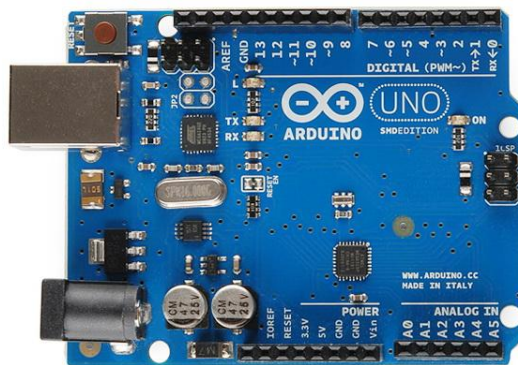


Fig. 4.5 – Placa Arduino UNO R3 versión SMD usada en nuestra plataforma

Arduino Uno es una placa electrónica que pertenece a lo que se conoce “Open Source”, es decir, código abierto y está basada en el procesador ATmega328. Cuenta con 14 entradas/salidas pines digitales (de las cuales 6 se pueden utilizar como salidas PWM), 6 entradas analógicas, un reloj de 16 MHz cerámico, una conexión USB, un conector de alimentación, una cabecera ICSP, y un botón de reset. Contiene todo lo necesario para apoyar el microcontrolador, basta con conectarlo a un ordenador con un cable USB o con

alimentación externa mediante una batería. Se puede adquirir en internet a un precio de unos 25 euros desde la página web [www.arduino.cc/es](http://www.arduino.cc/es). Las dimensiones de la placa son de 6,5 X 5,3 cm por lo que resulta adecuada para insertarse en nuestra plataforma, ya que ocupa muy poco espacio.

Para realizar los experimentos es necesario conectar nuestro arduino UNO a un PC. El programa utilizado para la conexión del PC con la tarjeta ha sido Matlab (anexo B.3). Para poder realizar la conexión de arduino/Windows y arduino/Matlab hay que instalar unos drivers y realizar una serie de pasos que están recogidos en el anexo A.1. Tras la primera conexión no es necesario volver a instalar los drivers, aunque si se debe seguir un protocolo de actuación cada vez que se vaya a conectar el PC con la tarjeta arduino, es decir con nuestra plataforma de experimentación (anexo A.2).

### 4.3.- BATERIA Y MEDIDOR DE VOLTAJE

Nuestros circuitos, montajes y cables SMA necesitan alimentación eléctrica por tanto tenemos que proveérsela. Con el fin de construir una plataforma de pruebas independiente, energéticamente hablando, vamos a incluir una batería que proporcione la alimentación necesaria. Esta es otra de las razones por las que se escogieron cables de 100  $\mu\text{m}$ , ya que tienen un menor consumo que otros cables de diámetros superiores (apartado 2.8).

Inicialmente se utilizó la misma batería que en el proyecto anterior de Guillermo. Una batería de Níquel-Cadmio de 12V con una capacidad de 1,2 AH, es decir puede entregar 1 A durante 1,2 horas, más que suficiente para nuestros montajes. Más tarde, surgieron algunos problemas ya que al ir incrementándose la circuitería de la maqueta y al hacer pruebas con los motores se comprobó que la batería duraba muy pocos días. Debido a esto y a que su coste no era muy grande se decidió pedir una batería de una capacidad mayor y cuyas dimensiones se adaptaran a nuestra plataforma. Se adquirió, por 21€, una batería Níquel-Cadmio de 12V y con una capacidad de 3,2 AH, por lo que así casi se triplicaba la duración respecto a la batería anterior y reducíamos la frecuencia de carga de la batería. Se pueden ver las características de esta nueva batería en su datasheet, adjunto en el CD del proyecto. Cuando la batería se descargue, lo que consideraremos cuando se encuentre por debajo de 11,2 V para que las pruebas se realicen de la forma más correcta posible, debe ser cargada tal y como se especifica en el anexo A.4.



Fig. 4.6 – Batería nueva, de 3,2 Ah, y anterior, de 1,2 Ah

Ya que estamos hablando de una plataforma autónoma, se pensó en colocar un indicador para ver la carga de la batería en cada momento de manera instantánea. En un primer momento se pensó en realizar un medidor de voltaje analógico, que indicara la carga de la batería mediante el encendido o apagado de unos leds. Pero esto tenía un gran problema ya que los requerimientos de voltaje conforme se van añadiendo elementos van cambiando, por lo que si anteriormente con 8V de carga podíamos funcionar y decir que estaba cargada, con más elementos esos 8V no son suficientes. Por esto se pensó que lo más cómodo era montar un voltímetro digital.

Para la implementación de este voltímetro digital inicialmente se diseñó el circuito que podemos ver en la figura 4.7. Este circuito tenía que tener un display de 3 ½ dígitos para poder mostrar los valores de voltaje con un par de cifras decimales. Puesto que no disponíamos de dicho display se decidió utilizar cuatro 7-segmentos de ánodo común de los que si disponíamos en el laboratorio. El corazón del circuito está compuesto por el integrado ICL7107, se trata de un convertidor analógico digital, cuya función básicamente es la de pasar la señal analógica del voltaje de la batería a señal digital que pueda ser llevada a los 7-segmentos utilizados. También se ha utilizado el integrado ICL7660 que nos puede proporcionar una tensión negativa de -5V, necesaria para el ICL7107. Ambos integrados fueron suministrados a modo de muestra o samples por la empresa Maxim Integrated. Este voltímetro se puede configurar para medir diferentes rangos de voltaje y con diferentes resoluciones que pueden verse en el datasheets del integrado ICL7107, que se incluye en el CD-ROM adjunto.

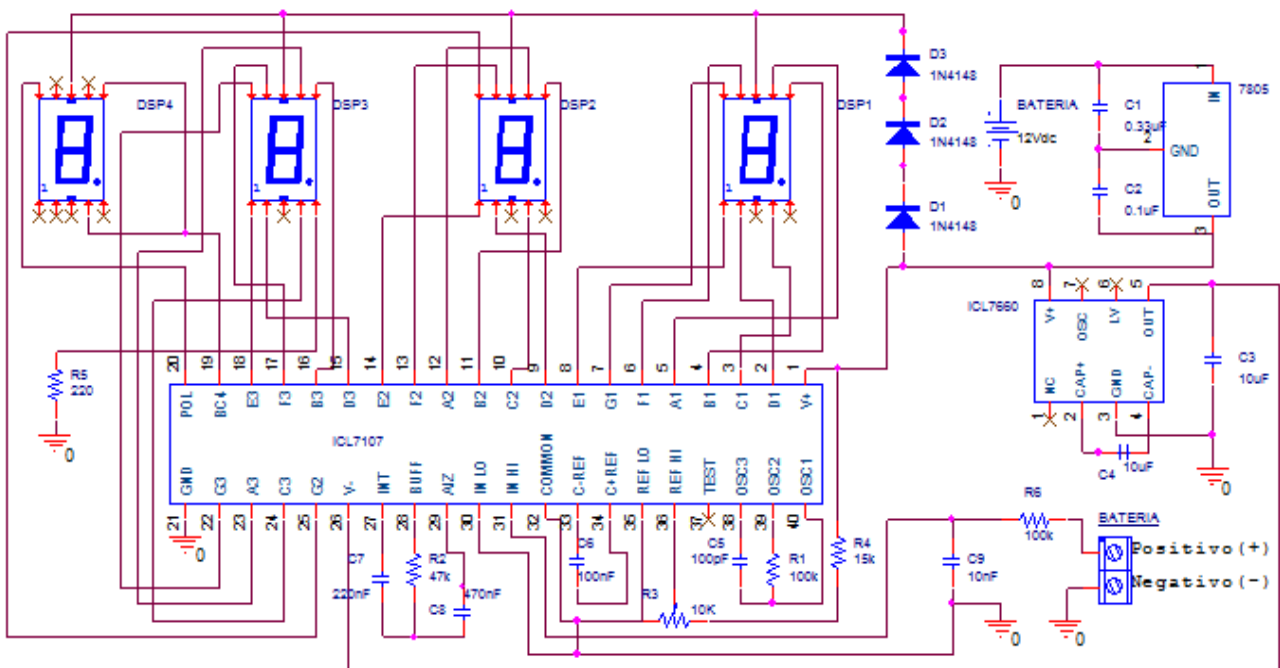


Fig. 4.7 – Esquema del voltímetro implementado para medir la carga de la batería de nuestra plataforma

Este voltímetro digital tenía el problema de que cuando el voltaje de la batería bajaba por debajo de 10V no era demasiado preciso con variaciones de 0,5 V respecto a la carga real de la batería. En un principio se utilizó este circuito hasta que se encontró un voltímetro mucho más preciso y más compacto, lo que permitía ahorrar sitio en nuestra plataforma, por lo que fue adquirido a un bajo precio (2,5€). A este nuevo voltímetro se le ha conectado un interruptor de palanca para conectarlo y desconectarlo cuando queramos y ahorrar en el consumo de batería. En la siguiente imagen se pueden ver físicamente ambos voltímetros, el que implementamos inicialmente siguiendo el esquema anterior y el que finalmente fue utilizado:



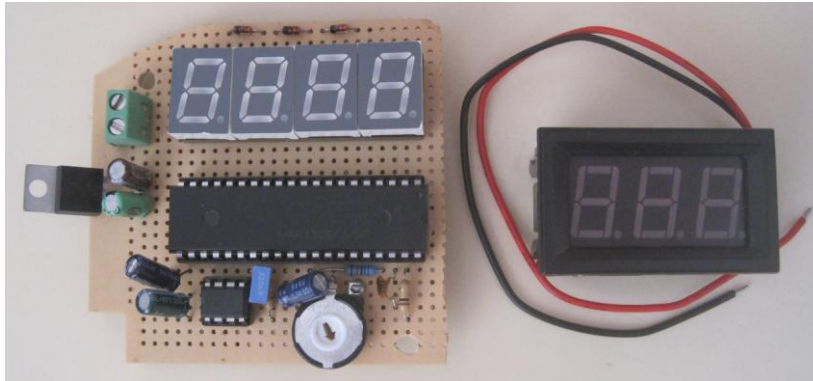


Fig. 4.8 – Voltímetro inicialmente implementado (izquierda) y voltímetro adquirido finalmente (derecha)

Este nuevo voltímetro dispone de unas medidas de 4,7 x 2,9 x 1,8 cm, un rango de medida de 4,5 a 30 V DC (nuestra batería es de 12 V DC), un consumo de corriente menor de 60 mA y un error en la precisión de la medida de un 1%.

## 4.4.- SISTEMA SMA-MOTOR PARA MOVIMIENTO ANGULAR

Uno de los objetivos principales de la construcción de este primer montaje en nuestra plataforma, son obtener una comparación de calidad, del control de posición angular realizado tanto por un cable SMA de 100  $\mu\text{m}$ , cómo por un motor DC. Otros objetivos para este montaje son los estudios de ese control de posición angular mediante la realimentación con diferentes variables físicas del cable SMA, cómo son su temperatura e intensidad. Este primer montaje ya fue realizado en el proyecto de Guillermo [1] para la comparación del cable SMA-Motor aunque se han incluido algunas mejoras, nuevos elementos de sensorización y se han eliminado fallos anteriores. Basándonos en la plataforma de metacrilato anteriormente construida (apartado 4.1), se va a implementar, en la parte superior, este conjunto SMA-Motor. En este sistema para movimiento angular se realiza la comparación entre dos actuadores:

- 1) Por un lado, el SMA de Flexinol de 100  $\mu\text{m}$  con una longitud de 24 cm, y cuyas características y ventajas ya se discutieron en el apartado 2.8. Los cables de flexinol fueron adquiridos de Jameco Electronics ([www.jameco.com](http://www.jameco.com)) en bobinas de 1 m.



Fig. 4.9 – Cable de Flexinol de 100  $\mu\text{m}$  utilizado en nuestra plataforma de experimentación

- 2) Por otro lado, un Motor DC. Se eligió el servo del proyecto anterior, que fue cogido del laboratorio. El servo en cuestión es un servo de la marca Futaba, cuyo modelo es el S3003. Posee tres conexiones, dos para la alimentación y otra para la señal de control PWM. Los servos no suelen girar completamente sino que tienen un tope y están preparados para girar solo un margen de grados. Sin embargo, este servo está “trucado” y se comporta como un motor DC, por lo que debido a esta situación, es válido para el cometido que se requiere. En el presente proyecto nos referiremos a él como Motor1 DC. El motor se implanta en la base de metacrilato sobre la que se ha situado la plataforma principal mediante dos tornillos y tuercas de 4 mm.



Fig. 4.10 – Motor1 DC: servo motor Futaba S3003 utilizado en nuestra plataforma

El sistema completo, aparte de los actuadores anteriores, consta de varias partes. Por un lado un engranaje grande, de 68 mm y 86 dientes (figura 4.11.a), que hace las veces de “volante” y que se hace girar tanto con el material SMA como con el servo. Este engranaje hace girar a su vez a otro engranaje más pequeño, de 9mm y 12 dientes (figura 4.11.b), con una relación de transmisión buscada de 12:86. Esto es así ya que debido al poco movimiento que realizan los cables SMA cuando se activan, se toma esta relación para que multiplique el movimiento realizado en los cables SMA y así obtener un mayor rango de movimiento en el engranaje pequeño. Este engranaje pequeño gira solidario al eje de un potenciómetro, por lo que se obtendrá un movimiento mayor en este y por lo tanto una mayor resolución en grados con la que se conseguirá una precisión mayor también en los experimentos.

Estos engranajes se cogieron del montaje del proyecto anterior [1], donde el grande fue conseguido de un VHS viejo y el pequeño se compró para que el paso de los dientes de 1.7 mm encajara bien y tuviera la relación de transmisión buscada.



Fig. 4.11 – Engranaje grande (a) y pequeño (b) para el sistema de desplazamiento angular

Los engranajes giran unidos a unos ejes. El eje del engranaje mayor es de 4 mm (figura 4.12.a), fue encontrado por el laboratorio y va unido mediante 4 tornillos al motor1 DC, que le transmite el movimiento. A este eje ira enganchado el engranaje mayor que transmitirá de

esta manera el movimiento del motor1 DC al engranaje pequeño. El engranaje grande podrá girar enganchado al eje para transmitir el movimiento del motor o podrá ir suelto girando solidario al eje para transmitir de esta manera el movimiento del SMA. Esto se consigue mediante el apriete o no de un pequeño tornillo de 3mm situado en la corona del engranaje grande y perpendicular al eje.



Fig. 4.12 – Eje grande y eje pequeño (potenciómetro) para el sistema de desplazamiento angular

El engranaje pequeño se ajustó al eje del potenciómetro de 3.3 mm. Aunque el hueco del engranaje es de 3mm, repasando un poco el agujero se consigue introducir el eje del potenciómetro quedando estas dos piezas muy fuertes y seguras. El potenciómetro usado también proviene del proyecto anterior [1] y es un potenciómetro multivuelta (figura 4.12.b), es decir, cuando llega al final de su recorrido vuelve a la punta contraria de la escala. Tiene una resistencia interna de 20 K $\Omega$  con una tolerancia del 20% y una linealidad del 5%. Este potenciómetro permite una resolución suficiente para la precisión que se quiere tener en los experimentos por lo que no se necesitó buscar otro.

Para hacer girar el engranaje grande, se tuvo que idear un sistema para poder enganchar el cable SMA a este engranaje. El sistema se definió como “pletina”, y constaba de una lámina de metal con unos taladros convenientemente dispuestos para aprovechar el mayor movimiento de los cables. Esta pletina fue diseñada por Guillermo pero tenía un gran inconveniente y es que es metálica por lo que al estar en contacto con el cable se producían pérdidas y puestas a tierra inesperadas que hacían que nuestro sistema no funcionase del todo bien. Debido a esto se decidió, con el mismo diseño de pletina, fabricar una nueva pletina de metacrilato. Esta nueva pletina, cuenta con un refuerzo metálico formado por unas arandelas en el hueco donde va el cable SMA. Esto se debe a que el SMA se calienta a unos 100 grados y llega a dañar el metacrilato por tanto estas arandelas lo protegen de esa alta temperatura, no dejando que el SMA lo toque directamente. Los otros taladros de la pletina son para el paso del eje de 4 mm (el central), dos para la sujeción con el engranaje grande y el último (derecha) para conectarlo a un muelle para poder trabajar con carga y ayudar a la recuperación del cable SMA.

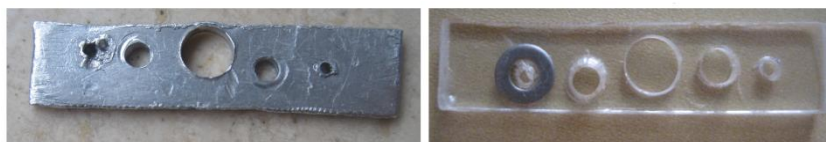


Fig. 4.13 – Anterior pletina metálica y nueva pletina de metacrilato

Como se ha comentado, uno de los extremos del SMA va sujeto a la pletina para transmitir el movimiento del cable al engranaje grande, pero el resto del cable pasa también por otros dos puntos. El primero de ellos es una polea de aluminio situada sobre un tornillo de 3 mm de diámetro enganchado a su vez sobre la base superior de la maqueta. El cable en esta polea cambia su dirección 90 grados, y así podemos tener un sistema más compacto en la plataforma. Por último, el cable está tensado en un tornillo de 3mm enganchado a la base

superior, donde haciendo uso de una tuerca se tensa el cable sujetándolo y aprisionándolo entre la cabeza del tornillo y la tuerca. En este tensor se dejara una parte del cable fuera de la parte tensada para poder sujetarlo mejor, pero no en exceso ya que si no, se estará perdiendo capacidad de elongación.

Como ya se ha comentado, la pletina tiene en el extremo contrario al agujero donde va el cable, otro agujero donde se engancha un hilo de nylon, que a su vez lleva en el extremo opuesto un muelle. Este muelle se engancha a un tornillo de 3mm enganchado también a la base superior de la maqueta. Con esto, se cierra el sistema del “volante”, de manera que cuando el cable SMA se encoja y transfiera el movimiento al engranaje grande, tenga una fuerza de oposición ejercida por este muelle. Esta fuerza, será a su vez la que se encargue de devolver el cable a su forma original durante la fase de martensita, sirviendo de fuerza de recuperación una vez que deje de aplicarse la tensión sobre el cable.

En el proyecto anterior [1] se utilizaron tres muelles distintos para ver la diferente respuesta del SMA y motor con esos muelles. Básicamente la diferencia al usar varios muelles está en que a mayor constante de rigidez elástica del muelle, mas fuerza de oposición al movimiento tendremos y por lo tanto menos grados de giro en nuestro potenciómetro. Debido a esto para este proyecto se ha elegido un muelle con una relativamente baja constante K, ya que nos permitirá tener un mayor rango de movimiento y resolución en nuestro potenciómetro, pudiendo obtener un control más flexible. La única desventaja de usar un muelle con una baja constante K es que cuando el cable deja de ejercer fuerza no queda del todo tensó, lo que provoca que a la hora de activarse aparezca un pequeño retardo hasta que el cable se tensa, pero es tan pequeño que se puede considerar despreciable.

La ecuación que rige el comportamiento elástico de un muelle es “ $F = K * x$ ”, donde F es la fuerza aplicada al muelle, K es la constante elástica del muelle y x es el desplazamiento del muelle al ser sometido a esa fuerza. Conociendo esto, se ha obtenido la constante K del muelle colgando de él dos pesas diferentes y midiendo el desplazamiento que ha realizado el muelle. Con todo esto y habiendo obtenido de los experimentos la deformación de los muelles al aplicarle una fuerza, es decir, la x de la ecuación descrita, se podrá despejar el valor de la “k” de cada muelle de la ecuación.



Fig. 4.14 – Pesos usados para obtener la constante K del muelle

PESO	DESPLAZAMIENTO (mm)	CONSTANTE (K)
50 g (0,4905 N)	4,35	112,76 N/m
100 g (0,981 N)	8	122,625 N/m

Tabla 4.1 – Obtención de valores de K para el muelle1

Se realiza la media de los dos valores de K obtenidos y sacamos la K de nuestro muelle de 6,8 mm de longitud (figura 4.15):

$$K = 117,7 \text{ N/m}$$



Fig. 4.15 – Muelle usado para el sistema de desplazamiento angular

A todo este primer sistema de nuestra plataforma, se le añaden dos módulos de sensorización, uno para medir la intensidad que circula por el cable y otro para medir su temperatura. Estos sensores y sus circuitos de acondicionamiento serán vistos con más detalle en los siguientes sub-apartados.

Del proyecto anterior [1] se decidió cambiar por completo todos los circuitos eléctricos que existían, ya que necesitaban mejorarse tanto funcional como estéticamente. En la siguiente imagen se puede ver el sistema completo SMA1-Motor1DC, y para que se pueda apreciar de forma más clara se ha pintado en verde el cable SMA y en azul el cable de Nylon que está sujeto al muelle:

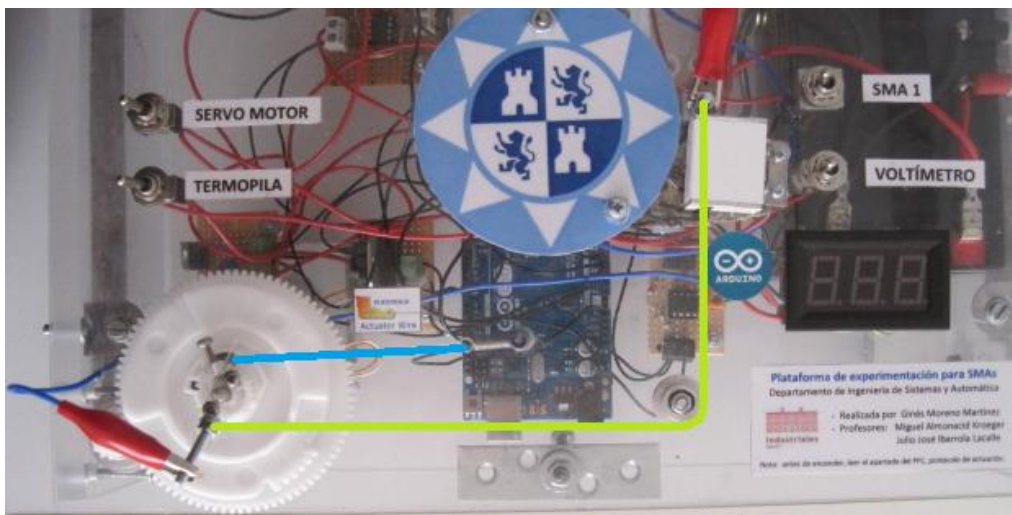


Fig. 4.16 – Sistema SMA-muelle / motor1 DC para desplazamiento angular

#### 4.4.1.- CÁLCULOS CABLE-PLETINA. DESPLAZAMIENTO

A continuación se detallan todos los cálculos y pruebas realizadas tanto para la pletina como para los cables para conseguir la máxima capacidad de giro en el potenciómetro y conseguir así un mayor margen de medida en los experimentos.

Según el fabricante, los materiales SMA se pueden acortar de un 3 a un 5 % de su longitud. El cable elegido es el de 100um de diámetro por todas las ventajas expuestas anteriormente (apartado 2.8). Se escoge usar 24 cm de cable para los experimentos de la maqueta, por lo que se debe saber de qué movimiento se va a disponer en un cable de estas características para poder diseñar la pletina de manera que se obtenga el máximo movimiento posible en los engranajes.

Según las pruebas realizadas en nuestro cable, este se puede acortar unos 10 mm sin fuerza de oposición alguna a su movimiento. Con esta longitud se diseñará la pletina para trabajar con el máximo movimiento posible.

En base a los resultados anteriormente obtenidos y por lo tanto sabiendo que se cuenta con 10mm de movimiento en los cables, se pasa ahora a calcular el movimiento que se tendrá tanto en el engranaje grande como en el engranaje pequeño. Esto se hará diseñando el sistema para una pletina de más de 20 mm de longitud, que tendrá dos agujeros separados entre sí 20 mm y que estarán situados a 10 mm de distancia del eje al que va enganchada la pletina, el eje del engranaje grande. Por lo tanto se dispondrá de una sujeción del cable a 10mm de distancia del eje en el que se desarrolla el giro del engranaje motriz (grande) que es el que transfiere movimiento al engranaje pequeño, que a su vez lo transfiere al potenciómetro. Los cálculos obtenidos dan los siguientes datos referidos a continuación:

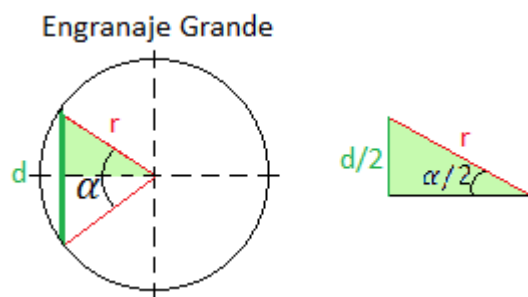


Fig. 4.17 – Giro en el engranaje grande

Donde:

- d = distancia que se acorta el cable (10 mm)
- r = radio de la pletina (10 mm)
- α = ángulo de giro del engranaje grande.

Podemos obtener del triángulo verde, por trigonometría, el valor del ángulo máximo que puede girar el engranaje grande:

$$\alpha/2 = \arcsin\left(\frac{5}{10}\right) \rightarrow \alpha/2 = 30^\circ \rightarrow \boxed{\alpha = 60^\circ}$$

Por tanto 60 grados es el ángulo máximo que puede girar la rueda grande. Con la relación de transmisión entre las dos ruedas dentadas, podemos obtener el máximo giro que se producirá en el engranaje pequeño de nuestro potenciómetro:

Con la ecuación:

$$f1 * n1 = f2 * n2$$

Donde f = número de dientes y n = número de vueltas de cada rueda respectivamente.

Sabiendo que se dispone de un radio de 10mm correspondientes a la distancia de la pletina y que la rueda grande tiene 86 dientes y la rueda pequeña 12 dientes, se obtiene que:

$$86 * \frac{1}{6} = 12 * n2 \Rightarrow n2 = \frac{86}{6 * 12} = 1.19$$

Por tanto se tiene, según la ecuación de arriba, 1.19 vueltas del engranaje pequeño por 1/6 de vuelta del engranaje grande, que equivale a los 60 grados que se han calculado que puede moverse. Con lo que con nuestra pletina podremos obtener un giro en el engranaje pequeño que equivaldría a 428 grados.

Ahora bien, todos estos cálculos han sido realizados sin una fuerza contraria al movimiento del SMA. En nuestro caso tenemos una fuerza opuesta al movimiento, que viene

proporcionada por un muelle, por lo tanto nuestro giro de los engranajes va a ser menor. Esta fuerza que se opone al acortamiento de nuestro cable va creciendo conforme el cable va reduciendo su longitud, por tanto, es complicado a priori saber que acortamiento tiene el cable en cada momento. Este dato del acortamiento nos puede ser útil para sacar futuras relaciones o gráficas y para poder conocerlo vamos a realizar los siguientes cálculos:

En nuestro montaje sabemos exactamente lo que nos marca el potenciómetro (engranaje pequeño) a través de la entrada analógica cero. Nos da valores entre 1023 y 0, por tanto podemos decir que para 1023 se ha movido  $0^\circ$  y que cuando marque cero habrá realizado un giro completo ( $360^\circ$ ). Con esto podemos sacar la ecuación de la recta que nos relacione en cada momento el valor del potenciómetro (Pot) con los grados que gira el engranaje pequeño (Grad2):



- Voy a sacar la ecuación de la recta que pasa por dos puntos:

$$\frac{Pot - 1023}{Grad - 0} = \frac{0 - 1023}{360 - 0}$$

$$Pot = -2.84167 * Grad2 + 1023$$

Esta ecuación de la recta, nos dice que 1023 es la posición cero del potenciómetro, pero nosotros no vamos a estar exactamente en esa posición por lo que tendremos una posición inicial diferente, para establecer nuestra posición inicial como  $0^\circ$  solo debemos cambiar el punto 1023 manteniendo la pendiente de la recta. Por tanto si llamamos Pos0 a nuestra posición inicial nuestra ecuación de la recta nos quedará:

$$Pot = -2.84167 * Grad2 + Pos0$$

Con esto ya podemos relacionar el valor del potenciómetro con los grados de giro del engranaje pequeño en cada momento. Podemos obtener también los grados que giraría el engranaje grande (Grad1), mediante la relación de transmisión:

$$f1 * n1 = f2 * n2 \rightarrow 86 * Grad1 = 12 * Grad2$$

Ya solo nos quedaría obtener la relación entre los grados de giro del engranaje grande (Grad1) y el acortamiento que se produce en el cable. Esto lo podemos realizar, como se ha visto en la figura TAL por relaciones trigonométricas. Para ello si el engranaje grande gira menos o igual de 30 grados, el acortamiento (x) vendrá dado por:

$$x = 10 * \sin\left(Grad1 * \frac{\pi}{180}\right)$$

Si el engranaje grande gira más de 30 grados, el acortamiento (x) vendrá dado por:

$$x = \left(10 * \sin\left((Grad1 - 30) * \frac{\pi}{180}\right)\right) + 5$$

Todas las distancias están en mm y todos estos cálculos explicados anteriormente son los que aparecen en algunas partes de los códigos de programación escritos para el control de los SMA en el anexo B.4.

#### 4.4.2.- CIRCUITO AMPLIFICADOR PARA EL SMA1

Se necesita un circuito de accionamiento para los cables SMA. Esto es debido a que la corriente necesaria para activar nuestros cables, de 100  $\mu\text{m}$ , según el fabricante es de 200 mA, puesto que las salidas de nuestra tarjeta arduino, pueden dar como máximo 40 mA se hace necesario un circuito de amplificación.

Se comprueba de forma experimental que la activación se produce para el valor de corriente que proporciona el fabricante. Debido a que para nuestro cable de 25 cm, tenemos una resistencia de unos 31  $\Omega$ , para que pasen los 200 mA recomendados por el fabricante necesitamos aplicar una tensión de unos 6,2 V.

Para este propósito es necesario amplificar el voltaje de los 5V que puede dar arduino hasta unos 6,5 V, tarea que vamos a realizar con el amplificador L272M. Este integrado es un amplificador operacional de alta potencia que puede dar tanto la tensión necesaria, ya que está alimentado a 12 V, como la corriente que se necesita debido a que es capaz de aportar hasta 1A de corriente. En la figura 4.18, se muestra el esquema que hemos diseñado para este circuito. En el mismo integrado L272M hay dos amplificadores operacionales por lo que vamos a usar los dos. En una primera etapa la salida 10 PWM de arduino la pasamos por un primer amplificador con una configuración de seguidor de tensión y la salida de este hacia el segundo operacional en una configuración de amplificador no inversor. Según la teoría de los amplificadores operacionales, se tiene la siguiente ecuación para este esquema:

$$V_s = V_e \left( 1 + \frac{R_2}{R_1} \right)$$

Donde  $V_s$  es la salida y  $V_e$  es la entrada.

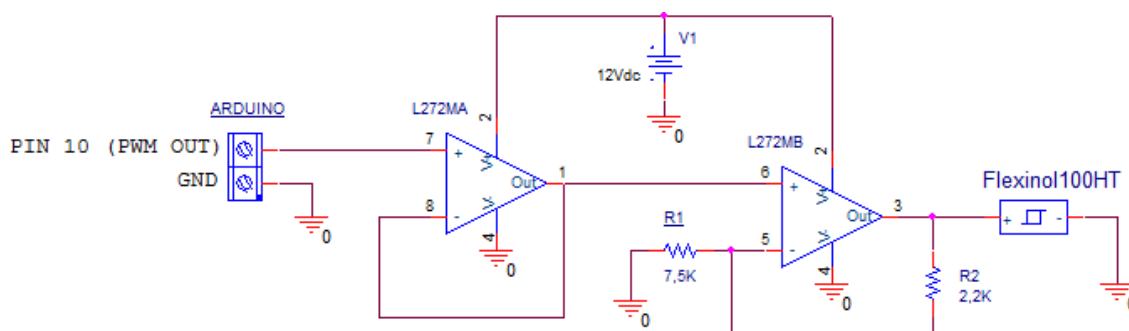


Fig. 4.18 – Esquema electrónico del circuito de amplificación para el SMA1

Ya que necesitamos unos 6,5 V a partir de los 5V de arduino necesitamos una ganancia de 1.3 que obtendremos eligiendo la resistencia  $R_1$  de 7,5K $\Omega$  y la  $R_2$  de 2,2K $\Omega$ , obteniéndose la siguiente ecuación:

$$V_s = V_e \left( 1 + \frac{2,2}{7,5} \right) = V_e * 1,29$$



Por lo que la multiplicación que obtendría la señal de entrada, que viene desde la placa arduino, es de aproximadamente 1,3 por lo que tendríamos unos 6,5V. Con este circuito también hemos conseguido aportar la intensidad necesaria para el correcto funcionamiento del SMA. Podemos ver el circuito implementado en PCB, en la imagen siguiente:

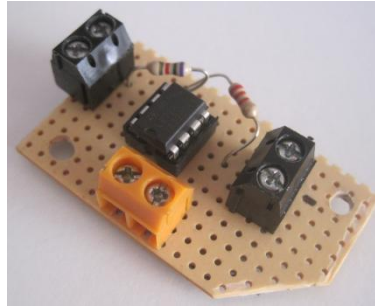


Fig. 4.19 – Implementación en un PCB del circuito de amplificación del SMA1

#### 4.4.3.- CIRCUITO DE CONTROL DEL MOTOR1 DC

En la maqueta definitiva de pruebas, se va a realizar la comparativa entre los actuadores SMA1 y el motor1 DC. Por tanto, se ha diseñado también un circuito electrónico para realizar el control oportuno sobre el motor. Este circuito, ha sido necesario, ya que se necesita que el motor gire en los dos sentidos, y para esto necesita ser alimentado también en los dos sentidos para poder girar en una dirección u otra. Como arduino no puede realizar automáticamente este cambio de polaridad, aparece un problema para realizar el control del motor1 DC. La solución a este problema se encuentra usando el controlador de motores LMD18200. Este controlador tiene una ganancia de tensión de 2,36 V y un pin que sirve para cambiar la polaridad de sus salidas, haciendo así controlable al motor1 DC en los dos sentidos de giro. Por lo tanto el circuito encargado de controlar al motor se puede observar en el siguiente esquemático:

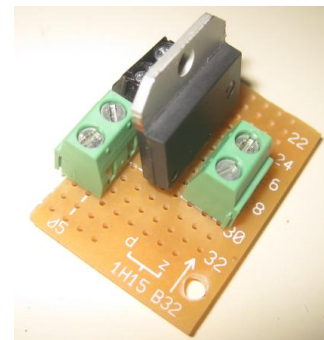
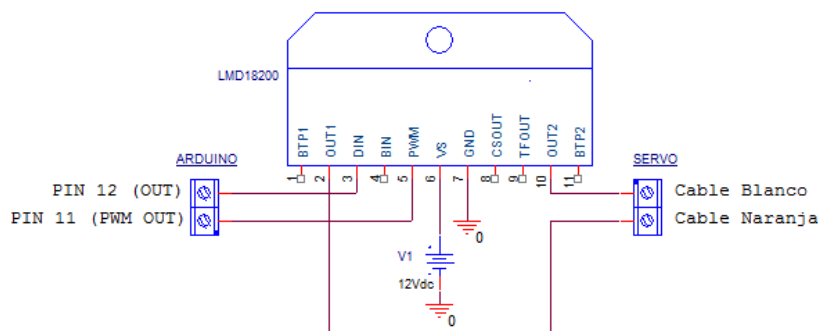


Fig. 4.20 – Esquema electrónico e implementación del circuito de control del motor1 DC o servo

Con este circuito la señal de control, que regulará la velocidad del motor, llegará al integrado desde el pin 11 (PWM) de Arduino a la patilla 5 de este, mientras que la señal de control de dirección llegará al integrado desde el pin 12 de arduino a la patilla 3 del integrado. Modificando esta señal de entrada a través de la salida 12 de arduino a nivel alto 5 V (sentido de las agujas del reloj) o a nivel bajo 0 V (sentido contrario), las señales de salida del integrado LMD18200 cambiarán su polaridad (patillas 2 y 10), haciendo que el motor gire en un sentido o en otro. En la siguiente figura se puede ver este circuito de control implementado en el PCB.

#### 4.4.4.- CIRCUITO POTENCIOMETRO

Este es un circuito bastante sencillo que se encarga simplemente de regular la tensión de alimentación del potenciómetro. Se alimenta a 5V y actúa como un divisor de tensión para que la entrada analógica A0 de arduino pueda leer los datos correctamente. Para sacar los 5V tenemos que adecuar la tensión de 12 V de la batería a los 5V requeridos, lo que se conseguirá fácilmente con un regulador de tensión, el integrado 7805, cuyas conexiones son las siguientes:

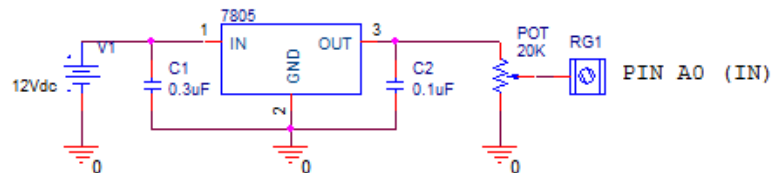


Fig. 4.21 - Circuito regulador de tensión del potenciómetro.

#### 4.4.5.- SENSOR DE TEMPERATURA Y CIRCUITO DE ACONDICIONAMIENTO

Debido a que la temperatura del cable varía al pasar por él una corriente eléctrica (efecto Joule) se pensó en poder realizar un control de posición angular realimentando con esta señal de temperatura. El mayor problema es que debido al pequeño diámetro de nuestros cables de flexinol, 100  $\mu\text{m}$ , se hace muy difícil el poder medir su temperatura de forma óptima, por esto prácticamente ningún autor ha realizado una medida de temperatura en los cables de forma satisfactoria, con rapidez y precisión (apartado 3.3.2).

Para empezar a realizar unas pruebas de medición de temperatura en el cable, se pidieron unas muestras (samples) de sensores a varios fabricantes como Texas Instrument, Analog Devices... Entre los sensores recibidos el que más nos interesaba era el sensor de infrarrojos TMP006 que puede medir la temperatura sin contacto directo con él cable. Este sensor es diminuto, de tan sólo 4 mm de lado, y con las herramientas que disponemos nos fue imposible soldarlo en una placa por lo que no pudo ser utilizado.

Tras esto se realizaron varias pruebas con el resto de sensores, empezando por los sensores TMP35 Y TMP37, poniéndolos en contacto con el cable SMA. Se pudo comprobar que al calentarse el SMA el sensor respondía pero su respuesta era demasiado lenta, con un tiempo de establecimiento de unos 7 min. Se observaron las hojas de característica de todos los sensores de que disponíamos y el más rápido era el LM335 con un tiempo de respuesta de 4min, por lo que tampoco nos valdría para realizar nuestros experimentos de control. Se realizaron pruebas también con un termistor NTC pero ni se detectaba el cambio de temperatura. Tras esto, se contactó con algunos de estos fabricantes para ver si disponían de algún sensor de temperatura analógico más rápido o de mayor tamaño. Pero o no tenían nada o nos dijeron que se podría hacer algo específico para ello, dependiendo del volumen de pedido. En nuestro caso, al necesitar solo un componente, esta opción fue descartada.

Posteriormente se pensó en usar un termopar, tal y como hizo Troisfontaine et ál. [63], ya que su respuesta es mucho más rápida. Pero esto tenía dos principales inconvenientes y es que el termopar debía estar pegado al cable por lo que cada vez este cable se rompiera por

algún golpe o rozamiento accidental se tendría que despegar y pegar al nuevo. El otro problema es que al estar unido, una mínima parte de la intensidad del flexinol puede perderse por el termopar y no resultar del todo precisa nuestra medida.

Se siguió indagando en la idea de medir la temperatura sin contacto con el cable, es decir a través de la radiación infrarroja que este emite, ya que todos los objetos con una temperatura superior al cero absoluto ( $0^{\circ}\text{K}$ ) emiten ondas electromagnéticas debidas al movimiento térmico de sus electrones. Esta radiación infrarroja abarca un rango muy amplio de longitudes de onda, con longitudes de onda menores según la temperatura del objeto radiante aumenta. La longitud de onda máxima se relaciona con la temperatura mediante la Ley del desplazamiento de Wien [71]:

$$\lambda_M = \frac{2896}{T(\text{Kelvin})} (\mu\text{m}) \quad [4.1]$$

Para medir esta radiación infrarroja se encontraron diferentes sensores, como los fotónicos, piroeléctricos o las termopilas entre otros. Los fotónicos quedan descartados debido a su alto precio y a la necesidad de usar sistemas refrigerantes. Por lo tanto se buscaron y pidieron un par de sensores piroeléctricos D203B y un par de termopilas TS118-3 a unas páginas web de china, en las cuales se obtenían por un bajo precio.

Los sensores **piroeléctricos** están basados en el efecto piroeléctrico de ciertos materiales, que se basa en la aparición de cargas en una dirección cuando el material experimenta un cambio de temperatura. Este efecto se aplica a la detección sobretodo de radiación térmica a temperatura ambiente. En la siguiente imagen podemos ver los sensores piroeléctricos D203B adquiridos y su circuito equivalente:



Fig. 4.22 – Sensor Piroeléctrico D203B y circuito equivalente

Investigando en el uso de los termopares, se conoció de la existencia de un sensor denominado **termopila**. Este transforma la energía recibida en calor produciendo una variación de la temperatura que, a su vez, actúa sobre un conjunto de decenas de termopares implantados en su interior que generan un voltaje de salida [73]. La aplicación de las termopilas como detectores de radiación IR no es novedosa, pero sí de actualidad y muy poco extendida. En su interior, los termopares ya no son discretos, sino integrados y con dimensiones micrométricas. Por esto es posible lograr un dispositivo sensible a la radiación IR con un volumen reducido. En la figura 4.23 se muestran las termopilas TS118-3 adquiridas, su circuito equivalente y el esquema interno de una termopila formada por 44 termopares semiconductores.

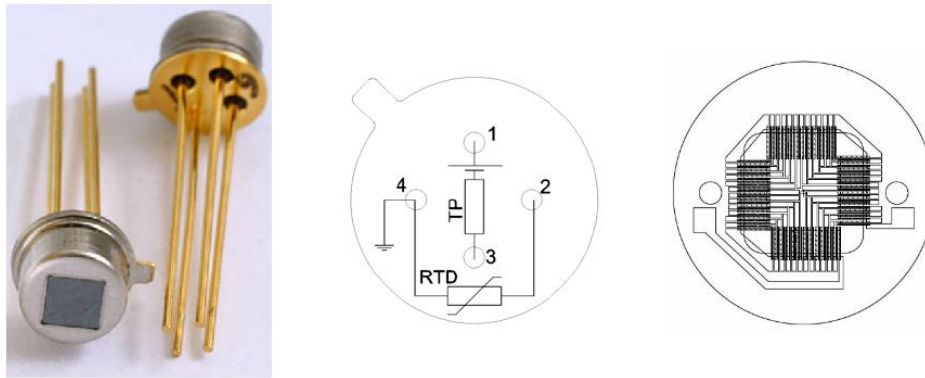


Fig. 4.23 – Termopilas TS118-3, circuito equivalente y esquema interno de termopares

Tras realizar pruebas en un cable de flexinol con el piroeléctrico y la termopila, ambos sin ningún tipo de circuito de acondicionamiento, se obtuvieron varias conclusiones:

- 1) El sensor piroeléctrico presenta poca estabilidad en la tensión de salida, la termopila da una tensión mucho más estable. La señal de salida del piroeléctrico aunque más inestable presentaba una mayor amplitud que la de la termopila (del orden del doble de mV que la termopila). Marcan muy poco quizá porque no están aislados del ambiente exterior y por lo fino que es el cable SMA.
- 2) La termopila no requiere de alimentación externa, en cambio el sensor piroeléctrico debe estar alimentado a 5V.
- 3) El tiempo de respuesta es rápido en ambos sensores, en el caso del piroeléctrico no está especificado este tiempo por el fabricante y para la termopila es de 20 ms por lo que parece más que aceptable para los experimentos de control.
- 4) La respuesta espectral de ambos es para el piroeléctrico para longitudes de onda entre 5.8 a 15  $\mu\text{m}$  y para la termopila de 7,8 a 14,5  $\mu\text{m}$ .
- 5) Los sensores piroeléctricos solo ofrecen salida cuando hay una variación de temperatura, para temperaturas estáticas no suelen ser la opción más recomendable ya que solo se crea una corriente en caso de que exista una variación. Esta propiedad dificulta la utilización de los sensores piroeléctricos para la medición de temperaturas estáticas.

Tras ver las conclusiones anteriores se decidió que por ser más novedosa, más estable su señal, de menor tamaño y por no necesitar voltaje de alimentación, se iba a utilizar la termopila como sensor de temperatura en nuestro proyecto. El mayor problema viene en la poca amplitud de la señal de salida, según nuestro rango de temperaturas del cable, que va de temperatura ambiente hasta unos 100 grados, la salida, según el fabricante, debería estar entre -1 y 4 mV aunque a esta respuesta teórica no le debemos hacer mucho caso como vamos a ver.

Surgió algún problema con el uso de la termopila y es que, según los datos del fabricante, cuya hoja de características podemos ver en el CD-ROM adjunto, esta ofrece respuesta para longitudes de onda entre 7,8 y 14, 5  $\mu\text{m}$  que pasado a grados mediante la ecuación de Wien [4.1], nos da que puede medir temperatura entre -73,3 y 98,3  $^{\circ}\text{C}$ . Por lo que

realmente no llegaría a medir cuando el cable pasa de 98,3 grados y quizá deberíamos haber usado el sensor piroeléctrico (con un rango de -66 a 210°C). En la práctica se ve como esto no es así y cuando según la hoja de características del flexinol, sabemos que el cable está por encima de esa temperatura el sensor sigue midiendo. Este fenómeno es debido a que al ser el diámetro del cable tan pequeño aunque esté a 120 grados el sensor no detecta esos 120 grados sino un valor menor, por lo que no hay problema de que se pase de los límites de longitudes de onda del sensor. Debido a que el sensor detectará una temperatura menor a la real su respuesta será menor y será incluso menor de 1 mV por lo que vamos a necesitar un circuito de acondicionamiento de su señal altamente preciso.

Una vez decidido que se iba a utilizar la termopila para nuestras pruebas de temperatura. Se tiene que realizar un circuito de acondicionamiento que pasara el valor de estos bajos mili voltios a valores entre 0 y 5V para poderlos llevar a una entrada analógica de arduino.

Para poder amplificar niveles de tensión tan bajos, que a veces no llegan ni a 1 mV tenemos algunos problemas y es que para esta tarea no nos vale cualquier amplificador operacional. En un principio se probó el amplificador operacional L272M usado en el circuito de amplificación de los SMA y no era válido ya que el offset de este amplificador es de 15 a 60 mV mucho mayor que los valores de entrada, que viene de la termopila, por lo que es imposible usar este amplificador. Vamos a necesitar unos amplificadores de precisión, en los que el offset sea lo más bajo posible para tener la mayor certeza de que solo se está amplificando nuestra señal de entrada. Puesto que en el laboratorio solo se disponía de un amplificador con offset bajo (INA122AP) se buscó por webs de varios fabricantes sus mejores modelos al respecto y se pidieron unas muestras (samples) de varios de ellos, que se muestran a continuación:

	V <sub>s</sub> (V)	V OFFSET (μv)	I OFFSET (nA)	CMRR (db)	GANANCIA	FABRICANTE
INA122AP	2,2 a 36 V	150 (500 max)	1 (5 max)	90	de 5 a 10000	BURR BROWN
AD8223A	3 A 24 V	250 (400 max)	0,25 (2 max)	90	DE 5 A 1000	ANALOG DEVICES
OPA177F	22 V	10 (25 max)	0,3 (1,5 max)	140		ANALOG DEVICES
OPA2277PA	5 a 15 V	20 (50 max)	0,5 (2,8 max)	140		ANALOG DEVICES
TLC2652AC	1,9 a 8 V	0,5 (1 max)	2 (60 pA)	140		TEXAS INSTRUMENT
TLC2654	2,3 a 8 V	4 (10 max)	30 (60 pA)	125		TEXAS INSTRUMENT
OP07C	22 V	30 (75 max)	0,5 (3,8 max)	123		ANALOG DEVICES
MAX412B	12 V	120 (250 max)	40 (80)	130		MAXIM INTEGRATED
MCP616	5 V	150	0.15	100		MICROCHIP

Tabla 4.2 – Amplificadores de precisión obtenidos para el circuito de acondicionamiento de la termopila

De todas las muestras recibidas, se escogió el TLC2652AC ya que su  $V_{\text{offset}}$  es sorprendentemente bajo, como máximo de 1 μV, tiene prácticamente un offset en intensidad despreciable, se puede alimentar a 5V y tiene un alto valor de rechazo al modo común (mayor rechazo a ruido de entrada y señales comunes a las dos entradas). Este amplificador TLC2652AC está basado en tecnología de transistores CMOS y pertenece a la familia de amplificadores conocidos como “chopper”. Este tipo de amplificadores operacionales poseen autocorrección de la deriva, lo que consiguen midiendo periódicamente cual es la tensión de desequilibrio, para descontarla luego a la tensión de interés. No vamos a entrar en detalle sobre el funcionamiento interno de este tipo de amplificadores, ya que no forma parte de los objetivos de este proyecto, si se desea se puede obtener más información sobre ellos [72].

Este tipo de amplificador necesita de una tensión de alimentación positiva de 5V y otra negativa de -5V. Para obtener esta tensión positiva usamos un integrado 7805 y para obtener la tensión negativa se usa un convertidor de voltaje, que es el integrado ICL7660, usado también en el circuito del voltímetro, en apartado 4.2.

Anteriormente se ha mencionado que realmente el sensor no da el voltaje correspondiente a la temperatura del cable ya que al ser este tan fino, marca una temperatura menor. Debido a esto, se ha elegido para el amplificador operacional TLC2652AC, la configuración de amplificador no inversor con una ganancia variable que se podrá ajustar mediante un potenciómetro de 2 MΩ. La salida de este amplificador vendrá dada por:

$$V_s = V_e \left( 1 + \frac{POT}{R_1} \right)$$

Y factor de amplificación podrá estar entre 0 ( $V_s=V_e$ ) y un valor máximo que viene dado por:

$$V_{s_{min}} = V_e \left( 1 + \frac{2000000}{387} \right) = 5169 * V_e$$

Pero esta salida del amplificador tiene un problema, y es que para valores de temperatura algo bajos, la termopila nos puede ofrecer una salida negativa, por lo que debemos sumarle una tensión positiva ya que a nuestro arduino no puede entrar un valor de tensión negativo. Esa tensión que sumamos la obtenemos de los 5V de salida del 7805, con un diodo zener posterior de 3,3 V y una resistencia de 1K, donde cae algo de tensión por lo que la tensión sumada es de aprox. 1,6 V. Con esto nos aseguramos de no tener una tensión negativa y de que en condiciones de temperatura normal (25 grados) el sensor nos dará una salida de unos 2V por lo que sabremos, si esta tensión se anula, si se ha producido o no algún tipo de fallo. Tras esto hay una etapa con un amplificador operacional LM358 de bajo offset (1 mV) en la configuración de amplificador no inversor, con ganancia unitaria a modo de seguidor de tensión. El circuito completo para el acondicionamiento de la señal de la termopila quedaría:

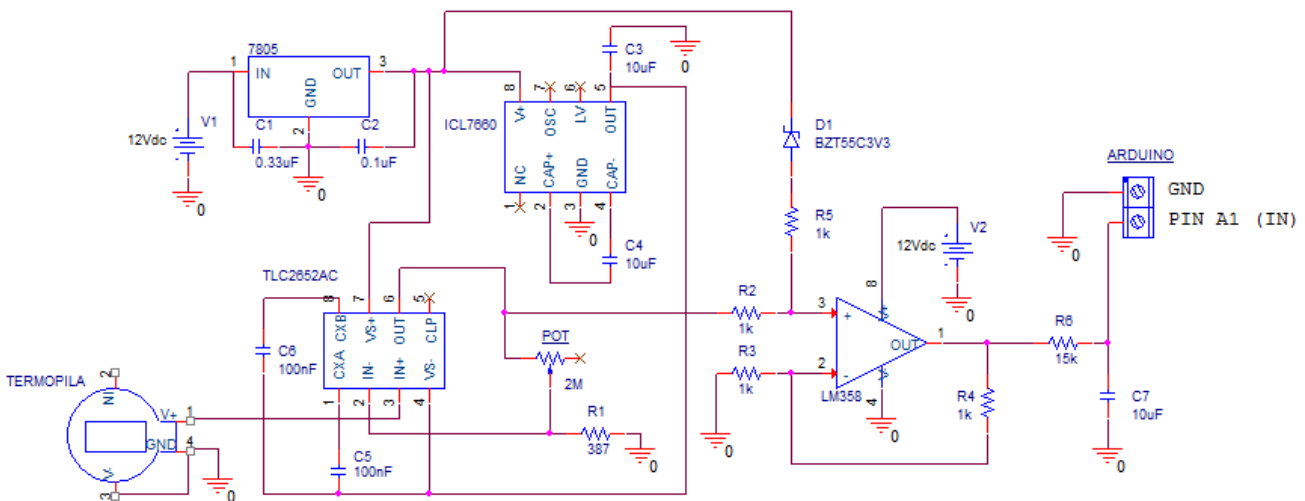


Fig. 4.24 – Esquema electrónico para el circuito de acondicionamiento de la señal de la termopila

Como se puede ver, a la salida del último amplificador se ha colocado un filtro paso bajo para quitar el ruido de alta frecuencia de la señal. Para ello con una frecuencia de corte

elegida de 1 Hz y un condensador de 10  $\mu\text{F}$ , pasamos a calcular el valor de la resistencia necesaria a colocar mediante la fórmula:

$$f_c = \frac{1}{2\pi RC} \rightarrow R = \frac{1}{2\pi * 10^{-6}} = 15,915 \text{ K}\Omega$$

Por tanto una resistencia de 15 K $\Omega$  para nuestro filtro paso bajo será totalmente válida. En la figura 4.25 se puede ver el efecto del filtro paso-bajo en la señal de temperatura de la termopila. Aunque las gráficas corresponden a dos pruebas diferentes, nos sirven para mostrar la eliminación de ruido en la señal.

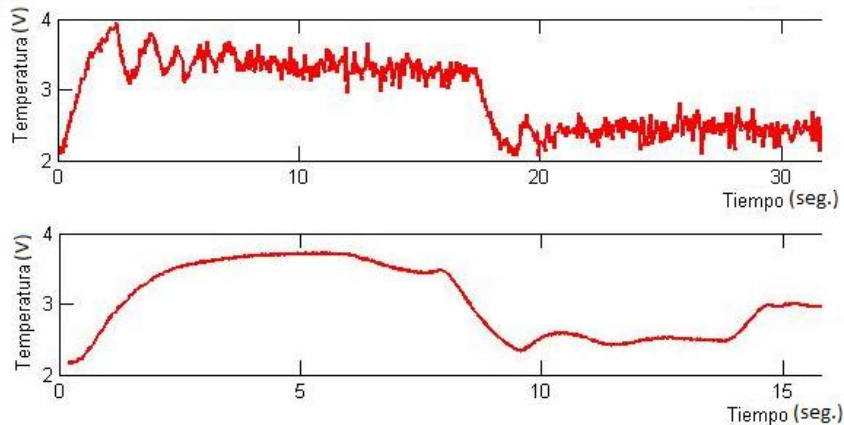


Fig. 4.25 – Efecto del filtro paso bajo en la señal de temperatura de la termopila

Al implementar todo el circuito anterior en un PCB se ha colocado por un lado la termopila y por el otro el resto de componentes para poder fijar la placa a la plataforma superior de nuestra plataforma, mediante dos tornillos y tuercas de 3 mm, quedando la termopila arriba y el resto de componentes por debajo.

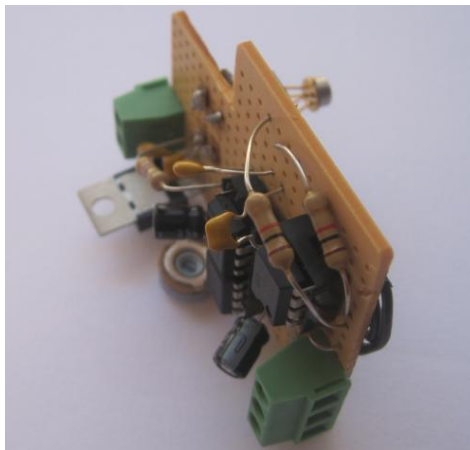


Fig. 4.26 – Implementación en PCB del circuito de acondicionamiento de la termopila

En las pruebas iniciales que se hicieron con estos sensores de infrarrojos se comprobó que al aislarlos de la radiación exterior se mejoraba la respuesta de los mismos. Se pensó en crear un cubo con una cara abierta donde poder alojar el sensor dentro realizándole un par de aberturas laterales para que pase el cable SMA. Se decidió que el material de este cubo fuera de aluminio, ya que es un buen reflector de la radiación infrarroja.

Para conseguir el aluminio se pidió alguna muestra de perfiles de aluminio en una carpintería metálica cercana. Se consiguieron un par de trozos de perfiles rectangulares y, con la multiherramienta dremel, fueron cortados y pegados hasta obtener la disposición correcta. Puesto que si se rompía el SMA en algún momento habría que quitar este cubo, se pensó en instalarlo con una pequeña bisagra con la que poder levantarlo fácilmente para poder reemplazar el cable o el sensor si fuese necesario. En las siguientes imágenes se pueden ver las dimensiones iniciales de diseño, un trozo de los perfiles conseguidos y el estado final del cubo donde alojar la termopila.

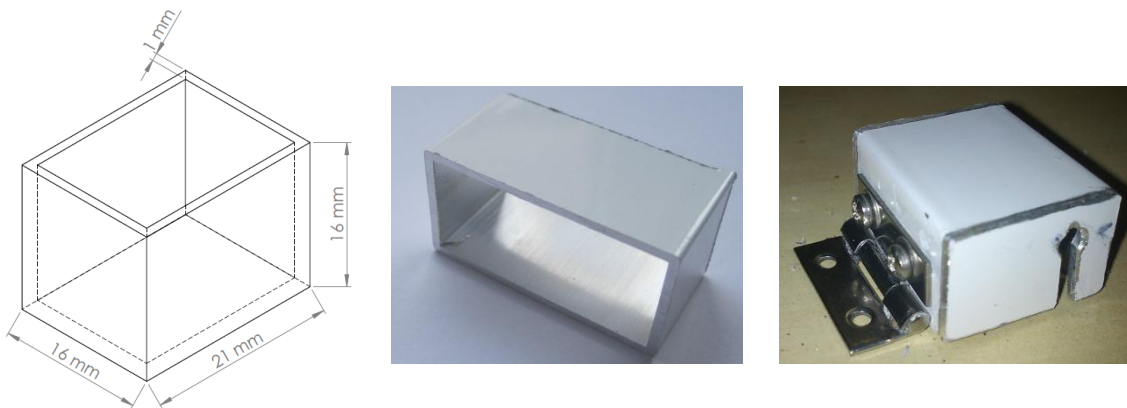


Fig. 4.27 – Medidas del cubo, perfiles de aluminio y cubo de aluminio acabado para albergar la termopila

A modo de representar los datos de una forma más adecuada, se busca una relación entre la temperatura que entra a arduino desde la termopila, cuyo valor viene en Voltios y el valor de temperatura real, en grados centígrados, que tiene el cable de flexinol. Esta relación no es fácil de obtener ya que nuestra termopila, como se ha comentado, no está midiendo la temperatura real del cable debido a su pequeño diámetro.

Para conseguir obtener la temperatura real del SMA se intentó medir su temperatura real, durante sus pruebas, con una cámara termográfica. Este método no resultó válido ya que al tener un cable de flexinol de un diámetro tan pequeño, la cámara termográfica ni lo detecta como un objeto por muy próximo que esté el SMA. En la siguiente figura se puede ver una imagen recogida por la cámara termográfica y como detecta que la temperatura aumenta en el circuito amplificador del SMA1 pero no detecta el cable SMA:

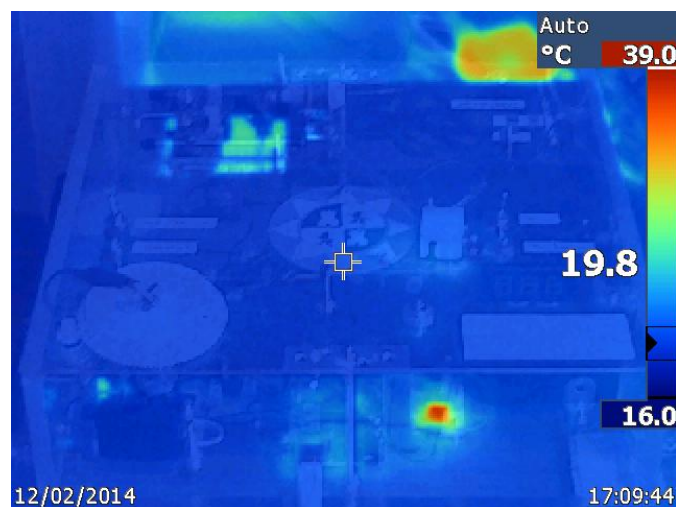


Fig. 4.28 – Imagen obtenida de nuestra plataforma de experimentación con la cámara termográfica



Debido a que no hemos sido capaces de obtener una temperatura real y exacta del cable, se realiza una aproximación de la gráfica de temperatura-desplazamiento del cable SMA, obtenida ante una entrada escalón de 5 V (figura 4.29), con la gráfica temperatura-deformación de la hoja de características del flexinol (figura 2.17).

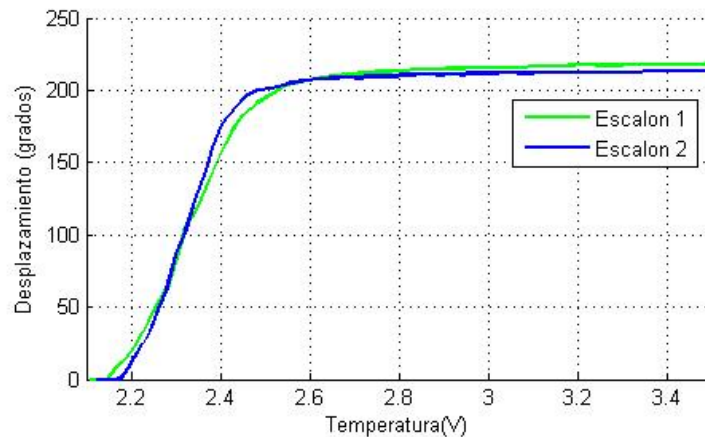


Fig. 4.29 – Variación de la temperatura con el desplazamiento

De la gráfica anterior, podemos decir que a partir de 3,4 V no se mueve el SMA y esto ocurre en la gráfica 2.17 para una temperatura de 115 °C, por tanto sacamos una relación lineal, entre este punto y el primero de 2,1 V para 25 °C. Esta recta nos quedaría:

$$T (^{\circ}C) = 69,23077 * T(\text{Voltios}) - 120,3846$$

Esta relación está implementada en los script del anexo B.4 en que queremos representar la temperatura en grados centígrados.

#### 4.4.6.- SENSOR DE INTENSIDAD Y CIRCUITO DE ACONDICIONAMIENTO

Se pensó también en la idea de poder realizar un control de la posición del cable mediante la medición de la Intensidad que circula por él o a través de su resistencia, ya que esta varía con el porcentaje de martensita de la aleación. Lo primero que debemos conocer es que la corriente por el SMA es de unos 200 mA. Se buscó por el laboratorio un antiguo sensor que había sido usado en alguna prueba en el proyecto anterior. Este sensor era el CAS 15-NP de la marca LEM y no resulta valido ya que es para medición de 15 A por lo que con una corriente tan pequeña el sensor no experimenta prácticamente variación.

Por esto, se decidió buscar algún sensor de Intensidad de bajo coste. En un principio se pensó en algún sensor tipo toroidal donde medir la intensidad sin contacto, pero resultaban más caros y teníamos el problema de que podrían entorpecer o rozar el SMA en algún punto, por lo que se descartó esta opción. Tras buscar, se encontró un sensor de la marca Honeywell de 1 A, el CSLW6B1. Este sensor tiene un bajo precio (12 €), y está basado en un sensor de efecto Hall, que da una respuesta sin corriente de 2,45 V y cuando pasa corriente su voltaje aumenta de manera lineal, por lo que resulta perfecto para nuestros intereses y no necesita de electrónica adicional para su conexión con arduino, basta con conectar de manera adecuada los pines de nuestro sensor. En la siguiente imagen podemos ver sus conexiones eléctricas:

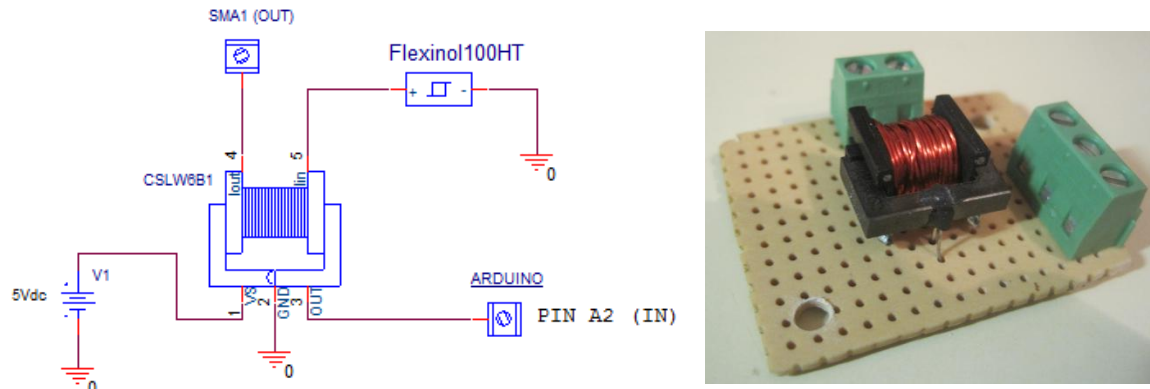


Fig. 4.30 – Esquema electrónico de conexión del sensor de intensidad e implementación en PCB

La alimentación de 5V la obtenemos del regulador de tensión 7805 utilizado para el circuito del potenciómetro en el apartado 4.4.4. En el esquema puede observarse que la salida del circuito amplificador SMA1 entra por el pin 4 de  $I_{out}$  y sale por el pin 3 de  $I_{in}$  hacia el SMA. No es que nos hayamos equivocado intercambiando la entrada por la salida, sino que de esta forma el sensor aumenta su voltaje al aumentar la Intensidad, si la corriente entrara por  $I_{in}$  y saliera por  $I_{out}$ , al aumentar la intensidad bajaría la tensión y resultaría menos intuitivo de ver, por lo que se eligió que la corriente entrara de forma inversa.

Para obtener la señal de mi intensidad en mA, basta con restar el valor fijo del sensor (2,45 V) a la señal de entrada, ya que los valores de voltaje están directamente relacionados a los de corriente, como podemos ver en la hoja de características del sensor que se adjunta en el CD-ROM.

## 4.5.- SISTEMA SMA-MOTOR PARA MOVIMIENTO LINEAL

Los objetivos principales de la construcción de este segundo montaje en nuestra plataforma, son obtener una comparación de calidad, del control de posición lineal realizado tanto por un cable SMA de 100  $\mu\text{m}$ , cómo por un motor lineal. Nos pareció interesante medir este desplazamiento lineal ya que parece mucho más adecuado al comportamiento de un cable SMA, sin necesidad de relaciones de transmisión para medir el desplazamiento. Para este montaje se realizará un estudio de control de posición lineal, mediante la medida de desplazamiento lineal. Este montaje se va a implementar, en la parte superior de nuestra plataforma, al lado del primer montaje. En este sistema también se usan dos actuadores, aunque en un principio se realizó el estudio de cuatro actuadores diferentes:

- 1) El SMA de Flexinol de 100  $\mu\text{m}$ , de idénticas características al utilizado en el montaje anterior (apartado 4.4) pero con una longitud mayor de casi el doble de longitud, 44 cm, y por tanto con mayor capacidad de movimiento.
- 2) Un motor Maxon DC encontrado por el laboratorio perteneciente a un proyecto anterior. Se trata de un motor Maxon de escobillas de metal precioso de 3,2W, montado en conjunto con un reductor planetario con una relación de reducción 19:1 y un encoder de 16 pulsos por vuelta. Este conjunto estaba montado con un husillo que

convertía el movimiento rotativo del motor a lineal por lo que era ideal para nuestro propósito. En un principio se pensó en usar uno de estos motores, ya que son de una gran calidad y se encontraban en desuso en el laboratorio. El problema vino a la hora de testar su funcionamiento ya que el paso de rosca del husillo era extremadamente pequeño, por tanto se movía demasiado lento para nuestro propósito. Se pensó en quitarle el reductor pero no fue fácil desmontarlo y al ganar en velocidad se perdía mucho par. Todo esto, unido a que su voltaje de alimentación es de 24V y tendríamos que añadir otra batería hizo que al final se descartara el uso de estos motores en nuestra plataforma de pruebas.



Fig. 4.31 – Motor Maxon DC de 3,2 W

- 3) Un par de motores lineales paso a paso unipolares que fueron encontrados por el laboratorio. Los motores son de la marca comercial Thomson Airpax Mechatronics de la serie L92100 y de 3,5 W, en concreto el L92111-P1, que funciona a 5V y cuyo desplazamiento por paso es de 0,025 mm, y el L92121-P2, que funciona a 12V y cuyo desplazamiento por paso es de 0,05 mm. Primeramente se decidió usar el motor de 5V debido a que necesitaba menos alimentación y disponía de un husillo más largo, pero se pudo ver que era más inestable al ser su husillo tan largo y tenía un paso de rosca del husillo muy pequeño por lo que iba demasiado lento y se decidió sustituirlo por el de 12 V con un husillo más corto y con un desplazamiento mayor por cada paso, por lo tanto se mejoraba en velocidad como en estabilidad. Un problema de estos motores es que necesitan de una electrónica adicional para su control, lo que se verá con detalle en el apartado 4.5.2.



Fig. 4.32 – Motores Thomson paso a paso unipolares

Para montar este motor en nuestra plataforma lo más adecuado es la utilización de un cojinete o rodamiento y solo disponíamos de unos que formaban parte de una rueda (figura 4.33.a) y cuyo diámetro interior era mayor que el del husillo. Para solucionar esto se decidió intentar su acople pegando dos arandelas

anchas en cada cara para centrar el husillo en el cojinete y así reducir el diámetro interior de este (figura 4.33.b). Tras esto se apretó el cojinete con dos tuercas de 4mm al husillo. En último lugar se tenía que enganchar el cojinete a un carro que se mueve linealmente, para ello se cortó y lijó una parte de la rueda, ya que va estriada interiormente (figura 4.33.c) y evita que la parte exterior del cojinete gire, por lo que es perfecta para asegurar la sujeción de este. Esta parte de la rueda, actuará como base del cojinete y se pegará al carro con silicona y ya estará lista para enganchar y desenganchar el cojinete cuando se quiera o no actuar con el motor.

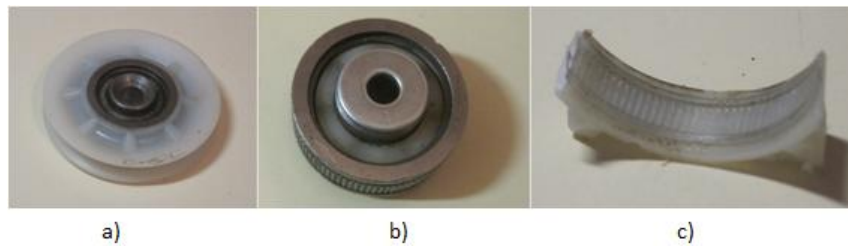


Fig. 4.33 – Rueda, cojinete extraído y superficie interior estriada para fijar el movimiento de su parte exterior

El motor fue enganchado a la parte superior de la plataforma con dos escuadras y un par de tornillos y tuercas de 4 mm, en la posición y altura adecuada para poder engancharse al carro, como podemos ver en la siguiente imagen:

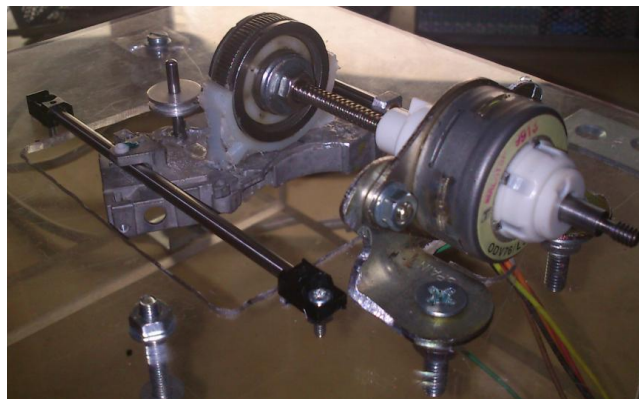


Fig. 4.34 – Montaje del motor paso a paso en nuestro sistema de desplazamiento lineal

Al final debido a que para bajas velocidades su comportamiento era algo caótico, tenía un mayor consumo de corriente y bastante electrónica adicional se decidió quitar este motor paso a paso de nuestra plataforma.

- 4) Un Motor Sony DC 6450034305, sacado de un reproductor VHS Sanyo, modelo VHR-267. Este será el motor implementado finalmente en nuestra plataforma debido a su estabilidad, simplicidad y a su fácil control de velocidad, simplemente variando la tensión entre sus terminales. En este proyecto nos referiremos a él como motor2 DC. Para convertir el movimiento rotativo en lineal se implemento un husillo de forma casera que será visto con detalle en este apartado.



Fig. 4.35 – Motor2 DC: motor DC Sony

Aparte de este motor2 DC y el cable SMA2, el sistema completo consta de varias partes y elementos auxiliares. Debemos tener en cuenta que el cable SMA y el motor lineal deben de mover alguna pieza deslizante de la que podamos medir su desplazamiento y que no tenga mucho rozamiento. Se pensó en la idea de montar una especie de carro y desmontando un DVD averiado, se observó que el carro de la lente del lector de DVD se movía de forma suave sin apenas rozamiento y era de un material no conductor por lo que no habría problemas con masas. Se procedió a desmontarlo y, realizando un corte rectangular en la parte superior de nuestra maqueta, se montó este carro sujetándolo con unos tornillos y tuercas de 2 mm. Este elemento, ya montado en la plataforma, puede verse en la siguiente figura:

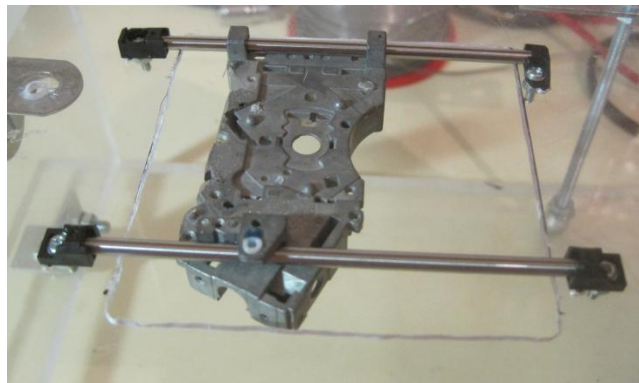


Fig. 4.36 – Carro para poder realizar la medida de desplazamiento lineal

Una vez tenemos el carro montado, nuestro SMA y motor deben poder tirar de él y soltarse cuando el otro actuador tire, para no perturbar el movimiento de cada actuador.

Para realizar la conexión de nuestro motor2 DC con el carro se pensó en construir un husillo casero formado por una varilla roscada que gire solidaria al eje del motor y vaya entrando o saliendo a roscas de una tuerca ancha que va fijada en el carro. Como el motor está sujeto a nuestra plataforma al girar, la rosca se mueve por la varilla roscada moviéndose el carro linealmente hacia delante o hacia atrás según el sentido de giro de nuestro motor. El acople del eje motor, de 2 mm, con la varilla roscada, de 5mm, se realiza con un acoplamiento flexible que fue sacado de un proyecto anterior del departamento. El enganche de la tuerca de 5mm al carro se realiza con una escuadra que va atornillada a la parte superior de nuestro carro. El conjunto entero quedaría como podemos ver en la siguiente imagen:

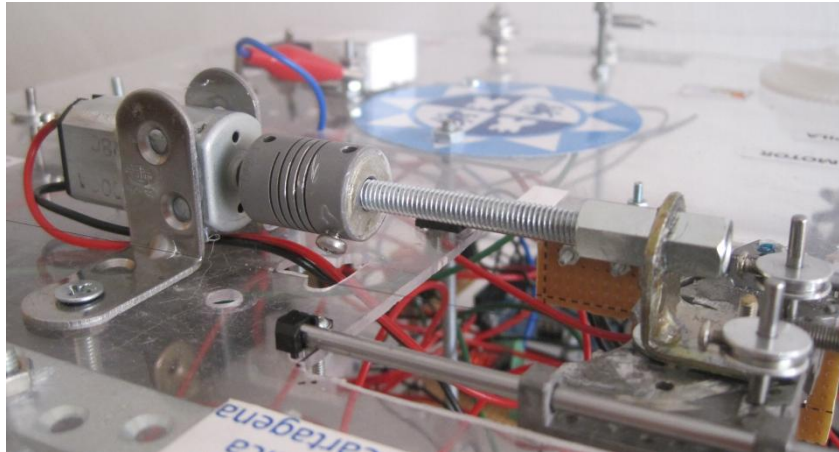


Fig. 4.37 - Montaje del motor2 DC con el husillo en nuestro sistema de desplazamiento lineal

Si queremos que el motor actúe sobre el carro nos bastará con dejar el montaje tal y como está pero para que el carro sea movido por el SMA se ha de desatornillar la varilla roscada de 5mm del acoplamiento flexible. Esta varilla está preparada para que simplemente se suelte del acoplamiento flexible y pueda salir fácilmente desenroscándose.

Para enganchar el SMA se pensó en el montaje de una polea sobre el carro, por la que pasase el SMA rodeándola y pudiera tirar de ella, el problema es que todas las poleas de que disponíamos eran muy grandes y muy pesadas. Por ello se decidió pedir unas poleas pequeñas y de bajo peso. En un primer momento se pensó en que fuesen de algún material cerámico, no conductor y que aguantara alta temperatura pero al no encontrarse de este tipo se decidió por unas poleas de 12 mm de aluminio, con sus respectivos ejes de 3 mm para poder colocarlas de forma adecuada. Al final se optó por poner dos trozos de eje cortados y pegados al carro con dos poleas sujetadas en ellos mediante un pequeño tornillo y por las cuales pasará el SMA para poder tirar del carro.

Tras pasar por este punto el SMA pasa por otras dos poleas que se colocaron en sus dos ejes en la parte superior de la maqueta (figura 4.38) para realizar el cambio de dirección en el cable y así aumentar su longitud sin ocupar demasiado espacio en nuestra plataforma. Por último, los dos extremos del cable SMA se sujetan con dos tuercas de 3 mm en dos tornillos colocados en la parte superior de la maqueta por donde recibirán la alimentación de corriente, como se puede ver en la siguiente imagen:

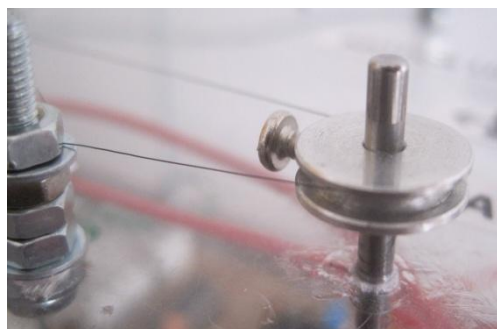


Fig. 4.38 – Detalle del enganche del SMA al tornillo y su paso por una de las poleas

Debido a que el cable SMA necesita una tensión exterior para ayudarle a volver más rápidamente a su estado martensítico, se coloca un tornillo en el carro y otro en la placa de metacrilato superior donde se enganchará un muelle, que servirá para este propósito y para

tener una carga contraria al movimiento, tal y como se hizo también para el montaje del desplazamiento angular.

Al igual que en el apartado 4.4, se obtiene la constante elástica del muelle elegido, colgando de él varios pesos y midiendo el desplazamiento producido, para posteriormente con la ecuación que rige el comportamiento elástico de un muelle " $F = K * x$ " obtener su constante elástica K.

PESO	DESPLAZAMIENTO (mm)	CONSTANTE (K)
50 g (0,4905 N)	5	100 N/m
100 g (0,981 N)	12,5	78,48 N/m

Tabla 4.3 – Obtención de valores de K para el muelle2

Se realiza la media de los dos valores de K obtenidos y sacamos la K de nuestro muelle de 18,9 mm de longitud (figura 4.39):

$$K = 89,24 \text{ N/m}$$



Fig. 4.39 – Muelle usado en el sistema de desplazamiento lineal

Una vez descrito todo el conjunto del carro solo nos queda medir este desplazamiento lineal. Esta tarea es llevada a cabo por un potenciómetro lineal, que es instalado en una placa de circuito impreso y se engancha por abajo en un hueco del carro para que pueda moverse solidario a él. Se puede ver más información sobre él en los siguientes apartados.

Para finalizar podemos observar cómo queda este conjunto montado físicamente en nuestra plataforma en la siguiente fotografía. Se ha marcado en verde el cable SMA2 para que se pueda apreciar por donde pasa correctamente:

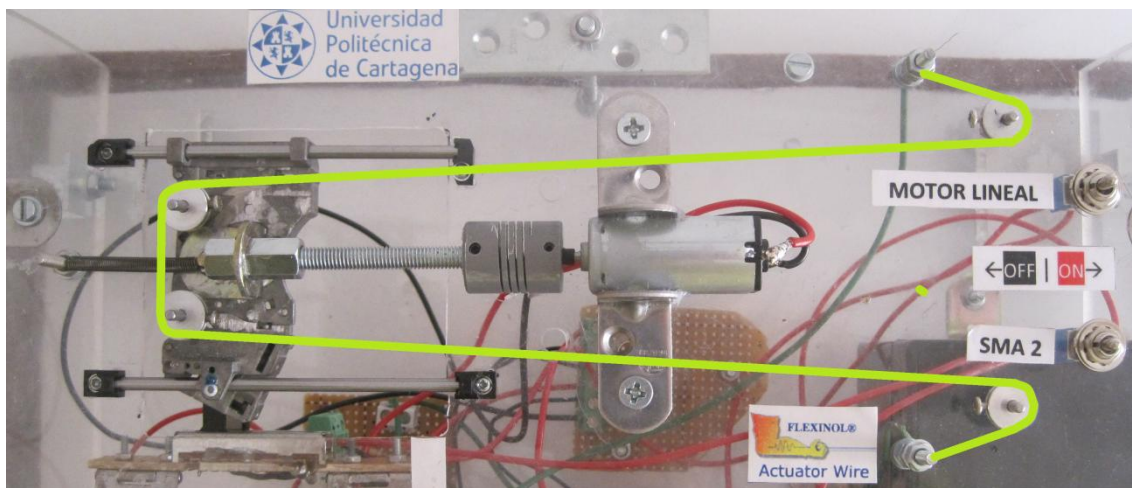


Fig. 4.40 - Sistema SMA2-muelle / Motor2 DC para desplazamiento lineal

### 4.5.1.- CIRCUITO AMPLIFICADOR PARA EL SMA2

Debido a que el cable de flexinol es el mismo que en el montaje anterior, también necesita 200mA para su activación, según recomienda el fabricante. Este cable al ser más largo posee más resistencia eléctrica y por tanto necesitaremos aplicar más tensión para que pasen esos 200 mA. En un principio la longitud del cable iba a ser de unos 68 cm, pero para esta longitud necesitábamos aplicar un voltaje de unos 17V, puesto que nuestra batería es de 12 V se decidió acortar el cable a unos 44 cm. Para esta longitud la resistencia del SMA es de aproximadamente unos 55  $\Omega$ , y para conseguir que pasen esos 200mA necesitamos aplicar una tensión de unos 11V, tensión que si podemos suministrar. Para conseguir estos requerimientos eléctricos el circuito amplificador posee la misma configuración que la del SMA del primer montaje (apartado 4.4.2), con el integrado L272M, pero con una ganancia de tensión mayor, necesaria para conseguir los 11V necesarios para el cable desde los 5V que suministra arduino. El esquema eléctrico es el siguiente:

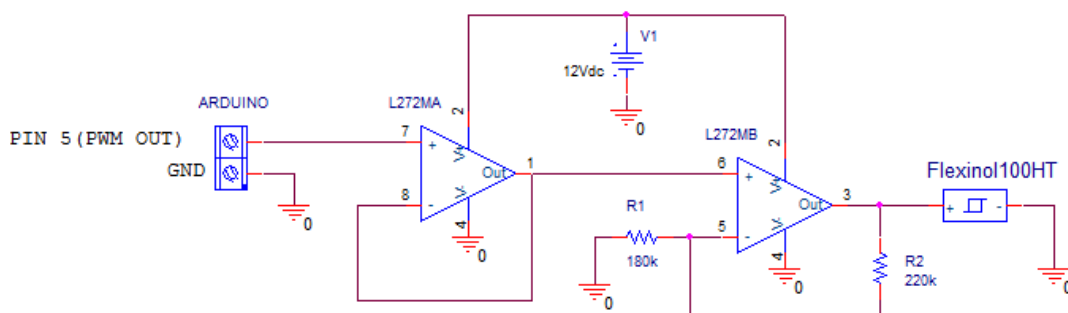


Fig. 4.41 – Esquema eléctrico del circuito amplificador para el SMA2

Según la teoría de los amplificadores operacionales, se tiene la siguiente ecuación para este esquema:

$$V_s = V_e \left( 1 + \frac{R_2}{R_1} \right) \quad \text{Donde } V_s \text{ es la salida y } V_e \text{ es la entrada.}$$

Ya que necesitamos unos 11 V a partir de los 5V de arduino necesitamos una ganancia de 2.2 que obtendremos eligiendo la resistencia R1 de 180K $\Omega$  y la R2 de 220K $\Omega$ , obteniéndose la siguiente ecuación:

$$V_s = V_e \left( 1 + \frac{220K}{180K} \right) = V_e * 2,22$$

Por lo que la multiplicación que obtendría la señal de entrada, que viene desde la placa arduino, es de aproximadamente 2,2 por lo que tendríamos unos 11V. Con este circuito también hemos conseguido aportar la intensidad necesaria para el correcto funcionamiento del SMA. El esquema anterior implementado en el PCB se puede ver en la imagen siguiente:

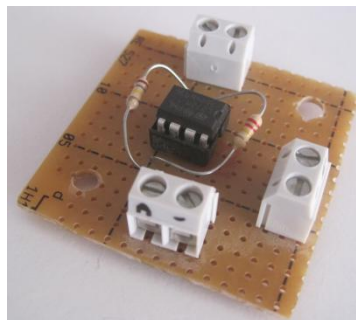


Fig. 4.42 – Implementación en PCB del circuito amplificador del SMA2



### 4.5.2.- CIRCUITO DE CONTROL DEL MOTOR PASO A PASO

La característica principal de los motores paso a paso, es el hecho de poder moverlos un paso con cada impulso aplicado. Estos motores, podemos considerar que están formados por una serie de electroimanes que rodean una armadura, formada por un imán. Para girar el rotor, se encienden y se apagan los electroimanes, por la parte exterior, haciendo que la parte central de un "paso" de un electroimán al siguiente.

Los motores paso a paso unipolares, como nuestro L92121-P2, básicamente se componen de dos bobinas, cada una con una derivación en el centro. Las derivaciones del centro son llevadas fuera del motor con dos cables, por tanto tenemos 6 cables del motor al exterior. Las dos tomas centrales ligadas a una fuente de alimentación y los cuatro extremos de las bobinas son llevados alternativamente a tierra. [73]

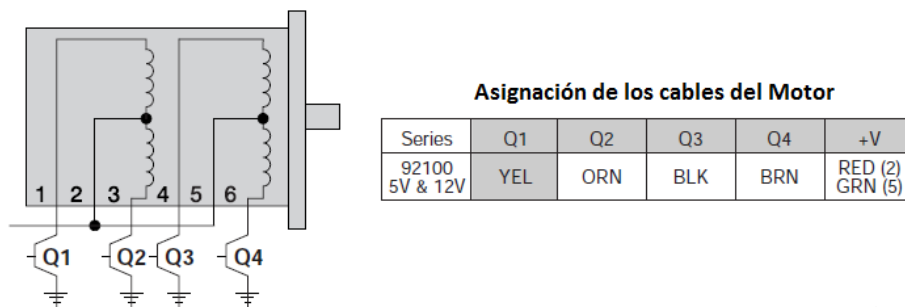


Fig. 4.43 – Esquema eléctrico y cables del motor paso a paso

Para hacer girar un motor unipolar, se aplican impulsos en una determinada secuencia a sus devanados, la secuencia de estos impulsos, se aplican con un controlador electrónico externo. Los controladores se diseñan de manera que el motor se pueda mantener en una posición fija y también para que se le pueda hacer girar en ambos sentidos.

Al invertir el orden de esta secuencia, se logra que el motor gire en sentido opuesto. Hay tres tipos de secuencias posibles para manejar motores unipolares. La secuencia simple, donde solo se activa una bobina a la vez, la secuencia en onda, que es la que recomienda el fabricante y hay dos bobinas activadas a la vez, y la secuencia de medio paso, un término medio de las dos anteriores. No vamos a entrar más en detalle en la secuencia de alimentación de las bobinas ya que no forma parte de nuestro proyecto, si se requiere se puede obtener más información [73].

En nuestro caso escogimos la secuencia en onda (figura 4.44) ya que aparte de ser la recomendada por el fabricante en las hojas de características, con ella el motor funciona más rápidamente con un mayor par aunque también con un mayor consumo de energía, aunque esto debido a la capacidad de nuestra batería no va a suponer ningún problema.

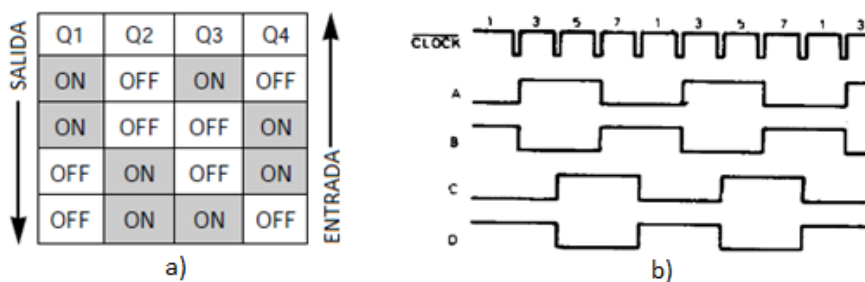


Fig. 4.44 – Secuencia en onda para motores paso a paso

En un principio para generar esta serie de pulsos en las bobinas se pensó en generarlos mediante software, creando en Matlab un script que activara y desactivara convenientemente las salidas digitales y que pudiera cambiar el sentido de giro del motor. Tras realizar algunas pruebas se comprobó como la velocidad del motor era más lenta de lo esperado y es que o bien la conexión matlab-arduino-motor no era lo suficientemente rápida o los pulsos no le estaban llegando de la manera más eficiente a nuestro motor paso a paso.

Para solucionar esto se pensó en la posibilidad de realizar esta serie de pulsos mediante el hardware electrónico necesario. Para ello se implementó el circuito de la figura 4.45. Este circuito está basado principalmente en el integrado L297, cuya muestra o sample fue suministrada por la empresa ST microelectronics. Este integrado se encarga de trocear la señal de reloj que le llegue de forma adecuada para mandar los pulsos de la forma más eficiente a las bobinas del motor paso a paso. Para la secuencia en onda, elegida anteriormente, la secuencia que da en las salidas este integrado se puede ver en la figura TAL. Por tanto el cable amarillo del motor corresponde con la salida D, el naranja con la C, el negro con la B y el marrón con la salida A. La señal de reloj que ha de llegarle al L297 se genera con el integrado NE555 en operación astable, configuración que se puede ver en la hoja de características del componente. Según este modo de operación la frecuencia de la señal de reloj generada responde a la siguiente ecuación:

$$frec. = \frac{1,44}{(R_A + 2R_B) * C}$$

Por tanto, se eligió RB=1470K y C=1nF y colocamos un potenciómetro como resistencia Ra y se fueron probando valores para sacar una frecuencia de señal de reloj máxima con la que pudiera trabajar nuestro motor paso a paso. Tras varias pruebas se ajustó que para la frecuencia máxima el valor de Ra debía ser de 325K, por lo que nuestra frecuencia de funcionamiento vendría dada por:

$$f = \frac{1,44}{(325000 + 2 * 1470000) * 1 * 10^{-9}} = 441,04 \text{ Hz}$$

Las salidas del integrado L297 son enviadas en la posición adecuada a un integrado ULN2004A, que fue comprado para ello, que se encarga de activar o desactivar las etapas de transistores para el buen control del motor paso a paso (datasheet en CD-ROM). Todas las conexiones pueden verse en el siguiente esquema:

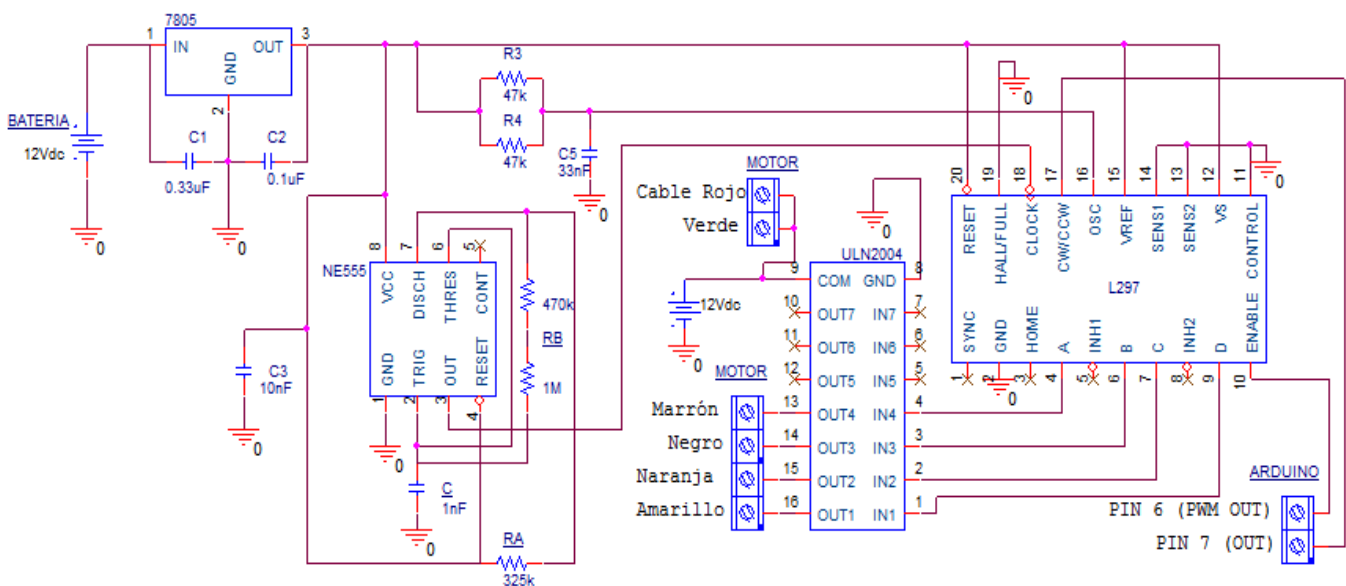


Fig. 4.45 – Esquema electrónico para aumentar la frecuencia de funcionamiento del motor paso a paso

Aunque el circuito anterior ha sido explicado como un conjunto, físicamente no se ha implementado en una misma PCB ya que como se dijo al principio se pensó en mandar los pulsos mediante arduino por lo que en un principio solo necesitábamos el integrado ULN2004A. Debido a esto tenemos por un lado un PCB con el integrado ULN2004A y otro PCB con el resto de componentes:

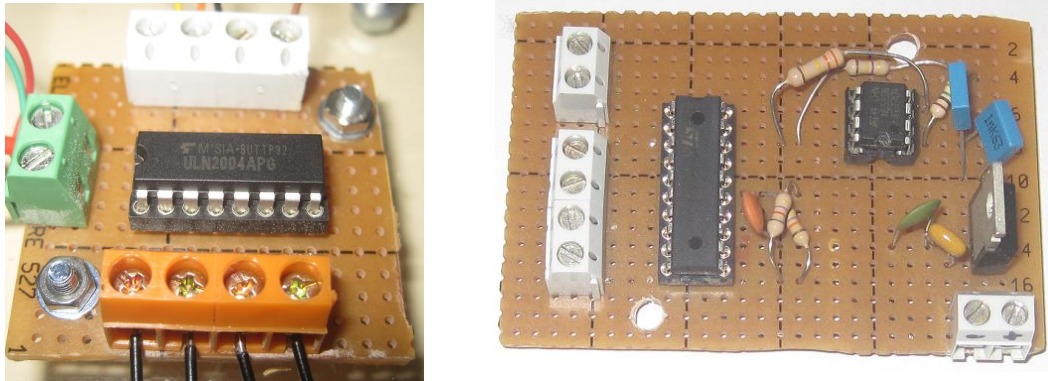


Fig. 4.46 –Implementación en PCB de los circuitos para el control del motor paso a paso

Finalmente se descartó el uso del motor paso a paso, debido a que presentaba un funcionamiento algo brusco y caótico a bajas velocidades, además de ofrecer un rango de velocidades muy bajo para realizar un control óptimo. Debido a la retirada del motor también fueron retirados los dos PCBs diseñados anteriormente.

### 4.5.3.- CIRCUITO DE CONTROL DEL MOTOR2 DC

En la maqueta definitiva el motor que se ha instalado para realizar la comparativa con el cable SMA2 es el motor2 DC. Por tanto, se ha diseñado también un circuito electrónico para realizar el control oportuno sobre este motor. Este circuito, ha sido necesario, ya que se necesita que el motor gire en los dos sentidos, y para esto necesita ser alimentado también en los dos sentidos para poder girar en una dirección u otra. Como arduino no puede realizar automáticamente este cambio de polaridad se recurre, como se hizo anteriormente con el motor1 DC, al controlador de motores LMD18200. Este controlador tiene una ganancia de tensión de 2,36 V y un pin que sirve para cambiar la polaridad de sus salidas, haciendo así controlable al motor en los dos sentidos de giro. Por lo tanto el circuito encargado de controlar al motor2 DC se puede observar en el siguiente esquemático:

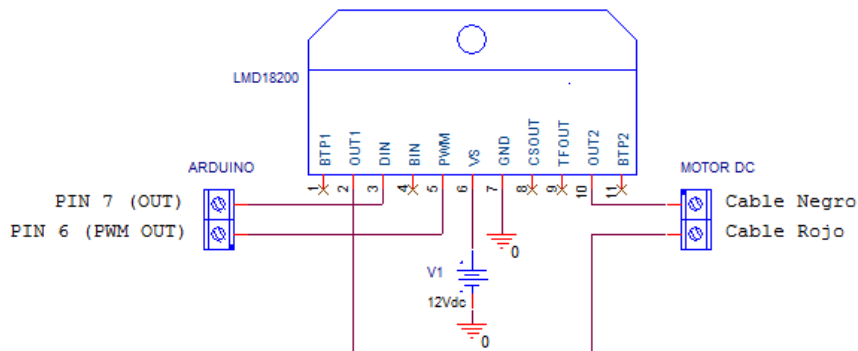


Fig. 4.47 – Esquema electrónico del circuito de control del motor2 DC

Con este circuito la señal de control, que regulará la velocidad del motor, llegará al integrado desde el pin 6 (PWM) de Arduino a la patilla 5 de este, mientras que la señal de control de dirección llegará al integrado desde el pin 7 de arduino a la patilla 3 del integrado. Modificando esta señal de entrada a través de la salida 7 de arduino a nivel alto 5 V (desplazamiento del carro hacia la derecha) o a nivel bajo 0 V (movimiento del carro hacia la izquierda), las señales de salida del integrado LMD18200 cambiarán su polaridad (patillas 2 y 10), haciendo que el motor gire en un sentido o en otro. En la siguiente figura se puede ver este circuito de control implementado en el PCB.

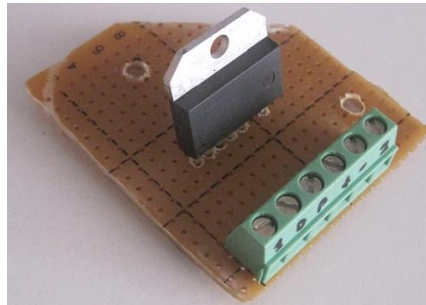


Fig. 4.48 – Implementación en PCB del circuito de control del motor2 DC

#### 4.5.4.- CIRCUITO DEL POTENCIOMETRO SLIDER

En un principio para medir el desplazamiento lineal se barajó la posibilidad de que esta medida se realizara con un sensor LVDT (), ya que dispondríamos de una medida de desplazamiento bastante precisa, pero esta opción fue descartada debido al elevado precio de estos sensores. Como alternativa se pensó en unos potenciómetros de desplazamiento lineal (sliders), ya que cumplieran con nuestros requerimientos y su precio era bastante asequible. Se realizó un pedido a la casa comercial Mouser Electronics de tres sliders de diferentes longitudes, de 1,2 y 4 cm. Se decidió colocar el de 2 cm, ya que para nuestro cable de flexinol de longitud X era más que suficiente. El slider fue implementado en un básico circuito, que podemos ver en la figura, para poder llevar la variación de tensión producida en él a una de nuestras entradas analógicas de arduino.

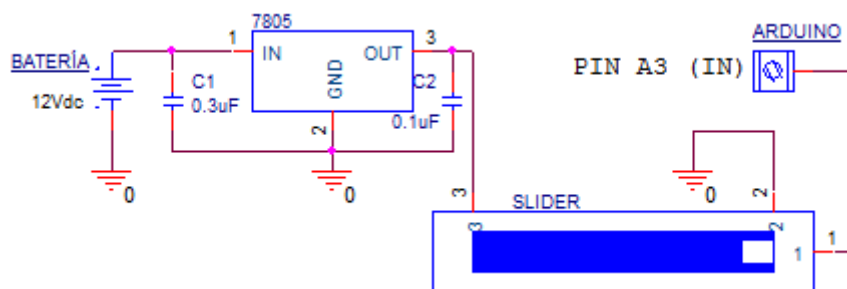


Fig. 4.49 – Esquema electrónico de las conexiones del potenciómetro slider

El slider va enganchado a uno de los huecos inferiores de nuestro carro para medir su movimiento lineal (figura 4.50 izquierda). Al implementarlo en un PCB se decidió colocarlo de forma perpendicular a la plataforma superior de nuestra plataforma y sujetado a ella mediante dos pequeñas bisagras (figura 4.50 derecha). Esta configuración se llevo a cabo para poder encajar es slider correctamente en nuestro sistema de carro sobre raíles y poderlo desenganchar

cuando queramos, para realizar otras pruebas o realizar cualquier tarea de reparación o mantenimiento si fuese necesario.

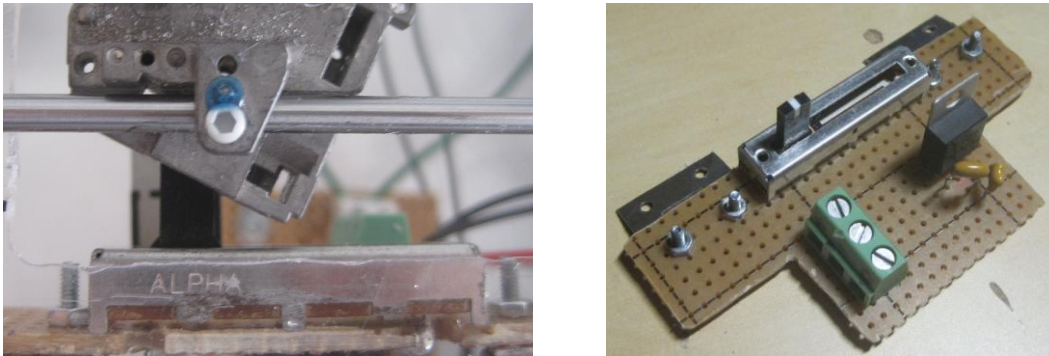


Fig. 4.50 – Detalle de la unión del potenciómetro con el carro e implementación de este en un PCB

## 4.6.- ELEMENTOS AUXILIARES

Con los dos sistemas anteriores montados, solo queda comentar que todas las conexiones eléctricas en nuestra plataforma se han realizado con cables semirrígidos y flexibles de  $0,5 \text{ mm}^2$  de sección que pueden aguantar hasta 3 A por lo tanto más que suficiente para los requerimientos eléctricos de cada uno de los actuadores o circuitos implementados en la plataforma. Debemos tener en cuenta que todas las masas de arduino, la batería y todos los circuitos han de estar conectadas entre sí para el correcto funcionamiento de la misma.

A la hora de desarmar nuestra plataforma para sacar algún circuito, realizar reparaciones o manipulaciones en ella interiormente, se recomienda seguir una serie de pasos que vienen recogidos en el anexo B.3, para evitar la rotura de los cables SMA o de alguna parte de la plataforma.

Una vez realizados los montajes en la plataforma, se comprobó que la parte superior, el metacrilato de 2 mm de grosor, tenía un poco de pandeo o curvatura por lo que se decidió introducir 3 varillas roscadas de 4mm desde la base de la maqueta hasta la zona superior. Estas varillas están sujetas con tuercas a ambas bases y en la parte superior poseen unas pletinas de metal para aumentar la superficie de apoyo del metacrilato. Las tuercas inferiores de la plataforma superior están sujetadas con silicona a la varilla roscada para que no se muevan y la zona superior se mantenga recta y en la misma posición. En la figura 8.1 del apartado 8.1 se puede ver una de estas varillas.

En la plataforma se añadieron varios interruptores de palanca, en concreto 6, para poder activar modularmente nuestra plataforma de pruebas, según necesitemos o no los diferentes componentes que alberga. Esto se realiza con la idea de ahorrar toda la energía posible de la batería, y poder desactivar todos los componentes de nuestra plataforma cuando no se utilicen. Los interruptores estarán en posición de apagado hacia la izquierda y en posición de encendido hacia la derecha. Para conocer la función de cada interruptor se imprimieron unas pegatinas a colocar en nuestra plataforma a modo de leyenda (figura 4.52). Se colocaron también otras pegatinas para un mejor acabado como son: el escudo de la

Universidad Politécnica de Cartagena, el de la escuela de industriales, el autor de la plataforma...

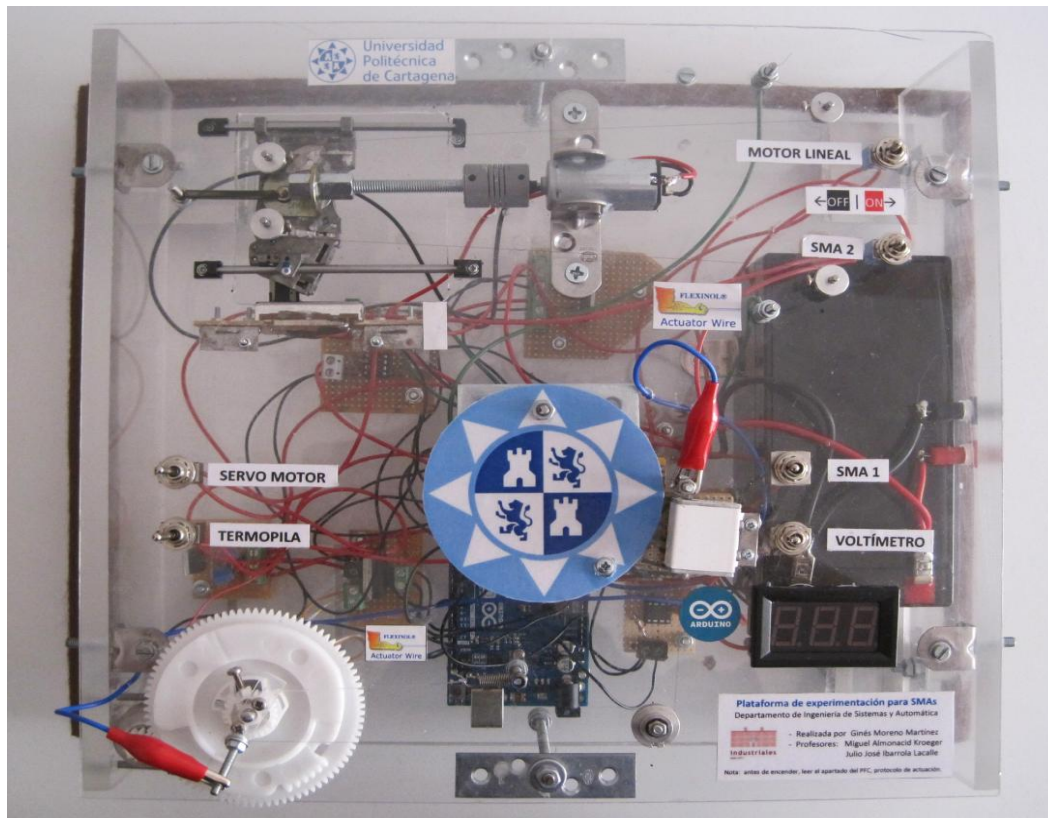


Fig. 4.51 – Imagen en planta de nuestra plataforma de experimentación

Por último y debido a que la zona inferior de la maqueta se apoyaba sobre los tornillos que sobresalían por debajo, se decidió colocar unas simples patas de goma (figura 4.53 izquierda) para que apoyara en ellas y no apoyara en dichos tornillos. Estas patas también facilitaban el agarrado de la maqueta, ya que queda más alta y se pueden introducir las manos por debajo. Por último, y con un fin puramente estético, se colocó pegado un embellecedor marrón en el borde posterior y en los laterales de la parte inferior de la maqueta (figura 4.53).

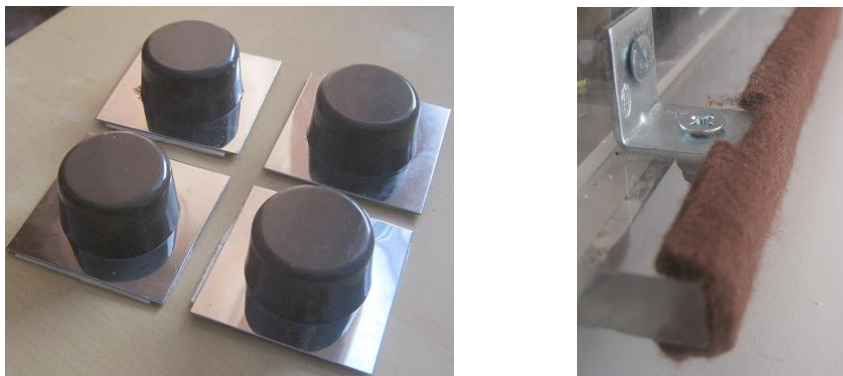


Fig. 4.52 – Patas de goma y embellecedor para el borde inferior de la plataforma

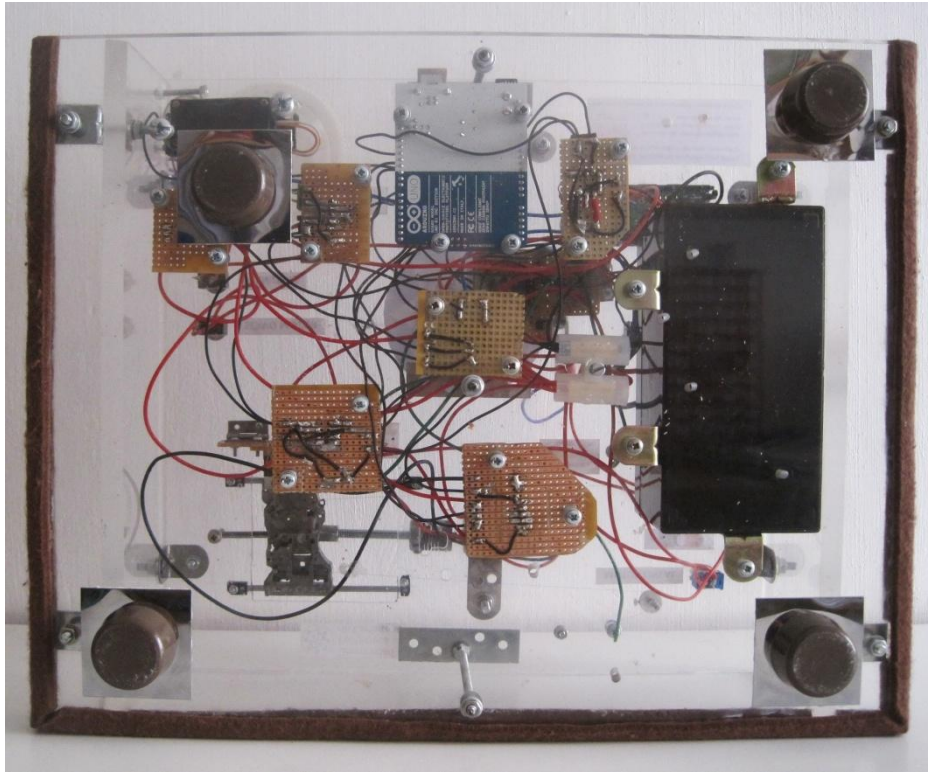


Fig. 4.53 – Vista posterior de la plataforma de experimentación para SMA



Fig. 4.54 – Perspectiva general de nuestra plataforma de experimentación acabada

# Capítulo 5: IDENTIFICACIÓN DE MODELOS Y CONTROL SIMULADO

Obtención de las funciones de transferencia. Sintonía  
y simulación de controladores.





## 5.1.- INTRODUCCIÓN

Para realizar un control bueno y realizar una comparativa de calidad entre SMA1 /Motor1DC y SMA2/motor2DC se necesitará conocer lo mejor posible las dinámicas de los sistemas que componen nuestra plataforma, por lo que se deben obtener las funciones de transferencia de todos los actuadores presentes en ella (SMA1, motor1 DC, SMA2 y motor2 DC). La identificación de estas funciones de transferencia en nuestros actuadores, se va a realizar a través de gráficas posición/tiempo o de gráficas velocidad/tiempo. Esta identificación se llevará a cabo con los muelles anteriormente mencionados, los cuales se opondrán al movimiento de los cables SMA y motores. En nuestros experimentos de identificación el tiempo de muestreo es de aproximadamente unos 0.0085 segundos, aunque se trata de un dato que puede variar, ya que depende de cada ordenador en el que se realice la adquisición de datos y de lo rápido que se ejecute Matlab (anexo B.3) en ese momento.

Tras sacar los modelos del sistema se realizará una sintonía de los parámetros de un controlador PID mediante el método de Ziegler-Nichols, que será explicado posteriormente (apartado 5.3.1). Con estos parámetros del controlador se realizará un control de posición simulado para comprobar que la respuesta teórica del sistema es correcta.

## 5.2.- IDENTIFICACIÓN DE MODELOS DEL SISTEMA

### 5.2.1.- IDENTIFICACIÓN PARA EL MOTOR1 DC

Como se ha comentado, en nuestro sistema tanto el motor como el SMA tiran de un muelle, necesario para devolver al SMA a su estado inicial y que nos ofrece una fuerza contraria al movimiento (carga). Esta fuerza de oposición de nuestro muelle no es constante sino que aumenta proporcionalmente al ángulo girado, es decir, cuando se estira el muelle. Este factor proporcional no es otra cosa que la constante de rigidez del muelle, obtenida anteriormente (apartado 4.4). Por tanto esto hace que la dinámica de lo que sería solo mi sistema formado por el motor varíe y tengamos que tener en cuenta en las ecuaciones que modelan el comportamiento del motor1 DC, nuestro muelle. Por tanto:

La ecuación eléctrica de nuestro circuito sería la siguiente:

$$V = R_c I + L_c \frac{dI}{dt} + E \quad \rightarrow \quad V(s) = (R_c + L_c s)I(s) + E(s)$$

Donde:

V = tensión que aporsto al Motor

I = intensidad que circula por el Motor

R<sub>c</sub> y L<sub>c</sub> = Resistencia e Inductancia del bobinado del rotor del motor.

E = fuerza contra-electromotriz del Motor.

\*s = Los términos con s están en dominio complejo, se ha realizado la transformada de Laplace

Sabemos que la ecuación electromecánica del motor (fem) viene dada por:

$$E = K_e \omega$$

Pero en nuestro caso nos interesa referenciar esa fem al ángulo girado ( $\Theta$ ) por el motor y no a su velocidad angular ( $\omega$ ), por tanto podemos poner:

$$E = K_e \frac{d\Theta}{dt} \quad \rightarrow \quad E(s) = K_e \Theta s$$

Sabemos que el motor me genera una fuerza en forma de par, que viene dada, para un motor de imán permanente (donde el campo magnético es constante), por:

$$\Gamma_m = K_r I \quad \rightarrow \quad \Gamma_m(s) = K_r I(s)$$

Y que sobre el par anterior que yo genero, he de tener un par resistente que será lo que mueva el motor o cable SMA. Este par vendrá dado por:

$$\Gamma_r = J_m \dot{\omega} + f_m \omega$$

Donde  $J_m$  es la inercia y  $f_m$  una constante de fricción, rozamiento y pérdidas internas. Si lo ponemos en función del ángulo de giro, nos quedaría:

$$\Gamma_r = J_m \frac{d^2\Theta}{dt^2} + f_m \frac{d\Theta}{dt} \quad \rightarrow \quad \Gamma_r(s) = J_m \Theta s^2 + f_m \Theta s$$

El par motor será igual al par resistente más la carga, en nuestro caso el muelle es nuestra carga que viene dada por  $F=K\Theta$ , por tanto nos quedaría:

$$\Gamma_m = \Gamma_r + F \quad \rightarrow \quad \Gamma_m = J_m \frac{d^2\Theta}{dt^2} + f_m \frac{d\Theta}{dt} + K\Theta$$

Haciendo la transformada de Laplace obtendríamos:

$$\Gamma_m(s) = (J_m s^2 + f_m s + K)\Theta$$

Como podemos observar al introducir el muelle nos aparece una nueva  $K$  proporcional al ángulo de giro, por tanto nuestro sistema en lazo cerrado nos quedaría:

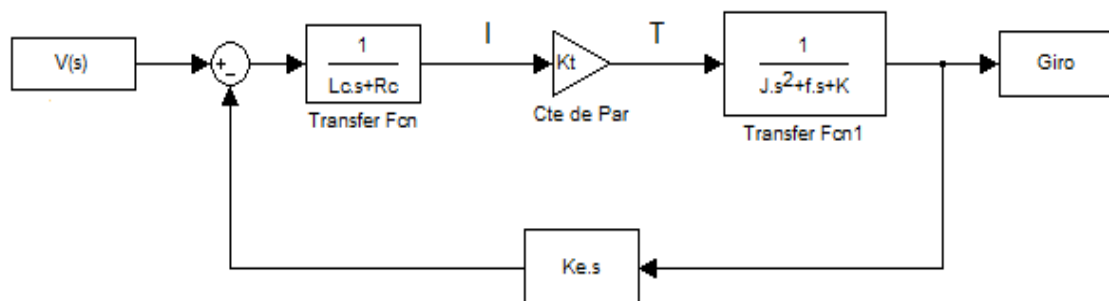


Fig. 5.1 – Sistema motor1 DC – muelle

Si desarrollo y considero que  $L_c$  es despreciable para cables de corta longitud, como es el bobinado de nuestro rotor, nos quedaría:

$$\frac{\Theta(s)}{V(s)} = \frac{K_T}{(R_c J_m s^2 + R_c f_m s + R_c K) + K_T K_e s}$$

Si divido todo entre  $R_c$  y  $J_m$ , nos queda:

$$\frac{\Theta(s)}{V(s)} = \frac{\frac{K_T}{R_c J_m}}{s^2 + \left(\frac{f_m}{J_m} + \frac{K_T K_e}{R_c J_m}\right)s + \frac{K}{J_m}}$$

Como podemos ver en la función de transferencia anterior, además de la función de transferencia esperada para el motor, que era un sistema de segundo orden con un polo en el origen, nos aparece un término  $K/J_m$ . En el caso de que este término fuera despreciable (porque  $J_m \gg K$ ) podemos aproximar la respuesta de mi sistema a un primer orden con un integrador (polo en cero).

En el caso del motor1 DC este término no es despreciable, pero debido a que el motor puede ejercer un par mucho mayor a la fuerza de oposición del muelle, para el rango de movimiento seleccionado (<200 grados), el muelle podemos considerar que no nos afecta por lo que se puede aproximar el sistema a uno de segundo orden con un polo en el origen.

Antes de realizar el experimento para sacar la función de transferencia del motor1 DC, por seguridad, soltamos el cable SMA de la pletina para que no pueda ser dañado por el movimiento del motor. En un futuro no será necesario soltarlo, porque en los experimentos en lazo cerrado controlaremos la posición de giro pero estos experimentos se realizan en lazo abierto por lo que es lo más recomendable. Aparte de soltar el cable SMA se ha mantenido enganchado el muelle, para simular una carga y tener la misma oposición al movimiento que se va a tener con el cable SMA.

Para la identificación se realiza un experimento en lazo abierto en el cual, mediante el script de Matlab `escalonMotor` (anexo B.4.3), se aplicará a nuestro motor 1 DC, un escalón de 0 a 3,92 V durante 0,3 segundos. Esto es así ya que si aplicáramos 5V giraría demasiado rápido, ya que nuestro circuito de control del motor1 DC (apartado 4.5.3) posee una amplificación de tensión. Se han aplicado 3,92 V y durante el tiempo de 0,3 segundo porque es el tiempo necesario para que el engranaje pequeño gire unos 230 grados, valor parecido al conseguido con la acción de nuestro cable SMA. Este experimento será aplicado dos veces para comprobar la repetitividad del motor. Después de aplicar estos dos escalones, podemos ver la respuesta de ambos en la figura 5.2, que nos muestra los grados que ha girado nuestro engranaje pequeño respecto al tiempo.

En esta figura podemos observar que suele haber repetitividad ante entradas iguales. Mediante la gráfica se puede observar como el motor posee un integrador (polo en cero), por tanto vamos a tener que derivar los incrementos de posición entre los incrementos del tiempo para sacar una gráfica velocidad/tiempo que se pueda aproximar a un sistema de primer orden y así obtener nuestra función de transferencia. El cociente de los incrementos en la posición

del cable en cada muestra entre los incrementos del tiempo está implementado en nuestro script `escalonMotor` (anexo B.4.3).

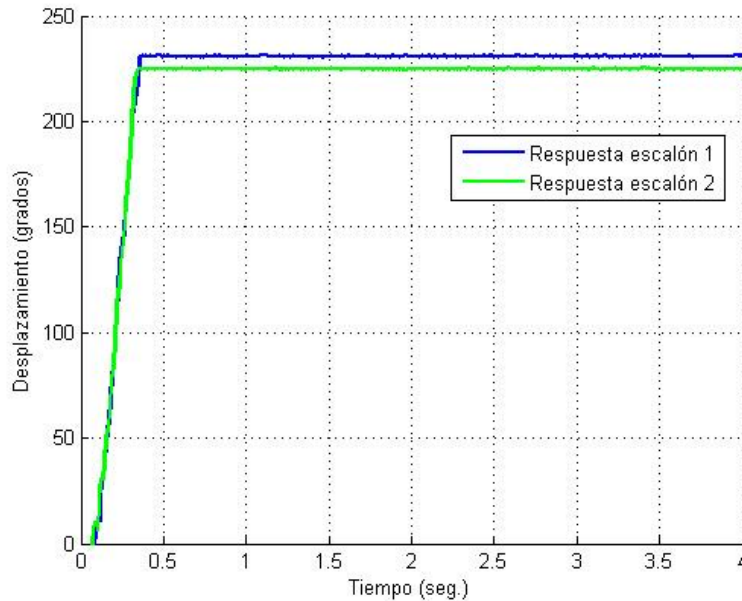


Fig. 5.2 – Respuesta del motor1 DC ante dos entradas escalón iguales

Una vez sacados los datos de velocidad, se muestran en una gráfica velocidad/tiempo, para dos entradas escalón iguales tal y como se realizó anteriormente. Estas gráficas velocidad-tiempo las podemos ver en la siguiente figura:

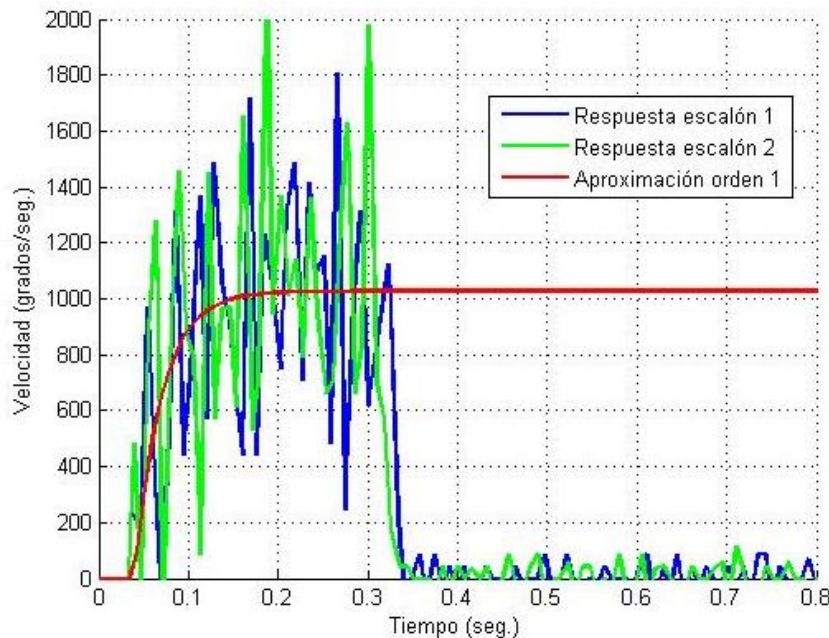


Fig. 5.3 – Respuesta en velocidad del motor1 DC ante dos entradas escalón iguales

A partir de las gráficas velocidad/tiempo, procederemos a obtener un modelo del sistema y a validar este. Como podemos observar en la figura, a partir de unos 0,32 segundos la velocidad comienza a decrecer, lo que quiere decir que el experimento está acabando por tanto los datos a partir de aquí no serán válidos para nuestra identificación. Para sacar nuestra

función de transferencia aproximamos nuestras gráficas de velocidad/tiempo (figura 5.3) a un sistema de primer orden (línea roja) del cual obtendremos todos los parámetros.

Un sistema de primer orden viene dado por la siguiente función de transferencia:

$$G(s) = \frac{K}{1 + \tau s}$$

Donde sus parámetros son los siguientes:

- Una ganancia K que vendrá dada por el cociente entre la salida estacionaria (max.) y el valor del escalón introducido:

$$K = \frac{1027}{3.92} = 262$$

- La constante de tiempo  $\tau$ , que se obtiene hallando el tiempo para el cual la salida es el 63% del valor de la salida final. El 63% de 1027 es 647 grados/seg. Para este valor, obtenemos una constante de tiempo de 0,03 segundos.

- Por tanto nuestra función de transferencia de primer orden en velocidad para el SMA1 será:

$$G(s) = \frac{262}{1 + 0,03s}$$

Tras haber obtenido este modelo, procedemos a usar simulink, una herramienta de Matlab (anexo B.3), para poder validarlo comparándolo con una respuesta real del sistema en posición ante entrada escalón. Para ello se implementará en simulink el siguiente diagrama de bloques:

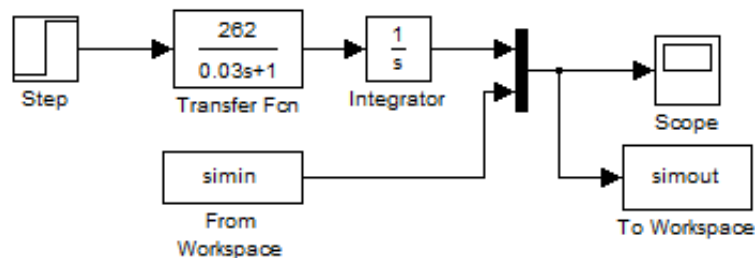


Fig. 5.4 – Validación en Simulink de la función de transferencia del motor1 DC

A través de simin se introducen los datos de un experimento real en posición/tiempo recogidos desde matlab y provenientes de aplicar un escalón. El modelo obtenido en velocidad se integrará para poder compararse con los datos reales en posición. La salida la pasamos a Matlab, a través de la variable simout, para poder mostrar los datos de una manera más conveniente, tal y como se muestran en la figura 5.5.

En esta figura se puede comprobar cómo el modelo obtenido se comporta de forma idéntica ante la respuesta real del sistema hasta los 0,32 segundos, que es el tiempo en el que hemos visto en la figura 5.3 que comienza a disminuir la velocidad con lo que esos datos no debemos tenerlos en cuenta. En definitiva podemos decir que el modelo obtenido del motor1 DC se comporta prácticamente igual al comportamiento real en velocidad del motor, por lo que nuestra función de transferencia obtenida es válida.

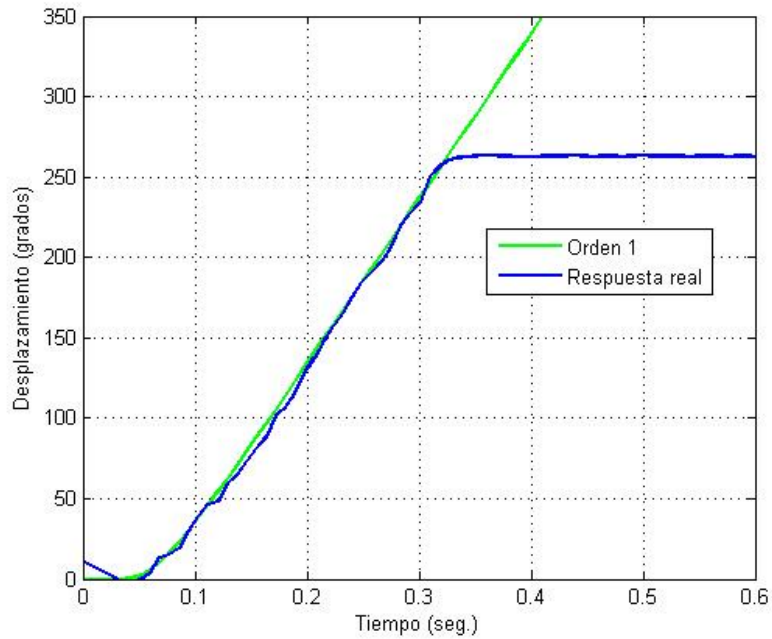


Fig. 5.5 – Comparación de la respuesta del modelo obtenido con la respuesta real del motor1 DC

### 5.2.2.- IDENTIFICACIÓN PARA EL SMA1

Para obtener la función de transferencia realizamos, al igual que para el motor1 DC, un experimento en lazo abierto, en el cual, mediante el script de Matlab llamado `escalónSMA` (anexo B.4.4), se aplicará a nuestro primer cable de flexinol, un escalón de 0 a 5 V durante 5 segundos. Este escalón será aplicado dos veces para comprobar la repetitividad del SMA. Después de aplicar estos dos escalones de igual valor, podemos ver la respuesta de ambos en la siguiente figura 5.6 que nos muestra los grados que ha girado nuestro engranaje pequeño respecto al tiempo para los dos escalones introducidos:

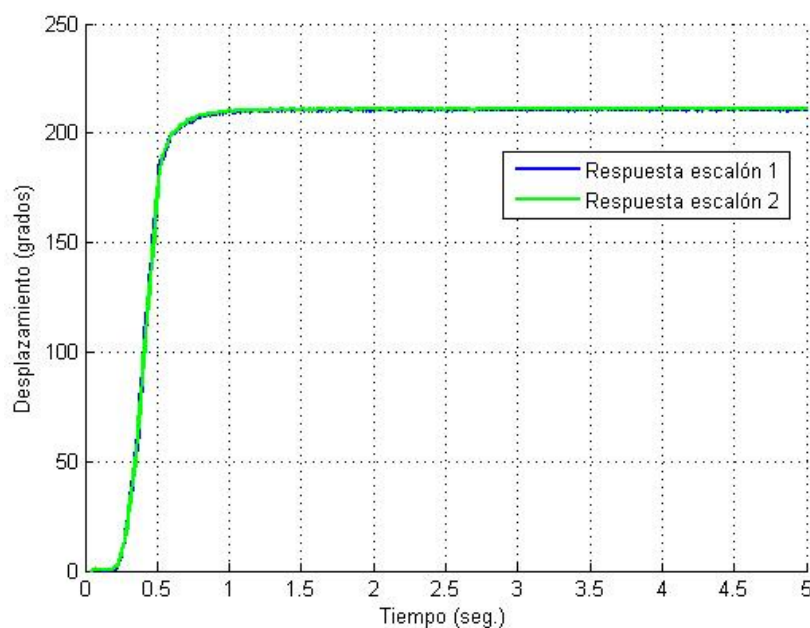


Fig. 5.6 – Respuesta del SMA1 ante dos entradas escalón iguales

En la gráfica anterior podemos observar como existe una especie de retardo, pero este fenómeno no es debido a la naturaleza del SMA sino a que el muelle no ejerce suficiente tensión como para mantener el cable SMA tensado. Esto hace que al calentarse el cable, primero se termine de tensar y luego comience a tirar de la pletina. Este retraso se puede considerar despreciable y suele estar entre 0,1 y 0,25 segundos y no lo vamos a tener en cuenta en nuestra identificación del sistema, por lo que este retardo no aparecerá en las gráficas posteriores. Como se puede observar suele haber repetitividad ante entradas iguales y de esta gráfica se pueden obtener todos los parámetros necesarios para obtener el modelo del SMA.

En un principio se puede pensar que nuestro conjunto SMA1-muelle se podría aproximar a un sistema de primer orden, que viene dado por:

$$G(s) = \frac{K}{1 + \tau s}$$

Donde sus parámetros son los siguientes:

- Una ganancia K que vendrá dada por el cociente entre la salida máxima (estacionaria) y el valor del escalón introducido:

$$K = \frac{211}{5} = 42,2$$

- La constante de tiempo  $\tau$ , que se obtiene hallando el tiempo para el cual la salida es el 63% del valor de la salida final. El 63% de 285,4 es 132,9 grados. Para este valor en las salidas obtenemos un tiempo de 0,452 seg. Pero esta no es nuestra constante de tiempo ya que debemos tener en cuenta el pequeño retraso producido en nuestra señal de 0,202 seg. Por tanto  $\tau = 0,452 - 0,202 = 0,25$
- Por tanto nuestra función de transferencia de primer orden para el SMA1 será:

$$G(s) = \frac{42,2}{1 + 0,25s}$$

Con este modelo, se puede utilizar la herramienta de Matlab “Simulink” para compararlo con la respuesta real ante una entrada escalón y poder validarlo. Para realizar esto comparamos los datos, de un experimento real, provenientes de Matlab a través de la variable “simin” y la salida conjunta de las dos señales (real y orden 1) la visualizamos en Matlab a través de “simout”. Para realizar la verificación del modelo, en simulink, se realiza el siguiente esquema:

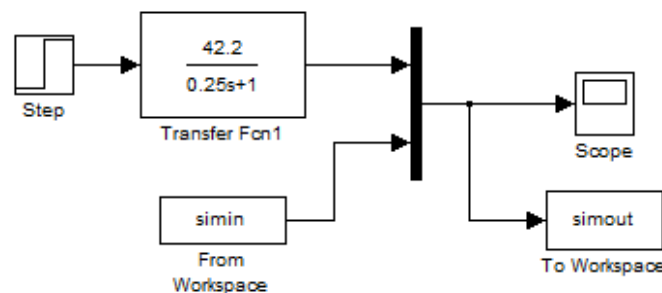


Fig. 5.7 - Esquema en Simulink para verificar la función de transferencia de primer orden del SMA1



El resultado de la comparación de nuestras señales lo podemos ver en la siguiente figura:

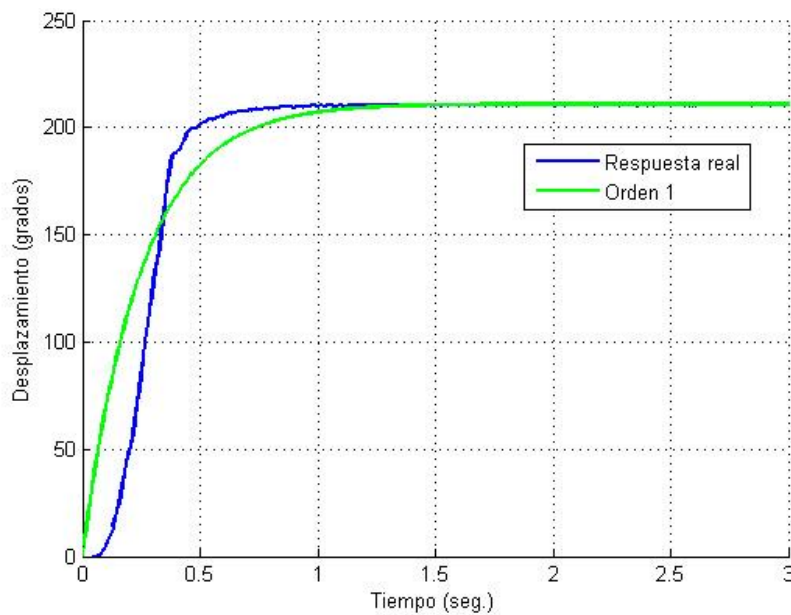


Fig. 5.8 - Comparación de la respuesta del modelo de primer orden del SMA con su respuesta real

En la figura podemos ver como un sistema de primer orden, aunque pueda resultar una aproximación aceptable en algunos casos (quizá solo usando el cable SMA), no podemos considerar que nos sea válido para nuestro sistema, ya que nuestro conjunto SMA-muelle no parece tener una respuesta de primer orden. Para el principal objetivo de este proyecto, el control preciso de posición, un sistema de primer orden podemos concluir que no nos vale como un modelo suficientemente bueno. La respuesta del sistema se cree que se asemeja a un sistema de segundo orden por analogía a las ecuaciones anteriormente demostradas del conjunto motor1DC-muelle (apartado 5.2.1) donde ahora nuestro cable SMA si se vería afectado por la acción del muelle ya que no puede ejercer suficiente fuerza para vencerlo. Por tanto se piensa que la respuesta se va a asemejar a un sistema de segundo orden que obtendremos a partir de la respuesta del sistema ante un escalón (figura 5.6).

En la figura 5.6, podemos ver que no se produce sobreoscilación alguna en la respuesta, pero que es rápida, por tanto podemos decir que estamos en un sistema subamortiguado con un factor de amortiguamiento muy próximo a 1 [74]. Un sistema de segundo orden viene dado por:

$$G(s) = \frac{K \omega_n^2}{s^2 + 2\xi \omega_n s + \omega_n^2}$$

Donde sus parámetros son los siguientes:

- Una ganancia K calculada de la misma forma que en el de primer orden, por tanto  $K=42,2$ .
- El factor de amortiguamiento, muy próximo a 1, por tanto fijamos  $\xi=0.95$ .
- $\omega_n$  es la frecuencia natural y la podemos obtener de la ecuación del tiempo de subida ( $t_r$ ), donde todos los parámetros nos son conocidos:

$$t_r = \frac{1}{\omega_n \sqrt{1 - \xi^2}} \tan^{-1} \left( \frac{\sqrt{1 - \xi^2}}{\xi} \right)$$

$t_r$  es el tiempo para el cual la señal ha subido desde el 0% al 100% para sistemas subamortiguados [74]. Este tiempo es de  $t_r = 0,92 \text{ seg.}$  y puesto que  $\xi=0.95$  ya conocemos todos los valores de la ecuación y podemos obtener el valor de  $\omega_n=10,2$ .

- Por tanto nuestra función de transferencia de segundo orden para el SMA1 será:

$$G(s) = \frac{4390,5}{s^2 + 19,38s + 104,04} * e^{-0.12s}$$

Con este modelo de segundo orden, al igual que se ha hecho anteriormente, mediante “Simulink” se compara con la respuesta real ante una entrada escalón para poder validarlo. Para realizar la verificación de los modelos, en simulink se realiza el siguiente esquema:

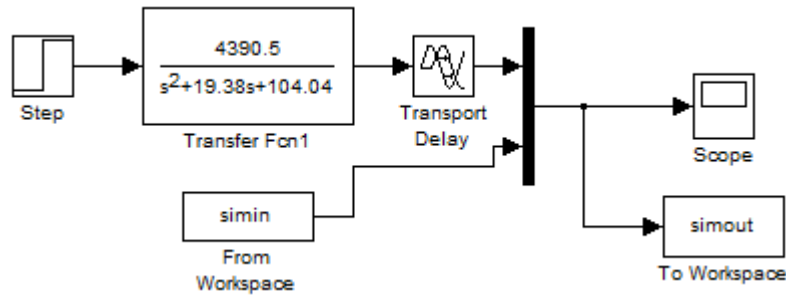


Fig. 5.9 – Esquema en simulink para la validación del modelo de segundo orden del SMA1

El resultado de la comparación de nuestras señales lo podemos ver en la siguiente figura:

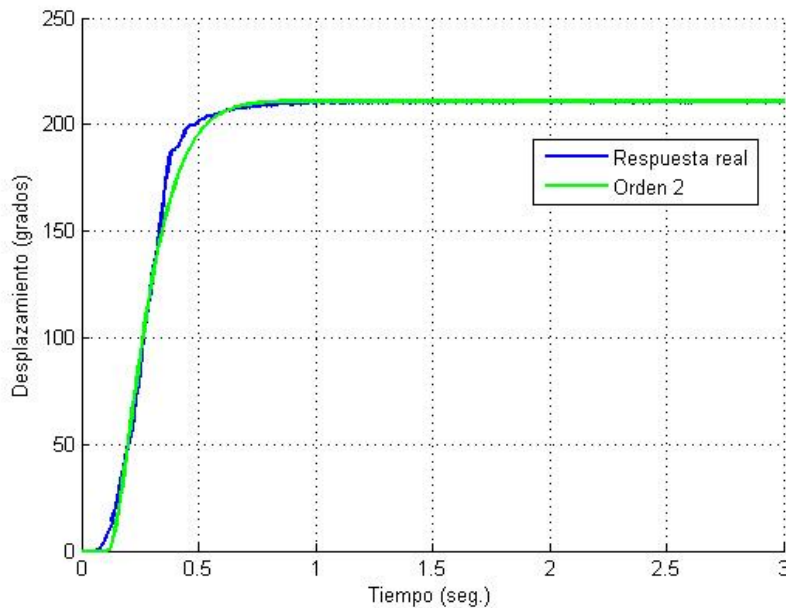


Fig. 5.10 - Comparación de la respuesta del modelo de segundo orden del SMA1 con su respuesta real

Como se puede observar en la figura anterior, el SMA presenta no linealidades en sus zonas iniciales y finales, por tanto para ajustar la respuesta se tuvo que dar un retraso de 0.12 segundos a mi función de transferencia de orden dos para que correspondiera su pendiente con la pendiente de la curva de respuesta del SMA. Este retardo se introduce en la función de transferencia anterior del SMA1. Ahora el modelo si se comporta idénticamente a la respuesta del sistema, excepto en las zonas inicial y final, debido a la no linealidad del SMA, por tanto se puede decir que una función de transferencia de orden dos constituye un modelo totalmente válido del sistema y se ha demostrado que la analogía que se ha supuesto, con las ecuaciones del motor, ha resultado ser totalmente válida.

### 5.2.3.- IDENTIFICACIÓN PARA EL MOTOR2 DC

Antes de poder realizar el experimento para obtener la función de transferencia correspondiente, debemos asegurarnos de que el pin 7 de salida está puesto a cero, para decirle al motor2 DC que tiene que ir hacia la derecha y no dañar el cable SMA, aunque esto ya se realiza automáticamente en el script InicioArduino (anexo B.4.1), necesario para conectar con la tarjeta arduino. En estos experimentos de identificación del motor lineal se ha quitado por seguridad el cable SMA2 y se ha mantenido enganchado el muelle, para simular una carga y tener la misma oposición al movimiento que teníamos anteriormente con nuestro cable SMA. Para realizar esta identificación se ha usado el script de Matlab escalonMotor (anexo B.4.3), que ya fue utilizado para la identificación del motor1 DC (apartado 5.2.1), pero con tres pequeños cambios para poder trabajar con el motor DC, estos cambios son:

- Sustituir la salida digital PWM de la 11 a la 6 para controlar la velocidad del motor2 DC.
- Cambiar la entrada analógica de la número cero (potenciómetro multivuelta) a la número 3 (potenciómetro slider).
- Introducir la ecuación que relaciona la caída de voltaje en el potenciómetro slider con el desplazamiento lineal de nuestro carro.

Con este script escalonMotor modificado se aplicará a nuestro motor2 DC un escalón de 0 a 1,37 V durante 1 segundo. Este escalón será aplicado dos veces para comprobar la repetitividad del motor, su respuesta la podemos ver en la siguiente figura:

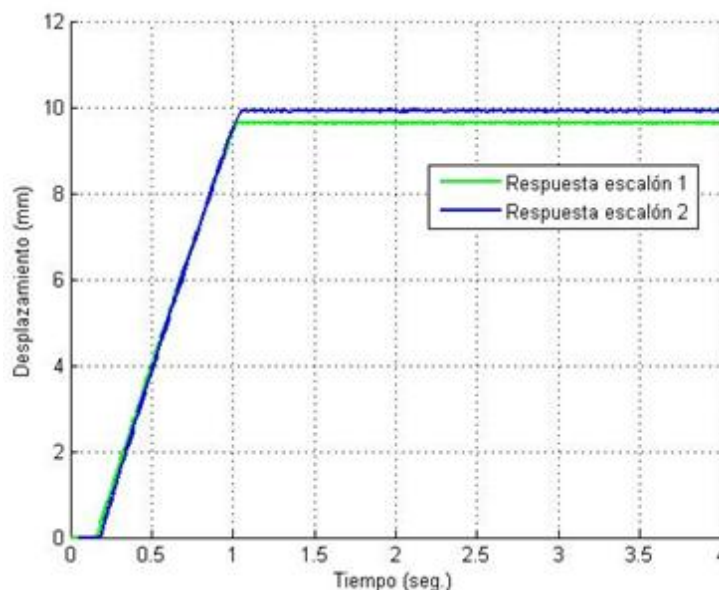


Fig. 5.11 - Respuesta del motor2 DC ante dos entradas escalón iguales

En la figura podemos observar que suele haber repetitividad ante entradas iguales y podemos observar, por su respuesta en rampa, como el motor posee un integrador (polo en cero) por lo que vamos a tener que dividir los incrementos de posición entre los incrementos del tiempo para sacar una gráfica velocidad/tiempo, tal y como se hizo para el motor1 DC (apartado 5.2.1) y cuyas operaciones quedan reflejadas en nuestro script de Matlab escalonMotor.

Para sacar las gráficas en velocidad se realiza el mismo experimento anterior, en lazo abierto y dando una entrada escalón de 0 a 1,37 V. En la siguiente figura podemos ver las gráficas velocidad/tiempo, para dos escalones iguales:

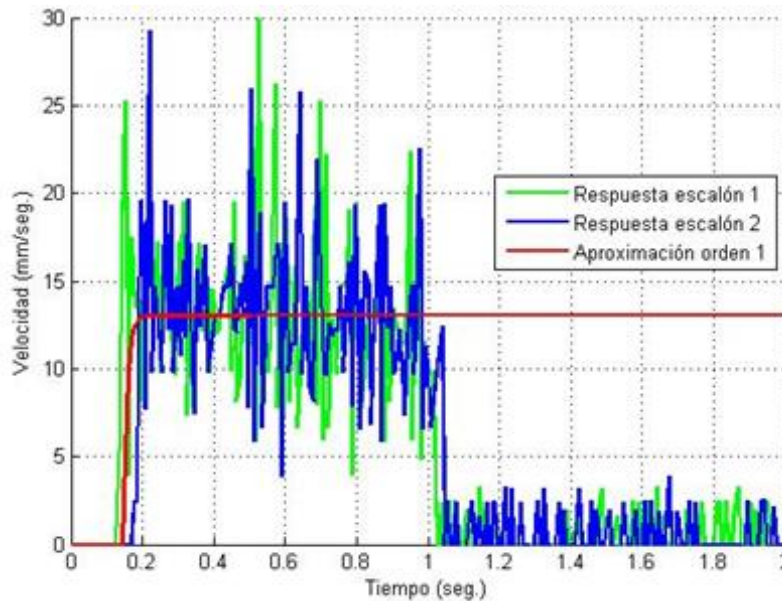


Fig. 5.12 – Respuesta en velocidad del motor2 DC ante dos entradas escalón iguales

A partir de estas gráficas velocidad/tiempo, procederemos a obtener un modelo del sistema y a validar este. Como podemos observar en la figura anterior, a partir de 1 segundo la velocidad comienza a decrecer, lo que quiere decir que el experimento está acabando, por tanto los datos a partir de aquí no serán válidos para nuestra identificación. Para sacar nuestra función de transferencia aproximamos nuestras gráficas de velocidad/tiempo a un sistema de primer orden (línea roja) del cual se pueden obtener todos los parámetros.

Un sistema de primer orden viene dado por:

$$G(s) = \frac{K}{1 + \tau s}$$

Donde sus parámetros son los siguientes:

- Una ganancia  $K$  que vendrá dada por el cociente entre la salida estacionaria (max.) y el valor del escalón introducido:

$$K = \frac{13}{1,37} = 9,5$$

- La constante de tiempo  $\tau$ , que se obtiene hallando el tiempo para el cual la salida es el 63% del valor de la salida final. El 63% de 13 es 8,19 mm/seg. Para este valor, obtenemos una constante de tiempo de 0,158 segundos, si a ese valor le restamos el

pequeño retraso que aparece de 0,148 seg. de media, obtenemos que el valor de nuestra constante de tiempo es 0.01 seg.

- Por tanto nuestra función de transferencia de primer orden en velocidad para el SMA1 será:

$$G(s) = \frac{9,5}{1 + 0,01s}$$

Tras haber obtenido este modelo, procedemos a usar simulink para validarlo, comparándolo con una respuesta real del sistema en posición ante entrada escalón. Para ello se implementará en simulink el siguiente diagrama de bloques:

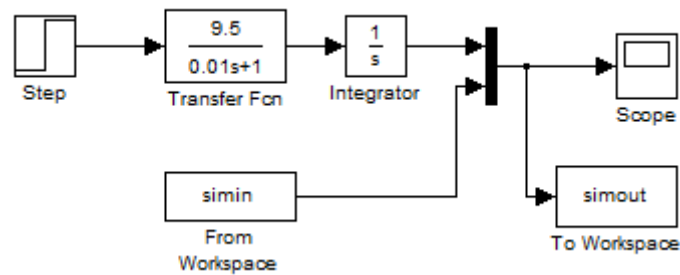


Fig. 5.13 – Esquema de simulink para validar el modelo obtenido del motor2 DC

La salida que pasamos a Matlab, para poder mostrar los datos de una manera más conveniente, es la siguiente:

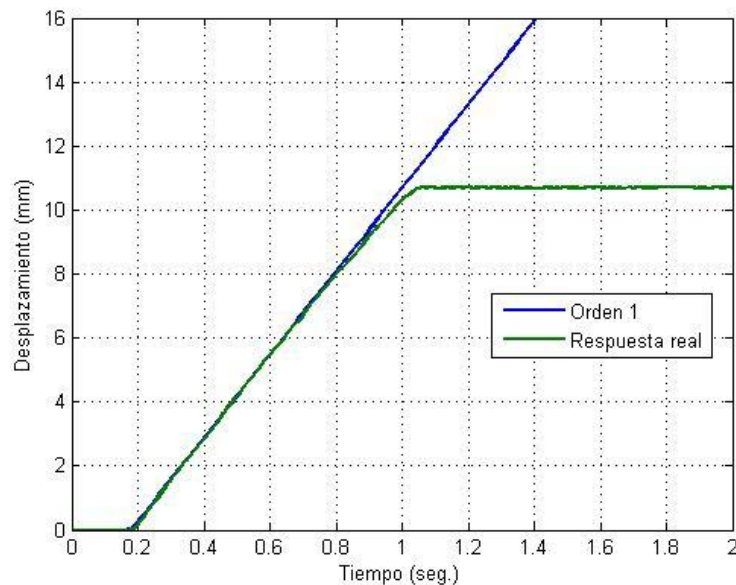


Fig. 5.14 - Comparación de la respuesta del modelo de primer orden del motor2 DC con su respuesta real

En la figura anterior se puede comprobar cómo el modelo obtenido para el motor2 DC se comporta de forma idéntica ante la respuesta real del sistema hasta los 0,9 segundos, que es el tiempo en el que comienza a disminuir la velocidad con lo que no debemos datos en cuenta. En definitiva, queda comprobada la validez del modelo obtenido.

### 5.2.4.- IDENTIFICACIÓN PARA EL SMA2

Para realizar esta identificación, se ha usado el script de Matlab escalonSMA (anexo B.4.4), que ya fue utilizado para la identificación del SMA1 (apartado 5.2.2), pero en el que se han realizado algunos cambios:

- Sustituir la salida digital PWM de arduino de la 10 a la 5 para mandar la señal al SMA2.
- Cambiar la entrada analógica de la número cero (potenciómetro multivuelta) a la número 3 (potenciómetro slider).
- Introducir la ecuación que relaciona la caída de voltaje en el potenciómetro slider con el desplazamiento lineal de nuestro carro.

Con este script escalonSMA se aplicará a nuestro segundo cable de flexinol (SMA2), un escalón de 0 a 5 V durante 4 segundos. Este escalón será aplicado dos veces para comprobar la repetitividad del SMA. Después de aplicar estos dos escalones, de igual valor, podemos ver la respuesta de ambos en la siguiente figura, que nos muestra los mm que se ha desplazado nuestro carro sobre los raíles para los dos escalones introducidos:

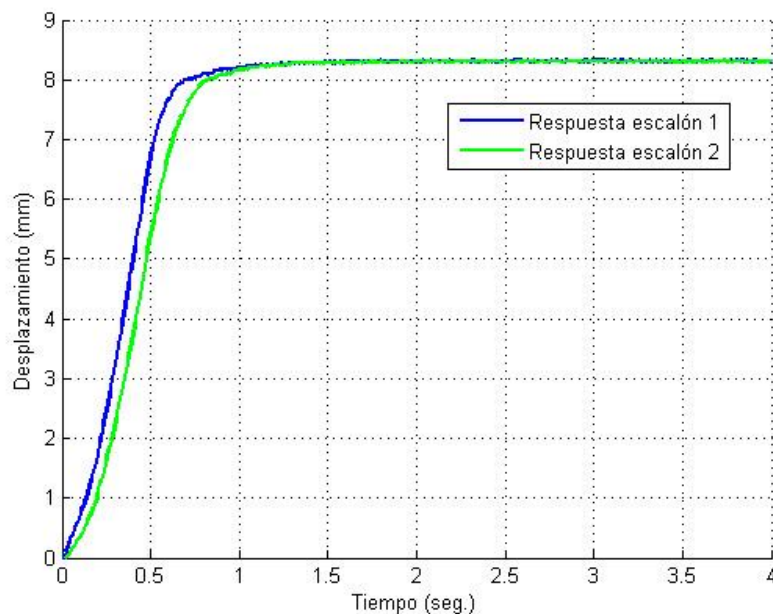


Fig. 5.15 – Respuesta del SMA2 ante dos entradas escalón iguales

Como podemos observar ante entradas iguales la respuesta suele ser muy parecida. Anteriormente a la hora de obtener la función de transferencia para el SMA1 se ha demostrado que al tener un sistema con una carga variable (muelle) no podemos aproximar este sistema a uno de primer orden, sino que debemos aproximar esta respuesta a un sistema de orden dos (apartado 5.2.2). Por tanto obtendremos la función de transferencia de segundo orden a partir de la respuesta del sistema a un escalón (figura 5.15).

Como podemos ver, no se produce sobreoscilación alguna en la respuesta, pero esta es rápida, por tanto podemos decir que estamos en un sistema subamortiguado con un factor de amortiguamiento muy próximo a 1 [74]. Un sistema de segundo orden viene dado por:

$$G(s) = \frac{K\omega_n^2}{s^2 + 2\xi\omega_n s + \omega_n^2}$$

Donde sus parámetros son los siguientes:

- Una ganancia  $K$  calculada de la misma forma que en el de primer orden, por tanto

$$K = \frac{8.3}{5} = 1,66$$

- El factor de amortiguamiento, como hemos dicho muy próximo a 1, por tanto  $\xi=0.95$ .
- $\omega_n$  es la frecuencia natural y la podemos obtener de la ecuación del tiempo de subida ( $t_r$ ), donde todos los parámetros nos son conocidos:

$$t_r = \frac{1}{\omega_n \sqrt{1 - \xi^2}} \tan^{-1} \left( \frac{\sqrt{1 - \xi^2}}{\xi} \right)$$

$t_r$  es el tiempo para el cual la señal ha subido desde el 0% al 100% para sistemas subamortiguados [OGATA]. Este tiempo es de  $t_r = 1,7 \text{ seg.}$  y puesto que  $\xi=0.95$  ya conocemos todos los valores de la ecuación y podemos obtener el valor de  $\omega_n=5,5$ .

- Por tanto nuestra función de transferencia de segundo orden para el SMA1 será:

$$G(s) = \frac{50,215}{s^2 + 10,45s + 30,25} * e^{-0.12s}$$

Con el modelo de segundo orden obtenido, al igual que se ha hecho anteriormente, se procede a validarlo en simulink, para lo cual se realiza el siguiente diagrama de bloques:

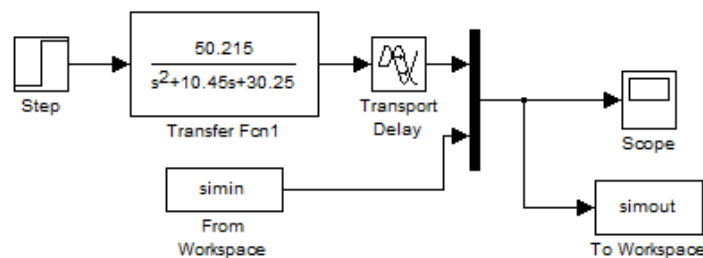


Fig. 5.16 - Esquema en simulink para la validación del modelo de segundo orden del SMA2

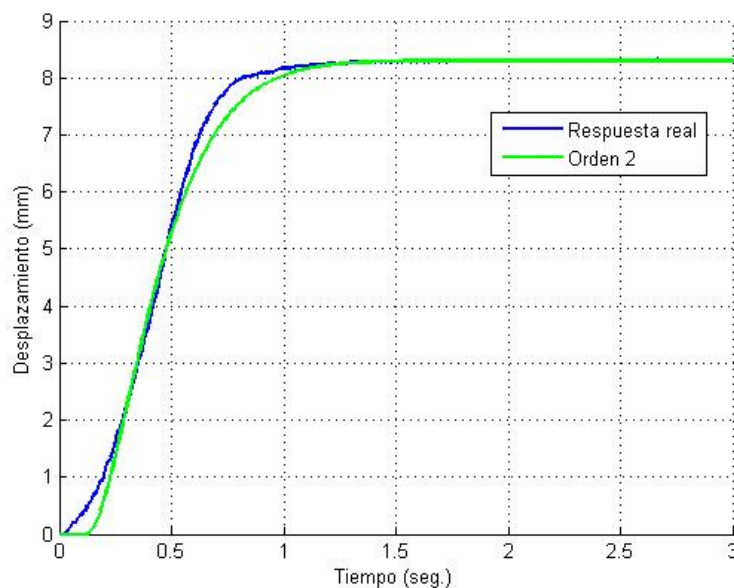


Fig. 5.17 - Comparación de la respuesta del modelo de segundo orden del SMA2 con su respuesta real

En la figura 5.17 podemos ver la comparación entre la respuesta de nuestro modelo de segundo orden y la respuesta real del sistema ante una entrada escalón. Debido a que el SMA presenta no linealidades en sus zonas iniciales y finales, para ajustar las respuestas se tuvo que dar un retraso de 0.12 segundos a la función de transferencia obtenida para que se ajustara lo máximo posible a la respuesta real. Este retardo se introduce en la función de transferencia anterior del SMA2

Como conclusión, podemos decir que se trata de un modelo totalmente válido y que se ha demostrado que la analogía con el comportamiento del motor ante un muelle (apartado 5.2.1) ha resultado satisfactoria a la hora de obtener nuestra función de transferencia.

## 5.3.- SINTONÍA Y CONTROL SIMULADO

### 5.3.1.- SINTONÍA DE PIDs POR ZIEGLER-NICHOLS

Una vez sacadas las funciones de transferencia de nuestros actuadores se procederá a sintonizar los controladores PID para cada uno de los actuadores anteriores. Los controladores PID son los más utilizados en la industria ya que dan unas prestaciones lo suficientemente buenas para la mayoría de sistemas de control. La función de transferencia de un controlador PID viene dada por:

$$\frac{U(s)}{E(s)} = K_p \left( 1 + \frac{1}{T_i s} + T_d s \right)$$

Donde se pueden diferenciar tres partes, la parte proporcional, integral y derivativa cuyos valores representan los parámetros del PID, que vienen dados por:

$$P = K_p \qquad I = K_p \frac{1}{T_i} \qquad D = K_p T_d$$

Al modificar estos parámetros se producen los siguientes efectos en algunos parámetros del sistema a controlar:

Acción de Control	Tiempo de Subida	Sobrepico	Tiempo de establecimiento	Error Estacionario
<b>Aumentar P</b>	Disminuye	Aumenta	Cambia poco	Disminuye
<b>Aumentar I</b>	Disminuye	Aumenta	Aumenta	Eliminado
<b>Aumentar D</b>	Cambia poco	Disminuye	Disminuye	Cambia poco

Tabla 5.1 – Efectos de los parámetros del PID en la dinámica del sistema.

Obtener una estimación de los parámetros de un PID para un modelo determinado es lo que se conoce como sintonizar el PID. Para realizar esa sintonía existen diferentes métodos, de los cuales nosotros nos vamos a decantar por el primer método de Ziegler-Nichols. Este método se basa en la respuesta de nuestro sistema a un escalón unitario en lazo abierto, datos que ya hemos conseguido en el apartado anterior para obtener las funciones de transferencia. Una vez se tiene la respuesta del sistema ante un escalón se traza una recta tangente a esa respuesta que pase por el punto de inflexión de la curva, tal y como podemos ver en la figura 5.18. Esta recta delimitará varios puntos (a y L), con los cuales y a través de la tabla 5.2 podremos obtener unos valores aproximados del controlador PID a implantar en nuestro sistema.



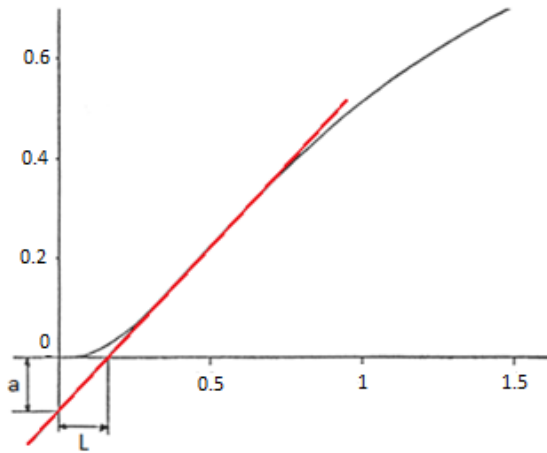


Fig. 5.18 – Ejemplo de curva para obtener los parámetros de Ziegler-Nichols

Controlador	$K_p$	$T_i$	$T_d$	$T_P$
P	$1/a$			$4L$
PI	$0.9/a$	$3L$		$5.7L$
PID	$1.2/a$	$2L$	$L/2$	$3.4L$

Tabla 5.2 - Parámetros recomendados para el PID según el primer método de Ziegler-Nichols

Una vez explicado el tipo de controlador y el método de sintonía de sus parámetros, vamos a pasar a realizar esa sintonía para cada uno de nuestros actuadores.

### 5.3.2.- SINTONÍA Y SIMULACIÓN PARA EL MOTOR1 DC

Como se ha comentado anteriormente para la sintonía del controlador PID usaremos el primer método de Ziegler-Nichols para ello cogemos las gráficas de la respuesta del motor1 DC ante un escalón de 3.92V, que hemos obtenido anteriormente (fig. 5.1), y trazamos la recta que pasa por el punto de inflexión, quedándonos:

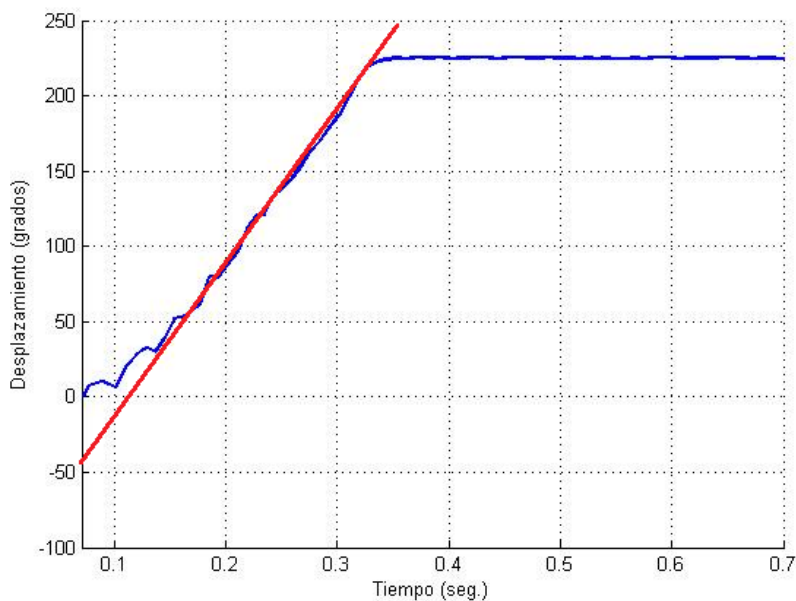


Fig. 5.19 – Recta tangente para obtener los parámetros de Ziegler-Nichols en el motor1 DC

Según Ziegler-Nichols los parámetros a y L en nuestra respuesta (figura 5.19) son: a = 45 y L = 0.06. Con estos datos obtenemos los parámetros para configurar tres controladores: un tipo P, un PI y un PID, como muestra la tabla 5.2. Hay que tener en cuenta que los valores obtenidos son para entrada escalón unitario y nosotros hemos introducido 3.92V por lo que hemos multiplicado por 3.92 los valores de los parámetros obtenidos. Los valores de nuestros controladores quedarían:

Controlador	Parámetro P	Parámetro I	Parámetro D
<b>P</b>	$P = K_P = 0.087$		
<b>PI</b>	$P = K_P = 0.0784$	$T_i = 0.18$ $I = \frac{K_P}{T_i} = 0.4356$	
<b>PID</b>	$P = K_P = 0.1045$	$T_i = 0.12$ $I = \frac{K_P}{T_i} = 0.8708$	$T_d = 0.03$ $D = K_P * T_d = 0.0031$

Tabla 5.3 – Parámetros de los controladores obtenidos para el motor1 DC.

Ahora desde Simulink podemos probar con la función de transferencia del motor1 DC, obtenida anteriormente, la respuesta del sistema para los diferentes valores de los controladores obtenidos anteriormente. Para ello, en primer lugar, creamos un bloque desde el que entrará la referencia elegida (apartado 6.1.1) a nuestro sistema. Nuestro sistema contará con un bloque PID donde introduciremos los valores de la sintonía obtenidos anteriormente, también tendremos un bloque saturación que nos servirá para limitar el voltaje que podemos mandar al motor1 DC, tras este bloque vendrá la función de transferencia del motor seguida de un integrador ya que vamos a usar los modelos del sistema obtenidos en velocidad y la referencia se da en posición, Y para finalizar se colocarán dos scope donde mostrar por un lado la referencia introducida con la respuesta simulada de mi sistema (pos) y en el otro, la señal de control (cont). El esquema en Simulink nos quedará de la siguiente manera:

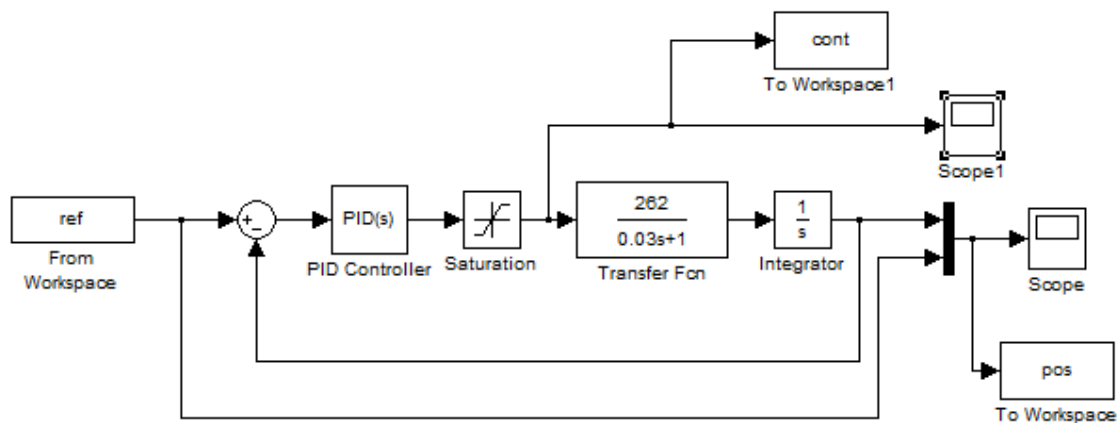


Fig. 5.20 – Esquema en simulink para el ajuste de un controlador adecuado para el motor1 DC

En este esquema tras ir probando los diferentes valores de los controladores obtenidos por Ziegler-Nichols se puede concluir que el mejor control se obtiene para el controlador proporcional de P=0.087. Realizando algunas pruebas se pudo ajustar mejor el controlador para obtener una mejor respuesta simulada del motor1 DC, quedándonos un controlador proporcional de P=0.04. Para este controlador obtenemos la siguiente respuesta con su señal de control correspondiente:

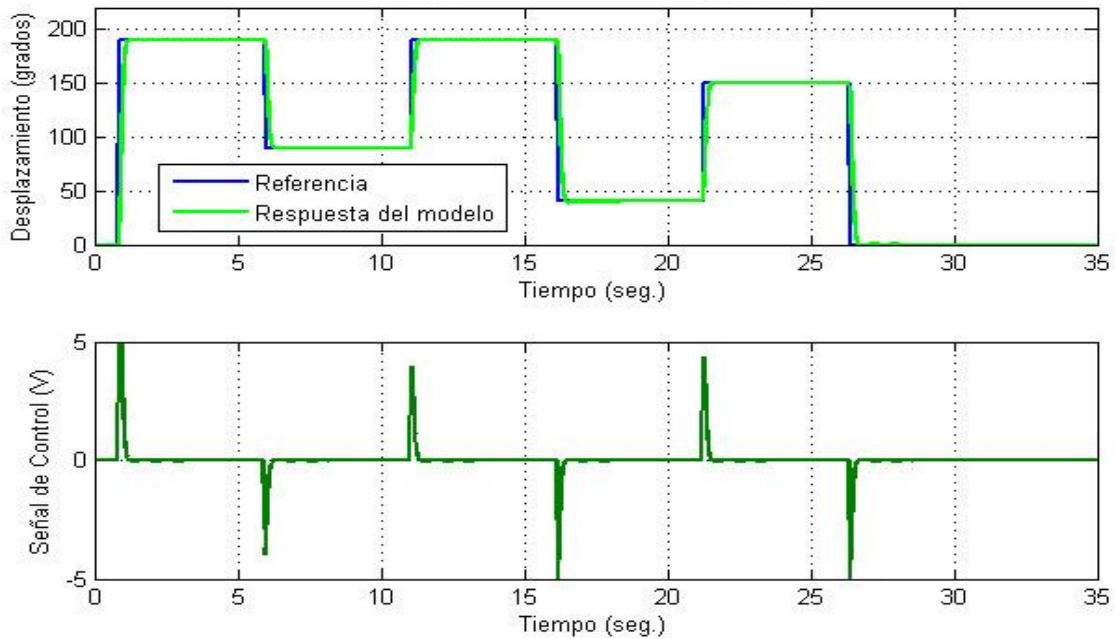


Fig. 5.21 – Respuesta Simulada para control de posición en el motor1 DC

Como vemos, en la simulación se obtienen buenos resultados con el controlador utilizado pero deberemos ajustar mejor el controlador en la práctica posteriormente (apartado 6.1.2). En la señal de control podemos ver como estoy aportando algunas veces una tensión negativa y ya hemos visto que arduino no puede aportar una tensión negativa. Esto se debe a que para que el motor gire en la dirección contraria debe existir un cambio en la polaridad de sus entradas. Este cambio de polaridad nosotros lo conseguimos con los circuitos de control del motor1 DC (apartado 4.4.3), por lo que realmente desde arduino no estamos mandando ninguna tensión negativa, sino una tensión entre 0 y 5V que cambia de polaridad al activar o desactivar el pin digital 12. Este hecho no lo podemos tener en cuenta en la simulación, por lo que para que exista un correcto funcionamiento debemos poner la señal de saturación entre +5 y -5V.

### 5.3.3.- SINTONÍA Y SIMULACIÓN PARA EL SMA1

Como se ha comentado anteriormente para la sintonía del controlador PID usaremos el primer método de Ziegler-Nichols para ello cogemos las gráficas de la respuesta del SMA1 ante un escalón de 5V, que hemos obtenido anteriormente (fig. 5.1), y trazamos la recta que pasa por el punto de inflexión (fig. 5.22)

Los ejes de la gráfica de la figura 5.22 se han ajustado para eliminar el pequeño retraso que aparecía en la respuesta, por lo que ha de tenerse en cuenta al sacar los parámetros. Según Ziegler-Nichols (tabla 5.2) los parámetros  $a$  y  $L$  en nuestra respuesta son:  $a = 50$  y  $L = 0.065$ . Con estos parámetros obtenemos los parámetros para configurar tres controladores: un tipo P, PI y un PID, como se muestran en la tabla 5.4. Hay que tener en cuenta que los valores obtenidos son para entrada de escalón unitario y nosotros hemos introducido 5V por lo que hemos multiplicado por 5 los valores de los parámetros obtenidos.

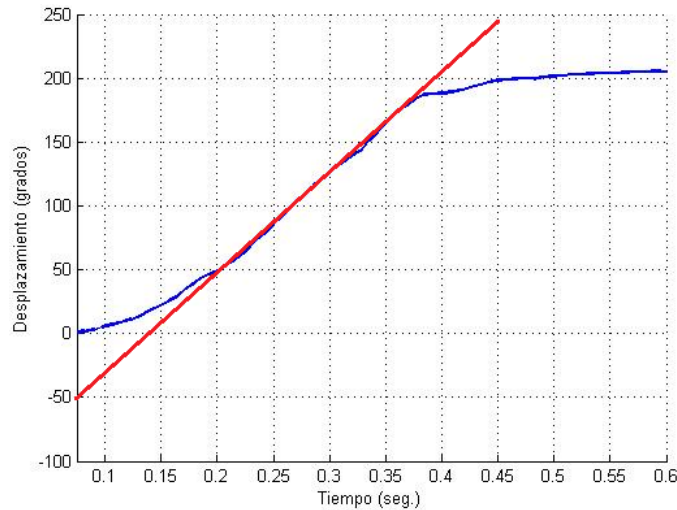


Fig. 5.22 - Recta tangente para obtener los parámetros de Ziegler-Nichols en el SMA1

Controlador	Parámetro P	Parámetro I	Parámetro D
<b>P</b>	$P = K_p = 0.1$		
<b>PI</b>	$P = K_p = 0.09$	$T_i = 0.975$ $I = \frac{K_p}{T_i} = 0.0923$	
<b>PID</b>	$P = K_p = 0.12$	$T_i = 0.65$ $I = \frac{K_p}{T_i} = 0.1846$	$T_d = 0.1625$ $D = K_p * T_d = 0.0195$

Tabla 5.4 - Parámetros de los controladores obtenidos para el SMA1.

Ahora desde Simulink podemos probar con la función de transferencia del SMA obtenida anteriormente, la respuesta del sistema para los diferentes valores de los controladores anteriores. Para ello realizamos el esquema de la figura 5.23, muy parecido al realizado para el motor1 DC pero introduciendo un retraso de 0,12 para asemejar el SMA a la respuesta real del SMA, tal y como se comentó en el apartado 5.2.2. El esquema en Simulink nos quedará:

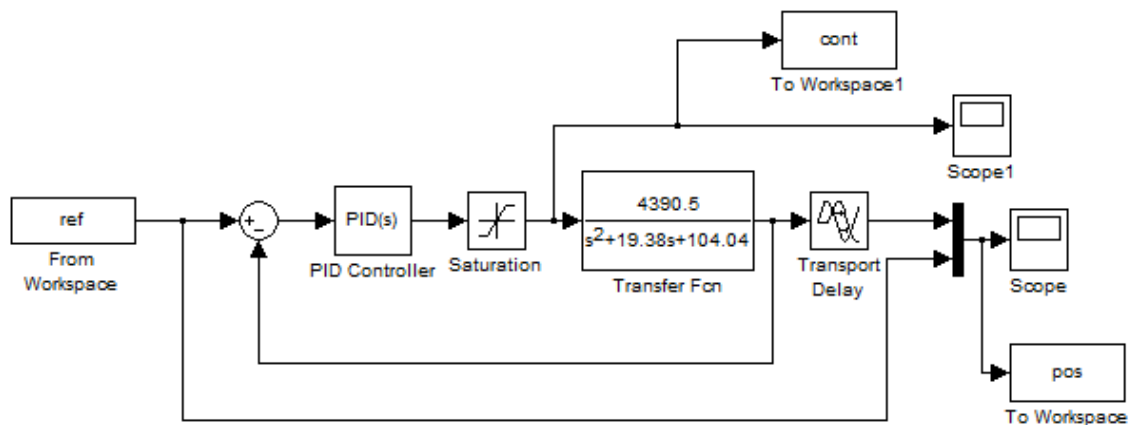


Fig. 5.23 - Esquema en simulink para el ajuste de un controlador adecuado para el SMA1

En este esquema tras ir probando los diferentes valores de los controladores obtenidos por Ziegler-Nichols se puede concluir que el mejor control se obtiene para el controlador PID de  $P=0.12$ , con  $I=0.1846$  y  $D=0.0195$ . Para este controlador obtenemos la siguiente respuesta con su respectiva señal de control:

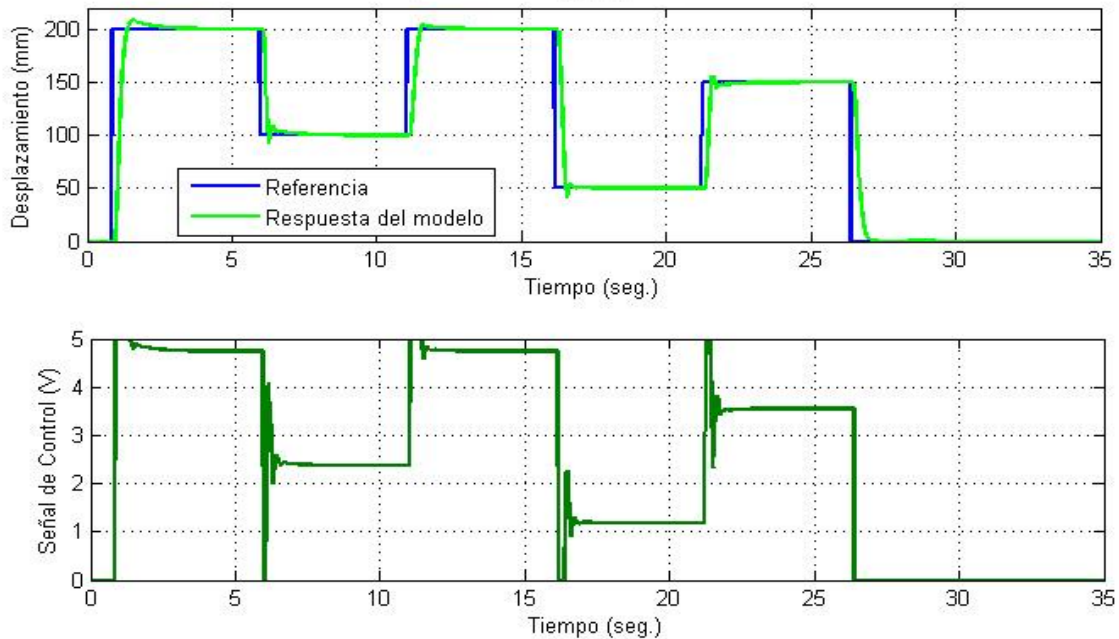


Fig. 5.24 - Respuesta Simulada para el SMA1 con los valores obtenidos por Ziegler-Nichols

Realizando algunas pruebas, con el esquema de simulink, se pueden ajustar mas los parámetros del controlador y se obtendrá que el mejor controlador para la respuesta simulada del SMA1 es un PI con  $P= 0.5$  e  $I=0.15$ , cuyas graficas de respuesta y señal de control son:

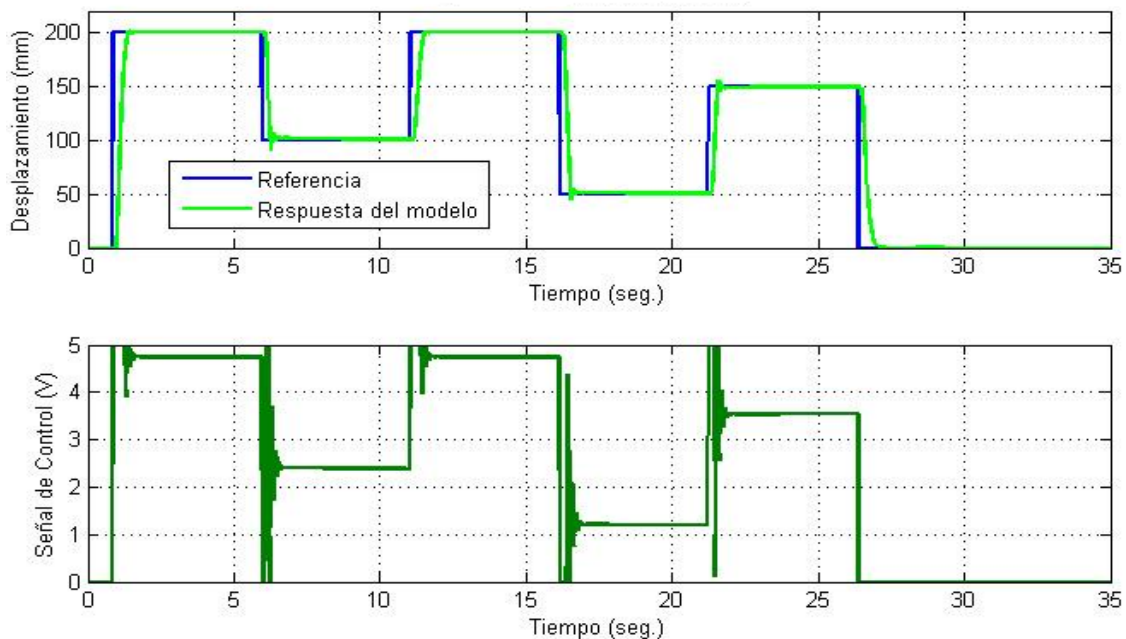


Fig. 5.25 - Respuesta Simulada para control de posición en el SMA1

Como vemos, en la simulación se obtienen buenos resultados con el controlador utilizado pero deberemos ajustar mejor el controlador posteriormente en la práctica (apartado 6.1.3).

### 5.3.4.- SINTONÍA Y SIMULACIÓN PARA EL MOTOR2 DC

El procedimiento es el mismo que el realizado anteriormente, cogemos las gráficas de la respuesta del motor2 DC ante un escalón de 1.37V, que han sido obtenidas anteriormente (fig. 5.11), y se traza la recta que pasa por el punto de inflexión, quedándonos:

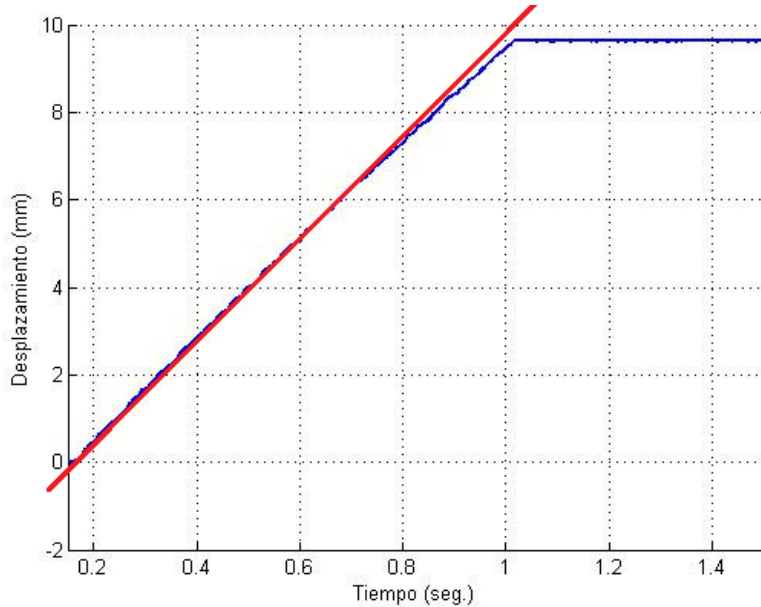


Fig. 5.26 - Recta tangente para obtener los parámetros de Ziegler-Nichols en el motor2 DC

Los ejes de la gráfica se han ajustado para eliminar el pequeño retraso que aparecía en la respuesta, por lo que ha de tenerse en cuenta al sacar los parámetros. Según Ziegler-Nichols (tabla 5.2) los parámetros  $a$  y  $L$  en nuestra respuesta son:  $a = 0.3$  y  $L = 0.02$ . Con estos datos obtenemos los parámetros para configurar tres controladores: un tipo P, un PI y un PID, como muestra la tabla 5.5. Hay que tener en cuenta que los valores obtenidos son para entrada de escalón unitario y nosotros hemos introducido 1.37V por lo que hemos multiplicado por 1.37 los valores de los parámetros obtenidos. Los valores de nuestros controladores quedarían:

Controlador	Parámetro P	Parámetro I	Parámetro D
<b>P</b>	$P = K_p = 4.57$		
<b>PI</b>	$P = K_p = 4.11$	$T_i = 0.0822$ $I = \frac{K_p}{T_i} = 50$	
<b>PID</b>	$P = K_p = 5.48$	$T_i = 0.0548$ $I = \frac{K_p}{T_i} = 100$	$T_d = 0.0137$ $D = K_p * T_d = 0.0751$

Tabla 5.5 - Parámetros de los controladores obtenidos para el motor2 DC.

Ahora desde Simulink podemos probar con la función de transferencia del motor2 DC, obtenida anteriormente, la respuesta del sistema para los diferentes valores de los controladores anteriores. Para ello realizamos el diagrama de bloques de la siguiente figura, muy parecido a los realizados anteriormente:

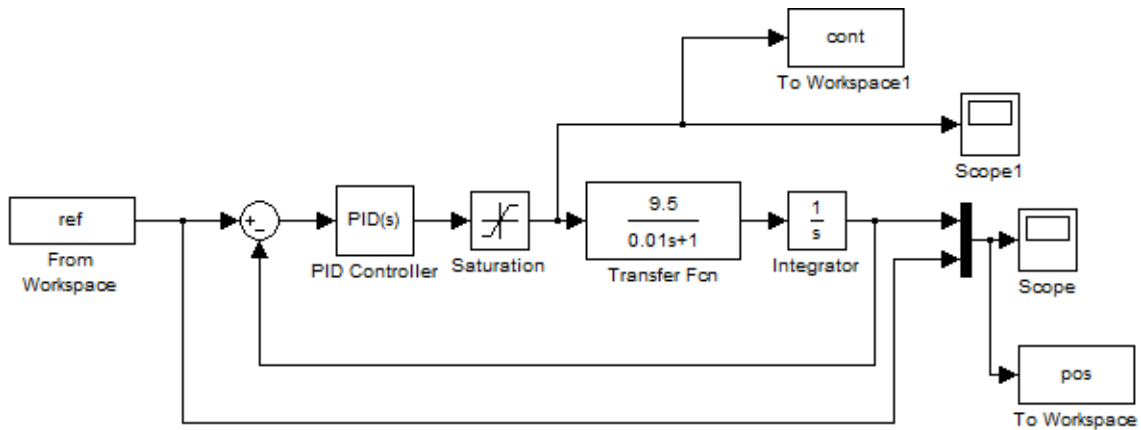


Fig. 5.27 – Diagrama de bloques en simulink para el ajuste de un controlador adecuado para el motor2 DC

En este esquema tras ir probando los diferentes valores de los controladores obtenidos por Ziegler-Nichols se puede concluir que el mejor control se obtiene para el controlador proporcional de  $P=6.85$ . Realizando algunas pruebas se pudo ajustar mejor el controlador para la respuesta simulada del motor1 DC, quedándonos un controlador proporcional de  $P=3.5$ . Para este controlador obtenemos la siguiente respuesta con su respectiva señal de control:

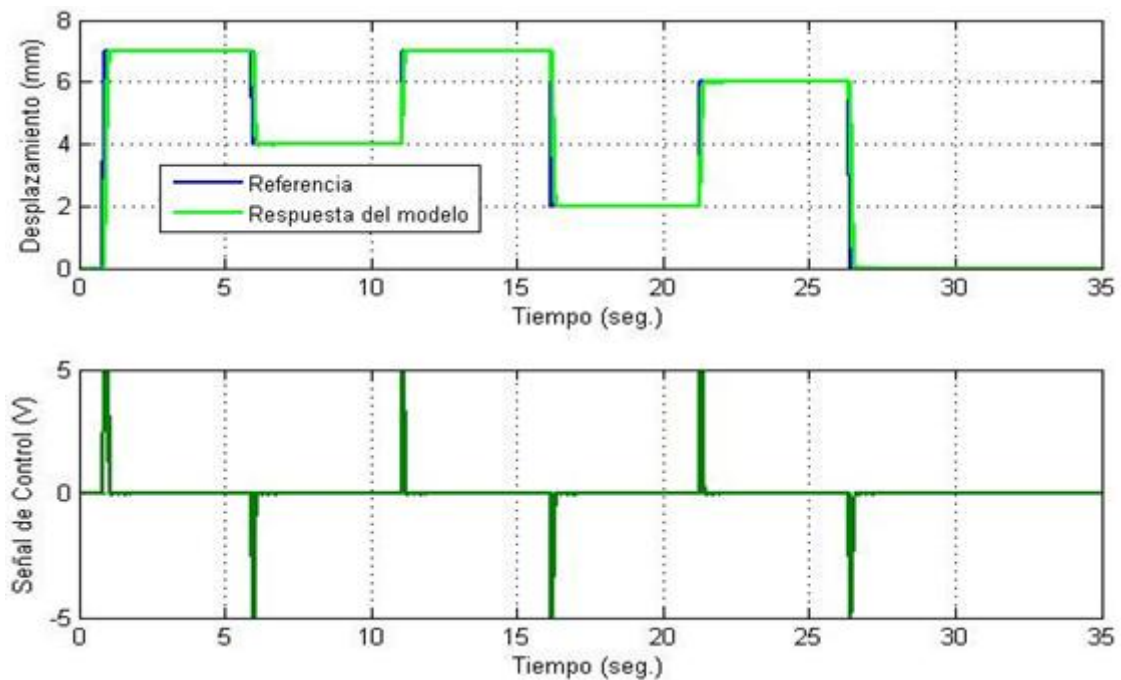


Fig. 5.28 - Respuesta Simulada para control de posición en el motor2 DC

Como vemos, en la simulación se obtienen muy buenos resultados con el controlador utilizado pero se deberá ajustar mejor el controlador en la práctica posteriormente (apartado 6.1.4). En la señal de control podemos ver como estoy aportando algunas veces una tensión negativa pero arduino no puede aportarla, este fenómeno ha sido explicado anteriormente en la sintonía y simulación para el motor1 DC (apartado 5.3.2).

### 5.3.5.- SINTONÍA Y SIMULACIÓN PARA EL SMA2

El procedimiento es el mismo que el realizado anteriormente, cogemos las gráficas de la respuesta del SMA2 ante un escalón de 5V, que han sido obtenidas anteriormente (fig. 5.15), y se traza la recta que pasa por el punto de inflexión, quedándonos:

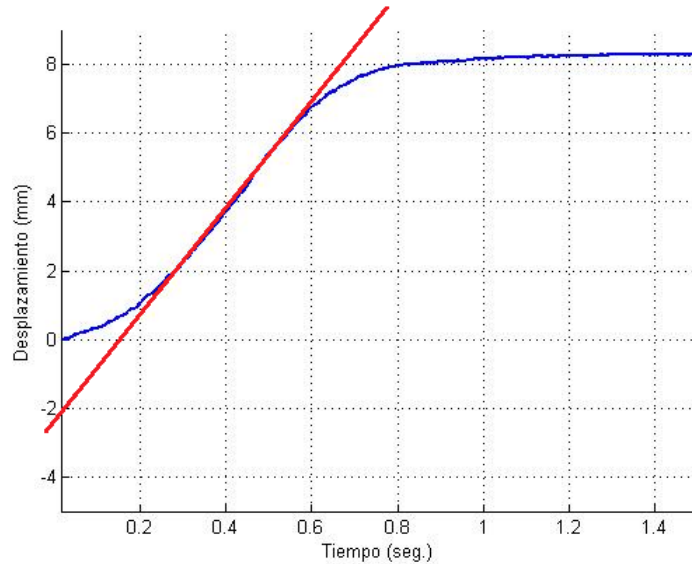


Fig. 5.29 - Recta tangente para obtener los parámetros de Ziegler-Nichols en el SMA2

Los ejes de la gráfica se han ajustado para eliminar el pequeño retraso que aparecía en la respuesta, por lo que ha de tenerse en cuenta al sacar los parámetros. Según Ziegler-Nichols (tabla 5.2) los parámetros  $a$  y  $L$  en nuestra respuesta son:  $a = 2$  y  $L = 0.14$ . Con estos parámetros obtenemos los parámetros para configurar tres controladores: un tipo P, PI y un PID, que se muestran en la tabla 5.6. Hay que tener en cuenta que los valores obtenidos son para entrada de escalón unitario y nosotros hemos introducido 5V por lo que hemos multiplicado por 5 los valores de los parámetros obtenidos. Los valores de nuestros controladores nos quedan:

Controlador	Parámetro P	Parámetro I	Parámetro D
<b>P</b>	$P = K_P = 2.5$		
<b>PI</b>	$P = K_P = 2.25$	$T_i = 2.1$ $I = \frac{K_P}{T_i} = 1.0714$	
<b>PID</b>	$P = K_P = 3$	$T_i = 1.4$ $I = \frac{K_P}{T_i} = 2.1429$	$T_d = 0.35$ $D = K_P * T_d = 1,05$

Tabla 5.6 - Parámetros de los controladores obtenidos para el SMA2

Ahora desde Simulink podemos probar con la función de transferencia del SMA2 obtenida anteriormente, la respuesta del sistema para los diferentes valores de los controladores anteriores. Para ello realizamos el esquema de la figura 5.30, muy parecido al realizado para los motores pero introduciendo un retraso de 0,12 para asemejar el SMA a su respuesta real, tal y como se comentó en el apartado 5.2.2. El diagrama de bloques en Simulink nos quedará:



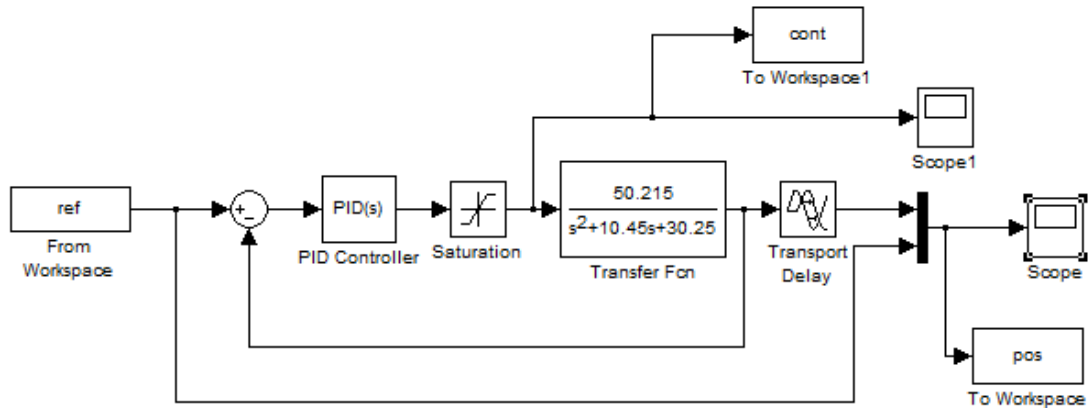


Fig. 5.30 - Diagrama de bloques en simulink para el ajuste de un controlador adecuado para el SMA2

En este esquema tras ir probando los diferentes valores de los controladores obtenidos por Ziegler-Nichols se puede concluir que el mejor control se obtiene para el controlador PID de  $P=3$ , con  $I=2.1429$  y  $D=1.05$ . Para este controlador en la siguiente figura podemos ver la respuesta del sistema y su señal de control:

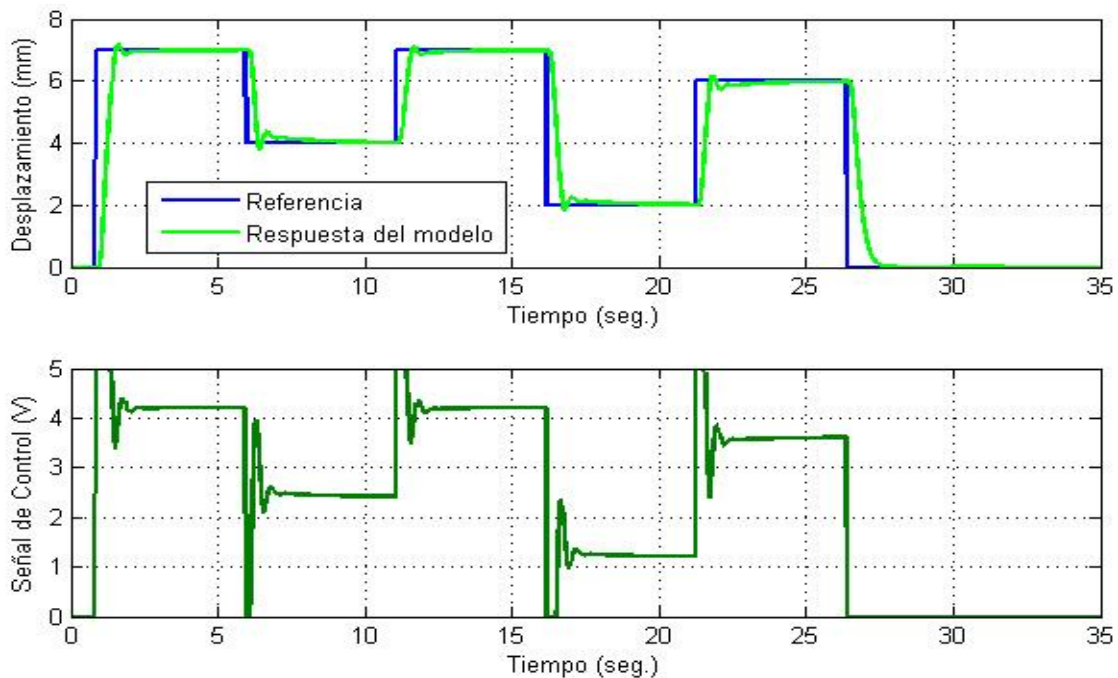


Fig. 5.31 - Respuesta Simulada para el SMA2 con los valores obtenidos por Ziegler-Nichols

Realizando algunas pruebas podemos ajustar el controlador realizando pruebas con el modelo del sistema en Simulink (FIGURA) y nos quedaremos con que el mejor controlador para la respuesta simulada del SMA1 es un PI con  $P=14$  e  $I=2.2$ . Para este controlador obtenemos la siguiente respuesta y la siguiente señal de control:

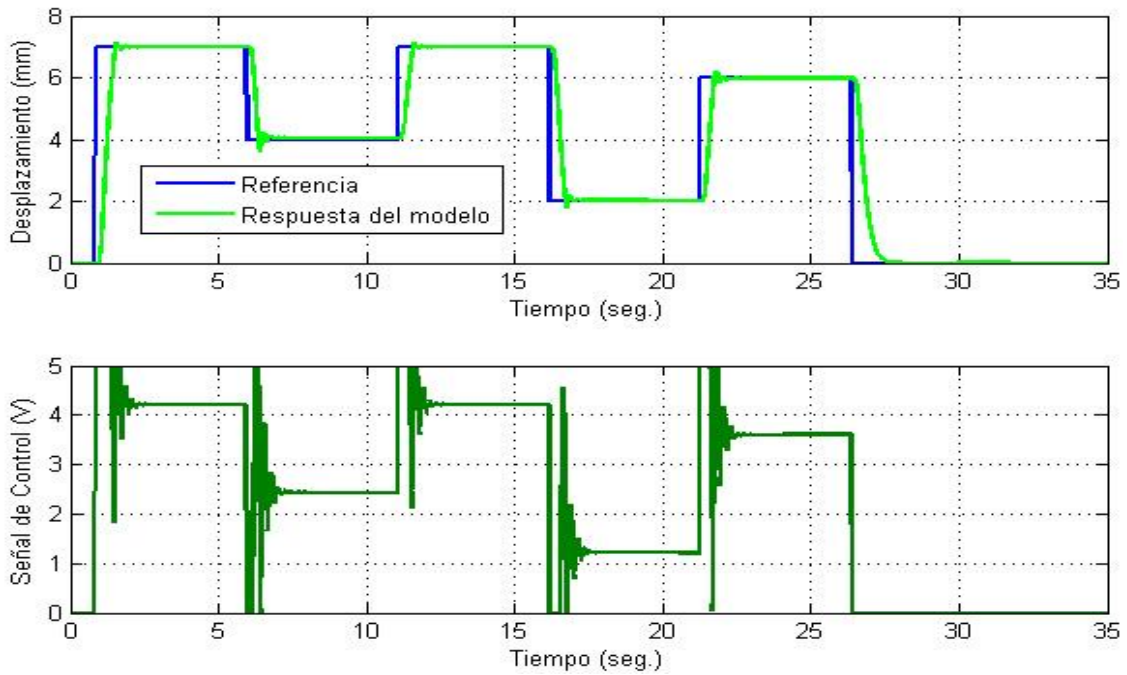


Fig. 5.32 - Respuesta Simulada para control de posición en el SMA2

Como vemos, en la simulación se obtienen buenos resultados con el controlador utilizado pero se debe ajustar mejor el controlador posteriormente en la práctica (apartado 6.1.5).



## Capítulo 6: CONTROL DE LA PLATAFORMA DE EXPERIMENTACIÓN

---

Ajuste de los controladores reales para los diferentes experimentos de control realizados.



## 6.1.- CONTROL DE POSICIÓN

### 6.1.1.- ELECCIÓN DE REFERENCIAS

Una parte muy importante antes de comenzar a realizar pruebas reales es definir muy bien los rangos de funcionamiento en los que vamos a poder movernos sin poner en peligro la integridad de cualquier actuador o parte de nuestra plataforma. Debido a que el rango de movimientos de los cables SMA es más bajo que el de los motores, ellos van a regir la región de funcionamiento válida en la que podremos trabajar sin problema. Obviamente esta región de trabajo será diferente tanto para el montaje de desplazamiento angular como para el de desplazamiento lineal. Por tanto:

a) Para el Conjunto de desplazamiento angular:

En este sistema, según las pruebas realizadas el SMA puede llegar a realizar en nuestro potenciómetro hasta un giro de unos 220 grados. Debido a que los SMA en sus zonas iniciales y finales de funcionamiento presentan no linealidades, deberíamos evitar estas zonas, por lo tanto un rango válido para trabajar estaría comprendido entre 30 y 200 grados. Una vez establecido este rango se deben elegir unas referencias a seguir por cada uno de los actuadores con el fin de movernos por todo el rango de trabajo y poder realizar una comparativa entre actuadores con las mismas señales de referencia. Así para el movimiento angular se establecen como referencia las siguientes señales de entrada:

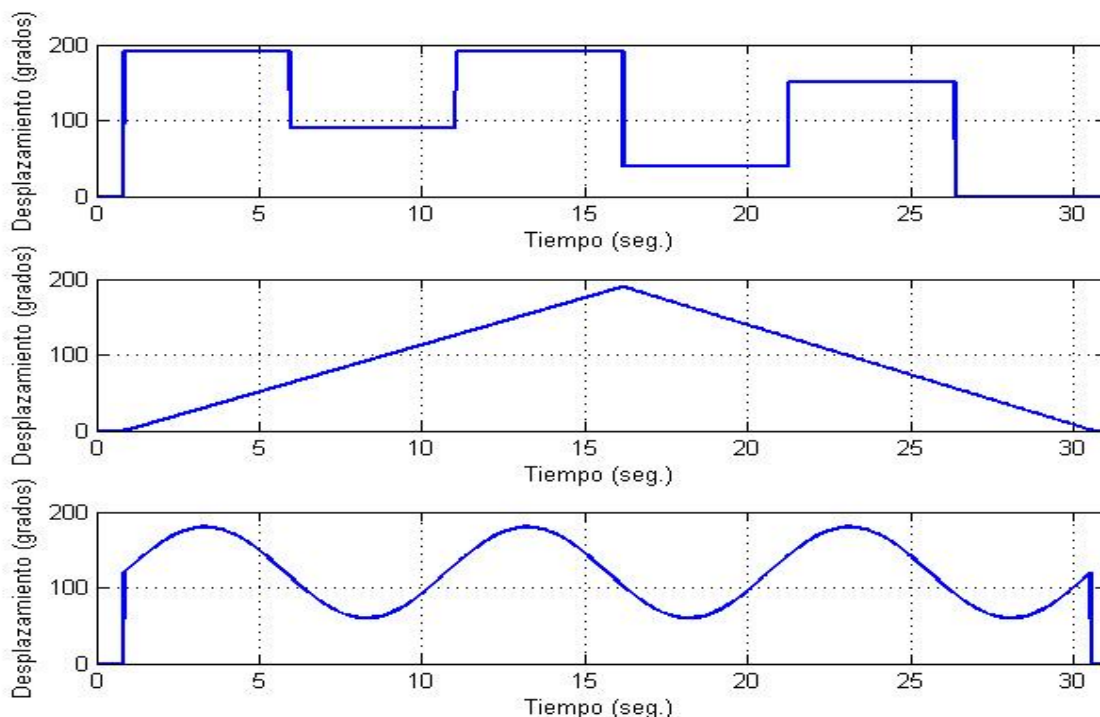


Fig. 6.1 – Señales de entrada (referencias) para el movimiento angular

La primera referencia son unas entradas escalón entre 190 grados como escalón máximo y 40 grados como escalón mínimo, a la que nos referiremos en el presente proyecto como referencia de escalones. La segunda dos entradas en rampa, una primera etapa ascendente y la otra descendente, que responden a las siguientes ecuaciones:

$$y = \frac{190}{1800} * x \quad y = -\frac{190}{1700} * x + 391.17647$$

Nos referiremos a esta señal, en lo sucesivo como referencia de rampas.

La tercera señal de referencia es una senoidal de 0,1 Hz de frecuencia, centrada en 120 grados y con una amplitud de 60 grados. A esta señal, nos referiremos en el presente proyecto como referencia senoidal y su ecuación es la siguiente:

$$y = 60 * \sin(\theta) + 120$$

b) Para el Conjunto de desplazamiento lineal:

De forma análoga, para el desplazamiento lineal también tendremos las tres referencias anteriores pero adaptadas a nuestro desplazamiento, que ahora cambia. En este sistema, según las pruebas realizadas el SMA puede llegar a realizar en nuestro potenciómetro slider hasta un movimiento de unos 9 mm. Debido a que los SMA en sus zonas iniciales y finales de funcionamiento presentan no linealidades un rango válido para trabajar estaría comprendido entre 1 y 8 mm. Así para el movimiento lineal se establecen como referencia las siguientes señales de entrada:

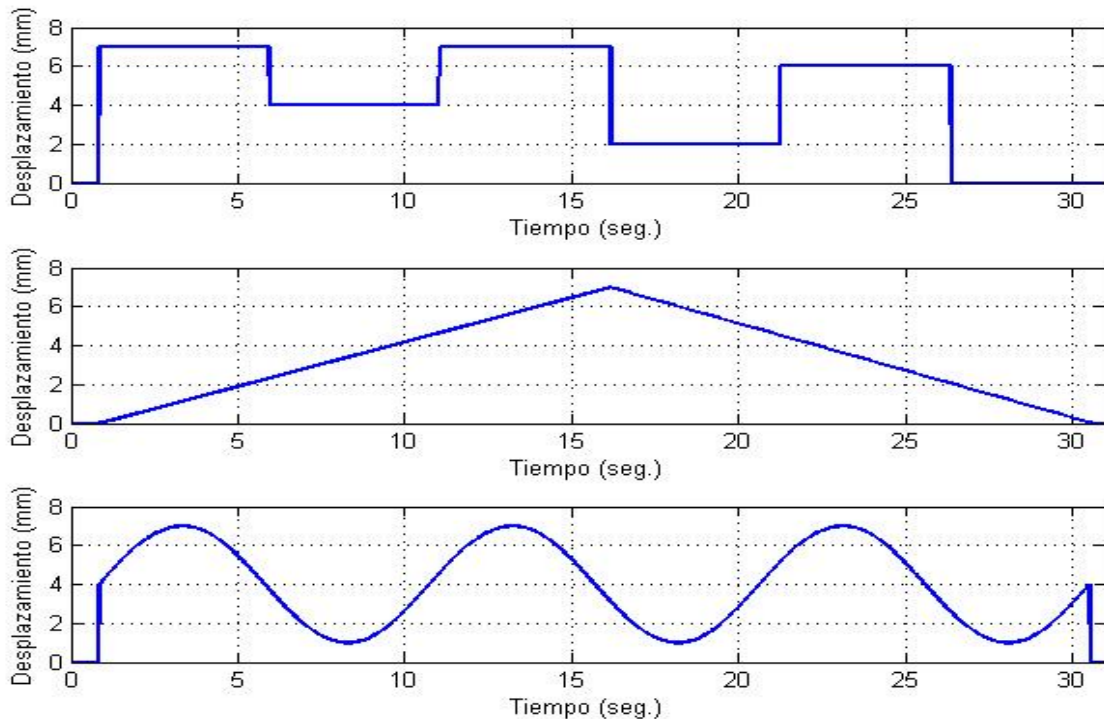


Fig. 6.2 - Señales de entrada (referencias) para el movimiento lineal

La primera referencia son unas entradas escalón entre 7 mm como escalón máximo y 2 mm como escaló mínimo. La segunda, dos entradas en rampa, una primera etapa ascendente y la otra descendente, que responden a las siguientes ecuaciones:

$$y = \frac{7}{1800} * x \quad y = -\frac{7}{1700} * x + 14.41176$$

La tercera señal de referencia es una senoidal de 0,1 Hz de frecuencia, centrada en 4 mm y con una amplitud de 3 mm, cuya ecuación es:

$$y = 3 * \sin(\theta) + 4$$

Puesto que las referencias son iguales para uno y otro sistema y solo cambian sus valores, nos referiremos a ellas de igual manera. Todas estas señales de referencia están implementadas en los script de Matlab PIDSMA y PIDMotor (anexo B.4).

### 6.1.2.- CONTROL DEL MOTOR1 DC

En el capítulo anterior se sintonizaron unos PID para realizar un control de posición óptimo, con las funciones de transferencia obtenidas, utilizando simulink. En este capítulo se va a realizar el ajuste a mano de esos parámetros de los PID anteriormente sintonizados para ajustarlos al comportamiento real de nuestros actuadores.

La implementación de un PID en el motor1 DC, se ha llevado a cabo con la programación de un script de Matlab denominado PIDMotor (anexo B.4.5). Se debe tener en cuenta que el motor tiene atornillado un eje de aluminio y el extremo de este va unido a una rueda dentada grande, que a su vez va unida a un muelle, y que además engrana con otra rueda dentada más pequeña unida a un potenciómetro. Debido a todas estas cargas, al motor1 DC le cuesta más arrancar por tanto para que se mueva en la dirección contraria al muelle (sentido contrario agujas del reloj) se necesitan aplicar 2,95 V y para su movimiento a favor del muelle (sentido agujas del reloj) se deben aplicar desde arduino 2,35 V. Esto hace que tengamos una gran zona muerta en la que el motor en un amplio rango de la señal de entrada no se movería. Esta dificultad a la hora de realizar el control hace que se propongan varias alternativas para realizar el control:

- Realizar un control con la señal de control saturada entre 2,05 V (a favor del muelle) y 2,65 V (en contra), sumando a la señal de control los valores mínimos para que el motor se mueva en ambos sentidos y así eliminar la zona muerta. Con estas condiciones y empezando con el valor del controlador ajustado para el control de posición simulado (apartado 5.3.2), se ha ajustado un controlador tipo P, con  $P=0.015$ , cuya respuesta es la siguiente:

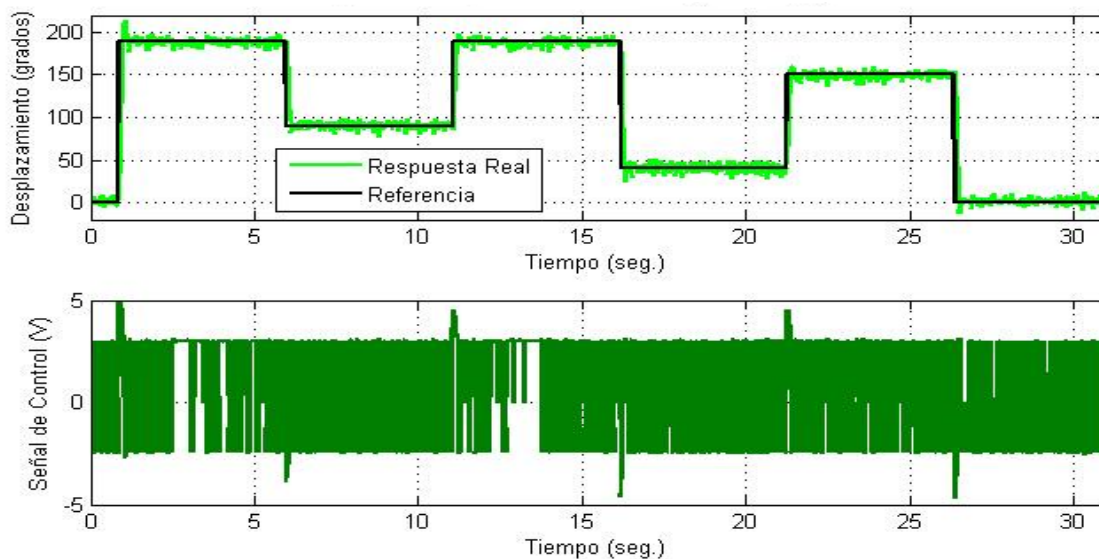


Fig. 6.3 – Control de posición del motor1 DC sin zona muerta

Con un controlador tipo P el motor se queda siempre moviéndose alrededor de la referencia y prácticamente se realiza un control todo-nada como puede verse en



la señal de control por lo que, debido a estos factores se ha decidido no usar este control en nuestro motor1 DC.

- b) Realizar un control sin tener en cuenta la zona muerta, saturando la señal de control entre 0 y 5 V que son los valores que puede aportar Arduino. Para esto el mejor controlador ajustado fue un PD, con valores  $P=0,2$  y  $D=0,15$ , cuya respuesta ante la referencia de escalones (apartado 6.1.1.a) es la siguiente:

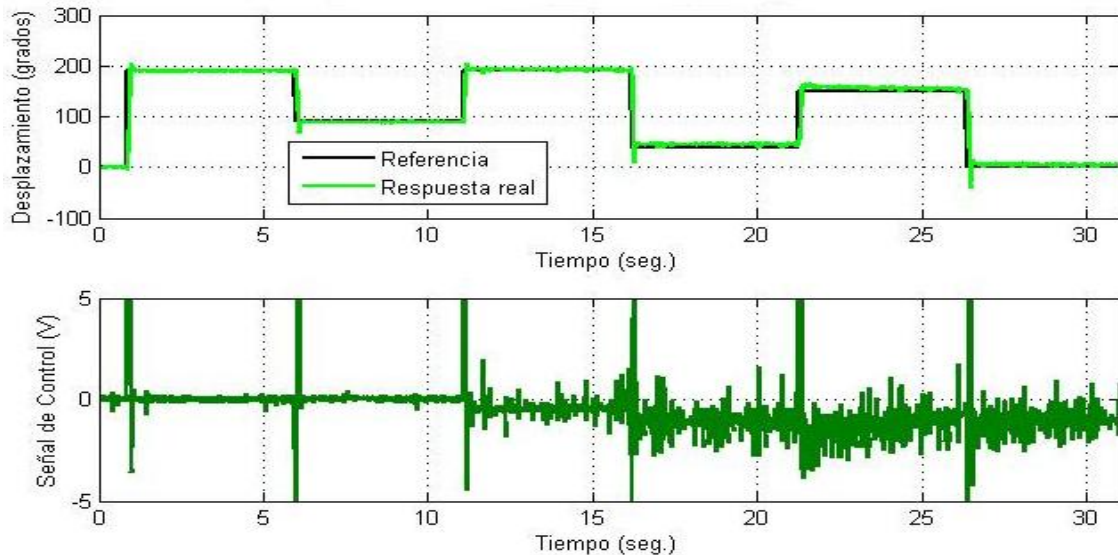


Fig. 6.4 – Control de posición del motor1 DC con zona muerta ante referencia de escalones

Como podemos ver, a priori el control es bueno y aunque existen pequeños errores estacionarios, podemos aceptar este controlador. El problema viene cuando la señal de error tiene un pequeño valor, por tanto la señal de control será pequeña y no llegará a mover el motor, por lo que para los escalones de referencia, donde el error en cada salto se puede considerar elevado, nos ofrece una buena respuesta, sin embargo si introducimos nuestra referencia de rampas (apartado 6.1.1.a), tendríamos:

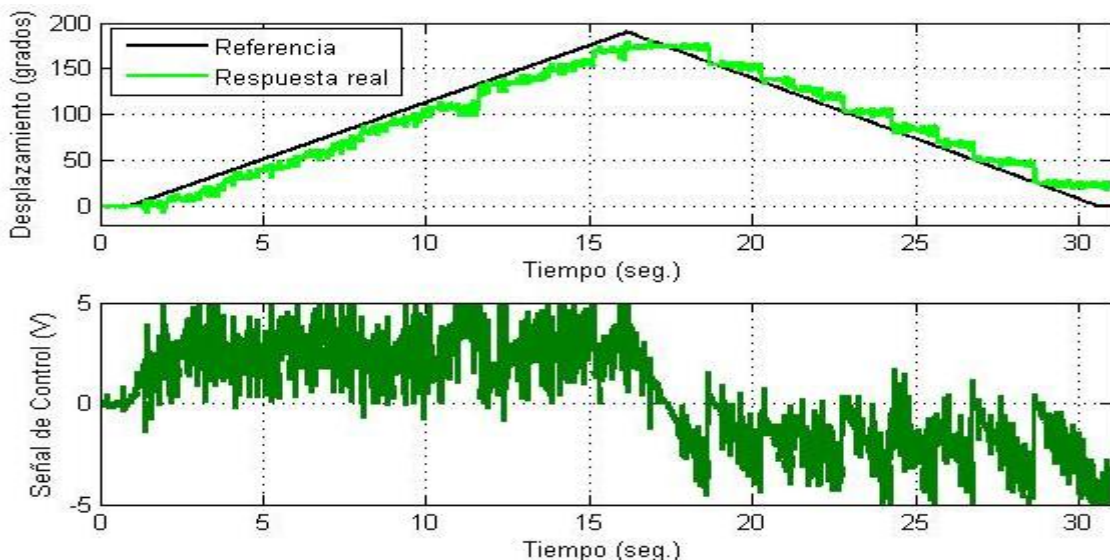


Fig. 6.5 - Control de posición del motor1 DC con zona muerta ante referencia de rampas

Como se puede observar ahora contamos con un error estacionario grande y el motor tiene una respuesta algo lenta debido a que para tensiones bajas no realiza giro

alguno. Debido a esto se intento mejorar el control realizando una mezcla entre el control a y el b.

- c) Tras varias pruebas se decidió utilizar un control en el que la señal de control este saturada entre 2,65 V (a favor del muelle) y 3,24 V (en contra) y sumando a la señal de control unos valores mínimos (2.35 y 1.76 V respectivamente) para que el motor no esté tan lejos de empezar a moverse en ambos sentidos y así poder minimizar el efecto de la denominada zona muerta. Con estas condiciones el mejor controlador ajustado fue un PD, de valores  $P=0.08$  y  $D=0.1$ , con el que se obtuvo la siguiente respuesta para la referencia de escalones:

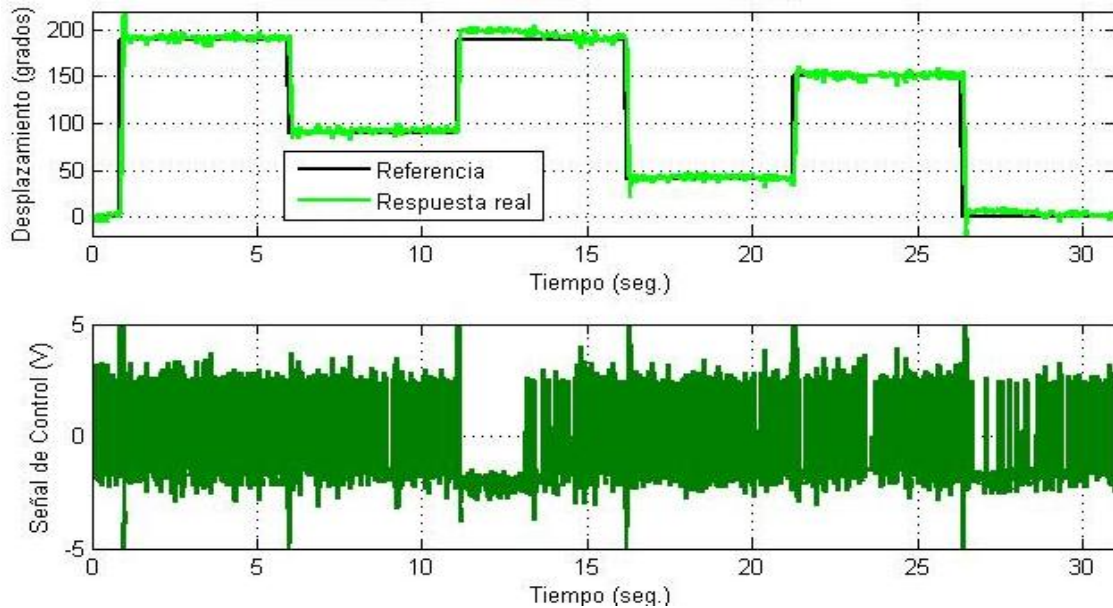


Fig. 6.6 – Control de posición del motor1 DC con reducción de la zona muerta ante referencia de escalones

Como se puede ver la repuesta es una mezcla de las anteriores, con la diferencia de que se han reducido los errores anteriores, como el constante movimiento del motor alrededor de la referencia, el realizar un control todo o nada y el error de posición. Para referencia de rampas, con controlador ajustado, tendríamos:

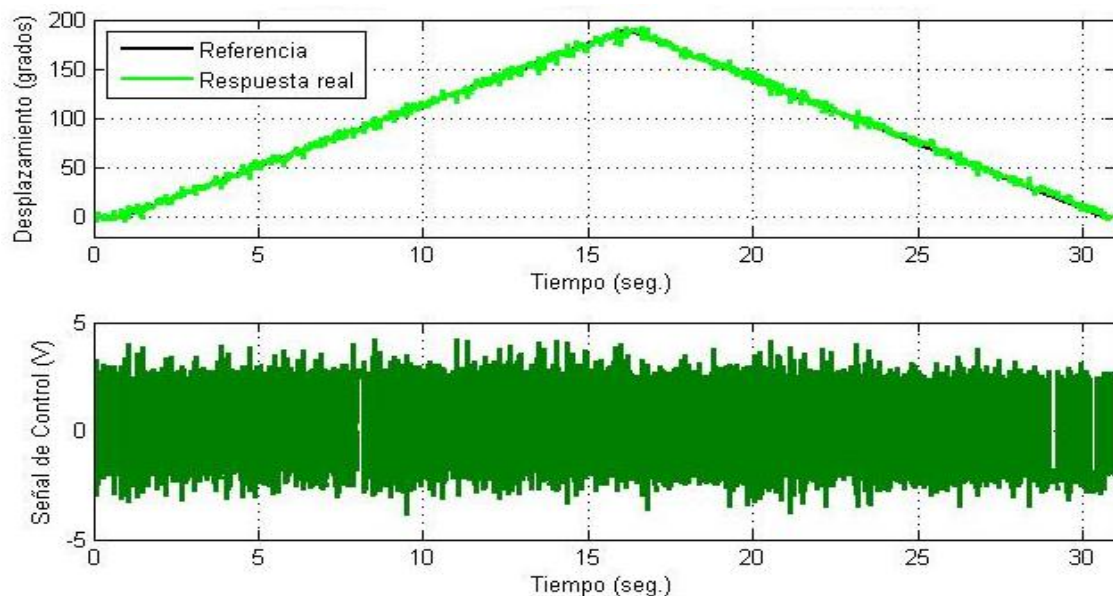


Fig. 6.7 - Control de posición del motor1 DC con reducción de la zona muerta ante referencia de rampas

Y para nuestra referencia senoidal (apartado 6.1.1.a) de frecuencia 0,1 HZ, obtendríamos:

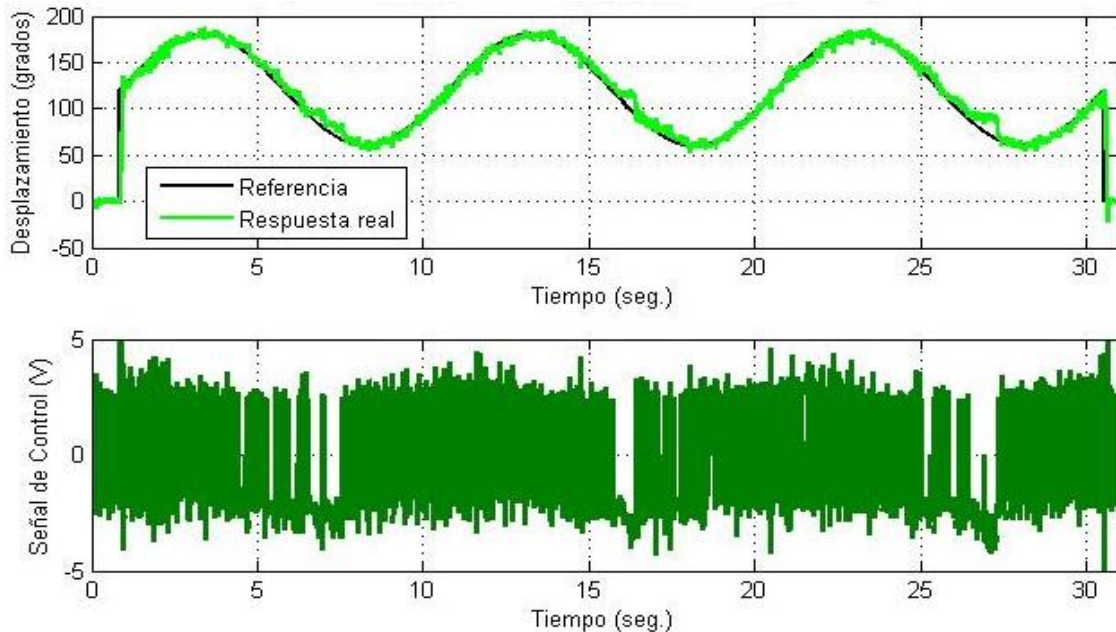


Fig. 6.8 - Control de posición del motor1 DC con reducción de la zona muerta ante entrada senoidal

Como puede verse, con este último controlador, reduciendo la zona muerta, logramos un buen seguimiento de la señal de entrada para los tres tipos de referencias elegidas, por tanto este será el controlador elegido para nuestro motor1 DC.

### 6.1.3.- CONTROL DEL SMA1

La implementación de un controlador en el primer cable SMA, se ha llevado a cabo con la programación de un script de Matlab denominado PIDSMA (anexo B.4.6). En el caso del cable SMA no tenemos, como ocurría con el motor, esa gran zona muerta por lo que el control resulta bastante más sencillo.

A la hora de sintonizar el controlador real, se comenzó por probar el PI sintonizado anteriormente por Ziegler-Nichols y ajustado en simulación. Realizando algunas pruebas se llegó a una respuesta buena para un controlador PI, cuyos parámetros ajustados son  $P=0,3$  e  $I=0,00034$ , con el que se obtuvo la respuesta de la figura 6.9 para la referencia de los escalones de entrada.

Como podemos observar en la figura 6.9 la respuesta es bastante buena y aunque a veces quede un pequeño error estacionario, casi siempre se suele dar cuando el SMA está en su fase de enfriamiento. Esto puede darse porque lo que realmente se ha modelado en el cable SMA es su respuesta al calentamiento que, debido a la histéresis (apartado 2.4.2), difiere un poco del comportamiento que presenta al enfriarse. Aun teniendo este pequeño inconveniente obtenemos con un controlador PI un control muy bueno, tal y como nos decía la simulación (apartado 5.3.3).

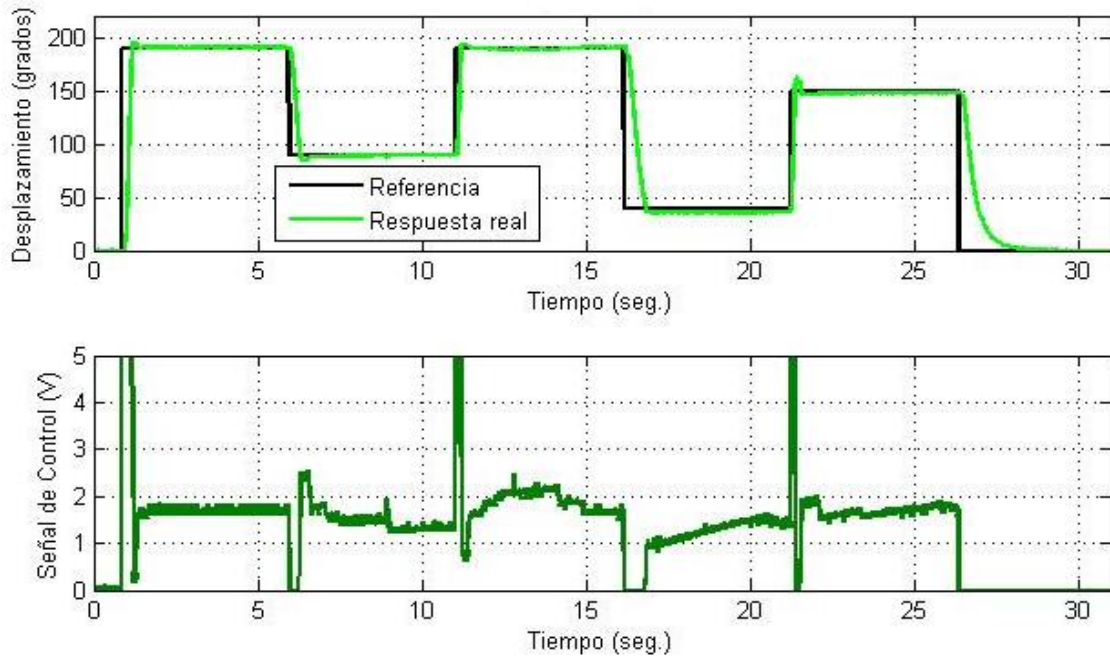


Fig. 6.9 - Control de posición del SMA1 ante referencia de escalones

Con el controlador PI, ajustado anteriormente, para nuestra señal de referencia de rampas tendríamos:

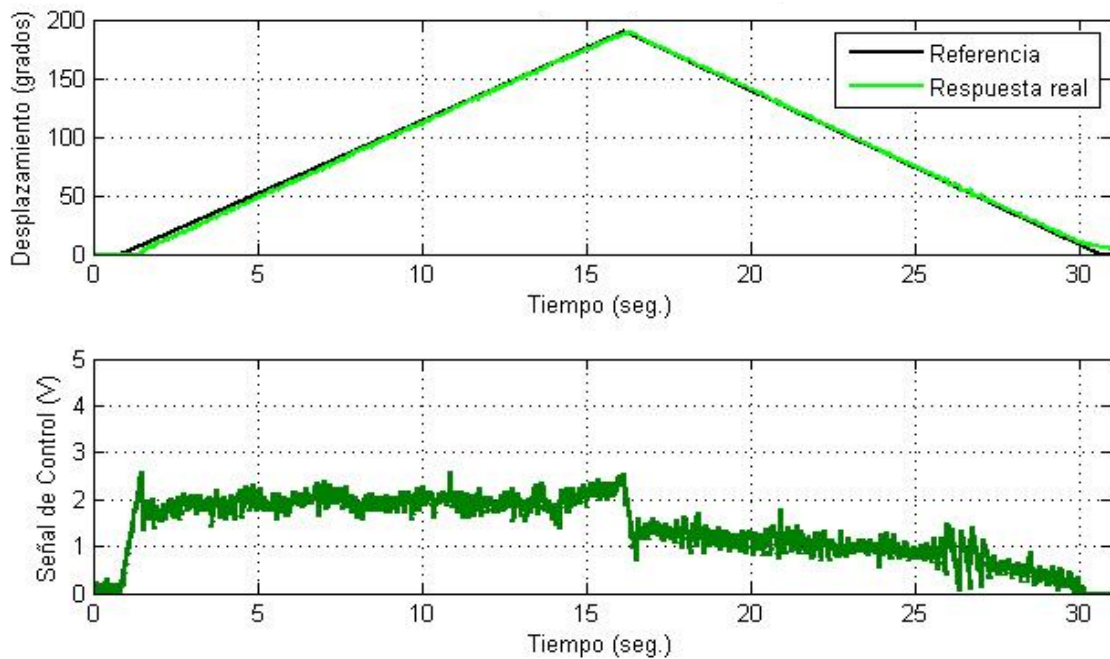


Fig. 6.10 - Control de posición del SMA1 ante entradas tipo rampa

Y para nuestra referencia senoidal de 0,1 Hz tendríamos:

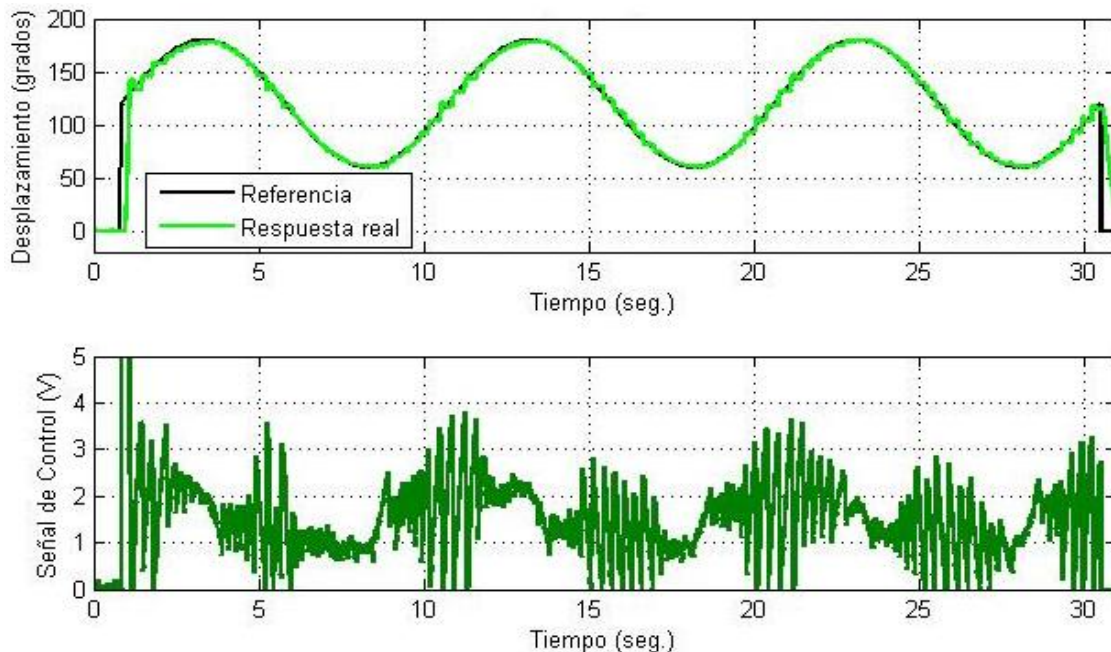


Fig. 6.11 - Control de posición del SMA1 ante referencia senoidal

Como se puede ver, con este controlador PI, logramos un buen seguimiento de la señal de entrada para los tres tipos de referencias elegidas.

#### 6.1.4.- CONTROL DEL MOTOR2 DC

La implementación de un PID en el motor2 DC, se ha llevado a cabo con el script de Matlab denominado PIDMotor (anexo B.4.5), mismo script que fue utilizado para el motor1 DC, con las modificaciones propuestas (apartado 5.3.4) para trabajar con el sistema de desplazamiento lineal.

Se debe tener en cuenta que el motor2 DC tiene atornillado a su eje una unión flexible que lo une a una varilla roscada de 5 mm, que a su vez se enrosca en el carro permitiendo el movimiento de éste. Debido a todas estas cargas y a tener un motor de baja potencia, le cuesta más arrancar por tanto para que se mueva en ambas direcciones (a favor y en contra del muelle) se deben aplicar desde arduino 1,76 V. Esto hace que tengamos una zona muerta en la que el motor no se movería, por lo que a la hora de realizar el control, como ocurría con el motor2 DC, se proponen varias alternativas:

- a) Realizar un control con la señal de control saturada a 3,43 V y sumando a esta los valores mínimos para que el motor se mueva en ambos sentidos, 1,57 V, y así eliminar la zona muerta. Con estas condiciones y empezando con el valor del controlador que fue ajustado por Ziegler Nichols con su posterior simulación en simulink (apartado 5.3.4), se ha ajustado, para el comportamiento real del motor2 DC, un controlador tipo P, con  $P=0.01$ , cuya respuesta es la siguiente:

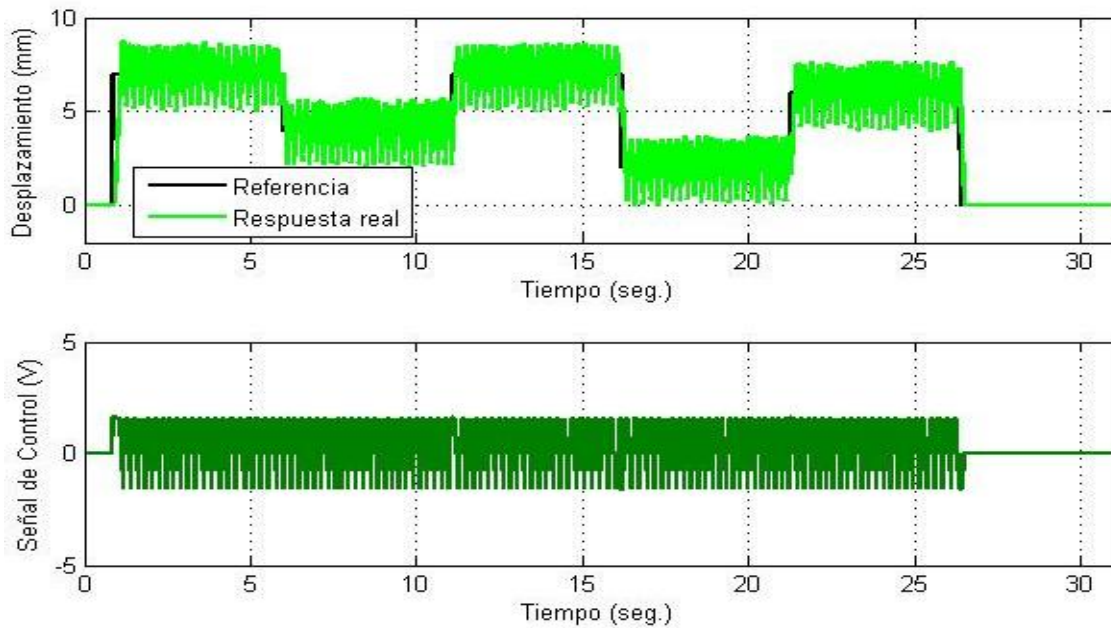


Fig. 6.12 – Control de posición del motor2 DC sin zona muerta

Como se puede observar con un tipo P y sumando el valor de tensión necesario para que el motor se mueva, este se queda siempre variando su posición alrededor de la referencia y prácticamente se realiza un control todo-nada como puede verse en la señal de control por lo que, debido a estos factores se ha decidido no usar este control en nuestro motor1 DC.

- b) Realizar un control sin tener en cuenta la zona muerta y sólo saturando la señal de control entre 0 y 5 V que son los valores que puede aportar Arduino. Para esto el mejor controlador ajustado fue un PD, con valores  $P=1$  y  $D=0,5$ , cuya respuesta ante la referencia de escalones (apartado 6.1.1.b) es la siguiente:

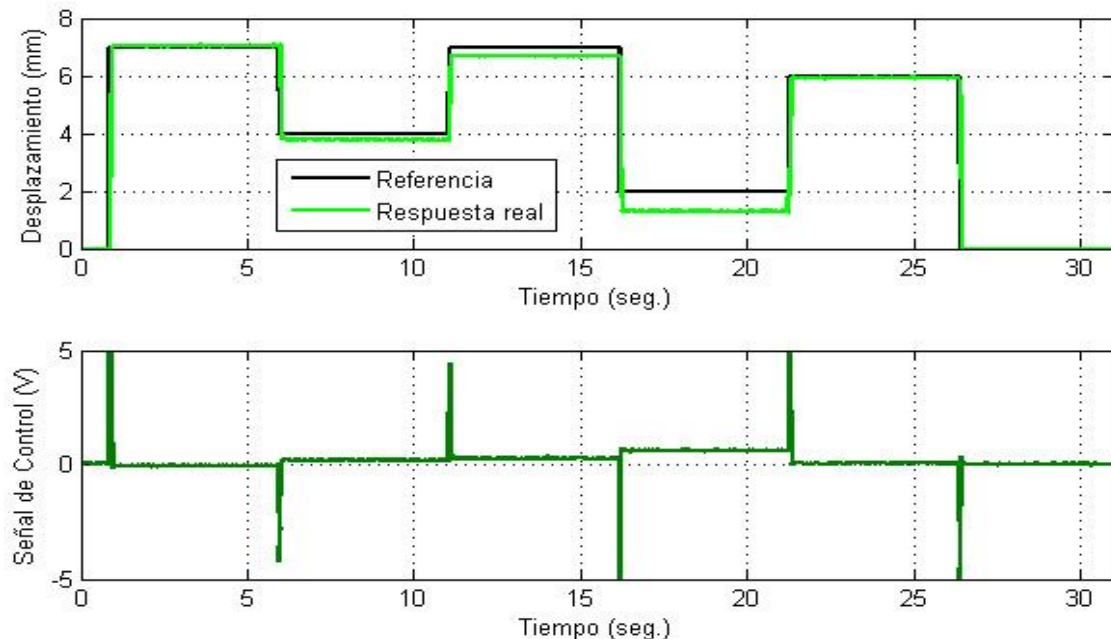


Fig. 6.13 - Control de posición del motor2 DC con zona muerta

Como podemos ver, a priori el control no es del todo malo aunque existen errores estacionarios y, como pasaba con el motor1 DC, si nuestra referencia fuera una rampa obtendríamos una respuesta muy lenta debido a que para tensiones bajas el motor no se mueve.

- c) Tras varias pruebas se decidió utilizar un control en el que la señal de control este saturada en 4,12 V (a favor y en contra del muelle) y se sumara a la señal de control un valor de 0,88 V para que el motor no esté tan lejos de empezar a moverse en ambos sentidos y así poder minimizar el efecto de la denominada zona muerta. Con estas condiciones el mejor controlador ajustado fue un PD, de valores  $P=0.8$  y  $D=0.8$ , con el que se obtuvo la siguiente respuesta para los escalones de referencia:

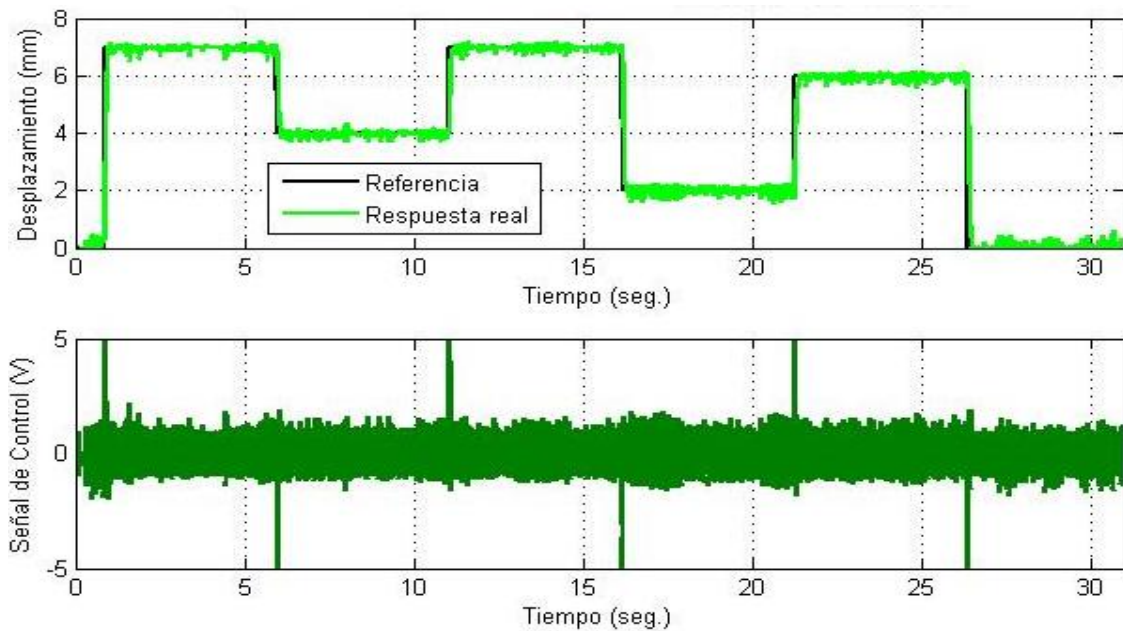


Fig. 6.14 - Control de posición del motor2 DC con reducción de la zona muerta ante referencia de escalones

Para nuestra referencia de rampas (apartado 6.1.1.b) tendríamos:

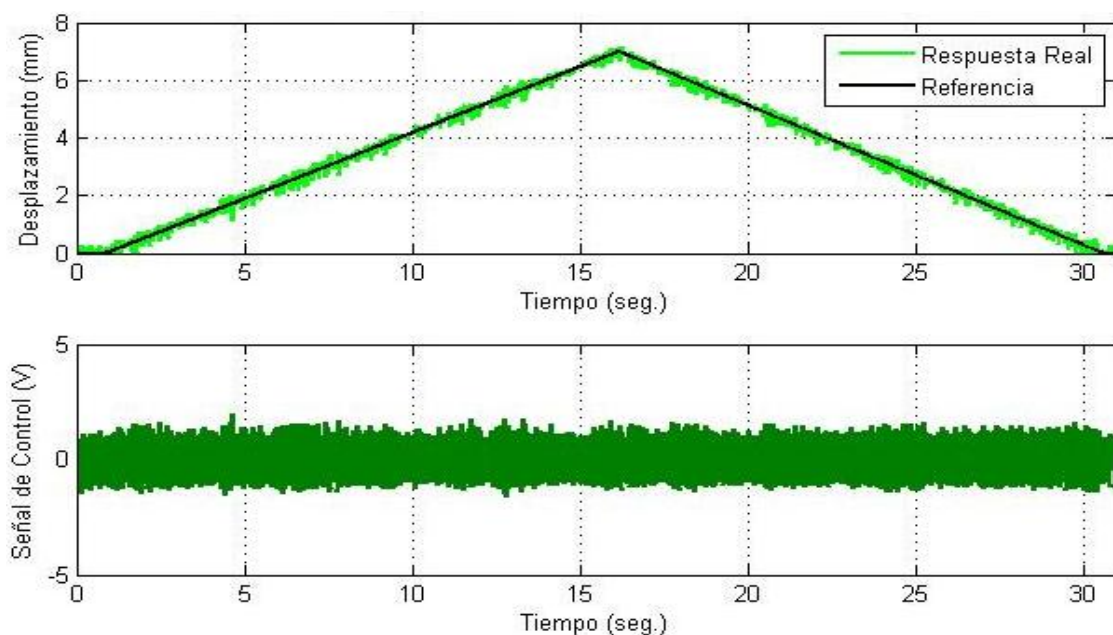


Fig. 6.15 - Control de posición del motor2 DC con reducción de la zona muerta ante referencia de rampas

Y para nuestra referencia senoidal (apartado 6.1.1.b) de frecuencia 0,1 Hz:

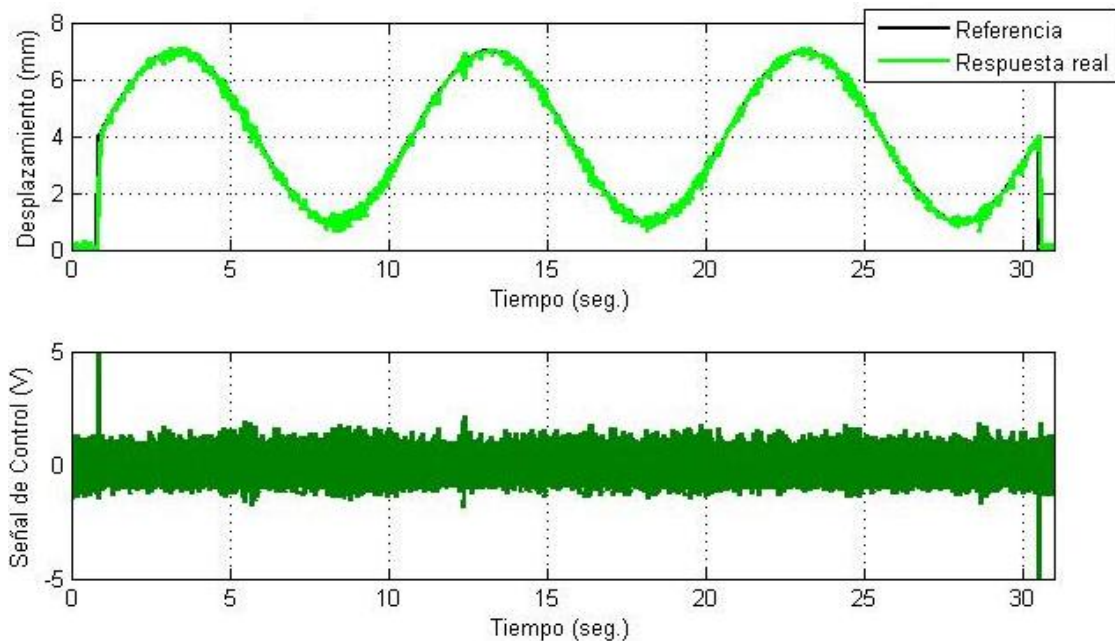


Fig. 6.16 – Control de posición del motor2 DC con reducción de la zona muerta ante referencia senoidal

Como se puede observar la repuesta es una mezcla de las anteriores, con la diferencia de que se han reducido los errores anteriores, aunque sigue existiendo un pequeño movimiento del motor alrededor de la referencia. Debido a que logramos un buen seguimiento de la señal de entrada para los tres tipos de referencias elegidas, este será el controlador elegido para nuestro motor2 DC.

### 6.1.5.- CONTROL DEL SMA2

La implementación de un controlador en el segundo cable SMA, se ha llevado a cabo con la programación de un script de Matlab denominado PIDSMA, el mismo que el usado para el SMA1, pero realizando las modificaciones siguientes para trabajar con el segundo cable:

- Sustituir la salida digital PWM de arduino de la 10 a la 5 para mandar la señal al SMA2.
- Cambiar la entrada analógica de la número cero (potenciómetro multivuelta) a la número 3 (potenciómetro slider).
- Introducir la ecuación que relaciona la caída de voltaje en el potenciómetro slider con el desplazamiento lineal de nuestro carro.

En el caso del SMA no tenemos, como ocurría con el motor, prácticamente ninguna zona muerta por lo que el control resulta más sencillo. Se empezó por probar como controlador el PI sintonizado anteriormente por Ziegler-Nichols y ajustado con la simulación (apartado 5.3.5). Realizando algunas pruebas se llegó a una respuesta buena para un controlador PI de valores  $P=12$  e  $I=0.0102$ , con el que se obtuvo la siguiente respuesta para los escalones de referencia:



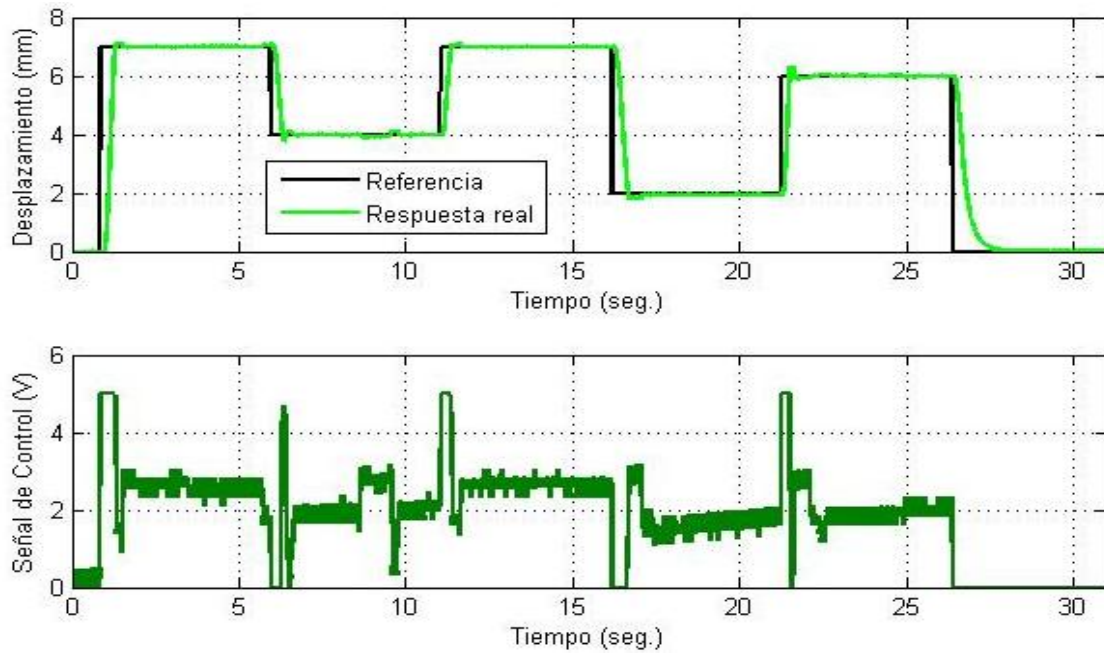


Fig. 6.17 - Control de posición del SMA2 ante referencia de escalones

Como podemos observar en la figura anterior la respuesta es bastante buena y aunque a veces quede un pequeño error estacionario, casi siempre se suele dar cuando el SMA está en su fase de enfriamiento. Esto puede darse porque lo que realmente se ha modelado en el cable SMA es su respuesta al calentamiento que, debido a la histéresis, difiere un poco del comportamiento que presenta al enfriarse. Aun teniendo este pequeño inconveniente obtenemos con un controlador PI un control muy bueno, tal y como nos decía la simulación (apartado 5.3.5).

Para señal de entrada tipo rampa tendríamos:

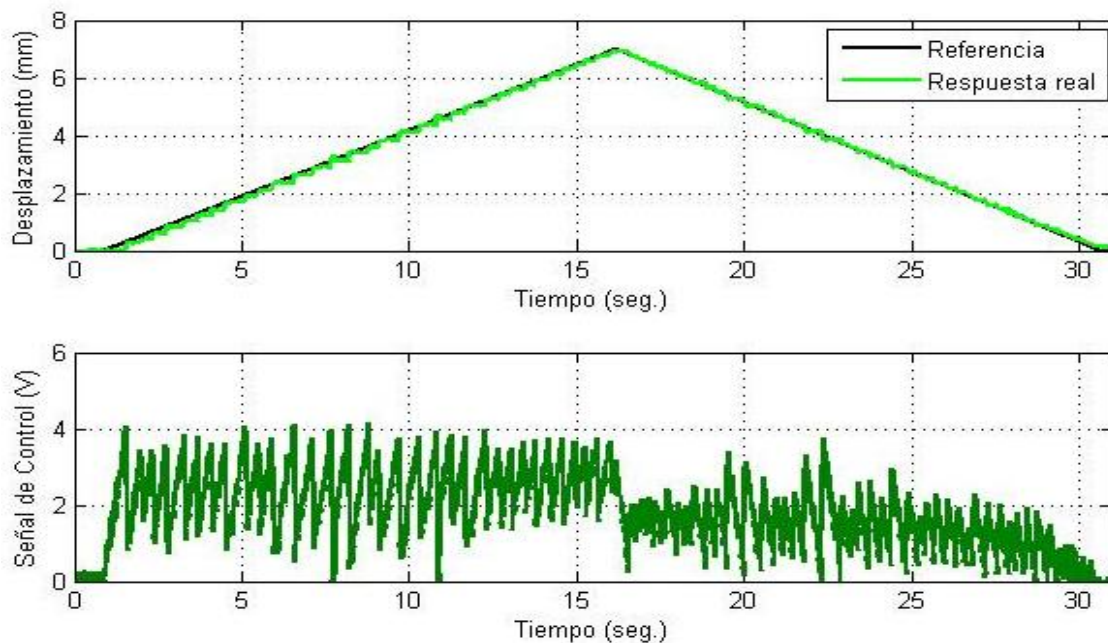


Fig. 6.18 - Control de posición del SMA2 ante referencia de rampas

Y para la referencia senoidal de 0,1 Hz tendríamos:

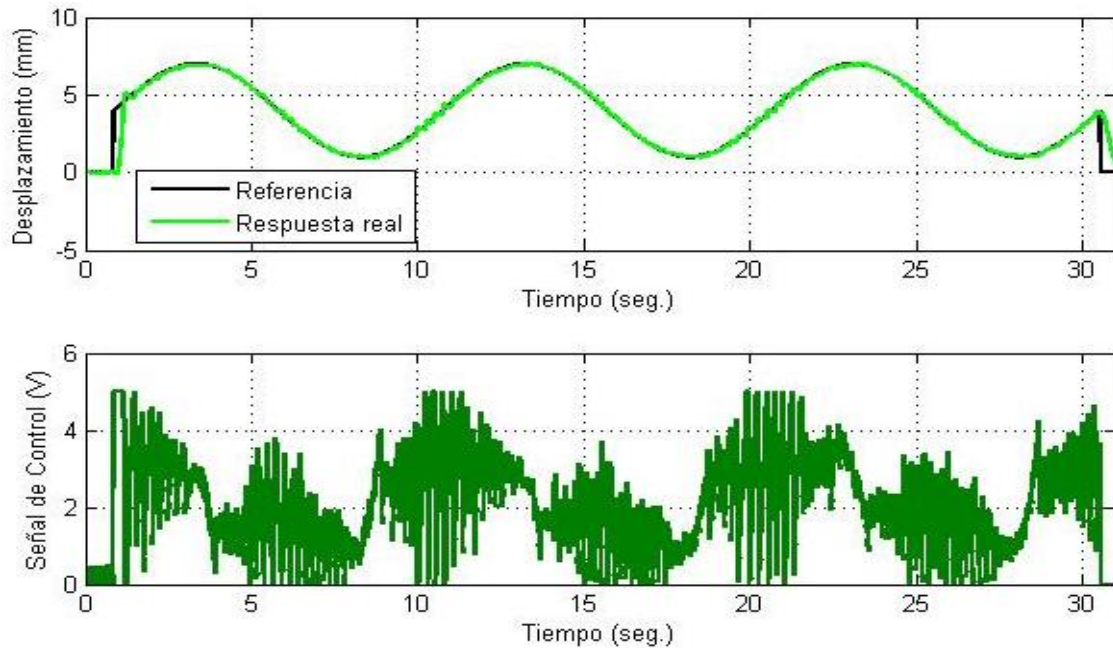


Fig. 6.19 - Control de posición del SMA2 ante referencia senoidal

Como se puede ver, con este controlador PI, logramos un buen seguimiento de la señal de entrada para los tres tipos de referencias elegidas.

## 6.2.- CONTROL DE POSICIÓN DEL SMA1 CON TEMPERATURA

Una de las alternativas a investigar en cuanto al control de los SMA, era realizar su control de posición realimentando con la medida de su temperatura. Este control no ha sido realizado de forma satisfactoria hasta ahora, a veces por las limitaciones de realizar la medición de temperatura en cables SMA de tan pequeño diámetro y otras veces por la respuesta lenta de los sensores utilizados para tal fin [63].

Anteriormente solo Troisfontaine et al. [63] habían realizado un control de posición con la temperatura, pero éste estaba limitado simplemente al seguimiento de una señal escalón. Aquí se quiere comprobar su viabilidad para varios escalones de referencia y comprobar si puede resultar una solución válida para el seguimiento de trayectorias.

Con la instalación de nuestra termopila, en el cable SMA1, hemos conseguido tener un sensor bastante rápido, que refleja bastante bien la variación de temperatura de nuestro cable en cada instante (apartado 4.4.5). A la hora de realizar este control de temperatura tenemos el problema de las no linealidades presentes en el SMA. Debido a esto, la relación de temperatura/desplazamiento en nuestros cables de flexinol varía en función de la tensión de entrada que se les aplique. Por ejemplo, para un escalón de 5V, en 190 grados de giro en el potenciómetro el sensor de temperatura nos marcará 2,44 V, en cambio si le damos un escalón de 2,45 V, para ese mismo giro de 190 grados, el sensor de temperatura nos dará 3,15

V. Puesto que la señal de control suele estar habitualmente de media en valores de 2,5 V, usaremos la relación temperatura/desplazamiento ante un escalón de 2,45 V (figura 6.20) en nuestro esquema de control.

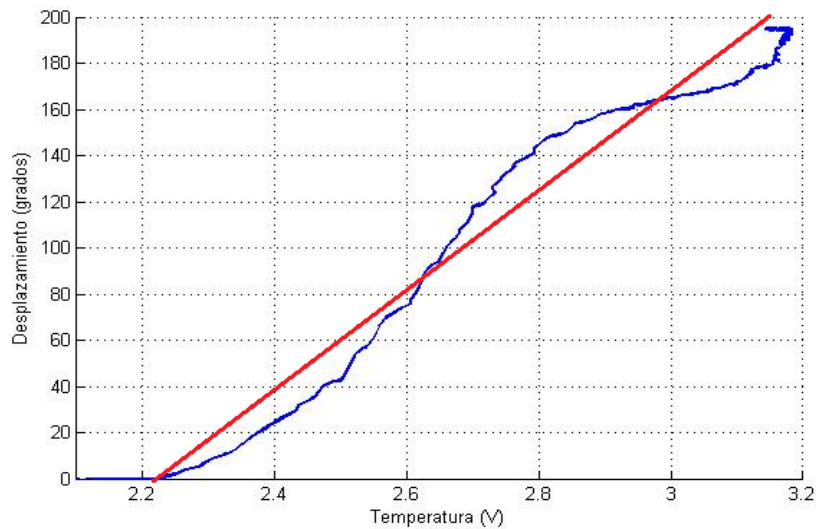


Fig. 6.20 – Relación Temperatura/Desplazamiento para entrada escalón de 2,45 V

Se ha linealizado la curva anterior para obtener una relación entre la temperatura del cable y el desplazamiento angular. Esta relación viene dada por la siguiente ecuación de recta (recta roja):

$$K(\text{grados}) = 212.766 * T^a (V) - 472.34$$

Nuestro esquema para el control de posición realimentado con la temperatura del cable de flexinol quedaría como se muestra en el siguiente diagrama de bloques montado en simulink:

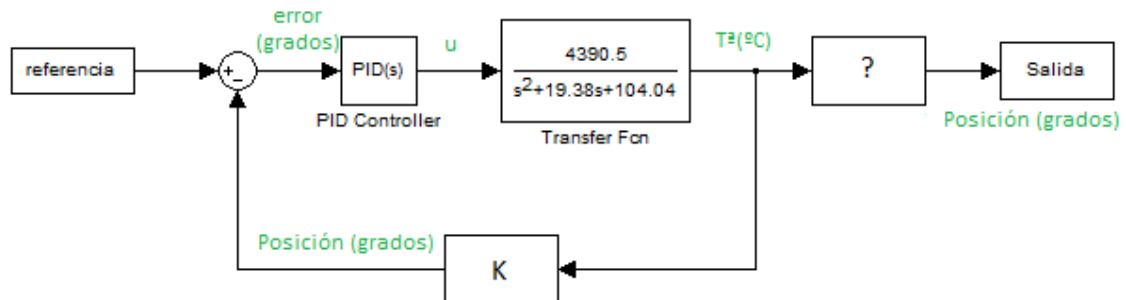


Fig. 6.21 – Diagrama de Bloques para el control de posición a través de la temperatura del cable SMA

En el diagrama de bloques anterior nuestra K es la recta anteriormente sacada, que nos relaciona la temperatura del cable con los grados de giro. El bloque “?” en un principio también es nuestra K obtenida, pero vamos a comprobar, en el siguiente experimento, que realmente ese bloque de relación de la temperatura con los grados de giro finales del cable, no es nuestra K.

En el script PIDSMA (anexo B.4.6) leemos la temperatura a partir del sensor ya instalado y convertimos el valor a grados de giro, con la ecuación K, para poder compararlo con la señal de referencia. Con esto se realizan pruebas y se sintoniza un nuevo controlador PID para ajustar bien el seguimiento de la señal de temperatura. Los valores de este PID son: P=0,02 I=0,000425 y D=0,094 y la respuesta que obtenemos con estos parámetros la podemos ver en las siguientes gráficas:

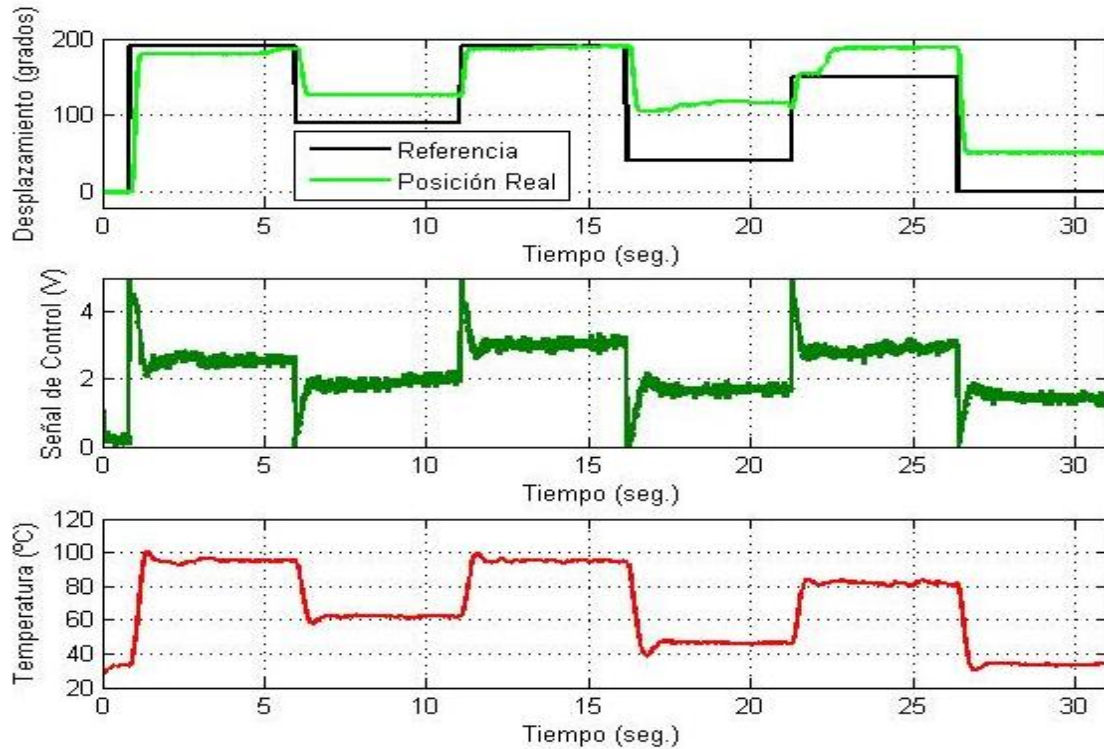


Fig. 6.22 – Respuesta del sistema de desplazamiento angular para el control realimentado con  $T^2$

En la respuesta anterior podemos ver como realizamos la medida de la posición real del cable (curva de color verde claro) para verificar si el cable se encuentra en la posición correcta, y podemos observar como no se adapta a la referencia. Esto, como podemos ver en el diagrama de bloques (figura 6.21) es porque la relación entre la temperatura del cable con la posición real, como hemos comentado, no corresponde con nuestra constante K. Esta relación (bloque ?) no la conocemos, pero vamos a intentar obtenerla con el siguiente experimento a realizar.

Un detalle a tener en cuenta es que, aunque tengamos un error en la posición final del SMA no quiere decir que se esté realizando un mal control de temperatura, ya que si pasamos nuestros valores de la referencia, en grados de giro, a grados centígrados y los comparamos con la respuesta en temperatura del sensor (curva roja), obtenemos lo siguiente:

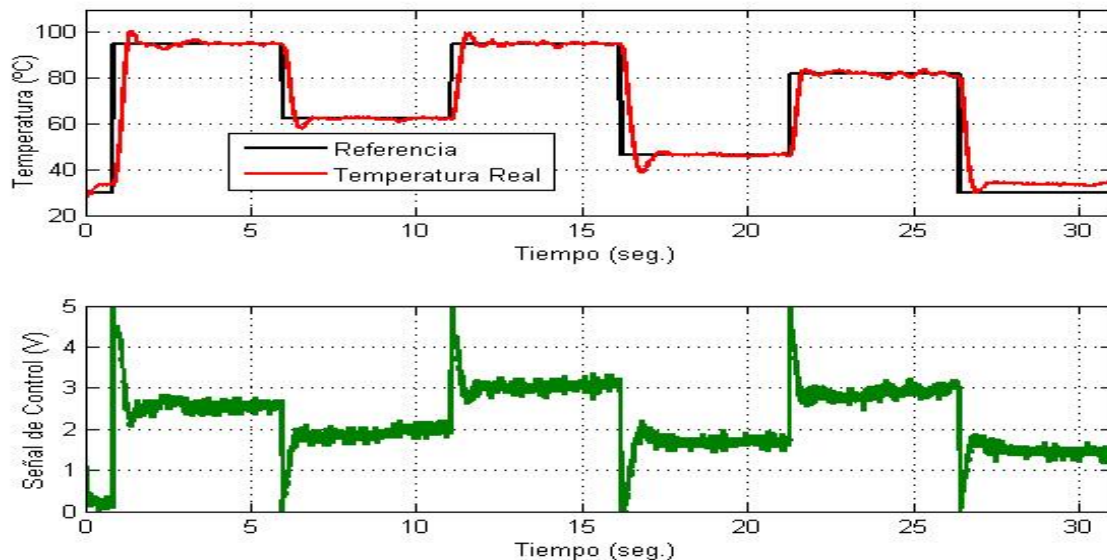


Fig. 6.23 – Control de Temperatura en el cable SMA

Como se puede ver, el control de temperatura es bastante bueno, lo que pasa que este control de temperatura, con la relación que hemos sacado, no lo podemos relacionar con la posición correcta que tiene el cable. Para intentar obtener una relación entre la temperatura del cable y su posición final se introducen al sistema los escalones de la señal de control anterior (fig. 6.23) en lazo abierto, con lo que obtenemos la relación entre la temperatura, en voltios del sensor, y el desplazamiento, en grados de giro (fig. 6.24 señal azul). Tras esto, se disminuyen todos los escalones anteriores un 25% y se introducen al SMA1 para realizar la comparación con los anteriores (fig. 6.24 señal aguamarina).

Como podemos ver en la figura 6.24, no podemos sacar una relación a simple vista entre mi temperatura y mi posición final en grados (bloque ?) debido a la histéresis que presentan los cables de flexinol. Por tanto podemos concluir que aunque el control de temperatura se realice de forma óptima, no podemos controlar la posición del cable SMA midiendo su temperatura. Para intentar sacar alguna relación posible entre temperatura y grados de giro quizá se debería entrar en técnicas de identificación para sistemas no lineales, como son las redes neuronales, con las que quizá se pueda sacar alguna relación entre las variables.

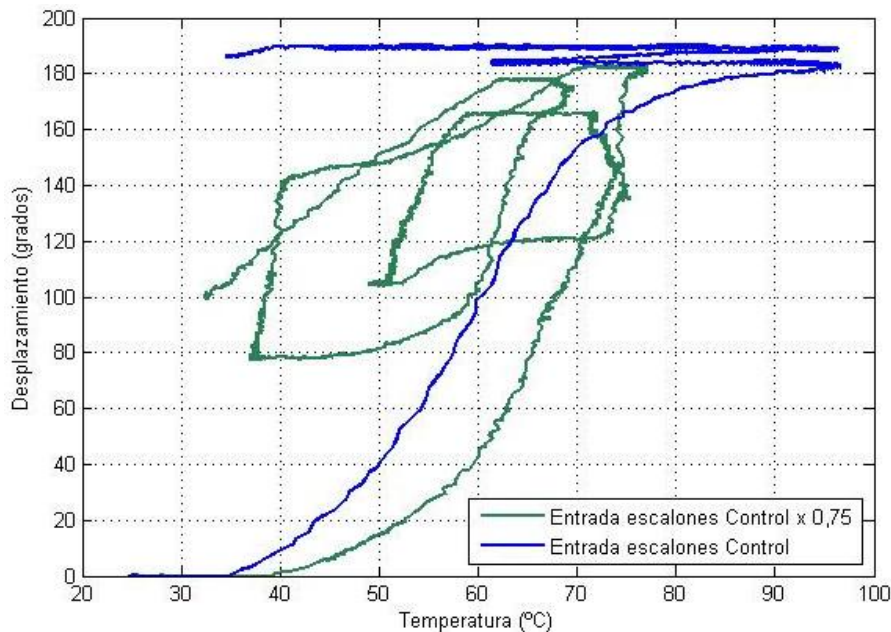


Fig. 6.24 – Relación no lineal entre Temperatura y desplazamiento del SMA debido a la histéresis

### 6.3.- CONTROL DE POSICIÓN DEL SMA1 CON INTENSIDAD

Otra de las alternativas a investigar en cuanto al control de los SMA, era realizar su control de posición realimentando con la medida de la intensidad que está pasando por el cable SMA en cada momento. Este control a través de la medida de la intensidad con un sensor no ha sido probado por prácticamente ningún investigador anterior pero lo que si se ha realizado son controles a través de la resistencia del cable SMA, variable que está relacionada con la Intensidad. En cuanto al control con la señal de resistencia existe cierta ambigüedad, ya que hay investigadores que han realizado este control de forma satisfactoria, como Ikuta et al. [33], y otros que aseguran que no se puede llevar a cabo por la no linealidad de esta variable, Asua et al. [34].

En nuestra plataforma, a los cables SMA les llegan señales PWM desde la placa arduino UNO. Pero esto no es realmente así ya que estas señales pasan por un circuito amplificador, por lo que la señal de intensidad en el cable de flexinol no es una señal PWM ni una analógica, sino una mezcla de ambas (fig. 6.25 señal azul). Debido a esta variabilidad en la señal de intensidad se han tenido que obtener unos valores medios. Para ello se ha ido obteniendo la media por cada 100 valores de esta señal de intensidad variable, quedándonos una señal media más limpia y con la que poder obtener una relación, como podemos ver en la siguiente figura:

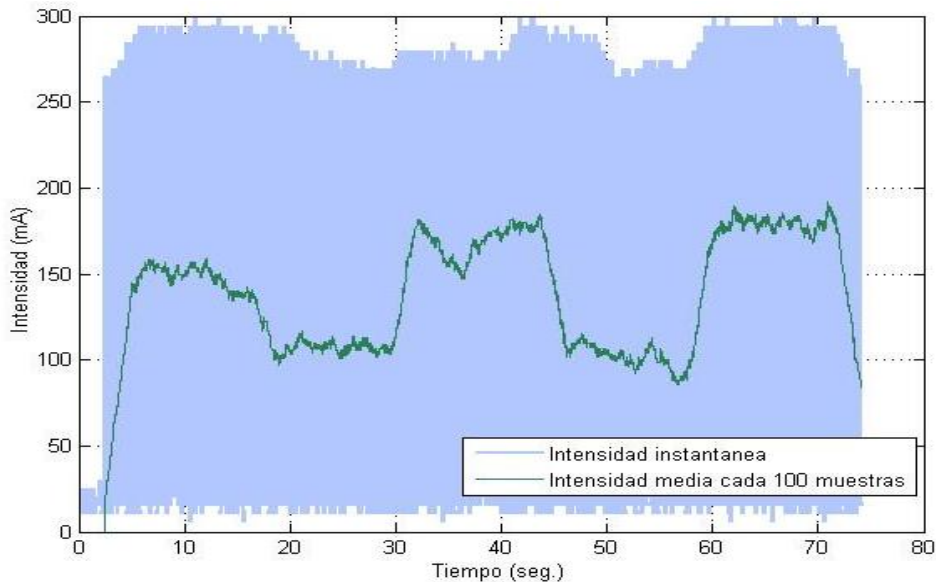


Fig. 6.25 – Intensidad instantánea y media por cada 100 muestras que pasa por el cable SMA1

Una vez que tenemos una señal mucho más limpia y definida (señal media), ya podemos mostrar la relación de esta señal de intensidad con el desplazamiento para las mismas entradas escalón introducidas en las pruebas de temperatura, y cuya respuesta es:

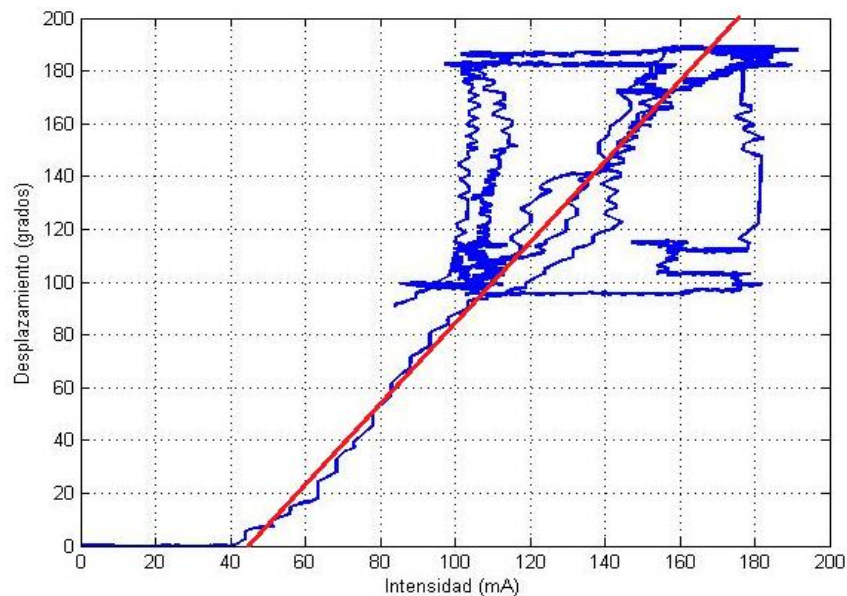


Fig. 6.26 - Relación Intensidad/Desplazamiento para entradas tipo escalón

Podemos ver que la relación no es lineal pero aún así vamos a intentar linealizarla para intentar realizar un control realimentado con la señal de intensidad. Se ha linealizado la curva

anterior para obtener una relación entre la intensidad que pasa por el cable de flexinol y el desplazamiento angular (recta roja), cuya ecuación es:

$$K(\text{grados}) = 1.538 * I (\text{mA}) - 69.231$$

Nuestro esquema para el control de posición realimentado con la intensidad, que medimos en cada instante en el cable con el sensor CSLW6B1 (apartado 4.4.6), quedaría como se muestra en el siguiente diagrama de bloques de simulink:

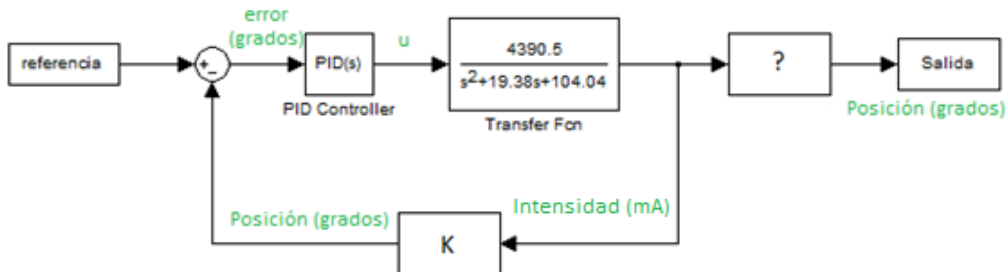


Fig. 6.27 - Diagrama de Bloques para el control de posición a través de la intensidad del cable SMA1

En el diagrama de bloques anterior nuestra K es la recta anteriormente sacada, que nos relaciona la intensidad del cable con los grados de giro. Tal y como ocurriría al realimentar con la señal de temperatura, el bloque "?" en un principio también es nuestra K obtenida, pero se va a comprobar, en el siguiente experimento, que realmente ese bloque de relación de la intensidad con los grados de giro finales del cable, no es nuestra K.

En el script PIDSMA (anexo B.4.6) leemos la intensidad a partir del sensor ya instalado y convertimos el valor a grados de giro, con la ecuación K, para poder compararlo con la señal de referencia. Con esto se realizan pruebas y se sintoniza un nuevo controlador PID para ajustar bien el seguimiento de la señal de temperatura. Los valores de este PID son: P=0,04 I=0,000425 y D=0,941 y la respuesta que obtenemos con estos parámetros la podemos ver en las siguientes gráficas:

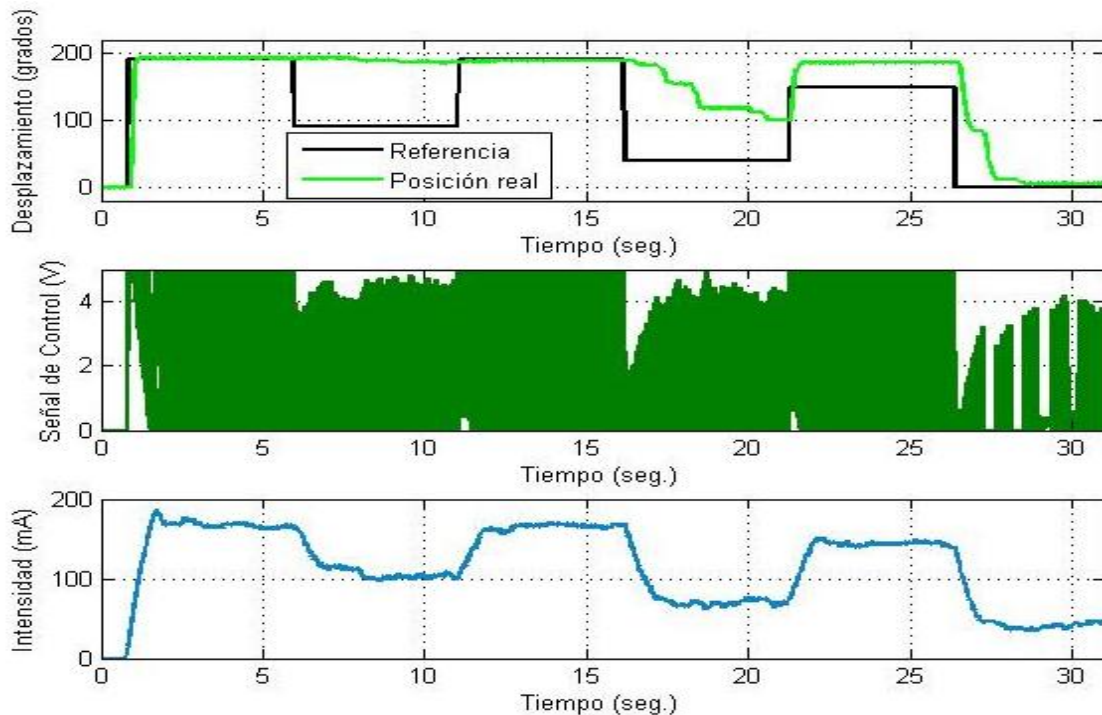


Fig. 6.28 - Respuesta del sistema de desplazamiento angular para el control realimentado con Intensidad

En la respuesta anterior podemos ver como a modo de comprobación realizamos la medida de la posición real del cable (curva de color verde claro) y podemos observar como no se adapta a la referencia, al igual que pasaba con la temperatura. Esto, como podemos ver en el diagrama de bloques (figura 6.27) es porque la relación entre la intensidad del cable con la posición real, como hemos comentado, no corresponde con nuestra constante K. Esta relación (bloque ?) no la conocemos, pero vamos a intentar obtenerla con el siguiente experimento a realizar.

Que tengamos un error en la posición final del SMA no quiere decir que se esté realizando un mal control de intensidad. Esto lo podemos comprobar pasando nuestros valores de la referencia en grados de giro a mA y comparándolos con la respuesta en intensidad del sensor (curva azul), obteniendo:

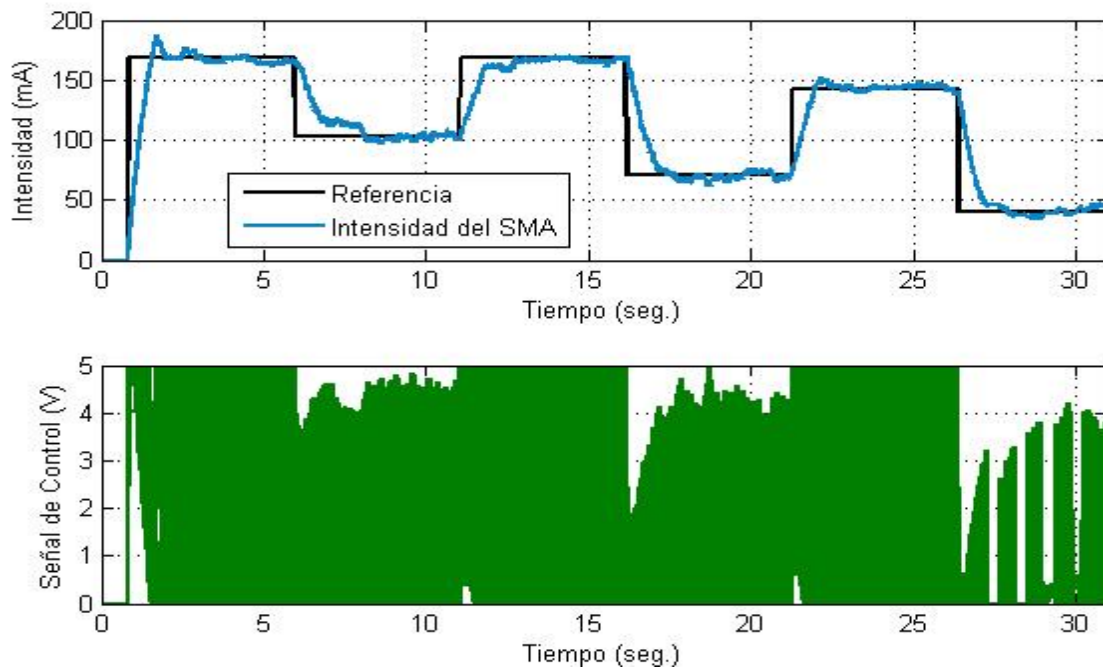
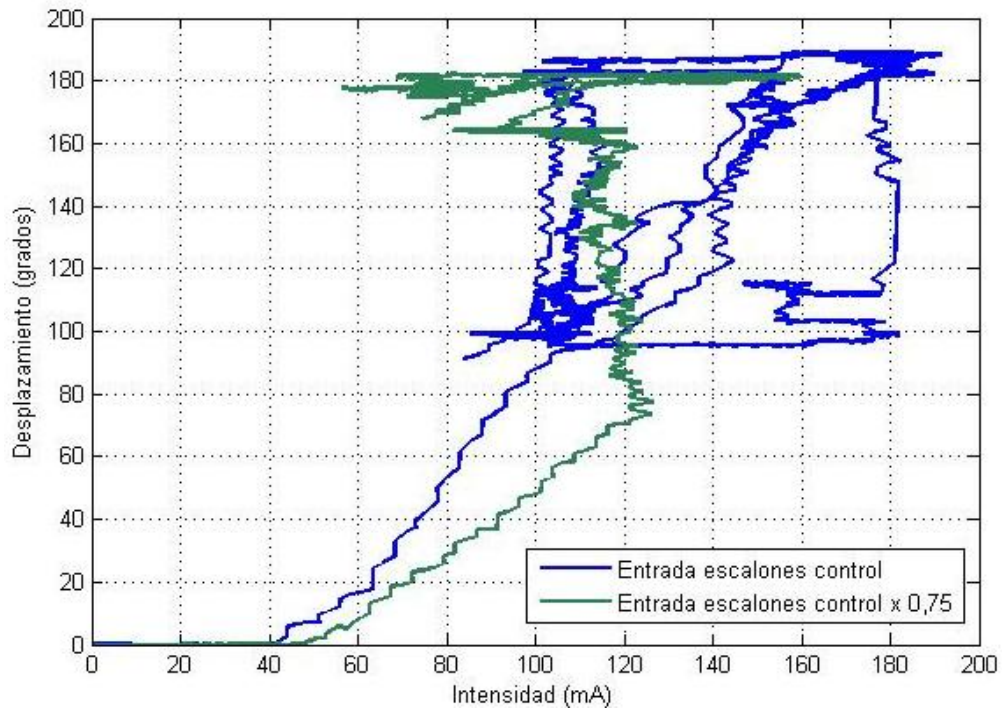


Fig. 6.29 - Control de Intensidad en el cable SMA1

Como se puede ver, el control de intensidad, como pasaba con el de temperatura es bastante bueno, lo que pasa es que este control de intensidad no se relaciona con una posición correcta del cable. Al igual que hicimos en temperatura para intentar obtener una relación entre la intensidad del cable y su posición final se introducen al sistema los escalones de la señal de control en lazo abierto, con lo que obtenemos la relación entre la intensidad, en mA del sensor, y el desplazamiento, en grados de giro (figura 6.30 señal azul). También se disminuyen todos los escalones anteriores un 25% y se introducen al SMA1 para realizar la comparación con los anteriores (figura 6.30 señal aguamarina).

Como se puede ver en la siguiente figura, no podemos sacar una relación a simple vista entre mi temperatura y mi posición final en grados. Por tanto podemos concluir que aunque el control de intensidad se realice de forma óptima, no podemos controlar la posición del cable SMA midiendo la intensidad que lo atraviesa. Para intentar sacar alguna relación posible entre intensidad y grados de giro quizá se debería entrar en técnicas de identificación para sistemas no lineales, como son las redes neuronales, con las que quizá se pueda sacar alguna relación entre las variables.





## Capítulo 7: COMPARATIVAS FINALES

Comparación de los datos de control de posición, frecuencias de respuesta y consumo de potencias entre actuadores.



## 7.1.- COMPARATIVA SMA<sub>s</sub> - MOTORES DC

Aquí se han representado conjuntamente los resultados para el control de posición entre los cables SMA y los motores tanto para el desplazamiento angular como el lineal. Esta comparativa se realiza para ver las ventajas e inconvenientes de los cables SMA frente a los motores para el control de posición en el seguimiento de distintas referencias.

### 7.1.1.- COMPARATIVA SMA1 VS MOTOR1 DC.

En el primer sistema se realiza el control de desplazamiento angular, con el primer cable SMA y con el primer motor DC, cuyas respuestas pueden verse conjuntamente en la figuras 7.1, 7.2 y 7.3 para diferentes referencias de entrada (apartado 6.1.1.a). Para la referencia de escalones:

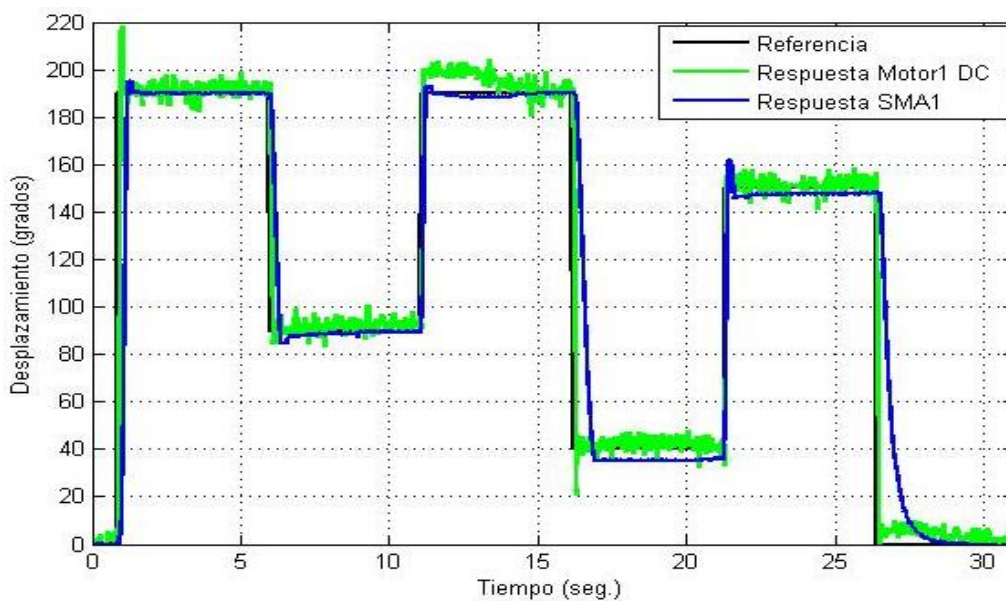


Fig. 7.1 – Comparativa de control de posición angular entre el SMA1 y el motor1 DC ante referencia de escalones

Para la referencia de rampas:

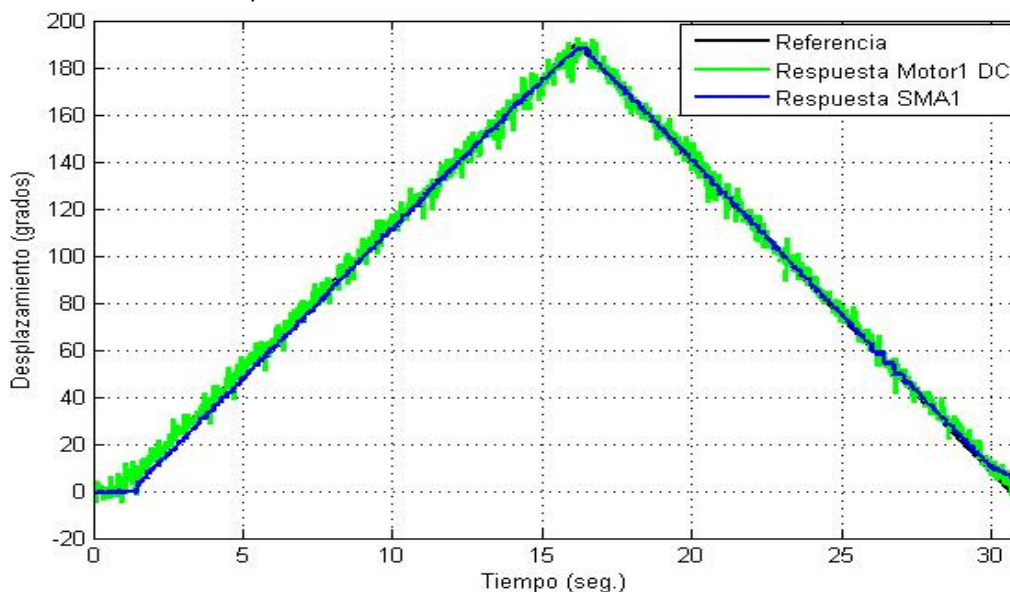


Fig. 7.2 - Comparativa de control de posición angular entre el SMA1 y el motor1 DC ante referencia de rampas

Ante nuestra referencia senoidal de 0,1 Hz:

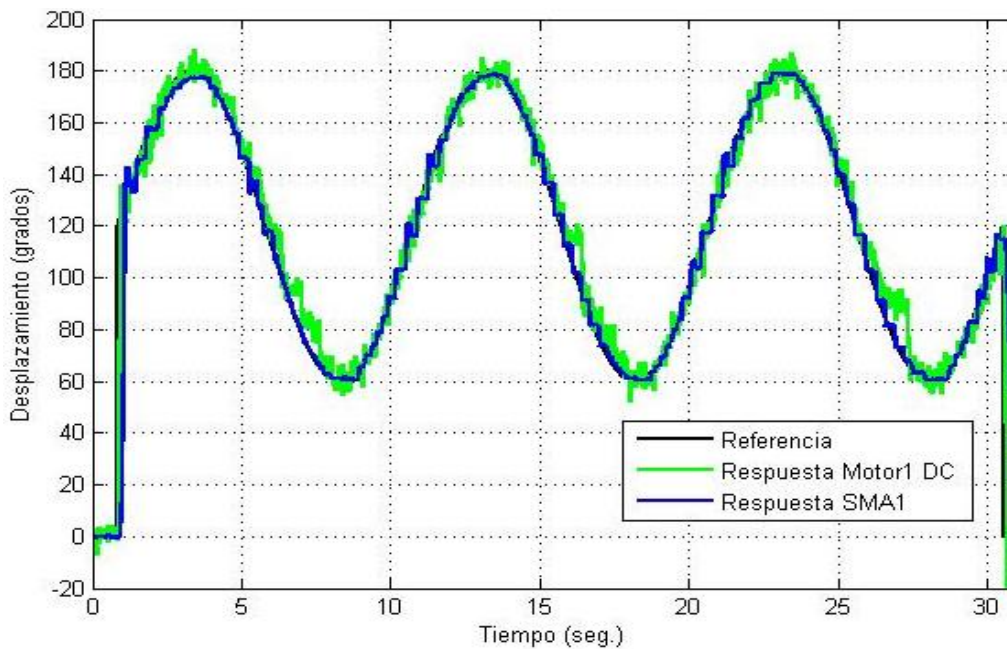


Fig. 7.3 - Comparativa de control de posición angular entre el SMA1 y el motor1 DC ante referencia senoidal

Podemos ver cómo tanto con el cable de flexinol como con el motor1 DC en general se realiza un buen control de posición. El motor suele seguir bien la trayectoria indicada, pero si nos fijamos en su señal vemos que oscila alrededor de la referencia, algo incómodo y poco práctico y que para aplicaciones de precisión nos limitaría bastante. Otro inconveniente del motor1 DC es su ruido a la hora de actuar y los mecanismos de reducción y transmisión, como ruedas dentadas o ejes, que introducen vibraciones, suciedad y necesidad de un mantenimiento para su correcto funcionamiento. La mayor ventaja del motor1 DC es que, como podemos observar en las gráficas anteriores realiza un control rápido en ambas direcciones, tanto a favor de la carga (resorte) como en contra.

La respuesta del SMA podemos ver que no presenta oscilación alguna y suele ser precisa, salvo en su fase de enfriamiento donde a veces puede presentar un pequeño error de posición (figura 7.1). Trabajar con cables SMA no nos proporciona ningún ruido, ni elementos adicionales en nuestro sistema y como se observa en las gráficas nos ofrecen una respuesta limpia sin oscilaciones. El mayor inconveniente del cable SMA es su lentitud, sobretodo en su fase de enfriamiento, lo que nos limita el poder trabajar a elevadas frecuencias, como veremos en apartado 7.2.

Para poder tener datos analíticos del error que cometemos respecto a las señales de referencia (apartado 6.1.1.a), tanto con el cable SMA1 como con el motor1 DC, se ha calculado el valor cuadrático medio de los errores (RMSE), que viene dado por la ecuación 7.1 y se ha calculado para las respuestas del SMA1 y motor1 DC para las tres señales de referencia mostradas anteriormente. Los valores calculados de este error se muestran en la tabla 7.1.

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum_{t=1}^n (x_{1,t} - x_{2,t})^2}{n}} \quad [7.1]$$

Donde  $x_1$  son los valores de la señal de referencia y  $x_2$  los de la respuesta del SMA o Motor.

	Referencia de Escalones	Referencia de Rampas	Referencia Senoidal
SMA1 (Flexinol 24 cm)	27,7579	2,6688	13,3894
Motor1 DC	14,9526	2,5636	9,1516

Tabla 7.1 – Valores, en grados de giro, del valor cuadrático medio del error para las respuestas del SMA1 y el motor1 DC

En la tabla 7.1 se puede observar como el RMSE del SMA es mayor al del motor, sobre todo para las entradas tipo escalón. Esto se debe, como se ha comentado anteriormente, a la fase de enfriamiento del SMA donde tarda en responder y es donde su respuesta está más alejada de la referencia. Esto produce que, aunque los errores de posición estacionarios puedan ser mínimos y tenga un buen control, el RMSE sea mayor por la lentitud del SMA en su fase de enfriamiento. Este efecto se produce sobretodo en entradas escalón, ya que es donde se requiere un enfriamiento más brusco de mi cable de Flexinol (figura 7.1). Para minimizar este error se podrían usar métodos de refrigeración en los SMA.

### 7.1.2.- COMPARATIVA SMA2 VS MOTOR2 DC.

En el segundo sistema se realiza el control de desplazamiento lineal, con el segundo cable SMA, también de 100  $\mu\text{m}$  pero del doble de longitud, y con el motor DC unido al husillo lineal. La respuesta de ambos actuadores puede verse conjuntamente en la figuras 7.1, 7.2 y 7.3 para diferentes señales de entrada: escalones, rampas y senoidales. Para referencia tipo escalón tendríamos:

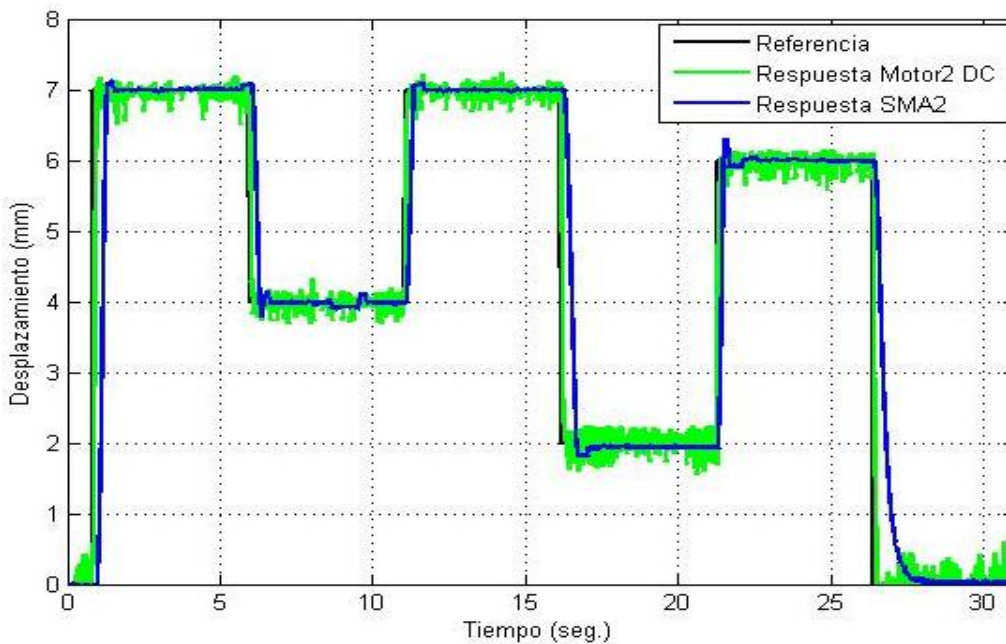


Fig. 7.4 - Comparativa de control de posición angular entre el SMA2 y el motor DC lineal ante estradas escalón

Cómo podemos ver la respuesta se asemeja mucho a la obtenida para el desplazamiento angular, el motor se ajusta rápidamente a la referencia pero permanece oscilando alrededor de esta, sin una respuesta limpia. El cable de flexinol realiza un buen control y mucho más estable, pero al ser un cable más largo, tiene más superficie, su velocidad de enfriamiento aun es menor y como se demostrará en el apartado 7.2 puede trabajar a una frecuencia máxima algo menor.

Para referencia tipo rampa tendríamos:

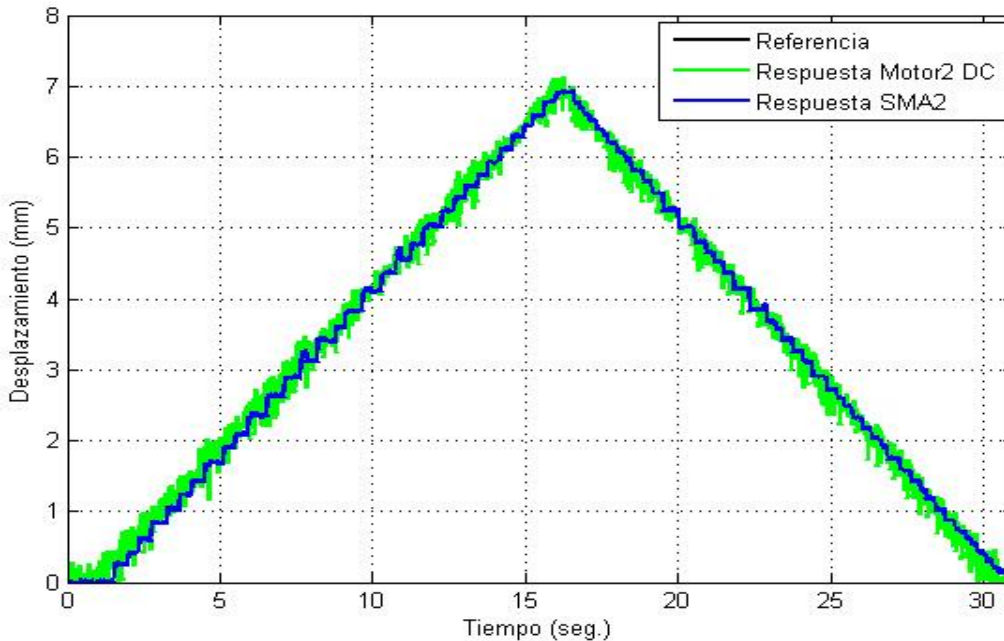


Fig. 7.5 - Comparativa de control de posición angular entre el SMA2 y el motor DC lineal ante estradas rampa

Para entrada senoidal de 0,1 Hz tendríamos:

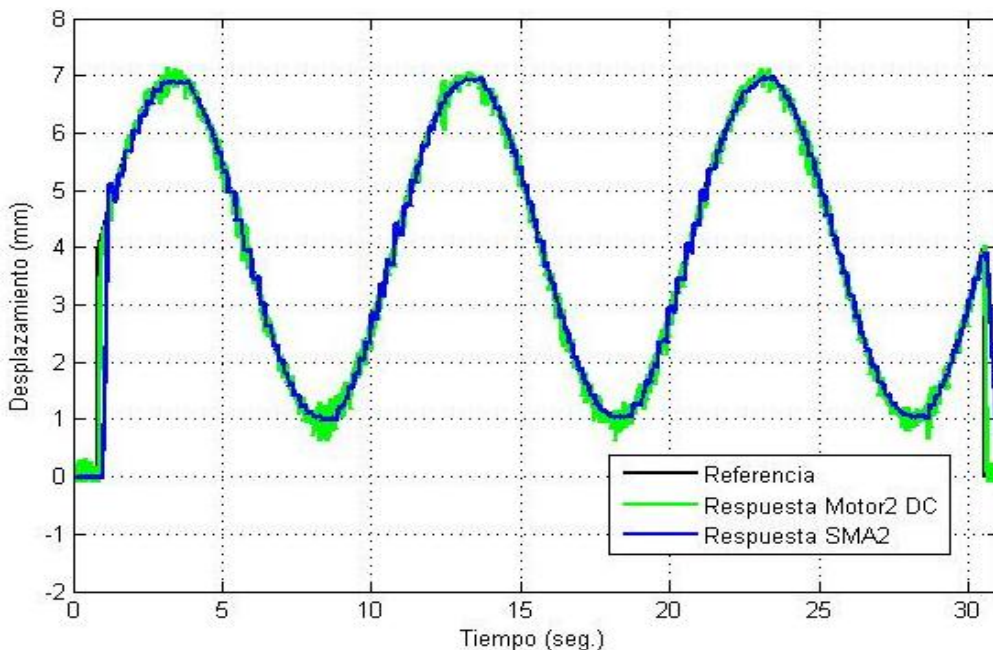


Fig. 7.6 - Comparativa de control de posición angular entre el SMA2 y el motor DC lineal ante estrada senoidal

Como vemos, la respuesta de ambos actuadores para el control es bastante buena. Para poder tener datos analíticos del error que cometemos respecto a la señal de referencia tanto con el cable SMA1 como con el motor1 DC, se ha calculado, como se ha hecho para el desplazamiento angular, el valor cuadrático medio de los errores (RMSE), que viene dado por la ecuación 7.1 anterior y se ha calculado para las respuestas del SMA y motor para las tres

señales de referencia mostradas anteriormente. Los valores calculados de este error se muestran en la siguiente tabla:

	Referencia de Escalones	Referencia de Rampas	Referencia senoidal
SMA2 (Flexinol 44 cm)	1,0478	0,1006	0,4856
Motor2 DC	0,4345	0,1504	0,2304

Tabla 7.2 - Valores, en mm, del valor cuadrático medio del error para las respuestas del SMA2 y el motor2 DC lineal

Podemos ver como el RMSE del SMA es mayor al del motor, menos para la entrada de rampas, donde afecta menos que su velocidad de enfriamiento sea menor. En los demás casos, al igual que para el desplazamiento angular, aunque los errores de posición estacionarios son mínimos y se consiga un buen control, el RMSE es mayor por la lentitud del SMA en su fase de enfriamiento. En las entradas tipo escalón es más del doble que el del motor, ya que es donde se requiere un enfriamiento más brusco de mi cable de Flexinol (figura 7.1). Para minimizar este error se podrían usar métodos de refrigeración en los SMA o usar SMA de menor longitud en las aplicaciones donde pudiera ser posible.

## 7.2.- FRECUENCIA MÁXIMA DE FUNCIONAMIENTO

En algunas pruebas anteriores se ha comparado el seguimiento de una trayectoria de una función seno entre los cables SMA y los motores. Esta onda seno tenía una frecuencia de 0,1 Hz por lo que para comprobar la limitación en frecuencia que nos ofrece trabajar con los SMA se han realizado varias pruebas de entradas senoidales a diferentes frecuencias.

Tras las primeras pruebas al primer cable SMA de 100 µm y 24 cm podemos decir que hasta 1,2 Hz, podemos ver como la respuesta del cable SMA es bastante buena:

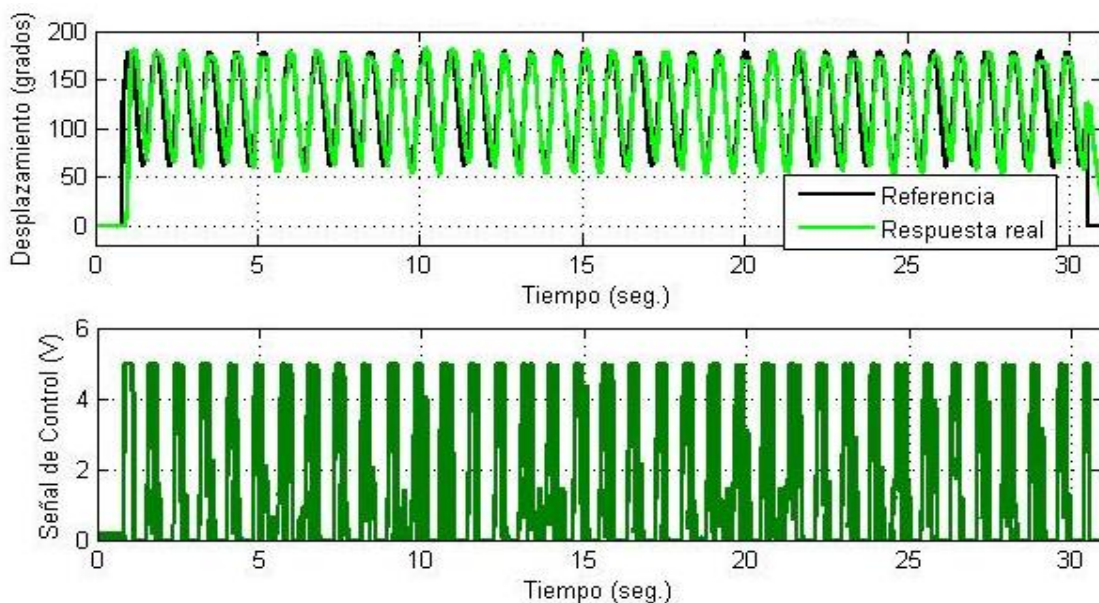


Fig. 7.7 – Control de posición del SMA1 ante entrada senoidal de 1,2 Hz



A partir de este valor de frecuencia el SMA no es capaz de seguir de forma precisa a la referencia, tal y como podemos observar:

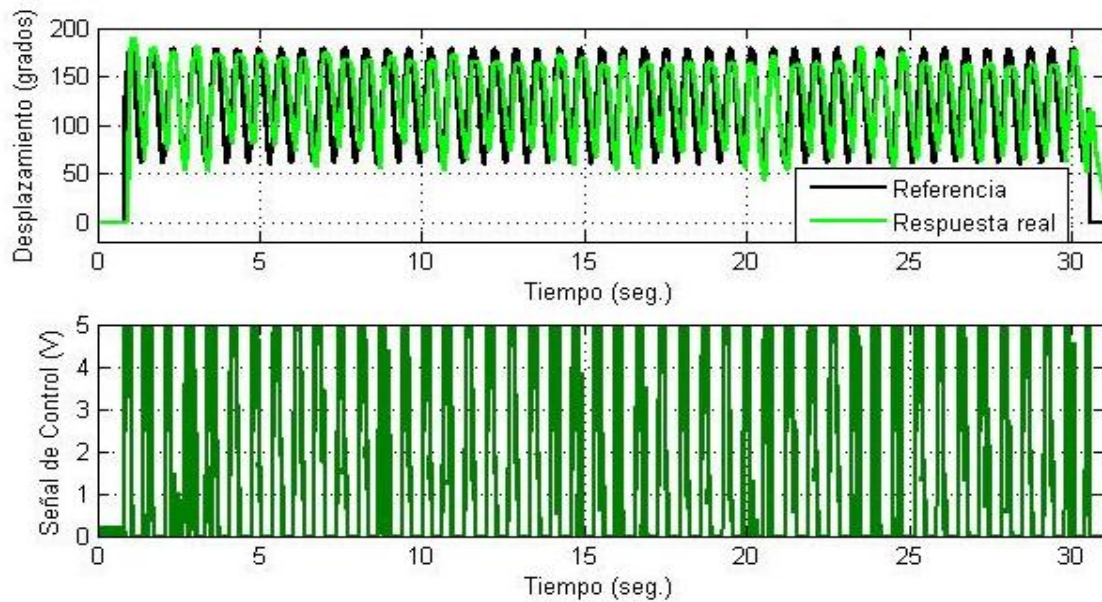


Fig. 7.8 - Control de posición del SMA1 ante entrada senoidal de 1,5 Hz

En la gráfica anterior ya podemos ver como el SMA no alcanza a realizar todos los puntos de la trayectoria, no le da tiempo a responder a esta frecuencia de 1,5 Hz. Tras haber realizado varias pruebas podemos decir que la frecuencia de trabajo límite para el SMA1 es de 1,2 Hz. Si quisiéramos para trabajar a frecuencias mayores a 1,2 Hz el SMA no nos valdría, a no ser que usáramos algún sistema de refrigeración con el que podríamos aumentar las frecuencias de funcionamiento por encima de 2 Hz [37] y hasta unos 20 Hz en actuadores basados en una fina capa de material [42].

En el caso del motor1 DC, aunque su control de posición es más complejo, no tenemos esta baja limitación y como se puede observar en la gráfica, su respuesta es prácticamente buena para, por ejemplo, una entrada senoidal de 2 Hz:

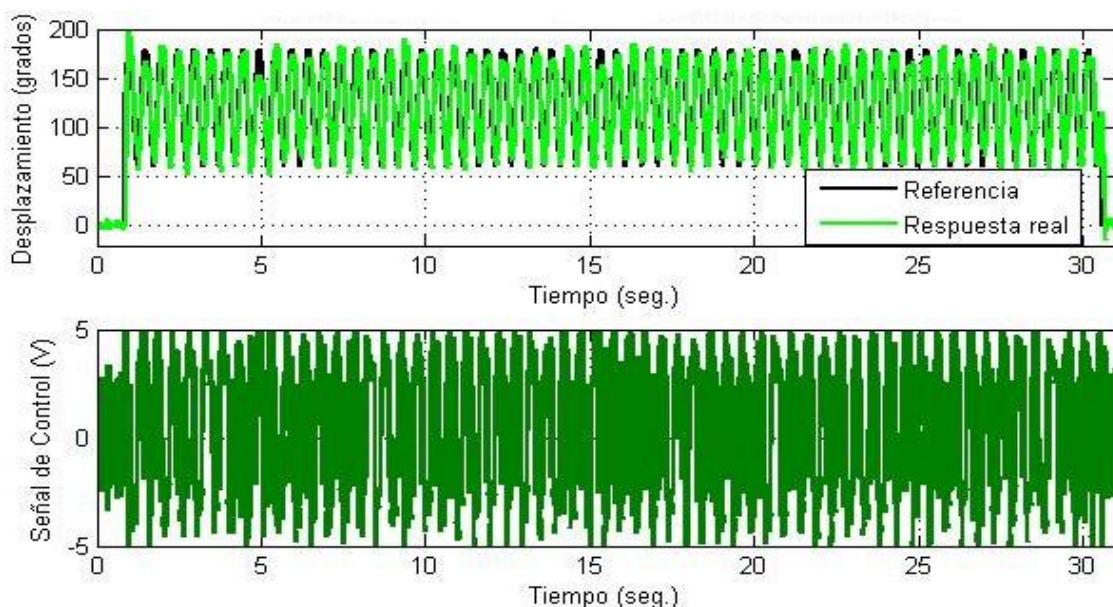


Fig. 7.9 - Control de posición del motor1 DC ante entrada senoidal de 2 Hz

En el caso del sistema para movimiento lineal, en el SMA de 48 cm y el motor DC lineal se realizó la misma comparativa, resultando que el SMA2 respondía bien hasta una frecuencia de 0,8 Hz. A partir de aquí el cable de flexinol no es capaz de responder bien y seguir la entrada senoidal de referencia, en cambio el motor lineal es completamente capaz de seguir una senoidal de una frecuencia mayor. Todas estas pruebas no se han incluido en la memoria por su similitud con las del sistema para desplazamiento angular pero se incluyen en el CD-ROM adjunto a esta memoria.

Como conclusión podemos decir que la longitud del cable de flexinol es importante para su respuesta en frecuencia, ya que a mayor longitud mayor superficie y va a tardar más en sus respectivos ciclos de calentamiento y sobretodo de enfriamiento. En nuestro caso un aumento de la longitud del 100% en nuestro cable de flexinol ha supuesto una disminución de un 33% en la frecuencia máxima a la que puede responder el SMA.

### 7.3.- CONSUMOS DE POTENCIA

Uno de los parámetros de estudio interesantes para realizar la comparación entre cables SMA y motores DC es el consumo de potencia de nuestros dispositivos. Para conocer el consumo de potencias de cada uno de nuestros actuadores, en cada experimento de control realizado, se han recogido los datos de tensión, intensidad, potencia instantánea y potencia media consumida por los actuadores, tal y como aparece en esta gráfica de ejemplo para el SMA1:

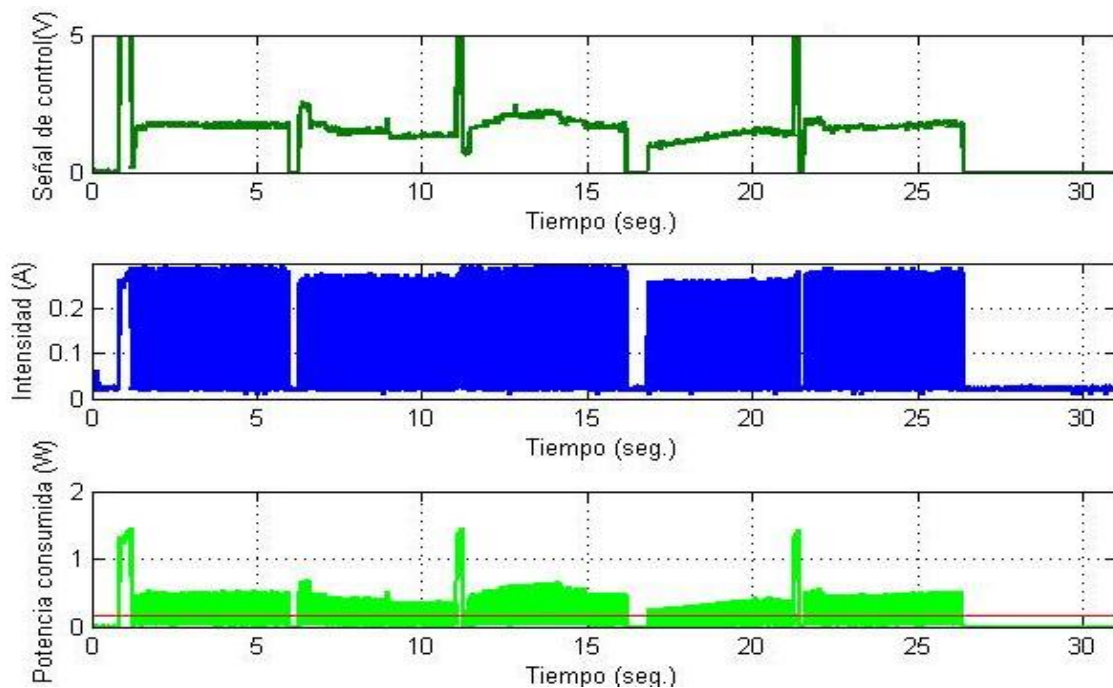


Fig. 7.10 – Tensión, Intensidad y Consumo de Potencia para control de posición en el SMA1 ante entradas escalón

De todas las pruebas de control realizadas anteriormente, se han obtenido estas gráficas, las cuales pueden verse en el CD-ROM adjunto. Hay que tener en cuenta que la señal de control no es la que realmente llega a nuestros actuadores, sino que los circuitos de control

electrónicos implementados tienen una ganancia de tensión, necesaria para el correcto funcionamiento de los actuadores, y que hay que tener en cuenta a la hora de sacar nuestras potencias consumidas. Estas ganancias son de 2,36 V para los motores, 1,29 V en el SMA1 y de 2,22 V para el SMA2.

Con todas las respectivas gráficas obtenidas y teniendo en cuenta estas ganancias comentadas anteriormente, se han sacado unas tablas comparativas de consumos para las pruebas realizadas en todos los actuadores:

	POTENCIA MEDIA(W)		POTENCIA MÁXIMA (W)		INTENSIDAD MÁXIMA(A)	
	Motor1 DC	SMA1	Motor1 DC	SMA1	Motor1 DC	SMA1
Referencia de Escalones	0,252	0,201	2,91	1,864	0,312	0,299
Referencia de Rampas	0,338	0,179	2,5	0,95	0,307	0,294
Referencia Senoidal	0,41	0,203	3,734	1,77	0,316	0,289

Tabla 7.3 – Comparativa de Potencias medias, máximas e Intensidad máxima entre el SMA1 y el motor1 DC

	POTENCIA MEDIA(W)		POTENCIA MÁXIMA (W)		INTENSIDAD MÁXIMA(A)	
	Motor2 DC	SMA2	Motor2 DC	SMA2	Motor2 DC	SMA2
Referencia de Escalones	0,482	0,506	7,71	2,666	0,653	0,25
Referencia de Rampas	0,268	0,438	1,251	2,058	0,365	0,245
Referencia Senoidal	0,352	0,564	6,778	2,602	0,556	0,25

Tabla 7.4 - Comparativa de Potencias medias, máximas e Intensidad máxima entre el SMA2 y el motor2 DC

En el primer caso para un SMA de menor longitud, el consumo de potencia es algo menor que el de un motor de similares características, en cambio cuando la longitud del SMA aumenta, su consumo de potencia media respecto al motor DC es mayor, debido a que se necesita una mayor tensión (11,5 V frente a los 6,3 V anteriores) para que la intensidad mínima de 200Ma, que exige el fabricante, pueda pasar por el cable y completar la transformación de martensita a austenita del flexinol.

Se ha obtenido también la intensidad máxima ya que puede ser un dato importante a la hora de dimensionar protecciones para nuestros actuadores y obtener un dato del consumo máximo de corriente, que nos va a ser necesario a la hora de elegir la alimentación eléctrica del sistema, permitiendo reducir el peso eligiendo baterías más pequeñas.

Por norma general, podemos concluir que la intensidad y potencias pico en los motores es superior a la de los cables SMA pero en cuanto a consumo medio de potencia todos están bastante igualados, resultando ventajoso el uso de cables SMA, en nuestro caso de 100  $\mu$ m, cuando su longitud es baja (<30 cm).

# Capítulo 8: RESOLUCIÓN DE PROBLEMAS, CONCLUSIONES Y DESARROLLOS FUTUROS

---

Problemas surgidos, conclusiones obtenidas y  
futuras investigaciones a realizar



## 8.1.- RESOLUCIÓN DE PROBLEMAS

Aunque durante la construcción de la plataforma de experimentación y durante la realización de pruebas han surgido numerosos problemas, solo se van a enumerar los más significativos y el procedimiento que se siguió para su resolución:

- **Pandeo de la parte superior de la plataforma de experimentación:** como se ha comentado anteriormente, a la hora de ir añadiendo actuadores, PCBs y demás componentes eléctricos y mecánicos la placa superior de metacrilato comenzó a pandear debido a que el grosor de esta placa de 2 mm era diferente al grosor de diseño inicial de 3 mm. Para solucionar este problema se instalaron 3 varillas roscadas de 4 mm desde la base de la plataforma hasta la parte superior. A estas varillas se les incluyó también unas pletinas de metal donde se ampliara la superficie de apoyo de la parte superior de la plataforma, tal y como se ve en la siguiente imagen:

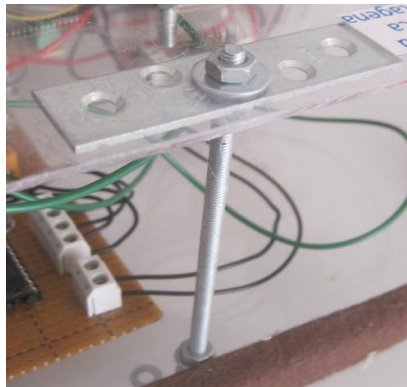


Fig. 8.1 – Varilla roscada para evitar el pandeo de la placa superior de metacrilato

- **Pletina de metacrilato quemada:** la primera pletina construida para que el cable SMA1 tirase de ella y moviera el engranaje grande, en el sistema de desplazamiento angular, se quemó por el roce con el cable SMA ya que esté al calentarse alcanza los 100 °C. Como solución se construyó una nueva pletina añadiéndole unas arandelas metálicas donde toca el SMA para que no queme el metacrilato (figura 4.13).
- **Se quemó algún amplificador L272M:** debido a su uso, al final falló uno de estos amplificadores. Al estar colocados sobre zócalos, no tendremos mayor problema en sustituir el integrado por uno nuevo.
- **Falta de corriente en el primer cable de Flexinol (SMA1):** en un principio este fallo se debía a las pinzas o cocodrilos de conexión de los extremos del SMA, ya que los cables no soldaban bien ellas, por lo que se lijaron un poco y se soldaron correctamente. Tras esto, en algunas ocasiones, seguía sin llegar corriente al SMA y era debido a la regleta de color naranja del circuito amplificador del SMA1 (apartado 4.4.2), se realizó una mejor soldadura pero se recomienda que si se repitiera el problema, esta regleta sea el primer punto del sistema a comprobar.

- **Rotura del primer cable SMA:** este percance se produjo varias veces durante la realización de este proyecto. Al estar trabajando con cables tan sumamente finos y que pasan por varios huecos, como son la caja del sensor de temperatura o poleas, puede pasar que cuando tengamos que quitar el cable y volverlo a colocar nos quede rozando en algún componente, por lo que al calentarse termina partiendo. En todos los casos el cable fue sustituido por otro pero hay que tener especial cuidado con la colocación de estos cables SMA de 100  $\mu\text{m}$ .
- **Cortocircuito y sustitución de la placa Arduino UNO:** este cortocircuito surgió en el circuito de control del motor DC lineal. A la hora de poner las tuercas para la sujeción del PCB, a la base de metacrilato, una de estas tuercas interconectó dos pistas eléctricas del PCB y al conectar la alimentación se produjo un cortocircuito. Este fenómeno hizo que hasta se apagara el PC, que en ese momento estaba conectado a la plataforma. Tras esto hubo que sustituir la placa Arduino UNO por otra y también el integrado LMD18200. Hay que tener en cuenta que este cortocircuito no dañó más componentes porque los tenemos todos con su propio interruptor y en ese momento estaban en circuito abierto, por lo que podemos ver la importancia de tener una plataforma de experimentación en módulos, tanto en el consumo de corriente como para la protección de circuitos electrónicos ante eventualidades.
- **Sustitución de la placa Arduino por fallo inesperado:** en la placa Arduino UNO nueva, colocada después del cortocircuito, se produjo un error en el cual nos mostraba el siguiente mensaje en el entorno de programación arduino: *“avrdude: stk500\_getsync(): not in sync: resp=0x00”*. Tras esto no nos dejaba cargar los drivers para poder controlar Arduino desde Matlab. Debido a esto se tuvo que cambiar por una nueva placa Arduino UNO.

## 8.2.- CONCLUSIONES

Con este proyecto se ha llevado a cabo el estudio de los materiales SMA y de las aplicaciones e investigaciones de mayor relevancia realizadas hasta la fecha sobre los cables de nitinol. Todo este estudio nos ha permitido saber cómo enfocar nuestro trabajo y poder diseñar y construir una plataforma de experimentación adecuada donde realizar nuestros experimentos en los cables de forma más exacta y más precisa. Este conocimiento ha permitido perfeccionar las técnicas de trabajo con los cables de nitinol y eliminar anteriores problemas, como derivaciones de corriente o inexactitudes en el control de estos.

De todas las pruebas realizadas en el presente proyecto, se pueden sacar bastantes conclusiones en el uso de los SMA, y más concretamente de los cables de flexinol, para su uso como actuadores en diferentes ámbitos de aplicación. Se ha mostrado en qué casos interesa sustituir actuadores convencionales, como motores DC, por cables SMA y cómo poder realizar un control de posición de éstos. Ambos actuadores resultan más o menos adecuados en función de nuestros requerimientos o necesidades. A modo de resumen, se va a mostrar en la tabla 8.1 las ventajas e inconvenientes, en cuanto a sus características más representativas, de usar cables SMA o motores como actuadores en sistemas de control. Debemos tener en cuenta que las características son diferentes en función del diámetro de los cables SMA y de la potencia de los motores, pero en nuestro caso, la **comparativa** se ha realizado para nuestros **cables SMA y motores DC**, los cuales son de potencias similares y a los que se le han realizado los mismos experimentos.

CARACTERÍSTICA	ACTUADORES SMA	MOTORES DC
<b>POTENCIA</b>	Por lo general, no pueden aplicar tanta potencia como los motores DC.	Mayor potencia, son capaces de vencer un par mayor.
<b>PESO Y VOLUMEN</b>	Muy bajo peso y ocupan muy poco espacio. Son idóneos para aplicaciones de miniaturización	Mucho más pesados que los SMA. Ocupan un volumen mucho mayor.
<b>RELACIÓN FUERZA / PESO</b>	Muy alta relación potencia/peso, aproximadamente unos 10000 W/kg.	Menor relación de potencia/peso, aproximadamente unos 25 W/Kg.
<b>RUIDO</b>	No producen ruido, son silenciosos	Son mucho más ruidosos, sobre todo si tienen que mover grandes cargas o tienen montados sistemas de transmisión.
<b>MANTENIMIENTO</b>	Se trata de un mecanismo limpio y su simplicidad mecánica y de actuación hacen que no requieran mantenimiento alguno.	Si tienen escobillas, requieren limpieza, por lo que necesitan un pequeño mantenimiento.
<b>PRECISIÓN</b>	En la fase de calentamiento, los SMA tienen un error de posición menor que los motores DC, mientras que en el enfriamiento su error de posición es mayor. En términos generales, el error de posición en los SMA es algo mayor que para motores DC, debido a su fase de enfriamiento.	Control de posición con un menor error de posición en términos generales, por tanto suelen tener una mayor precisión.
<b>CONTROL</b>	Control de posición más sencillo y más estable que en los motores DC. Menor zona muerta debida a cargas resistentes. Dificultad para un control muy preciso o realimentado con otras variables del cable SMA (temperatura, intensidad...) debido a su ciclo de histéresis.	Control de posición menos estable y con más dificultad para ajustar el controlador, debido a la zona muerta existente (apartado 6.1).
<b>VELOCIDAD DE RESPUESTA</b>	Generalmente los actuadores SMA son más lentos que los motores DC debido a sus restricciones de calentamiento y enfriamiento. Sin sistemas de refrigeración no pueden trabajar a frecuencias > 2 Hz.	Son más rápidos en su respuesta y pueden funcionar a frecuencias mucho más altas.
<b>CONSUMO ENERGÉTICO</b>	Por lo general, menor consumo de potencia que motores de similares características. Su consumo de corriente máxima suele ser mucho más pequeño, lo que implica ahorrar en las protecciones de mis circuitos y en la alimentación de estos (baterías de menor capacidad y tamaño).	En general, mayor consumo de potencia. Mayor consumo de intensidad máxima, por tanto necesitan baterías más grandes y protecciones también mayores. ( $I_{max}$ un 50% mayor) (apartado 7.3)
<b>EFICIENCIA ENERGÉTICA</b>	Menor eficiencia energética. En teoría de un 10%, aunque realmente es aún menor. La mayoría de la energía calorífica es perdida con el entorno.	Eficiencia energética mucho mayor, aproximadamente de un 80%.



<b>RANGO DE FUNCIONAMIENTO</b>	Poseen un rango de movimiento (deformación) limitado (aprox. 5% de su longitud)	No tienen límite de movimiento, en ausencia de carga. Giro de 360°.
<b>ELEMENTOS ADICIONALES</b>	No suelen necesitar sistemas de transmisión, como ejes o ruedas dentadas para transmitir su movimiento.	Suelen necesitar de sistemas de transmisión (ejes, ruedas dentadas, husillos...). Estos sistemas implican mantenimiento, ruido y suciedad.
<b>PROPIEDADES ESPECIALES</b>	Son biocompatibles y resistentes a la corrosión. Perfectos para aplicaciones médicas.	Por norma general no suelen darse estas propiedades. La fabricación con materiales especiales los encarecería demasiado.
<b>COSTE</b>	Su coste ha disminuido mucho en los últimos años. El coste de 1 m de flexinol de 100 es de 9 euros. El no necesitar sistemas de transmisión, y necesitar baterías de menor tamaño que los motores DC, hace que su precio algo mayor, pueda suponer un ahorro a largo plazo, en algunas aplicaciones.	El precio de los motores DC varía mucho dependiendo de sus características aunque una horquilla de precios normal rondaría los 3-8 euros.

Tabla 8.1 – Ventajas y desventajas del uso de SMA o Motores DC como actuadores en sistemas de control

Debemos tener en cuenta que muchos aspectos, como el consumo de potencia, la frecuencia máxima de trabajo o la fuerza que pueden realizar los cables SMA, varía con el tamaño de los cables, a mayor diámetro mayor consumo de potencia e Intensidad (tabla 2.4), más fuerza pueden realizar y tienen una respuesta más lenta, por lo que su frecuencia máxima de trabajo baja. Este fenómeno no solo ocurre a mayor diámetro, sino que a mayor longitud se ha demostrado que el cable SMA consume también una mayor potencia (apartado 7.3), mayor intensidad y su velocidad de actuación disminuye (apartado 7.2). Con todo esto podemos decir que no interesa utilizar cables de flexinol de longitudes grandes (por encima de unos 30 cm) ya que aumenta su consumo de potencia, incluso por encima del de motores de similares características. Por tanto los cables SMA no son recomendables para rangos de desplazamiento relativamente grandes.

A modo de conclusión, podemos decir que, sin ninguna duda los cables SMA presentan su mayor potencial para aplicaciones biomédicas y para dispositivos autónomos y de pequeño tamaño, ya que permiten disminuir el tamaño de las baterías y aplicar una alta relación de potencia en función a su peso y con una respuesta silenciosa y un control bastante preciso. Pero dependiendo de nuestros requerimientos y lo que nos interese en cada caso, un actuador nos resultará más ventajoso que otro, por lo que en este proyecto se ha mostrado una completa guía de características para poder ver las ventajas e inconvenientes de los SMA frente a actuadores convencionales y poder elegir el actuador más conveniente en cada caso.

En este proyecto también se han llevado a cabo técnicas de control en los SMA realizando modificaciones en el lazo de control para usar otras variables como realimentación, siendo estas la temperatura y la resistencia del cable SMA.

En cuanto a la **realimentación con la señal de Temperatura**, en primer lugar se ha demostrado que si se puede medir la temperatura en un cable SMA de 100  $\mu\text{m}$  de forma rápida, mediante la inclusión de un sensor que no necesita alimentación eléctrica, como es la

termopila. También se ha comprobado que podemos realizar un buen control de temperatura en nuestros cables de flexinol (apartado 6.2). Lo que no ha sido posible es relacionar este control de temperatura con la posición real del SMA, ya que debido a la histéresis que presentan estos materiales, se obtiene una relación con muchas no linealidades y en las cuales, con las técnicas utilizadas, no podríamos sacar ninguna relación posible. Debido a esto podemos decir que con las técnicas expuestas en este proyecto no es posible realizar un control de posición y midiendo la temperatura del cable SMA.

De igual forma ocurre en el caso de conseguir el control de posición mediante la **realimentación de la señal de intensidad**. Podemos realizar un buen control de intensidad en nuestro cable (apartado 6.3) pero no relacionarlo con la posición requerida en el SMA, debido a las no linealidades. En el caso de la intensidad esas no linealidades son algo menores que para la temperatura, pero de igual manera no nos permiten obtener una buena relación con los métodos empleados.

El control de posición con la señal de temperatura e intensidad por tanto solo se puede realizar cuando nuestra referencia de entrada sea simplemente un escalón y se deje al cable enfriarse totalmente.

Todos estos estudios exhaustivos y comparativas llevadas a cabo con cables de flexinol establecen una firme base para el desarrollo de sistemas de control más avanzados y su utilización como elementos actuadores para el desarrollo de nuevas aplicaciones SMA en la industria.

## 8.3.- DESARROLLOS FUTUROS

A partir de las conclusiones y desarrollos obtenidos en este proyecto, se pueden desarrollar numerosos trabajos futuros relacionados con el control y uso de los SMA. Unas líneas de investigación a seguir podrían ser:

- Estudios de consumos con cables de diferentes grosores a los estudiados y en diferentes configuraciones (en paralelo, en serie) e inclusión de nuevos elementos de sensorización, como algún sensor de fuerza, para intentar conseguir nuevos controles en nuestros cables de flexinol.
- Introducción de un cable o cables SMA para controlar la apertura o cierre de algunos aparatos quirúrgicos, como por ejemplo, una pinza de disección laparoscópica (figura 8.3). Realizar estudios sobre las mejores alternativas para medir la apertura o presión que se realiza con la pinza para obtener un control preciso de la apertura de esta.

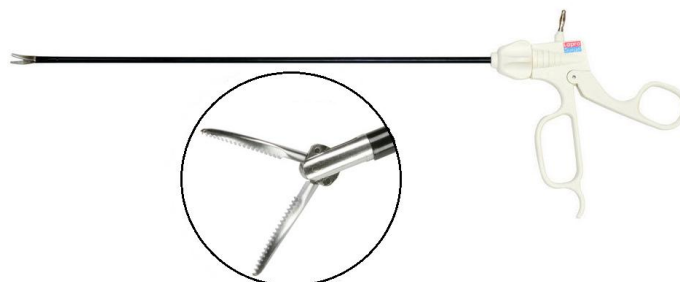


Fig. 8.2 – Pinza de disección laparoscópica, usada para el agarre y la separación de tejidos en cirugía

- Como se ha demostrado en este proyecto, no ha sido posible sacar una relación de la temperatura del cable con la posición real de este debido a su comportamiento no lineal (histéresis). Se deberían utilizar técnicas de identificación que me permitan aprender no linealidades (redes neuronales) y así poder realizar un control de la posición exacto mediante la medición de la temperatura del cable.
- Desarrollo de actuadores diminutos, donde es verdaderamente ventajoso el uso de cables SMA. En ellos se hará uso de componentes electrónicos SMD para reducir espacio y un estudio de consumos del sistema para ver si es posible la alimentación con pequeñas baterías, como pilas de botón.

## Capítulo 9: BIBLIOGRAFÍA

Diseño e implementación de todo el hardware necesario.



- [1] Ramírez, G., (2012), “Estudio comparativo de actuador SMA vs motor DC. Diseño y construcción de una plataforma de pruebas”, Proyecto fin de carrera, Universidad Politécnica de Cartagena.
- [2] Proyecto ACTIMAT del Gobierno Vasco, *Materiales inteligentes: materiales con memoria de forma*, Consulta: 30 Septiembre 2013, < <http://www.actimat.es> >
- [3] Herranz, S., (2011), “Control de posición de un material con memoria de forma (SMA)”, Proyecto fin de carrera, Universidad Carlos III de Madrid.
- [4] Greninger, A.B.; Mooradian, V.G., (1938), “Strain transformation in metastable beta copper-zinc and beta copper-tin alloys”, AIME Transactions, Vol. 128, pp. 337-368.
- [5] Cano, A., (2010), “Estudio e implementación de actuadores basados en aleaciones SMA”, Proyecto fin de carrera, Universidad Carlos III de Madrid.
- [6] Chang, L.C.; Read, T.A., (1952), “Plastic deformation and diffusionless phase changes in metals: the gold cadmium beta phase”, AIME Transactions, Vol. 191, pp. 47-52.
- [7] Buehler, W.J.; Wang, F.E., (1968), “A summary of recent research on the nitinol alloys and their potential application in ocean engineering”, Ocean Engineering, Vol. 1, pp. 105-120.
- [8] Soul, H.R., (2005), “Aplicaciones de la superelasticidad en aleaciones con memoria de forma para control de vibraciones en estructuras”, PhD thesis, Universidad Nacional de Cuyo.
- [9] De la Flor, S., (2005), “Simulación numérica y correlación experimental de las propiedades mecánicas en las aleaciones con memoria de forma”, PhD thesis, Universidad Politécnica de Cataluña.
- [10] Cano, I.G.; Cinca, N.; Dosta, S.; Guillemany, J.M., (2008), “Estudio de polvos y recubrimientos metaestables de NiTi obtenidos por proyección térmica de plasma”, Revista de metalurgia, Vol. 44, No. 3, pp. 197-205.
- [11] Teh, Y.H., (2008), “Fast, Accurate Force and Position Control of Shape Memory Alloy Actuators”, PhD thesis, Dept. Information Engineering, The Australian National University, Canberra, Australia.
- [12] Lahoz, R.; Puértolas, J.A., (2002), “Entrenamiento y memoria de forma de doble camino en aleaciones niti”, VIII Congreso de Propiedades Mecánicas de Sólidos, pp. 185-194.
- [13] Michiardi, A., (2005), “Nuevo tratamiento de oxidación en aleaciones de niti para aplicaciones biomédicas. Caracterización superficial y respuesta biológica in vitro”, PhD thesis, Universidad Politécnica de Cataluña.
- [14] Mavroidis, C.; Pfeiffer, C.; Michael, M., (1999), “Conventional actuators, shape memory alloys, and electrorheological fluids”, in Automation Miniature Robotics and Sensors for Non-Destructive Testing and Evaluation, Ed. Bar-Cohen, Rutgers University, New Jersey.

- [15] Leppaniemi, A., (1998), "Shape memory alloys: applications and commercial aspects", *Mechatronics '98: proceedings of the 6th UK Mechatronics Forum International Conference*, Ed. Pergamon, Amsterdam.
- [16] Villoslada, A., (2010), "Diseño y aplicación de un actuador SMA en el control de manos robóticas", Proyecto fin de carrera, Universidad Carlos III de Madrid.
- [17] Buehler, W.J.; Wiley, R.C., (1965), "Nickel-Based Alloys", U.S. Patent Number 3.174.851, Naval Ordnance Laboratory.
- [18] Kauffman, G.B.; Mayo, I., (1996), "The story of nitinol: the serendipitous discovery of the memory metal and its applications", in *The chemical educator*, Vol. 2, No. 2, Ed. Springer-Verlag, New York.
- [19] Johnson, A.D., (1998), "State-of-the-art of SMA actuators", TiNi alloy company, San Leandro (CA).
- [20] Gómez, A.; Restrepo, C.A., (2005), "Cables musculares", *Revista EIA*, No. 4, Escuela de Ingeniería de Antioquía, Medellín, pp. 103-111.
- [21] Ryhänen, J., (1999), "Biocompatibility evaluation of nickel-titanium shape memory metal alloy", PhD thesis, OULU University.
- [22] Morgan, N.B., (2004), "Medical shape memory alloy applications – the market and its products", *Materials Science and Engineering: A*, Vol. 378, pp. 16-23.
- [23] Petrini, L.; Migliavacca, F., (2011), "Biomedical applications of shape memory alloys", *Journal of Metallurgy*, Vol. 2011, Article ID 501483.
- [24] Conti, M., (2010), "SMA and numerical simulations: a focus on biomedical applications", Seminario IUSS, Università degli Studi di Pavia.
- [25] Domingo, S.; Puértolas, S., Sánchez, F.; Gracia-Villa, I.; Puértolas, J.A., (2002), "Aplicación de la superelasticidad del niti a los stents: consideraciones termomecánicas", VIII congreso nacional de propiedades mecánicas de sólidos, Gandía, pp. 417-424.
- [26] Bahraminasab, M.; Sahari, B.B., (2013), "NiTi shape memory alloys, promising materials in orthopedic applications", in *Shape Memory Alloys - Processing, Characterization and Applications*, Ed. InTech, Lisboa, pp. 261-278.
- [27] Linzoain, A.P., (2009), "Fabricación y caracterización de aleaciones de Ti-Ni con porosidad controlada", Proyecto fin de carrera, Universidad de Sevilla.
- [28] Angulo, E., (1993), "Invention: device for removing foreign objects from anatomic organs", in *NASA Tech Briefs*, Vol. 17, No.3, p. 18.
- [29] Wu, M.H.; Schetky, L.M., (2000), "Industrial applications for shape memory alloys", In *Proceedings of the International Conference on Shape Memory and Superelastic Technologies*, California, pp. 171-182.

- [30] Mavroidis, C., (2002), "Development of Advanced Actuators Using Shape Memory Alloys and Electrorheological Fluids", in *Research in Nondestructive Evaluation*, Vol.14, No. 1, Ed. Springer-Verlag, New York, pp. 1-32.
- [31] Hobbizine, Robotics & Electronics, Flexinol and other nitinol muscle wires, Consulta: 15 de Noviembre de 2013, < <http://www.hobbizine.com>>
- [32] Hirose, S.; Ikuta, K.; Umetani, Y., (1985), "A new design method of servo-actuators based on the shape memory effect", In *Theory and Practice of Robots and Manipulators*, The Fifth CISMIFToMM Symposium, Hermes Publishing, pp. 339-349.
- [33] Ikuta, K.; Tsukamoto, M.; Hirose, S., (1988), "Shape memory alloy servo actuator system with electric resistance feedback and application for active endoscope", In *Proc. Of 1988 IEEE Robotics and Automation*, Philadelphia, pp. 427-430.
- [34] Asua, E.; Etxebarria, V.; García-Arribas, A., (2007), "Diseño y control de actuadores basados en materiales con memoria de forma", Departamento de Electricidad y Electrónica, Facultad de Ciencia y Tecnología, Universidad del País Vasco (UPV/EHU).
- [35] Grant, D.; Hayward, V., (1997), "Variable structure control of shape memory alloy actuators", In *IEEE Control Systems Magazine*, Vol. 17, No. 3, p. 80-88.
- [36] Grant, D.; Hayward, V., (1997), "Controller for a high strain shape memory alloy actuator: quenching of limit cycles", in *Proceedings. IEEE International Conference on Robotics and Automation*, Albuquerque, Vol. 1, pp. 254-259.
- [37] Reynaerts, D.; Brussel, H., (1991), "A SMA high performance actuator for robot hands", In *supplcmnt au journal de physique III*, Vol. 1, Katholieke Universiteit Leuven, Belgium.
- [38] DeLaurentis, K.; Mavroidis, C.; Pfeiffer, C., (2000), "Development of a shape memory alloy actuated robotic hand", Rutgers University & CyBotic Technologies Inc, New Jersey.
- [39] Guevara, J.A.; Flores, J.C.; Mocencagua, D., (2002), "Robot con alambre muscular "GJ-M"", en Segundo Congreso Nacional de Electrónica de México, Facultad de Ciencias de la Electrónica BUAP.
- [40] Martínez y Cardenas, J.R.; Diego, F.; Claris, T.B.; Murcio, I.A., (2007), "Implementación de un sistema motriz con alambres musculares y controlado con un microcontrolador Atmega16", Instituto Tecnológico de Oaxaca.
- [41] Bergamasco, M.; Salcedo, F.; Dario, P., (1989), "A linear SMA motor as direct-drive robotic actuator", In *Proceedings. IEEE International Conference on Robotics and Automation*. Vol. 1, pp. 618-623.
- [42] Rediniotis, O.K.; Lagoudas, D.C., (2001), "Shape memory alloy actuators as locomotor muscles", Aerospace Engineering Department, Texas A&M University.
- [43] Mosley, M.J.; Mavroidis, C.; Pfeiffer, C., (1999), "Design and dynamics of a shape memory alloy wire bundle actuator", In *Proceedings of the ANS, 8 th Topical Meeting on Robotics and Remote Systems*, Rutgers University, New Jersey.



- [44] Elahinia, M.H.; Seigler, T.M.; Leo, D.J.; Ahmadian, M., (2004), "Nonlinear stress-based control of a rotary SMA-actuated manipulator", In *Journal of Intelligent Material Systems and Structures*, Vol. 15, Sage Publications.
- [45] Teh, Y.H.; Featherstone, R., (2008), "An architecture for fast and accurate control of shape memory actuators", In *International Journal of Robotics Research*, Vol. 27, No. 5, Sage Publications.
- [46] Russell, R.A.; Gorbet, R.B., (1995), "Improving the response of SMA actuators", In *Proceedings. IEEE International Conference on Robotics and Automation*, Vol. 3, pp. 2299-2304.
- [47] Featherstone, R.; Teh, Y.H., (2004), "Improving the Speed of Shape Memory Alloy Actuators by Faster Electrical Heating", In Proc. 9th Int. Symp. Experimental Robotics, Singapore, paper ID 128.
- [48] Jayender, J.; Patel, R.V.; Nikumb, S.; Ostojic, M., (2008), "Modeling and control of shape memory alloy actuators", in *IEEE Transactions on Control Systems Technology*, Vol. 16, No. 2, pp. 279-287.
- [49] Teh, Y.H.; Featherstone, R., (2004), "A new control system for fast motion control of SMA actuator wires", In *Shape Memory And Related Technologies (SMART 2004)*, Singapore.
- [50] Ahn, K.K.; Nguyen, B.K., (2006), "Position control of shape memory alloy actuators using self tuning fuzzy PID controller", In *International Journal of Control, Automation, and Systems*, Vol. 4, No. 6, pp. 756-762.
- [51] González-Quijano, J.; Villoslada, A.; Abderrahim, M.; González-Gómez, J.; Bensalah, C., (2011), "Perspectives in SMA actuators: a frequency response and power consumption study", In *ICRA 2011 Workshop on Biologically-inspired Actuation*, Shanghai, China.
- [52] Ikuta, K., (1990), "Micro/miniature shape memory alloy actuator", In *Proceedings. IEEE International Conference on Robotics and Automation*, Vol. 3, pp. 2156-2161.
- [53] Bizdoaca, N.G.; Petrisor, A.; Patrascu, D.; Pana, C.; Vasile, C., (2006), "Mathematical model and conventional control for a shape memory alloy tendon actuated tentacle robot", In *IEEE International Conference on Automation, Quality and Testing, Robotics*, Vol. 2, pp. 243-248.
- [54] Song, G., (2007), "Design and control of a nitinol wire actuated rotary servo", In *Smarts Materials and Structures*, Vol. 16, pp. 1796-1801, IOP Publishing.
- [55] Lan, C.C.; Lin, C.M.; Fan, C.H., (2011), "A self-sensing microgripper module with wide handling ranges", In *IEEE/ASME Transactions on Mechatronics*, Vol. 16, No. 1, pp. 141-150.
- [56] Nikdel, N.; Nikdel, P.; Badamchizadeh, M.A.; Hassanzadeh, I., (2014), "Using neural network model predictive control for controlling shape memory alloy-based manipulator", In *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, Vol. 61, No. 3, pp. 1394-1401.

- [57] Lai, C.M.; Chu, C.Y.; Lan, C.C., (2013), "Design of a miniature manipulator actuated by antagonistic shape memory alloys", In IEEE/ASME International Conference on Advanced Intelligent Mechatronics (AIM), pp. 217-222, Wollongong, Australia.
- [58] Andrianiesis, K.; Tzes, A., (2013), "Design of a innovative prosthetic hand with compact shape memory alloy actuators", In 21st Mediterranean Conference on Control & Automation (MED), pp. 697-702, Crete, Greece.
- [59] Engeberg, E.D.; Hariharan, S.I.; Kent, B.A., (2013), "Electromechanical conversion of low-grade heat into electricity with shape memory alloy actuators", In IEEE Energytech, pp. 1-6, Cleveland.
- [60] Chaitanya, S.K.; Dhanalakshmi, K., (2013), "Control of shape memory alloy actuated gripper using sliding mode control", In IEEE International Conference on Control Applications (CCA), pp. 1247-1252, Hyderabad, India.
- [61] Reynaerts, D.; Van Brussel, H., (1996), "Design of a shape memory alloy actuated implantable drug delivery system", In Eurosensors X, pp. 1185-1188, Leuven, Belgium.
- [62] Lan, C.C.; Fan, C.H., (2010), "An accurate self-sensing method for the control of shape memory alloy actuated flexures", In Sensors and Actuators A: Physical, Vol. 163, pp. 323-332. Elsevier B.V.
- [63] Troisfontaine, N.; Bidaud, P.; Dario, P., (1997), "Control experiments on two SMA based micro-actuators", In Fifth International Symposium on Experimental Robotics (ISER), pp. 1-11, Barcelona, Spain.
- [64] Meier, H.; Oelschlaeger, L., (2004), "Numerical thermomechanical modelling of shape memory alloy wires", In Materials Science and Engineering: A, Vol. 378, pp.484-489, Elsevier.
- [65] Hashimoto, M.; Takeda, M.; Sagawa, H.; Chiba, I.; Sato, K., (1985), "Application of shape memory alloy to robotic actuators", In *Journal of Robotic Systems*, Vol. 1, No. 1, pp. 3-25.
- [66] Choi, E.; Cho, S.; Hu, J.W.; Park, T.; Chung, Y., (2010), "Recovery and residual stress of SMA wires and applications for concrete structures", In Smart Materials and Structures, Vol. 19, pp. 1-10, IOP Publishing.
- [67] Song, G.; Kelly, B.; Agrawal, B.N.; Lam, P.C.; Srivatsan, T.S., (2000), "Application of shape memory alloy wire actuator for precision position control of a composite beam", In Journal of Materials Engineering and Performance, Vol. 9, No. 3, pp. 330-333, ASM international.
- [68] Colorado, J.D., (2012), "BaTboT: a biologically inspired flapping and morphing bat robot actuated by SMA-based artificial muscles", PhD thesis, Universidad Politécnica de Madrid.
- [69] O'Toole, K., (2011), "A methodology towards comprehensive evaluation of shape memory alloy actuators for prosthetic finger design", PhD Thesis, Dublin Institute of Technology.

- [70] Pallás, R., (2005), “Sensores piroeléctricos”, en Sensores y Acondicionadores de Señal, (4ª edición), Marcombo, Barcelona, pp. 299-304.
- [71] Pallás, R., (2005), “Amplificadores con bajas derivas”, en Sensores y Acondicionadores de Señal, (4ª edición), Marcombo, Barcelona, pp. 322-324.
- [72] Aplicaciones Tecnológicas Electrónica digital Práctica, *Los Motores Unipolares (Stepper)*, Consulta: 3 Diciembre 2013, < <http://www.hispavila.com> >
- [73] Hamamatsu, Characteristics and use of infrared detectors, Technical information SD12, Consulta: 14 de Diciembre de 2013, <<http://www.hamamatsu.com>>
- [74] Ogata, K., (2010), *Ingeniería de control moderna*, (5ª edición), Pearson, Madrid.

# ANEXOS

Diseño e implementación de todo el hardware necesario.



## A.- PROCEDIMIENTOS A SEGUIR EN NUESTRA PLATAFORMA DE EXPERIMENTACIÓN

### A.1.- PRIMERA CONEXIÓN DE ARDUINO AL PC Y MATLAB

- 1) Para la conexión de arduino a un pc, necesitaremos primero descargar software. Tendremos que descargar los drivers de arduino y su programa (IDE), desde la dirección: <http://arduino.cc/en/Main/Software#.Uy1m-N5Nlw>. Tras esto, conectamos la tarjeta arduino Uno al PC que detectará el nuevo hardware y pedirá instalar los drivers, para ello, le daremos la ruta de los archivos anteriormente descargados, así, comenzará la instalación de los drivers. Después de la instalación, ya se podrá usar la tarjeta Arduino en el PC.
- 2) Ya podemos abrir la aplicación arduino que está en los archivos descargados, y en herramientas- tarjeta, seleccionamos Arduino Uno. Con esta aplicación ya podremos programar la tarjeta con el propio código de arduino.
- 3) Programar en código arduino no nos interesa para nuestro proyecto ya que lo que queremos es usar la placa como tarjeta de adquisición de Datos y poder tratar estos datos con el Software Matlab. Para ello se descargarán los drivers que hacen esto posible desde la dirección: <http://www.mathworks.es/hardware-support/arduino-matlab.html>. Existen drivers tanto para Matlab como para Simulink, aunque estos últimos no son de nuestro interés en este proyecto.
- 4) Después de descargar estos drivers, tendremos que instalarlos, para esto abriremos el entorno de programación de Arduino descargado a la misma vez que los drivers de Arduino, desde su web. Desde el entorno de programación se pulsa archivo y abrir y se abre la carpeta de los últimos drivers para Matlab descargados, se entra en la carpeta llamada "pde", donde se encontrará un archivo llamado "adiosrv" que es el que debemos abrir. Tras abrirlo y con la tarjeta arduino conectada al PC, pulsamos en el entorno de programación arduino cargar y pasaremos el código al microcontrolador de la placa.
- 5) Por último nos queda abrir Matlab y ejecutar el fichero denominado install\_arduino.m que se encuentra en los archivos bajados de los drivers de Matlab y ya estará listo nuestro arduino para ser usado como tarjeta de adquisición de datos en Matlab.

## A.2.- PROTOCOLO DE ACTUACIÓN. CONEXIÓN DE NUESTRA PLATAFORMA A MATLAB. FUNCIONAMIENTO DE ACTUADORES Y SENSORES.

- 1) Antes de nada, asegurarse de que todos los interruptores en nuestra plataforma están en la posición de apagado (hacia la izquierda), ya que pueden haber salidas de arduino a nivel alto y llegarle corriente a cables de flexinol y poder dañarlos.
- 2) Conectamos arduino al PC y abrimos Matlab, donde estando en el directorio adecuado, ejecutamos el script llamado inicioArduino (anexo B.4.1). Este script conecta con arduino y establece los pines necesarios como entrada o salida, poniendo las salidas a nivel bajo.
- 3) Tras ejecutar este script, ahora podemos activar los interruptores de los módulos de la plataforma que se vayan a usar sin ningún problema y poder ejecutar todas las pruebas y programas que se requieran.

\*Nota: Para desconectar la plataforma, primero establecer todos los interruptores en posición de apagado y luego cerrar Matlab y desconectar. Si se cierra Matlab antes de apagar los interruptores, algunas salidas de arduino se ponen a nivel alto y pueden dañar los cables SMA.

A la hora de trabajar con cualquier actuador o sensor de nuestra plataforma, debemos tener claro que interruptores gobiernan la alimentación de cada uno. Aunque esto se puede observar en nuestro plano del anexo C, se ha construido la siguiente tabla donde podemos ver cada interruptor de la maqueta, qué módulos está alimentando:

INTERRUPTORES A ACTIVAR (ON)	MÓDULOS ACTIVADOS
VOLTÍMETRO	Activa el Voltímetro para ver voltaje de la Batería
SMA 1	Alimenta el circuito amplificador del SMA1, el potenciómetro multivuelta y el sensor de Intensidad.
SERVO MOTOR	Alimenta el circuito de control del Motor1 DC.
TERMOPILA	Alimenta el circuito acondicionador de la termopila.
SMA 2	Alimenta el circuito amplificador del SMA2 y el potenciómetro slider.
MOTOR LINEAL	Alimenta el circuito de control del Motor2 DC.

Tabla A.1 – Módulos activados con cada uno de los interruptores de la plataforma

\*Nota: debemos tener en cuenta que aunque se alimenten los circuitos, necesitan las señales adecuadas desde arduino para poder trabajar. Otra consideración a tener en cuenta es que si necesitamos dos módulos que se alimentan con dos interruptores diferentes, debemos poner en posición de ON (hacia la derecha) los dos interruptores. Parece algo trivial, pero puede olvidarse al empezar a realizar algunas pruebas. Por ejemplo, para realizar control de posición en el motor1 DC, se debe activar el interruptor SERVO MOTOR y el interruptor SMA 1 ya que alimenta al potenciómetro con el cual obtenemos la señal de realimentación.

### A.3.- PROCEDIMIENTOS PARA DESMONTAR LA PARTE SUPERIOR DE LA PLATAFORMA

- 1 – Darnos cuenta de que todos los interruptores están en posición de apagado (izquierda) y arduino desconectado del USB.
- 2 – Empezamos por destornillar los tres tornillos de la parte media superior de la plataforma, los que hay en las varillas roscadas de sujeción de la parte superior.
- 3 – Tras esto procedemos con cuidado a desatornillar los pequeños tornillos de las esquinas de nuestra plataforma que van unidos a las escuadras laterales.
- 4- Una vez desatornillados todos los tornillos de sujeción de la parte superior, giramos la plataforma, con la parte posterior hacia nosotros y con cuidado levantamos la parte superior.
- 5- Una vez sacada la parte superior hacia arriba, todas las conexiones están pensadas para que la parte superior pueda apoyarse verticalmente delante de la plataforma sin tener que desconectar nada, tal y como vemos en las siguientes imágenes:

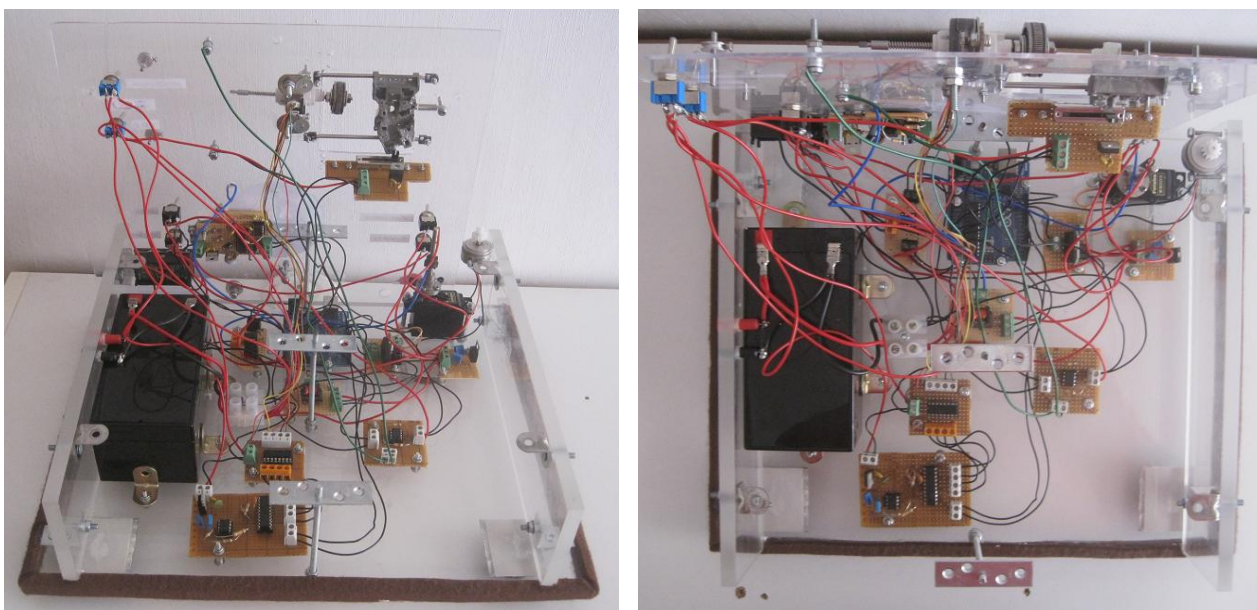


Fig. A.1 – Plataforma de experimentación abierta, para realizar tareas de manipulación

Tened mucho cuidado con los cables SMA sobretodo con el que va unido al volante para el desplazamiento angular, ya que queda colgando y debemos tratarlo con cuidado para evitar que se enganche en cualquier parte y pueda romperse.

6 – Una vez la tenemos como en la figura anterior, procurar apoyar la parte vertical por el otro lado en algo y ya podemos proceder a desmontar o reparar cualquier hardware de la plataforma.

NOTA: Para volver a montarla, se han de seguir los pasos anteriores de forma inversa.



## A.4.- CARGA DE LA BATERÍA

Cuando la batería se descarga por debajo de unos 11,4 V consideramos que no va a haber repetitividad en nuestros experimentos y procederemos a cargarla, siempre y cuando nos sea posible. Para ello, utilizaremos una fuente de corriente continua. En nuestro caso se ha usado una del laboratorio, para la carga deberíamos establecer como parámetros:

<b>VOLTAJE</b>	13,5 a 13,8 V
<b>INTENSIDAD</b>	0,95 A (0,96 A max.)

La carga dura aproximadamente unas 4 horas, hasta que veamos que la corriente en la fuente de alimentación se hace cero, que es cuando tendríamos nuestra batería cargada.

Desde la hoja de características del fabricante o datasheets, que se adjunta en el CD-ROM del proyecto, se nos dice que es recomendable cada tres meses realizar una carga de compensación o de ciclo de servicio, aunque no es absolutamente necesario. Esta carga consistiría en:

- 1 – Descargar la batería completamente.
- 2- Cargar durante 24 horas a 0,96 A y con un voltaje entre 14,4 y 15 V.

Aunque como hemos comentado esta carga de ciclo de servicio no es imprescindible realizarla, a no ser que tengamos problemas con nuestra batería.

\*Nota: Si que es necesario cargar las baterías por lo menos, mediante el método convencional, una vez cada 6 meses, para que no vaya perdiendo muchas de sus propiedades.

## B.- SOFTWARE UTILIZADO

### B.1.- SOLIDWORKS

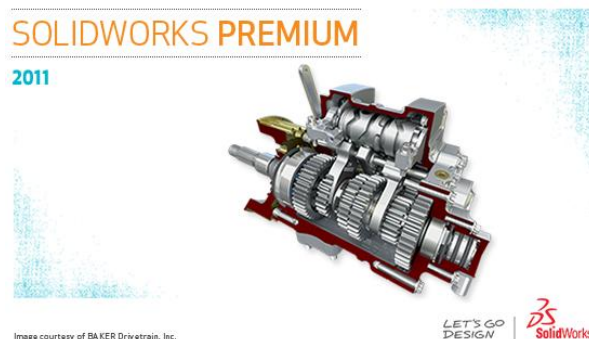


Fig. B.1 – Software de diseño 3D Solidworks

SolidWorks es un programa de diseño asistido por computadora para modelado mecánico. El programa permite modelar piezas y conjuntos y extraer de ellos tanto planos técnicos como otro tipo de información necesaria para la producción. Es un programa que funciona con base en las nuevas técnicas de modelado con sistemas CAD.

Este software, en su versión 2011, se ha usado en la realización de nuestro trabajo, para crear el croquis en 3D del diseño inicial de nuestra plataforma de pruebas y obtener sus planos (capítulo 4.1) y también para realizar el croquis 3D del pequeño cubo de aluminio que encierra al sensor de temperatura (capítulo 4.4.4) para que resultara más intuitivo a la hora de obtener los perfiles de aluminio mostrar la finalidad o forma que debían tener.

### B.2.- ORCAD

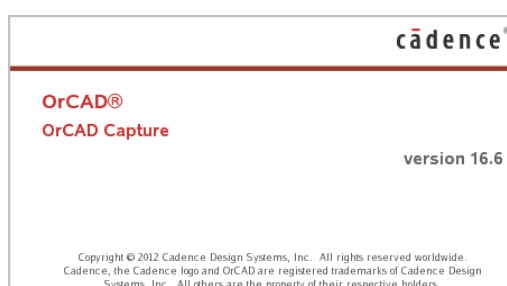


Fig. B.2 – Software de diseño electrónico Cadence Orcad

Orcad es una herramienta de software usada principalmente para el diseño electrónico. En él podemos crear esquemas electrónicos, tanto analógicos como digitales, realizar el diseño de las placas de circuito impreso, simular el comportamiento de nuestros circuitos...

Con este software, en su versión 16.6, se han realizado todos los esquemas electrónicos que aparecen en el presente proyecto. Al estar trabajando con componentes muy

específicos, muchos de ellos no aparecían en las librerías preinstaladas de Orcad por lo que se crearon todos los diseños de los componentes que faltaban y se albergaron en una nueva librería, creada para tal fin, llamada “ginesmm.olb”. Esta librería puede encontrarse en el CD-ROM adjunto al proyecto. Los componentes nuevos que se han creado e incluido en esta librería, son los siguientes:

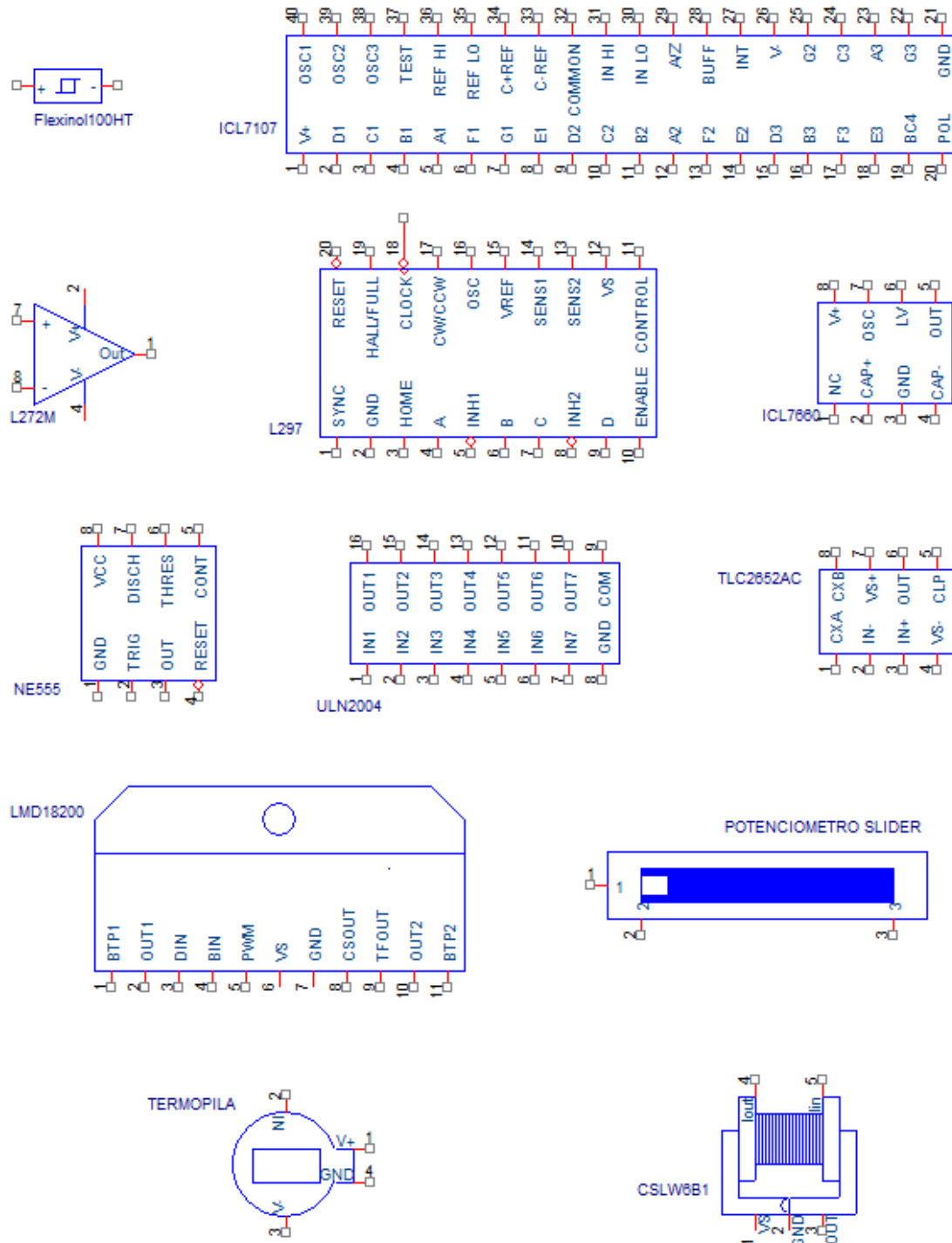


Fig. B.3 – Componentes electrónicos creados y guardados conjuntamente en la librería ginesmm.olb

En Orcad también se ha implementado el plano de conexiones eléctricas del anexo C. Las placas electrónicas que ahí aparecen también se encuentran en la librería “ginesmm.olb”.

## B.3.- MATLAB

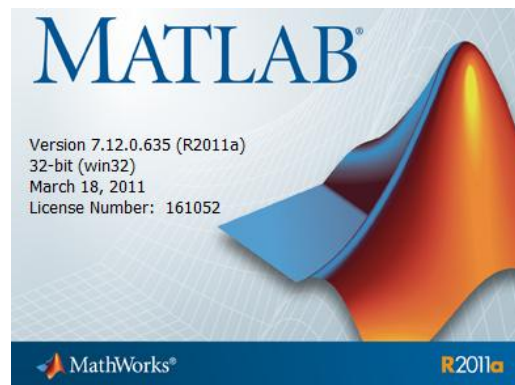


Fig. B.4 – Software Matlab para adquisición de datos y programación

MATLAB, de forma simplificada, es un software para realizar cálculos numéricos con vectores y matrices. Se puede trabajar también con números escalares (tanto reales como complejos), con cadenas de caracteres y con otras estructuras de información más complejas. Matlab es un lenguaje de alto rendimiento para cálculos técnicos que integra:

- Análisis numérico
- Cálculo matricial
- Procesamiento de señales
- Gráficos

Permite resolver muchos problemas numéricos en una fracción del tiempo que llevaría hacerlo en lenguajes como C, Basic o Fortran. Uno sus puntos fuertes es que podemos crear fácilmente nuestras propias funciones y programas especiales (conocidos como M-archivos) en código Matlab, que podemos agrupar en Toolbox (también llamadas librerías), que son una colección especializada de M-archivos para trabajar en clases particulares de problemas como: procesamiento de señales, adquisición de datos, identificación de sistemas, tratamiento de imágenes... En resumen, las prestaciones más importantes de Matlab son:

- Escritura del programa en lenguaje matemático.
- Implementación de las matrices como elemento básico del lenguaje, lo que permite una gran reducción del código, al no necesitar implementar el cálculo matricial.
- Un gran contenido de órdenes específicas, agrupadas en toolboxes.
- Posibilidad de ampliar y adaptar el lenguaje, mediante ficheros de script y funciones.

En definitiva Matlab es un sistema ideal para desarrollar sistemas avanzados de control. Una de las herramientas de Matlab usadas es Simulink, el cual es un entorno de programación visual, que funciona sobre el entorno de programación Matlab, donde podemos crear diagramas de bloques y mostrar de forma más intuitiva los lazos de control con las funciones de transferencia de nuestros actuadores.

En nuestro proyecto Matlab constituye el software central del mismo, ya que en Matlab se han implementado todos los programas (scripts) que manejan nuestra tarjeta arduino UNO, y que envían, recogen y muestran todos los datos de nuestra plataforma de experimentación.

Se ha usado Simulink únicamente como una herramienta de apoyo. Con ella se han representado los lazos de control y se ha llevado a cabo, con las funciones de transferencia obtenidas, un control simulado de las respuestas de mis actuadores. Nuestra versión de Matlab y Simulink utilizada ha sido la versión R2011a, aunque no habría problema a ejecutar los script en versiones anteriores o posteriores.

A continuación se van a mostrar los script que se han desarrollado para llevar a cabo todos los experimentos realizados en la plataforma de experimentación:

## B.4.- PROGRAMAS (SCRIPTS) DESARROLLADOS

### B.4.1.- InicioArduino.m

```
% Programa para ejecutar al inicio, antes de conectar la alimentación
% de la batería a cualquier módulo. Establece los puertos de Arduino
% como entradas o salidas y los pone a 0V.

global a

a=arduino('COM5');      % Se establece la conexión con la tarjeta
Arduino.

a.pinMode(5,'output')   % Pin 5 PWM para el SMA2

a.pinMode(6,'output')   % Pin 6 PWM para la velocidad del motor2 DC
a.pinMode(7,'output')   % Pin 7 que controla la dirección del motor2 DC

a.pinMode(10,'output')  % Pin 10 PWM para el SMA1

a.pinMode(11,'output')  % Pin 11 PWM para la velocidad del motor1 DC.
a.pinMode(12,'output')  % Pin 12 que controla dirección del motor1 DC
a.pinMode(13,'output')  % Pin 13 para apagar la luz del LED de arduino

% Se ponen todos los valores de las salidas a cero

a.analogWrite(5,0)
a.analogWrite(6,0)
a.digitalWrite(7,0)     % Pin 7 a cero (motor DC hacia la derecha)
a.analogWrite(10,0)
a.analogWrite(11,0)
a.digitalWrite(12,0)    % Pin 12 a cero (sentido contrario agujas
reloj)
a.digitalWrite(13,0)    % Apaga el LED amarillo
```

## B.4.2.- Analogica.m

```
% Programa para probar los valores de las entradas analógicas.

global salida;
global tiempo;
tiempo=[];           % Establece las variables como vectores
salida=[];
tic;

while toc < 1
    av=a.analogRead(0); % Establezco el número de la entrada a leer
                        % 0 --> Potenciómetro
                        % 1 --> Termopila
                        % 2 --> Sensor Intensidad
                        % 3 --> Potenciómetro Lineal (Slider)

    avolt=(5*av)/1024; % Se pasa la resolución de hasta 1024 a
voltios

    salida=[salida avolt]; % Introduce en salida los V que da el
sensor
    tiempo=[tiempo toc]; % Se guarda en tiempo cada intervalo de
muestra
end

plot(tiempo,salida,':','Linewidth',2) %Muestra gráfica Tiempo/Salida
```

## B.4.3.- EscalonMotor.m

% Este programa da un escalón al motor1 DC o motor2 DC y representa su  
% posición o velocidad en función del tiempo.

```
global tiempo; %Se declaran como variables globales tiempo y salida.
global salida;
tiempo=[];
salida=[];
poten=[];
vel=[];
tic;           % Se empieza a contar tiempo

while toc < 10 % Mientras toc sea menor que ese valor en segundos,
               % se seguirán recogiendo datos

    if toc < 10
        a.analogWrite(6,255); % Se aporta el valor de voltaje
                               % establecido, a la salida 11 (motor1 DC)
    else
        a.analogWrite(6,0);   % o a la 6 (motor2 DC)

        a.analogWrite(6,0);   % Ponemos a 0V la salida 11(motor1 DC) o
                               % 6(motor2 DC)
    end
```

```

av=(a.analogRead(3));    % Se lee el valor del potenciómetro, 0
                        % para el motor1 DC y 3 para el motor2 DC

poten=[poten av];       % En poten se guardan los valores leídos.

%gra=(av-poten(1))/-2.84167; %Pasa la resolución del potenciómetro
gra=(av-poten(1))/-51.15;  %a grados (primera ecuación)o mm
                        %según estemos con motor1 o motor2 DC

salida=[salida gra];    % En salida guarda la posición en
                        % grados o mm

tiempo=[tiempo toc];   % En tiempo se guarda el tiempo de
                        % cada muestra

end

% Parte para el cálculo de las gráficas velocidad/tiempo
% Se realizan los incrementos de posición:
incdat=salida(2:length(salida))-salida(1:length(salida)-1);

% Se realizan los incrementos de tiempo:
inct=tiempo(2:length(tiempo))-tiempo(1:length(tiempo)-1);

vel=incdat./inct;      % Se obtiene la velocidad

% Para velocidad, quito a tiempo y salida un valor para que sean del
% mismo tamaño que el vector "vel"

%tiempo=tiempo(1:length(tiempo)-1);
%salida=salida(1:length(salida)-1);

%Muestra por pantalla la gráfica Tiempo / Velocidad.
%hold on
%plot(tiempo,vel,'b','Linewidth',2), grid on,
%xlabel('Tiempo (seg.)'), ylabel('Velocidad (grados/seg.)')

% Muestra la gráfica Tiempo / Posición
hold on
plot(tiempo,salida,'b','Linewidth',2), grid on,
xlabel('Tiempo (seg.)'), ylabel('Desplazamiento (mm)')

```

#### B.4.4.- EscalonSMA.m

```

% Este programa da un escalón desde arduino al SMA1 o SMA2 y ...
% representa su posición o velocidad en función del tiempo.

global tiempo; %Se declaran como variables globales tiempo y salida.
global salida;
tiempo=[];
salida=[];
poten=[];
vel=[];
tic;          % Empiezo a contar tiempo

```

```

while toc < 5 % Mientras toc sea menor que ese valor en segundos,
se...
    % seguirá entregando intensidad al SMA

    a.analogWrite(10,255); % Se activa a 5V la salida 10(SMA1) o
5(SMA2)

    av=(a.analogRead(0)); % Se lee el valor del potenciómetro
    % Valor 0 para el SMA1 y 3 para el SMA2

    poten=[poten av]; % En poten se guardan los valores leídos.

    pos=(av-poten(1))/-2.84167; % Pasa la resolución del
potenciómetro...
    %pos=(av-poten(1))/-51.15; % a grados o mm (segunda ecuación),...
    % según estemos con el SMA1 o SMA2

    salida=[salida pos]; % En salida guarda la posición en grados o
mm

    tiempo=[tiempo toc]; % En tiempo se guarda el tiempo de cada
muestra
end

a.analogWrite(10,0); % Ponemos a 0V la salida 11(SMA1) o
5(SMA2)

% Parte para el cálculo de las gráficas velocidad/tiempo
% Se realizan los incrementos de posición:
incdat=salida(2:length(salida))-salida(1:length(salida)-1);
% Se realizan los incrementos de tiempo:
inct=tiempo(2:length(tiempo))-tiempo(1:length(tiempo)-1);
vel=incdat./inct; % Se obtiene la velocidad

% Para velocidad, quito a tiempo y salida un valor para que sean
del...
% mismo tamaño que el vector "vel"
%tiempo=tiempo(1:length(tiempo)-1);
%salida=salida(1:length(salida)-1);

% Muestra por pantalla la gráfica Tiempo / Velocidad.
%hold on
%plot(tiempo,vel,'b','Linewidth',2), grid on,
%xlabel('Tiempo (seg.)'), ylabel('Velocidad (grados/seg.)')

% Muestra la gráfica Tiempo / Posición
hold on
plot(tiempo,salida,'b','Linewidth',2), grid on,
xlabel('Tiempo (seg.)'), ylabel('Desplazamiento (grados)')

```



## B.4.5.- PIDMotor.m

```
% Programa para realizar el control en lazo cerrado de los motores DC
% motor1 DC o motor2 DC mediante un controlador PID, con diferentes
% variables para la realimentación y ante distintas señales de
% entrada.
```

```
global tiempo; %declaro las variables globales
global salida;
global control;
global intensidad;

eacum=0; %igualo constantes a cero
eant=0;
e=0;
v=0;
tiempo=[];
salida=[];
control=[];
intensidad=[];
poten=[];
potencia=[];
resistencia=[];

% REFERENCIA DE ESCALONES.

% Para movimiento angular:
%refer=[zeros(1,100) 190*ones(1,600) 90*ones(1,600) 190*ones(1,600)...
% 40*ones(1,600) 150*ones(1,600) zeros(1,600)];
% Para movimiento lineal:
%refer=[zeros(1,100) 7*ones(1,600) 4*ones(1,600) 7*ones(1,600)...
%2*ones(1,600) 6*ones(1,600) zeros(1,600)];

%REFERENCIA DE RAMPAS.

% Para movimiento angular:
%refer=[zeros(1,100)];
%for r=1:350
% if r<1800
% grad=(190/1800)*r;
% refer=[refer grad];
% elseif r>=1800 && r<3500
% grad=-(190/1700)*r+391.17647;
% refer=[refer grad];
%end
%end

%refer=[refer zeros(1,101)];

%Para movimiento lineal:
%refer=[zeros(1,100)];
%for r=1:3500
% if r<1800
% grad=(7/1800)*r;
% refer=[refer grad];
%elseif r>=1800 && r<3500
% grad=-(7/1700)*r+14.41176;
% refer=[refer grad];
```

```

    %end
%end

%refer=[refer zeros(1,101)];

%REFERENCIA SENOIDAL

% Para movimiento angular:
%refer=[zeros(1,100)];
%rad=[0:0.054:6*pi];
%refer =[refer 60*sin(rad)+120];
%refer=[refer zeros(1,109)];

% Para movimiento lineal:
%Entrada senoidal
refer=[zeros(1,100)];
rad=[0:0.0054:6*pi];
refer =[refer 3*sin(rad)+4];
refer=[refer zeros(1,109)];

tic;          %comienzo a contar tiempo

for i=1:3700

    av=a.analogRead(3);          %Leo potenciometro y lo paso a
    grados o mm
    poten=[poten av];
    %avolt=(5*av)/1024;

    %pos=(av-poten(1))/-2.84167;% Pasa la resolución del
    potenciometro...
    pos=(av-poten(1))/-51.15; % a grados o mm (segunda ecuación),...
                                % según estemos con motor1 DC o motor2
    DC

    salida=[salida pos];

    int=a.analogRead(2);          %Medida de Intensidad
    inten=(5*int)/1024;
    inten=(inten-2.46);
    intensidad = [intensidad inten];

    eant=e;
    e=(refer(i)-pos);          %Saco la señal de error

    %PID
    %Control proporcional del cable
    p=0.9*e;
    %u=p;

    % Control integral
    eacum=eacum+e;
    in=eacum*0.5*0.0085;
    %u=p+in;

```

```

% Control derivativo
d=(e-eant)*2; %Meter el error anterior bien
u=p+d;

v=round(u*255/5);
if v>0
    if v>=210
        v=210;
    elseif v<=0
        v=0;
    end
    v=v+45;
    a.digitalWrite(7,0); %Sentido contrario a las agujas del
reloj
    a.analogWrite(6,v); %Señal de control

elseif v<0
    v=-v;
    if v>=210
        v=210;
    elseif v<=0
        v=0;
    end
    v=v+45;
    a.digitalWrite(7,1); %Sentido igual a las agujas del reloj
    a.analogWrite(6,v); %Señal de control
v=-v;
end

%tiempo=[tiempo toc];
tiempo=[0:0.0085:0.0085*3699];

control=[control 5*v/255];

%resistencia=[resistencia control(i)/intensidad(i)]; %Resistencia
Motor
potencia=[potencia abs(control(i)*intensidad(i))]; %Potencia Motor

end

pmedia=sum(potencia)/3700; % Obtención de potencia media

a.analogWrite(6,0);

%GRÁFICAS. Dependiendo que queramos mostrar, han de modificarse
figure(1)
subplot(2,1,1)
plot(tiempo,refer,'k','Linewidth',2)
grid on
title('Control de posición para el motor1 DC')
xlabel('Tiempo (seg.)'); ylabel('Desplazamiento (grados)')
%axis([0 35 0 220])
hold on,plot(tiempo,salida,'g','Linewidth',2)
legend('Referencia','Respuesta real')
subplot(2,1,2)
plot(tiempo,control,'g','Linewidth',2)
grid on
%axis([0 35 -5 5])

```

```

xlabel('Tiempo (seg.)'); ylabel('Señal de Control (V)')

figure(2)
subplot(3,1,1)
plot(tiempo,control,'g','Linewidth',2)
grid on
xlabel('Tiempo (seg.)'); ylabel('Señal de control(V)')
%axis([0 35 0 220])
subplot(3,1,2)
plot(tiempo,intensidad,'b','Linewidth',2)
xlabel('Tiempo (seg.)'); ylabel('Intensidad (A)')
grid on
subplot(3,1,3)
plot(tiempo,potencia,'g','Linewidth',2)
xlabel('Tiempo (seg.)'); ylabel('Potencia consumida (W)')
hold on, plot(tiempo,pmedia,'r','Linewidth',2)
grid on

```

## B.4.6.- PIDSMA.m

```

% Programa para realizar el control en lazo cerrado de los cables
% SMA1 o SMA2 mediante un controlador PID, con diferentes variables
% para la realimentación y ante distintas señales de entrada.

global tiempo; %declaro las variables globales
global salida;
global control;
global temperatura;
global intensidad;

eacum=0; %igualo constantes a cero
eant=0;
e=0;
v=0;
tiempo=[]; %digo que las variables son un vector cero
salida=[];
control=[];
temperatura=[];
intensidad=[];
error=[];
poten=[];
potencia=[];
resistencia=[];
media100=[];
media100=0;
tiempo1=0;

% REFERENCIA DE ESCALONES.

% Para movimiento angular:
refer=[zeros(1,100) 190*ones(1,600) 90*ones(1,600) 190*ones(1,600) ...
40*ones(1,600) 150*ones(1,600) zeros(1,600)];
% Para movimiento lineal:
%refer=[zeros(1,100) 7*ones(1,600) 4*ones(1,600) 7*ones(1,600) ...

```

```

%2*ones(1,600) 6*ones(1,600) zeros(1,600)];

%REFERENCIA DE RAMPAS.

% Para movimiento angular:
%refer=[zeros(1,100)];
%for r=1:350
%   if r<1800
%       grad=(190/1800)*r;
%       refer=[refer grad];
%   elseif r>=1800 && r<3500
%       grad=-(190/1700)*r+391.17647;
%       refer=[refer grad];
%   end
%end

%refer=[refer zeros(1,101)];

%Para movimiento lineal:
%refer=[zeros(1,100)];
%for r=1:3500
%   if r<1800
%       grad=(7/1800)*r;
%       refer=[refer grad];
%   elseif r>=1800 && r<3500
%       grad=-(7/1700)*r+14.41176;
%       refer=[refer grad];
%   end
%end

%refer=[refer zeros(1,101)];

%REFERENCIA SENOIDAL

% Para movimiento angular:
%refer=[zeros(1,100)];
%rad=[0:0.054:6*pi];
%refer =[refer 60*sin(rad)+120];
%refer=[refer zeros(1,109)];

% Para movimiento lineal:
%Entrada senoidal
%refer=[zeros(1,100)];
%rad=[0:0.0054:6*pi];
%refer =[refer 3*sin(rad)+4];
%refer=[refer zeros(1,109)];

tic;           %comienzo a contar tiempo

for i=1:3700

    av=a.analogRead(0);           %Lee potenciometro y pasa a grados o mm
    poten=[poten av];
    %avolt=(5*av)/1024;

    pos=(av-poten(1))/-2.84167; % Pasa la resolución del potenciometro
    %pos=(av-poten(1))/-51.15; % a grados o mm (segunda ecuación),...
                                % según estemos con el SMA1 o SMA2

```

```

salida=[salida pos];

ti=a.analogRead(1);           %Medir Temperatura
te=(5*ti)/1024;
tem=69.23077*te-120.3846;     %Pasar de V a grados centígrados
temperatura = [temperatura tem];

int=a.analogRead(2);         %Medir Intensidad
inten=(5*int)/1024;
inten=(inten-2.46);          %Paso de V a mA
intensidad = [intensidad inten*1000];

if length(intensidad)>100    %Realiza la media de cada 100 valores
cont=i;                      %de la intensidad
med=mean(intensidad(cont-100:cont));
media100=[media100 med];
end

eant=e;

%Rel=212.766*te-472.34; %relación temperatura con grados de giro

if length(intensidad)>100
Rel= 1.538*med-69.231; %relación Intensidad con grados de giro
else Rel=refer(i);
end

e=(refer(i)-Rel);           %Obtengo la señal de error de cada punto
error=[error e];

%PID
%Control proporcional del cable
p=0.04*e;
%u=p;

% Control integral
eacum=eacum+e;
in=eacum*0.05*0.0085;
%u=p;

% Control derivativo
d=(e-eant)*0.008/0.0085;
u=p+in+d;

v=round(u*255/5);
if v>=255
v=255;
elseif v<=0
v=0;
end

a.analogWrite(10,v);        %envío la señal de control

tiempol=[tiempol toc];
tiempo=[0:0.0085:0.0085*3699]; %Tiempo fijo para comparativa

control=[control 5*v/255];

```

```
%resistencia=[resistencia control(i)/intensidad(i)]; %Resistencia SMA
potencia=[potencia abs(control(i)*intensidad(i))]; %Potencia SMA
```

```
end
```

```
media100=[zeros(1,99) media100]; %añado ceros que le faltan a
media100
pmedia=sum(potencia)/3700; %Obtengo potencia media
a.analogWrite(10,0);
```

```
%refertemp=[30*ones(1,100) 95.13*ones(1,600) 62.59*ones(1,600)...
%95.13*ones(1,600) 46.32*ones(1,600) 82.115*ones(1,600)
30*ones(1,600)];
referinten=[0*ones(1,100) 168.55*ones(1,600) 103.53*ones(1,600)...
168.55*ones(1,600) 71.02*ones(1,600) 142.54*ones(1,600)
40*ones(1,600)];
```

```
%GRÁFICAS. Modifico, dependiendo que quiera mostrar
```

```
figure(1)
subplot(3,1,1)
plot(tiempo,refer,'k','Linewidth',2)
grid on
title('Control de posición para el servo')
xlabel('Tiempo (seg.)'); ylabel('Desplazamiento (grados)')
%axis([0 35 0 220])
hold on,plot(tiempo,salida,'g','Linewidth',2)
legend('Referencia','Respuesta real')
subplot(3,1,2)
plot(tiempo,control,'g','Linewidth',2)
grid on
%axis([0 35 -5 5])
xlabel('Tiempo (seg.)'); ylabel('Señal de Control (V)')
subplot(3,1,3)
plot(tiempo,media100,'r','Linewidth',2)
grid on
%axis([0 35 -5 5])
xlabel('Tiempo (seg.)'); ylabel('Intensidad (mA)')
hold on,plot(tiempo,referinten,'k','Linewidth',2)
```

```
figure(2 )
subplot(3,1,1)
plot(tiempo,error,'g','Linewidth',2)
grid on
xlabel('Tiempo (seg.)'); ylabel('Error (grados)')
%axis([0 35 0 220])
subplot(3,1,2)
plot(tiempo,intensidad,'b','Linewidth',2)
xlabel('Tiempo (seg.)'); ylabel('Intensidad (A)')
grid on
subplot(3,1,3)
plot(tiempo,potencia,'g','Linewidth',2)
xlabel('Tiempo (seg.)'); ylabel('Potencia consumida (W)')
hold on, plot(tiempo,pmedia,'r','Linewidth',2)
grid on
```

## C.- PLANO DE CONEXIONES ELÉCTRICAS



