

Índice general

Contenido

1.-Motivación y objetivos.	
1.1-Motivación.....	6
1.2-Objetivos	8
2.-SMA.	
2.1.-Descripción y características generales de los SMA.	10
2.2.-Ventajas y desventajas de los SMA.	11
2.3.-Fases de los SMA.	12
2.3.-Efecto memoria de forma.	14
2.3.-Pseudoelásticidad.....	18
2.4.-SMA como actuadores.	19
2.5.-Historia de los SMA.	20
3.-Hardware y software del proyecto.	
3.1.-Hardware del proyecto.	22
3.1.1.-Tarjetas de adquisición.	23
3.1.1.2.-Tarjeta de adquisición Data Translation.	23
3.1.1.3.-Tarjeta de adquisición Arduino	23
3.1.2.-Circuitos de accionamiento de los SMA.....	24
3.1.2.1.-Circuito de control para SMA de 150um.....	24
3.1.2.2.-Circuito de control para SMA de 100um.....	26
3.1.2.3.-Circuito de control para el muelle SMA.	26
3.1.3.-Circuito de control del motor DC.	28
3.1.4.-Circuito regulador de tensión para el potenciómetro.	29
3.1.5.-Descripción de los SMA usados.....	29
3.1.6.-Potenciómetro.	30

3.1.7.-Servo (motor DC).....	31
3.2.-Software del proyecto.....	32
3.2.1.-Conexión de la tarjeta Arduino al PC.	33
3.2.2.-Conexión de la tarjeta Data Translation al PC.....	33
3.2.3.-Programas de software usados.....	33
4.-Prototipos construidos.	
4.1.-Prototipo 1.Columpio.....	36
4.2.-Prototipo 2.Plataforma unidireccional con cable (SMA) y muelle.....	40
4.3.-Prototipo 3. Plataforma bidireccional con muelle (SMA) y cable (SMA).	46
4.4.-Prototipo 4. Plataforma definitiva de comparación de cable (SMA) y motor DC.	52
4.4.1.-Diseño base de la maqueta.	53
4.4.2.-Construcción de la maqueta	53
5.-Identificación y control.	
5.1.-Identificación.....	70
5.1.1.-Identificación realizada con el muelle 1 para el cable SMA y el motor DC..	71
5.1.2.-Identificación realizada con el muelle 2 para el cable SMA y el motor DC..	78
5.1.3.-Identificación realizada con el muelle 3 para el cable SMA y el motor DC..	83
SMA.-	83
5.2.-Control simulado.	89
5.2.1.-Sintonía y control simulado para el muelle 1.....	89
5.2.2.- Sintonía y control simulado para el muelle 2.....	97
5.2.3.- Sintonía y control simulado para el muelle 3.....	102
6.- Control real en el prototipo y comparativas.	
6.1.-Muelle 1.....	108
Control con SMA.-.....	108
Control con motor DC.-	110
6.2.-Muelle 2.....	112
Control con SMA.-.....	112
Control con Motor DC.-	114

6.3.-Muelle 3.....	116
Control con SMA .-.....	116
Control con Motor DC.-	119
6.4-Comparativas finales.	121
6.4.1.-Resultados finales SMA vs motor DC para el muelle1.	121
6.4.2.-Resultados finales SMA vs motor DC para el muelle2.	122
6.4.3.-Resultados finales SMA vs motor DC para el muelle3.	123
7.-Conclusiones y trabajos futuros.	
7.1.-Conclusiones finales.	124
7.2.-Trabajos futuros.	126
Bibliografía.....	129
1.-Referencias.	129
2.-Sitios web.	129
Anexos.	131
Anexo 1.-Protocolo de actuación.	131
Anexo 2.-Solución de problemas.....	133
Anexo 3.-Código de los programas utilizados.	136
Anexo 4.-Hoja de características de los componentes.	144

Índice de esquemas eléctricos:

Esquema 1.-Circuito de control SMA.....	25
Esquema 2.-Circuito formado por el transistor IFR530 para el muelle de nitinol.	27
Esquema 3.-Esquema electrónico del motor DC.....	28
Esquema 4.-Circuito regulador de tensión del potenciómetro.....	29
Esquema 5.-Esquema electrónico final SMA 150um.	46
Esquema 6.-Esquema electrónico para el cable y muelle SMA.	52
Esquema 7.-Esquema electrónico completo del prototipo final.....	66

Capítulo 1. Motivación y Objetivos

1.1-Motivación

En el departamento de Ingeniería de Sistemas y automática de la Universidad Politécnica de Cartagena, se realizan numerosos proyectos y trabajos orientados al campo de la automática y el control. Este hecho da con el interés en desarrollar proyectos con nuevas tecnologías y materiales que aparecen en el mercado para el desarrollo de nuevas técnicas industriales de trabajo, con las que crear nuevos sistemas de control más eficientes, económicos y específicos con los que trabajar. De aquí, surge la idea de estudiar nuevos tipos de materiales como los SMA, de los que trata el estudio que de ellos se va a hacer en este proyecto. Estos materiales, de los que ya existen algunos estudios, son conocidos como “materiales inteligentes” o “materiales con memoria de forma” de ahí sus siglas en inglés SMA (Shape Memory Alloy), las características y cualidades, así como una descripción más detallada de estos materiales se describen más adelante [véase capítulo 2].

Estos materiales siguen estando en un proceso de investigación constante, debido en parte a que su uso no es muy extendido aunque sus propiedades hacen pensar en grandes aplicaciones para las que los SMA podrían servir en un futuro, por ejemplo en el campo de la robótica, biomedicina [véase figura 1.1], ingeniería de control, etc.

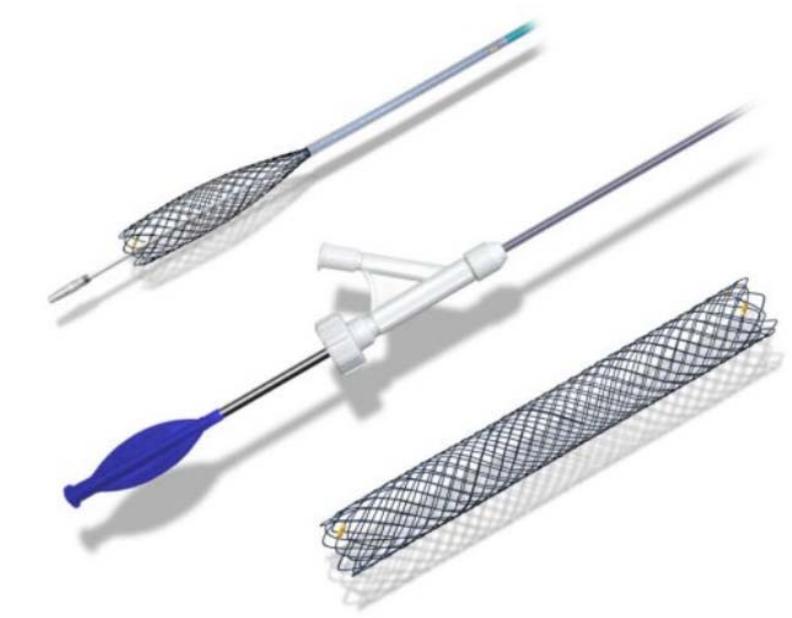


Fig.-1.1 Uso de SMA en biomedicina

Viendo los distintos usos que se hacen de estos materiales y sus posibilidades en el futuro, se hace muy interesante el estudio sobre estos. Los SMA centran su principal interés en su capacidad como actuadores, y es ahí de donde parte el mayor interés de este estudio. Conocidos como “MuscleWires”, estos materiales se usan también en investigación para la construcción de manos robóticas haciendo las veces de músculos de alambre como su propio nombre indica y como se puede ver en la figura 1.2.



Figura.-1.2

1.2-Objetivos

Se pretende realizar un estudio de los materiales SMA usándolos como actuadores. Para ello, primero se llevará a cabo un estudio de este tipo de materiales, para después construir una plataforma independiente de pruebas donde se puedan realizar experimentos que permitan conocer mejor las características de comportamiento como actuadores de este tipo de materiales. Los pasos que se seguirán, se describen a continuación:

1. Primero se llevará a cabo un estudio exhaustivo de estos materiales para conocer cuáles son sus principales características de funcionamiento. Entre estas características se encuentran sus valores térmicos, así como los valores eléctricos recomendables para los que su funcionamiento como actuador sea el adecuado, como por ejemplo la máxima tensión a la que se les podrá someter. Se contrastarán los valores suministrados por el fabricante, teniendo en cuenta que el uso de estos materiales es experimental, para evitar problemas. Se obtendrán también sus valores mecánicos, por lo que se diseñarán diferentes experimentos para conocer estos parámetros.
2. Para poder realizar estos experimentos, se diseñarán circuitos de acondicionamiento de señal con los que poder accionar a los distintos materiales SMA utilizados. Para diseñar los circuitos, se tendrán que tener en cuenta las características eléctricas de estos. Se necesitarán también circuitos de control con los que poder controlar los circuitos de acondicionamiento, así como programas informáticos para usarlos en el control de los SMA.
3. Después de conocer las principales características de los materiales, se diseñará una plataforma de pruebas que permita realizar experimentos con estos. Antes de conseguir una plataforma definitiva, se probarán varios diseños para comprobar el tipo de movimiento, el rango de trabajo, las técnicas de instalación, las dimensiones de la plataforma así como la mejor manera de instalar los SMA. Con esto, se pretende conseguir un diseño lo más adecuado posible de manera que se puedan realizar diferentes pruebas que permitan enfrentar el comportamiento de los SMA frente a un motor de corriente continua (a partir de ahora motor DC). Para conseguir esto, la plataforma de pruebas diseñada tiene que poder albergar la instalación tanto del cable SMA que se use para las pruebas, como el motor DC utilizado, así como un sistema que permita recoger los datos de los experimentos tanto de uno como de otro, para esto se utilizarán los circuitos mencionados en el anterior punto. La plataforma tiene que ser independiente, es decir, debe de poder trabajar sin

tener que estar enganchada a la corriente eléctrica, de esta manera se conseguirá más libertad a la hora de trabajar.

4. Una vez que se tenga la plataforma de pruebas definitiva, se pasará a realizar los experimentos que enfrenten a los materiales SMA con el motor DC. Para llevar a cabo esta comparación, se procederá a realizar un control de posición tanto con los SMA como con el motor DC. Para esto se hará uso de un potenciómetro que proporcionará una salida con la que podremos realizar las pruebas de control que permitan hacer las comparaciones oportunas entre SMA y motor DC. Después de registrar los resultados de los experimentos, se obtendrá un modelo de cada sistema, tanto para el SMA como para el motor DC. Una vez que se obtengan estos modelos de sistema, se realizarán una serie de simulaciones con estos modelos para obtener los parámetros de ajuste del controlador.

5. Con estos parámetros de ajuste del controlador y la plataforma de pruebas, se procederá ahora a realizar unas pruebas de control de posición partiendo de los parámetros obtenidos en las simulaciones. Con estas pruebas sobre la plataforma, se obtendrá una sintonización de los controladores más fina. Con estas pruebas finales, se realizará un estudio comparativo entre el control de posición de los SMA y el motor DC. Finalmente y después de obtener los resultados finales de los experimentos de control en la plataforma final, se obtendrán unas conclusiones finales comparativas sobre la capacidad y las distintas características de control que tienen los SMA frente a las del motor DC bajo las condiciones en las que se han probado. Estas conclusiones irán acompañadas de gráficas explicativas.

Capítulo 2. Materiales con memoria de forma SMA.

En los últimos años, se han realizado numerosos estudios sobre los materiales con memoria de forma (SMA), como tesis doctorales y proyectos fin de carrera. Entre ellos se ha seleccionado en [1] la tesis doctoral; “Fast, Accurate Force and Position Control of Shape Memory Alloy Actuators”, de 2008, y en [2], el proyecto final de carrera; “Estudio e implementación de actuadores basados en aleaciones SMA”, de 2010, donde se encuentran muchos datos referentes a materiales SMA. A partir de esta información, se presentan los siguientes apartados con relación a los materiales SMA.

2.1.-Descripción y características generales de los SMA.

Los materiales con memoria de forma (a partir de ahora SMA), son un tipo de aleaciones metálicas que tienen la especial “habilidad de recordar” o de retener una específica forma o tamaño anterior a su deformación, sometiéndose a un proceso de calentamiento. Estos materiales demuestran esta habilidad mediante el proceso de transformación de fase dependiente de la temperatura, 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”.

La austenita, la fase de más alta temperatura, es más dura y tiene un mayor módulo de Young, mientras la fase de martensita es más suave y maleable. Cuando se enfría el SMA y se encuentra en la fase de martensita, es muy dúctil aplicando una pequeña fuerza. Para recuperar su longitud original, la aleación es calentada hasta cierta temperatura, causando que se contraiga y pase a la fase de austenita. Este calentamiento del material se puede llevar a cabo haciéndole pasar una corriente eléctrica al SMA.

De todas las aleaciones descubiertas que disponen de esta capacidad, la aleación Ni-Ti, o también conocida como nitinol es la que más flexibilidad presenta y la más exitosa en aplicaciones de ingeniería. En este proyecto ha sido esta la aleación que se ha utilizado en su versión comercial "Flexinol".

2.2.-Ventajas y desventajas de los SMA.

Las ventajas de usar SMA como actuador son:

1. Alta relación potencia–peso: A bajo peso, los SMA tienen una alta relación potencia-peso que los hace muy atractivos para aplicaciones de miniaturización.
2. Simplicidad mecánica: Un actuador SMA solo usa la fuerza de contracción y puede ser accionada directamente por una corriente eléctrica, por lo que es fácil diseñar los sistemas que puedan hacerlos funcionar como actuadores. Debido a esta simplicidad mecánica y a su pequeño tamaño hay otros beneficios como la producción de estos materiales o el costo de su mantenimiento.
3. Fácil miniaturización: Los SMA pueden ser usados como actuadores lineales de accionamiento directo requiriendo pocos o ningún sistema de amplificación o reducción de movimiento.
4. Limpieza y bajo ruido: Debido a que estos materiales no requieren mecanismos de fricción, producen pocas partículas y por lo tanto también poco ruido. Estas características hacen de los SMA unos actuadores muy válidos para ser usados en microelectrónica, biotecnología y aplicaciones médicas.

Dentro de estas ventajas generales, el nitinol tiene otra ventaja que hacen que se destaque de otros materiales SMA. Estas incluyen una mayor ductilidad, mayor movimiento de recuperación, tienen una excelente resistencia a la corrosión, temperaturas de transformación estables y una alta biocompatibilidad.

Como desventajas de estos materiales se puede mencionar:

1. Baja eficiencia energética: La máxima eficiencia teórica de los SMA está en torno al 10% basada en el ciclo de Carnot. Sin embargo la realidad es que la eficiencia es menor del 1% por lo que el SMA puede ser considerado un motor de calor operando a bajas temperaturas. La mayoría de la energía calorífica es perdida con el entorno. Por esto, los actuadores SMA deben estar limitados a áreas donde la eficiencia energética no sea lo principal.

2. Degradación y fatiga: El rendimiento a lo largo del tiempo y la fiabilidad dependen de numerosos factores incluyendo la máxima temperatura que se alcance, el estrés, la tensión y el número de ciclos trabajado. Se tiene que tener un especial cuidado con los sobrecalentamientos y las sobretensiones en el actuador para que este dure el máximo tiempo posible. sin embargo el desarrollo y la investigación con estos materiales están consiguiendo mejorar sus características, por ejemplo el Flexinol está diseñado para durar millones de ciclos.
3. Baja velocidad e imprecisión: generalmente los actuadores de SMA son considerados lentos en cuanto a respuesta se refiere debido a sus restricciones en enfriamiento y calefacción así, como a su ciclo térmico de histéresis. La manera normal de calentar los actuadores SMA es a través de la corriente eléctrica, esto puede aumentar su velocidad de respuesta, pero también los lleva a padecer más sobrecalentamiento.
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. Muchas investigaciones en control de posición con estos materiales han encontrado bajas velocidades de muestreo de tan solo 1Hz. Los tiempos de respuesta para una entrada escalón fueron de más de 1 segundo, y las precisiones fueron mediocres con errores de más de 1% del rango de trabajo.

2.3.-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 otras transformaciones asociadas con la memoria de forma.

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

Capítulo 2

fase de austenita. Este efecto es conocido como pseudoelasticidad y será visto en los siguientes apartados de este mismo capítulo.

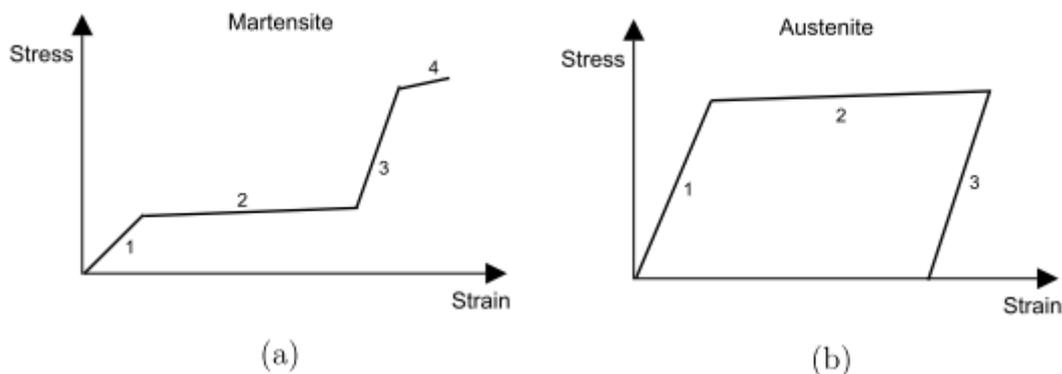


Fig.-2.1.-Principales fases de los SMA.

Cuando una fuerza externa es aplicada en el SMA cuando se encuentra en su fase de martensita, el material se deforma elásticamente. 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. La martensita será recuperable hasta que la fuerza llegue a este punto. Sin embargo, si la fuerza aplicada supera este límite, se romperán las uniones atómicas del material, provocando una deformación plástica permanente (Figura 2.1(a), curvas 3 y 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 fase de austenita sin embargo existe un límite elástico superior comparado con la martensita. Inicialmente el SMA se comporta elásticamente (Figura 2.1(b), curva 1) hasta que la fuerza excede la longitud de límite elástico. A partir de este punto, la deformación plástica causa un estiramiento irre recuperable (Figura 2.1(b), curvas 2 y 3).

La transformación en la fase de martensita puede ser caracterizada por 4 temperaturas de transformación:

1. A_s , temperatura de comienzo de la fase de austenita.
2. A_f , temperatura de final de la fase de austenita.
3. M_s , temperatura de comienzo de la fase de martensita.
4. M_f , temperatura de final de la fase de martensita.

Estas fases se pueden observar en la figura del ciclo de histéresis:

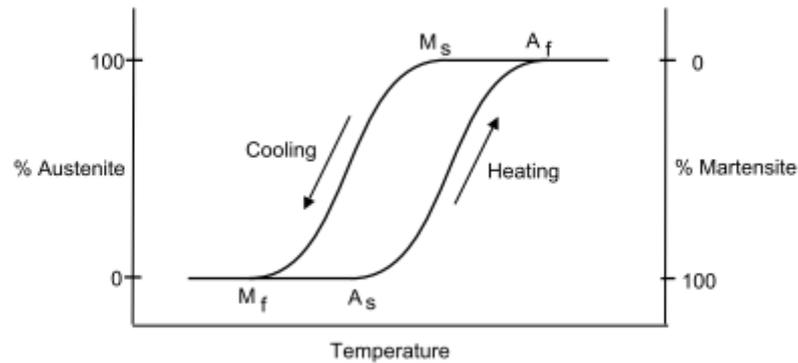


Fig.-2.2.-Ciclo de histéresis de los SMA.

Como se comprueba y empezando por la izquierda en la figura 2.2 con una temperatura menor de M_f , el SMA se encuentra en la fase de martensita. Cuando la temperatura supere A_s , comenzará la fase de austenita y cuando la temperatura supere A_f el SMA seguirá en la fase de austenita. Cuando la temperatura baje por debajo de M_s dará comienzo la fase de martensita hasta que el SMA llegue a la temperatura de M_f en cuyo punto estará completamente en la fase de martensita. Durante la transición de fase entre austenita y martensita muchas de las propiedades físicas de los SMA varían. Estas incluyen el módulo de elasticidad, la resistencia eléctrica, capacidad calorífica y conductividad térmica. En el rango donde la fase de austenita y martensita coexisten la no linealidad y la histéresis están influidas por la composición del SMA, el proceso y el número de ciclos.

2.3.-Efecto memoria de forma.

Además de los efectos de cambio de forma como las deformaciones plásticas y elásticas así como la expansión y contracción térmica, los SMA también presentan 3 características de memoria de forma que pueden ordenarse de la manera siguiente:

1. Primer camino de efecto memoria: Después de dejar de aplicar la fuerza exterior el material muestra una deformación permanente. Este puede recuperar su forma original calentándose y llegando a la fase de austenita, pero cuando se enfríe, no volverá a deformarse a menos que se le aplique una fuerza externa.
2. Segundo camino de efecto memoria: Además de la primera manera de efecto memoria, se puede dar un cambio de forma que ocurriese durante el enfriamiento y sin aplicar fuerza externa.

Capítulo 2

3. Pseudoelásticidad: La aplicación de fuerza a temperaturas más allá de A_f estira el material y cuando esta se deja de aplicar el material regresa a su forma inicial. No hay ningún tipo de proceso térmico.

Estos tres efectos pueden ser explicados usando simplemente un modelo de estructura cristalina de 2 dimensiones y una curva que refleje el estrés, la tensión y la temperatura.

El primer camino de efecto memoria 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 camino de efecto memoria se presenta en la siguiente figura:

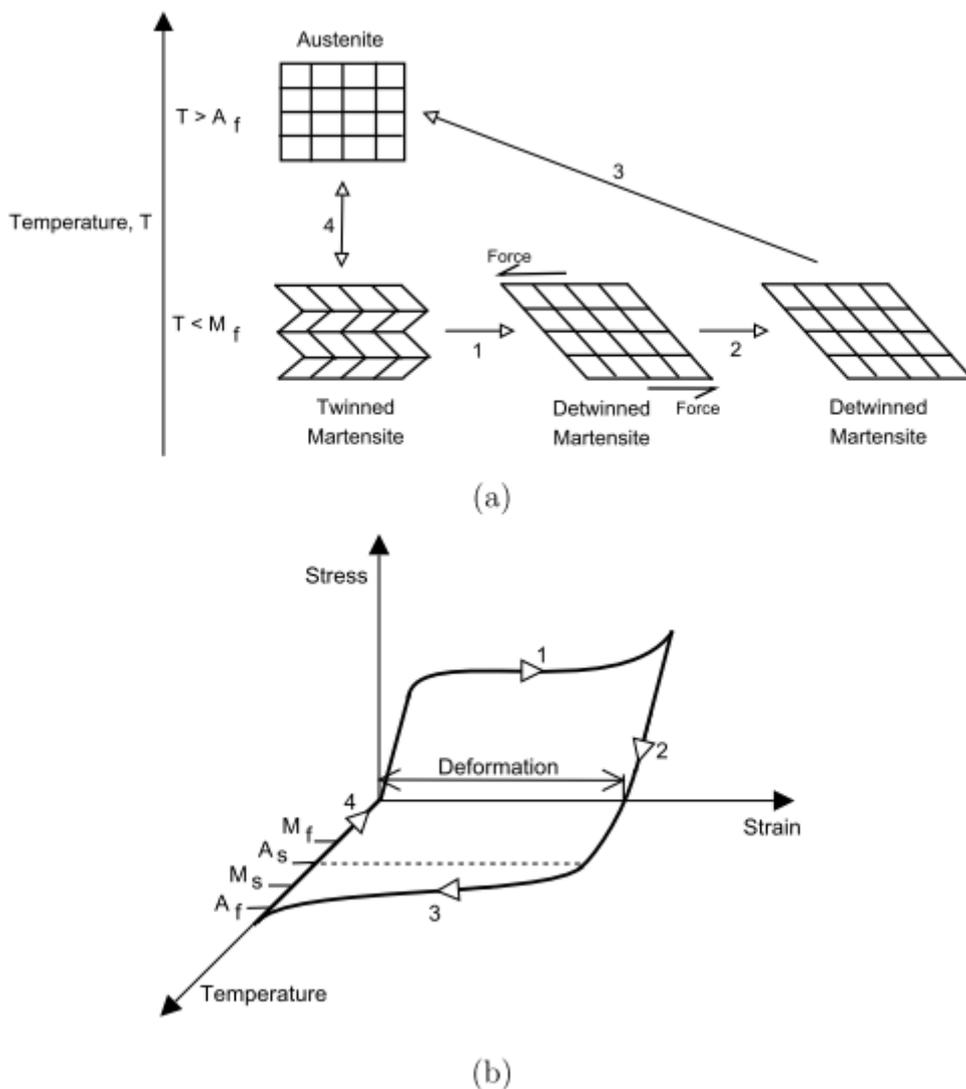


Fig.-2.3.-Primer camino de efecto memoria usando un modelo de estructura cristalina 2D(a).

Curva de temperatura, tensión y estrés (b).

Capítulo 2

Viendo el modelo 2D de la figura 2.3(a), puede verse como la temperatura de la fase de austenita disminuye y la martensita empieza a formarse. Se puede apreciar como la forma del material no cambia mientras se enfría el material, (figura 2.3 (b) curva 4). La martensita en este punto se dice que está “twinned” (hermanada). La martensita en este estado es altamente maleable y tiene un límite elástico muy bajo. Aplicando una fuerza externa a la martensita se tendrá el resultado de la curva 1 en las figuras 2.3(a) y 2.3 (b). El material inicialmente se comporta elásticamente seguido por una deformación pseudoelástica recuperable. Se dice que la martensita se encuentra en este punto “detwinned”. En este punto demasiada tensión puede llegar a provocar una fractura del material. En la curva 2 de la figura 2.3 se puede ver como se mantiene la deformación.

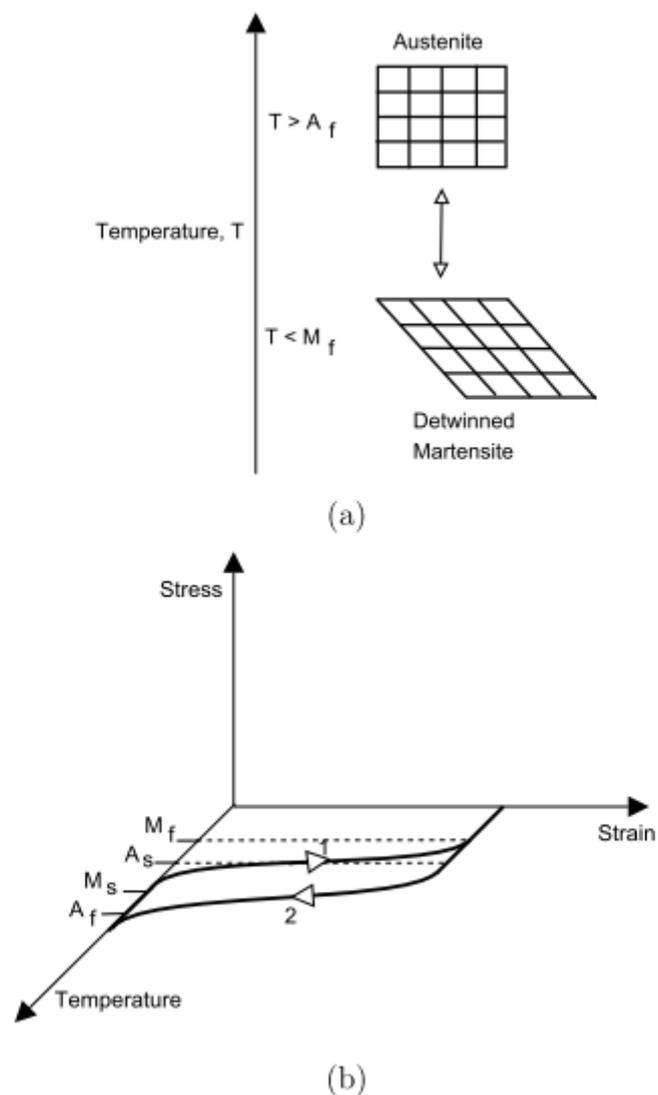


Fig.-2.4.-Segundo camino de efecto memoria usando un modelo de estructura cristalina 2D (a). Curva de estrés, tensión y temperatura (b).

Capítulo 2

Debido al calentamiento, la martensita deformada pasa al punto A_s , que corresponde al punto de temperatura de inicio de la fase de austenita. Esta fase comienza a formarse cuando el material empieza a contraerse (figura 2.4 (b) curva3). La completa recuperación de forma puede darse en el punto A_f , donde el material está por completo en la fase de austenita de nuevo. Debido a que esta recuperación de forma solo ocurre en una dirección se le nombra como primer camino del efecto memoria. Este efecto puede repetirse durante muchos ciclos, siguiendo el proceso de la figura 2.3. Este ciclo puede observarse también mediante el ciclo de histéresis del proceso.

El segundo camino del efecto memoria de forma es menos pronunciado que el primero. Puede definirse como el cambio de forma reversible por ciclo térmico en el rango de temperaturas de la transformación martensítica sin requerimiento de ninguna fuerza externa. Este resultado se muestra en la transformación directa entre austenita y “detwinned” martensita se muestra en la figura 2.4 (a). Esto puede también verse en usando la curva localizada solo en el plano de la tensión y la temperatura y en la figura 2.4 (b).

2.3.-Pseudoelásticidad.

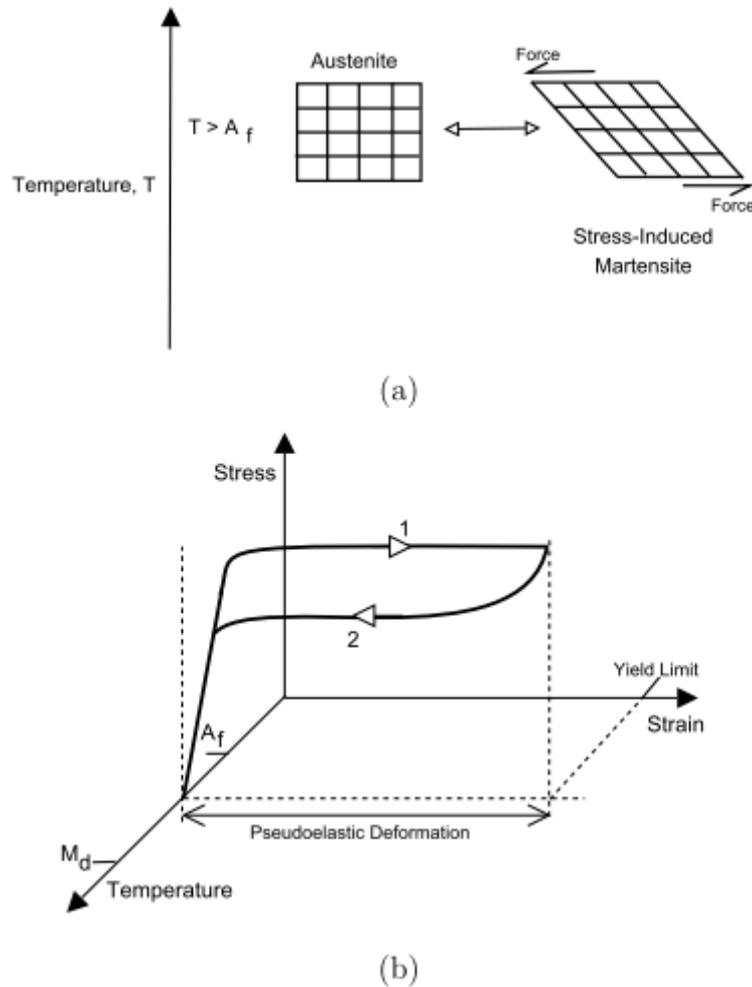


Fig.-2.5.-Pseudoelásticidad usando un modelo de estructura cristalina 2D (a).

Curva de tensión, estrés y temperatura (b).

La pseudoelásticidad, también conocida como “superelastividad”, es la recuperación de forma asociada a cargas y descargas mecánicas de SMA a temperaturas superiores a A_f . La figura 2.5 (a) y 2.5 (b) muestran la pseudoelásticidad. No se necesita cambio en la temperatura para que se produzca este fenómeno. Por lo tanto las características de tensión solo pueden ser explicadas mediante el plano de estrés y tensión de la figura 2.5 (b). Aplicando una fuerza externa con temperatura superior a A_f , la austenita se comporta primero de una manera elástica seguida de un cambio en el cual la alta deformación no lineal aparece hasta un límite de rendimiento virtual. Al retirar la carga, la curva regresa por la parte más baja del ciclo de histéresis para completar la tensión de recuperación.

La región de cambio es resultado de la formación de estrés en el material inducido por la fase de austenita a la de martensita. El estrés externo en el material incrementa las temperaturas de transformación de fases. Esta relación es bastante lineal y puede

observarse en la figura 2.6, aunque A_s y A_f se comporten de manera no lineal ante bajos niveles de estrés.

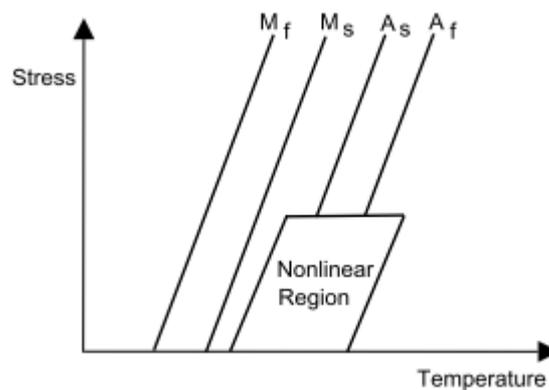


Fig.-2.6.-Estrés dependiente de las temperaturas de transformación.

2.4.-SMA como actuadores.

Un SMA puede funcionar como actuador realizando un trabajo contrario a una fuerza. Al calentarse, el SMA usa el primer camino del efecto memoria para generar fuerza y movimiento. Esta fuerza puede ser usada para usar a los SMA como actuadores. Los actuadores SMA pueden ser usados en distintas aplicaciones y en varios formatos, incluyéndose muelles helicoidales, alambres, tubos de torsión, muelles de torsión, etc....

Las ventajas de los SMA como actuadores incluyen una gran variedad de trabajos, son silenciosos, limpios, tienen una simplicidad de diseño y una fácil miniaturización. Los SMA tienen actualmente un gran potencial como actuadores porque también tienen otras cualidades como son la biocompatibilidad, fiabilidad de varios millones de ciclos, más capacidad de movimiento comparados con otros SMA más antiguos, pueden ser calentados eléctricamente, pueden simplificar mecanismos, reducir su número y reducir peso en algunas aplicaciones, etc....

Dependiendo del trabajo que realicen como actuadores los SMA 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 2.7.

Debido a que los SMA utilizan el primer camino del efecto memoria 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 hacer se 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. Puede verse lo descrito en la figura 2.7.

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, como se puede ver en la figura 2.7, 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 en un sistema de revolución y obtener un mayor rango de trabajo debido a que el muelle ayuda a devolver el SMA a su estado neutro.

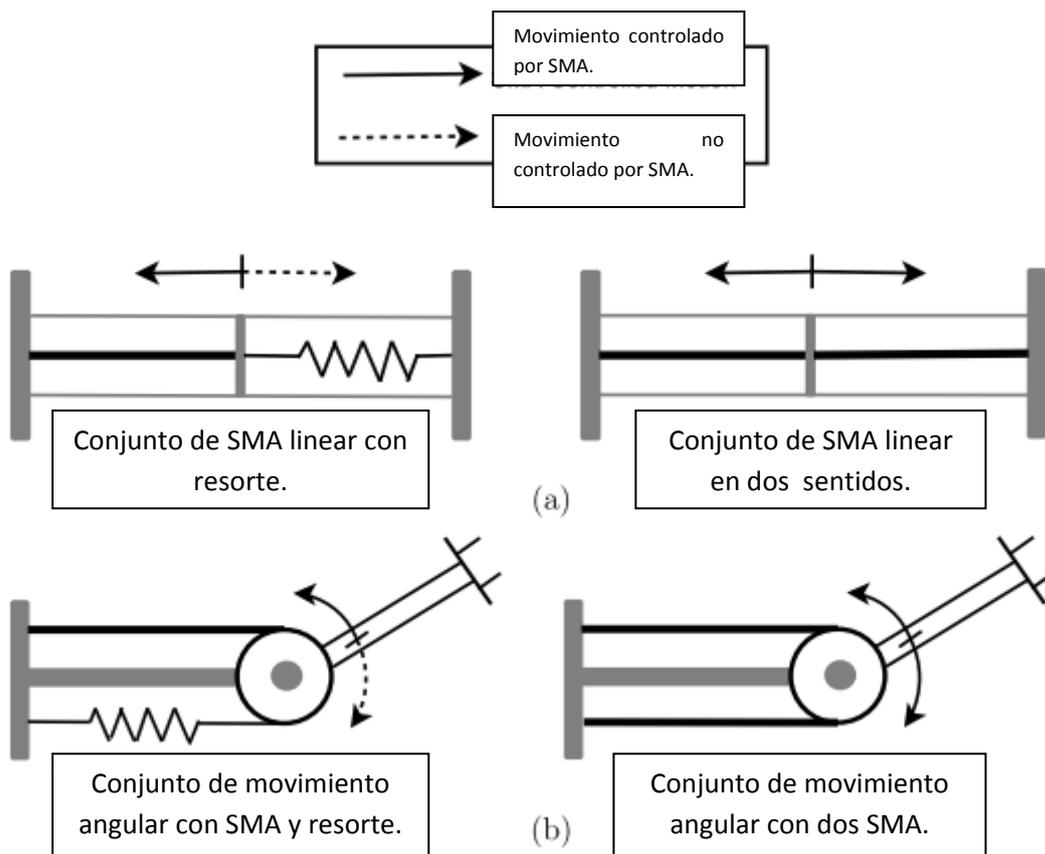


Fig.-2.7.-Configuración lineal de SMA (a). Configuración angular(b).

2.5.-Historia de los SMA.

Estas propiedades se descubrieron por primera vez en aleaciones Au-Cd en los años 30, cuando se observó esta propiedad martensítica en dichas aleaciones. Más tarde se descubrió una aleación que demostraba estas propiedades de forma más notable. Esta aleación estaba formada por Níquel y Titanio (Ni-Ti) y debe su nombre a los laboratorios de la marina norteamericana donde fue descubierta mientras se buscaba un nuevo material anticorrosión, dicho nombre es Nitinol (Níquel-Titanio Naval Ordnance Laboratory). En los años 70 se descubrieron nuevas aleaciones que

presentaban las mismas propiedades como Cobre-zinc, Cobre-Titanio, Cobre-Aluminio-Níquel, etc. Durante estos mismos años, se estudiaron las posibilidades de uso de estos materiales, como por ejemplo la NASA que estudió la posibilidad de usarlos como antenas de satélites para que se expandieran cuando estas se expusiesen al sol. Las universidades así como entidades privadas investigaron también otros posibles usos como motores que funcionasen solo con agua fría o caliente, sensores de temperatura, válvulas de agua caliente o dispositivos que accionasen la ventilación de los motores al pasar de una temperatura, etc.... Muchas de estas ideas no pasaron de su fase investigadora, sin embargo, se aprendió mucho sobre estos materiales y sobre sus técnicas de manufactura y fabricación. De estos desarrollos, creció el interés en estos materiales por parte de la industria médica, debido sobre todo a que la naturaleza de estos, les hace ser muy compatibles biológicamente y por lo tanto tener un bajo índice de rechazo en implantes médicos. En su funcionamiento, cabe destacar que estos materiales no deben de ser sobrecalentados, ya que si no se perderán las capacidades de recuperación de las que dispone, no se debe tampoco estirar más de un 3-5 %de su longitud aunque el nitinol puede alcanzar el 10%, ya que podrían romperse, y la fuerza máxima a la que deberían someterse para un buen funcionamiento, debería de ser menor que un tercio de su máxima fuerza de recuperación. Por último cabe destacar como usos futuros su implantación en robots de tipo humanoide como actuadores, en sistemas de tele operación, en implantes biomédicos (Véase figura 1.1), así como un largo etc.... [3].

Capítulo 3. Hardware y software del proyecto.

Se verá a continuación el hardware y software, tanto usado como diseñado, para la construcción del prototipo y la realización de las pruebas. Las partes que forman el hardware descrito son:

- Circuitos de control y accionamiento de los SMA
- Potenciómetro
- Tarjetas de adquisición de datos
- Tipos de SMA usados

Estas partes aparecen a continuación de forma más detallada.

3.1.-Hardware del proyecto.

Para realizar los experimentos con los distintos prototipos que se han construido, se ha necesitado diseñar unos circuitos de accionamiento de los SMA. Estos circuitos, se encargan de hacer pasar una corriente a través de los SMA que provoque su calentamiento y los lleve desde la fase de martensita a la de austenita. Dependiendo del tipo de SMA usado, se ha necesitado un circuito con más o menos potencia. De igual forma, se han necesitado sistemas hardware que permitan controlar los circuitos mencionados, para poder a su vez controlar el movimiento de los cables SMA y que estos funcionen como actuadores. Para esto, se han utilizado tarjetas de adquisición de datos, ya que para poder tener un control sobre los cables, se tendrá también que recoger los datos del movimiento de estos y mediante su procesamiento, poder realizar el control del movimiento de los SMA. Para adquirir los datos en las pruebas, se ha utilizado un potenciómetro, que recoge los valores de posición con los que realizar un lazo de control sobre los SMA.

3.1.1.-Tarjetas de adquisición.

Estos dispositivos de hardware se han usado para poder controlar los experimentos realizados con los SMA así como para poder enviar y recibir señales con los datos de los experimentos. Han sido uno de los principales instrumentos electrónicos junto a los circuitos de accionamiento. Se han usado dos modelos.

3.1.1.2.-Tarjeta de adquisición Data Translation.

La primera de ellas corresponde al modelo de tarjeta de adquisición de la casa Data Translation, modelo DT9812 que posee 8 entradas analógicas y 2 salidas analógicas, así como 16 salidas digitales. Todo ello con una resolución de 12 bits y una frecuencia máxima de 50 Kilohercios a un precio de 375 euros. La imagen de la tarjeta la podemos ver a continuación:



Fig.-3.1.-Tarjeta de adquisición "DT9812" de la casa "Data Translation".

Esta tarjeta se estuvo utilizando desde el principio del estudio, sin embargo, se dieron ciertos problemas a la hora de usarla. El primero de ellos fue conseguir controlar los tiempos de ejecución del programa ya que al conectar la tarjeta de adquisición con el ordenador aparecieron problemas de retraso en la comunicación, por lo que la frecuencia de muestreo que se alcanzaba con la tarjeta no era exactamente la que se esperaba y se usó una más pequeña. Más tarde, cuando se quiso experimentar con señales de tipo PWM, no se pudo hacer funcionar la tarjeta con este tipo de señal, por lo que se presentó la oportunidad de usar otra tarjeta que se mencionará a continuación y que disponía de salidas de tipo PWM, por lo que al final se dejó de un lado esta tarjeta.

3.1.1.3.-Tarjeta de adquisición Arduino

La segunda tarjeta de adquisición que se usó, fue una placa conocida con el nombre de "arduino". Esta tarjeta pertenece a lo que se conoce como "Open Source", es decir,

código abierto. Se puede adquirir en internet a un precio de 22 euros y desde la página web de arduino.cc/es se pueden descargar multitud de proyectos hechos con esta placa así como encontrar mucha ayuda sobre ella. El cerebro de esta tarjeta es un procesador Atmega328, dispone de 14 entradas/salidas digitales, 6 de las cuales pueden ser usadas como salidas PWM y una de las causas de porque se elige finalmente esta tarjeta. Dispone también de 6 entradas analógicas y de un reloj de 16Mhz.



Fig.-3.2.-Placa Arduino.

Debido al precio de la placa comparado con el de la anterior, a su facilidad de uso, ya que se tardó menos de tres horas en hacerla funcionar con el sistema y de conectarla a Matlab, y a que dispone de varias salidas PWM, que era lo que se necesitaba para empezar a usarlas con los cables de nitinol, se decidió cambiar la anterior tarjeta de adquisición de datos por esta.

3.1.2.-Circuitos de accionamiento de los SMA

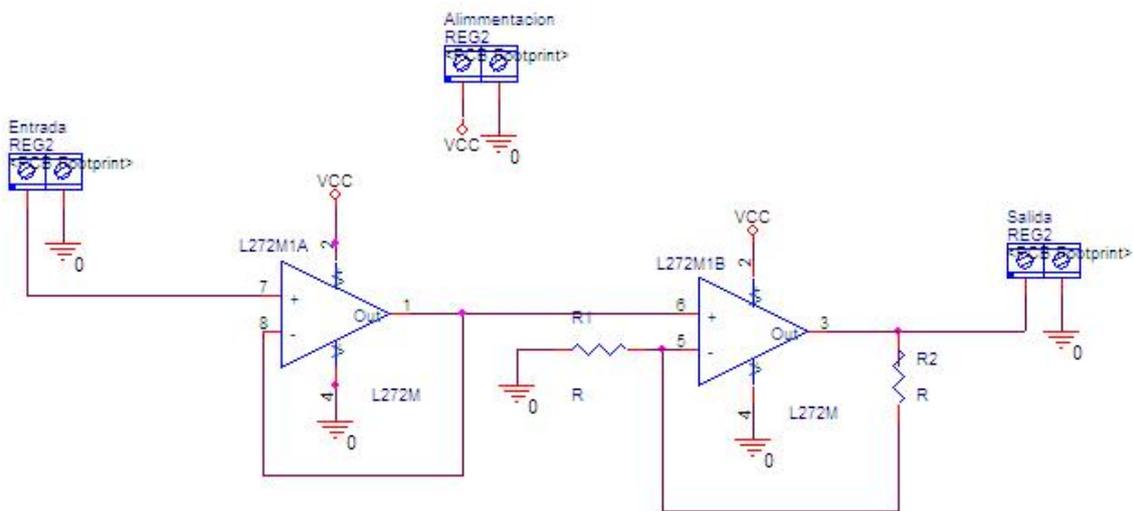
A continuación se describen los distintos circuitos de accionamiento de los cables SMA usados en los experimentos. Estos circuitos estarán comandados por las tarjetas de adquisición vistas en el punto anterior, sirviendo así de conexión entre el hardware de control y los SMA.

3.1.2.1.-Circuito de control para SMA de 150um.

Según el fabricante este tipo de cable necesita unos 400mA de corriente para ser accionado, sin embargo, este dato se ha comprobado en el laboratorio usando una fuente de alimentación con la que se ha hecho pasar una corriente a través del cable,

Capítulo 3

para así, accionar y hacer pasar de su fase martensítica a su fase austenítica a los cables SMA. Se comprueba finalmente que se necesita que pase una corriente de unos 400mA a unos 600mA por el cable. De esta manera, aunque el fabricante recomienda una corriente de 400mA, se comprueba que aplicando una tensión de unos 10 V por el cable pasa más o menos unos 600mA de corriente y así el cable actúa bastante bien. Después de comprobar estos resultados, se diseña un circuito que pueda aportar por lo tanto estos valores, es decir, que pueda dar como salida unos 10V de caída de tensión así como unos 600mA de corriente. Para esto se busca en el laboratorio los materiales que tenemos a disposición y se encuentra el integrado 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. A continuación, se muestra el esquemático del circuito:



Esquema 1.-Circuito de control SMA

Según la teoría de los amplificadores operacionales, se tiene la siguiente ecuación que se cumple en el esquemático anterior.

$$U_s = U_e \left(1 + \frac{R_2}{R_1} \right)$$

Ecuación1.-Amplificador operacional.

Donde U_s es la salida y U_e es la entrada. Todo esto, para resistencias del mismo valor, que dará por tanto finalmente.

$$U_s = 2U_e$$

Por lo que el operacional doblará la tensión introducida y por tanto bastará con 5V de entrada para obtener la salida necesaria en los cables SMA. Esto hace que tanto la primera tarjeta de adquisición como la segunda puedan ser utilizadas, ya que la primera puede dar una tensión de salida de 10V, mientras que el Arduino que es la usada finalmente, no puede dar más de 5V de salida, pero con esta configuración tanto una como otra se pueden usar sin problemas, ya que cubre las necesidades de tensión requeridas.

3.1.2.2.-Circuito de control para SMA de 100um.

En los últimos experimentos y más concretamente en el prototipo final [véase capítulo 5.4], se ha usado cables de 100um. Para estos cables las necesidades eléctricas han sido otras con respecto a los de 150um, por esto, el circuito de accionamiento ha sido modificado, aunque los cambios han sido mínimos. Debido a que para los cables de 100um necesitamos una tensión de solo 5V, para obtener una corriente de 200mA a 300mA en el cable, se ha modificado el circuito cambiando únicamente una de las resistencias, ya que debido a que ahora se necesita menos corriente y en definitiva menos potencia para cambiar el estado del SMA. Por esto los cambios realizados en el circuito ha sido cambiar la resistencia R1 por un valor 10 veces menor al de antes, obteniéndose la siguiente ecuación:

$$U_s = U_e \left(1 + \frac{1}{10}\right)$$

De donde se obtiene:

$$U_s = U_e * 1.1$$

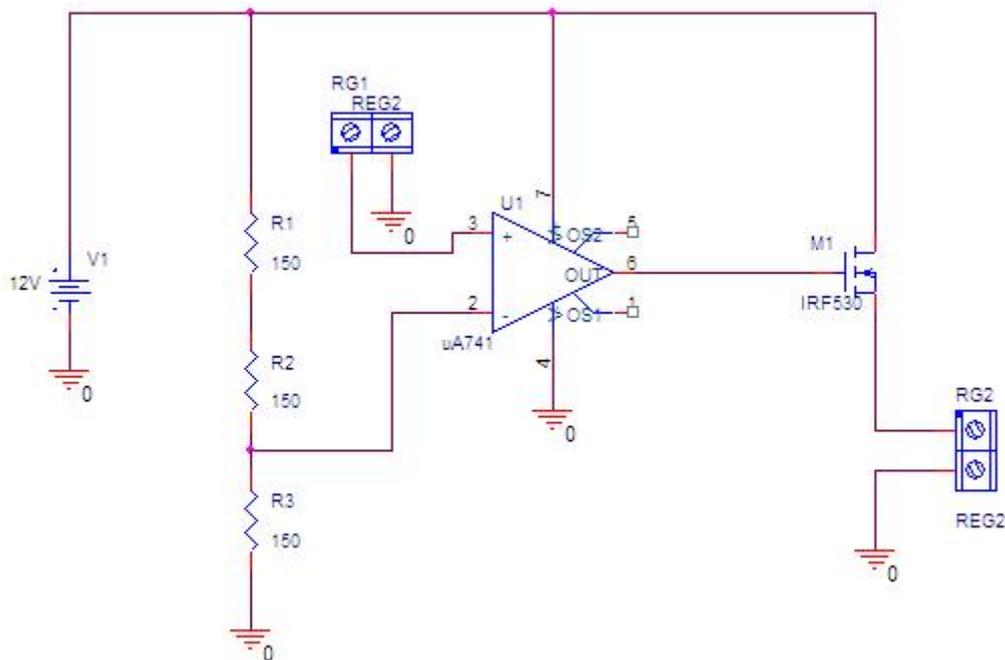
Por lo que la multiplicación que obtendría la señal de entrada es prácticamente unitaria. La elección de la resistencia 10 veces más pequeña, ha sido debido a que era la que se encontraba más a mano en el laboratorio y de acuerdo con que teniendo un factor de multiplicación de 1.1 los resultados que se obtenían eran buenos y suficientes. La salida de este circuito se conectará a los SMA a través de dos pinzas de cocodrilo.

3.1.2.3.-Circuito de control para el muelle SMA.

En otras de las maquetas construidas se ha usado también un muelle SMA para poder realizar el movimiento en dos direcciones [véase el capítulo 3.3]. Debido a que las necesidades eléctricas de este muelle, necesarias para poder realizar un control, son muy distintas y mucho más altas que las de los SMA anteriores, se deberá usar una electrónica totalmente distinta. Ahora se necesitará una potencia mucho mayor para poder alimentar de corriente al muelle SMA, ya que este con sus 0.8 milímetros de sección de alambre, necesita muchísima más potencia para poder calentarse y

Capítulo 3

comenzar su fase de austenita. En concreto se ha calculado usando una fuente de alimentación al igual que antes, que el muelle necesita más de 6A para poder comenzar su movimiento, por lo que se diseña y construye un circuito con un transistor modelo IRF530 que dispone de una corriente máxima de 14A. Esta corriente es suficiente corriente como para que el cable se mueva ya que en las primeras pruebas que se han hecho directamente con el cable enganchado a la fuente, se ha comprobado el movimiento de este, con un consumo de 9A a 10A. El circuito descrito es el siguiente:



Esquema 2.-Circuito formado por el transistor IFR530 para el muelle de nitinol.

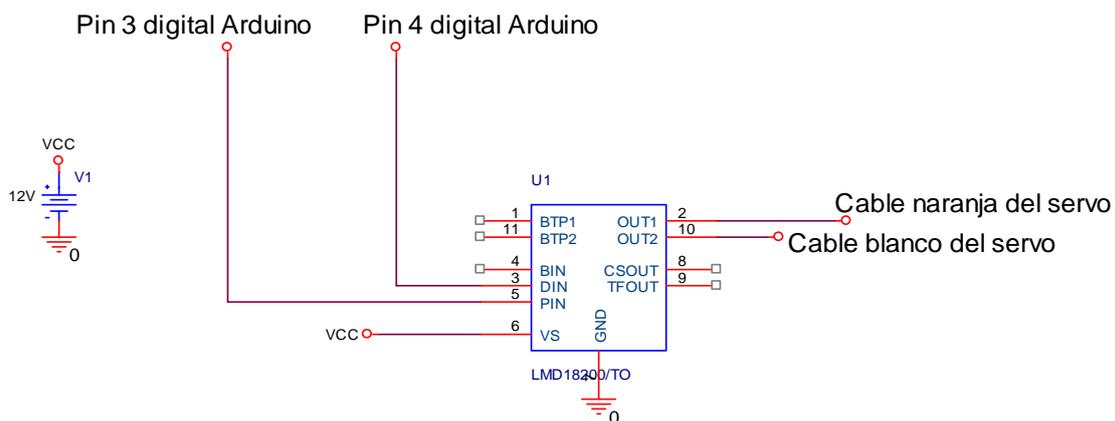
Como se puede apreciar en el esquema el transistor está gobernado a través de la patilla “gate” por un integrado UA741 que es un operacional con el que se le envía la señal de control para que el transistor deje pasar la corriente o no. La alimentación es de 12 voltios tanto para el operacional como para el transistor, con esta se consigue la corriente necesaria. De esta manera, el circuito de control mandará un pulso de 5 V a la patilla 3 del UA741, este pulso hará que la diferencia de tensión entre la patilla 3 y 2 sea positivo, por lo que se producirá una tensión en la puerta del transistor IFR530 a través de la patilla 6 del UA741 con lo que el transistor se abrirá en ese instante y dejará pasar la corriente resultante de la tensión de 12 V aplicada sobre el muelle SMA. Para conseguir esta corriente con una tensión de 12 V se ha usado una fuente de alta potencia del laboratorio.

Observaciones:

Hay que resaltar que se ha podido comprobar que si se queda durante mucho tiempo pasando la corriente sobre los muelles estos se estropean, es decir, pierden su efecto memoria debido al sobrecalentamiento. Por esto, se deberá proceder con cuidado y programar un tiempo máximo a partir del cual se deberá de cortar la corriente en el muelle para no romperlo.

3.1.3.-Circuito de control del motor DC.

En la maqueta definitiva de pruebas, como se ha explicado anteriormente [véase capítulo 1.2] se va a realizar la comparativa entre los actuadores SMA y el motor DC. Por tanto, se ha diseñado también un circuito electrónico para realizar el control oportuno sobre el motor DC. Este circuito, ha sido necesario, ya que debido a que el motor DC necesita girar en los dos sentidos, tendrá que ser alimentado también en los dos sentidos para poder girar en una dirección o en la otra. Sin embargo, Arduino no puede realizar este cambio de polaridad si no se hace de manera manual intercambiando los pines. Se presenta por esto, un problema para realizar el control del motor DC con el arduino. La solución a este problema se encuentra usando el controlador de motores LMD18200. Este controlador tiene un pin que sirve para cambiar la polaridad de sus salidas, haciendo así controlable al motor DC en los dos sentidos de giro. Por lo tanto el circuito encargado de controlar al motor DC vendrá dado por el siguiente esquemático.



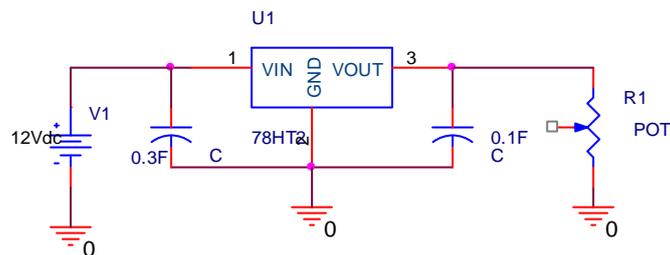
Esquema 3.-Esquema electrónico del motor DC.

Con este circuito, la señal de control llegará al integrado por la patilla 3 de Arduino a la patilla 5 de este, mientras que la señal de control de dirección llegará al integrado por la patilla 4 de Arduino a la patilla 3 del integrado. Modificando la señal de entrada de la patilla 3 del integrado a nivel alto (5 V TTL) o a nivel bajo (0 V), la señal de salida del

integrado que corresponde a la patilla 2 y 10 cambiará su polaridad, haciendo así que el motor gire en un sentido o en otro.

3.1.4.-Circuito regulador de tensión para el potenciómetro.

Este es un circuito bastante sencillo que se encarga simplemente de regular la tensión de alimentación del potenciómetro, ya que este se alimenta a 5V, y se ha usado una batería de 12V [véase capítulo 5.4], por lo que habrá que adecuar esta tensión a la del potenciómetro. Esto se conseguirá con un circuito formado básicamente por el integrado 7805 y un par de condensadores.



Esquema 4.-Circuito regulador de tensión del potenciómetro.

Este circuito por tanto, proporcionará a la salida una tensión de 5V teniendo una tensión de entrada de 12V, de esta manera será el encargado de alimentar al potenciómetro.

3.1.5.-Descripción de los SMA usados.

Los materiales utilizados en este proyecto han sido varios:

- Los SMA de 150um han sido usados en los distintos tipos de maquetas que se han diseñado para realizar los experimentos previos a la plataforma final. Estos cables de 150 micrómetros de diámetro son de tipo LT, habiendo dos tipos de cables los LT y los HT. La diferencia entre estos dos tipos es la temperatura con la que se activan siendo está más baja para los LT que para los HT, de ahí sus siglas en ingles de “Low Temperature” y de “High Temperature” respectivamente. Estos SMA tienen además unas propiedades eléctricas de una resistencia lineal de 50 Ω /m y una corriente media de actuación de 400 miliamperios así como una potencia recomendada de 8 vatios por metro. Sus propiedades de fuerza, son una fuerza de 330 gramos en la fase de austenita y de 62 gramos en la fase de martensita. Tienen un tiempo de contracción de 1 segundo y un tiempo de relajación de 2 segundos.

Capítulo 3

- Otro de los materiales usados, ha sido un muelle de nitinol que tiene 0.8 milímetros de diámetro. Este muelle tiene además una fuerza de 3 Newton y un movimiento típico de 100 milímetros. La corriente necesaria para usarlo como actuador es de 6 Amperios.
- El último material usado en la plataforma de pruebas final, han sido los SMA de 100 micrómetros, que tienen unas características eléctricas de una resistencia linear de $150 \Omega/\text{m}$, una corriente media de actuación de 180 miliamperios y una potencia recomendada de $4.86\text{W}/\text{m}$. Todo esto con unas propiedades de fuerza de 150 gr en la fase de austenita y de 28 gr en la de martensita.

Todas las características mencionadas para los distintos materiales usados, se han obtenido de los datos suministrados por el fabricante.

3.1.6.-Potenciómetro.

El potenciómetro de la figura 3.3, es el que se ha usado para poder realizar un lazo de control, es un potenciómetro multivuelta, es decir, cuando llega al final de su recorrido, vuelve a la punta contraria de la escala. Tiene una salida de 0-5V y está alimentado también a 5V. Tiene una resistencia interna de $20 \text{K}\Omega$, con una tolerancia del 20% y una linealidad del 5%. Este potenciómetro, es el que se ha usado en todos los prototipos construidos que se describirán en el capítulo siguiente. Con estas características, este potenciómetro permite una buena resolución para la precisión que se necesita tener en los experimentos.



Fig.-3.3.-Potenciómetro

3.1.7.- Motor DC (Servo).

Como ya se ha dicho antes, para conseguir el objetivo de este proyecto e pretende realizar una comparación de control de posición de un actuador SMA con un motor DC. De esta manera se elige como motor DC un servo que se encontraba también entre los materiales del laboratorio después de haber sido usado en proyectos anteriores. El servo en cuestión es uno de la marca “Futaba”, cuyo modelo es el S3003. Normalmente los servos tienen tres conexiones, dos para la alimentación y otra para la señal de control PWM, además de no girar completamente sino que tienen un tope y están preparados para girar solo un margen de grados. Teniendo en cuenta estas características, ningún motor DC valdría para el objetivo planteado. Sin embargo, este motor DC está “trucado” para que se comporte como un motor DC, por lo que debido a esta situación, es válido para el cometido que se requiere. Así, se decide usar este servo en el prototipo. Para ello se implanta en la base de madera sobre la que se han situado la plataforma principal del prototipo y se conecta con los dos cables que lo controlan al circuito controlador del motor DC explicado anteriormente [véase capítulo 3.1.3].

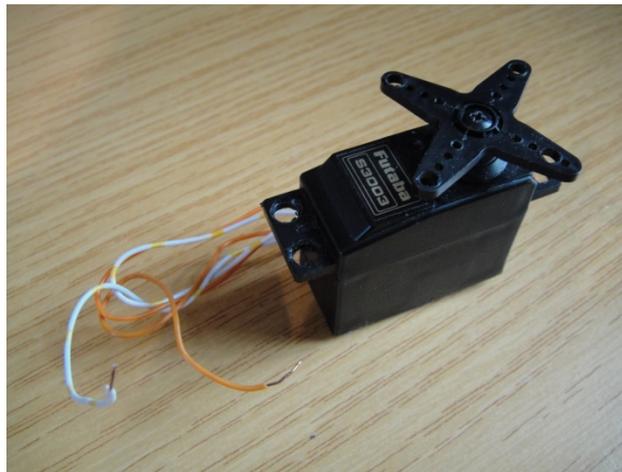


Fig.-3.4.-Servo Futaba S3003

3.1.8.-Fuentes de alimentación.

Para poder alimentar los circuitos electrónicos descritos anteriormente, se ha hecho necesario el uso de dos fuentes distintas de alimentación para laboratorio.

1. La primera de ellas es una fuente doble, es decir, tiene dos salidas de 0-30V y de 0.2A, con una potencia de 60 vatios. Esta fuente ha sido usada en todos los prototipos para alimentar los circuitos de control de los SMA así como al potenciómetro.

2. La segunda de las fuentes tiene una sola salida pero en cambio tiene mucha más potencia. Esta fuente presenta una tensión variable de 0 a 30 voltios y una salida de 0 a 20 amperios, por lo que aporta una potencia de 600 vatios. Esta fuente, ha sido necesaria para alimentar el circuito de control del muelle SMA, que precisaba de una potencia superior a la primera de las fuentes.



Fig.-3.5.-Fuentes usadas en el proyecto.

La primera de las fuentes corresponde a la que se sitúa en la parte superior en la figura 3.5, mientras que la segunda fuente es la que se ve en la parte inferior.

3.2.-Software del proyecto.

Después de haber visto en el anterior capítulo todos los sistemas de hardware que se han usado en el proyecto así como las tarjetas de adquisición, se verá a continuación el software necesario para hacer funcionar correspondientemente el hardware antes descrito. Para realizar los experimentos ha sido necesario conectar las tarjetas de adquisición de datos a un PC. El programa utilizado para la conexión del PC con las tarjetas de adquisición ha sido Matlab. Este programa se usará para programar las tarjetas de adquisición y para poder recoger y administrar todos los datos obtenidos de los experimentos realizados así como para obtener todas las gráficas que han ido obteniéndose de los experimentos, para esto, habrá que configurar e instalar los drivers de las tarjetas para que funcionen con Matlab. Debido a que la placa más usada en el proyecto es la tarjeta de adquisición Arduino, se explicará de manera clara el proceso que hay que seguir para conectar esta tarjeta con el PC y poder así realizar los experimentos.

3.2.1.-Conexión de la tarjeta Arduino al PC.

Lo primero que habrá que hacer será bajar los drivers de la tarjeta Arduino de la página web [6]. Después, habrá que conectar la tarjeta Arduino al PC. El PC detectará el nuevo hardware y comenzará la instalación, para esto, 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. Llegados a este punto se podrá usar la tarjeta con el PC, pero no con el programa Matlab, es decir, la conexión entre el PC y la tarjeta Arduino como tarjeta de adquisición de datos no funcionará aún. Para poder establecer un lazo de conexión entre Arduino y el PC serán necesarios los drivers de Arduino para Matlab. Para esto, se descargarán los drivers gratuitamente de la página web [9]. 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 allí se abrirá una carpeta de los últimos drivers descargados de la página de Mathworks llamada “pde”, dentro se encontrará un archivo llamado “adiosrv”. Este será el archivo que habrá que ejecutar en el entorno de programación de Arduino e instalarlo en él. Una vez hecho todo esto, tendremos por fin la tarjeta de adquisición de datos preparada para ser conectada al PC y establecer la conexión con Matlab. Por último, para realizar esta conexión Arduino-Matlab en el entorno de programación de Matlab, habrá que declarar una variable con el nombre de Arduino y el puerto en el que se encuentra este, por ejemplo “a=arduino(‘COM5’)”. Todas estas órdenes se verán más claramente en los programas definitivos de los experimentos que se han dejado en los anexos.

3.2.2.-Conexión de la tarjeta Data Translation al PC.

Para conectar esta tarjeta al PC también habrá que instalar los drivers para que Matlab reconozca la tarjeta, sin embargo, con esta tarjeta la instalación de estos drivers es mucho más sencilla. Lo único que hay que hacer es ir a la página web de la compañía que comercializa la tarjeta de adquisición [7]. Desde allí habrá que bajar los drivers, para lo cual pedirán que se rellene una tabla con datos y después comenzará la descarga de los drivers. Se bajará un archivo ejecutable en el que lo único que habrá que hacer será pinchar encima de él y la instalación se completará fácilmente siguiendo los pasos.

3.2.3.-Programas de software usados.

En la realización del proyecto, se han hecho uso de varios programas de software necesarios tanto para la realización de los experimentos, como en el diseño de las distintas plataformas de pruebas, así como para poder realizar distintos cálculos. Estos programas se detallan a continuación:

Capítulo 3

1. Matlab: Es un software matemático que ofrece un entorno de desarrollo integrado con un lenguaje de programación propio, la versión utilizada es la r2008a. Ha sido el programa más usado con el que se han realizado todos los experimentos. Con este software se ha podido realizar los programas de control (anexos) además de realizar la conexión de todas las partes físicas (hardware) con el PC para poder así recoger los datos de los experimentos, manipularlos y representarlos de manera analítica.
2. Orcad: Es un programa de sistemas CAD usado para el diseño de circuitos electrónicos así como para las placas de circuito impreso, la versión utilizada ha sido la 10.2. Este programa se ha usado para diseñar todos los esquemas electrónicos que se pueden ver en el proyecto.
3. Word 2010: Es un procesador de texto perteneciente a la suite Microsoft office. Se ha usado para la redacción de este proyecto.
4. Excel 2010: Es un procesador de texto perteneciente a la suite Microsoft office. Se ha utilizado para crear todas las tablas que se pueden ver en este proyecto.
5. Autocad: Perteneciente también a la familia de programas CAD, es un programa de diseño asistido por computadora en 2D y 3D de uso muy popular. La versión utilizada es la de Autocad 2007, se ha usado para hacer algunos dibujos en la redacción del proyecto.

Capítulo 4. Prototipos construidos.

En este capítulo, se han probado de manera experimental los SMA, para ver qué tipo de señales se deberán de usar para poder accionarlos, controlarlos y en definitiva, poder usarlos de manera que realicen la función de actuadores de la mejor forma posible. Se han probado diversas formas de instalación y uso de estos materiales, se verá hasta donde se puede llegar con ellos y cuáles son los más idóneos para lograr los objetivos planteados [véase capítulo 1.2]. En definitiva, se le ha dado el máximo juego posible, que ayude a tomar las mejores decisiones para poder diseñar, desarrollar y construir un prototipo definitivo de prueba de estos materiales. A continuación se describe la construcción y pruebas realizadas con los distintos 4 prototipos realizados:

- Columpio
- Plataforma unidireccional con cable SMA y muelle
- Plataforma bidireccional con cable SMA y muelle SMA
- Plataforma definitiva de comparación de SMA y motor DC

4.1.-Prototipo 1.Columpio

La primera de las maquetas construida para experimentar con los cables de nitinol se ha denominado “Columpio”. Está construida con piezas de “LegoMindstorm” y dispone de una rueda que hace las veces de polea. En esta polea van conectados los cables SMA para tirar de ella y así provocar el movimiento de un contrapeso que hace las veces de “columpio”. El objetivo de este prototipo, es empezar a usar los cables SMA como actuadores, colocando primero uno que tire de la polea y que levante el contrapeso en un sentido, para luego, colocar otro más en sentido contrario y poder así girar la polea en ambas direcciones. Esta polea, tendrá instalado en su eje de forma perpendicular, un potenciómetro que recogerá el movimiento angular de la polea cuando sea movida por el SMA, de esta manera se podrá realizar el cálculo de la elongación del cable, con la ecuación:

$$M = \alpha * r$$

Ecuación 1.-Elongación de los SMA.

Donde M es la elongación del cable, α el ángulo girado por el potenciómetro y r el radio de la polea.

Este sistema puede verse también en la figura 2.7 (b) [véase capítulo 2]. En la figura 4.1, se puede ver en azul el movimiento del “columpio”, en rojo la dirección seguida por el contrapeso y en verde el ángulo que gira el sistema debido a la contracción ejercida por los SMA.

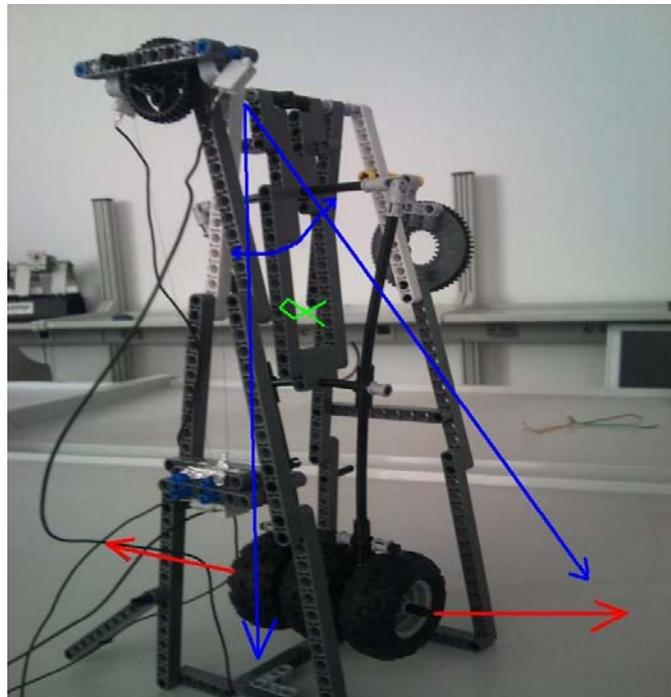


Fig.-4.1.-Prototipo denominado “Columpio”

Debido a la sencillez del primer sistema con un solo SMA y a que el peso no retraía a este lo suficiente en su fase martensítica (no devolvía el SMA a su posición neutra), se ha preparado un nuevo sistema, en el que se realizan pruebas con dos SMA. El movimiento y la disposición que tendrían estos SMA, pueden apreciarse en la figura 4.2.

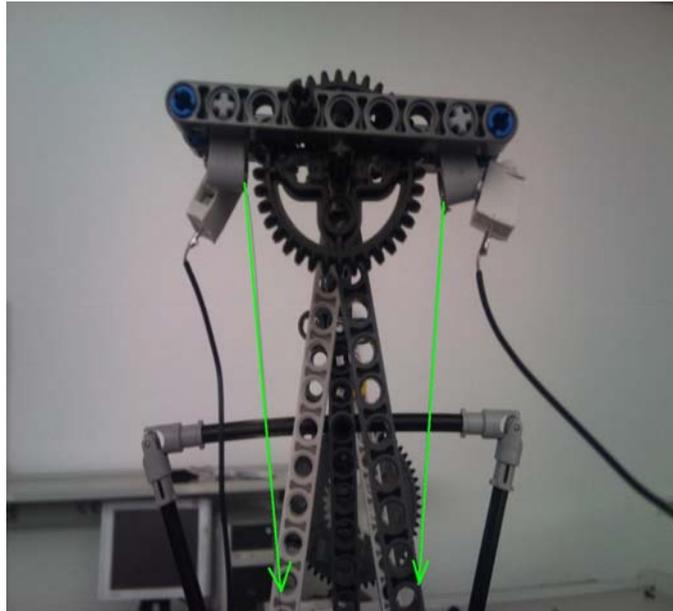


Fig.-4.2.-Sistema de polea del primer prototipo

Ahora, se les ha introducido a los SMA distintos tipos de señales a través de circuitos electrónicos [véase capítulo 3.1.2] para controlar el sistema y ver en qué posición quedan los cables. Para conseguir esto, se dispone de un potenciómetro del que se obtendrá su señal de salida, que será proporcional al movimiento de la polea. De esta manera, se registrará el movimiento de los cables en una y otra dirección, ya que la elongación de los cables será proporcional al ángulo girado por la polea como se ha visto en la ecuación 1. Usando este sistema con los SMA y el potenciómetro se tienen las gráficas de las figuras 4.3 y 4.44.

En la gráfica de la figura 4.3, se observan las señales de entrada proporcionadas por los circuitos de control (abajo), y la salida proporcionada por el potenciómetro (arriba). Primero, se aplica una señal de 2 segundos de duración y de 4V de tensión, las señales se envían por duplicado, como se puede ver, en una señal azul y en otra verde, eso es debido a que una corresponde a uno de los cables, y la otra al otro cable. Cada SMA cuenta con su propio circuito de control. La respuesta a la entrada de estas señales se puede observar en la parte de arriba de la figura, donde el SMA se mueve primero en una dirección (parte más baja de la gráfica) y cuando recibe la señal igual pero en sentido contrario (la primera señal verde), se mueve hacia la parte más alta de la gráfica. La siguiente señal que se introduce en los cables, es una de 2V de tensión repartida en dos escalones de 0.5 segundos y con un intervalo de 1 segundo en medio de la señal. Estas señales hacen moverse el cable de una manera más suave a diferencia que la primera señal que producía un movimiento mucho más brusco. La última señal aplica es una de 3V y 2 segundos de duración que provoca los mismos efectos que la primera señal introducida.

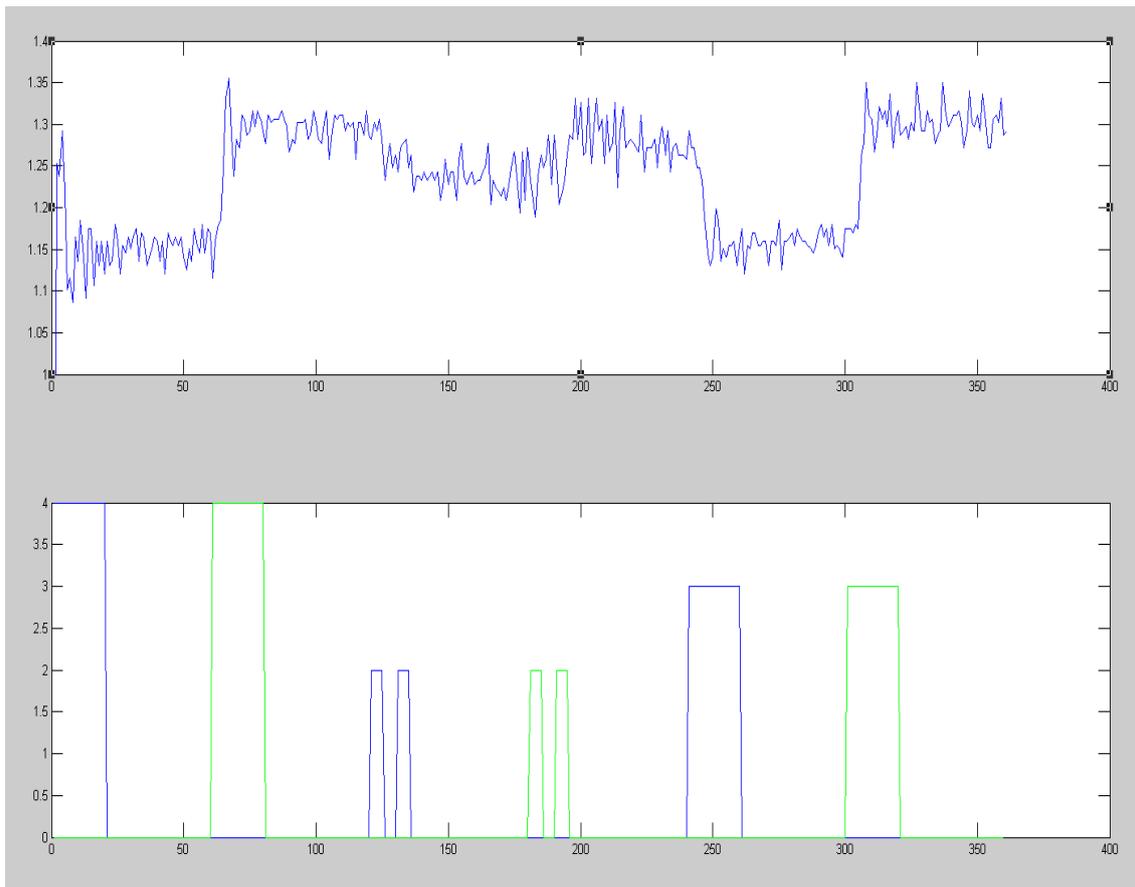


Fig.-4.3.-Gráfica de salida y entrada de señal.

Ahora, para la figura 4.4, se introduce después de los picos de 4 voltios, unas señales cuadradas como las anteriores, pero esta vez de 4 segundos de duración total con intervalos de 0.5 segundos. Se aprecia como describen una variación de extremo a extremo de forma suave. Se observa de esta manera, las respuestas de los dos cables ante la entrada de distintas señales, ya que el objetivo perseguido en estos primeros experimentos, es encontrar un tipo de señal adecuado con el que se pueda controlar la elongación del cable y con ella el giro del potenciómetro.

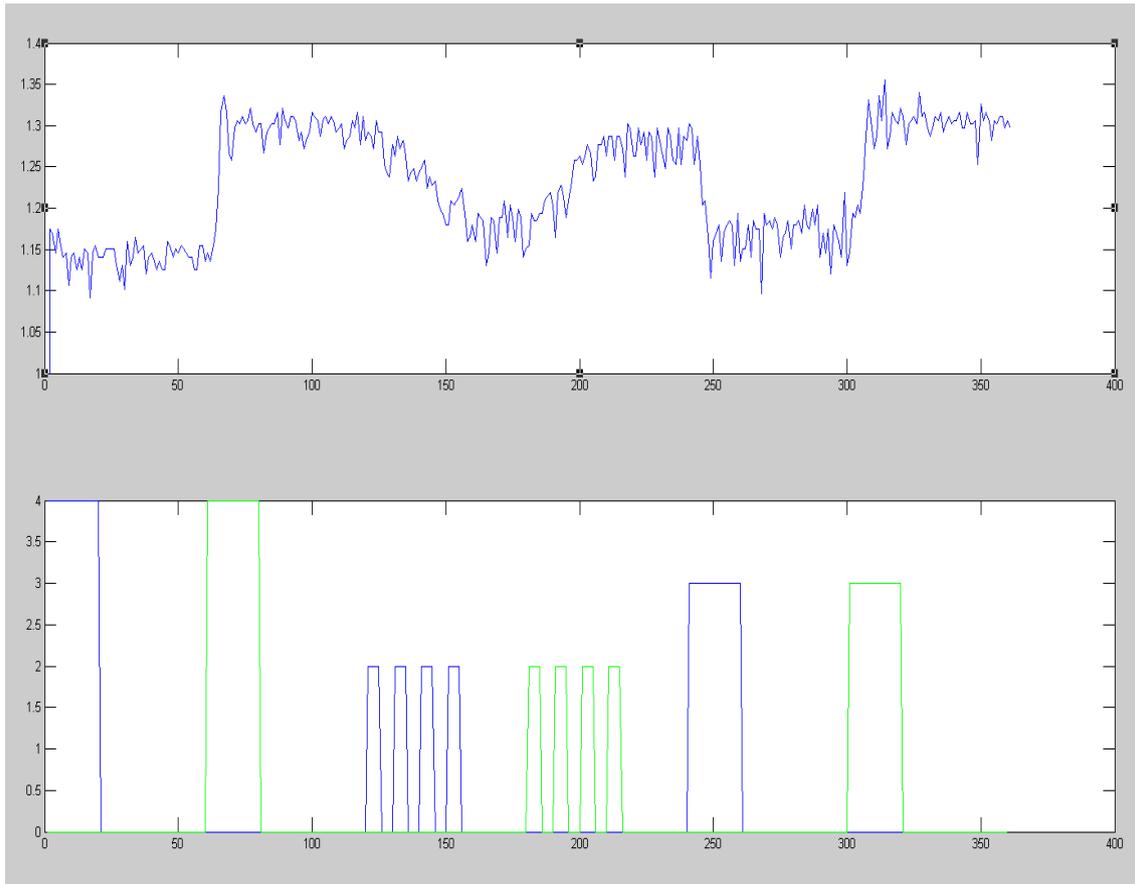


Fig.-4.4.-Gráfica de salida

4.2.-Prototipo 2.Plataforma unidireccional con cable (SMA) y muelle.

Debido a que en los experimentos realizados en el capítulo anterior, costaba mucho trabajo mantener los SMA con la misma tensión, la caída del contrapeso debido a la gravedad modificaba los resultados, además de que la construcción de este no era muy buena, se decide construir otro prototipo, sobre todo para conseguir más precisión en el resultado de los experimentos. Después de pensar en varios diseños, se toma la decisión de construir otro prototipo compuesto por una especie de volante que sería movido por un SMA. Este volante consistiría en un engranaje que estaría en contacto con otro más pequeño, que a su vez movería un eje donde va enganchado el potenciómetro. De esta manera y con una relación de transformación concreta, se consigue que el movimiento del SMA se multiplique y el potenciómetro tenga más margen de movimiento, obteniéndose así más precisión en los experimentos. El funcionamiento de este prototipo sería el siguiente:

1. El cable SMA se encuentra sujeto sobre una plataforma en uno de sus extremos. Cuando el cable SMA se contraiga, este tira de una chapa de metal a

Capítulo 4

la que está sujeto por uno de sus extremos, esta chapa a su misma vez se encuentra enganchada al eje de la rueda dentada grande.

2. En el otro extremo de la chapa, hay enganchado un hilo, que a su vez está enganchado en su extremo opuesto con un muelle. El muelle se sitúa sobre una plataforma movable para poder tensar de forma adecuada el sistema.
3. Con este muelle, se consigue que el cable de nitinol vuelva a su estado inicial después de su fase de austenita ayudando así a la fase de relajación o martensita a recobrar su forma inicial.

Todo este sistema, permite poder realizar los experimentos con más precisión que los anteriores. Debido a que la construcción de este prototipo, es de mayor calidad que el anterior, se espera tener menos problemas, y así, disponer de mejores resultados en los experimentos. Se ve a continuación, el sistema descrito, en la figura 4.5:

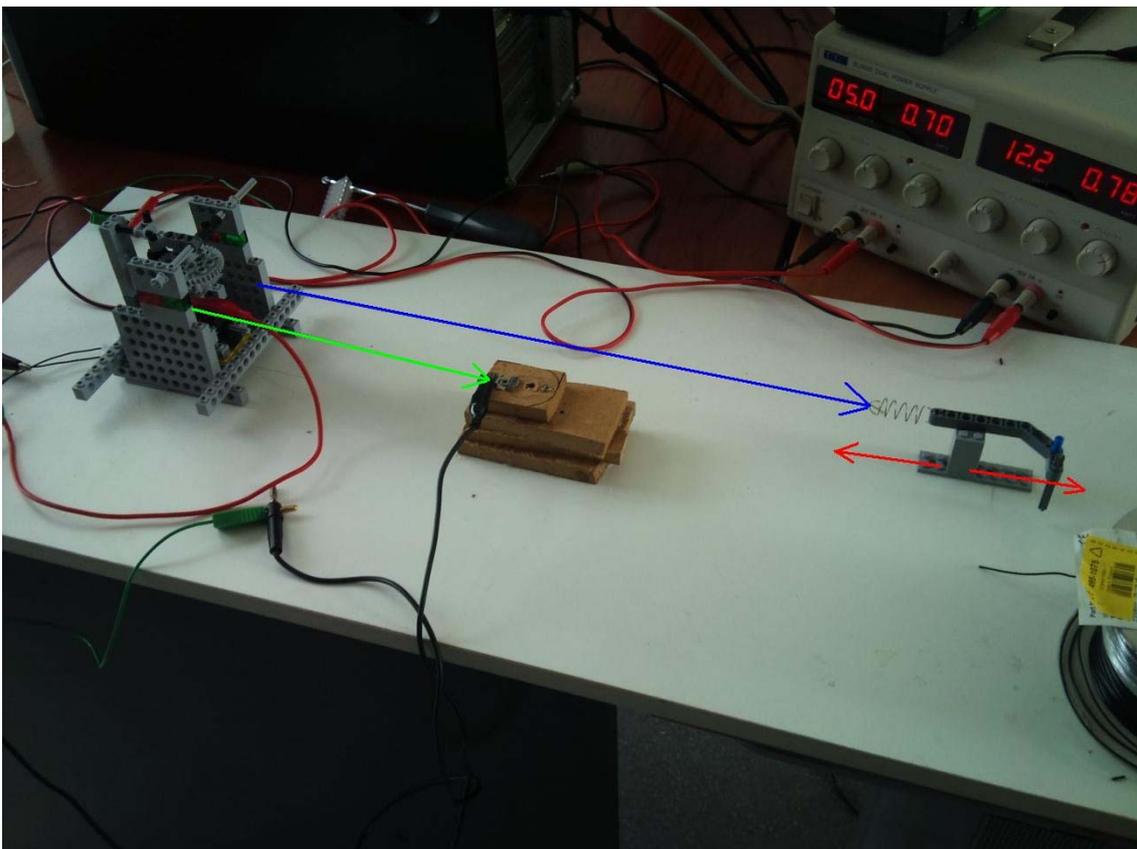


Fig.-4.5.-Plataforma de dirección

Este sistema sería muy parecido al de la figura 2.7 (b), formado por un SMA y un muelle [véase capítulo 2]. Se puede ver en verde el SMA y la dirección en la que se

Capítulo 4

movería el sistema cuando fuese accionado. En azul se puede ver el sistema formado por el muelle y un cable que devuelven al SMA a su posición de equilibrio cuando el SMA se encuentre en su fase de martensita. Por último se puede ver en rojo el dispositivo para que el sistema se encuentre siempre con la tensión necesaria de manera que el muelle mantenga lo más estirado posible al SMA, aprovechando así su capacidad de contracción.

Se ha intentado diseñar una plataforma lo suficientemente estable y robusta como para conseguir los mejores resultados en los experimentos realizados en lo que a precisión se refiere. La siguiente figura 4.6 muestra la plataforma del volante:

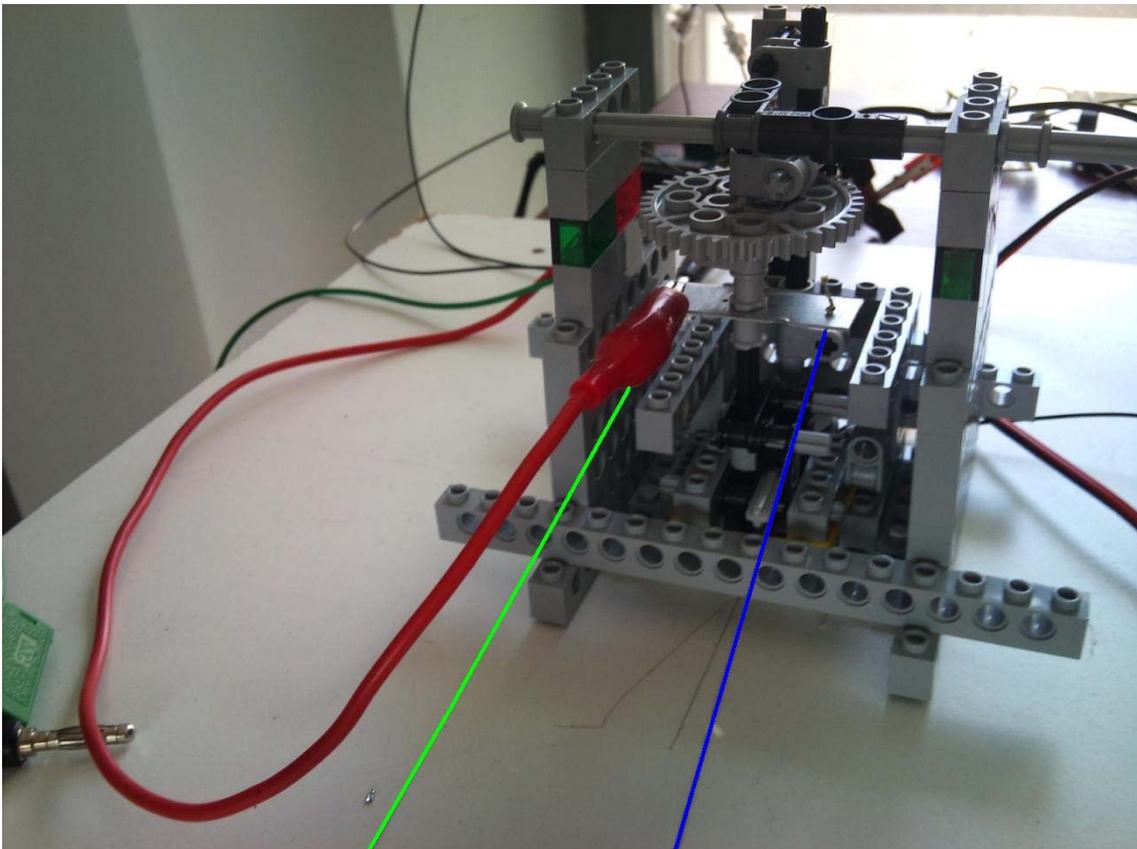


Fig.-4.6.-Plataforma de "volante"

Las gráficas de algunos experimentos realizados con esta maqueta se pueden ver a continuación:

Experimentos para Amplitudes de 3 voltios

Se empieza a hacer pruebas en las que se irá introduciendo escalones con una misma amplitud, que ahora es de 3 voltios, y con distintos anchos de pulso. En esta gráfica se ha introducido un escalón de 0.2 segundos de ancho, otro de 0.3 y otro de 0.4 segundos, además de los tres grandes de un segundo que se usan de referencia para ver la diferencia entre los escalones grandes y los pequeños.

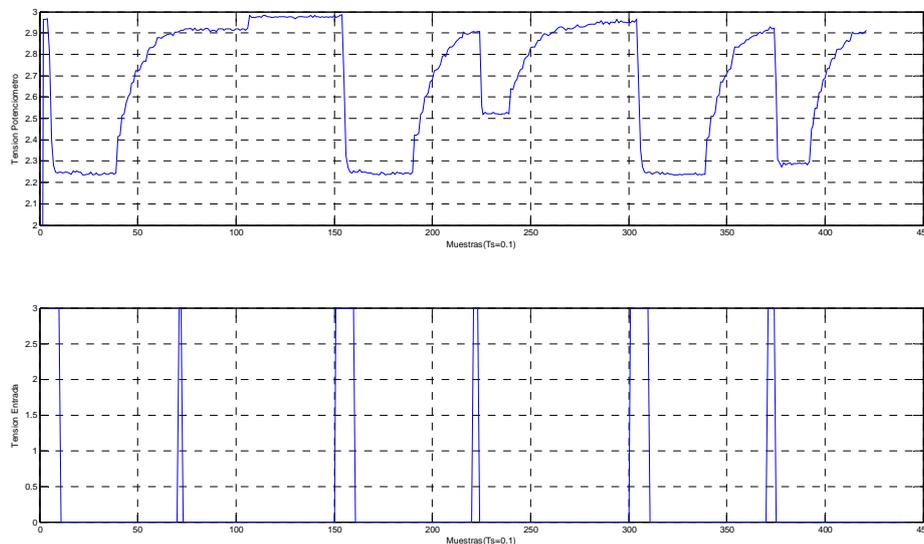


Fig.-4.7.-Pruebas realizadas para 3 voltios

Como se observa en la gráfica de abajo de la figura 4.7, cuando se le aplica un escalón de 0.4 segundos el SMA, este se contrae y la señal del potenciómetro que es la que aparece en la gráfica de arriba, baja debido al movimiento generado por el SMA, ya que esta señal es suficiente para accionarlo. Después del enfriamiento, que ocurre mientras la señal se sitúa en la parte más baja de la gráfica, el SMA vuelve a recuperar su forma debido a que la fase de austenita se termina y pasa a la fase de martensita, donde empieza a recuperar su forma, ayudado por la fuerza ejercida del muelle. Cuando se le aplica el segundo escalón de 0.2 segundos, no ocurre nada, esto es debido a que este no es suficiente para accionar al SMA. En el tercer pulso, que es de referencia, el SMA vuelve a llegar a su máxima contracción. En el cuarto escalón, debido a que es aplicado durante 0.3 segundos, el cable se acciona, pero no el tiempo suficiente como para llegar a su máxima contracción, por lo que se ve como este llega a mover el potenciómetro la mitad. Tanto con el tercer escalón de referencia, como con el último de 0.4 segundos, el SMA llega hasta su máxima elongación.

Experimentos para amplitudes de 2 voltios

En esta grafica de la figura 4.8, se introduce ahora un escalón de 0.2 segundos de ancho, otro de 0.3 y otro de 0.4 segundos para una amplitud de 2 voltios, usando entre ellos otros tres escalones de referencia..

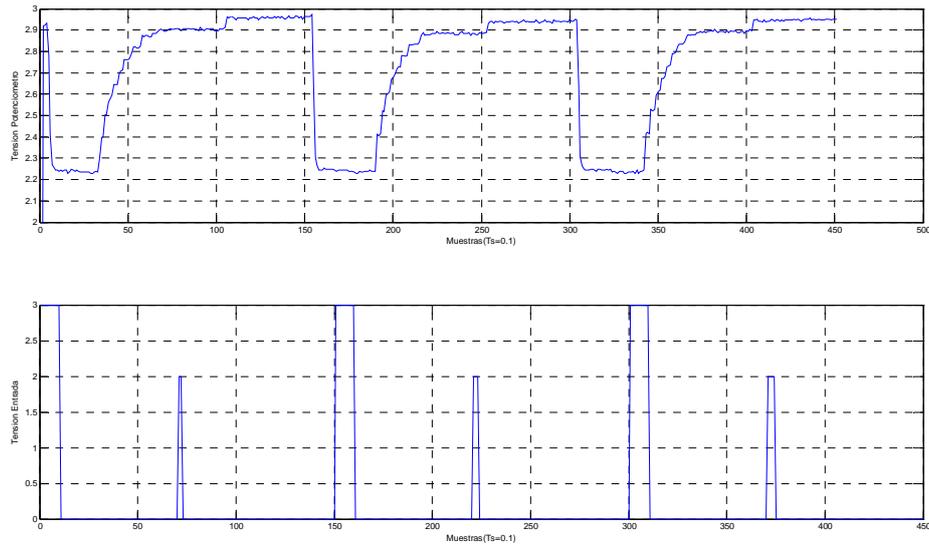


Fig.-4.8.-Gráficas de salida para 2 voltios

Como vemos ahora en la gráfica de señales de 2V, el cable no puede ser accionado con ninguna de las señales aplicadas ya que estas no son suficientes para llevar al SMA su fase de austenita. Esto se aprecia al compararlas con otras de 3V que se han aplicado y que si han accionado al SMA en la gráfica de la figura 4.7.

Se pueden obtener como conclusiones de estos experimentos que es necesario tanto una mínima tensión, como un mínimo tiempo de aplicación, para que el SMA pase a su fase de austenita y se contraiga.

Experimentos con señales PWM

Observando la dificultad de controlar el movimiento del SMA con señales como las que se han usado en experimentos anteriores, se pasa a usar señales de modulación por ancho de pulso PWM. Con este tipo de señales se comienza a realizar un control de posición con un PID y el SMA obteniéndose estos resultados:

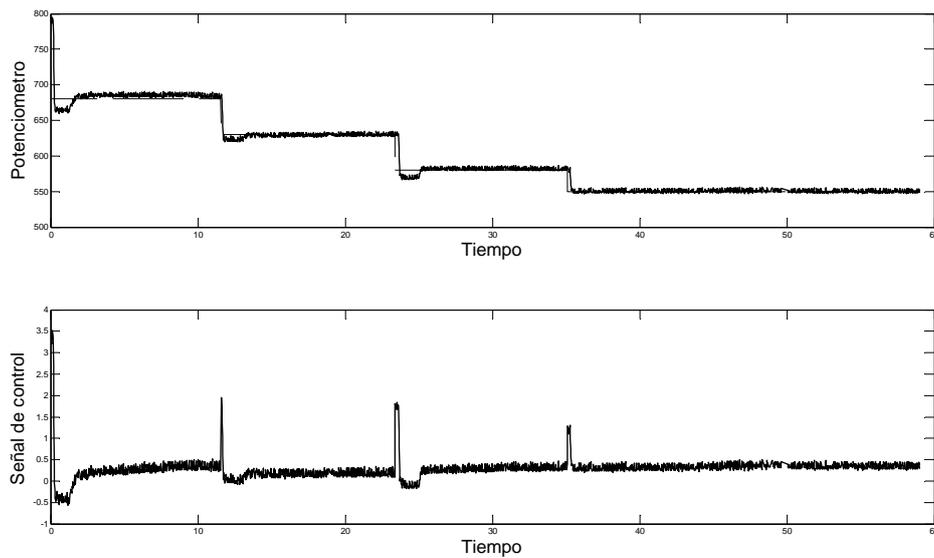
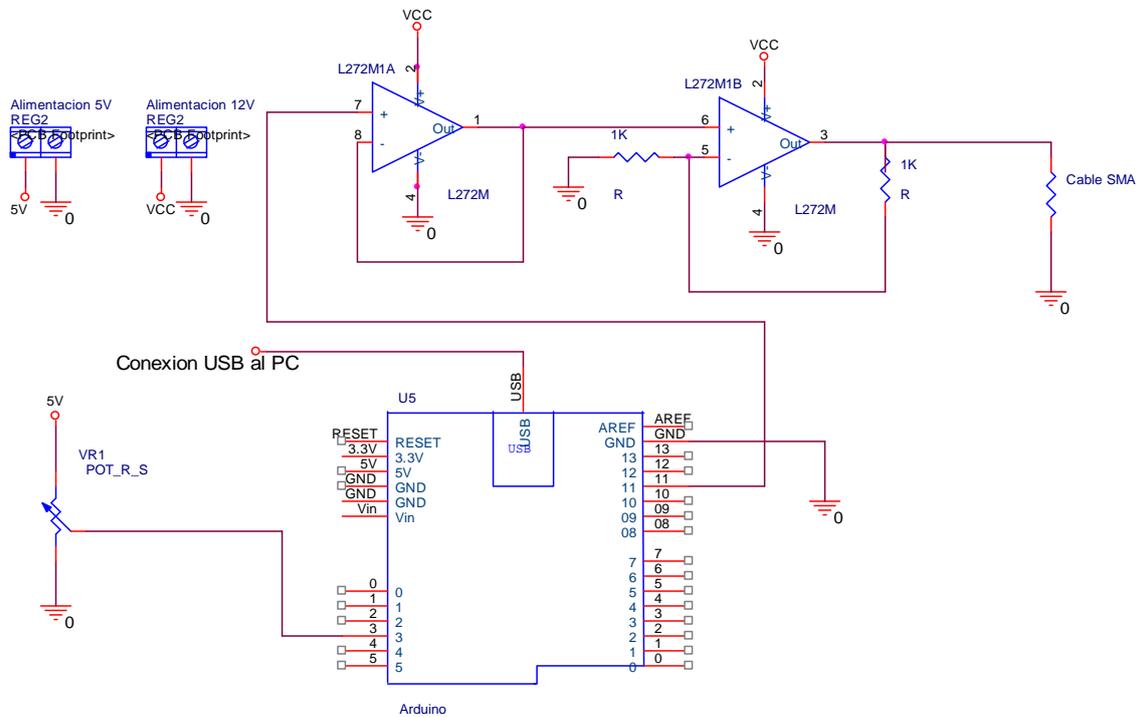


Fig.-4.9.- Control para $K_p=0.03$ y $K_i=0.0001$

En la gráfica de la figura 4.9, se puede ver como se ha dado 4 referencias (680, 630, 580 y 550) en la gráfica superior, para que el SMA las siga, mientras que en la gráfica inferior se puede ver la señal de control que se mantiene en torno a los 0.5 V con picos de hasta 2 V. Los valores introducidos para un controlador PI han sido de $P=0.03$ e $I=0.0001$. Se aprecia como el control se bastante bueno observándose algo de sobrepico.

Finalmente se muestra un esquema del conexionado electrónico de todo el sistema.



Esquema 5.-Esquema electrónico final SMA 150um.

4.3.-Prototipo 3. Plataforma bidireccional con muelle (SMA) y cable (SMA).

Después del anterior montaje, se construye otro en el que esta vez, el movimiento se pueda controlar en las dos direcciones, y que además, no dependa del tiempo que necesita el muelle para estirar al SMA. Para ello, se monta en el lugar donde estaba el muelle anterior, otro con el que poder realizar un movimiento en el sentido contrario. Esto se puede conseguir, debido a que el nuevo, es un muelle SMA de compresión, que al aplicarle una corriente se encoge. Este permitiría el mismo movimiento que el anterior muelle, a la hora de actuar el cable SMA, pero luego, cuando el SMA pase a la fase de martensita, el nuevo muelle realizaría el movimiento contrario al cable SMA. El montaje queda reflejado en la figura 4.10:

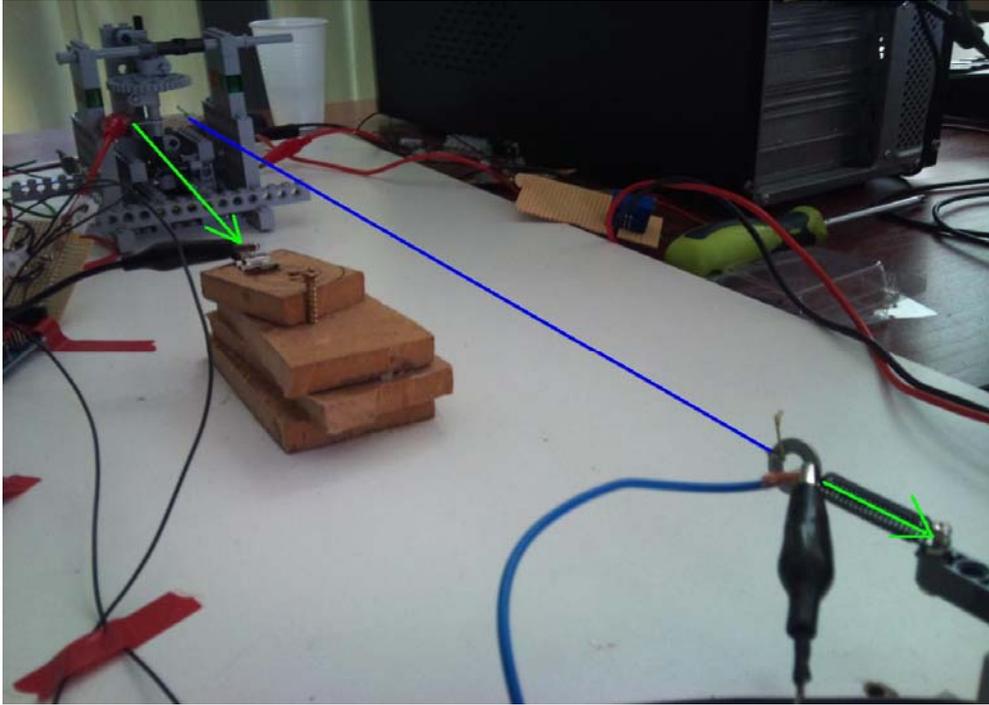


Fig.-4.10.-Montaje con el muelle y el cable SMA.

En la figura se puede apreciar los materiales SMA en verde y las direcciones que siguen cuando actúan pasando a su fase de austenita. En azul, el cordón que une la pletina con el muelle SMA.

Con este montaje, se realizan varios experimentos y se obtiene diversos resultados bastante buenos reflejados en las siguientes gráficas descritas a continuación.

- La gráfica correspondiente a la figura 4.11 ha sido obtenida con control con muelle y cable a la vez. Se ha aplicado una referencia con 3 escalones para el cable (680,630,580,550) y 1 para el muelle (600), todos estos de unos 10 segundos de duración. Se ha aplicado un control proporcional únicamente con una componente $P=0.03$, tanto para el cable como para el muelle. La señal de control está en torno a los 0.5-1 voltios, con picos de 2 V y con un mayor consumo de energía para el caso del muelle, que se comporta de manera más lenta que el cable que muestra tener sobrepico en todos los escalones.

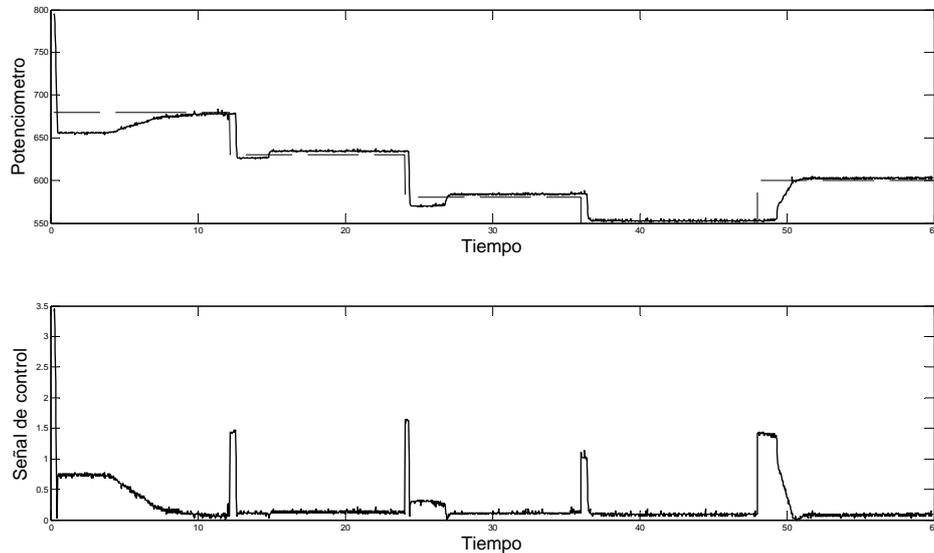


Fig.-4.11.-Gráfica de pruebas de control

- En la gráfica de la figura 4.12 se muestra un control de muelle y cable SMA's, pero esta vez, con más escalones en el sentido del muelle para comprobar mejor su capacidad de movimiento. Se usa ahora un controlador P con una componente proporcional para el muelle es de $P=0.1$ y la misma anterior para el cable $P=0.03$. La referencia para el cable será de (700, 650 y 600), mientras que para el muelle será de (650 y 700), los escalones tendrán la misma duración que anteriormente, situándose en torno a los 10 segundos. La señal de control para el cable tendrá picos de 1.5 V, mientras que para el muelle se llegarán a alcanzar picos de 4.5 V con un consumo de energía más grande para el muelle, debido a su consumo. Se sigue observando que el muelle es más lento que el cable y que el cable presenta sobrepico en dos escalones.

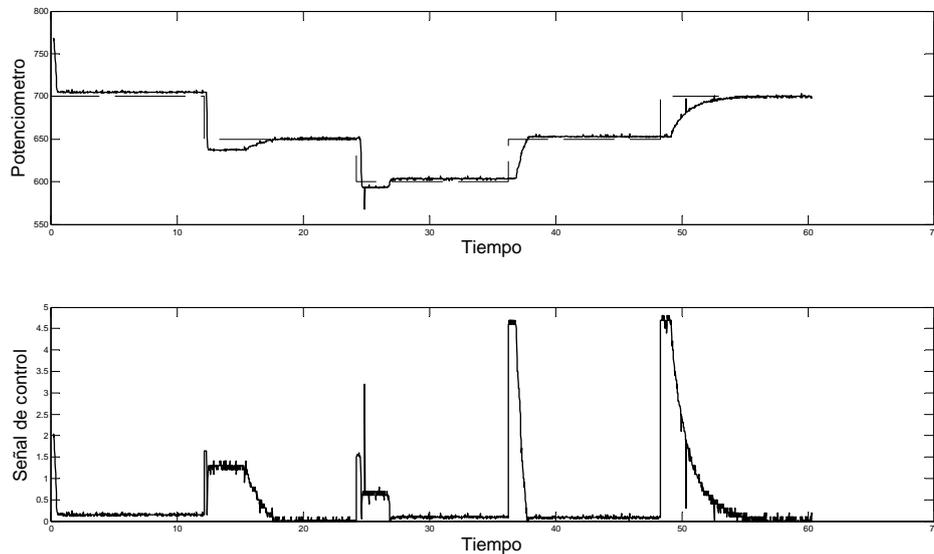


Fig.-4.12.-Pruebas de control

Se puede apreciar como en estos experimentos el muelle de nitinol tarda más tiempo en actuar que el cable, por lo que se puede obtener la conclusión de que el muelle es más lento que el cable.

Observaciones:

Cuando se experimenta con el muelle se comprueba en el amperímetro de la fuente del muelle (la grande), que el consumo de corriente sube a 20 y 30 amperios, pero después de varias pruebas se comprueba que no es cierto ya que ni el muelle se quema ni es posible que esto ocurra debido a que el transistor solo soporta corrientes de 14 amperios.

- Se vuelve a repetir el mismo experimento que para la gráfica de la figura 5.12 en la figura 5.13, pero esta vez, la fuente que alimenta al muelle se limitará a 3A. Partiendo de que las referencias a seguir y las consignas del controlador son las mismas, se puede apreciar ahora que el cable no presenta sobrepico, así como un menor consumo de energía, probablemente porque ahora disponga de menos. Por otro lado y debido a la limitación energética que existe en la fuente, el muelle es más lento que en la gráfica 4.12, presenta picos de 4V y consumos de energía muy parecidos a los anteriores.

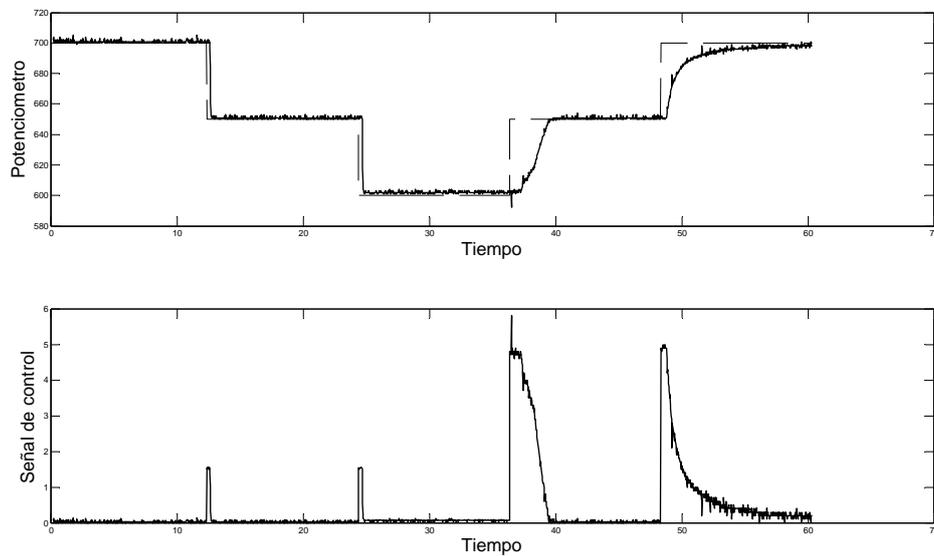


Fig.-4.13.-Gráfica de pruebas de control

- De nuevo en la gráfica de la figura 4.14, se tendrán los mismos parámetros de referencia de seguimiento, así como de controlador, de los que se disponía en la figura 4.13 y 4.12, pero esta vez la fuente estará limitada a 5A. Debido a esto, se comentarán solo los resultados. Para el cable, se mantendrán los mismos resultados que anteriormente, es decir, ya no habrá sobrepico y la señal de control muestra unos picos de 1.5V. en el muelle se obtendrá un error estacionario menor, consiguiéndose un menor tiempo de establecimiento.

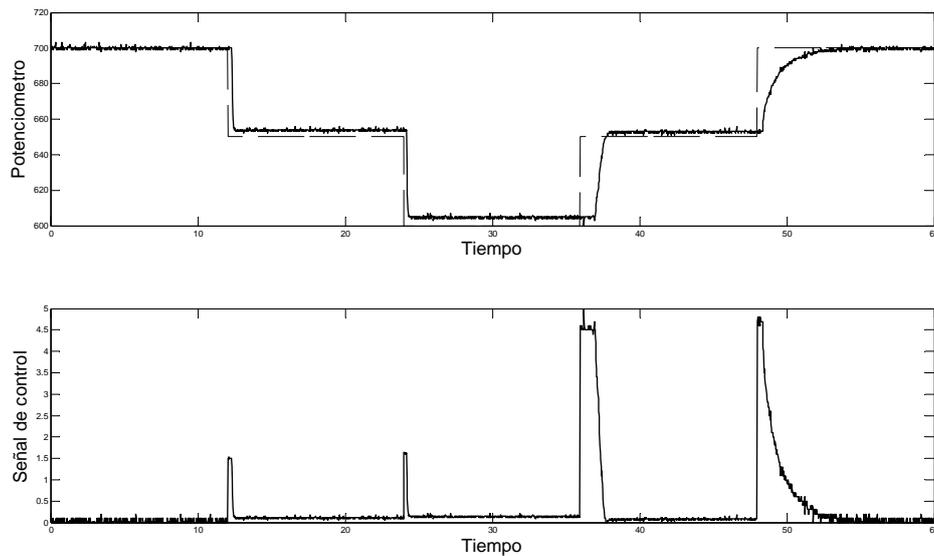


Fig.-4.14.-Gráfica de pruebas de control

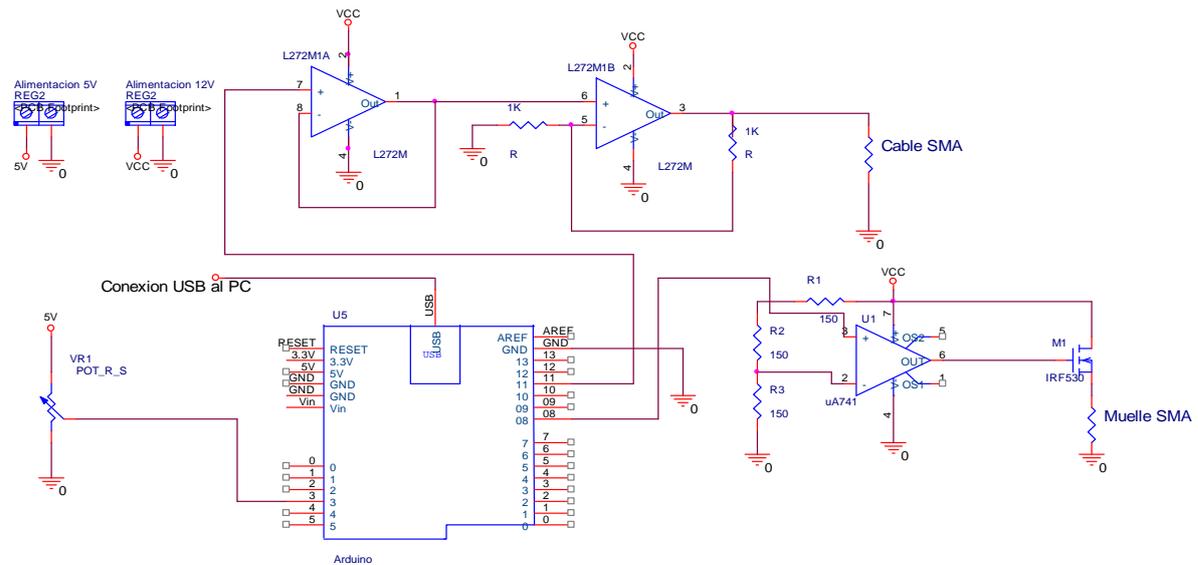
Después de estos experimentos se extraen varias conclusiones:

1. La primera ya mencionada es que el muelle es claramente más lento que el cable, por lo que la convivencia del cable y el muelle en el mismo sistema es muy difícil si se quiere tener un sistema eficaz.
2. La segunda es que el requerimiento del muelle para trabajar es mucho más alta, ya que este necesita una fuente de alta potencia [véase capítulo 3.1.8] y que el enfriamiento en la fase de austenita para el muelle SMA es de muchos segundos, mientras que en el cable es de apenas 1 o 2 segundos. Debido a esto, si se estableciese un experimento con distintas referencias, llegaría un momento en el que el cable no podría estirar del muelle. Esto ocurriría debido a que el muelle SMA, aún se encontraría en su fase de austenita o por lo menos, en el punto en el que las dos fases coexisten y por lo tanto el material aún no es moldeable, impidiendo el control de posición.
3. En uno de los experimentos realizados, uno de los muelles se ha sobrecalentado perdiendo sus propiedades de memoria de forma. Debido a

este hecho, se ha tenido que modificar el programa informático de control para que esto no ocurra, limitando el tiempo de exposición de corriente en el cable.

De estas conclusiones, se aprende que para trabajar con el muelle SMA, se tendrá que usar un sistema de refrigeración para el muelle. Debido a estos problemas planteados, se desecha la posibilidad de trabajar con el muelle SMA en este proyecto.

A continuación se muestra el esquemático de todas las conexiones electrónicas para el sistema detallado de cable y muelle SMA.



Esquema 6.-Esquema electrónico para el cable y muelle SMA.

4.4.-Prototipo 4. Plataforma definitiva de comparación de cable (SMA) y motor DC.

Siguiendo con los anteriores trabajos realizados, se ha construido una plataforma definitiva de pruebas en base a los prototipos anteriormente construidos. Esta pretende ser una plataforma de pruebas para materiales SMA de uso permanente y prolongado en laboratorio, incluso en docencia.

Objetivos:

Los objetivos principales de la construcción de esta plataforma, son obtener una comparativa, del control de posición de un potenciómetro realizado tanto por los materiales SMA, como por un motor DC. Por lo tanto, se enfrentarán estos dos dispositivos en la plataforma, obteniendo los datos suficientes para tener unas

conclusiones sobre la capacidad de cada sistema frente al otro en el control de posición mencionado. A diferencia de los anteriores prototipos, se pretende que este sea un prototipo independiente, que no necesite ningún tipo de fuente de alimentación externa para funcionar.

4.4.1.-Diseño base de la maqueta.

El diseño base para la construcción de la maqueta es el penúltimo prototipo realizado con piezas de “Lego Mindstorm”.

1. Está formado por un engranaje que hace las veces de “volante”, que a su vez está engranado con otro más pequeño que gira solidario al eje de un potenciómetro. Con este potenciómetro se obtendrá una salida de posición que cerrará el lazo de control que se realizará más adelante.
2. La mayor diferencia existente entre este prototipo y los construidos anteriormente, es el tipo de materiales usados. Antes se ha usado materiales de plástico para construir los prototipos. Estos plásticos, cuando se sometían a tensiones de los materiales SMA o de los muelles usados en los experimentos anteriores, sufrían desperfectos o simplemente saltaban debido a que no eran capaces de contener estas fuerzas. Esto provocaba que se tuviera que estar continuamente montando y desmontando los prototipos construidos con la consiguiente pérdida de tiempo.
3. Otro de los problemas que se presentaba, era la poca precisión que se alcanzaba debido a que la calidad de la terminación del prototipo no era lo suficientemente grande para obtener resultados buenos. Sin embargo, al final se consiguieron resultados más que apreciables que se pudieron valorar y analizar, para tomar decisiones sobre los futuros experimentos que se deseaba realizar. Con este prototipo, se desea mejorar aún más a estos resultados.

Con todos los datos de los anteriores prototipos en la mano, se toma la decisión del diseño final de la maqueta a construir para la obtención de datos y la experimentación con los materiales SMA.

4.4.2.-Construcción de la maqueta

Debido a la coyuntura actual y al bajo presupuesto del que se dispone para la construcción del proyecto, se decide usar materiales “reciclados” en su mayoría, para que el coste del proyecto sea lo más bajo posible. De ahí, se comienza a buscar piezas que puedan ayudar a construir la maqueta con la máxima calidad posible y el menor costo. Estas partes fueron buscadas de entre los desechos y sobrantes de otros proyectos, así como de piezas que se encontraban en el laboratorio y que aguardaban para ser usadas con algún fin. Algunas piezas tuvieron que ser compradas debido a que

no se pudo encontrar otras del mismo tipo recicladas, o a que las que se encontraron, no valían.

A).-Plataforma principal:

En lo primero que se pensó, es en una plataforma sobre la que construir la maqueta. En un primer momento se piensa en alguna tabla de madera como la usada de base en el anterior prototipo [véase figura 4.10]. Continuando con la búsqueda de materiales, se encuentra en un armario del laboratorio cajas de metal destinadas a proteger y albergar circuitos en su interior. Con la mitad de una de estas cajas se observó que se podría disponer de una base perfecta para construir sobre ella las distintas partes de la maqueta.



Fig.-4.15.-Base de la maqueta

Que la base fuese de metal dio la posibilidad de construir la maqueta con mayor robustez, de manera que todas las partes quedaran una vez terminada, bien ancladas a la base para un fácil transporte de la maqueta y una mayor seguridad a la hora de trabajar y manipular cada parte. Finalmente esta plataforma se atornillará a una base de madera para que todo quede bien sujeto.

B).-Engranajes y ejes

Como se ha mencionado antes, la maqueta dispone de un engranaje o “volante” que se hace girar tanto con el material SMA como con el motor DC. Este engranaje hace girar a su vez a otro engranaje más pequeño con una relación de transformación de 12:86 (se verá más adelante en este mismo capítulo) en lo que a dientes se refiere. Esta relación se ha diseñado así, ya que uno de los objetos como se ha comentado era obtener buenos resultados en los experimentos posteriores. Debido a esto y al poco movimiento que realizan los cables SMA cuando se activan, se toma esta relación para multiplicar 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 del potenciómetro, por lo que se obtendrá un movimiento mayor en este y por lo tanto un mayor rango de medidas con el que se conseguirá una precisión mayor también en los experimentos.



Fig.-4.16.-Engranaje grande



Fig.-4.17.-Engranaje pequeño

El engranaje grande, siguiendo con la política de austeridad, se ha obtenido desmontando un antiguo video VHS, en el que se esperaba encontrar los engranajes necesarios para montar la maqueta además de otras piezas que se verán más adelante. Sin embargo, no se ha podido encontrar una pareja de engranajes que encajen bien, ya que el paso de los dientes de los que se ajustaban al tamaño que se

Capítulo 4

deseaba, no coincidía por lo que fue necesario esta vez sí, buscar un engranaje pequeño que nos sirviera en una tienda [10]. Visto esto, se compra el engranaje pequeño que tiene unas características de 9.6mm de diámetro y 12 dientes. El engranaje grande, sacado del video dispone de un diámetro de 68.6mm y de 86 dientes, y tiene un paso de 1.7mm que coincide perfectamente con el paso del engranaje pequeño.

Los engranajes giran unidos a unos ejes. Uno de los problemas que se presentó fue unir el motor DC con el engranaje mayor. Sin embargo, buscando por el laboratorio, se encuentra una pieza usada en anteriores proyectos preparada para ser colocada también encima de un potenciómetro, por lo que sirvió de manera perfecta para su objetivo, para más inri, la pieza tiene un diámetro en el eje de 4mm, que es justamente el necesario para el engranaje grande, por lo que estas dos piezas encajan a la perfección.



Fig.-4.18.-Eje engranaje grande

La pieza es de aluminio y esta mecanizada para ser colocada encima del motor DC. Se sujeta con cuatro tornillos a los brazos que mueve el motor DC y así, transfiere el movimiento de este al eje. A este eje, ira enganchado el engranaje mayor que transmitirá de esta manera el movimiento del motor DC al engranaje pequeño. El engranaje grande podrá girar enganchado al eje para transmitir el movimiento del motor DC o podrá ir suelto girando solidario al eje para transmitir de esta manera el movimiento del SMA. Esto se consigue con un pequeño tornillo de 3mm sin cabeza y que se aprieta con una llave hexagonal. Este tornillo se coloca de manera perpendicular al eje después de haber taladrado un pequeño agujero en la corona del engranaje grande, en la foto de la figura 4.19 se aprecia mejor la colocación de este tornillo.



Fig.-4.19.-Tornillo pasador del eje grande

Para el engranaje pequeño, se optó por hacer un ajuste, ya que el eje del potenciómetro era de 3.3mm y el diámetro del agujero del engranaje pequeño de 3mm. Repasando un poco el agujero del engranaje, se consigue introducir el eje del potenciómetro, quedando estas dos piezas muy fuertes y seguras.

C).-Potenciómetro

El potenciómetro usado en la plataforma definitiva, es el mismo que se ha usado en anteriores prototipos, este potenciómetro se ha obtenido del laboratorio y había sido usado en anteriores proyectos, por lo que se sigue manteniendo la política de austeridad mencionada en anteriores capítulos. Las características de este potenciómetro han sido descritas anteriormente [véase capítulo 3.1.6].

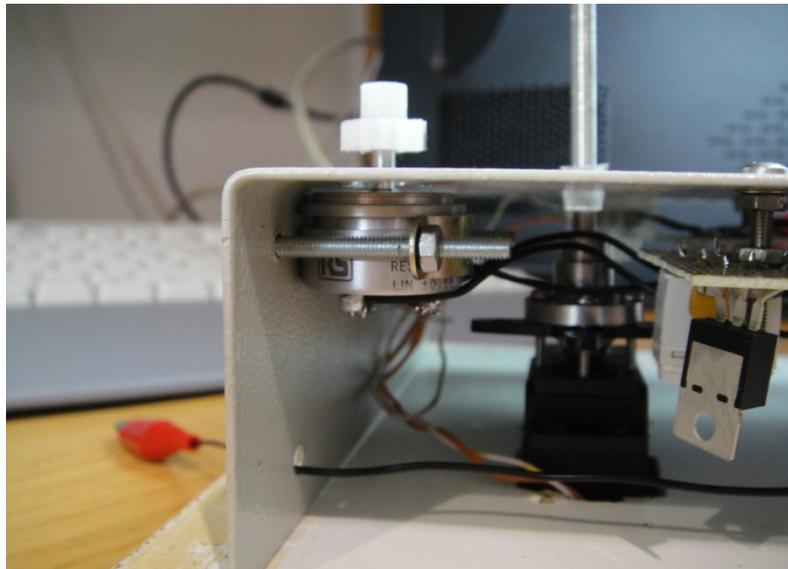


Fig.-4.20.-Potenciómetro y engranaje pequeño ya instalados

D).-Pletina

Para hacer girar el engranaje grande, se tuvo que idear un sistema para poder enganchar el cable SMA a este engranaje. El sistema ideado se ha definido como “pletina”, ya que está formado por una pletina de metal con unos agujeros convenientemente dispuestos para aprovechar el mayor movimiento de los cables.

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:

1. Cálculos del movimiento del cable

Según el fabricante, los materiales SMA en su fase de austenita se acortan entre un 3% y un 5% de su longitud. El cable elegido es el de 100um de diámetro, ya que se dispone de un carrete de un metro y su consumo no es muy elevado. Se escoge usar 25cm 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. Para esto, se diseña un experimento con el cual se averigua el movimiento del cable. Este experimento se basa en colgar varios pesos del cable de manera que la gravedad tire de estos. Después, se le aplica una tensión sobre los extremos para que se encoja pasando a su fase de austenita y ver así que longitud de movimiento tiene el cable. Este experimento como se ha dicho, se repetirá para varios pesos para comprobar también la fuerza de recuperación del cable.

Para realizar estos experimentos se echa cuenta del ingenio y de los materiales de los que se dispone. Usando una antigua madera y un tornillo introducido en un agujero taladrado, se cuelgan los pesos sujetos a los cables SMA, para poder ver el movimiento de los cables, se usa un lápiz sujetado con cinta sobre los pesos a modo de indicador de las distintas longitudes alcanzadas por el cable.



Fig.-4.21.-Experimentos con el cable

Después de realizar estos experimentos se obtienen los siguientes datos:

	Peso=116gr	Peso=175gr
Cable=100um y 25cm	10mm	12mm
	11mm	10mm
	10mm	10mm

Tabla1.-Pruebas de los cables

Para el segundo peso, se aprecia durante el experimento que el cable tarda en encogerse hasta su máximo, ya que aunque pueda mover este peso, este es ya un peso considerable para él. Con el primer peso el cable se comporta perfectamente.

Del resultado de este experimento, se obtienen como conclusiones que se puede contar con unos 10mm de longitud de cable para trabajar con él. Con esta longitud será con la que se pase a calcular la pletina para obtener el máximo movimiento posible.

2. Cálculos de la pletina

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 20mm de longitud, que tendrá dos agujeros separados entre sí 20mm y que estarán situados a 10mm de distancia del eje al que va enganchada la pletina al igual que el engranaje mayor. 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). Los cálculos obtenidos dan los siguientes datos referidos a continuación:

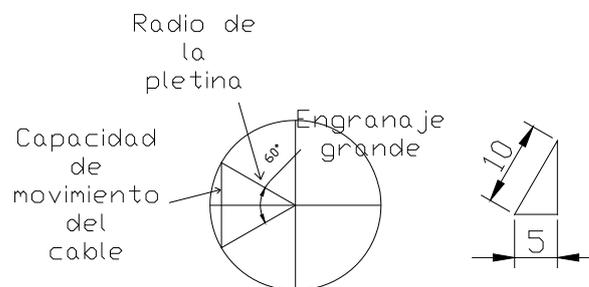


Fig.-4.22.-Cálculos de la pletina

$$\alpha = \sin 5/10 \Rightarrow \alpha = 30^\circ$$

Ecuación 3.-Cálculo del ángulo girado.

De donde se obtiene que el ángulo máximo que se podrá mover la rueda grande es de $30^\circ \times 2 = 60^\circ$.

Con la ecuación:

$$f1 * n1 = f2 * n2$$

Ecuación 4.-Ecuación de relación de transmisión

Donde $f=n^\circ$ de dientes y $n=n^\circ$ de vueltas de cada rueda respectivamente. Sabiendo que se dispone de un radio de 10mm correspondientes al diámetro de la pletina y que la rueda grande tiene 86 dientes y la rueda pequeña 12 dientes, se obtiene que:

$$86 * \frac{1}{6} = 12 * f2 \Rightarrow f2 = \frac{86}{6 * 12} = 1.19$$

Por tanto, se tiene según la ecuación de arriba, 1.19 vueltas del engranaje pequeño por $\frac{1}{6}$ de vuelta del engranaje grande, que equivale a los 60 grados que se han calculado que puede moverse. Finalmente se tendrá una pletina con las características descritas y con la que se podrá obtener, junto al movimiento de los cables calculado experimentalmente, un movimiento en el engranaje pequeño de más de 1.19 vueltas, que equivaldría a 428 grados.



Fig.-4.23.-Pletina

E).-Polea y tensor del cable

Como ya se ha visto, 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 que se describirán a continuación.

Polea:

El primero de ellos es una polea de aluminio situada sobre un tornillo de 3mm de diámetro enganchado a su vez sobre la base de la maqueta. El cable se sitúa sobre esta polea para doblar su dirección 90 grados con respecto a la dirección que lleva cuando sale de la pletina, debido a que el cable se ha dispuesto como una "L", ya que debido a su longitud de 25cm, este no se puede disponer en la base de manera longitudinal. Por lo tanto esta es la misión de la polea, servir simplemente como guía para el cable desde la pletina, hasta el tensor, donde estará sujeto finalmente.

Tensor:

El tensor consta simplemente de un tornillo de 3mm enganchado a la base, 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 dejará una parte del cable fuera de la parte tensada para poder sujetarlo mejor, pero no será mucha ya que si no, se estará perdiendo capacidad de elongación.

F).-Muelles

Ya se ha explicado cómo se sujeta el cable y la pletina al eje del engranaje grande para transmitir el movimiento del SMA. Pero como ya se ha dicho, la pletina tiene en el extremo contrario al agujero donde va el cable, otro agujero donde se ha enganchado un cordón, que a su vez lleva en el extremo opuesto un muelle. Este muelle se engancha a un tornillo de 3mm sujeto a la base 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 la que se encargue de devolver el cable SMA 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 la imagen de la figura 4.24, se puede ver el sistema formado por el cable SMA Y el muelle que le ayuda a volver a su posición inicial en azul.

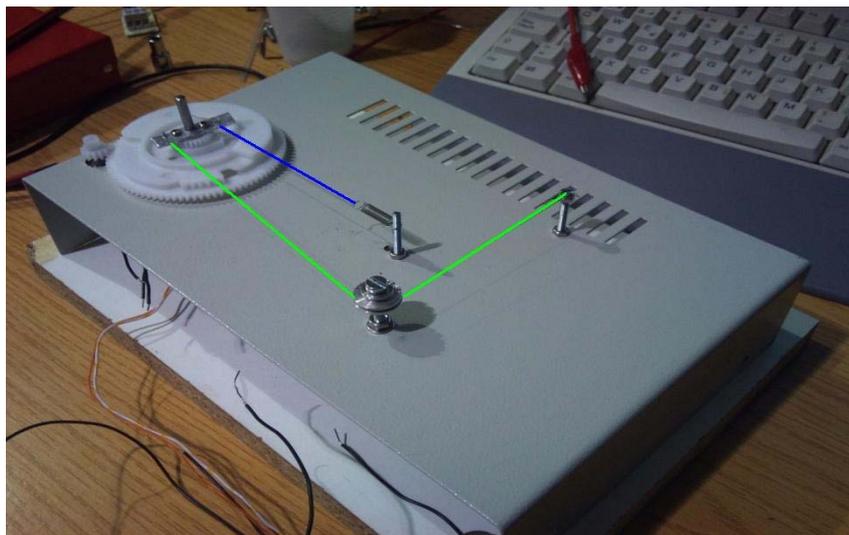


Fig.-4.24.-Sistema del “volante” completo

Para la aplicación de esta fuerza de recuperación, se ha usado tres muelles distintos con distintas “k” (constante de elasticidad del muelle). Todos estos muelles han sido obtenidos también del video VHS del que se han obtenido ya varias piezas para reciclarlas y darles un segundo uso. Para obtener estas “k” de los distintos muelles usados, se han realizado varios experimentos muy parecidos a los anteriores realizados con el cable. Para ello, se ha usado varias botellas con distintas cantidades de agua dentro, obteniendo varios pesos. A estas botellas se les ha colocado un lápiz con cinta igual que antes, para saber el desplazamiento que realizan los distintos pesos aplicados a estos muelles.

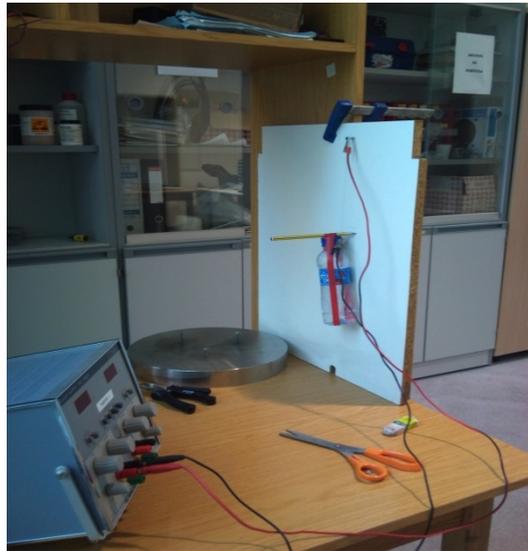


Fig.-4.25.-Experimentos con los muelles

Ahora se tiene, según la ecuación del muelle “ $F = K * x$ ”, 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. 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 ahora despejar el valor de la “k” de cada muelle de la ecuación.

	<u>Peso (gr)</u>	<u>Pruebas(mm)</u>
Muelle1=6.4mm	175	22.7
		22.35
		21.4
		16.65
Muelle2=12.3mm	116	14.7
		16.1
		17.2
Muelle3=12.2mm	175	3
		3
		7.5
		6
		6
		5
Muelle3=12.2mm	1185	4.5
		4.5
		5.5
		5

Tabla 2.-Datos de los experimentos de los muelles

Con estos datos despejamos y obtenemos los siguientes valores para la “k” de los tres muelles:



k1=73.88 N/mm



k2= 485.83 N/mm



k3= 2382.12 N/mm

Fig.-4.26.-Muelles 1, 2 y 3

G).-Batería.

Al principio, con los primeros prototipos, se usaban para alimentar a los distintos circuitos fuentes de alimentación independientes [véase 3.1.8]. Se necesitaban al menos 3 fuentes entre circuitos y potenciómetro para poder trabajar con los prototipos, pero para el diseño de la maqueta final, se pretende eliminar la dependencia de estas fuentes y construir un prototipo independiente energéticamente hablando, por lo que se piensa en instalar una batería que proporcione la potencia suficiente tanto para alimentar al SMA, como para alimentar al motor DC. Para que

esto sea posible, se ha elegido usar cables SMA de 100um, ya que su consumo es muy pequeño. Por esto, se busca en internet una batería que tenga unas características que cumplan con nuestras necesidades y que sea lo más barata posible. Así, se consigue por unos 9€ una batería de Níquel-Cadmio de 12V que puede entregar hasta 1.2A, potencia más que suficiente para la necesidad del diseño. De esta manera se consigue crear una plataforma de pruebas independiente de la red eléctrica, mucho más manejable y con menos cableado.

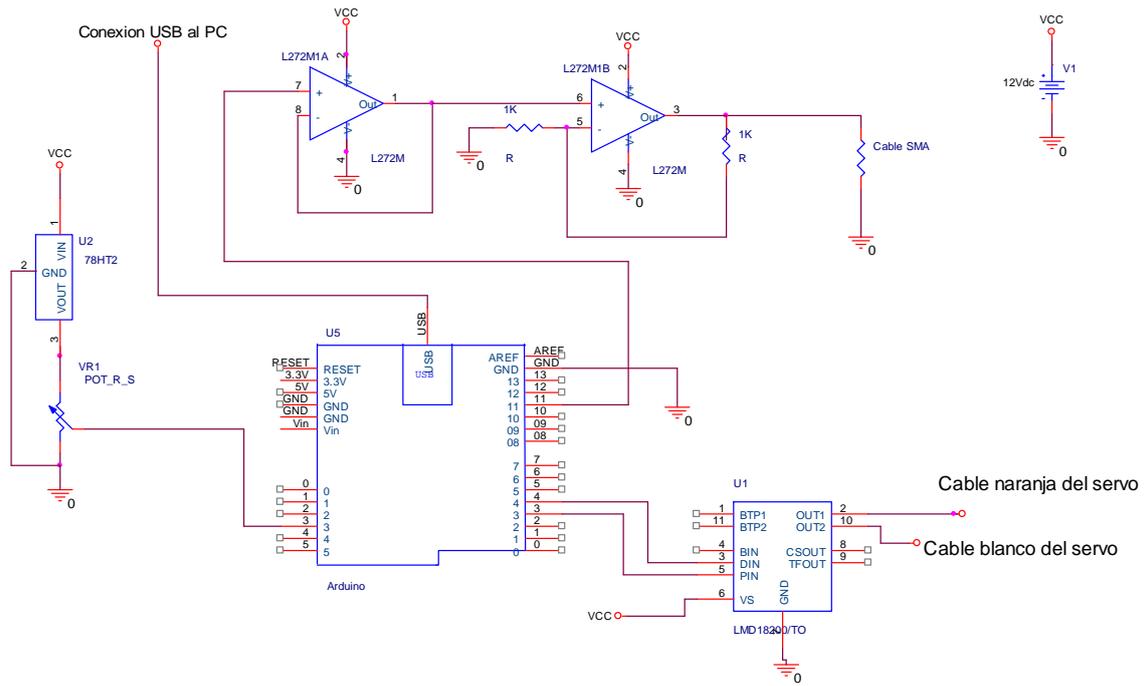


Fig.-4.27.-La batería usada en el proyecto

H).-Circuitos

Se implantarán en la maqueta final tanto el circuito electrónico de control para los cables SMA de 100um, que son los elegidos para la maqueta final y que ya ha sido explicado anteriormente [véase capítulo 3.2.2], el circuito de control del motor DC, también visto anteriormente [véase capítulo 3.3], así como la tarjeta de adquisición de datos Arduino, también explicada anteriormente [véase capítulo 3.1.2]. Para ver el conjunto entero, se representa el esquema electrónico completo del prototipo final:

Capítulo 4



Esquema 7.-Esquema electrónico completo del prototipo final.

Toda la circuitería, quedaría implementada en la parte baja del prototipo de la siguiente manera:

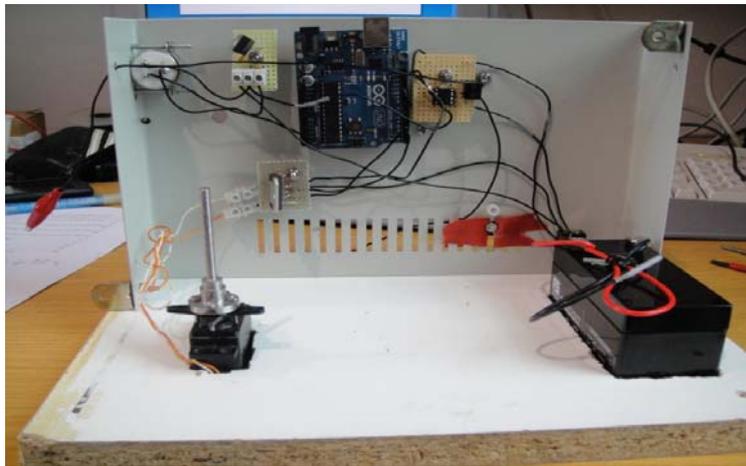


Fig.-4.28.-Circuitería implementada en la maqueta final.

I).-Base de madera

Sobre dicha base, será donde se atornille la plataforma principal que lleva todos los sistemas y circuitos encima. Debido a que la batería y el motor DC se sitúan por debajo de la base principal y estas piezas son demasiado grandes para caber debajo, se ha

hecho uso de una base de madera, que se ha perforado con la forma de la batería y del motor DC de manera que estos se encuentran encajados dentro de esta madera. Después de situarlos en la base de madera, la plataforma principal se ha atornillado por dos esquinas contrarias usando dos escuadras que había en el laboratorio.

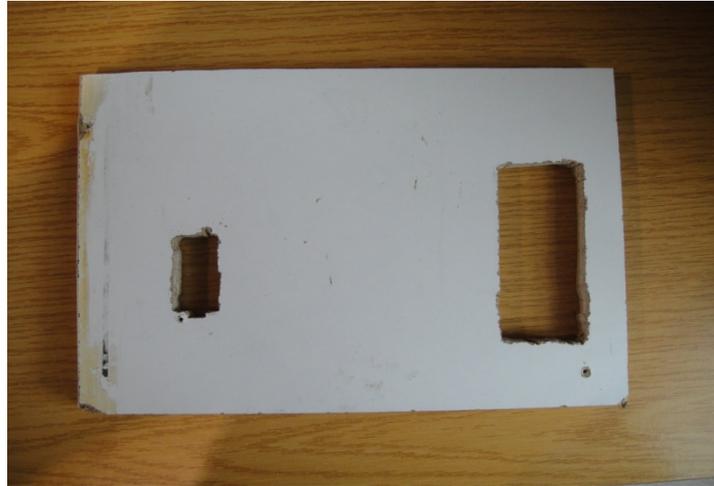


Fig.-4.29.-Base de madera con la forma de la batería y el servo

J).-Aislamientos.

Uno de los mayores problemas que se ha presentado en la construcción del prototipo ha sido las conexiones a tierra. Debido a que la plataforma principal es de metal, y a que el SMA debe de estar conectado a la corriente para ser accionado se han tenido muchos problemas debidos a derivaciones a tierra. Ya que el SMA debe de realizar esfuerzos mecánicos y de que está sujeto a un tornillo por un lado y a la pletina por otro, además de apoyarse en la polea como anteriormente se ha visto [véase capítulo 4.4.2, apartado E], se deberá aislar todos estos puntos para que la corriente que pase por el cable, no se deriva a la plataforma principal. Para ello se han llevado a cabo tres aislamientos principales:

1. El primer punto de aislamiento ha sido el tornillo que engancha el SMA. Aquí se ha hecho uso de un cilindro de nylon obtenido del vídeo VHS, que ha rodeado al tornillo que sujeta al cable y a su vez este cilindro se ha fijado mediante ajuste a la plataforma principal de metal. Así se ha conseguido dejar bien aislado el enganche.
2. La polea por donde pasa el SMA como se ha descrito anteriormente [véase capítulo 4.4.2, apartado E], esta introducida en un tornillo, el cual se ha rodeado de tubo termoretáctil para que la polea quede aislada del cuerpo del tornillo, además de usar arandelas de goma en los extremos del tornillo aumentando su aislamiento.

Capítulo 4

3. El otro punto de aislamiento es el que está situado en el eje del engranaje grande. Debido a que el eje es de metal al igual que la pletina donde va sujeto el SMA, ha sido preciso aislar el eje de la plataforma principal, por lo que debido a la falta de presupuesto como se ha explicado anteriormente, se ha vuelto a usar el ingenio y se ha recortado la punta de un bolígrafo Bic a modo de cilindro de plástico un poco cónico, que se ha situado alrededor del eje. De esta manera, el eje queda aislado de la plataforma y por lo tanto el SMA sujeto a la pletina también.
4. Otro de los aislamientos que se han llevado a cabo ha sido en los circuitos electrónicos que van sujetos a la plataforma principal con un tornillo, excepto Arduino que va sujeto con dos. Estos tornillos han sido aislados con arandelas de plástico obtenidas del vídeo VHS.



Fig.-4.30.-Sistemas de aislamiento.

K).-Plano de montaje.

Se muestra ahora un dibujo para indicar la disposición de las piezas que se han situado en la parte superior de la plataforma.

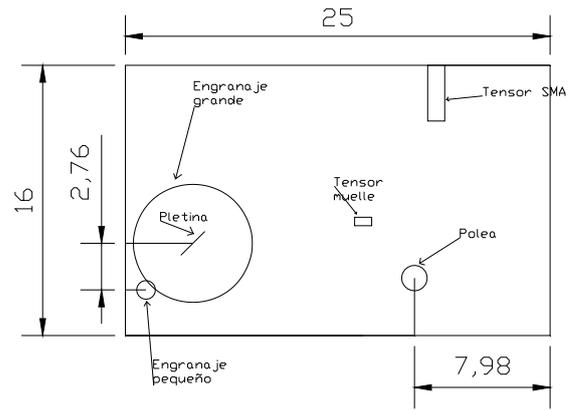


Fig.-4.31.-Detalle superior de la plataforma.

Este dibujo de la figura 4.31, junto a las descripciones del montaje que se han hecho en cada uno de los apartados, servirán para indicar el ensamblaje completo de la plataforma. Se tendrá de esta manera finalmente acabada, la plataforma de pruebas para SMA, como se muestra en la figura 4.32.

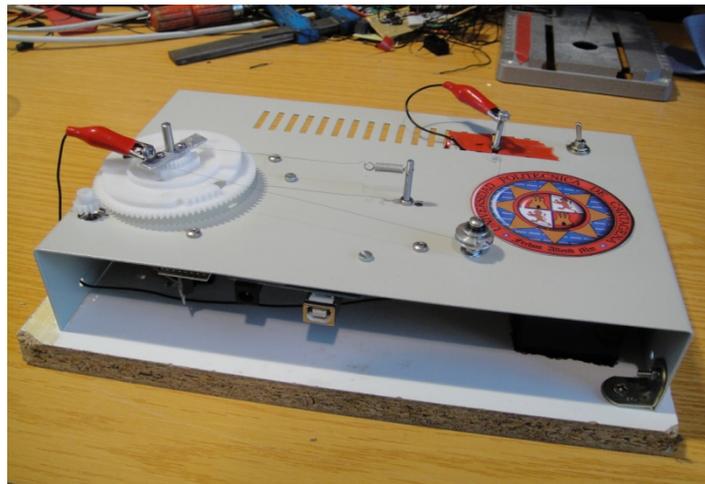


Fig.-4.32.-Plataforma de pruebas finalizada.

Capítulo 5. Identificación de los procesos y control simulado.

En este capítulo, se procederá a realizar tanto la identificación y posterior validación de los sistemas que representan el movimiento de los SMA y del motor DC en la plataforma construida. Después se procederá a realizar el control del SMA y del motor DC con los parámetros del mejor PID calculado de forma teórica a partir de los modelos obtenidos. Se realizará también un control manual para buscar el mejor resultado posible. Después, se realizará un estudio comparativo de los SMA frente al motor DC con los resultados obtenidos en los experimentos. Todas estas pruebas de control, se realizarán en simulaciones con el software Matlab y más concretamente con su herramienta simulink.

5.1.-Identificación.

Para realizar un control de calidad, se necesitará conocer lo mejor posible las dinámicas de los sistemas, por lo que primero que habrá que hacer, será realizar la identificación de todos los procesos que intervienen tanto en los sistemas formados por los SMA como en los del motor DC, para cada uno de los muelles.

Para conseguir llevar a cabo la identificación, se va a hallar una función de transferencia lo más sencilla posible (de primer orden), realizando experimentos de entrada escalón en lazo abierto, para cada uno de los sistemas.

Para la realización de los experimentos de identificación, se ha usado un tiempo de muestreo de $t=0.016$ segundos, este es el tiempo entre iteraciones que usa Matlab en su conexión con la plataforma. Este tiempo de muestreo, se debe a que no se ha usado un “timer” en los programas para controlar los tiempos de ejecución. Se ha observado, que si se realizan los experimentos en otro ordenador, el tiempo de muestreo varía.

5.1.1.-Identificación realizada con el muelle 1 para el cable SMA y el motor DC.

SMA.-

El primero de los muelles cuenta con una $k = 73.88 \text{ N/mm}$. Se diseña un experimento en lazo abierto, en el que se le dará al cable una señal escalón de 0 a 5 voltios a partir del primer segundo del experimento y se llevará el cable al máximo de su fase de austenita enfrentándose al muelle1. Este experimento se realizará dos veces para comprobar la repetitividad del SMA. Después de estos experimentos, se obtendrá una gráfica que se puede ver en la figura 5.1, que reflejará la cantidad de movimiento que se ha obtenido en grados frente al tiempo.

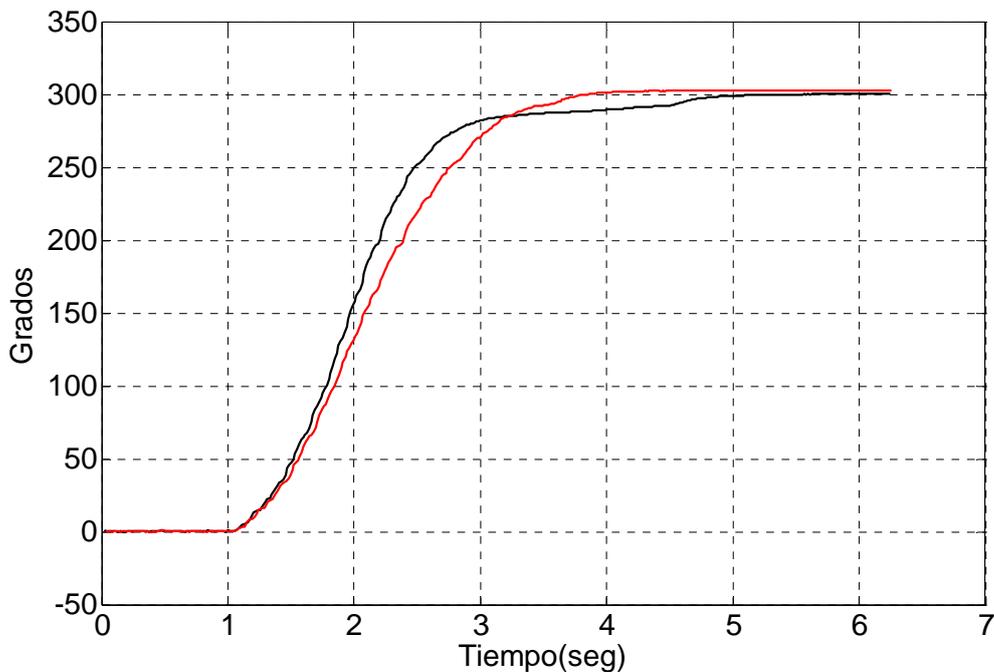


Fig.-5.1

Como se puede observar en la figura 5.1, la referencia máxima para realizar el control será de 300 grados, ya que es el máximo movimiento que registra el SMA con el muelle utilizado. En la realización de dos experimentos, se tiene unos resultados prácticamente iguales debido a la repetitividad del SMA. De estas gráficas, se extraen todos los parámetros necesitados para poder obtener el modelo final del SMA. Aproximando el sistema a uno de primer orden:

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

Ecuación 5.-Ecuación de primer orden

Se obtienen los siguientes parámetros:

- La k vendrá dada por la división entre la media de la salida máxima y el escalón introducido:

$$G(s) = \frac{K}{1 + Ts} \implies K = \frac{301.25}{5}$$

- La constante de tiempo T de la función, se obtendrá hallando el tiempo para el cual la salida es el 63% de la salida final, que vendrá dado por la media de los dos anteriores experimentos, obteniéndose una constante de tiempo $T = 1.2$
- Así, la función de transferencia de primer orden final para el cable será de:

$$G(s) = \frac{301.25/5}{1 + 1.2s}$$

Con este modelo se recurre ahora a la herramienta de MATLAB “simulink” para saber si este modelo es válido o no. Para ello, se comparan los datos de salida reales de uno de los experimentos anteriores, que corresponden a la variable “simin”, con la salida simulada con el modelo obtenido. El esquema de simulink quedaría como en de la figura 5.2.

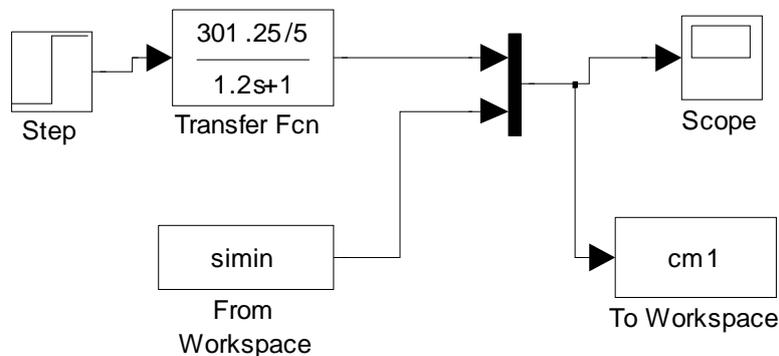


Fig.-5.2

El resultado se puede ver en la figura 5.3, en la que la salida real corresponde a la línea roja y la simulada a la línea negra.

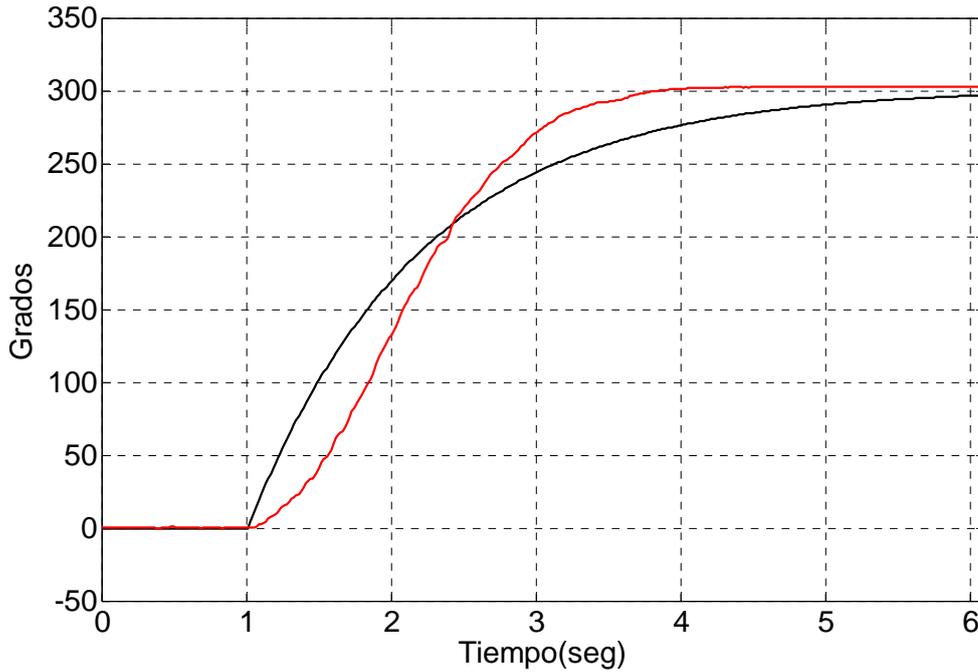


Fig.-5.3

Como se observa, la salida real correspondería a un sistema de segundo orden, sin embargo, la aproximación puede resultar suficiente para un primer acercamiento al control de esta plataforma.

Motor DC.-

Ahora, con el motor DC y de forma parecida a como se ha hecho anteriormente, se procederá a realizar dos experimentos en lazo abierto con una entrada escalón de 0 a 3.5 voltios. Este escalón difiere del anterior introducido al SMA, debido a que el circuito de control del motor DC, tiene cierta amplificación, por lo que se tuvo que introducir una señal menor, para no sobrepasar la tensión máxima del motor DC que estaba en 6V. De estos experimentos se obtendrán unas salidas que se pueden ver en la figura 5.4 que representa la posición en grados frente al tiempo:

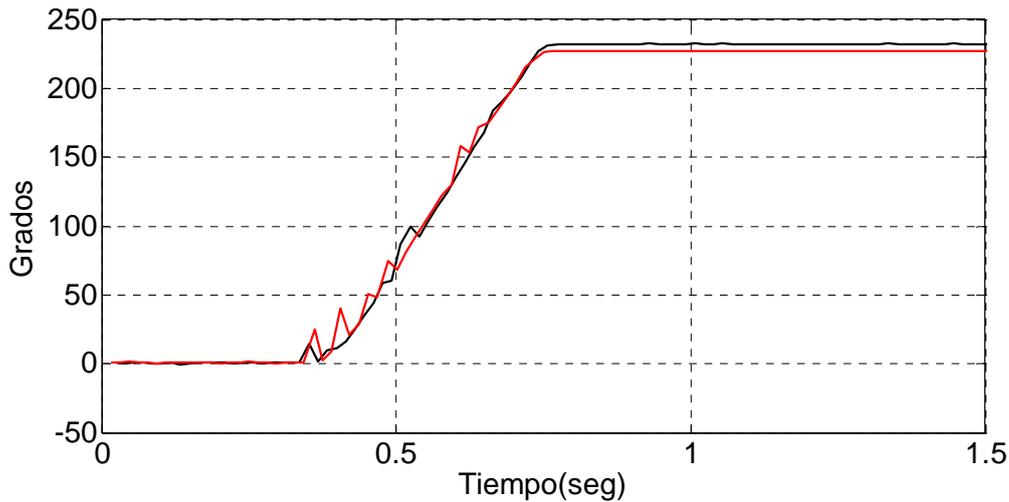


Fig.-5.4

La gráfica de la figura 5.4 muestra la posición angular frente al tiempo y se quiere obtener el modelo del sistema a partir de la velocidad. Sabiendo que:

$$W = \theta/t$$

Para obtener la gráfica velocidad, se tendrá que dividir los incrementos del ángulo en la gráfica posición, entre los incrementos del tiempo. Haciendo uso de la herramienta de software Matlab. De esta manera se obtendrá una gráfica que representará la velocidad en grados por segundos frente al número de muestras de los experimentos.

Identificación para la velocidad en el motor DC

Después de haber obtenido la gráfica de velocidad, se procederá ahora a obtener un modelo para el sistema y a validar este.

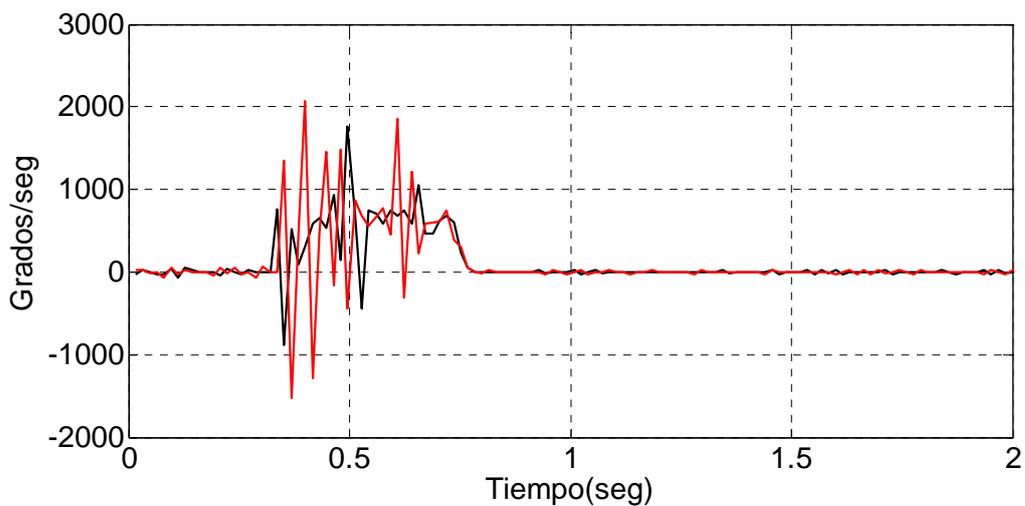


Fig.-5.5

Capítulo 5

Como se observa, a partir de unos 0.8 segundos la velocidad cae a cero ya que el experimento se termina, por lo tanto los datos a partir de aquí no serán válidos para la identificación. De estas gráficas que representan la velocidad para los dos experimentos realizados, se obtendrá la función de transferencia de primer orden del modelo del motor DC:

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

Primero, se hará un ejercicio de imaginación para suponer una respuesta de primer orden superpuesta a las gráficas de velocidad de la figura 5.5. Para ello se obtendrá la k de la función dividiendo el valor máximo al que llega la velocidad por el valor de la señal escalón.

$$K = \frac{675}{3.5}$$

Después, se calcula la constante de tiempo del modelo, hallando igual que anteriormente, el tiempo para el que la señal llega al 63% del valor final. Para esto, multiplicamos el número de muestras por el tiempo de muestreo que como se ha dicho antes es de 0.016 segundos. Después de esto, ya se tendrá un modelo para el motor DC, que vendrá dado de la siguiente manera:

$$G(s) = \frac{675/3.5}{1 + 0.09s}$$

Tras haberse obtenido el modelo para el motor DC, se pasa ahora a usar "simulink" para poder comprobar si el modelo es válido. Para ello se introducirán los datos en el programa como se puede ver en la figura 5.6:

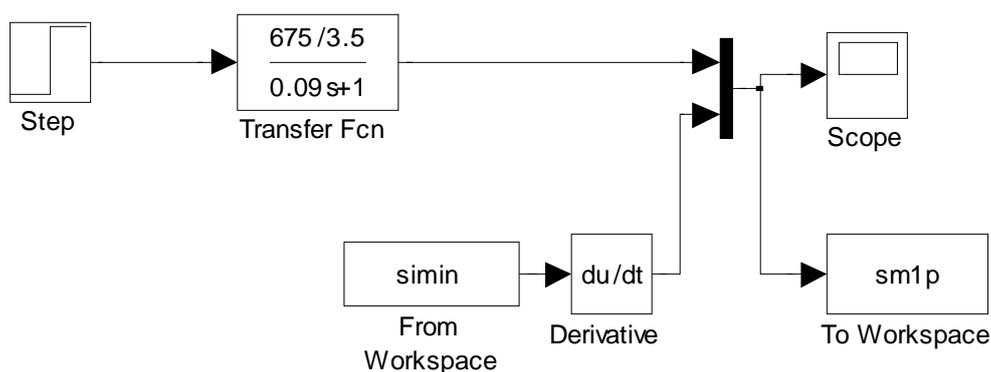


Fig.-5.6

Al igual que anteriormente, se introducen los datos de salida de uno de los experimentos reales de posición (variable simin) y se hace la derivada de estos datos

para obtener la salida en velocidad. Después, se compara la salida del modelo obtenido con el real, obteniéndose la figura 5.7.

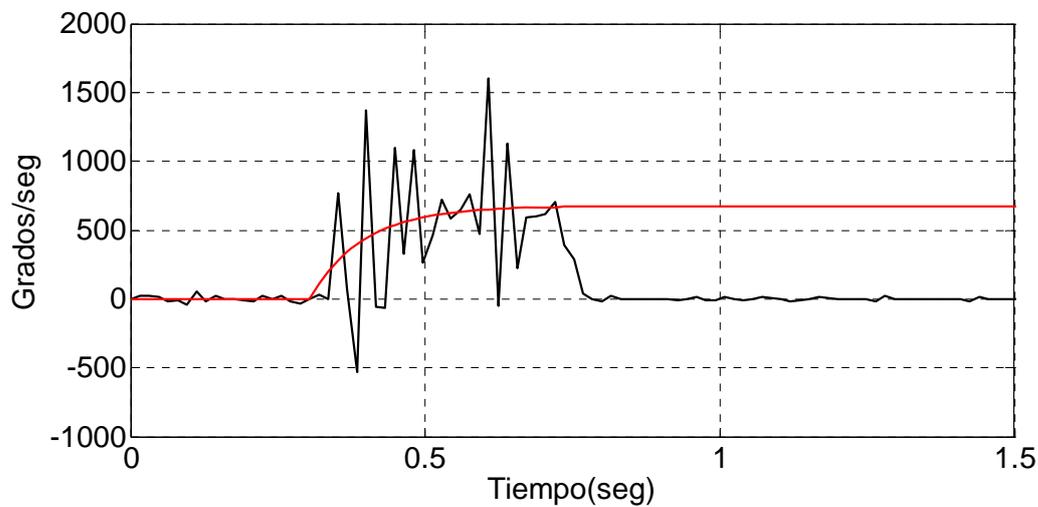


Fig.-5.7

Como se aprecia, se obtiene un resultado bastante aproximado al real con el modelo que se ha obtenido anteriormente. Esto se aprecia en que la respuesta imaginaria que describiría el modelo real (en negro), coincidiría con el modelo simulado (en rojo). A partir de 0.8 segundos no habría que tener en cuenta nada ya que el experimento ha terminado.

Identificación para la posición en el motor DC

A partir de las gráficas de posición del motor DC de la figura 5.4, obtenidas de los experimentos realizados aplicando una entrada escalón de 3.5V como se ha explicado antes, se realizará ahora la validación del modelo para la posición angular.

Modificando el sistema anterior de la figura 5.6 en “simulink”, se puede obtener la comprobación de la identificación en posición en vez de en velocidad.

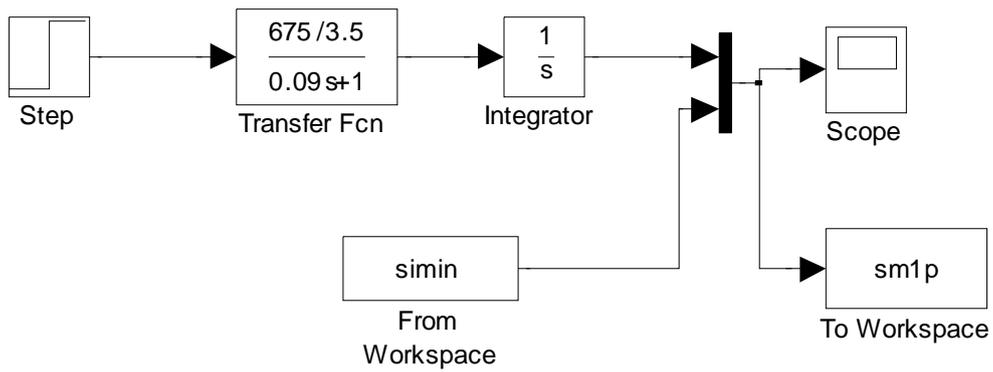


Fig.-5.8

Al contrario que en la figura 5.7, como ahora se hace la validación para la posición, el modelo obtenido para la velocidad se integrará y se comparará con los datos de salida reales de uno de los experimentos realizados. Se obtiene así, la gráfica de la figura 5.9.

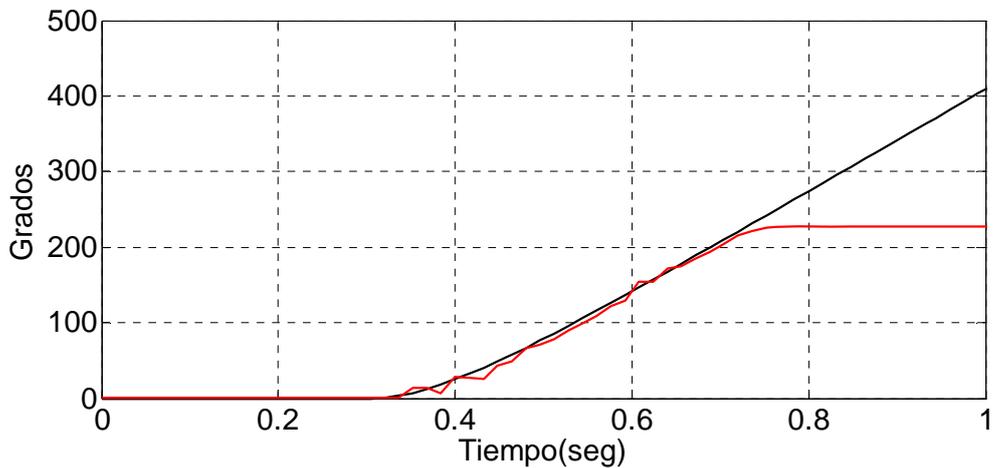


Fig.-5.9

Al igual que anteriormente se puede comprobar que el modelo obtenido se comporta lo suficientemente bien ante la salida real del sistema y la sigue hasta un valor en el que se separan y a partir del cual no hay que tener en cuenta los datos debido a que el experimento termina.

5.1.2.-Identificación realizada con el muelle 2 para el cable SMA y el motor DC

SMA.-

El segundo muelle cuenta con una constante de elasticidad de $K = 485.83 \text{ N/mm}$. Se volverán a realizar dos experimentos con el SMA aplicando un escalón de 0 a 5 voltios para obtener el modelo del cable. Los resultados de dichos experimento se aprecian en la figura 5.10.

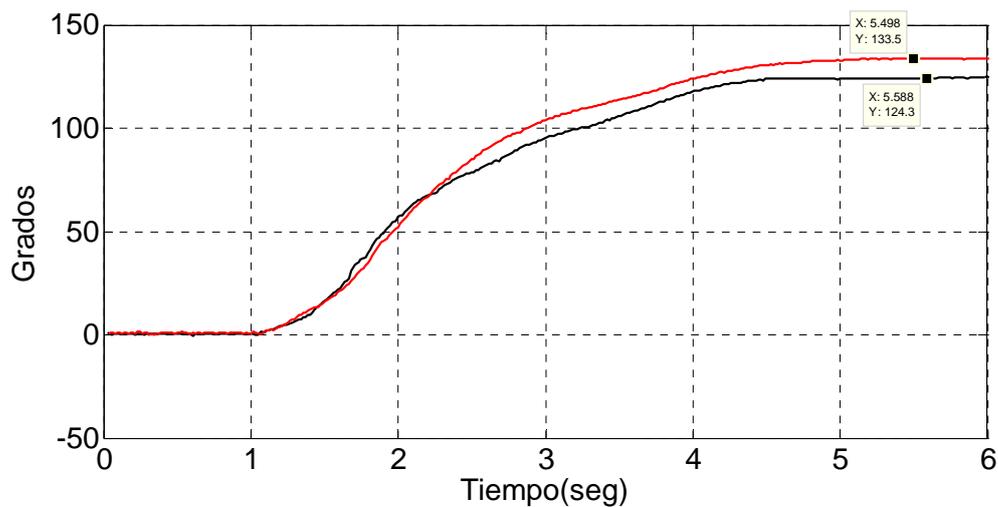


Fig.-5.10

De esta gráfica de la figura 5.10 se obtienen de nuevo los parámetros necesarios para obtener el modelo correspondiente al SMA enfrentado con el muelle 2. Se observa que la referencia máxima que se podrá usar en el control será de menos de 130 grados, ya que es el máximo alcanzado por el SMA. Así, se obtienen los siguientes parámetros necesarios para nuestro modelo de primer orden:

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

- La K se obtendrá dividiendo el valor medio máximo de la salida por la entrada en escalón:

$$K = \frac{129.2}{5}$$

- La constante de tiempo vendrá dada por el tiempo en el que la señal de salida llega al 63% de su valor máximo, que será de $T = 1.5$.

De esta manera el modelo de primer orden quedará de la siguiente manera:

$$G(s) = \frac{129.2/5}{1 + 1.5s}$$

Ahora se realizará la comparación de la simulación del modelo obtenido con los datos de salida de uno de los experimentos (variable simin) en “simulink”. La figura 5.11 muestra el diagrama de “simulink”.

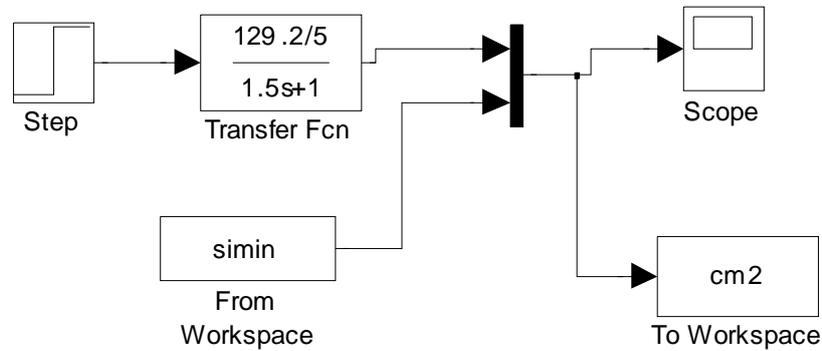


Fig.-5.11

La salida de la simulación corresponderá con la figura 5.12.

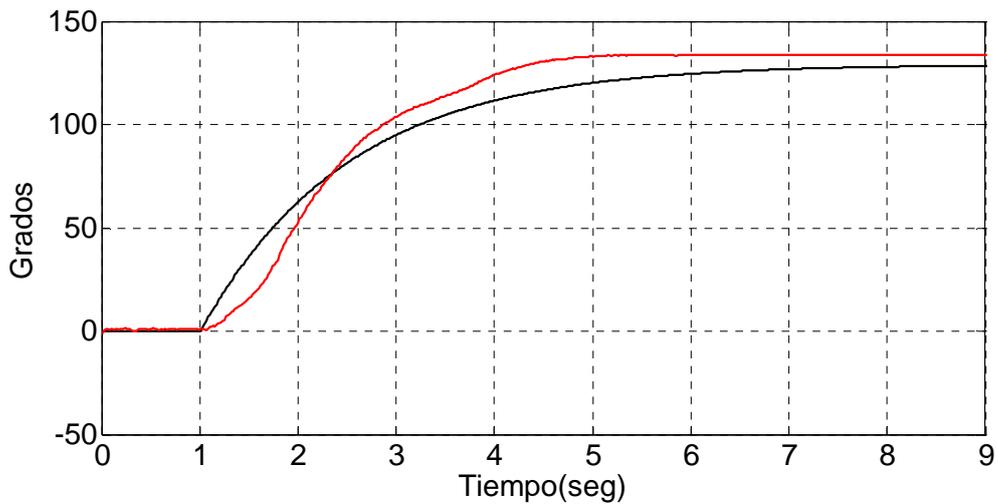


Fig.-5.12

Como se observa, tenemos la curva real (línea roja) y la simulación con el modelo obtenido (línea negra) que son bastante aproximadas, dando así por válido nuestro modelo.

Motor DC.-

Se introduce al igual que anteriormente un escalón de 0 a 3.5 voltios de entrada y se realizan dos experimentos con el motor DC. La figura 5.13 corresponde a la salida de estos experimentos en la que se representa el movimiento angular del motor DC frente al tiempo.

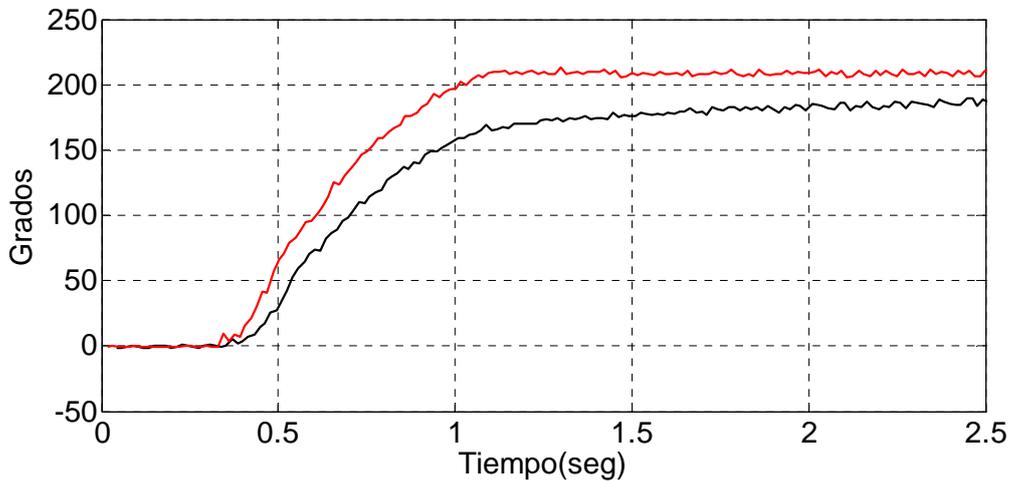


Fig.-5.13

Identificación en velocidad para el motor DC

Al igual que antes, se conseguirán las gráficas de velocidad angular a partir de las de posición de la figura 5.13. Para ello se dividirá el incremento de ángulo, entre el incremento de tiempo [véase capítulo 5.1.1, identificación en velocidad para el motor DC].

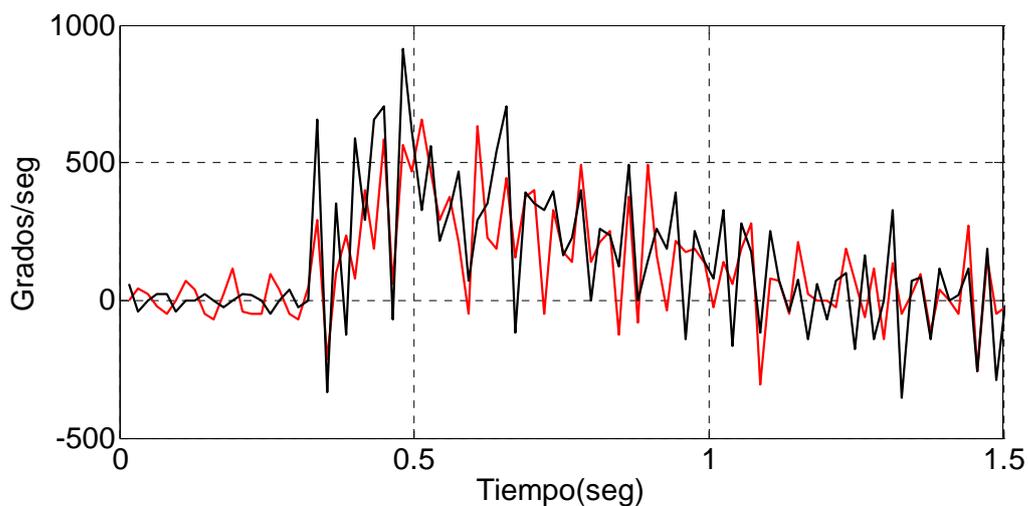


Fig.-5.14

Capítulo 5

Como se puede observar en la figura 5.14, a partir de 0.7 segundos ya no hay que tener en cuenta los datos para la validación, ya que el experimento se termina.

Ahora, como en el capítulo anterior, se procede a extraer de la figura 5.14 los parámetros del modelo de primer orden aproximado.

- La K se obtiene de nuevo dividiendo el valor máximo de la señal por el valor del escalón introducido, por lo que se tiene:

$$K = \frac{425}{3.5}$$

- Hallando de nuevo el tiempo para el que la señal llega al 63% de su valor final, se obtiene la constante de tiempo de la función, para la que se tendrá un valor de $T = 0.07$.

Por lo que finalmente se hallará la siguiente ecuación que describe nuestro sistema de primer orden:

$$G(s) = \frac{425/3.5}{1 + 0.07s}$$

El siguiente paso como en el muelle anterior, será comprobar si este modelo es válido, para esto se procederá a su validación en “simulink” siguiendo las pautas anteriores. De ahí, el siguiente diagrama de simulink de la figura 5.15 en el que se vuelven a introducir los datos de uno de los experimentos reales en la variable simin y se derivan para obtener la velocidad y compararla con la simulación del modelo obtenido:

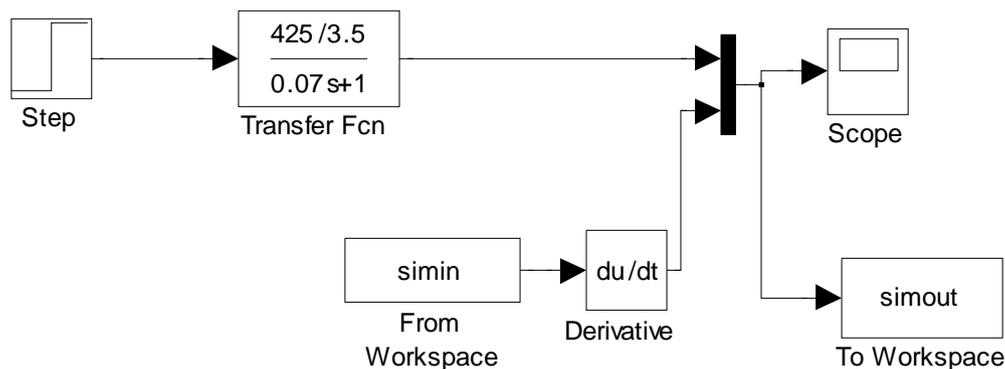


Fig.-5.15

Del diagrama de la figura 5.15 se obtiene la gráfica de la figura 5.16 que servirá para validar el modelo:

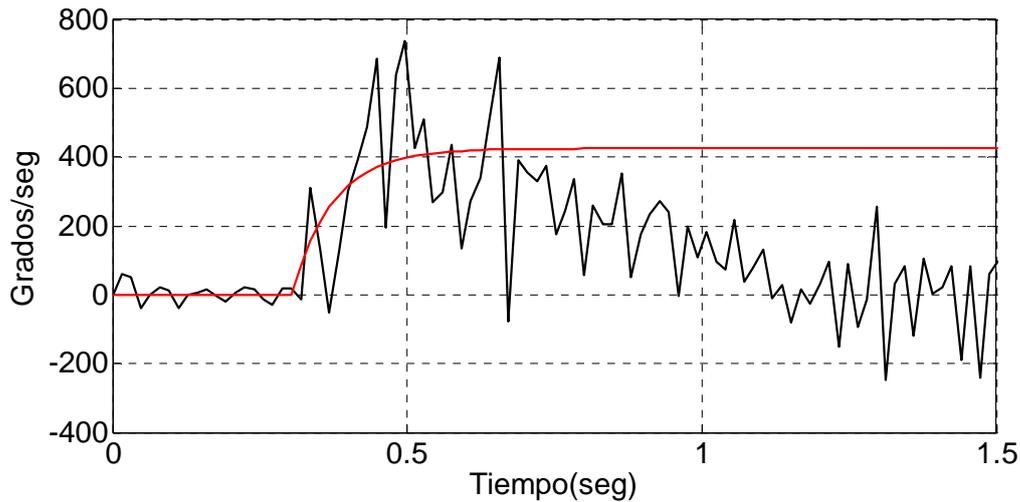


Fig.-5.16

Como resultado final, se puede validar el modelo, ya que mientras la velocidad sube, la respuesta imaginaria que describiría el modelo real (línea negra) coincide con la simulada (línea roja).

Identificación en posición para el motor DC

A partir de la gráfica de la figura 5.13 se procede ahora a validar el modelo para la posición angular.

Se tendrá ahora el diagrama de la figura 5.17 donde se hará la comparación de la salida de uno de los experimentos reales con la salida de la simulación del modelo, la cual se integrará para tenerla en posición angular.

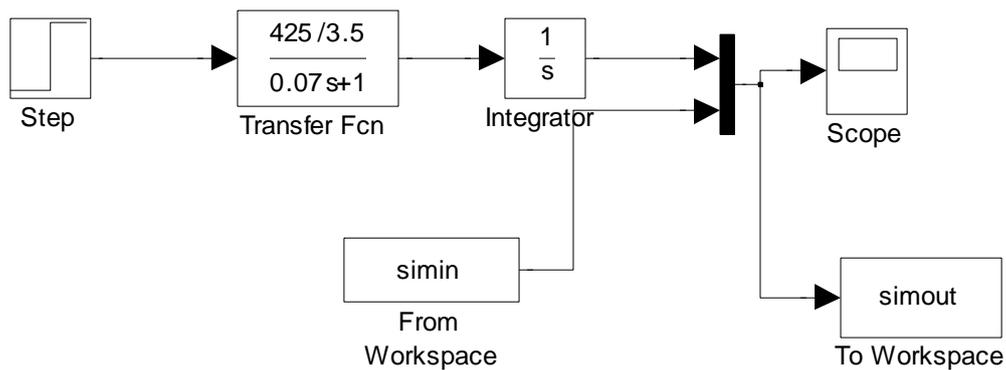


Fig.-5.17

Tras esto, volvemos a obtener la gráfica de la figura 5.18 de validación para el motor DC en posición angular:

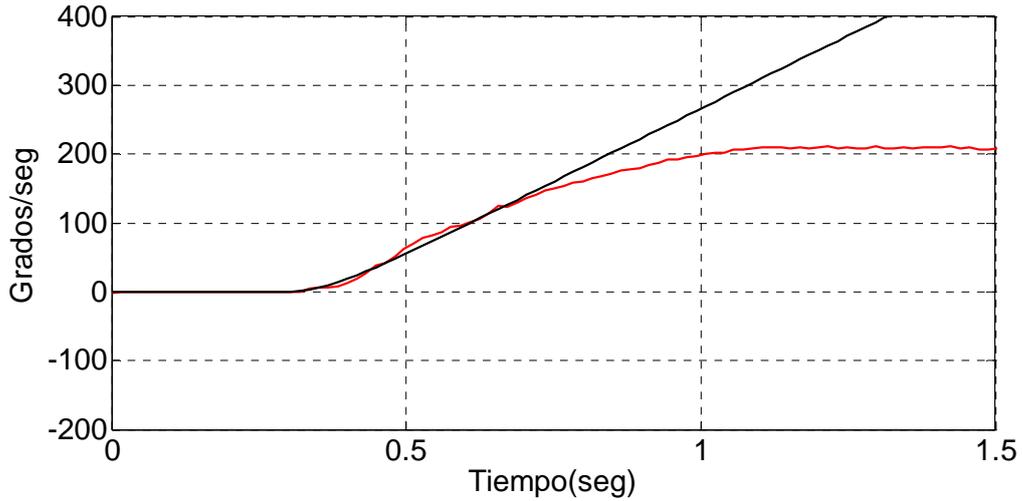


Fig.-5.18

Se obtiene un resultado muy parecido, aunque se aprecia que al final la recta simulada (negra) se separa un poco de la real (roja). Como se vuelve a observar, a partir de 0.7 segundos, se separan las curvas porque el experimento ya ha acabado. Se puede decir de esta manera, que el modelo es lo suficientemente aproximado.

5.1.3.-Identificación realizada con el muelle 3 para el cable SMA y el motor DC.

SMA.-

Se vuelven a realizar dos experimentos introduciendo un escalón de 0 a 5 voltios. El muelle 3 que tiene una constante de elasticidad de $K = 2382.12 \text{ N/mm}$. Con estos experimentos, se obtienen las gráficas de la figura 5.19 que representan la posición angular del cable:

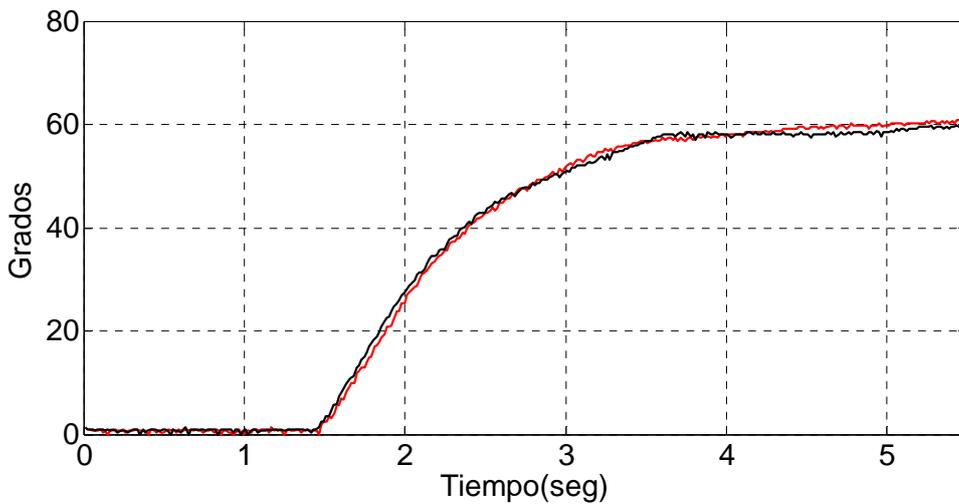


Fig.-5.19

Capítulo 5

De los datos de salida de la figura 5.19 que muestra los experimentos realizados, se puede comprobar que dando el escalón en el segundo 1, se aprecia un retraso de unos 0.4 segundos. Este retraso, se tendrá que tener en cuenta a la hora de obtener el modelo. Según se observa en la gráfica, el valor máximo que se podrá usar en control para el muelle 3 será de 60 grados. Se comienza a obtener los parámetros del modelo de primer orden igual que en los capítulos anteriores.

- Obtenemos la K con el valor máximo de salida y el escalón aplicado:

$$K = 60.81/5$$

- Ahora se aplican las mismas reglas que en anteriores ocasiones para la constante de tiempo, teniendo $T = 0.9$.

Finalmente se vuelve a obtener una ecuación de primer grado que quedaría:

$$G(s) = \frac{60.81/5}{1 + 0.9s}$$

Ahora usamos “simulink” para la validación, pero esta vez como anteriormente se ha señalado tendremos que usar un nuevo bloque llamado “transportdelay” en el que introduciremos el retraso observado en los experimentos:

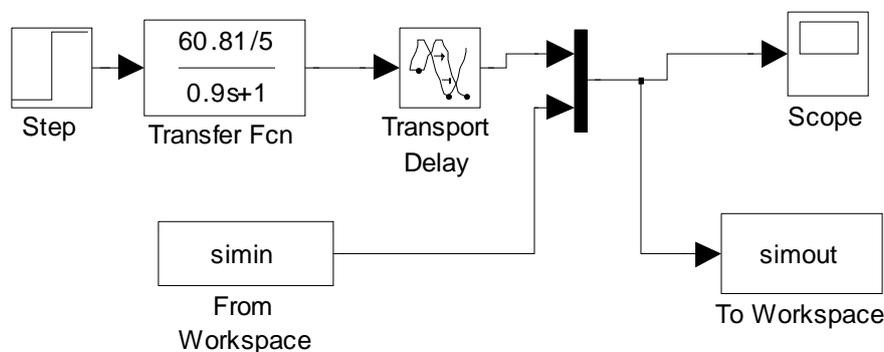


Fig.-5.20

Ahora la gráfica obtenida para la validación de la figura 5.21:

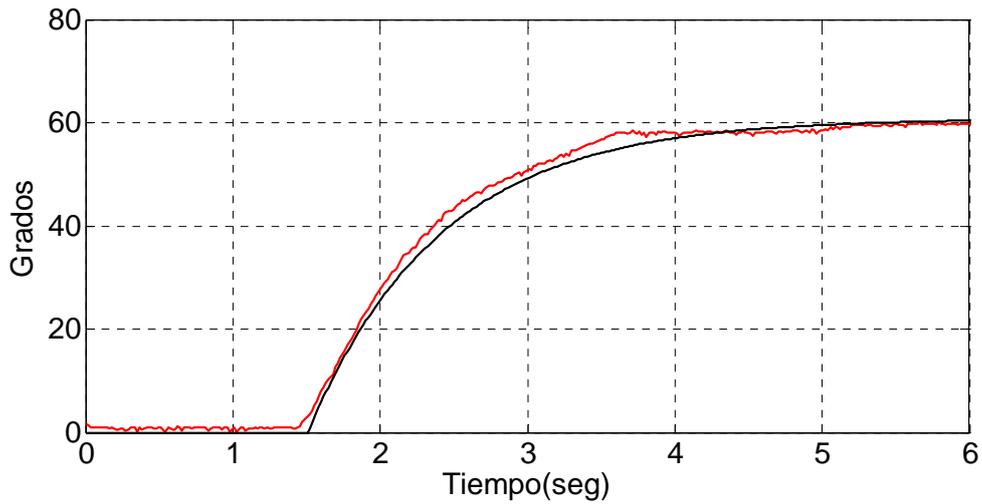


Fig.-5.21

Se comprueba una vez más la validez del modelo observando que las curvas real e imaginaria coinciden.

Motor DC.-

Se repiten los pasos de las anteriores identificaciones, para ello se vuelven a realizar dos experimentos que nos muestran la variación de posición angular para un escalón de 0 a 3.5 voltios en el motor DC. Se observan los resultados de los experimentos en la figura 5.22:

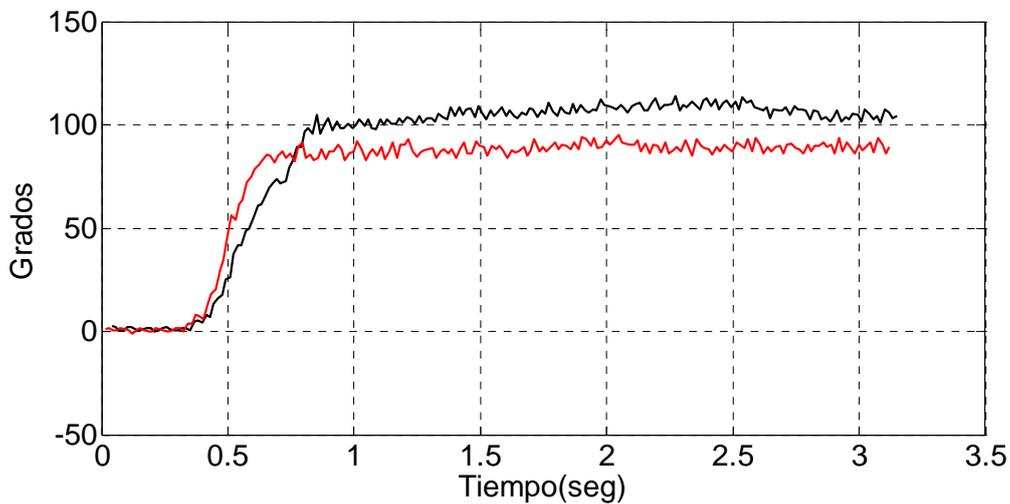


Fig.-5.22

Como se puede ver, esta vez no se produce el retraso que se da en el SMA, debido a que el motor DC ejerce mucha más fuerza para vencer al muelle.

Identificación en velocidad para el motor DC

Se repetirá de nuevo el método de los capítulos anteriores para obtener un modelo del sistema formado por el motor DC y el muelle 3. Se utilizará la gráfica de la velocidad, obtenida a partir de la de posición angular de la figura 5.22 como se ha explicado anteriormente [véase capítulo 5.1.1 identificación en velocidad para el motor DC]. La figura 5.23, representa la velocidad angular del motor DC obtenida a partir de la posición angular. A partir de la figura 5.23 se obtendrá un modelo para su posterior validación de la misma manera que antes.

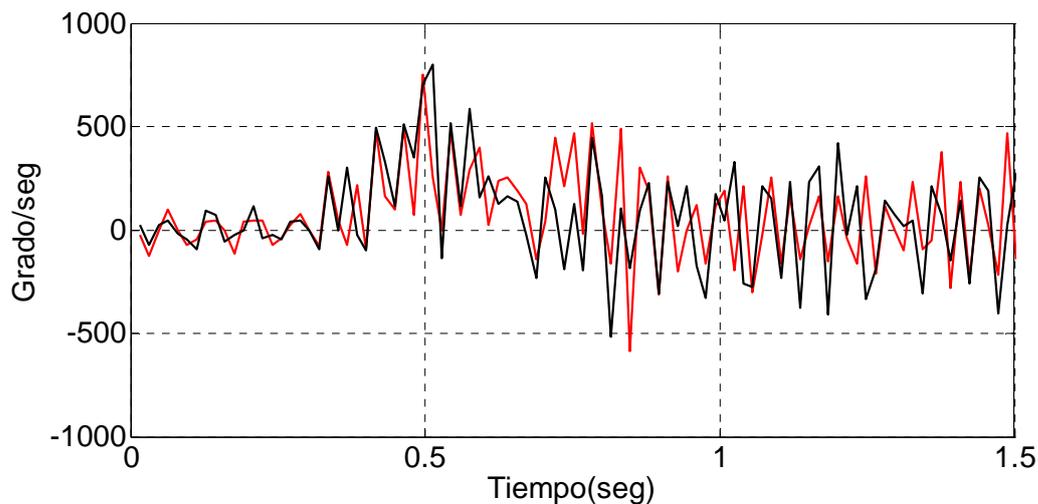


Fig.-5.23

Se vuelve a observar en la gráfica que a partir de 0.6-0.7 segundos, los datos ya no son válidos ya que el experimento ha acabado.

Bajo estos experimentos se vuelve a obtener la función de primer orden siguiendo los mismos pasos que en los capítulos anteriores de manera que se ha obtenido el siguiente modelo de primer orden:

$$G(s) = \frac{375/3.5}{1 + 0.1s}$$

Usando de nuevo “simulink” se obtiene el diagrama de la figura 5.24:

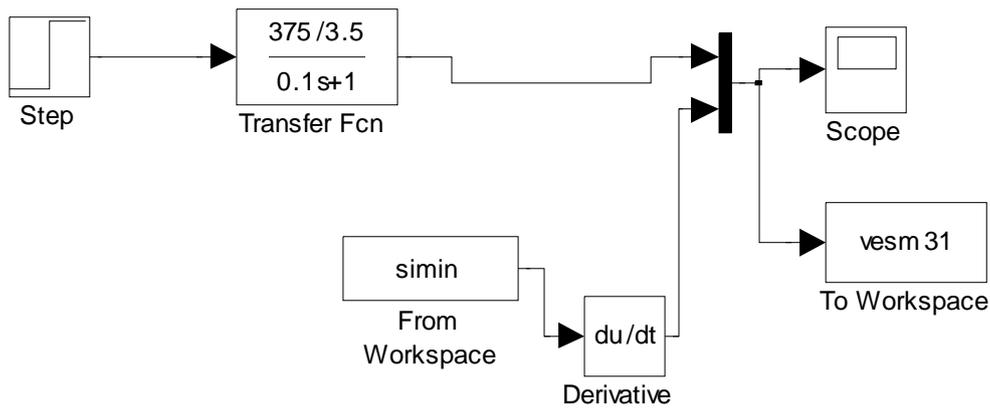


Fig.-5.24

Ahora se obtiene la comparación del modelo simulado, con la derivada de los datos de salida reales de uno de los experimentos de la gráfica de posición angular de la figura 5.22, obteniéndose la salida de la gráfica de la figura 5.25.

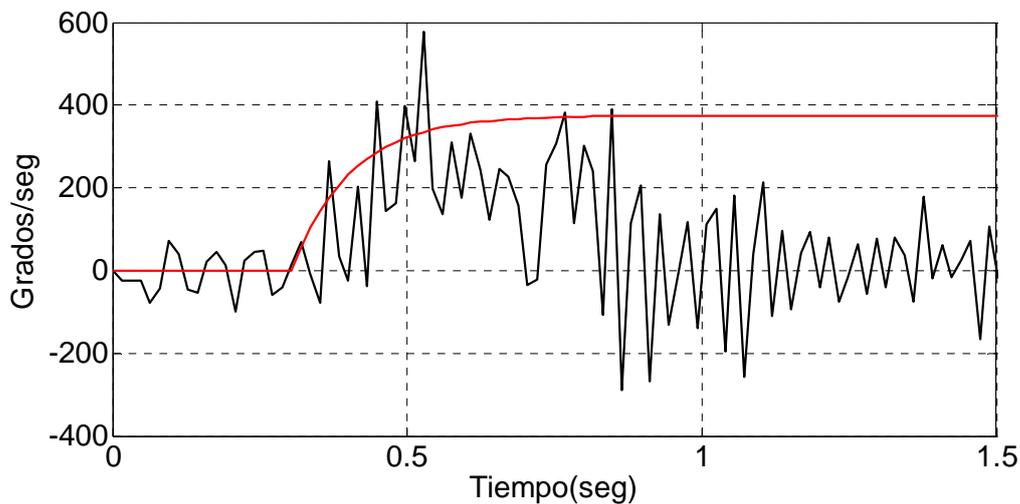


Fig.-5.25

A partir de los 0.7 segundos, los datos ya no valen porque el experimento ha acabado, pero se sigue viendo como la respuesta imaginaria de la velocidad real (línea negra) coincide con la simulada (línea roja), aunque esta vez no tanto como en anteriores experimentos.

Identificación en posición para el motor DC

Ahora, de nuevo se hace lo mismo que en capítulos anteriores pero con las gráficas de posición del motor DC de la figura 5.22. Se volverá a introducir los datos en “simulink”

Capítulo 5

para obtener la validación del modelo, comparando la simulación del modelo integrada con los datos de salida de uno de los experimentos reales de la figura 5.22:

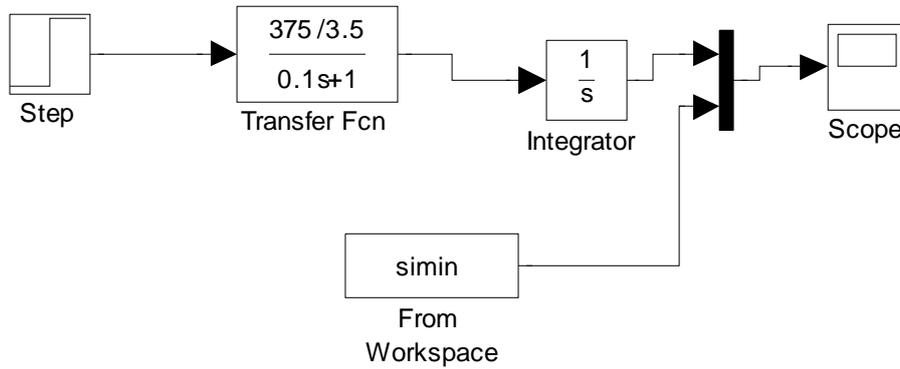


Fig.-5.26

De este diagrama de simulink, se obtiene la gráfica de validación de la figura 5.26:

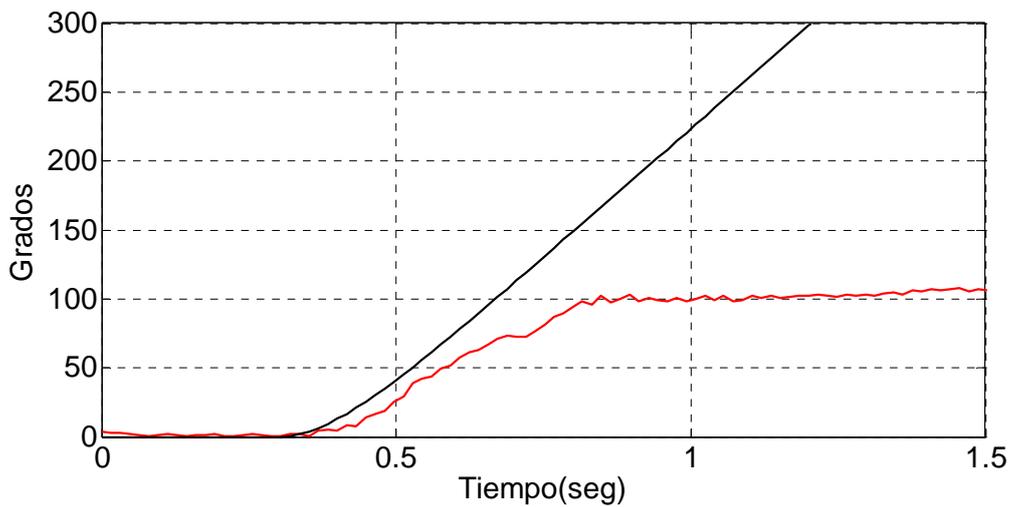


Fig.-5.27

Esta vez sí que se puede apreciar que la verificación del modelo no es todo lo buena que cabe esperar, aunque en la primera parte, las curvas se aproximan. A partir de los 0.7 segundo los datos no son válidos.

Datos finales de las identificaciones		
	SMA	Motor DC
Muelle 1	$G(s) = \frac{301.25/5}{1 + 1.2s}$	$G(s) = \frac{675/3.5}{1 + 0.09s}$
Muelle 2	$G(s) = \frac{129.2/5}{1 + 1.5s}$	$G(s) = \frac{425/3.5}{1 + 0.07s}$
Muelle 3	$G(s) = \frac{60.81/5}{1+0.9s} e^{-0.4s}$	$G(s) = \frac{375/3.5}{1 + 0.1s}$

Tabla 3.-Tabla resumen de los modelos identificados

5.2.-Control simulado.

En este capítulo, se procederá al siguiente paso después de la identificación del sistema. Se tratará de sintonizar un PID para control mediante simulación del proceso. Se intentará así, establecer un control lo más preciso posible, tanto del SMA, como del motor DC. Todo esto, para los distintos muelles de los que se dispone, es decir, el mejor control para cada uno de los sistemas. Para realizar este control se usará una referencia para cada sistema que tendrá valores dentro del margen de movimiento de cada muelle según se ha visto en el capítulo de identificación 5.1.

5.2.1.-Sintonía y control simulado para el muelle 1.

SMA.-

Para simular el control del cable para el muelle1, usaremos la misma herramienta que hemos usado antes para la identificación, es decir, “simulink”. Para esto, se diseñará primero un bloque de “simulink”, con el que se simulará la entrada de varios escalones que se le irán introduciendo al modelo hallado en la identificación. Este sistema contará con un bloque PID, donde se introducirán los parámetros necesarios para el control del cable, de igual manera, contará con un bloque denominado “saturation” que servirá para establecer los parámetros reales que se le pueden introducir al cable.

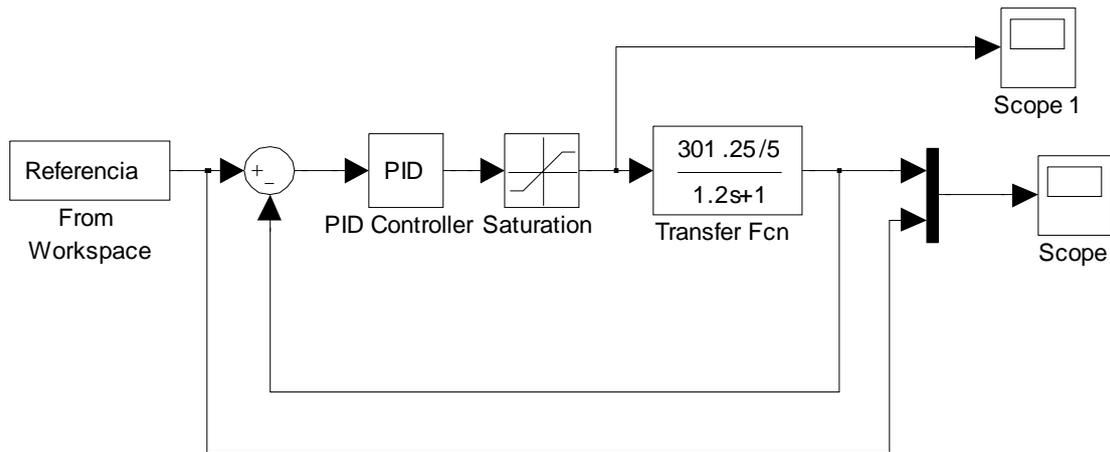


Fig.-5.28

Tras esto, tendremos dos salidas, una será para ver tanto la referencia como la respuesta del sistema ante la entrada introducida y la otra para ver la señal de control del sistema.

Para obtener los parámetros del PID se usará el método “Ziegler-Nichols”[4]. Para esto se usará una de las gráficas de las salidas que se han obtenido al aplicarle una entrada escalón de 5 voltios al cable SMA.

El método de Ziegler-Nichols consiste en hacer una recta que pase por el punto de inflexión de manera tangente a la curva que se obtiene del sistema ante la entrada escalón. Esta recta, delimitará varios puntos de los que se extraerán los parámetros necesarios para que a partir de una tabla dada se obtengan a su vez, los parámetros de configuración del PID. Se puede ver a continuación la gráfica de la figura 5.29 en la que se aplica este método:

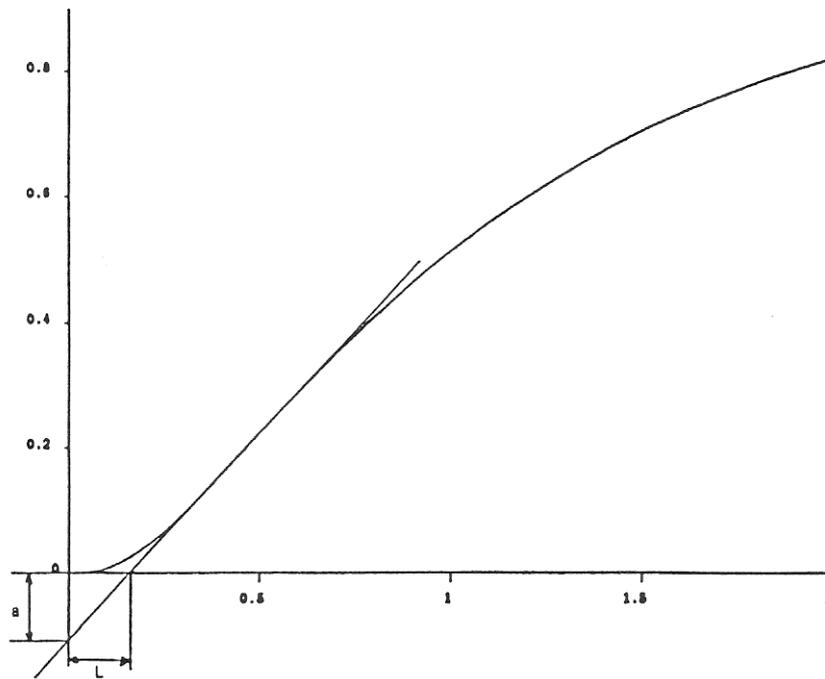


Fig.-5.29

Después de esta gráfica obtenemos los valores para configurar un PID según la tabla de la figura 5.30:

*Table 4.1
Recommended PID Parameters According to
Ziegler-Nichols Step Response Method*

Controller	K	T_i	T_d	T_p
P	$1/a$			$4L$
PI	$0.9/a$	$3L$		$5.7L$
PID	$1.2/a$	$2L$	$L/2$	$3.4L$

Fig.-5.30

Para usar este método, se tiene una de las curvas de salida, a la que se le colocará la recta tangente para obtener los parámetros siguiendo las normas del método descrito anteriormente. Estas indicaciones, se pueden ver en la figura 5.31:

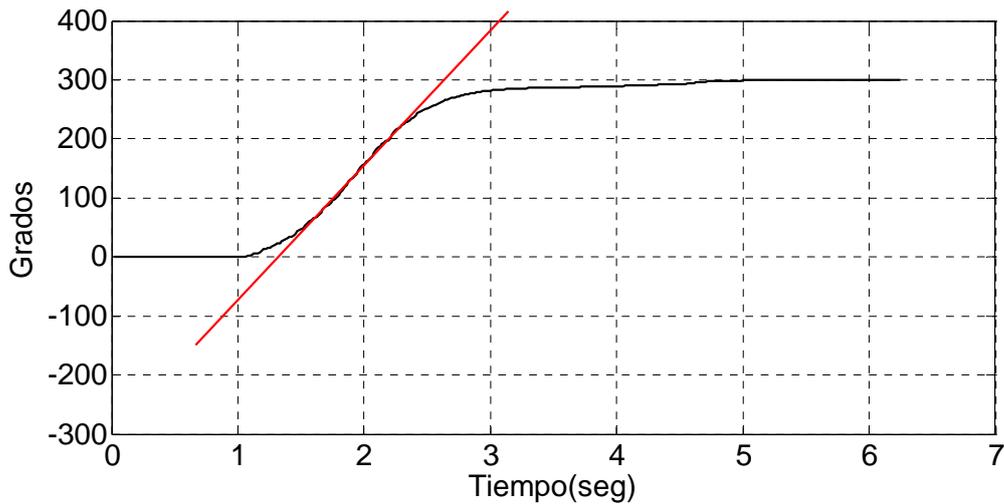


Fig.-5.31

Según la tabla 5.30 y la gráfica de la figura 5.31, se obtiene para el método de Ziegler-Nichols $a=70$ y $L=0.4$.

Con estos valores se obtienen los parámetros para configurar el PID visto en la tabla de la figura 5.28. Probando distintos PID, se obtiene para el mejor control un PI con valores de $P=0.013$ e $I=1.2$, donde podemos ver la salida y la señal de control en las figuras 5.32 y 5.33 respectivamente:

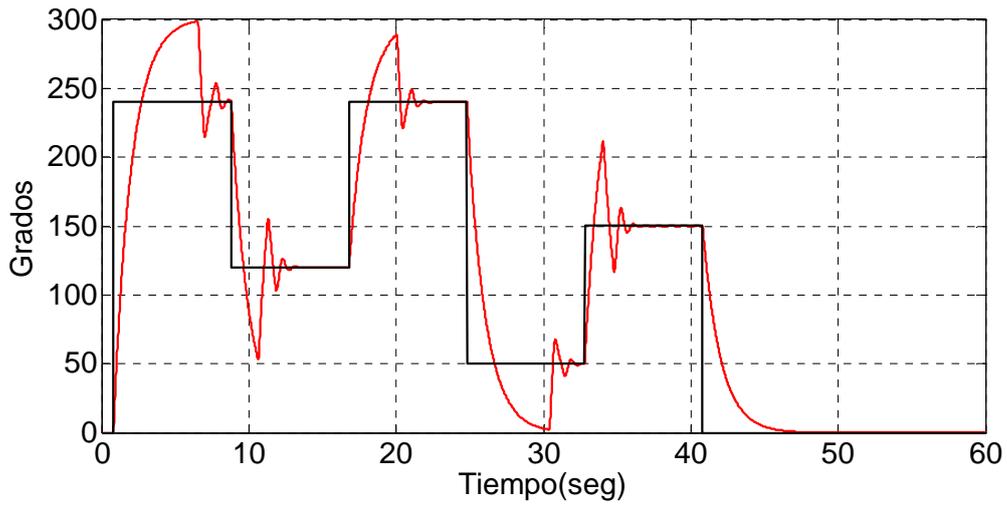


Fig.-5.32

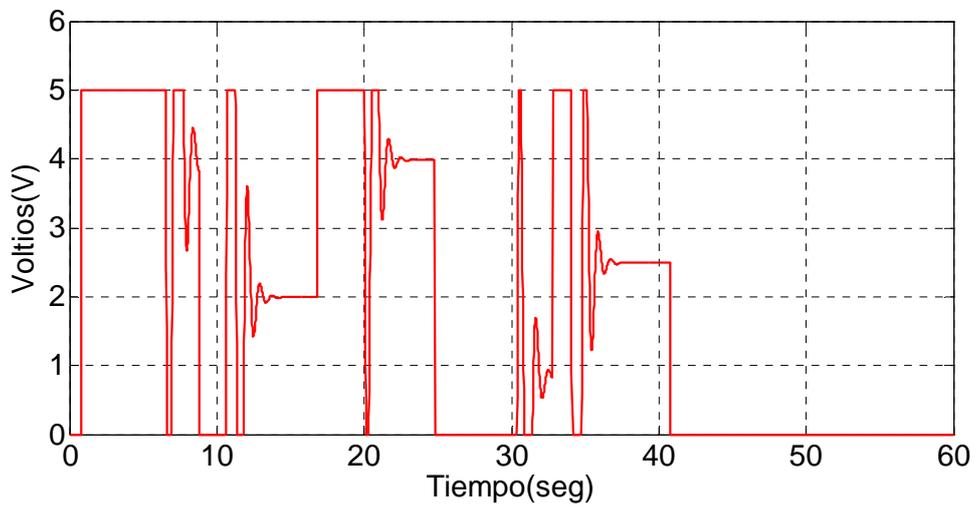


Fig.-5.33

Se puede observar cierta saturación en la señal de control de la segunda gráfica.

Después de estos resultados se prueba manualmente para intentar de esta manera conseguir una salida mucho mejor, que siga mejor la referencia y que tenga una señal de control que no esté tan saturada.

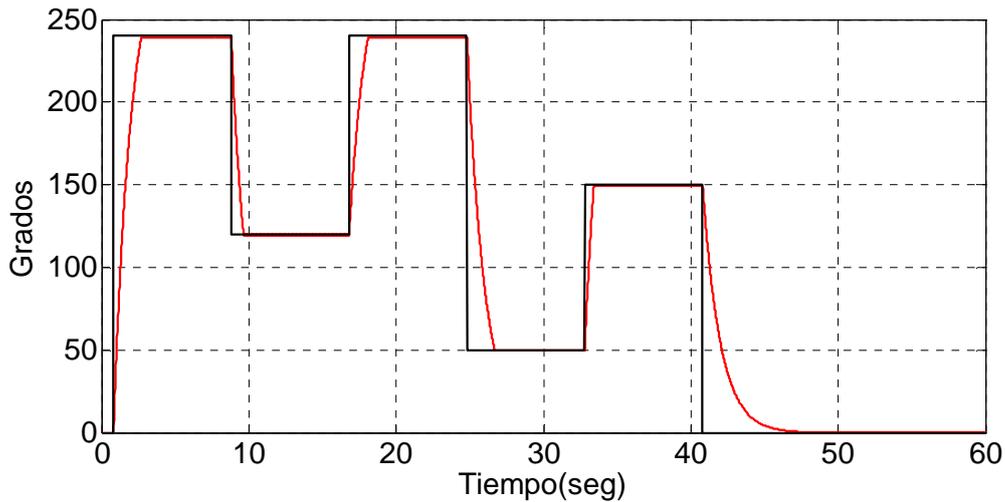


Fig.-5.34

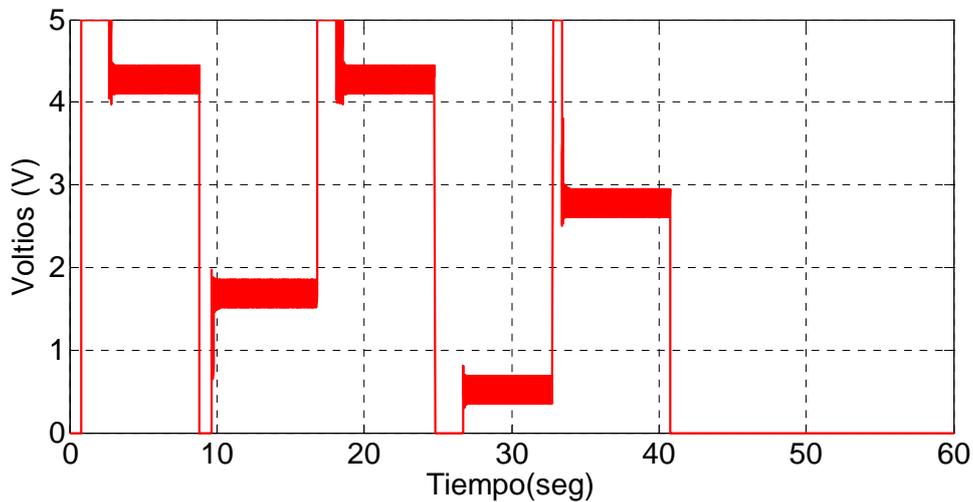


Fig.-5.35

Estos resultados de las figuras 5.34 y 5.35, se han obtenido después de distintas pruebas y habiendo configurado el PID con un valor de $P=5$, $D=0$ y $I=0$. Estos resultados obtenidos de manera manual reportan mejores resultados que usando el método descrito, así, ahora se obtiene menos saturación, pero el sistema también es más lento.

Motor DC.-

Ahora se usará el método anterior para obtener de nuevo los parámetros necesarios para configurar el mejor PID y realizar el control del motor DC. Para esto, se usará una gráfica de salida del motor DC obtenida anteriormente en los experimentos, donde se

dibujará la recta tangente que marcará los datos necesarios para obtener los parámetros, como se puede ver en la figura 5.36.

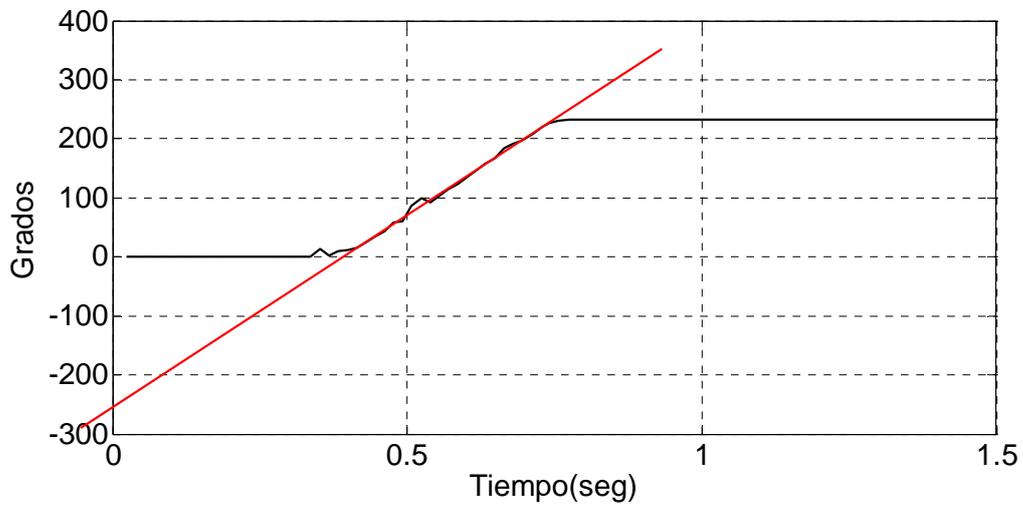


Fig.-5.36

Ahora, se obtiene de la gráfica de la figura 5.36 los siguientes datos, $a=250$ y $L=0.4$.

A partir de estos datos, se obtendrán unos parámetros para el PID con los que se realizará un control del motor DC. El controlador usado será un PI con valores de $P=0.0036$ e $I=1.2$, que se podrá ver en las gráficas de las figuras 5.35 para el seguimiento de referencia y 5.36 para la señal de control:

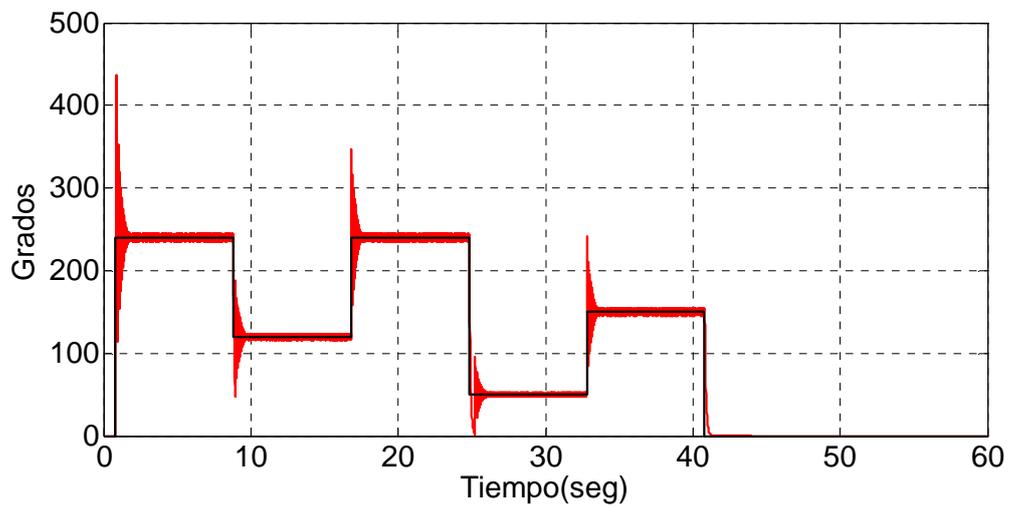


Fig.-5.35

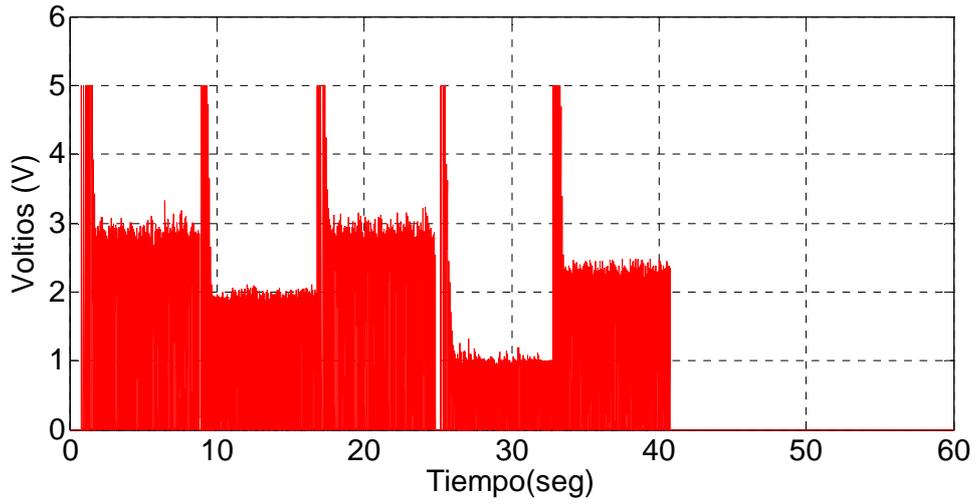


Fig.-5.36

Viendo estos resultados, en los que se observa mucha saturación en la señal de control y mucho error transitorio, se procede a intentar configurar el PI de manera manual, obteniendo los siguientes resultados para los valores de $P=1$ e $I=0.1$ que se pueden observar en las figuras 5.37 y 5.38.

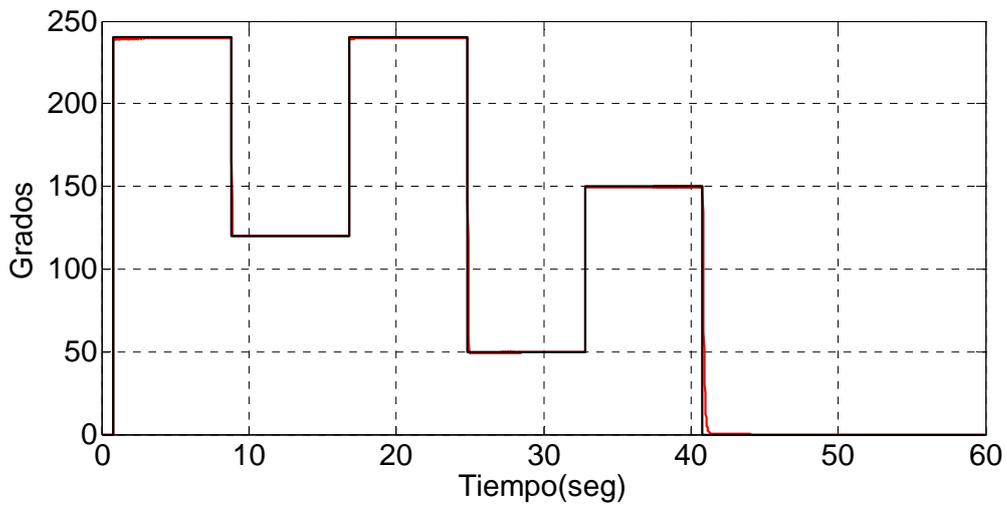


Fig.-5.37

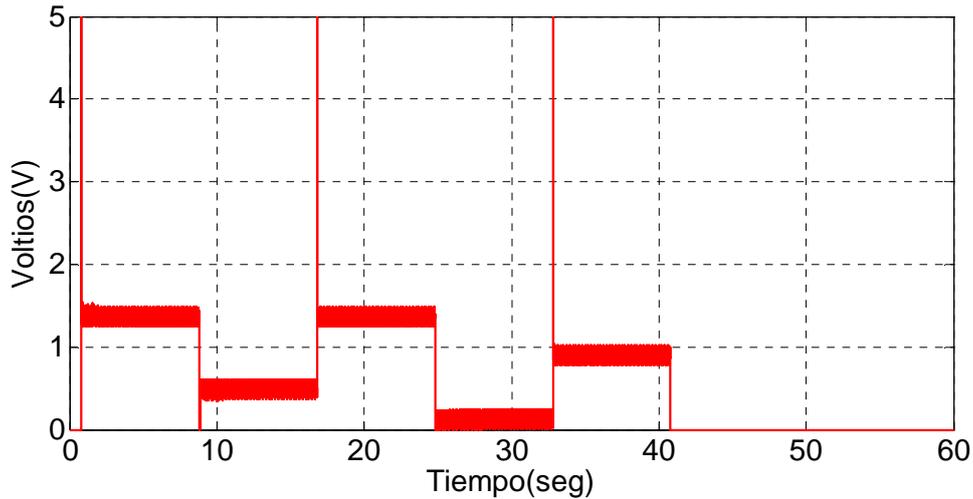


Fig.-5.38

5.2.2.- Sintonía y control simulado para el muelle 2.

Se vuelve a repetir la metodología anterior para la obtención de los parámetros de los PID, pero esta vez para el muelle 2. A partir de aquí, se tendrán en cuenta todos los datos aportados anteriormente sobre el método Ziegler-Nichols para obtener los parámetros del controlador PID, tanto en el control del SMA como después en el del motor DC.

SMA.-

Al igual que en apartados anteriores, se procederá a obtener los datos necesarios para conseguir los parámetros del PID del SMA, para ello se recurrirá a los experimentos realizados con el SMA obteniéndose los resultados de la figura 5.39.

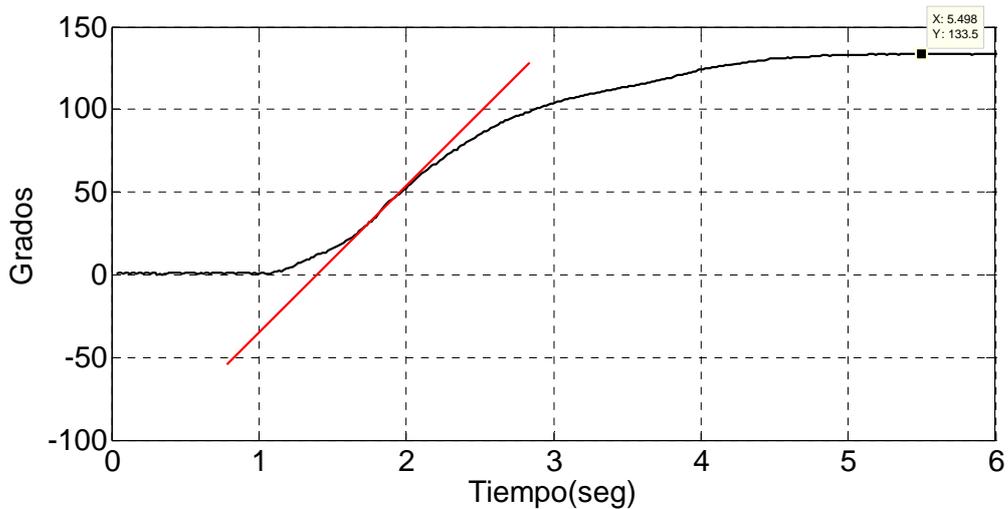


Fig.-5.39

Capítulo 5

De aquí, igual que anteriormente, se obtienen los parámetros que designan la configuración del PID según el método Ziegler-Nichols, obteniéndose los datos de $a=35$ y $L=0.4$. Con estos valores y haciendo uso de la figura 5.28, se obtendrá como mejor PI el de la figura 5.40 y 5.41, definido por $P=0.025$ e $I=1.2$.

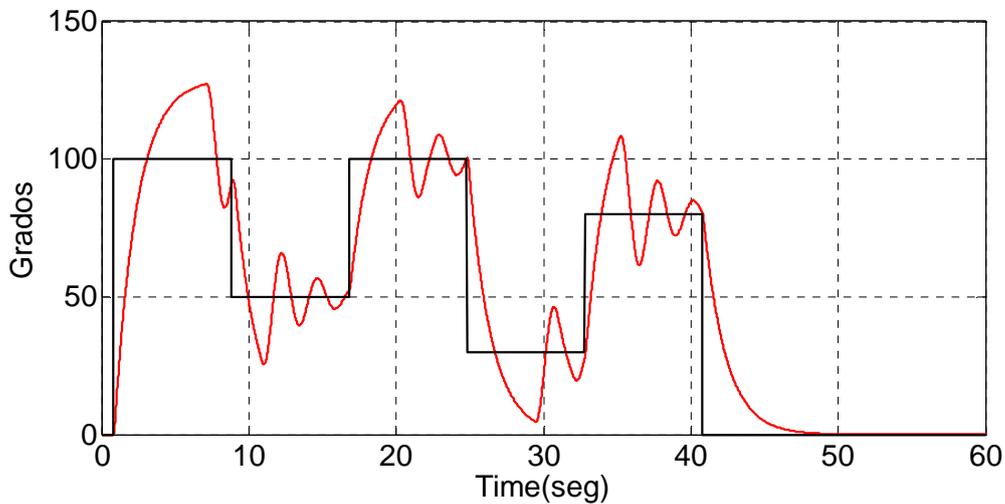


Fig.-5.40

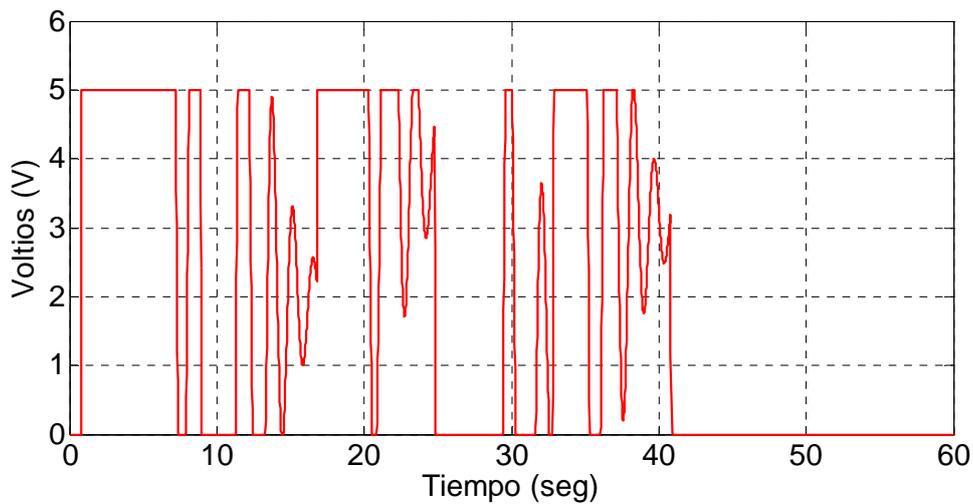


Fig.-5.41

Se vuelve a observar también en esta gráfica de la figura 5.41 que hay mucha saturación.

Ahora igual que anteriormente se configura el PI manualmente buscando la mejor configuración, obteniéndola para $P=3$ e $I=0.05$:

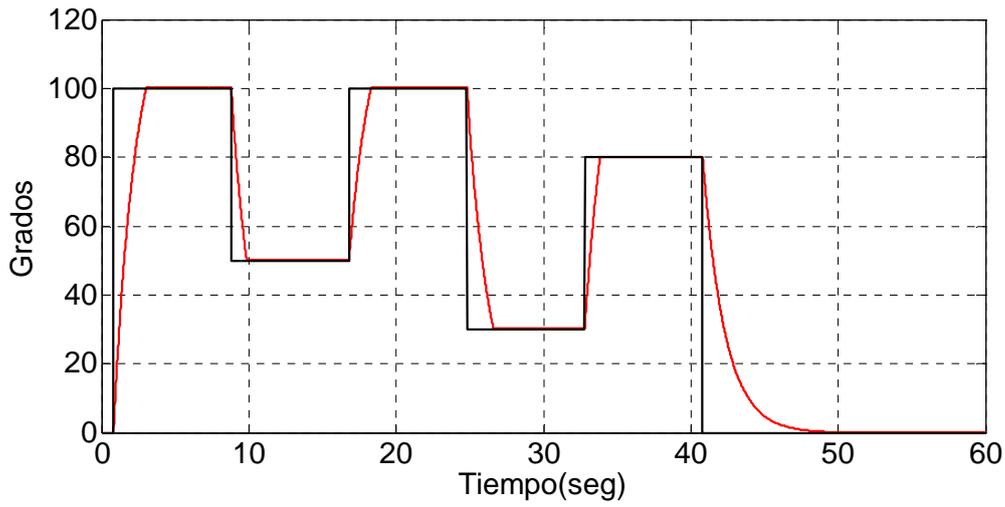


Fig.-5.42

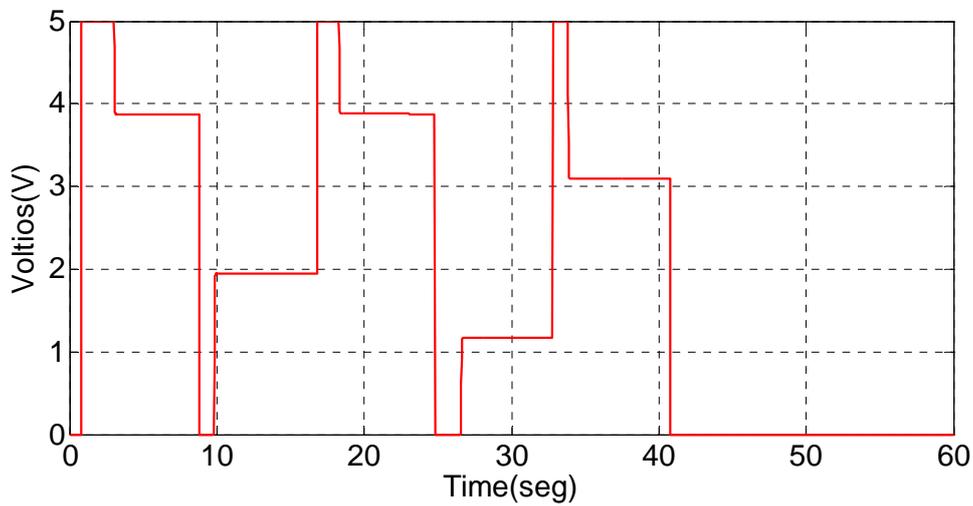


Fig.-5.43

Como se observa, se obtienen mejores resultados usando los parámetros manuales, ya que ahora aunque más lento, el sistema se comporta mucho mejor.

Motor DC.-

Se empieza de nuevo usando la gráfica de respuesta a una entrada escalón para conocer los parámetros del PID:

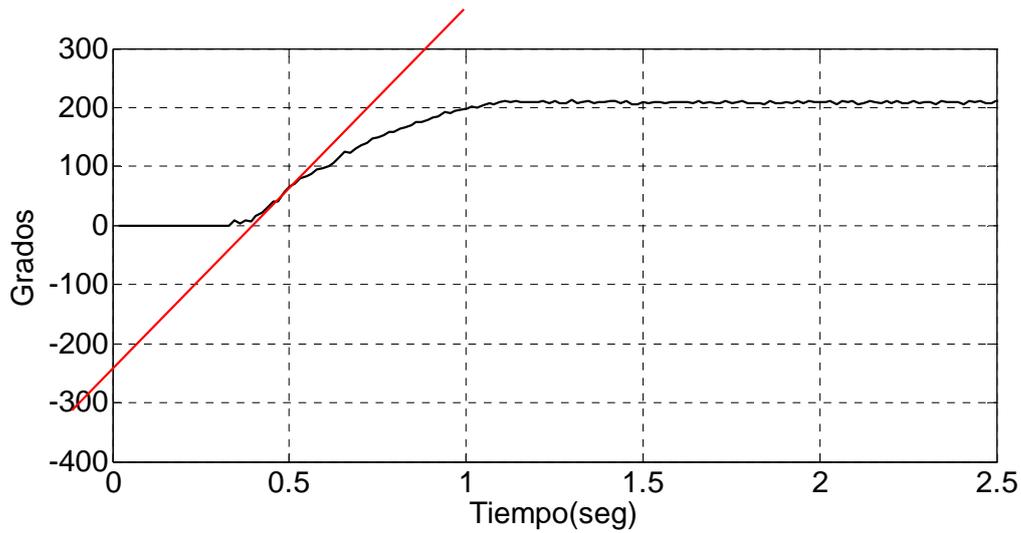


Fig.-5.44

De la figura 5.44 y siguiendo el método explicado anteriormente [véase capítulo 5.2.1], se obtienen los valores de $a=240$ y $L=0.4$.

Con estos valores se procede a simular el control del motor DC para los parámetros obtenidos con el método ya explicado, hallándose como mejor controlador un PI con $P=0.0037$ e $I=1.2$ para las figuras 5.45 y 5.46.

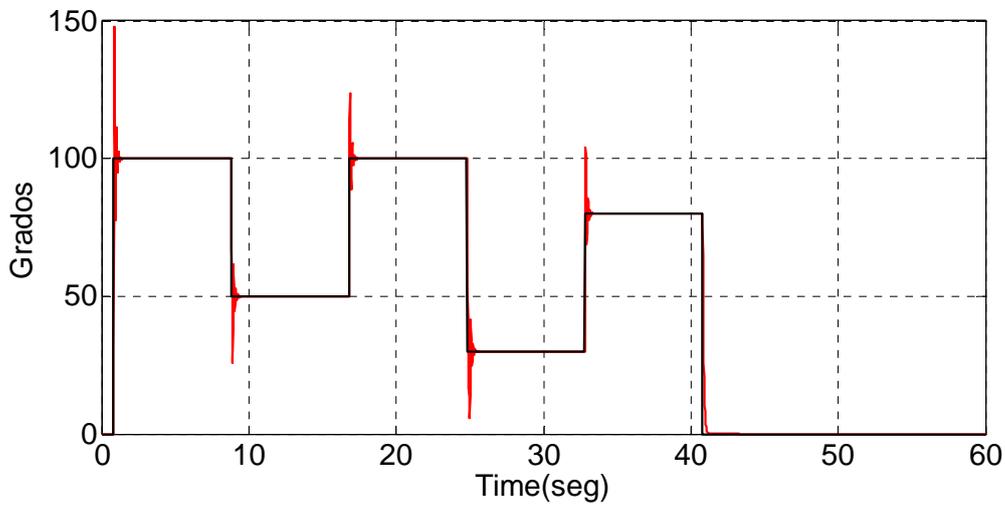


Fig.-5.45

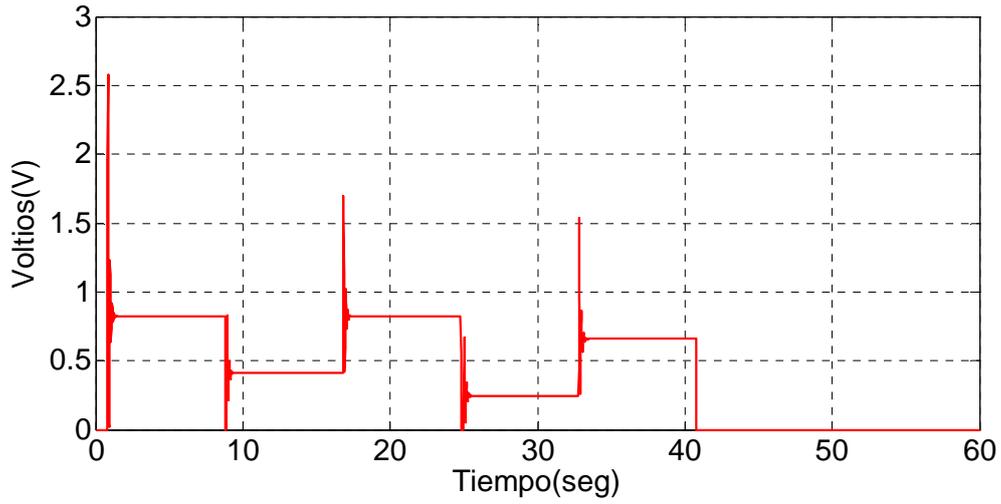


Fig.-5.46

Después de haber obtenido estos resultados en los que se aprecia demasiado sobrepico, se intentan obtener otros mejores configurando el PI de manera manual, obteniéndose mejores resultados para un PI con $P=2$ e $I=0.5$, que se puede apreciar en las figuras 5.47 y 5.48:

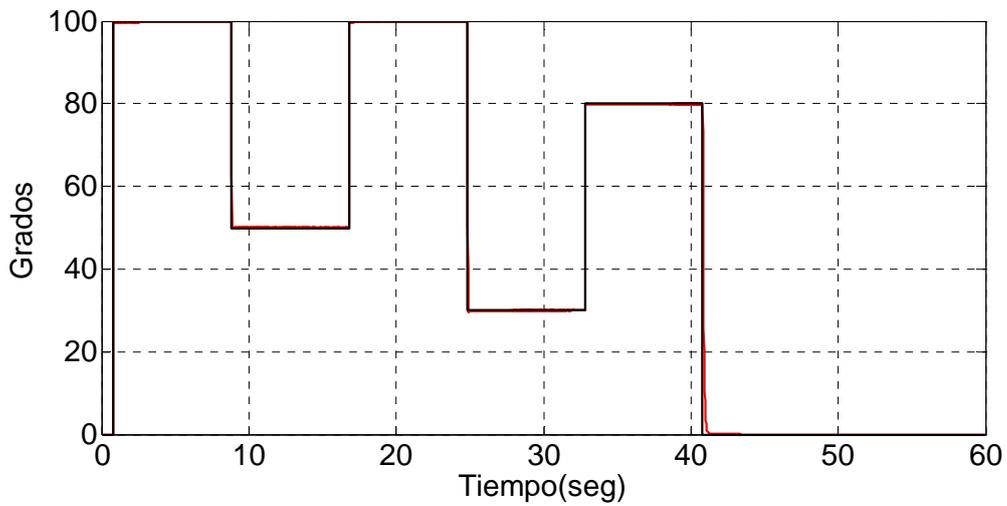


Fig.-5.47

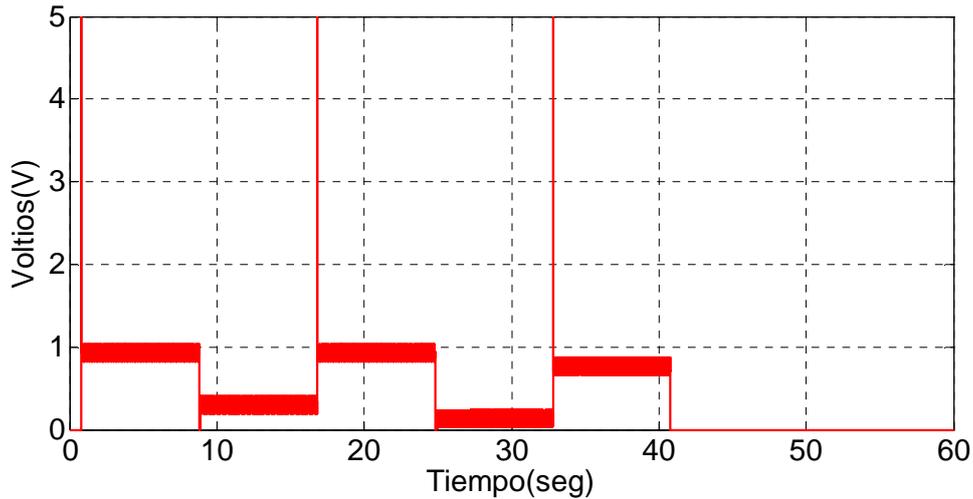


Fig.-5.48

Como se observa en la figura 5.48, para estos valores el sistema se comporta mucho mejor.

5.2.3.- Sintonía y control simulado para el muelle 3.

SMA.-

Se usa el método anterior [véase capítulo 5.2.1], para obtener la figura 5.49 de la que se calculan los parámetros para aplicar Ziegler-Nichols.

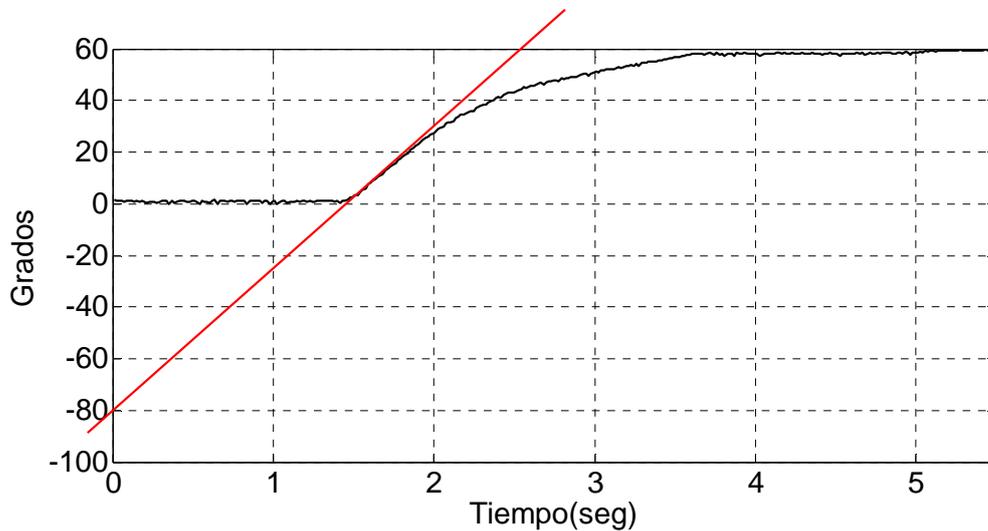


Fig.-5.49

Ahora se procede a extraer los parámetros de Ziegler-Nichols, obteniéndose los valores de $a=80$ y $L=0.4$. Con estos valores se procede a obtener las gráficas de la figura 5.51 y de la 5.52 del mejor control para el SMA que resulta ser un PI. Los valores obtenidos para el PI por Ziegler-Nichols son $P=0.011$ e $I=1.2$. Esta vez debido al retraso

Capítulo 5

reflejado en los experimentos de 0.4 segundos, se introduce un nuevo bloque denominado "Transportdelay". Así, se obtiene el diagrama de "simulink":

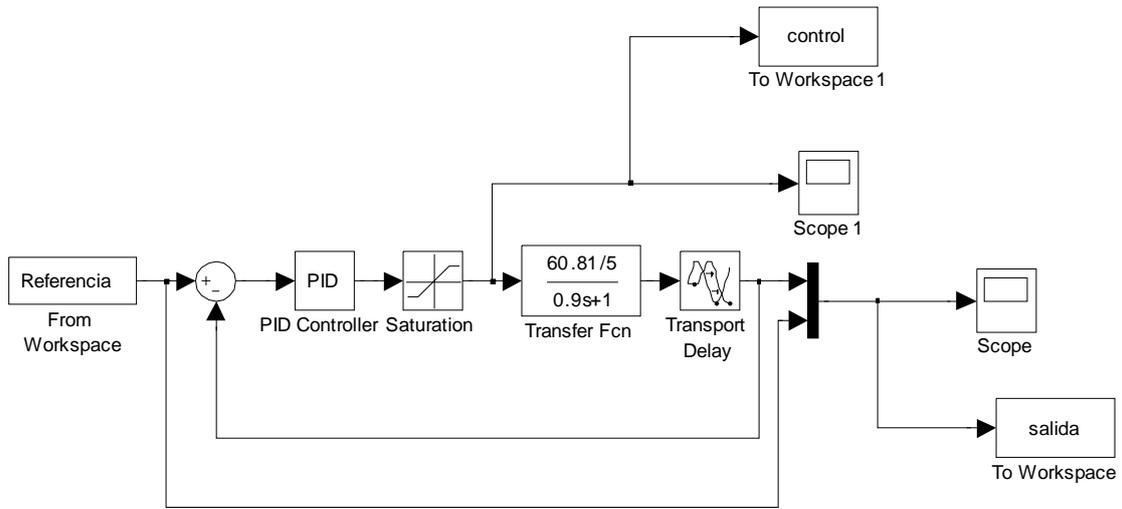


Fig.-5.50

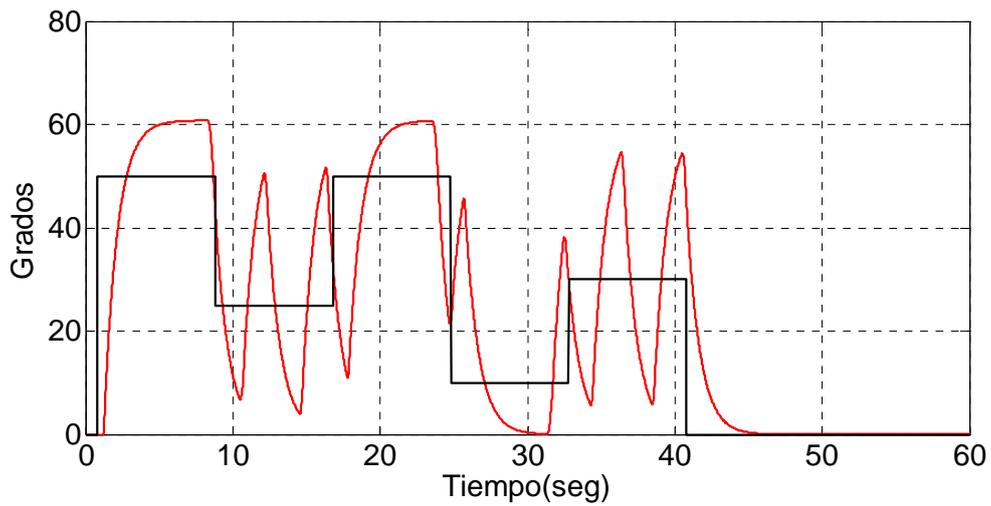


Fig.-5.51

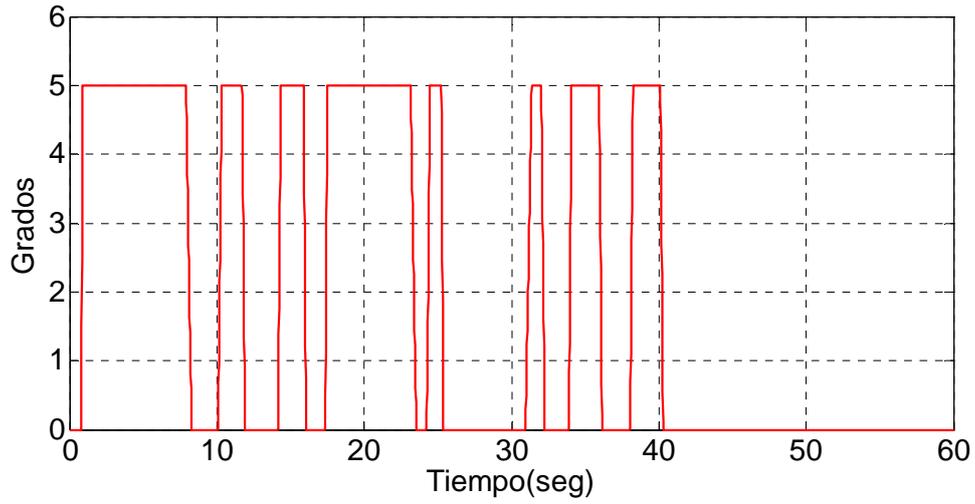


Fig.-5.52

De nuevo se observa saturación en la señal de control correspondiente a la figura 5.52. Después, como antes se ha hecho, se intenta buscar el mejor controlador probando manualmente, como en las figuras 5.53 y 5.54 donde se obtiene un PI con parámetros $P=0.05$ e $I=0.08$.

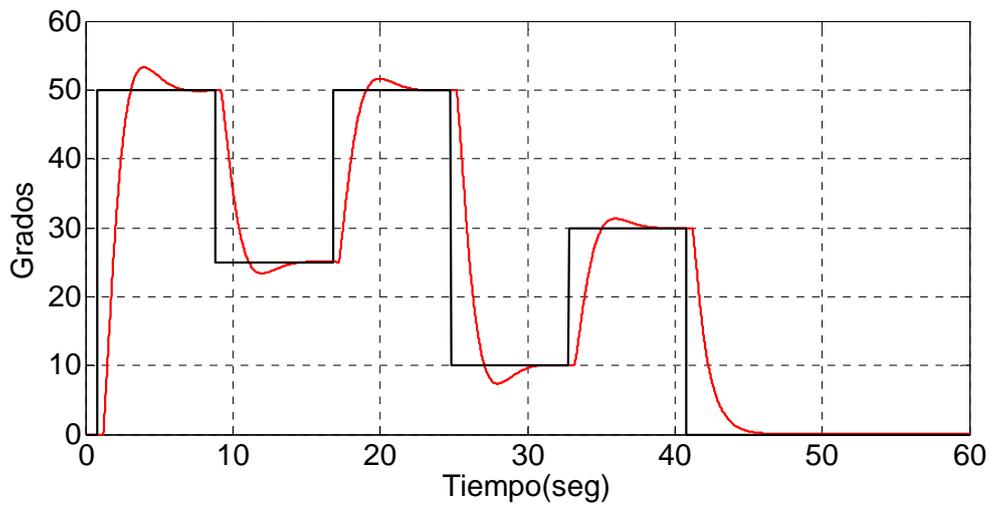


Fig.-5.53

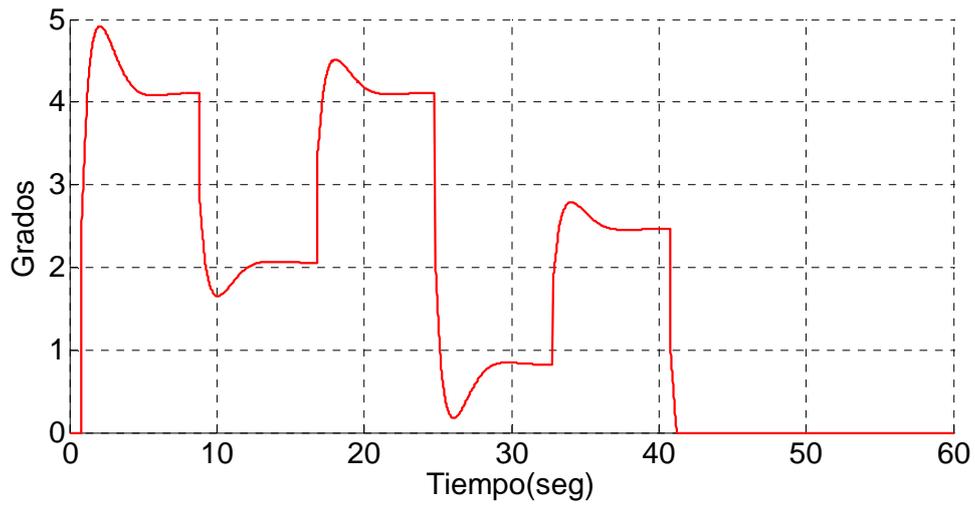


Fig.-5.54

Motor DC.-

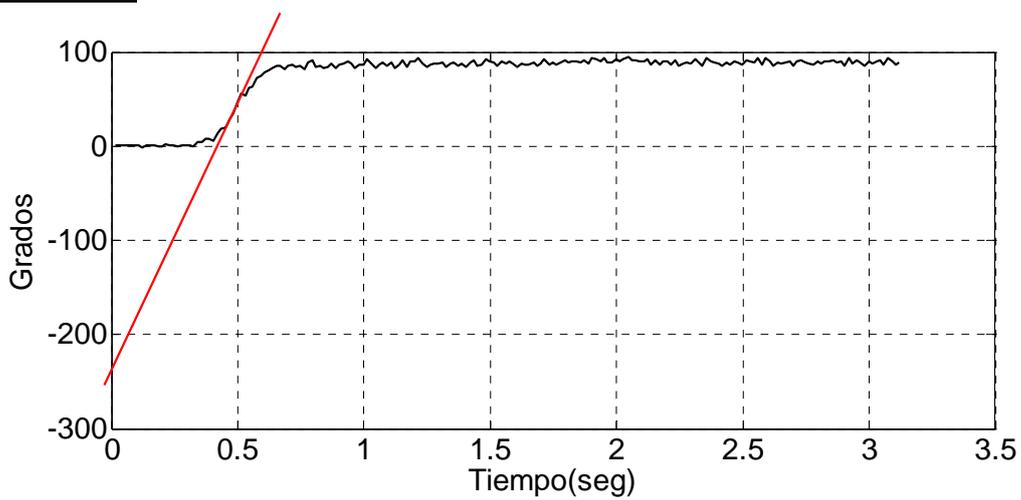


Fig.-5.55

De la figura 5.55 se han calculado los valores de Ziegler-Nichols $a=240$ y $L=0.4$ que proporcionan los parámetros del PI ($P=0.9/240$ y $I=3*0.4$). Se obtienen los siguientes resultados en las figuras 5.56 y 5.57.

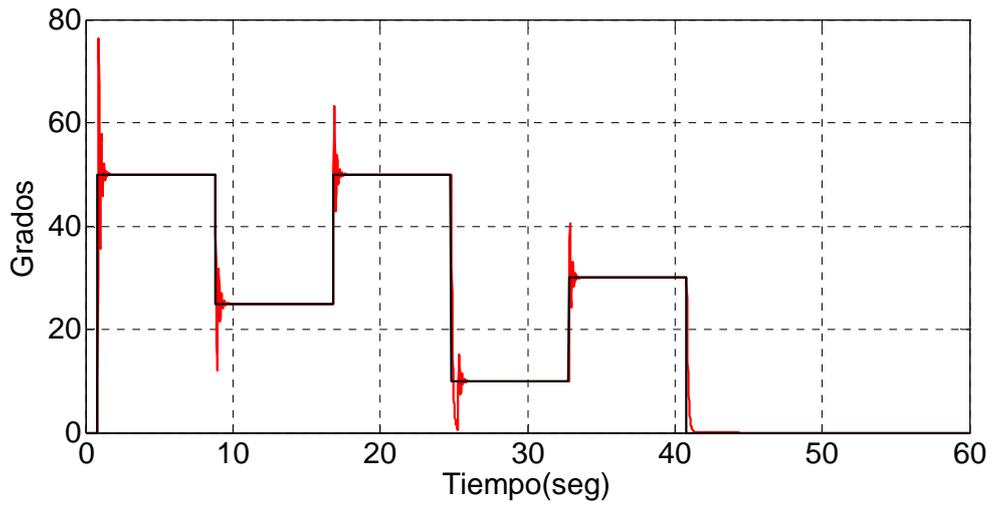


Fig.-5.56

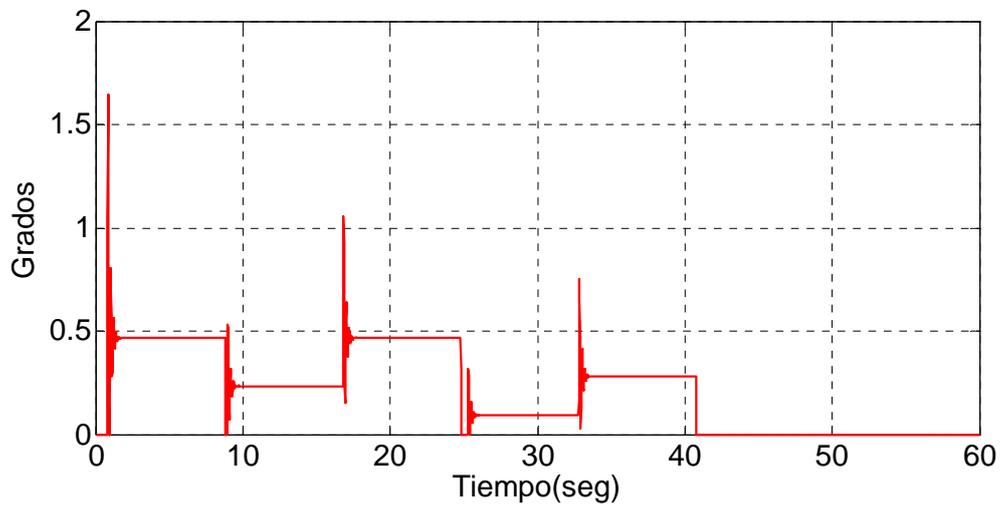


Fig.-5.57

Ahora, se intenta buscar un mejor control de manera manual ya que se observa mucho sobrepico, obteniéndose las figuras 5.58 y 5.59 para un PI con $P=1.2$ e $I=0.2$.

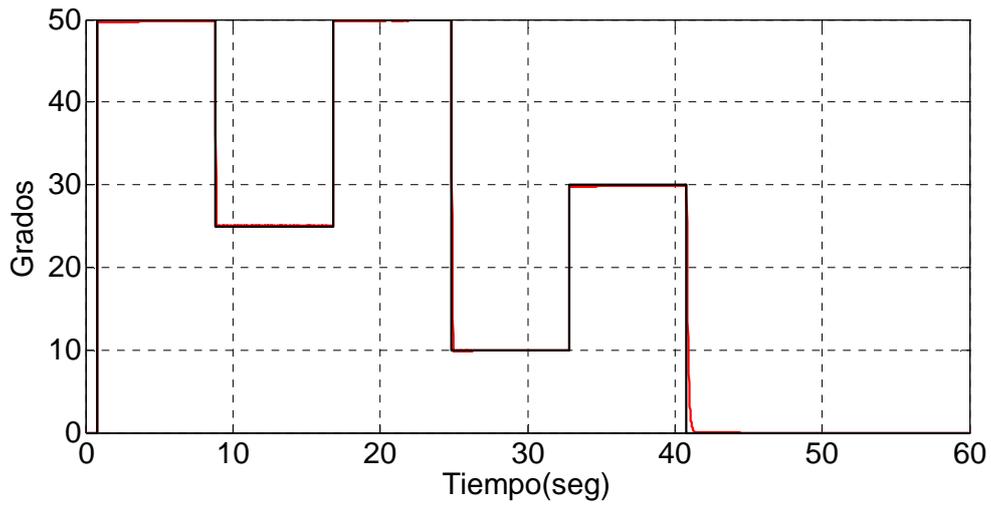


Fig.-5.58

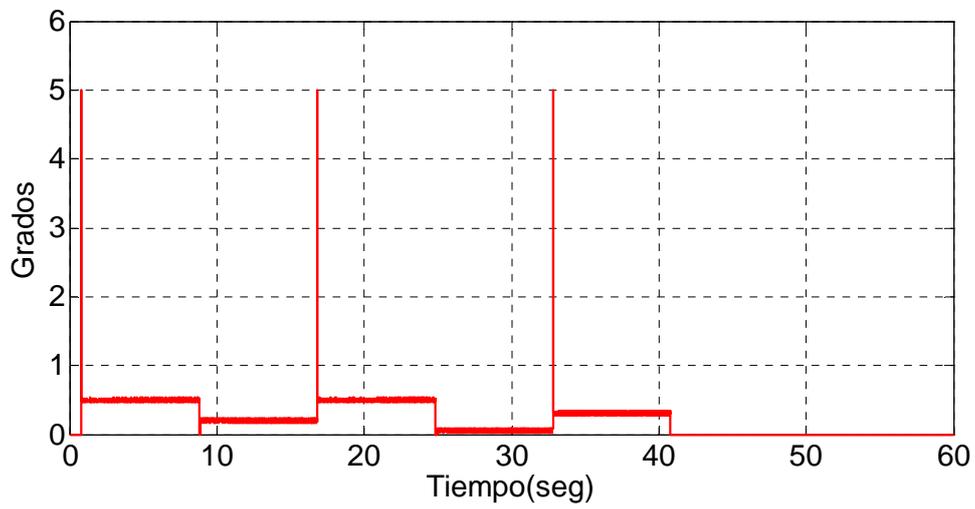


Fig.-5.59

	Cable		Motor DC	
	Ziegler-Nichols	Manual	Ziegler-Nichols	Manual
Muelle 1	P=0.013, I=1.2	P=5	P=0.025, I=1.2	P=1, I=0.1
Muelle 2	P=0.025, I=1.2	P=3, I=0.05	P=0.0037, I=1.2	P=2, I=0.5
Muelle 3	P=0.011, I=1.2	P=0.05, I=0.08	P=0.0037, I=1.2	P=1.2, I=0.2

Tabla 4.-Gráfica de los valores obtenidos para las distintas simulaciones.

Capítulo 6. Control real en el prototipo y comparativas.

A continuación se realizarán las pruebas de control con los datos de las simulaciones del capítulo anterior y después se realizará la comparativa de los resultados obtenidos en las pruebas.

Hay que tener en cuenta que los parámetros obtenidos son para sistemas en tiempo continuo. Para realizar el control de la maqueta real habrá que discretizar de forma sencilla estos parámetros. Para ello habrá que multiplicar la componente integral de los PID usados por el periodo de muestreo, por lo la componente integral, se hará más pequeña.

6.1.-Muelle 1.

Control con SMA.-

- Para el primero, se tendrán unos valores de PID ($P=5$, $I=0$, $D=0$). Así, se puede ver los primeros resultados para el SMA con muelle 1:

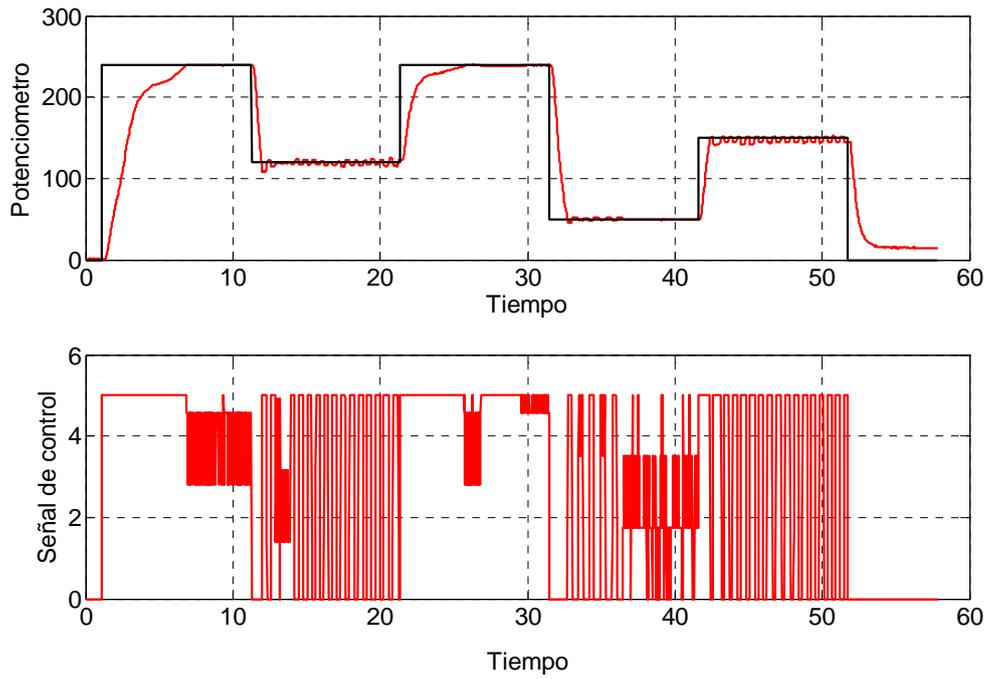


Fig.-6.1

- Se intenta mejorar los resultados obtenidos manualmente y se prueban valores de PI para $P=3$ e $I=0.008$, obteniéndose la figura 6.2:

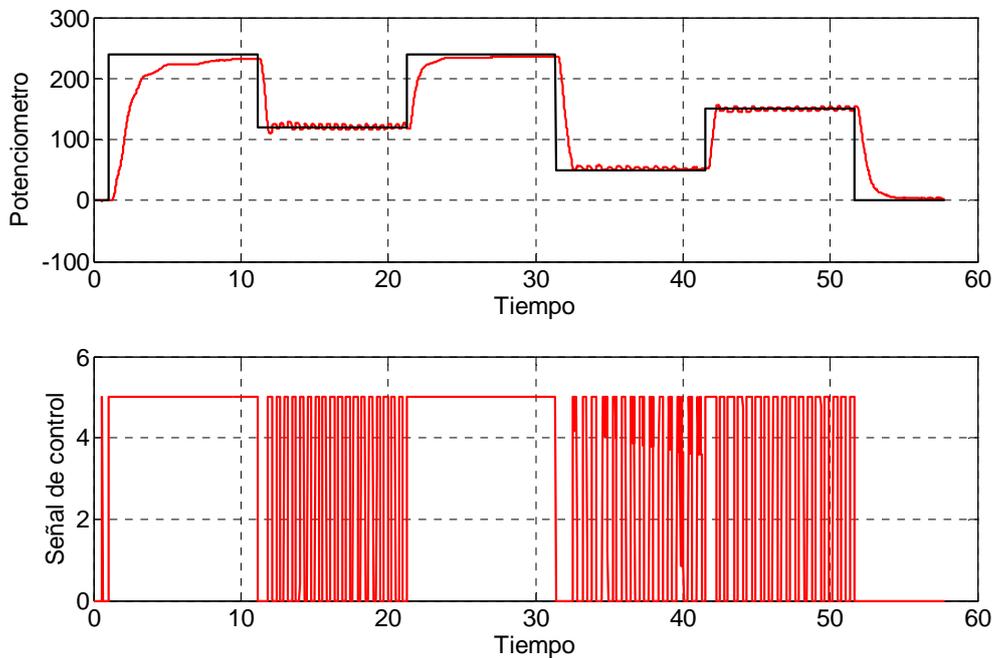


Fig.-6.2

- Usando los parámetros de sintonía de Ziegler-Nichols para el SMA 1 y teniendo en cuenta que la saturación produce un efecto “windup” desaconsejable, se ha reducido la parte integral considerablemente para evitarlo. De esta manera los parámetros del PID quedan como $P=0.1$, $I=0.0005$ y $D=0$, el resultado se muestra en la siguiente gráfica de la figura 6.3:

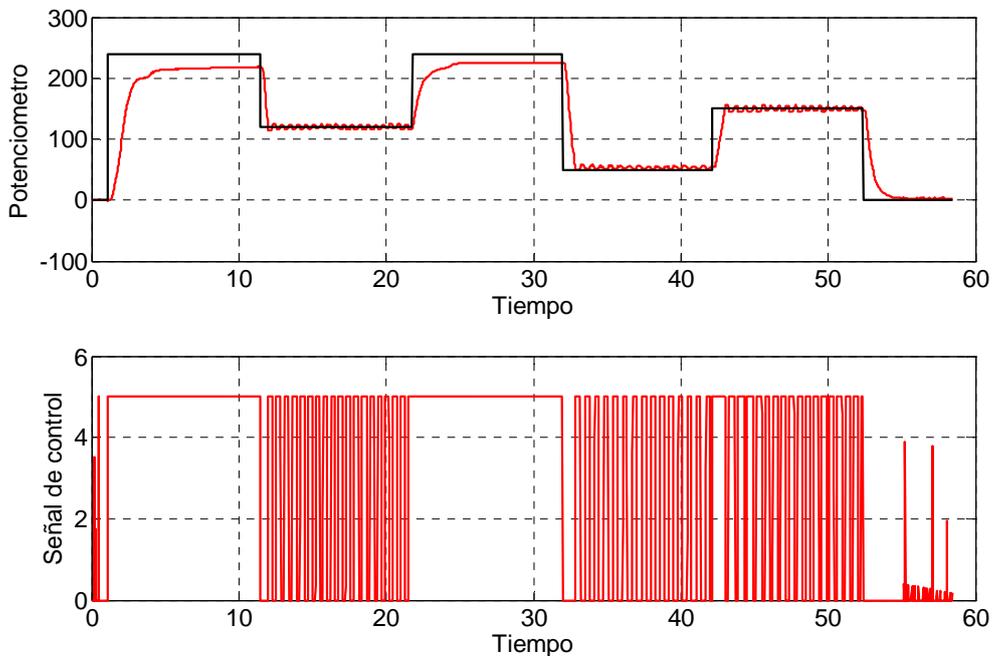


Fig.-6.3

Control con motor DC.-

- Se encuentran una serie de problemas debido a que el modelo que se ha obtenido del motor DC para cada muelle, es válido cuando el motor DC trabaja enfrentándose al muelle, pero no es válido cuando el motor DC trabaja a favor de este. Se comienza probando un PID con controlar $P=0.033$ obteniéndose la gráfica de la figura 6.4:

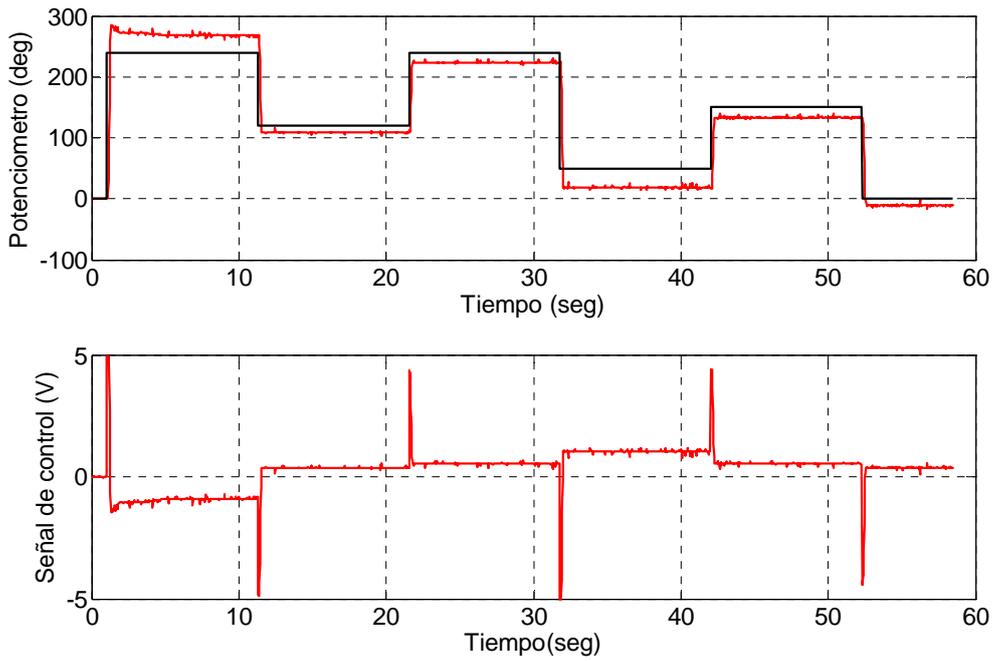


Fig.-6.4

Se observa la existencia de error estacionario para la figura 6.4.

- Se vuelve a realizar un control, esta vez PI, con valores de $P=0.02$ y $I=0.0001$, reflejado en la figura 6.5.

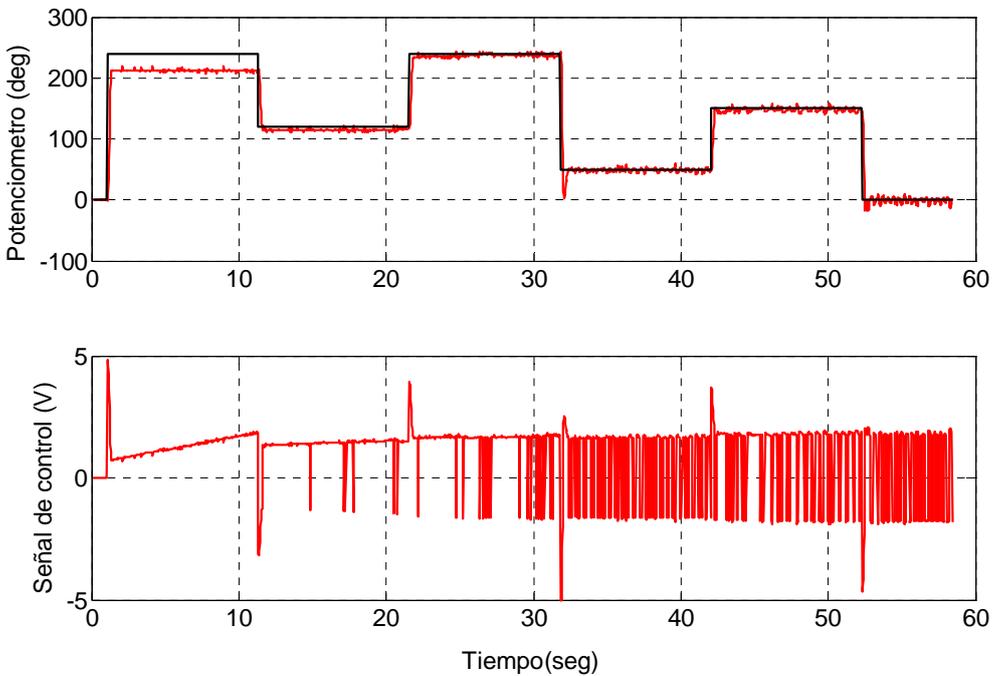


Fig.-6.5

- Otro controlador de tipo PID con valores de $P=0.03$, $I=0.00005$ y $D=0.03$, en la figura 6.6.

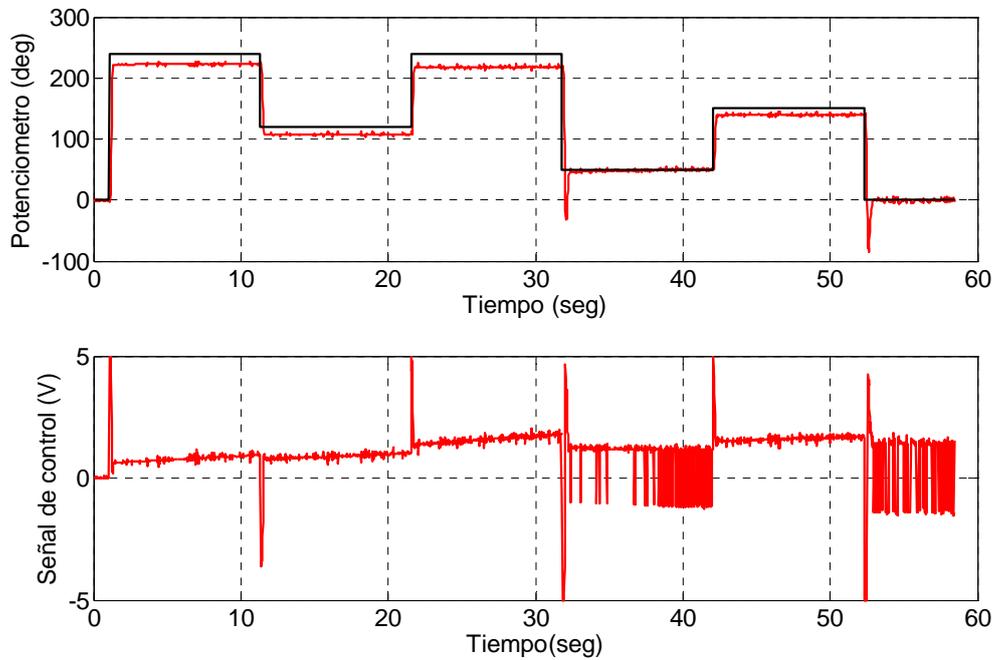


Fig.-6.6

6.2.-Muelle 2.

Control con SMA.-

- Usando los parámetros obtenidos manualmente para la configuración del mejor PID se obtiene la siguiente gráfica de la figura 6.7 obtenida de la maqueta de pruebas para $P=3$ e $I=0.05$.

Capítulo 6

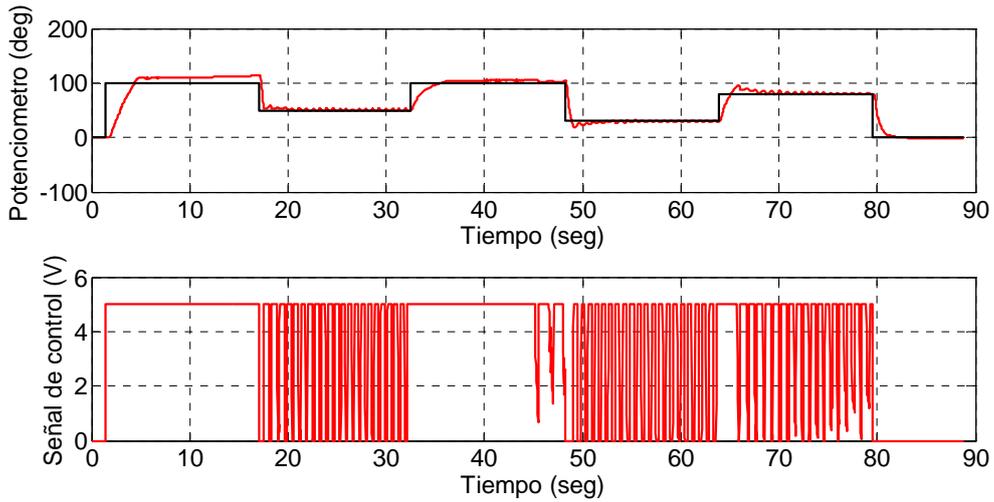


Fig.-6.7

Debido a que estos resultados no son muy buenos, ya que se aprecia por ejemplo mucha saturación, se vuelve a realizar experimentos afinando el resultado de manera manual.

- La figura 6.8 se obtiene con los valores de controlador $P=3.5$.

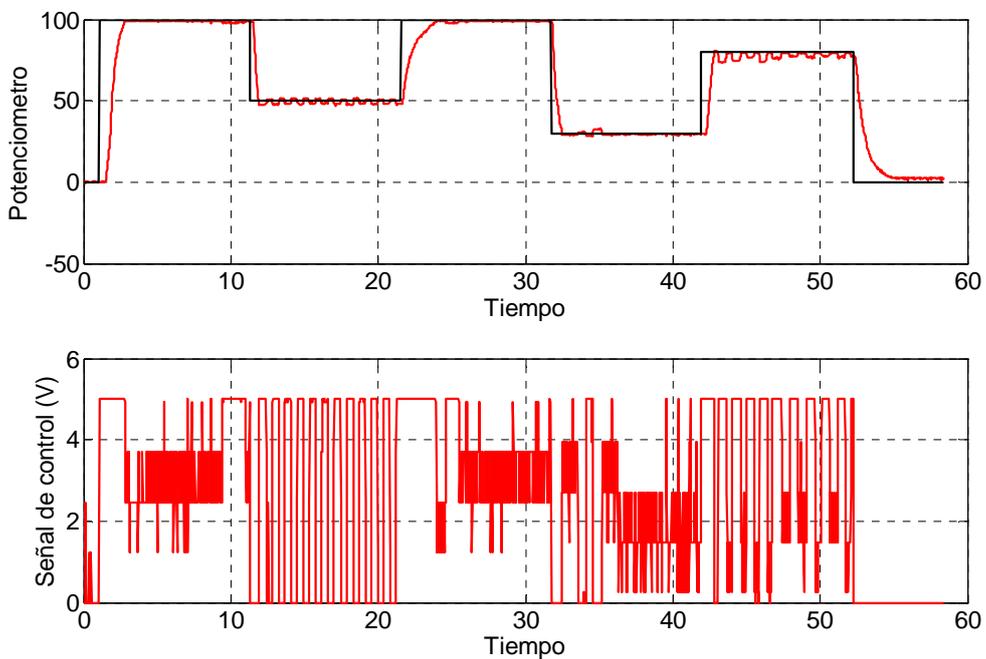


Fig.-6.8

- Se hará uso de la maqueta para probar en ella experimentos introduciendo los parámetros de Ziegler-Nichols en el PID obtenidos anteriormente, es decir, para $P=0.025$ e $I=1.2$, obteniéndose la figura 6.9.

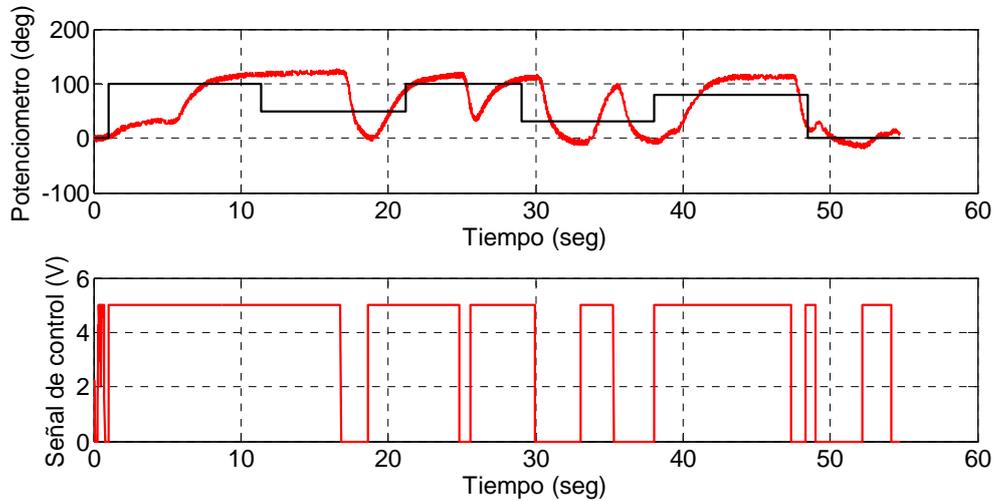


Fig.-6.9

Control con Motor DC.-

- Se procede a realizar las pruebas de los datos obtenidos manualmente en las simulaciones en la maqueta real para el motor DC, se prueban varios resultados para intentar dar con el mejor control, obteniéndose un controlador PID para $P=0.06$, $I=0.0001$ y $D=0.01$, que se puede ver en la figura 6.10.

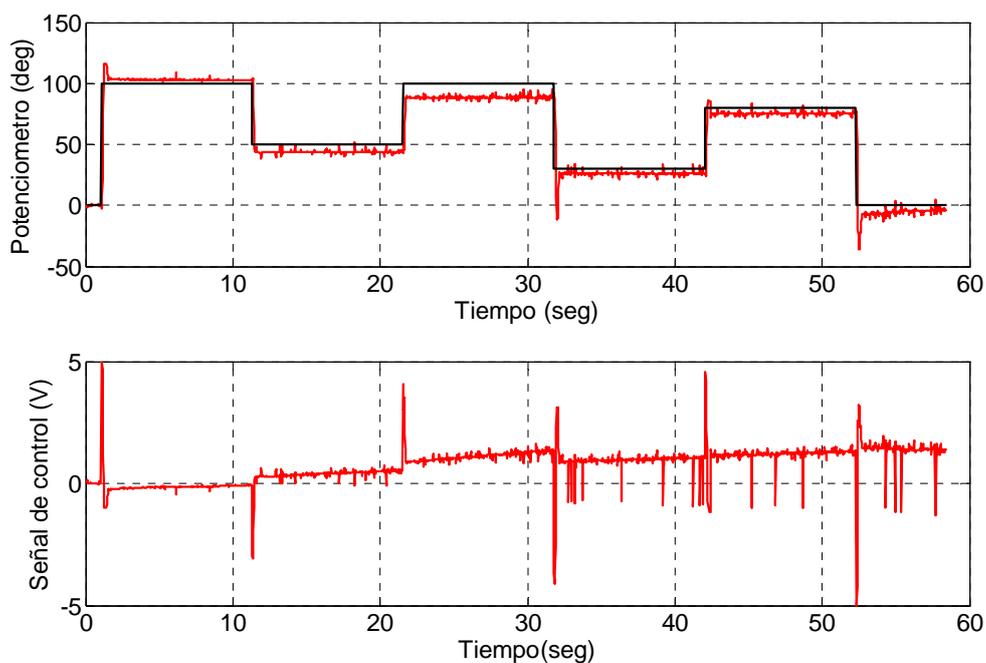


Fig.-6.10

Capítulo 6

- Se realiza de nuevo un control PI con $P=0.06$ e $I=0.00001$ para tener la figura 6.11.

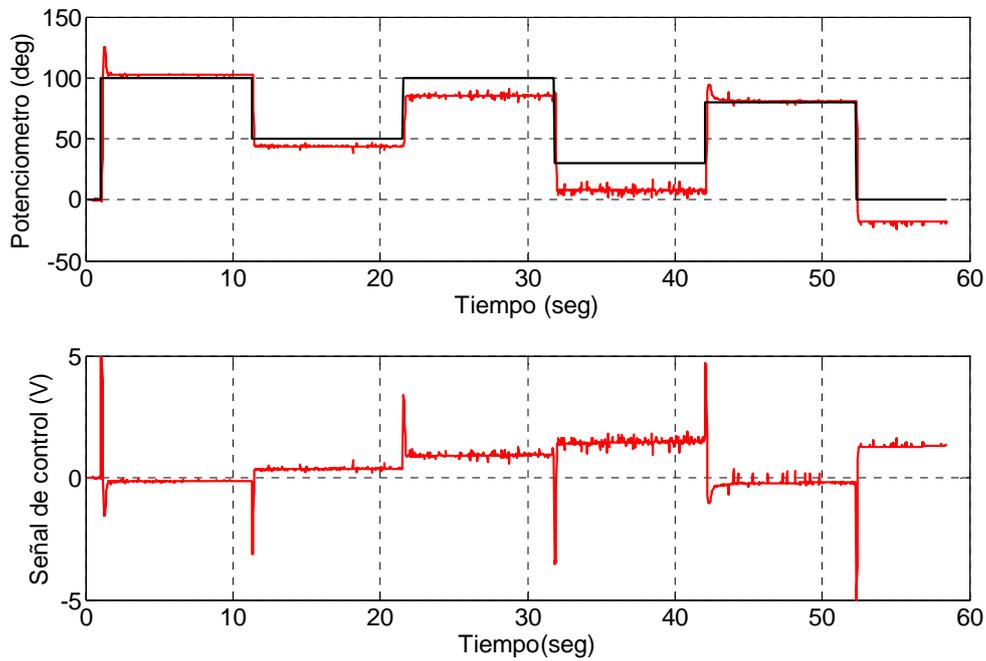


Fig.-6.11

- Ahora, de nuevo, se prueban los parámetros obtenidos por Ziegler-Nichols con un valor de controlador $P=0.0037$ pero en el parámetro integral se usa $I=0.001$ para evitar el windup, se puede ver el resultado en la figura 6.12:

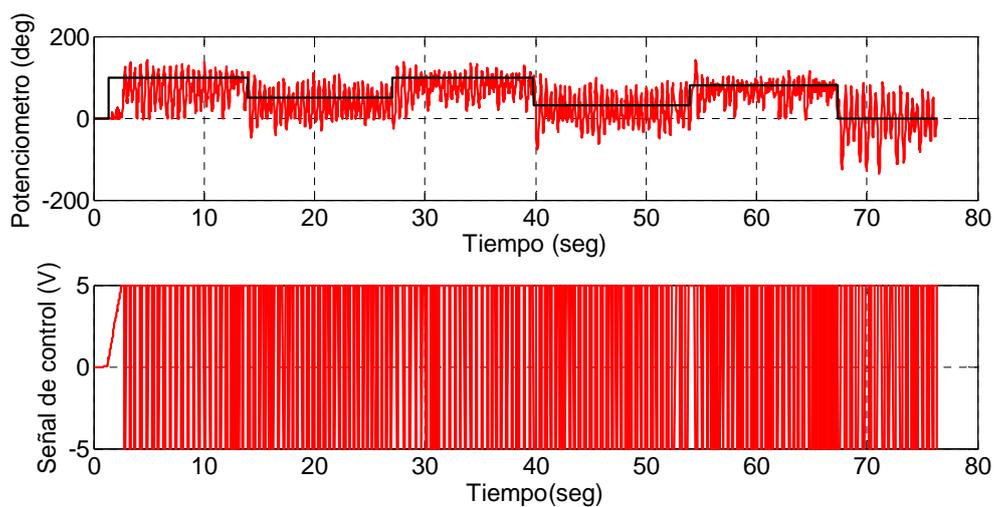


Fig.-6.12

La saturación observada es muy alta.

6.3.-Muelle 3.

Control con SMA.-

- Se repite los mismos pasos que en apartados anteriores y se usan los datos obtenidos manualmente en las simulaciones para usarlos en la maqueta real, se intentan varios resultados para dar de nuevo con el mejor control posible obteniéndose un controlador PI con parámetros $P=0.8$ e $I=0.001$ para la figura 6.13.

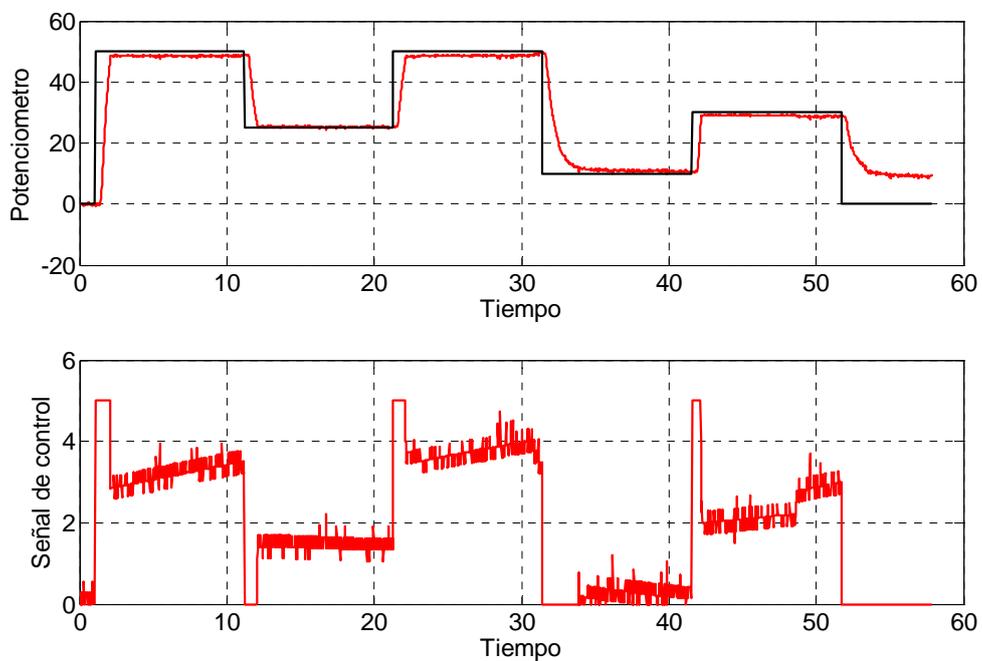


Fig.-6.13

- Se prueba para obtener un mejor resultado y se obtiene un controlador PI con $P=1$ e $I=0.005$, que se puede observar en la figura 6.14.

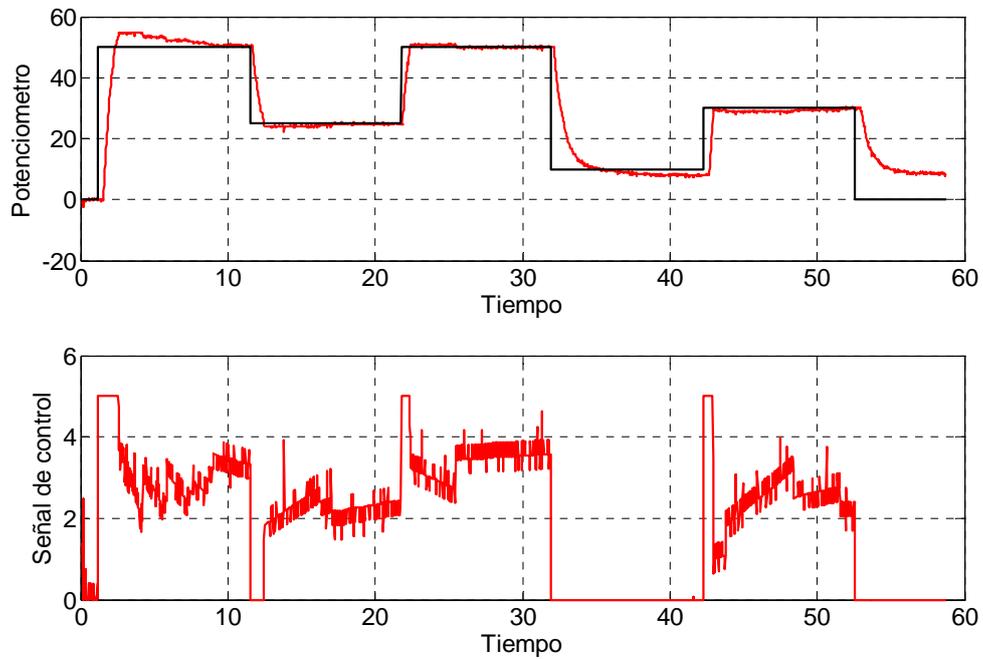


Fig.-6.14

- Se sigue probando obteniéndose otro controlador para $P=1$ e $I=0.001$ en la figura 6.15.

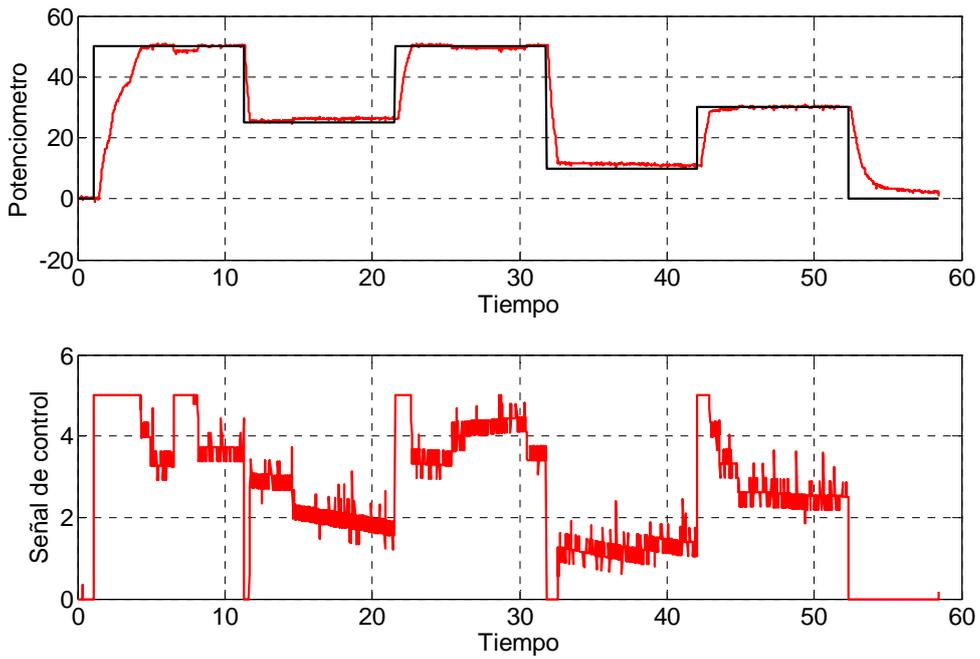


Fig.-6.15

- Ahora usando los parámetros de Ziegler-Nichols, para $P=0.011$ aunque disminuyendo la parte integral debido al "windup" hasta el valor de $I=0.001$ se obtienen la figura 6.16.

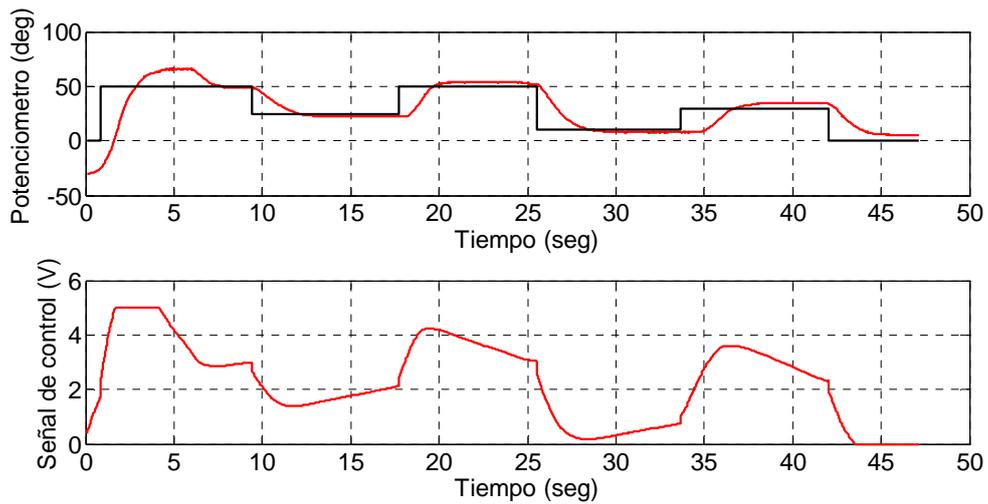


Fig.-6.16

Control con Motor DC.-

- Usando los datos que se habían obtenido en las simulaciones de manera manual se obtiene ahora para un PI con $P=0.1$ e $I=0.0008$ la gráfica de la figura 6.17.

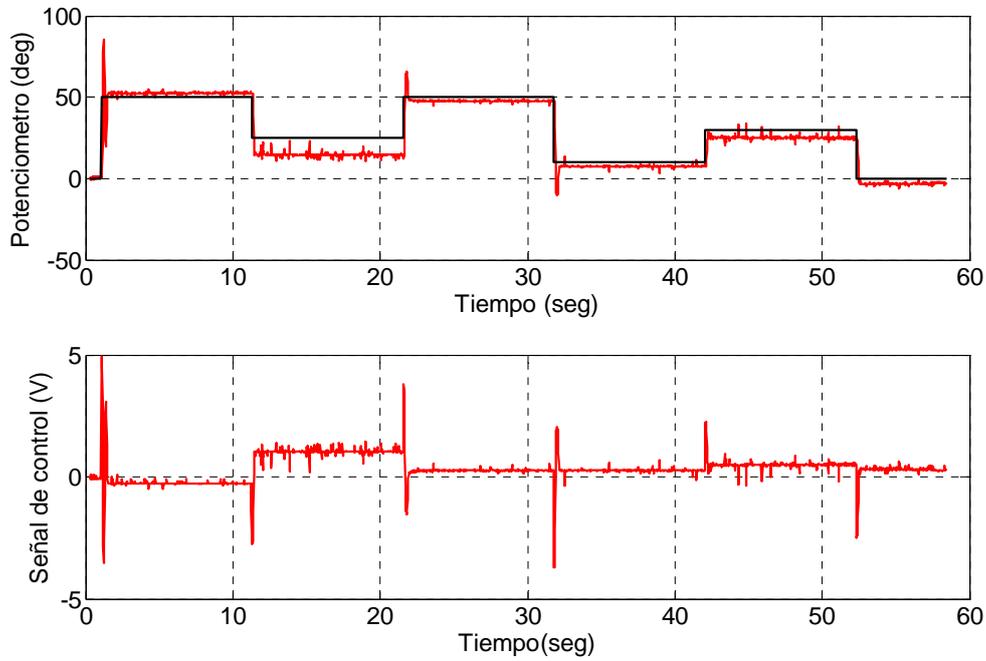


Fig.-6.17

Se observa cierto sobrepico y un error permanente constante en todos los saltos de referencia.

- Ahora se tiene otro PI manual con $P=0.1$ e $I=0.008$ que aparece en la figura 6.18.

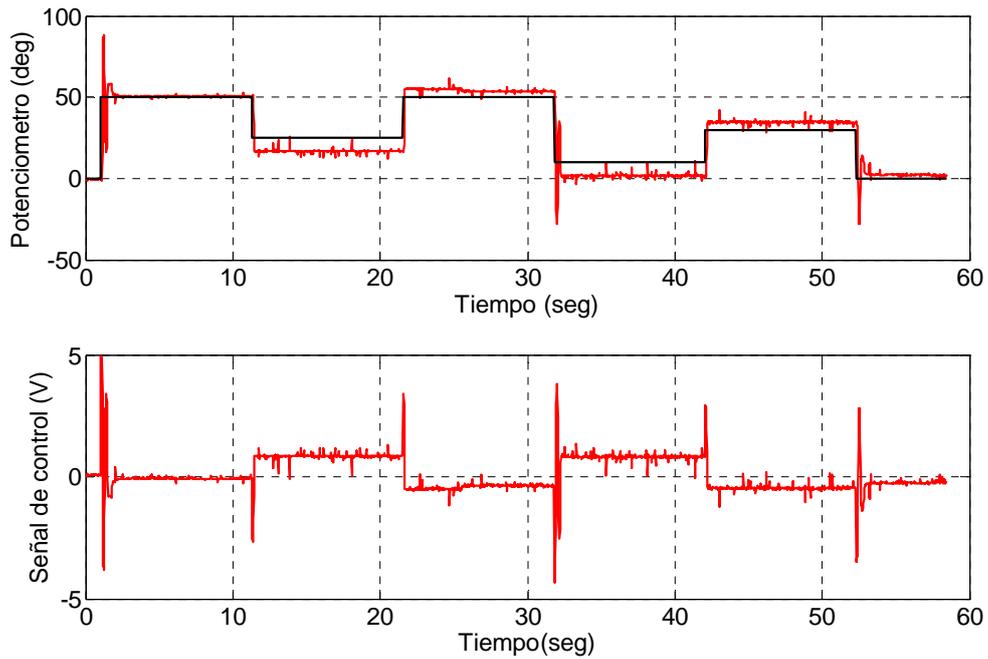


Fig.-6.18

Se sigue observando un error permanente.

- Ahora se vuelve a repetir el experimento en la maqueta real pero usando los valores que da el método de Ziegler-Nichols. Para esto se ha seguido la idea anterior de colocar un valor muy pequeño del parámetro integral debido al “windup” por lo que se coloca una $I=0.0001$ con un valor proporcional de $P=0.0037$ que se pueden observar en la figura 6.19.

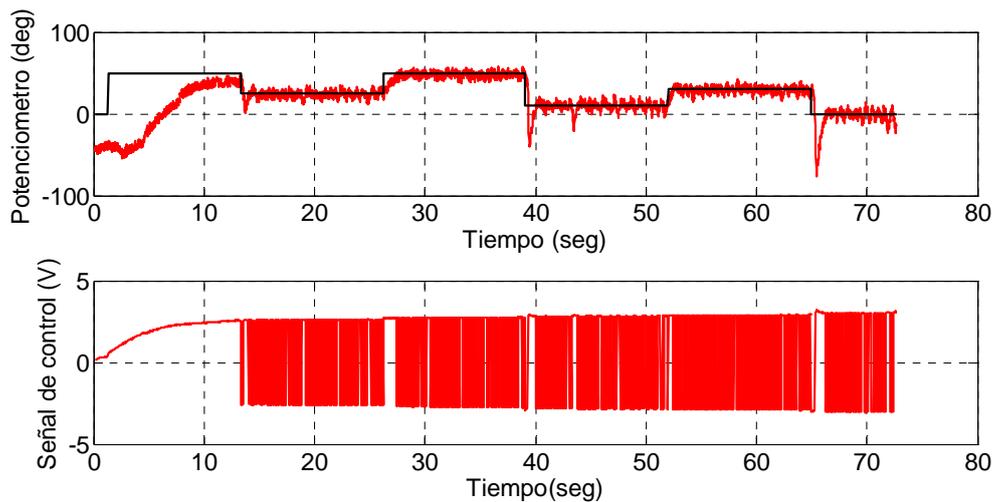


Fig.-6.19

6.4-Comparativas finales.

Ahora, se han representado los mejores resultados obtenidos en todos los experimentos realizados en el capítulo anterior 5.2 para el SMA y el motor DC. Se conseguirá así, realizar la comparativa final entre SMA y motor DC en los distintos sistemas formados con los muelles usados.

6.4.1.-Resultados finales SMA vs motor DC para el muelle1.

A continuación y como resultado final, se ha representado una gráfica en la figura 6.20 de los mejores resultados obtenidos en los experimentos conjuntos del SMA y del motor DC:

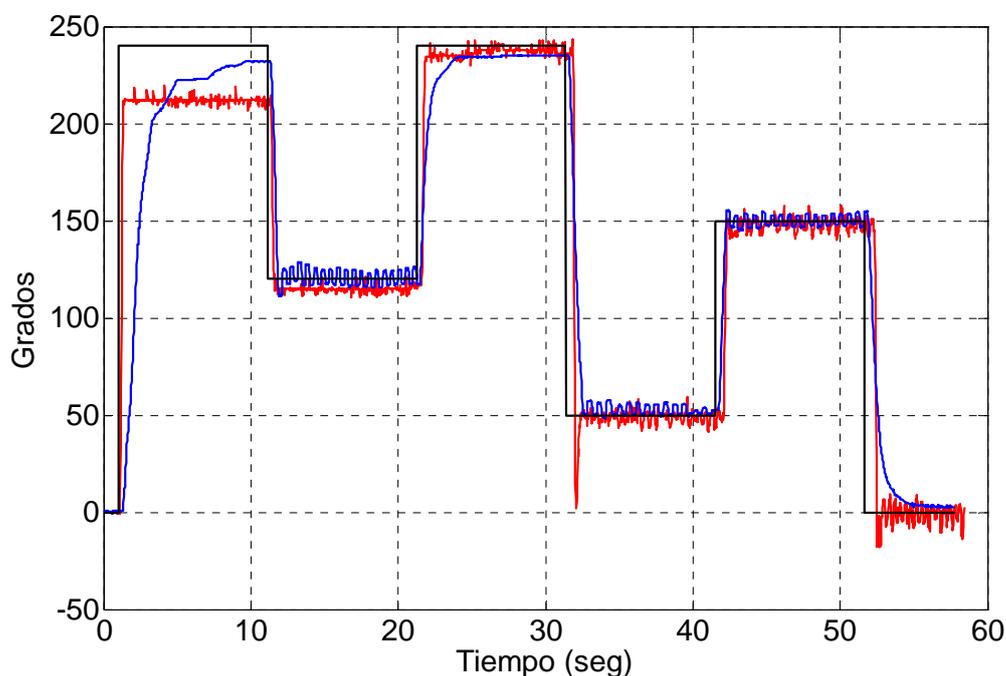


Fig.-6.20

Se puede ver en rojo la señal del motor DC, en azul la señal del SMA y en negro la señal de referencia de los experimentos. Como se puede observar, existe un error permanente tanto para el motor DC, como para el SMA en los dos saltos más grandes, pero sobre todo en el primer salto. Se aprecia que el motor DC es más rápido que el cable y que tiene cierto sobrepico cuando controla en los escalones de bajada. Hay que recordar que el modelo de motor DC sirve cuando este tira en oposición al muelle, es decir, cuando describe escalones hacia arriba, mientras que cuando lo hace en sentido contrario, el modelo no es válido. Para el SMA, también es destacable decir que cuando controla en los escalones hacia abajo, no depende de él, ya que el SMA solo tira en contra del muelle, pero cuando se relaja y pasa a su fase de martensita, depende del muelle y de la fuerza que haga este para estirar el SMA.

6.4.2.-Resultados finales SMA vs motor DC para el muelle2.

A continuación y como resultado final, se ha representado una gráfica de los mejores experimentos conjuntos del SMA y del motor DC:

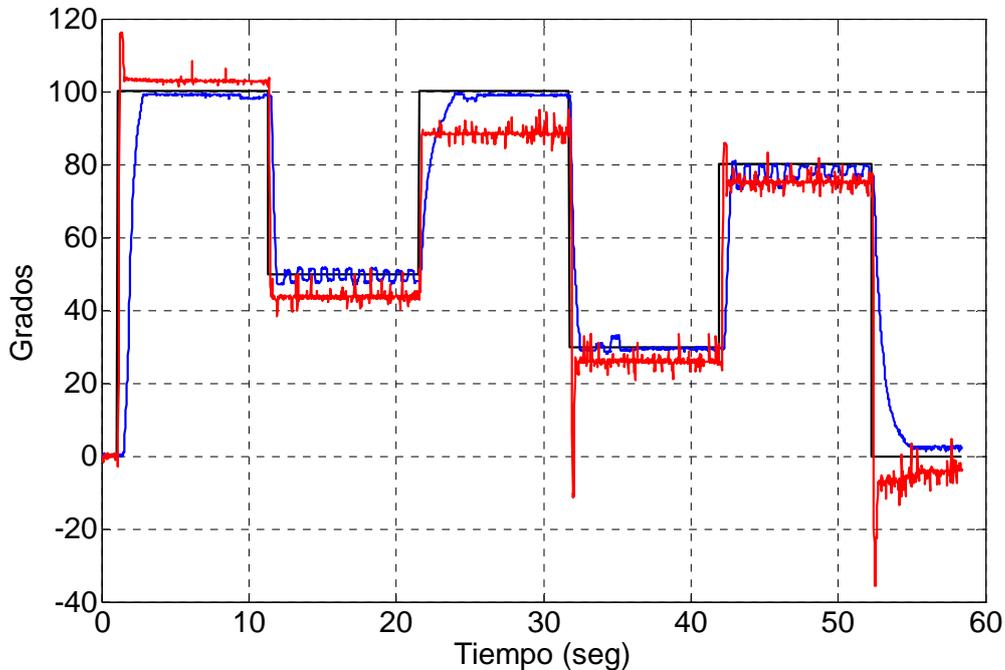


Fig.-6.21

Se puede ver en rojo la señal del motor DC, en azul la señal del SMA y en negro la señal de referencia de los experimentos. En este experimento, se aprecia como el motor DC presenta mucho más error permanente que el SMA, ya que el motor DC presenta este tipo de error en todas las referencias mientras que el SMA no. El motor DC sigue demostrando más velocidad aunque como ya se ha mencionado a cambio de error permanente. Se tiene que indicar que el introducir o aumentar la parte integral para eliminar este error permanente produce una inestabilización del sistema debido a que el modelo para el motor DC solo funciona cuando tira de los muelles. El motor DC también presenta varios sobrepicos, los más grandes cuando gira en sentido favorable al muelle, justo cuando el modelo no es válido como se ha explicado anteriormente [véase capítulo 6.1.1 en el apartado del motor DC].

6.4.3.-Resultados finales SMA vs motor DC para el muelle3.

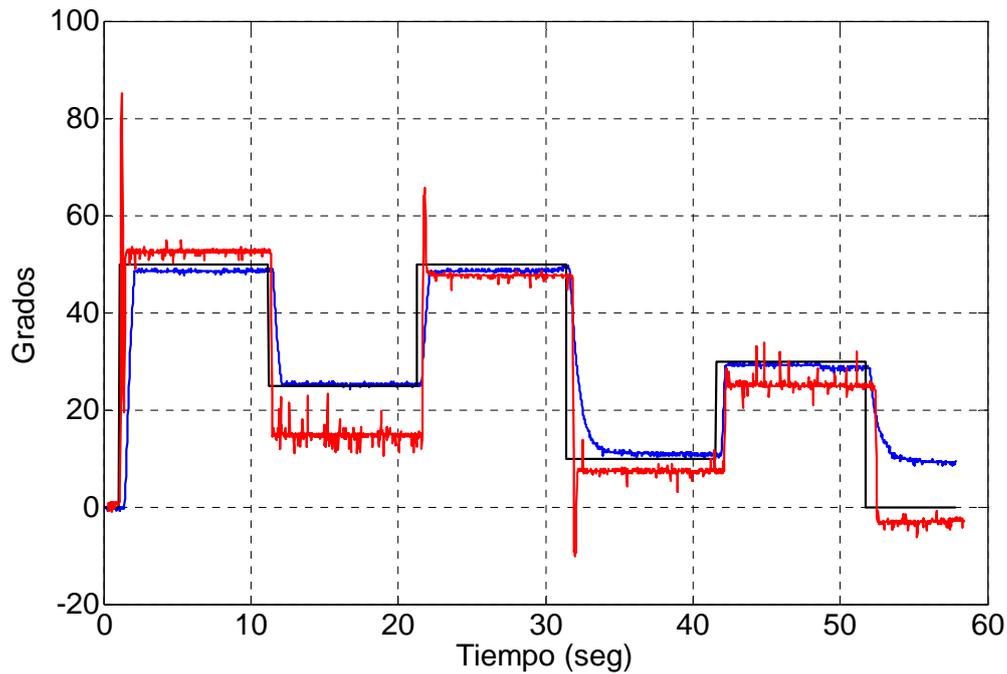


Fig.-6.3

Se puede ver en rojo la señal del motor DC, en azul la señal del SMA y en negro la señal de referencia de los experimentos. En la figura 6.3 se vuelve a apreciar error estacionario en el motor DC, sin embargo, esta vez este error tiene especial incidencia en los escalones de bajada, es decir, cuando gira en sentido favorable al muelle. El SMA en cambio hace un control bastante bueno, exceptuando en las dos últimas bajadas cuando depende del muelle, aquí, o no consigue controlar, o si lo hace es con mucho retraso, como se puede ver en la cuarta señal de referencia.

Capítulo 7. Conclusiones y trabajos futuros.

Se detallan a continuación las conclusiones de los trabajos realizados en este proyecto fin de carrera, así, como las ideas de trabajo futuro para realizar con la plataforma.

7.1.-Conclusiones finales.

Repasando todo lo que se ha hecho hasta ahora, se pueden resaltar los siguientes puntos:

1. Se ha realizado un análisis inicial sobre las características de los materiales SMA. En este análisis se ha podido ver su composición, ventajas y desventajas, capacidades de trabajo y uso. Con este estudio, se ha visto el gran potencial de futuro que tienen estos materiales.
2. Se ha experimentado con los SMA, construyendo varias plataformas de pruebas. Con esto se ha podido comprobar el alcance y las limitaciones en el control de posición de los SMA usados como actuadores. Se han llevado a cabo muchos experimentos poniendo a prueba a los SMA con diferentes señales de control. Las señales PWM han sido las más adecuadas para realizar el control de los SMA. Los diferentes prototipos han permitido llegar a un buen diseño final de plataforma con bastantes mejoras con respecto a los primeros que han permitido realizar de forma más precisa y más sencilla los diferentes experimentos con los SMA.
3. Gracias a los experimentos con varios dispositivos de adquisición de datos, así como al uso de varios circuitos electrónicos diseñados para los SMA, se han podido extraer las siguientes conclusiones.
 - Usando las tarjetas de adquisición, se ha podido comprobar como la tarjeta Arduino con un precio muchísimo menor que la de la casa Data Translation, ha presentado unas prestaciones más que suficiente para realizar todas las

pruebas con los SMA, ha dado más facilidad de programación, capacidad de integración en el prototipo definitivo, además de tener los puertos PWM necesarios, capacidad que hizo definitivamente decantarse por la tarjeta Arduino.

- Se ha podido comprobar que los circuitos construidos mediante transistores son necesarios para los SMA que demanden gran potencia, sin embargo para los SMA de menor diámetro (100 y 150 μm), son circuitos demasiado complejos, ya que con un operacional que aporte las necesidades eléctricas es más que suficiente y simplifica mucho la circuitería.
 - Después de haber realizado pruebas con los SMA, se ha comprobado como los cales SMA con menor diámetro, consumen muy poca energía, mientras que los muelles SMA con un diámetro de 0.8 milímetros pueden llegar a consumir hasta varios amperios de corriente eléctrica.
4. Se ha decidido usar SMA pequeños en la plataforma, ya que como se ha comprobado comparándolos con los muelles SMA, los cables se enfrían mucho antes, por lo que para usarlos como actuadores serán mucho mejores, ya que pasar de la fase de austenita a la de martensita les será mucho más fácil a los cables SMA que al muelle SMA, que necesita mucho más tiempo para enfriarse.
 5. En los prototipos y más concretamente en el prototipo final, se ha instalado un juego de engranajes, para así multiplicar el factor de movimiento del cable y obtener más precisión en las medidas. Después de haber realizado los experimentos, se puede analizar, que esta idea ha funcionado perfectamente ya que como se ha podido comprobar, en los experimentos hay una gran variedad de movimiento en los cables, viéndose desde más de 200 grados para el muelle 1, hasta unos 60 grados en el muelle 3. El éxito de este sistema, hace que la plataforma sea válida para seguir realizando experimentos con ella.
 6. De la comparación para un control de posición usando SMA frente a un motor DC, se pueden extraer varias conclusiones:
 - Se comprueba que el motor DC es más rápido que el SMA, sin embargo el SMA presenta una buena capacidad de control, muchas veces, simplemente usando un control proporcional.
 - Aunque el motor DC tiene mucho más margen de movimiento, si se compara moviéndose en el mismo rango que el SMA, el motor DC tiene mucho más error permanente, en torno a un 40% más. El SMA presenta a veces cierto error permanente, pero si se le introduce un valor integral muy alto, la señal de control se satura y aparece el efecto windup.

Finalmente, se extrae la conclusión de que globalmente se han obtenido buenos resultados y se han cumplido los objetivos planteados en este proyecto. Estos se han

conseguido experimentado con los SMA y construyendo una plataforma de pruebas para seguir desarrollando en un futuro la investigación y la experimentación con los SMA como actuadores.

7.2.-Trabajos futuros.

Como trabajos futuros, se ha pensado en:

- Desarrollar otra comparación de actuador SMA con otro tipo de motor. La comparación se haría esta vez entre un cable SMA controlando la posición del potenciómetro por un lado, y por otro habría un motor de husillo que haría exactamente el mismo trabajo que el cable, ya que se sujetaría del mismo modo que el SMA a la pletina, es decir, mediante un hilo. El husillo tiraría de este hilo haciendo el esfuerzo en la misma dirección que el cable SMA y enfrentándose al muelle de la misma manera.
- Aparte de este futuro trabajo pensado para la plataforma de pruebas, se tiene también en mente realizar un control de la elongación del cable mediante una realimentación con sensores de temperatura. Se implantaría algún tipo de sensor de temperatura en la plataforma para intentar establecer un lazo de control realimentado por temperatura. Este tipo de sensor ya se estuvo buscando para usarlo, pero debido a que el actuador SMA es tan fino como un pelo humano, se hace bastante difícil situar un sensor térmico que recoja la temperatura del SMA.
- Otra idea de futuro, sería implantar otro sensor, pero esta vez de corriente. Sería algo muy parecido a lo planteado anteriormente. La idea sería establecer una relación entre la temperatura que tiene el SMA y la corriente que le está pasando en ése momento, controlando la elongación del SMA al igual que antes, pero esta vez con una realimentación con un sensor de corriente. A partir de aquí se podrían ver muchas más ideas de trabajos para el futuro, sobre todo después desarrollar las que ya se han pensado, ya que si se consiguiesen realimentar el sistema con sensores de corriente o temperatura, permitirían una reducción del hardware necesario en muchas posibles aplicaciones futuras.

BIBLIOGRAFÍA

Bibliografía

1.-Referencias.

[1] "Fast, Accurate, Force and Position Control of Shape Memory Allow Actuators" Yee Harn. The Australian national University, 2008.

[2] "Estudio e implementación de actuadores basados en aleaciones SMA" Andrés Cano Sánchez, octubre 2010, Universidad Carlos III de Madrid.

[3] "Muscle Wires project book" Roger G. Gilbertson.

[4] "PID controllers: Theory, Design and Tuning" K. ASTROM and H. HAGGLUND.

2.-Sitios web.

[5] http://www.dynalloy.com/?gclid=Cl_8ruPVoq4CF5MLtAodCy9RSQ

[6] <http://arduino.cc/es/Main/Software>

[7] http://www.datatranslation.com/products/dataacquisition/software/matlab_data_acquisition.asp

[8] <http://www.smaterial.com/SMA/sma.html>

[9] <http://www.mathworks.es/academia/arduino-software/arduino-matlab.html>

[10] <http://www.rs-online.com/es>

ANEXOS

Anexos.

Anexo 1.-Protocolo de actuación.

A continuación se describen todos los pasos a seguir para la conexión y uso de la plataforma de pruebas:

1. El primer paso será conectar el arduino al PC que se vaya a usar. Para poder realizar la conexión, será necesario haber instalado antes los drivers. Si no se tienen los drivers instalados, todos los pasos a seguir se encuentran en el capítulo 4.1.
2. Una vez instalados los drivers, se conectará el cable USB al PC teniendo cuidado de que el interruptor se encuentra en la posición de apagado (hacia la izquierda). Después de esto arrancaremos el programa Matlab en nuestro PC.
3. Con el Matlab ya arrancado, el cable USB conectado y el interruptor en posición de apagado, se introducirán en la ventana de Matlab las órdenes para poner todas las salidas que tiene Arduino a la plataforma a cero. Estas órdenes se encuentran en la cabecera de los programas que hemos usado y que se encuentran en el anexo 4.
4. Una vez que se hayan introducido estas órdenes, se podrá poner el interruptor en la posición de encendido y ejecutar el programa que queramos en la plataforma de pruebas.

Dependiendo de si queremos usar la plataforma para hacer pruebas con el SMA o con el motor DC deberemos de seguir unas pautas u otras.

Para el caso del motor DC:

1. Después de haber seguido los pasos de conexión anteriores, ahora se deberá de fijar el engranaje grande al eje. Para ello y haciendo uso de una llave hexagonal se apretará el pequeño tornillo de fijación que hará que el engranaje quede seguro y fijado al eje. Como en este caso no se usará el SMA, lo más seguro es que lo retiremos para en caso de inestabilidad del motor DC el SMA no quede enganchado.
2. Para hacer las pruebas con seguridad, situaremos el engranaje grande de manera que el muelle esté tenso, es decir, que en el mismo momento que el engranaje comience a girar el muelle ya esté oponiéndose al giro del engranaje.

Para el caso del SMA:

1. En el caso del SMA, después de haber seguido los pasos de conexión, se preparará el muelle sujeto a la pletina por el hilo y enganchado al tornillo. El tornillo de fijación permanecerá suelto cuando se use el SMA.
2. Después, con el SMA sujeto a la pletina por uno de sus extremos, se estirará de este hasta dejar el sistema en equilibrio con el muelle ligeramente tenso, en este momento, se sujetará la otra punta del SMA al tornillo tensor y se anclará este a la plataforma.
3. Una vez que se tenga la plataforma en este estado, se podrán realizar los experimentos oportunos. Se recomienda que durante estos procesos el interruptor permanezca apagado (hacia la izquierda).

Anexo 2.-Solución de problemas.

Durante la realización de experimentos o pruebas con la plataforma se pueden presentar una serie de problemas. En este anexo, se darán las soluciones a los problemas que han ido apareciendo durante las pruebas realizadas con la plataforma y que pueden volver a aparecer:

1. **Masas o tierras:** Uno de los problemas típicos que han aparecido durante la construcción y prueba de la plataforma ha sido el relacionado con las “masas” o “tierras”. Este problema se ha presentado siempre cuando se han realizado pruebas con los SMA. Si en algún momento, cuando se vaya a realizar algún experimento con los SMA aparece el problema de que por uno de los extremos del SMA salta una chispa o se rompe por donde engancha al tensor o a la pletina, será síntoma inequívoco de que existe una derivación. Otras veces se puede tener el problema de una masa y que esta no se presente de forma visual. En estos casos se podrá percibir su existencia, cuando al intentar accionar el SMA no se obtenga ninguna respuesta. Se comprobará que se trata de una masa poniendo el dedo encima del integrado que controla al SMA (el L272) y comprobando que este integrado se calienta mucho. En todos estos casos la solución será comprobar todas las conexiones para encontrar donde se encuentra la derivación, poniendo especial atención al tensor del SMA y al enganche de este con la pletina.
2. **Motor DC:** Otro problema que puede ocurrir es que mientras se realicen pruebas con el motor DC, este no responda. El problema en este caso puede ser tanto del circuito que controla al motor DC como simplemente que la batería se ha quedado sin potencia suficiente para alimentarlo. Si este problema apareciese, se puede repasar el estado del circuito de control y medir la batería. Si el problema es por falta de batería habrá que cargar esta.
3. **Matlab:** Otro problema, puede aparecer mientras se está ejecutando algún programa desde el Matlab. Puede darse el caso de que en mientras esto ocurre, haya algún problema con el Matlab y se pierda la conexión con la tarjeta Arduino. Si este es el caso, se deberá inmediatamente apagar la plataforma con el interruptor y reiniciar Matlab, ya que si esto ocurre, Arduino puede quedarse con sus salidas a nivel alto y producir daños en el motor DC o en el SMA.
4. **Conexión Matlab-Arduino:** Otro problema también muy frecuente, se da cuando al arrancar Matlab y conectarlo con el Arduino, este no deje realizar la conexión y aparezca un mensaje diciendo que falta un archivo. Este problema se ha presentado cada vez que hemos conectado la plataforma a PC's distintos. La solución será simplemente volver a instalar el archivo “adiosrv” desde el

entorno de Arduino como ya se ha explicado anteriormente [véase capítulo 3.6.1].

5. **Ajuste de los muelles:** Se debe prestar atención a la instalación de los muelles [véase anexo 1]. Si los muelles no se colocan correctamente pueden aparecer problemas a la hora de realizar los experimentos. Para que esto no ocurra, se deberán de colocar los muelles de manera que queden ligeramente tensos, para que en el primer instante de ejecución de las pruebas tanto del SMA como del motor DC, se note la fuerza de acción de los muelles contra el movimiento.
6. **Carga batería:** Puede que la batería se quede sin suficiente carga para realizar las pruebas. Esto se notará sobre todo cuando se realicen pruebas con el motor DC. Para solucionar este problema habrá que cargar la batería. La batería deberá cargarse con una tensión de 14.7 a 15 voltios y se limitará la corriente a un máximo de 360mA. La carga de la batería se puede prolongar hasta 3 horas. Cuando se cargue la batería, si esta se realiza con la fuente de alimentación del laboratorio, la tensión caerá primero y poco a poco comenzará a aumentar hasta que se iguale a la tensión que se le haya dado de carga. Entonces la batería estará cargada.
7. **Fuente de alimentación:** Si se quiere realizar pruebas con la plataforma usando una fuente de alimentación de laboratorio, lo primero que habrá que hacer es apagar el interruptor de la plataforma. Después se conectará el polo positivo de la fuente al cable rojo que se conecta a la batería, de igual manera se conectará el polo negativo de la fuente al cable negro que se conecta a la batería.
8. **Ajuste potenciómetro:** En la realización de las pruebas con la plataforma, se ha usado un programa para leer el valor del potenciómetro [véase anexo 4 página 141] y saber en qué parte de su escala se encuentra, debido a que habrá que tener en cuenta el valor de salida del potenciómetro para realizar las pruebas.
 - A) Cuando se realicen pruebas tanto con el SMA como con el motor DC, habrá que situar el potenciómetro en un extremo de su escala, de manera que cuando se realicen las pruebas, el potenciómetro vaya de una punta de su escala a la otra y no realice ningún paso por cero. Esto es debido a que es un potenciómetro multivuelta y si durante las pruebas se le hace pasar por uno de los extremos de su escala, el experimento no saldrá bien y no se podrá realizar el control. Además de que si se está usando el potenciómetro, la plataforma puede resultar dañada. Debido a esto, se tendrá que situar el potenciómetro en un extremo de su escala para que no aparezca este problema.
 - B) Para evitar el problema del apartado A, se ha modificado una parte del programa dedicado a realizar las pruebas de control del motor DC. Esta modificación, evita que cuando se estén haciendo las pruebas de control del motor DC, el programa no se “piense” que está en el

extremo opuesto de la escala. Este problema ocurre sobre todo con el motor DC, debido a que este se mueve en las dos direcciones y puede pasarse la escala del potenciómetro tanto por un extremo como por el otro.

9. **Cables SMA:** Cuando se esté realizando pruebas con los SMA y ocurra algún problema como los que se han comentado antes referentes a alguna conexión a tierra, o se note en algún momento que los cables ya no se acortan igual que antes, podría darse el caso de que el SMA hubiese llegado al fin de su vida útil o de su máximo de ciclos de trabajo. Si se notase alguno de estos síntomas, habría que cambiar el SMA. Si después de cambiarlo se siguiesen notando estos problemas, habría que seguir buscando otra posibilidad (véase el punto 1), pero si se solucionase el problema, habría que tirar el SMA usado y dejar el nuevo.

Anexo 3.-Código de los programas utilizados.

1.-Programas de la tarjeta de adquisición Data Translation.

Con esta tarjeta se escribieron varios programas debido a que se tuvo problemas para controlar el tiempo de cada ciclo de trabajo por retrasos producidos entre la conexión de Matlab con la tarjeta.

El primero de los programas que escribimos fue el siguiente:

- Esta primera función llamaba a otra mediante la instrucción “set(ao,'StartFcn',@callback_G1)”:

```
ao=analogoutput('dtol',0);
ch=addchannel(ao,0);
set(ao,'SampleRate',100)
set(ao,'TriggerType','Manual')
ai = analoginput('dtol',0);
Pot = addchannel(ai,0);
set(ai,'SampleRate',50)
set(ai,'SamplesPerTrigger',700)
set(ai,'TriggerType','Manual')
cero=0;
set(ao,'StartFcn',@callback_G1)
start(ai)
trigger(ai)
putdata(ao,cero)
start(ao)
stop(ao)
[datai,time] = getdata(ai);
% stop(ao)
stop(ai)
delete(ai)
clear ai
data=[5*ones(1,50) zeros(1,200) 5*ones(1,50) zeros(1,400)];
plotyy(time,datai,time,data)
%hold on
%plot(time,data/3,'r');
disp('Terminadito')
delete(ao)
clear ao
```

- La siguiente función “callback” a la que se llama es esta:

```
function callback_G1(obj,event, ao)
ao=analogoutput('dtol',0);
```

```
ch=addchannel(ao,0);
set(ao,'SampleRate',100)
set(ao,'TriggerType','Manual')
data=[5*ones(1,500) zeros(1,2000) 5*ones(1,500) zeros(1,2000)];
cero=0;
tic
for i=1:5000
putsample(ao,data(i))
end
toc
putsample(ao,cero)
clearao
```

A) El segundo programa y el que usamos finalmente para poder controlar el tiempo en la tarjeta fue el siguiente:

- Función “prueba”

```
function prueba()
globalTs;
globaltiemposimu;
inicio;
t=timer('TimerFcn',@callback_PRU,'StopFcn',@callback_stop,'TasksToExecute',tiemposimu,'ExecutionMode','fixedRate','Period',Ts);
tic;
start(t);
```

- Función “inicio”

```
clearall;
global salida;
global contador;
global tiempo;
globalTs;
globaltiemposimu;
globalao;
globalai;
global ch;
globalpot;
global u1;
% global u2;
ao=analogoutput('dtol',0);
ai = analoginput('dtol',0);
ch=addchannel(ao,0);
pot = addchannel(ai,0);
contador=0;
Ts=0.01;%Realmente el Ts es otro aprox 0.017;
tiemposimu=4500;
```

```
tiempo=[];
salida=0;
u1=[3*ones(1,100) zeros(1,600) 3*ones(1,15) zeros(1,185) zeros(1,600)
3*ones(1,100) zeros(1,600) 3*ones(1,17) zeros(1,183) zeros(1,600)
3*ones(1,100) zeros(1,600) 3*ones(1,19) zeros(1,181) zeros(1,600)];
```

- Función “callback_PRU”

```
function callback_PRU(~,~)

global salida;
global contador;
global tiempo;

global ao;
global ai;
global u1;

sal=getsample(ai);

salida=[salida;sal];

contador=contador+1;

putsample(ao,u1(contador))

tiempo=[tiempo toc];
```

- Función “callback_stop”

```
function callback_stop(~, ~, ~)
global u1;

global salida;
global tiempo;
subplot(2,1,1),plot(salida);
xlabel('Muestras(Ts=0.01)'),ylabel('TensionPotenciometro');

subplot(2,1,2),plot(tiempo,u1(1:length(tiempo)));
xlabel('Muestras(Ts=0.01)'),ylabel('Tension Entrada');
holdon

disp('Tiempo de muestreo medio:');
mean(tiempo(2:length(tiempo))-tiempo(1:length(tiempo)-1))
toc
```

- Función “finaliza” (esta función finalmente no se usaba)

```
function finaliza(ai, ao)

stop(ai);
stop(ao);
delete(ai);
delete(ao);
```

2).-Programa de la tarjeta de adquisición Arduino.

Estos son los programas que se han usado para la realización de los experimentos con el SMA y el muelle.

- Programa para enviar un escalón de 0 a 5 voltios al SMA.

```
global Tiempo;
global Salida;
global Control;
Tiempo=[];
Salida=[];
Control=[];
tic;
for i=1:400
    Tiempo=[Tiempo toc];
    if(Tiempo(end)) > 1
        Control=[Control 255];
    else
        Control=[Control 0];
    end
    av=-(a.analogRead(5));
    Salida=[Salida av];
    a.analogWrite(11,Control(end));
end
a.analogWrite(11,0);
plot(Tiempo,Salida,'g','Linewidth',2),hold on;
% subplot(2,1,1),plot(tiempo,ref(1:length(tiempo)))
xlabel('Tiempo (seg.)'); ylabel('Potenciometro')
```

- Programa realizado para enviar un escalón de 0 a 3.5 voltios al motor DC.

```
% CONFIGURACION INICIAL
% a=arduino('COM5')
% a.pinMode(3,'output')
% a.pinMode(4,'output')
% a.analogWrite(3,0)
% a.digitalWrite(4,0)
global Tiempo;
global Salida;
```

```

global Control;
eacum=0;
f=0;
contador=0;
eant=0;
Tiempo=[];
Salida=[];
Control=[];
tic;
a.digitalWrite(4,0);
ref=[0*ones(1,20) 175*ones(1,200)];
for i=1:200
av=-(a.analogRead(5));
Salida=[Salida av];
if av<-300
control=ref(i);
else
control=0;
end
a.analogWrite(5,control);
Tiempo=[Tiempo toc];
Control=[Control 5*control/255];
end
subplot(2,1,1),plot(Tiempo,Salida,'r','Linewidth',2),hold on;
subplot(2,1,1),plot(Tiempo,ref(1:length(Tiempo)))
xlabel('Tiempo'); ylabel('Potenciometro')
subplot(2,1,2),plot(Tiempo,Control,'-', 'Linewidth',2)
xlabel('Tiempo(seg.)'); ylabel('Señal de control')
a.analogWrite(5,0);

```

- Programa para realizar las pruebas de control con el SMA.

```

% connecttheboard
%Hay que ejecutar esta línea antes de encender la fuente
%a=arduino('COM5');
%a.pinMode(3,'output');
%a.analogWrite(3,0);
global tiempo;
global salida;
global control;
%a.pinMode(4,'input');
%a.pinMode(5,'output');
eacum=0;
eant=0;
tiempo=[];
salida=[];
control=[];
ref=[zeros(50,1);240*ones(500,1);120*ones(500,1);240*ones(500,1);zeros(500,1);90*ones(50
0,1);zeros(300,1)];
tic;

```

```

av0=a.analogRead(5);
for i=1:2850
av=-(a.analogRead(5)-av0)/2.84;
salida=[salida av];
%Control proporcional
e=(ref(i)-av);
% if e<=0;
% e=0;
% end
p=0.1*e;
% Control integral
eacum=eacum+e;
in=eacum*0.0005;
u=p+in;
% Control derivativo
% d=(e-eant)*0.01;
% u=p+d+in;
% u=p;
Control=round(u*255/5);
if Control>=255
    Control=255;
elseif Control<=0
    Control=0;
end
% av=ref(i);
a.analogWrite(11,Control);
tiempo=[tiempo toc];
control=[control Control*5/255];
% eant=e;
end
subplot(2,1,1),plot(tiempo,salida,'r','Linewidth',2),hold on;
subplot(2,1,1),plot(tiempo,ref(1:length(tiempo)))
xlabel('Tiempo'); ylabel('Potenciometro')
subplot(2,1,2),plot(tiempo,control,'-','Linewidth',2)
xlabel('Tiempo'); ylabel('Señal de control')
a.analogWrite(11,0);

```

- Programa para realizar las pruebas de control con el motor DC. La ejecución de este programa está preparada para que se ejecute por tiempo y que así coincidan los resultados con los de control de los SMA.

```

global Tiempo;
global Salida;
global control;
ref=0;
referencia=[];
error1=[];
error2=[];
sc=[];

```

```

eacum=0;
eant=0;
vueltas=0;
Tiempo=[];
Salida=[];
control=[];
tic;
%ref=[zeros(50,1);240*ones(500,1);120*ones(500,1);240*ones(500,1);50*ones(500,1);150*ones(500,1);zeros(300,1)];
%ref=[zeros(50,1);100*ones(500,1);50*ones(500,1);100*ones(500,1);30*ones(500,1);80*ones(500,1);zeros(300,1)];
%ref=[zeros(50,1);50*ones(500,1);25*ones(500,1);50*ones(500,1);10*ones(500,1);30*ones(500,1);zeros(300,1)];
av0=a.analogRead(3);
while toc<=58.425
    if (toc>=1.0250)&&(toc<11.275)
        ref=240;
    elseif (toc>=11.275)&&(toc<21.525)
        ref=120;
    elseif (toc>=21.525)&&(toc<31.775)
        ref=240;
    elseif (toc>=31.775)&&(toc<42.025)
        ref=50;
    elseif (toc>=42.025)&&(toc<52.275)
        ref=150;
    elseif toc>=52.275
        ref=0;
    end
    av=-(a.analogRead(3)-av0)/2.84;
    e=(ref-av)
    if abs(e-eant)>250
        av=av-360;
        e=(ref-av);
        disp('me paso1')
        vueltas=1;
    elseif (abs(e-eant)>250)&& (vueltas==1)
        av=av;
        e=(ref-av);
        disp('me paso3')
        vueltas=0;
    end
    %
    Salida=[Salida av];
    eacum=eacum+e;
    in=eacum*1.2;
    % d=(e-eant)*0.03;
    error1=[error1 eacum];
    if e<0
        a.digitalWrite(4,1);
        e=-e;
        disp('error negativo')

```

```

else
a.digitalWrite(4,0);
end
p=0.025*e;
% Control integral
% u=p+in;
% Control derivativo
% u=p+d+in;
u=p;
sc=[sc u];
Control=round(u*255/5);
if Control>=255
Control=255;
elseif Control<=0
Control=0;
end
e=(ref-av);
error2=[error2 e];
eant=e;
if e<0
control=[control -Control*5/255];
disp('control negativo')
else
control=[control Control*5/255];
end
a.analogWrite(3,Control);
Tiempo=[Tiempo toc];
referencia=[referencia ref];
end
subplot(2,1,1),plot(Tiempo,Salida,'r','Linewidth',2),hold on;
subplot(2,1,1),plot(Tiempo,referencia(1:length(Tiempo)))
xlabel('Tiempo (seg)'); ylabel('Potenciómetro (deg)')
subplot(2,1,2),plot(Tiempo,control,'-', 'Linewidth',2)
xlabel('Tiempo(seg)'); ylabel('Señal de control (V)')
a.analogWrite(3,0);

```

- Programa para leer el valor del potenciómetro:

```

global salida;
global tiempo;
tiempo=[];
salida=[];
tic;
for i=1:200
av=a.analogRead(5);
salida=[salida av];
tiempo=[tiempo toc];
end
plot(tiempo,salida,'-', 'Linewidth',2),hold on;
a.analogWrite(3,0);

```

Anexo 4.-Hoja de características de los componentes.

A continuación se dispondrán las hojas de datos o “data sheet”, de todos los componentes utilizados en el proyecto.

- Integrado 7805
- Integrado LM18200
- Integrado L272
- Potenciómetro
- Arduino
- Data translation
- SMA (flexinol) y muelle
- Integrado UA741