



UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE BAJA CALIFORNIA

FACULTAD DE INGENIERÍA

PROGRAMA EDUCATIVO INGENIERO EN MECATRÓNICA

**Diseño, Implementación y Control de un Actuador Lineal Basado
en Resortes de nitinol**

TESIS

Que, para cubrir parcialmente los requisitos necesarios para
obtener el título de Ingeniero en Mecatrónica, presenta:

Gerardo Alonso Villaescusa Mata

Asesor: Dr. David Isaías Rosas Almeida

Mexicali, B.C, a mayo de 2023

Dedicatoria

Dedico este trabajo a Silvia Mata Rizo, mi tía, esa persona llena de luz y amor, que siempre fue partícipe de mis metas y triunfos pero que hoy en día no me acompaña más en mi camino, aunque siempre permanecerá conmigo cada día, en cada logro más de mi vida.

Agradecimientos

A Mi Madre Leonor y Hermana Sophia, que han sido mis más grandes pilares en esta vida, su amor y motivación, fueron y son imprescindibles para cada meta por cumplir.

A Reyes y Belinda mis padrinos, gracias por su gran apoyo incondicional y enseñanzas que me han dado en la vida.

A Eusebio mi tío, que ha sido mi más grande maestro en mi vida profesional y ha tenido esa virtud para enseñarme todo lo que sabe.

A mi familia y amigos de los que siempre recibí su cariño y apoyo incondicional.

A todos mis maestros que fueron parte de mi desarrollo profesional.

A mi tutor y asesor Dr. David por la confianza y creer en mi para brindarme la oportunidad de poder llevar un proyecto de esta magnitud.

A mi Universidad y Facultad por abrirme las puertas de sus instalaciones y darme la dicha de convertirme en profesionista.

Contenido

Introducción	1
Capítulo 1. Antecedentes	4
1.1 Aleaciones con memoria de forma	4
1.2. Encoder incremental	8
1.3. Termistores	9
1.4. Aplicación de PWM y puentes H en etapas de potencia.....	11
1.5. Celdas de Peltier	15
1.6. Controlador Proporcional Integral Derivativo (PID).....	16
Capítulo 2. Diseño del prototipo	20
2.1 Descripción de la primera propuesta del mecanismo	20
2.2 Descripción de la segunda propuesta del mecanismo	26
Capítulo 3. Dispositivos y sistemas electrónicos	32
3.1 Sensores para medición de posición y su correspondiente circuito de acondicionamiento de señales	32
3.2 Sensores para medición de temperatura y su correspondiente circuito de acoplamiento. 34	
3.3 Etapa de potencia	37
3.4 Hardware para adquisición de datos e implementación de algoritmos de control.....	39
3.5 Celdas de Petri	43
Capítulo 4. Pruebas básicas de operación	44
4.1. Prueba de la etapa de potencia	44
4.2 Prueba de sensores de temperatura y se etapa de acondicionamiento	45
4.2. Prueba de sensor de posición y de su etapa de acondicionamiento.....	51
4.4. Descripción de una plataforma basada en myRIO, DAQ y LabVIEW para la manipulación del actuador lineal	52
4.5. Caracterización de los resortes de nitinol	56
Capítulo 5. Implementación de un controlador PID.....	61
Capítulo 6. Conclusiones y trabajo futuro	69
Referencias	71

Lista de figuras

Figura 1.1 Gráfica de la histéresis del Nitinol,	5
Figura 1.2 Descripción la construcción básica de un decodificador rotativo con tecnología óptica.....	6
Figura 1.3 Diagrama de estructura de un encoder incremental.....	7
Figura 1.4 Simbología de los termistores.....	7
Figura 1.5 Gráfica típica de la relación temperatura – resistencia en termistores.....	8
Figura 1.6 Gráfica de una señal PWM.....	10
Figura 1.7 Diagrama de Puente H.....	11
Figura 1.8 Sentido de giro 1 del puente H.....	11
Figura 1.9 Sentido de giro 2 del puente H.....	12
Figura 1.10 Diagrama de estructura interna de una celda de Peltier.....	13
Figura 1.11 Esquema de un lazo de control con una entrada y una salida.....	14
Figura 2.1. Actuador lineal basado en resortes de Nitinol, segunda versión del diseño....	17
Figura 2.2 Placa base del SMA lineal.	18
Figura 2.3 Base para el riel del actuador lineal.....	18
Figura 2.4 Riel para balero lineal.....	19
Figura 2.5 Balero lineal del mecanismo, al mismo tiempo es la carga que desplaza el actuador.....	19
Figura 2.6 Estructura une los dos baleros lineales y otras piezas en el actuador lineal.....	20
Figura 2.7 Soporte de resorte de Nitinol Izquierdo sobre baleros lineales.....	20
Figura 2.8 Soporte de resorte de Nitinol derecho sobre baleros lineales.....	20
Figura 2.9 Transmisión para sensor de posición sobre baleros lineales.....	21
Figura 2.10 Soporte de sensor sobre riel.....	22
Figura 2.11 Adaptaciones para la sujeción de los resortes de nitinol.....	22
Figura 2.12 Estructura de celda de Peltier utilizada en el SMA lineal.....	23
Figura 2.13 Ensamble de la primera versión del actuador lineal basado en resortes de Nitinol.....	24

Figura 2.14 Segundo Riel para baleros lineales.....	24
Figura 2.15 Segundo Diseño de balero lineal para la modificación del SMA.....	25
Figura 2.16 Diseño de soportes de resortes L R y transmisión para sensor de posición.....	25
Figura 2.17 Diseño del Sensor de posición LPD3806.....	26
Figura 2.18 Diseño de base para sensor de posición LPD3806.....	26
Figura 2.19 Diseño de polea para sensor de posición LPD3806.....	27
Figura 2.20 Diseño de mecánico de la lectura de posición.....	27
Figura 2.21 Ensamble de la segunda versión del actuador lineal basado en resortes de Nitinol.....	28
Figura 3.1 Diagrama de conexiones en tarjeta de acondicionamiento de señal.....	30
Figura 3.2 Diagrama Para acondicionamiento de señal para censado de temperatura.....	33
Figura 3.3 Diseño de Tarjeta PCB acondicionamiento de señal para dos termistores.....	33
Figura 3.4 Descripción de entradas y salidas de diseño en PCB de Acondicionamiento de señal.....	34
Figura 3.5 Diagrama a bloques de conexión de etapa de potencia.....	36
Figura 3.6 MyRIO.....	38
Figura 3.7 Entradas/Salidas, Software/Hardware de la tarjeta myRIO.....	39
Figura 3.8 Entradas/Salidas de los puertos A y B tipo MXP.....	40
Figura 3.9 Entradas/Salidas del puerto C tipo MSP.....	40
Figura 3.10 Diagrama de conexión de celdas de Petri.....	41
Figura 4.1 Diagrama de conexiones del controlador de la etapa de potencia para los resortes de Nitinol.....	43
Figura 4.2 Control para etapa de potencia en LabVIEW.....	43
Figura 4.3 Diagrama de conexiones de amplificador de instrumentación.....	44
Figura 4.4 Programa propuesto en [12] para la interpretación del amplificador de instrumentación.....	44
Figura 4.5. Comportamiento de la temperatura en el resorte izquierdo $T_{iz}(t)$; a) $u(t) = 0.3V$, b) $u(t) = 0.35V$, c) $u(t) = 0.4V$	45
Figura 4.6. Comportamiento de la temperatura en el resorte izquierdo $T_{iz}(t)$; a) $u(t) = 0.45V$, b) $u(t) = 0.5V$, c) $u(t) = 0.55V$	45
Figura 4.7. Comportamiento de la temperatura en el resorte derecho $T_{der}(t)$; a) $u(t) = 0.3V$, b) $u(t) = 0.35V$, c) $u(t) = 0.4V$	46

Figura 4.8. Comportamiento de la temperatura en el resorte derecho $T_{der}(t)$; a) $u(t) = 0.45V$, b) $u(t) = 0.5V$, c) $u(t) = 0.55V$	46
Figura 4.9. Diagrama de conexiones del sensor de posición y etapa de acondicionamiento.....	50
Figura 4.10 Diagrama de bloques de VI RT.....	53
Figura 4.11 Panel Frontal de VI PC.....	54
Figura 4.12 Diagrama de bloques de VI PC.....	54
Figura 4.13 Esquema de maqueta del experimento para investigar el comportamiento de la constante k con respecto a cambios en la temperatura.....	56
Figura 4.14. Resultados de la medición de la constante k del resorte de Nitinol con una masa de 0.178 Kg. a) primer experimento, b) segundo experimento.....	57
Figura 4.15. Resultados de la medición de la constante k del resorte de Nitinol con una masa de 0.3169 Kg.....	58
Figura 5.1. Diagrama a bloques del sistema en lazo cerrado.....	59
Figura 5.2. Señal de referencia, línea negra, y salida del actuador lineal, línea roja, con un controlador P donde $k_p = 1$, para resolver el problema de regulación.....	60
Figura 5.3. Comportamiento de las señales de control total y la que se aplica en cada resorte del actuador lineal con un controlador proporcional donde $k_p = 1$	60
Figura 5.4. Comportamiento de la temperatura en cada resorte del actuador lineal con un controlador proporcional donde $k_p = 1$	61
Figura 5.5. Señal de referencia y comportamiento de la salida del actuador lineal con un controlador proporcional donde $k_p = 4$, $k_i = 0.3$	61
Figura 5.6. Comportamiento de las señales de control total y la que se aplica en cada resorte del actuador lineal con un controlador proporcional donde $k_p = 4$, $k_i = 0.3$	62
Figura 5.7. Comportamiento de la temperatura en cada resorte del actuador lineal con un controlador proporcional donde $k_p = 4$, $k_i = 0.3$	62
Figura 5.8. Señal de referencia y comportamiento de la salida del actuador lineal con un controlador proporcional donde $k_p = 4$	63
Figura 5.9. Comportamiento de las señales de control total y la que se aplica en cada resorte del actuador lineal con un controlador proporcional donde $k_p = 4$	64

Figura 5.10. Comportamiento de la temperatura en cada resorte del actuador lineal con un controlador proporcional donde $k_p = 4$	64
Figura 5.11. Señal de referencia y comportamiento de la salida del actuador lineal con un controlador proporcional- integral donde $k_p = 4, k_i = 0.3$	65
Figura 5.12. Comportamiento de las señales de control total y la que se aplica en cada resorte del actuador lineal con un controlador proporcional donde $k_p = 4, k_i = 0.3$	65
Figura 5.13. Comportamiento de la temperatura en cada resorte del actuador lineal con un controlador proporcional donde $k_p = 4, k_i = 0.3$	66

Introducción

Un actuador es un elemento de un sistema de control el cual es responsable de transformar la salida de un controlador, o dispositivo en donde se ejecuta un algoritmo de control, a una acción que modifica el comportamiento de una máquina o dispositivo [1]. Por ejemplo, es un dispositivo que convierte la señal eléctrica de salida de un PLC a un movimiento rotacional o traslacional de un mecanismo. Otro ejemplo es un dispositivo que transforma la señal eléctrica de salida de una microcomputadora a una presión en un contenedor.

Dentro de la ingeniería mecatrónica existe una gran variedad de actuadores, los cuales dan vida a máquinas que conforman muchos procesos industriales automatizados. Los actuadores más comunes en estos procesos son los eléctricos, neumáticos, hidráulicos y térmicos. Actualmente, la mayoría de estos actuadores son activados por señales de naturaleza eléctrica, ya sea por voltajes o por corrientes.

Como en todas las áreas de la ingeniería, los fabricantes de estos dispositivos y los centros de investigación buscan su mejora constantemente; minimizar su peso, incrementar la fuerza que se genera y hacer más eficiente el consumo de energía son algunos de los tópicos de investigación más importantes.

Las aleaciones con memoria de forma, también conocidas como SMA por sus siglas en inglés, son materiales que, después de estar sujetos a una deformación, pueden recuperar su forma original al aplicar un proceso térmico [2]. Estos materiales fueron creados en la década de los 60 del siglo XX y desde entonces se han realizado investigaciones para entender su comportamiento dinámico y desarrollar diferentes aplicaciones como dispositivos médicos [3], [4], actuadores rotacionales, traslacionales y otras configuraciones no convencionales para las aplicaciones en robótica y biomimética [5], [6].

La dinámica de estos materiales es altamente no lineal, con parámetros variantes en el tiempo y con una característica de histéresis la cual depende de la tensión, deformación y la temperatura. También presenta una velocidad baja de respuesta en términos de

actuación. Algunas de las referencias más relevantes sobre el modelado de actuadores basados en SMA son [7] y [8]. Estas características no lineales implican un gran reto en el diseño de algoritmos de control que garanticen alta precisión posicionamiento y velocidad de respuesta aceptable. Dentro de las ventajas del material están su relación fuerza-peso, su operación silenciosa, así como la posibilidad de funcionar como actuador, estructura mecánica y sensor al mismo tiempo [9].

En este proyecto de tesis se presenta el diseño, implementación, pruebas de operación y control de un actuador lineal basado en resortes de nitinol. El objetivo de este actuador es ser un sistema que permita desarrollar investigaciones sobre el modelado, identificación de parámetros y desarrollo de algoritmos de control para diferentes objetivos, como regulación y seguimiento de trayectorias.

El prototipo de actuador lineal que se desarrolló satisface dicho objetivo, ya que permite el intercambio de los resortes de nitinol y la instalación de sensores para medir su temperatura con facilidad, su rango de movimiento es de 6 centímetros y cuenta con acondicionadores de señales de los sensores y una etapa de potencia que le permite ser manipulado por cualquier plataforma que tenga señales de entrada y salida analógicas. En este momento el actuador se controla a través de la tarjeta myRIO y el software LabVIEW, ambos de la empresa National Instruments.

Los resultados de la aplicación de controladores P y PI para resolver los problemas de control de regulación y seguimiento de trayectorias muestran que el actuador tiene una adecuada velocidad de respuesta mientras que todas las variables internas se mantienen dentro de límites para una operación segura.

La organización del documento es la siguiente, en el capítulo 1 se encuentran los antecedentes, integrados por un conjunto de conceptos básicos que son la base del trabajo realizado. En el capítulo 2 se presenta el diseño mecánico de todas las partes que forman el actuador lineal, incluyendo partes mecánicas, sensores y celdas de Peltier, todo desde una perspectiva mecánica.

En el capítulo 3 se describe la operación, desde el punto de vista electrónico, de los sensores, etapas de acondicionamiento de señal, la etapa de potencia y tarjetas de adquisición de datos. En el capítulo 4 se describen las pruebas básicas, así como los programas en LabVIEW que permitieron realizarlas. Aquí se presentan dos caracterizaciones de los resortes de nitinol, la primera es un modelo dinámico que relaciona el voltaje que se aplica a la etapa de potencia y su temperatura, mientras que el segundo es la característica de histéresis que presenta la constante k de los resortes con respecto a la temperatura.

En el capítulo 5 se muestran los resultados experimentales de aplicar controladores P y PI al actuador para resolver los problemas de regulación y seguimiento de trayectorias. Finalmente, en el capítulo 6 se presentan las conclusiones globales del trabajo y problemas que se pueden abordar en el futuro.

Capítulo 1. Antecedentes

En este capítulo se describen los principales conceptos que se utilizan en el diseño y la operación del actuador lineal basado en resortes de nitinol. Se abordan conceptos relacionados con las aleaciones con memoria de forma, los principios de operación de los sensores que se utilizan en el prototipo, los cuales son encoders incrementales y termistores. También se aborda el principio de operación de la modulación por ancho de pulsos (PWM) y de circuitos de potencia conocidos como puentes H, dichos conceptos son utilizados en la etapa de potencia.

En la búsqueda de dar mayor velocidad de actuación se han integrado celdas de Peltier al prototipo, por lo que se aborda el principio de operación de estos dispositivos.

Finalmente, se describe la operación del controlador proporcional integral derivativo (PID), el cual se utiliza en las pruebas finales de operación del sistema en lazo cerrado.

1.1 Aleaciones con memoria de forma

El efecto de memoria de forma, conocido como SME por sus siglas en inglés (*Shape Memory Effect*) hace referencia a la capacidad de un material de regresar a su forma original, después de haber sufrido una deformación, esto ocurre a bajas temperaturas donde su estructura cristalina está en su fase martensita, estos materiales permanecen en deformación, hasta recibir un calentamiento, con lo cual estos metales podrán regresar a su forma original al alcanzar su fase de austenita [16]. Algunos de los materiales en donde se presenta este fenómeno son aleaciones binarias, a las cuales se les conoce como aleaciones con memoria de forma, también conocidas como SMA por sus siglas en inglés (*Shape Memory Alloys*). Estos materiales son una alternativa liviana con respecto a los actuadores convencionales como sistemas hidráulicos, neumáticos y motores eléctricos y actualmente tienen aplicaciones en diferentes áreas como la robótica, la industria automotriz, el sector aeroespacial y la industria biomédica.

Las dos aleaciones de memoria de forma más relevantes son de cobre-aluminio-níquel y níquel-titanio. También se pueden crear aleaciones a base de zinc, cobre, oro y hierro. Aunque las aleaciones a base de hierro y cobre son más económicas, la aleación de NiTi, también conocida como nitinol, es la más utilizada debido a su estabilidad, practicidad y su rendimiento termo-mecánico.

Acerca del descubrimiento de las aleaciones de memoria de forma se conoce que, en la década de 1930, según Otsuka y Wayman [14], Arne Ölander descubrió el comportamiento pseudoelástico de la aleación de Au-Cd en 1932, mientras que en el año de 1938 Greninger y Mooradian observaron la presencia del fenómeno de memoria de forma en una aleación de Cu-Zn. Kurdjumov y Khandros en 1949 y Chang y Read en 1951 publicaron sus observaciones acerca del fenómeno del efecto de memoria gobernando por el comportamiento termo-elástico de la fase martensita en algunas aleaciones; aquí entendemos que el nitinol no fue la primera aleación que presentó el efecto de memoria de forma.

El nitinol fue descubierto por William J. Buehler, quien era un metalúrgico del laboratorio de Artillería Naval trabajando en un proyecto para Polaris [14]. Dentro de sus investigaciones Buehler buscaba una aleación que conformara dos sólidos en un solo material y examinando un libro titulado "*Constitution of binary alloys*", encontró el NiTi en una de esas aleaciones y creó unos lingotes de esta aleación. Al dejar caer uno frío, él esperaba escuchar el sonido de un metal al caer al piso como un anillo, sin embargo, escuchó un sonido seco, que lo describe como un sonido "seco", similar a un saco de harina en la tierra. Preocupado, analizando que no se formó de manera adecuada la aleación decide soltar un segundo lingote aun sin enfriar y escucha ese ruido como de un anillo cayendo al suelo; posteriormente dejó enfriar un segundo lingote y ocurre lo mismo que el primero caso, obteniendo un sonido seco como un saco de harina cayendo en la tierra. De esta forma Buehler pudo observar que su material contaba con dos estados y nombró a esta aleación como nitinol por **Nickel-Titanium Naval Ordnance Laboratories**. Todo esto ocurrió en 1959 pero no fue hasta 1961 que se dio a conocer en una reunión en el laboratorio en donde se descubrió [14].

¿Qué causa el efecto de memoria de forma? Desde el momento que el SME fue visto por primera vez se ha tratado de responder esta pregunta. En los materiales tradicionales hay dos tipos de deformación, elástica y plástica, la deformación elástica se refiere a la deformación que puede ser eliminada totalmente, o casi totalmente, cuando la fuerza es removida del material, en este caso se considera que el material se comporta como un resorte. La ley que define la deformación elástica se conoce como ley de Hooke [14].

$$F = kx \quad (1.1)$$

donde la F es la fuerza que genera el material al sufrir la deformación, k es la constante del resorte y x es la distancia que el resorte fue deformado.

El segundo tipo de deformación, la deformación plástica se refiere a la deformación fija del material, es decir, cuando la fuerza es removida el material no recupera su forma original [14].

Los materiales con memoria de forma pueden sufrir una deformación plástica, pero al someterse al calentamiento éstos elásticamente regresan a su forma original, fue bastante confuso explicar que una aparente deformación permanente se recupera por un simple calentamiento (Específicamente a temperaturas menores a 100°C). Claramente, a nivel atómico, la deformación en memoria de forma es diferente a la deformación elástica [14].

El Dr. Frederick Wang determinó que el efecto de memoria de forma se debe al fenómeno llamado transformación martensítica, que se presenta cuando un material cambia sus estructuras cristalinas, llamadas austenita y martensita. El estado de austenita se presenta a altas temperaturas y aquí la estructura cristalina posee un estado bastante fuerte, por lo que el material tiene una gran resistencia a la deformación. La martensita se presenta a bajas temperaturas, y aquí la estructura cristalina es menos fuerte, lo que permite la deformación del material.

Este proceso de transición entre su estado de martensita a austenita y su regreso a martensita es fuertemente no lineal, donde un fenómeno de histéresis es el preponderante. Suponga que el material se encuentra en su estado de martensita y la temperatura se incrementa. El material inicia su transición a su estado de austenita en la temperatura A_s

(Austenite start), si la temperatura sigue incrementando se alcanzará la temperatura A_f (Austenite finish) en donde el material se encuentra completamente en estado de austenita. Si la temperatura disminuye, el estado de austenita permanecerá hasta alcanzar la temperatura M_s (Martensite start), aquí la estructura cristalina inicia su transición al estado de martensita, logrando la transición completa hasta alcanzar la temperatura M_f (Martensite finish), este proceso se ilustra en la Figura 1.1 y se le conoce como histéresis [14].

La definición del fenómeno de histéresis por el diccionario “The Collins Englis” establece que es “un retraso en una variable de salida de un sistema con respecto al efecto producido por una variable de entrada”. [30] En el nitinol, la variable de entrada es la temperatura, esto significa que hay una temperatura que se debe superar para inducir térmicamente a la transformación martensítica, lo que produce la histéresis es que el nitinol permanece en su estado de austenita después de que la temperatura ha descendido por debajo de la temperatura de transición.

Sin embargo, cuando el nitinol es sometido a un estrés, la temperatura de transición se eleva, y si esta es lo suficientemente grande, la temperatura puede aumentar provocando una transición martensítica inducida térmicamente. Cuando se elimina la tensión el nitinol permanece en su estado martensita deformado, y es necesario calentar el nitinol para que este recupere su forma original.

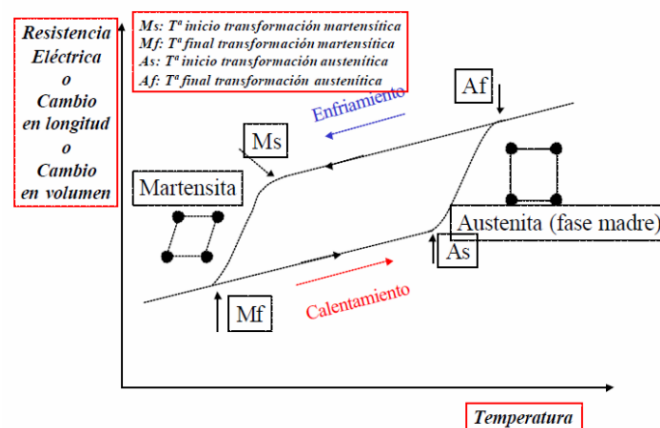


Figura 1.1 Gráfica de la histéresis del nitinol, Figura tomada de [24].

1.2. Encoder incremental

Los encoders incrementales son dispositivos electrónicos que permiten medir el movimiento angular o traslacional en un mecanismo. Sin embargo, debido a las características de las señales de salida, este sensor también puede utilizarse para medir velocidad y dirección de movimiento. Los encoders incrementales utilizan diferentes tipos de tecnologías, las principales son la óptica y la magnética. En la figura 1.2 se muestra la estructura interna general de un encoder rotativo que utiliza tecnología óptica.

Dentro del encoder rotativo hay un haz de luz emitido por un LED que pasa a través del disco codificado con líneas opacas. A medida que el eje del codificador gira el haz de luz se interrumpe por las líneas opacas, lo que produce un código o un tren de pulsos a la salida del encoder [15].



Figura 1.2 Descripción la construcción básica de un encoder rotativo con tecnología óptica (Figura recuperada de [15]).

Los encoders producen señales incrementales o absolutas. Las señales incrementales no indican la posición específica, solo que la posición ha cambiado. Los encoder absolutos utilizan una “palabra o código” diferente para cada posición.

En general, los encoders incrementales cuentan con tres salidas denominadas como A, B y Z, ver figura 1.3. La señal A es una señal en forma de pulsos que permite conocer la posición angular del encoder ya que se generan n pulsos por una vuelta completa; es decir, un encoder incremental tiene una resolución de $2\pi/n$ radianes. La señal B tiene las mismas

características que la señal A, pero tiene un desfase de 90 grados, lo que permite conocer el sentido de giro del encoder. Finalmente, la señal Z solo produce un pulso por cada vuelta y puede ser usada en diferentes aplicaciones.

Los encoders incrementales necesitan un sistema electrónico adicional para interpretar las señales de salida descritas previamente, este sistema debe de tener una respuesta adecuada para no perder ningún pulso generado, de lo contrario se generarán errores acumulables en las mediciones [22].

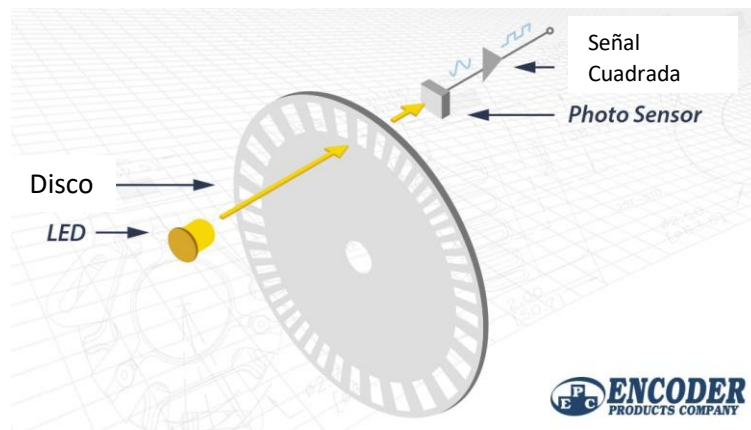


Figura 1.3 Diagrama de estructura de un encoder incremental (Figura tomada de [23]).

1.3. Termistores

Un termistor o resistor térmico es un tipo de resistor cuya resistencia cambia rápidamente con un pequeño cambio de temperatura, en otras palabras, es un resistor en el que el flujo de corriente cambia conforme aumenta o disminuye la temperatura siendo este un cambio considerable a poca temperatura.

El primer termistor en el cual se experimentó fue un termistor NTC descubierto por Michael Faraday en 1833. Faraday observó que la resistencia del sulfuro de plata disminuía rápidamente cómo la temperatura aumentaba. En la figura 1.5 se muestra la simbología internacional y americana de un termistor.



Figura 1.4 Simbología de los termistores.

Un termistor está conformado por dos o más polvos semiconductores de óxidos metálicos y un material aglutinante que se emplea para formar una pasta. Se depositan pequeñas gotas de esta pasta sobre los hilos de plomo y se someten a un proceso de secado en un horno de sintonización. Este proceso de secado consiste en un ciclo de calentamiento donde se expone la pieza a una temperatura por debajo del punto de fusión del metal base. Aquí la pasta se encoge sobre los hilos de plomo para hacer una conexión eléctrica. Posteriormente este óxido metálico se sella con un recubrimiento de vidrio, esto para darles una propiedad impermeable a los termistores, lo que contribuye a mejorar su estabilidad.

Hay termistores de diferentes tipos y tamaños, por ejemplo, los de forma de perla que abarcan de 0.15 mm a 1.5 mm de diámetro y los de disco o arandelas que pueden abarcar diámetros desde los 3 mm hasta los 25 mm. En el mercado se pueden encontrar termistores cuya resistencia nominal a 25 °C es de 1k Ω , 2k Ω , 10k Ω , 20k Ω , 100k Ω etc. La ventaja que tienen estos dispositivos es su pequeño tamaño, bajo costo y buena precisión.

El principal fundamento de un termistor es que su resistencia depende de su temperatura, si conocemos el comportamiento temperatura contra resistencia, entonces al medir la resistencia del termistor podemos obtener su temperatura, la resistencia varía con respecto al material utilizado en el termistor, sin embargo, esta relación es no lineal como se muestra en la figura 1.6, en donde se puede apreciar la gráfica típica de un termistor.

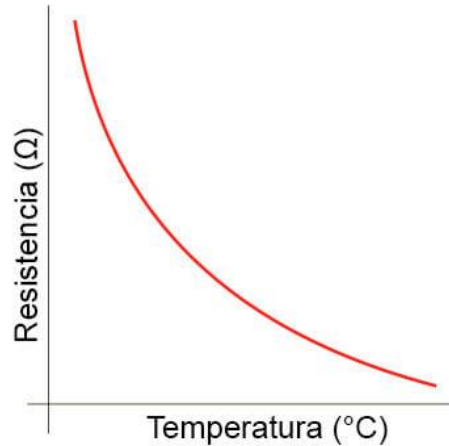


Figura 1.5 Gráfica típica de la relación temperatura – resistencia en termistores.

Se tienen dos tipos de termistores; los NTC (coeficiente de temperatura negativo) y los PTC (coeficiente de temperatura positivo). La resistencia en los termistores NTC disminuye con el aumento de temperatura, mientras que en los PTC la resistencia aumenta con el incremento de temperatura.

1.4. Aplicación de PWM y puentes H en etapas de potencia

El laboratorio de mecatrónica cuenta con etapas de potencia para motores de CD con brochas, las cuáles están basadas en modulación por ancho de pulsos (PWM) y puentes H. Estas etapas de potencia tienen la capacidad de suministrar hasta 10 A de corriente y recibir un voltaje de modulación de ± 10 V, para el control de velocidad y sentido de giro de 2 motores en forma independiente. Ya que los resortes son cargas resistivas y no tienen la función del motor, no se necesita el cambio del sentido de la corriente, por lo que no es necesario el uso de los puentes H. Estas etapas de potencia se usaron aplicando voltajes positivos en la señal moduladora.

En esta sección se abordan los principios básicos de la modulación por ancho de pulsos y los puentes H.

El PWM es una señal en forma de tren de pulsos con un periodo constante, la cual puede modificar su ciclo de trabajo, con base a la señal moduladora, desde un 0% a un 100% de su periodo. En la figura 1.7 se muestra una señal típica de PWM que se aplica a una carga, aquí A es la amplitud de voltaje, T es el periodo y t_1 es el tiempo que la señal permanece

en nivel alto en un período. El principio de operación de la etapa de potencia se basa en que el voltaje promedio que se aplica a la carga $\bar{V}$, que está dado por

$$\bar{V} = \frac{1}{T} \int_{T_0}^T V(t) dt \quad (1.2)$$

$$\bar{V} = \frac{1}{T} \int_0^{t_1} A dt$$

$$\frac{1}{T} A \Big|_0^{t_1}$$

$$\frac{1}{T} [A(t_1) - A(0)]$$

$$\bar{V} = \frac{t_1}{T} A$$

Por lo tanto, si $t_1 = 0$, el voltaje promedio $\bar{V} = 0$ y la carga no recibe corriente, pero si $t_1 = T$, $\bar{V} = A$, y la carga recibe la corriente máxima necesaria para operar. De esta forma al variar t_1 con respecto a una señal moduladora podemos controlar la temperatura en los resortes de nitinol.

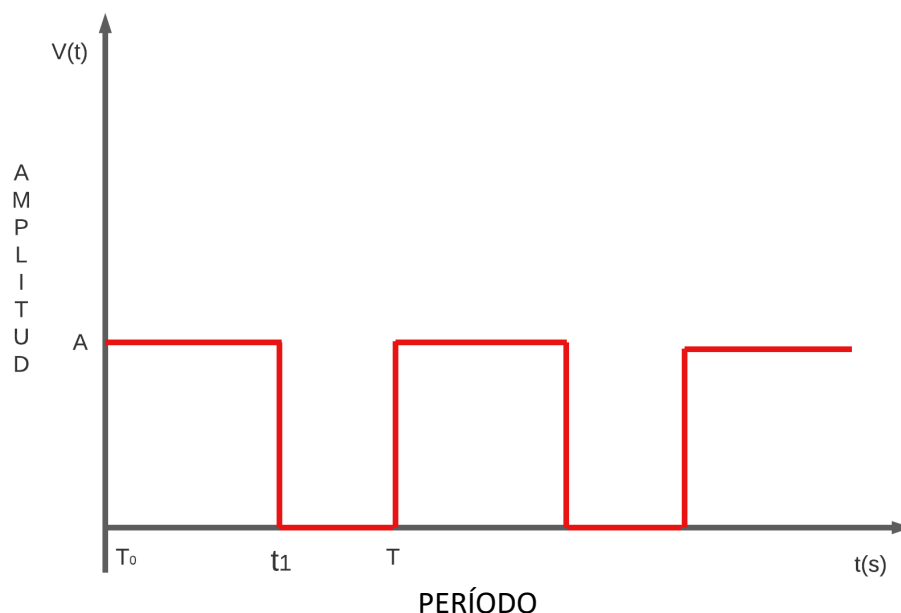


Figura 1.6 Gráfica de una señal PWM.

Por otro lado, los puentes H son una configuración de 4 interruptores los cuales se cierran de tal manera para poder dar paso a la corriente hacia un motor de DC, dependiendo de los interruptores activados se establece un sentido de la corriente a través de los motores, lo que permite el control del sentido de su rotación. Estos contactos pueden ser con componentes mecánicos o transistores, en la figura 1.8 se muestra un diagrama típico de un puente H, el cual al cerrar sus contactos S1 y S4 deja circular la corriente en una dirección dando un sentido de giro al motor como se muestra en la figura 1.9, y para cambiar el sentido de giro hay que accionar S2 y S3 cambiando la polarización del motor, como se muestra en la figura 1.10 es importante recalcar que solo una de las polarizaciones debe estar accionada al momento de trabajar con el puente H ya que puede generar un corto en la bobina del motor y dañarlo.

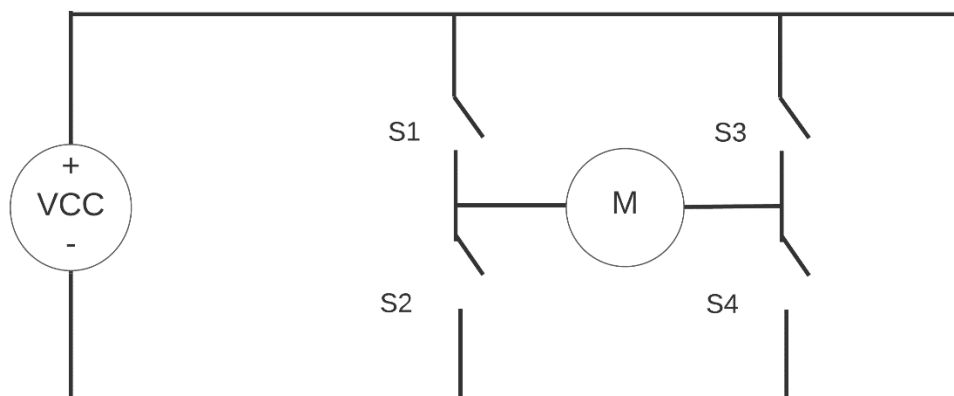


Figura 1.7 Diagrama de Puente H.

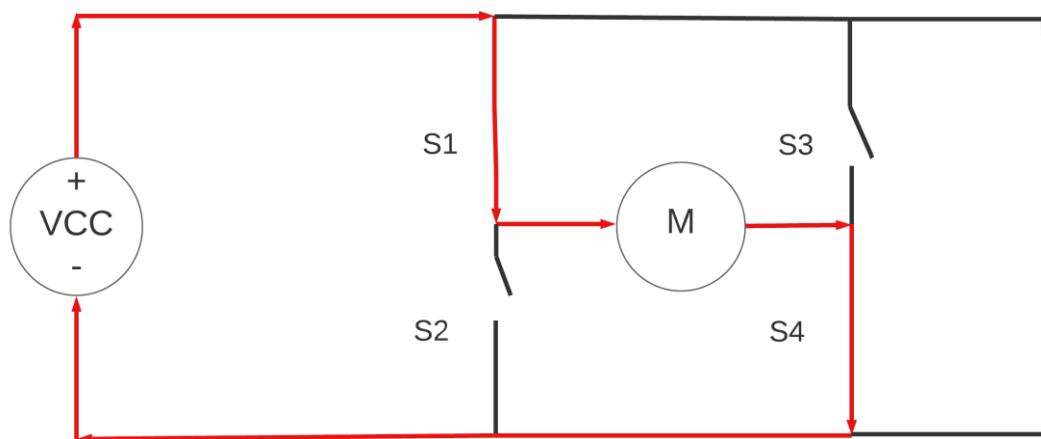


Figura 1.8 Sentido de giro 1 del puente H.

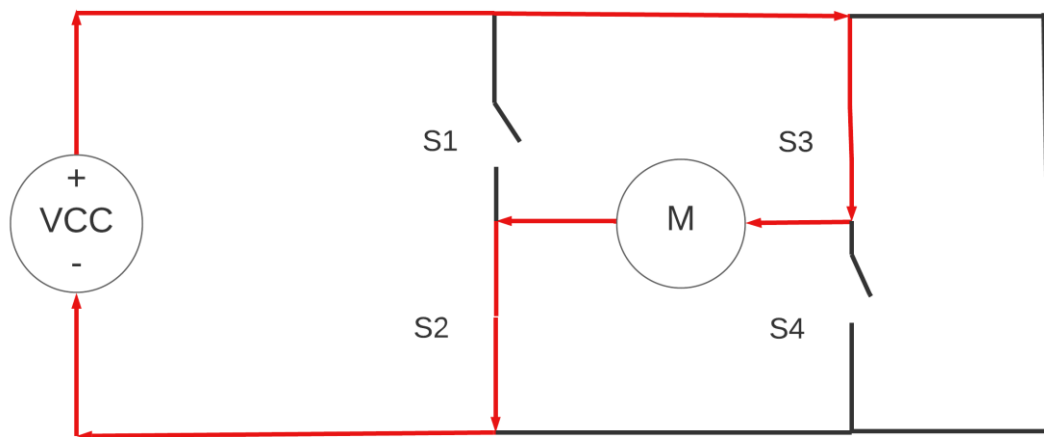


Figura 1.9 Sentido de giro 2 del puente H.

1.5. Celdas de Peltier

Las celdas de Peltier o bombas de calor Peltier son dispositivos de estado sólido, que transfieren calor de un lado del dispositivo al otro y a su vez, dependiendo de su polarización, la celda de Peltier puede usarse como refrigerante o calefactor, aunque en la práctica su función principal es la refrigeración [18].

Los enfriadores termoeléctricos funcionan a base del efecto Peltier. El dispositivo cuenta con dos lados y cuando una corriente de fuente continua fluye a través de este, lleva calor de un lado al otro, de tal manera que un lado se calienta mientras que el otro se enfría [18].

Para su fabricación se utilizan dos tipos de semiconductores, uno del tipo N y uno tipo P, ya que es necesario contar con densidades de electrones diferentes, los semiconductores son colocados térmicamente en paralelo entre sí y electrónicamente en serie, para ser unidos por dos placas térmicas que se colocan una en cada lado [18] como se muestra en la figura 1.10.



Figura 1.10 Diagrama de estructura interna de una celda de Peltier (figura tomada de [18]).

1.6. Controlador Proporcional Integral Derivativo (PID)

Uno de los controladores más utilizados en la industria es el controlador proporcional-integral-derivativo, también conocido como PID. Este controlador tiene la propiedad de resolver el problema de regulación para una familia muy amplia de sistemas dinámicos, inclusive sin la necesidad de tener un modelo aproximado. Además, hay estrategias de sintonización de las ganancias del controlador, y si se sintoniza adecuadamente, el sistema en lazo cerrado presenta buenas propiedades de robustez. Actualmente existen muchas variantes de este controlador que permiten resolver el problema de seguimiento de trayectorias en diferentes tipos de sistemas, como en robots manipuladores.

Sin embargo, también hay algunas desventajas, como el fenómeno conocido como “*windup*” que es el crecimiento de la salida de la acción integral debido a la saturación del actuador, otra desventaja importante es que, para que resuelva adecuadamente el problema de seguimiento de trayectorias, se deben de incorporar términos que dependen fuertemente del modelo de la planta.

El diagrama a bloques de un sistema de control basado en un controlador PID se muestra en la figura 1.11.

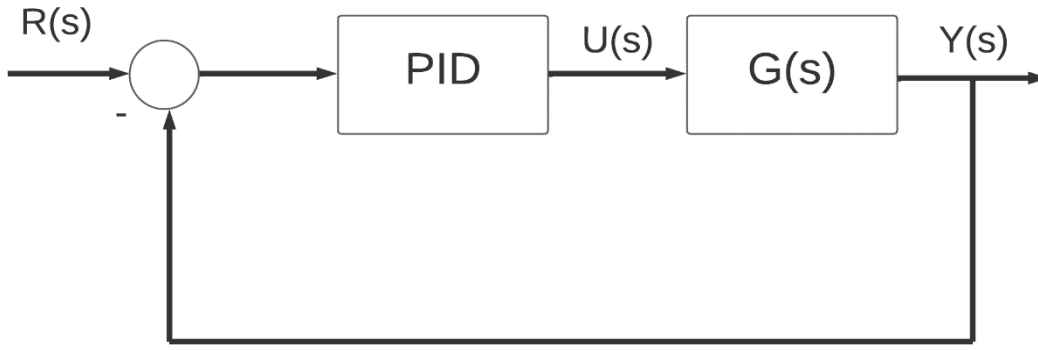


Figura 1.11 Esquema de un lazo de control con una entrada y una salida basado en un controlador PID.

Las acciones que forman un controlador PID son: la acción proporcional (P), la integral (I) y la derivativa (D), con estas tres acciones se define una familia de controladores entre los cuales están los denominados P, I, PI, PD y PID. A continuación, se definen cada una de las acciones del controlador, en estas definiciones el error $e(t) = y_r - y(t)$, donde y_r es una referencia constante y $y(t)$ es la salida de la planta [20].

Acción de control proporcional P. Genera una salida de control que es proporcional al error, es decir $u(t) = K_p e(t)$, de esta forma su función de transferencia $C_p(s)$ es:

$$C_p(s) = K_p, \quad (1.3)$$

donde K_p es una ganancia proporcional ajustable. Un controlador proporcional tiene la capacidad de controlar cualquier planta estable, pero el sistema en lazo cerrado presenta un desempeño limitado y no puede eliminar un error en régimen permanente [19].

Acción de control integral I. Esta acción de control genera una salida que es proporcional al error acumulado, lo que implica que es un modo de control lento, se define como la integral del error [19].

$$u(t) = K_i \int_0^t e(\tau) d\tau. \quad (1.4)$$

De esta forma, su función de transferencia está dada por

$$C_i(s) = \frac{K_i}{s}. \quad (1.5)$$

La señal de control $u(t)$ tiene un valor diferente de cero cuando la señal de error $e(t)$ es cero. Por lo que se concluye que, dada una referencia constante, o perturbaciones, el error en régimen permanente es cero [19].

Control proporcional-integral. Este controlador se define mediante la unión de la acción proporcional y de la integral. En la ecuación (1.6) se presenta su definición en términos de constantes de tiempo.

$$u(t) = K_p e(t) + \frac{K_p}{T_i} \int_0^t e(\tau) d\tau, \quad (1.6)$$

donde T_i es la constante tiempo integral y es quien ajusta la acción integral. La función de transferencia resulta en.

$$C_{PI}(s) = K_p \left(1 + \frac{1}{T_i s} \right). \quad (1.7)$$

Con un control proporcional, es necesario que exista error para tener una acción de control distinta a cero. Con acción integral, un error pequeño positivo siempre nos dará una acción de control creciente y si fuera negativa la señal de control será decreciente. Este razonamiento nos muestra que el error en régimen permanente será siempre cero en una familia amplia de sistemas a controlar [19].

Controlador Proporcional-Derivativo PD. Este controlador se define mediante la expresión:

$$u(t) = K_p e(t) + K_p T_d \frac{de(t)}{dt}, \quad (1.8)$$

donde T_d es una constante denominada constante de tiempo derivativa. Esta acción tiene carácter de previsión, lo que hace más rápida la acción de control, aunque tiene la desventaja importante que amplifica las señales de ruido y puede provocar saturación en el actuador, la acción derivativa nunca se utiliza por sí sola, debido a que solo es eficaz durante periodos transitorios. La función de transferencia de este controlador es [20]

$$C_{PD}(s) = K_p + s K_p T_d. \quad (1.9)$$

Cuando una acción de control derivativo se agrega a un controlador proporcional permite obtener un controlador de alta sensibilidad, es decir que responde a la velocidad del cambio del error y produce una corrección significativa antes de que la magnitud del error se vuelva

demasiado grande. Aunque el control derivativo nos afecta directamente al error de estado estacionario [19].

Controlador proporcional-integral-derivativo PID. Este controlador reúne las ventajas de las tres acciones de control.

$$u(t) = K_p e(t) + \frac{K_p}{T_i} \int_0^t e(\tau) d\tau + K_p T_d \frac{de(t)}{dt}, \quad (1.10)$$

y su función de transferencia es [19]

$$C_{PID}(s) = K_p \left(1 + \frac{1}{T_i s} + T_d s \right). \quad (1.11)$$

Con excepción de casos en que el control sin realimentación es aceptable, el controlador PID es el más usado en la industria en la solución de problemas de regulación [21].

Capítulo 2. Diseño del prototipo

En este capítulo se describe en forma detallada cada uno de los elementos que forman el actuador lineal basado en resortes de nitinol, el cual se muestra en la figura 2.1. Este prototipo consta de diferentes partes mecánicas, electrónicas y de diferentes dispositivos que permiten su operación.

Es importante mencionar que diferentes partes mecánicas fueron tomadas de otros mecanismos que estaban fuera de operación, por lo que su forma y características quizá no sean las óptimas. En consecuencia, se elaboraron dos propuestas del mecanismo que se describen a continuación.

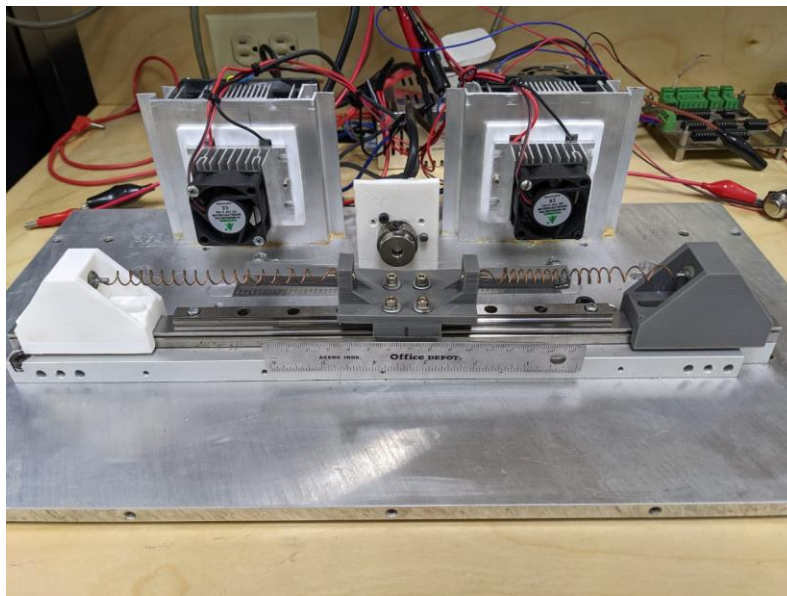


Figura 2.1. Actuador lineal basado en resortes de nitinol, segunda versión del diseño.

2.1 Descripción de la primera propuesta del mecanismo

Se inicia con la descripción de la base del prototipo, la cual es una placa de aluminio que fue recolecta del material fuera de uso, con dimensiones 480 mm de ancho, 260 mm de largo y

10 mm de espesor, la cual se muestra en la figura 2.2. A esta placa se le hicieron perforaciones con rosca para sujetar el resto de los elementos mecánicos.

El segundo elemento es la base del riel, la cual se muestra en la figura 2.3, esta pieza también se tomó de un sistema fuera de uso, al igual que el riel y los baleros lineales, ver figuras 2.4 y 2.5 respectivamente. Es importante mencionar que se realizó el mantenimiento al balero lineal y al respectivo riel para retirar el óxido y suciedad con la finalidad de tener un movimiento con la mínima fricción posible, de esta manera evitar que los resortes de nitinol necesitaran generar una mayor fuerza para provocar movimiento en el sistema.

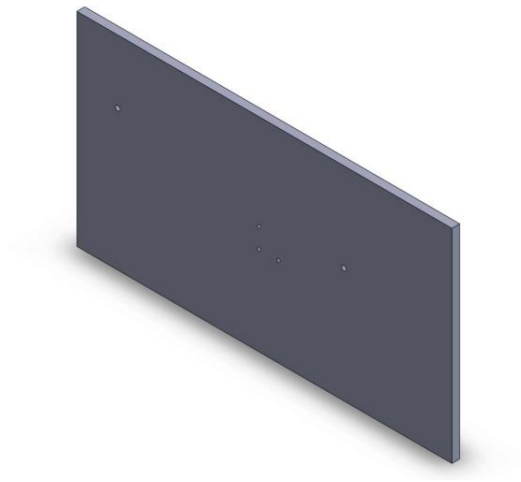


Figura 2.2 Placa base del SMA lineal.

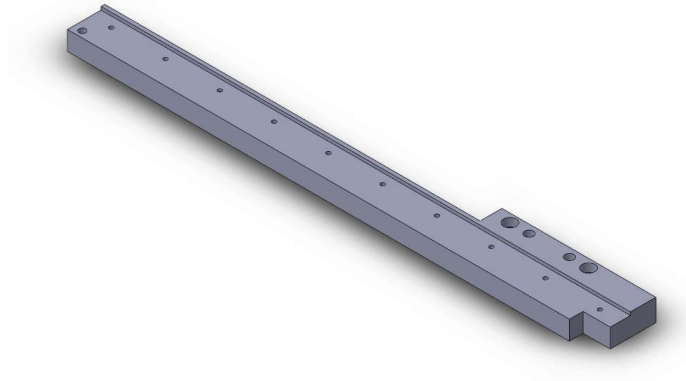


Figura 2.3 Base para el riel del actuador lineal.

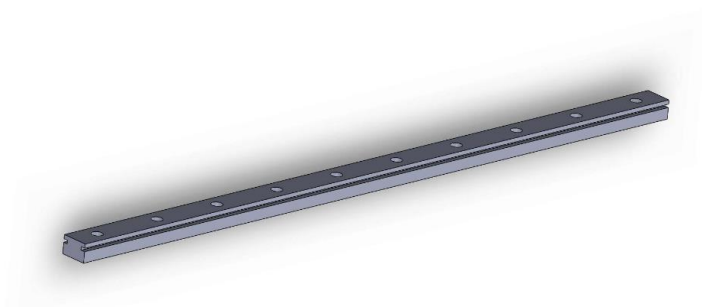


Figura 2.4 Riel para balero lineal.

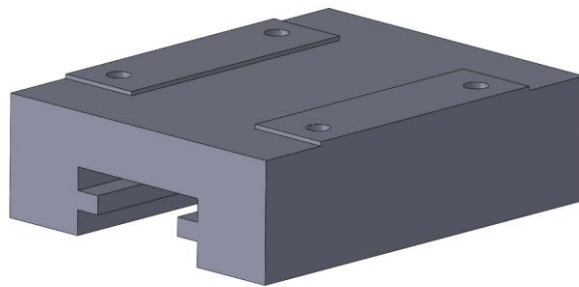


Figura 2.5 Balero lineal del mecanismo, al mismo tiempo es la carga que desplaza el actuador.

Se colocaron dos baleros lineales sobre el riel junto con la pieza que se muestra en la figura 2.6 para lograr la instalación de los resortes y mover una masa en el centro del riel, esta pieza une a los baleros y al mismo tiempo permite la instalación de otras piezas para instalar los resortes de nitinol y mover el eje de un encoder incremental que medir la posición del actuador. En los puntos marcados como 1 y 2 se colocan soportes para instalar los resortes de nitinol, los cuales se muestran en las figuras 2.7 y 2.8. Es importante mencionar que estas piezas tienen un diseño en espejo debido a que la guía no es una pieza centrada con el riel, lo que ocasionó que estas dos piezas tengan diferente orientación. En el punto 3 de la figura 2.6 se coloca una pieza que permite el acoplamiento con un encoder incremental.

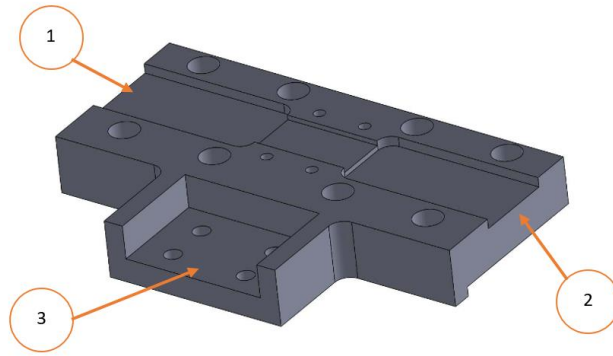


Figura 2.6 Estructura une los dos baleros lineales y otras piezas en el actuador lineal.

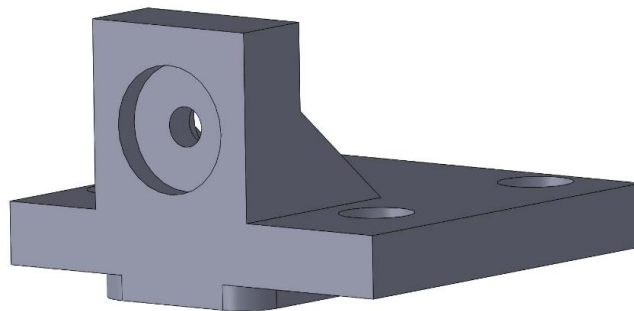


Figura 2.7 Soporte de resorte de nitinol izquierdo sobre baleros lineales.

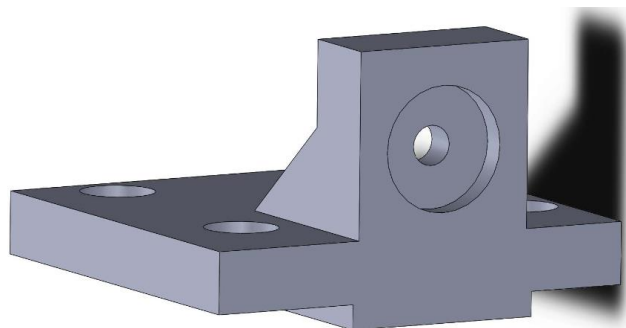


Figura 2.8 Soporte de resorte de nitinol derecho sobre baleros lineales.

Se continuó con el diseño de la transmisión para el sensor de posición que se ve en la figura 2.9 y, con base a la parte 3 de la figura 2.6, se diseñó una pieza que permite el balero lineal se traslade en un rango de 15 cm, lo cual se logra sujetando una cuerda en sus extremos para después colocarla en la polea del sensor de posición, del cual se hablará más adelante.

Finalmente, se requiere de otro par de soportes para los resortes de nitinol, los cuales se muestran en la figura 2.10. Estos soportes van atornillados al riel principal que se observa en la figura 2.4, por lo que se diseñaron alineados al riel y se colocaron dos piezas iguales de ambos lados.

En la figura 2.11 se muestra uno de los resortes que se utilizan en el actuador lineal. En la parte indicada con el número 3 se muestra cómo se adaptó un tornillo con una rondana al resorte con epóxico para altas temperaturas, con la finalidad de que su ensamble y desensamble fuera más eficiente. En la parte indicada con el número 1 se muestra como entra el tornillo por en medio del resorte. El tamaño de la rondana y de la cabeza de tornillo se seleccionaron de tal forma que tanto la rondana y la cabeza del tornillo quedara dentro de las piezas.

En la parte posterior del actuador lineal hay dos celdas de Peltier, como la que se muestra en la figura 2.12. Estas celdas tienen la finalidad de enfriar los resortes SMA y de esta forma obtener una mayor velocidad de movimiento del actuador. Por tal motivo, cada celda se coloca frente a cada resorte SMA, las cuales se pueden observar en la figura 2.12.

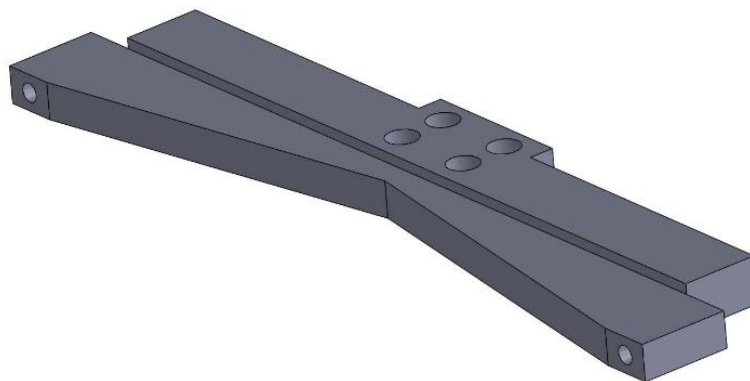


Figura 2.9 Transmisión para sensor de posición sobre baleros lineales.

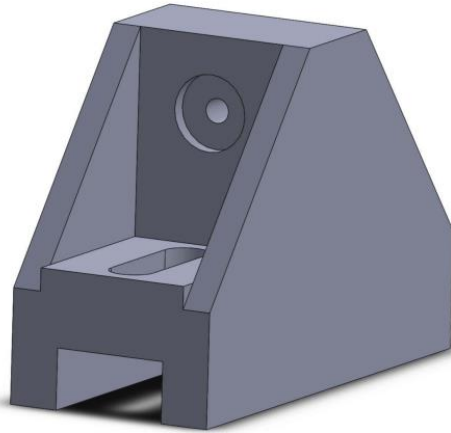


Figura 2.10 Soporte de sensor sobre riel.

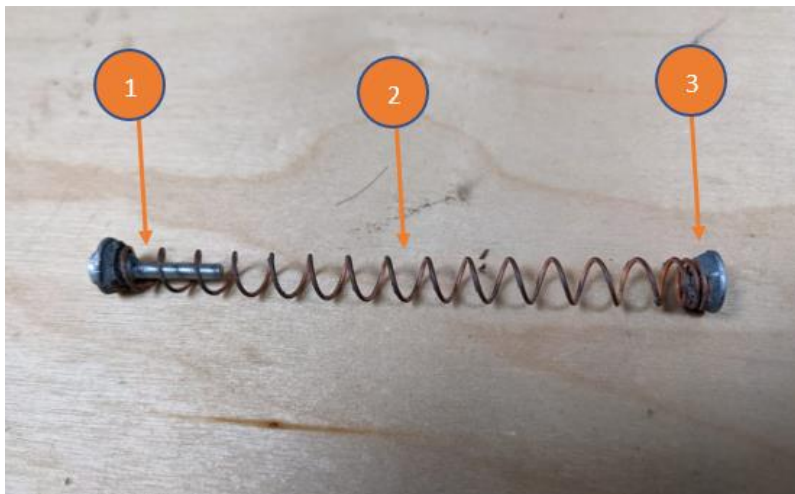


Figura 2.11 Adaptaciones para la sujeción de los resortes de nitinol.

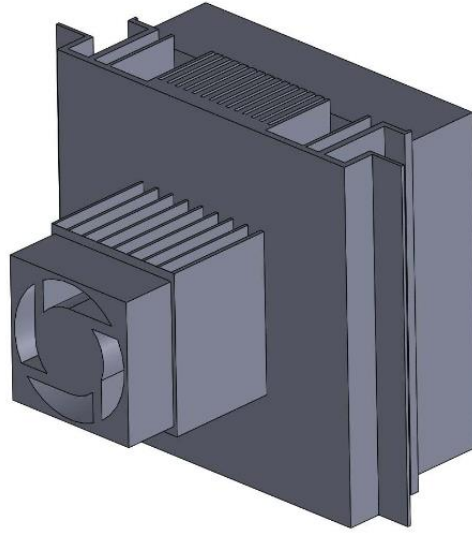


Figura 2.12 Estructura de celda de Peltier utilizada en el prototipo.

El ensamble de la primera versión del prototipo se muestra en la figura 2.13. Sin embargo, al realizar pruebas básicas de operación las cuales consistieron de hacer pasar una corriente a través de los resortes de nitinol para generar un movimiento, se observó que se requería mucha corriente, y en consecuencia una temperatura alta, en los resortes para lograr mover el mecanismo. Después de un análisis de esta situación se llegó a la conclusión que la principal causa de este comportamiento era el deterioro en el riel y en los baleros lineales. Por lo que se tomó la decisión de buscar otros que tuvieran mejores condiciones, lo que condujo a una segunda versión del mecanismo.

2.2 Descripción de la segunda propuesta del mecanismo

La segunda versión del diseño mecánico del actuador se basa en el cambio del riel y el balero lineal, por lo que algunas de las piezas de la primera versión se mantienen. En esta sección se describen las piezas que se rediseñaron y algunas nuevas que se agregaron a la primera versión.

El riel y balero que se eligieron en esta segunda versión fueron más pequeños, figuras 2.14 y 2.15 respectivamente. Debido a esto no se pudo instalar en la base original el cual se observa en la figura 2.3; pero sí sobre el primer riel que se ve en la figura 2.4, por lo que se instaló de esta forma y se usó solo un balero lineal.

En consecuencia, se diseñó una nueva pieza para acoplar el balero con un extremo de los resortes de nitinol, la cual se muestra en la figura 2.16. Esta nueva opción de acoplamiento es más eficiente ya que es más fácil de ensamblar y tiene menor peso.

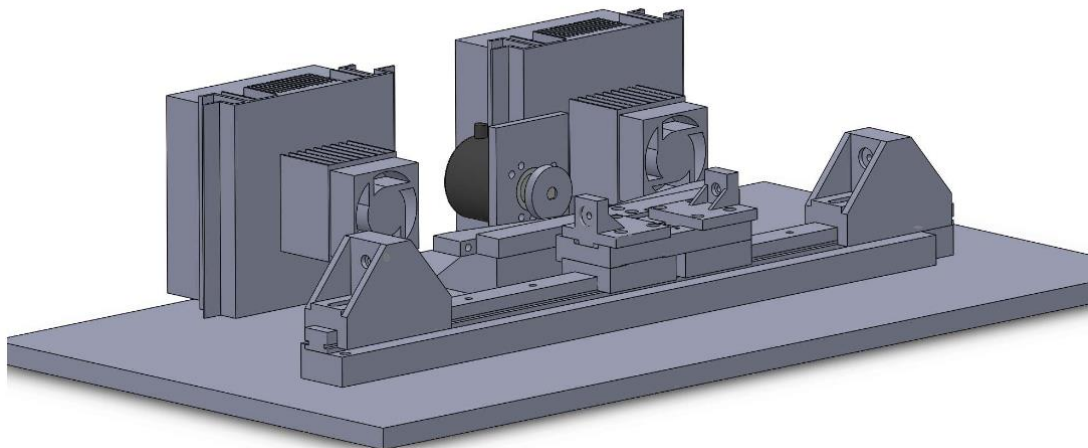


Figura 2.13 Ensamble de la primera versión del actuador lineal basado en resortes de nitinol.



Figura 2.14 Segundo riel para baleros lineales.

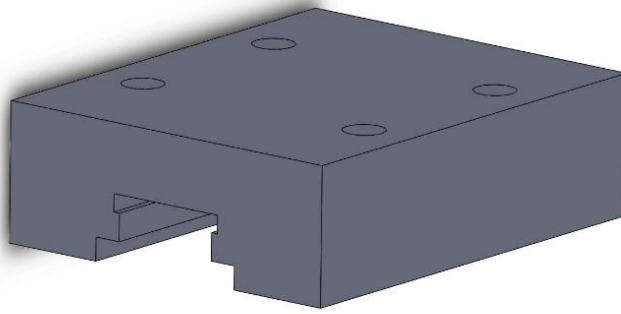


Figura 2.15 Segundo diseño de balero lineal para la modificación del SMA.

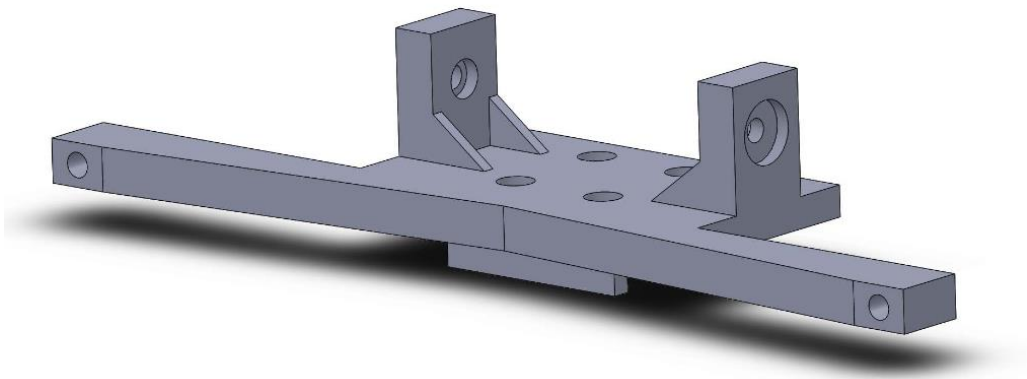


Figura 2.16 Diseño de soportes de resortes L R y transmisión para sensor de posición.

Para medir el desplazamiento del actuador se utilizó el encoder incremental LPD3806-600BM-G5-24C el cual se observa en la figura 2.17. Considerando su diseño mecánico dado por el fabricante, se diseñó una base para su instalación en el prototipo, la cual se muestra en la figura 2.18. Para acoplar el eje del encoder con el mecanismo de la figura 2.16 se diseñó la polea que se muestra en la figura 2.19, cuyo ensamble final de esta etapa de sensado se muestra en la figura 2.20.

El ensamble final de la segunda versión del actuador lineal se muestra en la figura 2.21. Este mecanismo tuvo un mejor desempeño que la primera versión, en el sentido de que necesita menor corriente para lograr un movimiento.

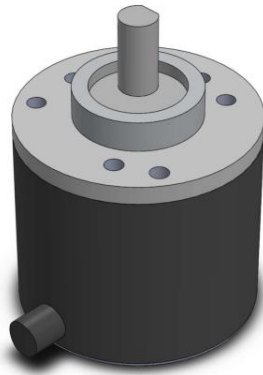


Figura 2.17 Sensor de posición LPD3806 (Diseño tomado de [11]).

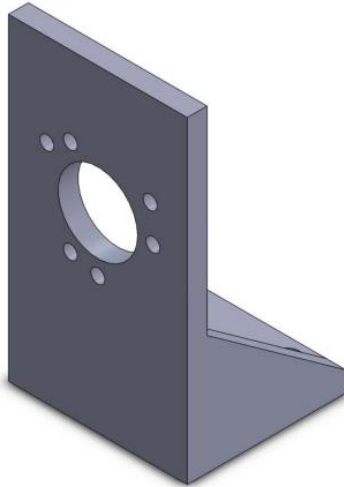


Figura 2.18 Diseño de base para sensor de posición LPD3806.

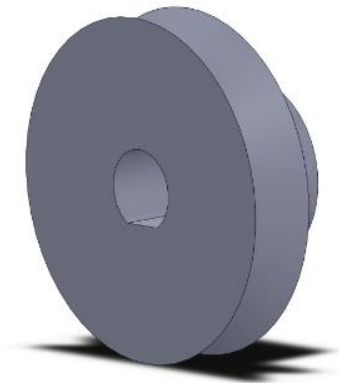


Figura 2.19 Diseño de polea para sensor de posición LPD3806.

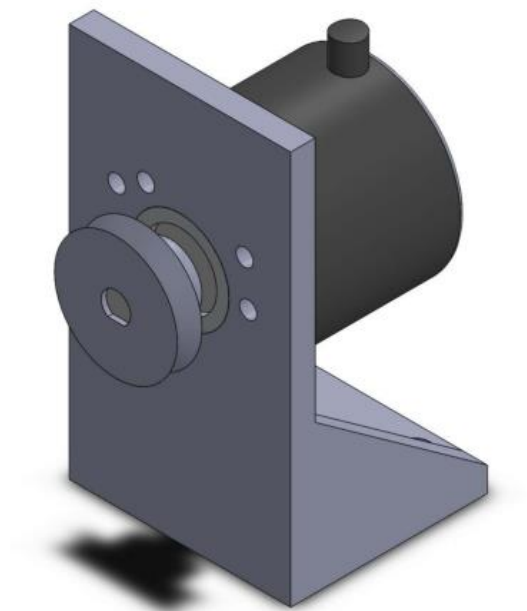


Figura 2.20 Ensamble de los mecanismos para la lectura de posición.

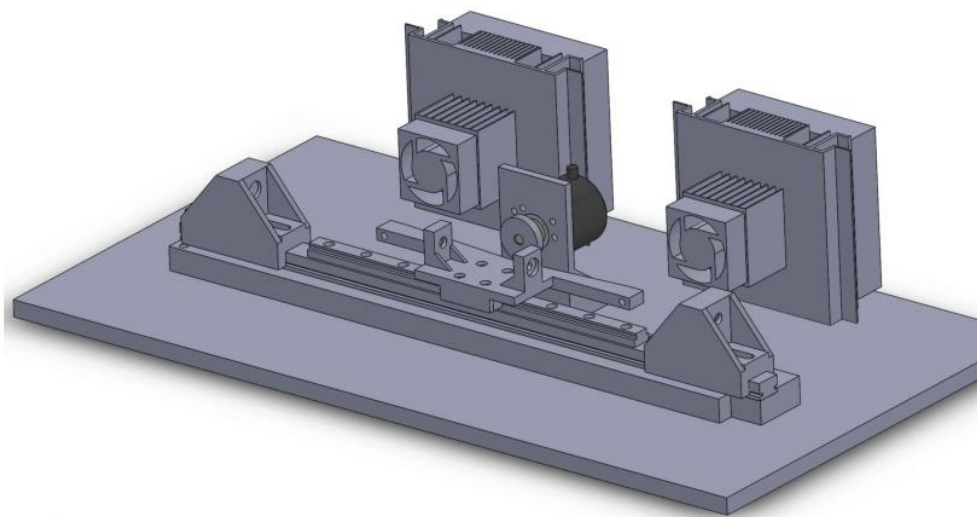


Figura 2.21 Ensamble de la segunda versión del actuador lineal basado en resortes de nitinol.

Capítulo 3. Dispositivos y sistemas electrónicos

En este capítulo se describen los dispositivos y sistemas electrónicos que forman parte del prototipo. Entre los cuales se encuentran sensores, etapas de acondicionamiento de señal, etapas de potencia y tarjetas de adquisición de datos. Es importante mencionar que algunos de estos dispositivos fueron diseñados e implementados previamente por estudiantes de diversos programas educativos de ingeniería. En este proyecto se rehabilitaron algunos de ellos o se acondicionaron para darles un uso diferente.

3.1 Sensores para medición de posición y su correspondiente circuito de acondicionamiento de señales

Para medir la posición del actuador se utiliza un encoder incremental LPD3806-600BM-G5-24C, el cual se muestra en la figura 2.17. Este encoder tiene una resolución de 600 pulsos por revolución y solo cuenta con las señales de salida denominadas como A y B, estas salidas son a colector abierto, por lo que se puede obtener un nivel de voltaje 5 a 24 V dependiendo de una fuente externa a la cual se conectan las resistencias de pull-up.

Para convertir las salidas del encoder a un voltaje analógico proporcional a la posición del actuador se utiliza un circuito de acondicionamiento de señales, el cual fue diseñado y fabricado previamente por el Dr. Mario Mora Camacho.

La conexión detallada del circuito de acondicionamiento de las señales del encoder se muestra en la figura 3.1, y un listado que describe su correcta conexión para su funcionamiento en la tabla 3.1.

El funcionamiento de esta etapa es el siguiente. Las señales A y B entran al circuito LS7184, el cual identifica el sentido de giro del encoder y puede incrementar la resolución por 1, 2 y por 4. Las salidas de este CI son una señal de reloj y el sentido de giro del encoder, estas salidas se conectan a un contador ascendente/descendente de 16 bits; la señal de salida de

reloj del LS7184 se conecta a la entrada de reloj de los contadores y la de sentido de giro a la entrada que define el modo de cuenta ascendente o descendente. El código de 16 bits que genera el contador se conecta a un convertidor digital a analógico DAC712P el cual lo interpreta en forma directa; el bit más significativo es el signo y el resto de los bits es el valor absoluto del voltaje de salida, el cual tiene el rango de $\pm 10V$.

Es importante mencionar que el uso de esta tarjeta de acondicionamiento de señales es indispensable ya que, a pesar de que se utiliza una tarjeta de adquisición de datos myRIO para la manipulación del actuador y esta cuenta con entradas dedicadas para la lectura de encoders incrementales, debido a la alta frecuencia de las señales del encoder, la tarjeta myRIO pierde la cuenta de los pulsos. Por lo tanto, esta tarjeta nos da la libertad de procesar las señales de voltaje mediante una plataforma MyRIO evitando el costo computacional de la detección y cuenta de los pulsos generados por el encoder.

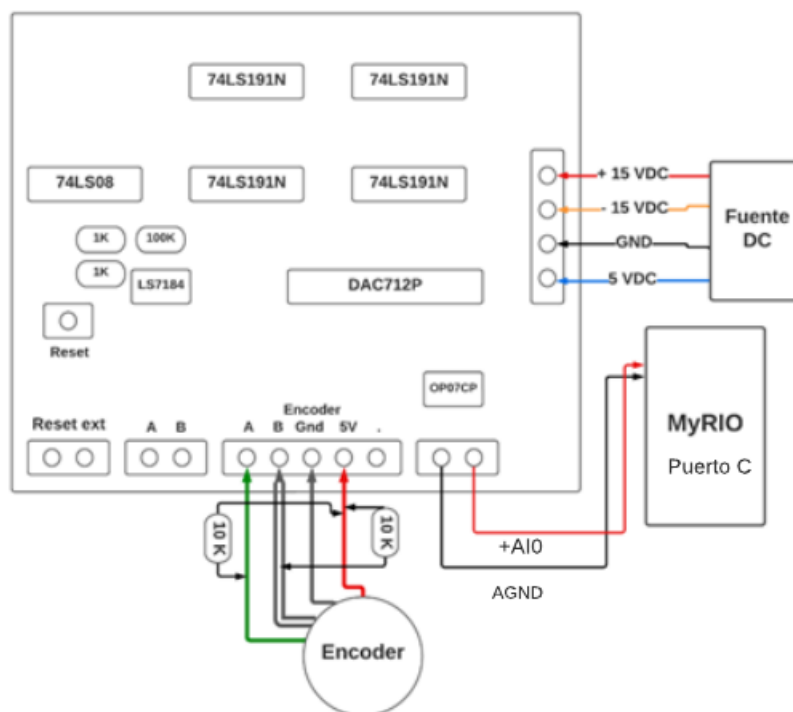


Figura 3.1 Diagrama de conexiones de la tarjeta de acondicionamiento de señal para el encoder incremental.

Tabla 3.1 Descripción de conexiones para tarjeta de acondicionamiento de señal.

Entradas / Salidas	Descripción de conexión
Reset Externo	Se puede colocar un botón externo al que ya tiene la placa, en nuestro caso no lo colocamos
A	Es una segunda señal de salida del encoder de la terminal A
B	Es una segunda señal de salida del encoder de la terminal B
Encoder A	Lectura de encoder, Cable Verde del encoder, se coloca una resistencia de 10 k ohm junto con 5 V del encoder
Encoder B	Lectura de encoder, Cable Blanco del encoder, se coloca una resistencia de 10 k ohm junto con 5 V del encoder
Encoder GND	Polarización de encoder cable negro
Encoder 5 VCC	Polarización de encoder cable Rojo
VCC + 15v	Polarización de la tarjeta +15 V , De fuente de DC
VCC – 15v	Polarización de la tarjeta -15 V , De fuente de DC
GND	Polarización de la tarjeta GND, De fuente de DC
5 V	Polarización de la tarjeta 5 V, De fuente de DC
Salida	Señal de entrada para myRIO en puerto C +AI0 y AGND

3.2 Sensores para medición de temperatura y su correspondiente circuito de acoplamiento.

Para medir la temperatura en cada uno los resortes de nitinol se utiliza un termistor NTCLE317E4103SBA. Dicho termistor fue utilizado exitosamente por la Ing. Lizeth Fernanda Moreno Rodríguez en [12], en donde se desarrolló y controló un actuador rotacional con resortes de nitinol. Este sensor tiene un rango de temperatura de -55°C a 150°C y un tiempo de respuesta (en aceite) de 0.3 S. [17].

Los termistores NTC son sensores resistivos con un coeficiente de temperatura negativo. Para calcular la temperatura (T) en base a la resistencia (R) del semiconductor, se utiliza la versión extendida de la ecuación Steinhart-Hart, ver la ecuación 3.1, donde A_1 , B_1 , C_1 , D_1 son coeficientes que dependen de la marca y modelado de termistor y R_{ref} es la resistencia de referencia los cuales se muestran en la Tabla 3.2.

En [12] se implementó un puente de Wheatstone para poder interpretar el valor de la resistencia como una señal proporcional de voltaje mediante la ley de Ohm, después se utilizó un amplificador de instrumentación para amplificar la señal de salida entre los puntos

A y B a un nivel del rango adecuado para el dispositivo que adquiere la señal, este circuito se muestra en la figura 3.2.

La mejora realizada al circuito electrónico propuesto en [12] consistió en el diseño e implementación del PCB correspondiente. El objetivo de esta mejora es disminuir la introducción de ruido en el circuito; este diseño se realizó en el software Altium Designer. La figura 3.3 muestra el PCB diseñado, mientras que la figura 3.4 muestra una imagen de la tarjeta de acondicionamiento de señales para dos termistores, donde se describe sus conexiones, mientras que en la tabla 3.3 se presenta una descripción de cada conexión.

$$T_{(R)} = \left(A_1 + B_1 \ln \frac{R}{R_{ref}} + C_1 \ln \frac{R^2}{R_{ref}} + D_1 \ln \frac{R^3}{R_{ref}} \right)^{-1}. \quad (3.1)$$

Tabla 3.2 Coeficientes del termistor NTCLE317E4103SBA, tabla tomada de [12].

Coeficientes	Valor
A_1	3.354016 e-03
B_1	2.565236 e-04
C_1	2.605970 e-06
D_1	6.329261 e-08

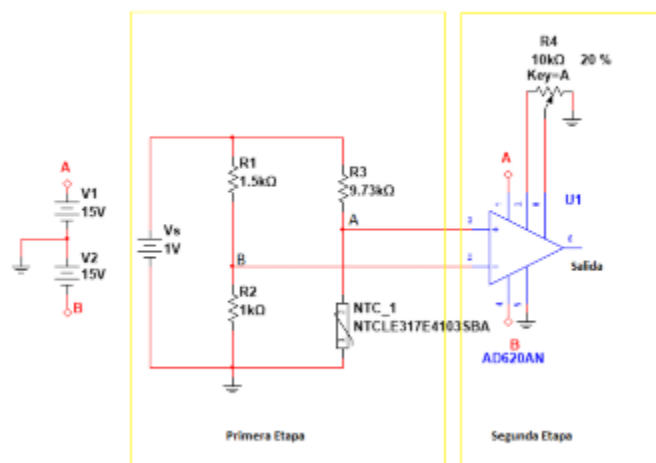


Figura 3.2 Diagrama del circuito para el acondicionamiento de señal para la medición de temperatura. Figura tomada de [12].

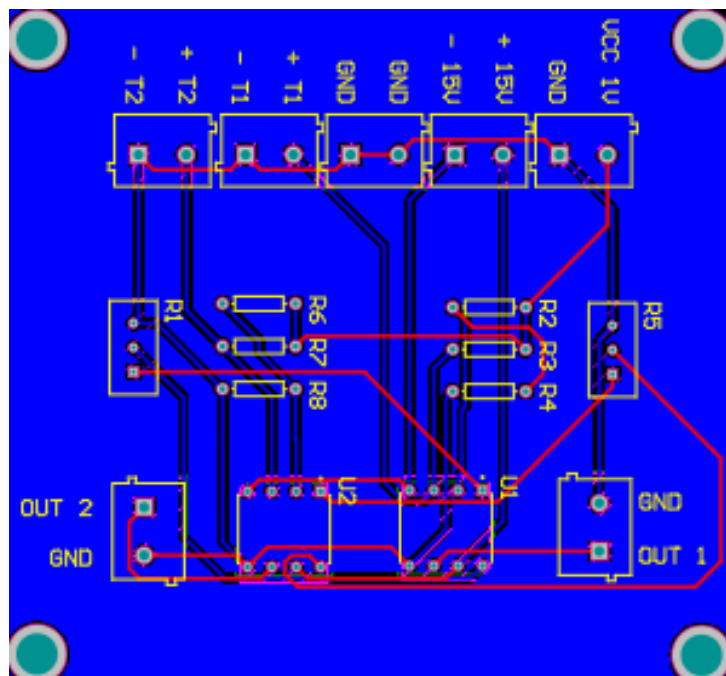


Figura 3.3 Diseño de la tarjeta PCB del circuito de acondicionamiento de señal para dos termistores.

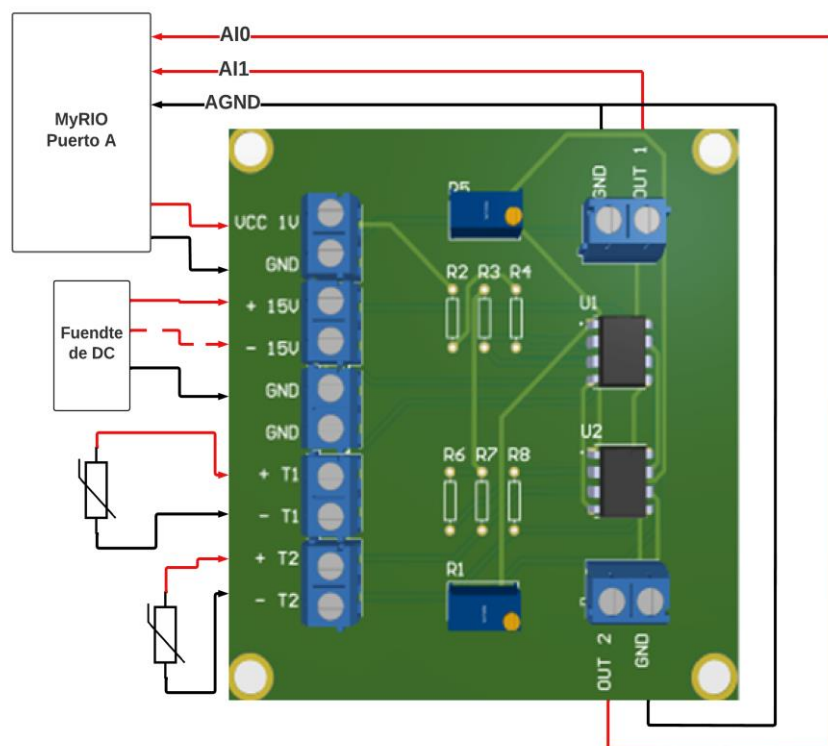


Figura 3.4 Descripción de entradas y salidas de diseño en PCB de acondicionamiento de señal para la medición de temperatura.

Tabla 3.3 Descripción de entradas y salidas para tarjeta de medición de temperatura.

Entrada / Salida	Descripción de conexiones
VCC 1 v	Voltaje suministrado por la tarjeta MyRIO por una de sus salidas Analógicas, para el puente de Wheatstone de la tarjeta
GND	Negativo/Tierra suministrado por la tarjeta MyRIO por una de sus salidas Analógicas, para el puente de Wheatstone de la tarjeta
+ 15 V	Voltaje de + 15 V suministrado por una fuente de DC, para la polarización de los Amplificadores Operacionales
- 15 V	Voltaje de - 15 V suministrado por una fuente de DC, para la polarización de los Amplificadores Operacionales
GND	Negativo/Tierra suministrado por la fuente de DC para el Amplificador
+ T1	Terminal 1 del Termistor 1
- T1	Terminal 2 del Termistor 1
+ T2	Terminal 1 del Termistor 2
- T2	Terminal 2 del Termistor 2
Out 1	Salida de voltaje del termistor 1 que se conecta a tarjeta MyRIO, Puerto A AI0
Out 2	Salida de voltaje del termistor 2 que se conecta a tarjeta MyRIO, Puerto A AI1

3.3 Etapa de potencia

Debido a que los resortes de nitinol requieren de un nivel considerable de corriente para generar el calor necesario para que éste regrese a su forma memorizada, entre 1 y 2 A, se utiliza una etapa de potencia basada en PWM y puentes H que se encuentra en el laboratorio de Investigación de Mecatrónica. Esta etapa de potencia fue diseñada para el control de velocidad y sentido de giro de motores de DC con brochas con una capacidad de corriente de hasta de 10 A. Esta etapa fue implementada, probada y realizada por los compañeros del programa educativo de Ingeniería en Mecatrónica en semestres pasados [10].

En el caso del prototipo de actuador lineal basado en resortes de nitinol, los resortes se conectan en el lugar de los motores en la etapa de potencia, ver figura 3.5. En este caso, debido a que los resortes son principalmente cargas resistivas, no es necesario el uso de un puente H, y como se verá posteriormente, solo se utilizan voltajes de control positivos para el control de la temperatura en los resortes.

Es necesario aclarar que esta etapa de potencia utilizada en el SMA puede ser cambiada por un amplificador de potencia más compacto y sin la necesidad de colocar Puentes H, pero, se utilizó esta debido a que es un equipo con el que ya se contaba en el laboratorio y se trabajó anteriormente con él, así que su uso ya era conocido y nos ahorró tiempo en la fabricación de una etapa de potencia exclusivamente para este sistema.

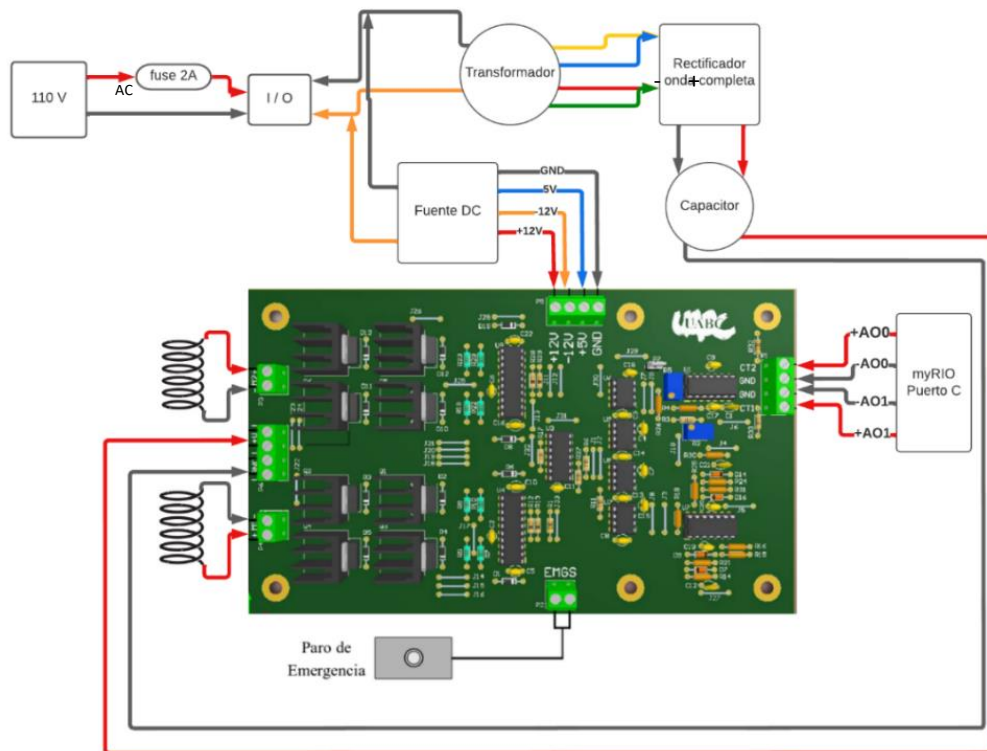


Figura 3.5 Diagrama a bloques de conexión de etapa de potencia.

Tabla 3.4 Descripción de entradas y Salidas de etapa de potencia.

Entrada/Salidas	Descripción
CT1	Salida analógica de la tarjeta myRIO , Puerto C +AO0
GND	Salida analógica de la tarjeta myRIO , Puerto C -AO0
CT2	Salida analógica de la tarjeta myRIO , Puerto C +AO1
GND	Salida analógica de la tarjeta myRIO , Puerto C -AO1
EMGS	Contacto NO del paro de emergencia
+12 V	Voltaje de alimentación de la fuente de DC de +12v
-12 V	Voltaje de alimentación de la fuente de DC de -12v
5 V	Voltaje de alimentación de la fuente de DC de 5v
GND	Tierra de la fuente de DC
+ M1	Terminal 1 de termistor 1
- M1	Terminal 2 de termistor 1
+ M2	Terminal 1 de termistor 2
- M2	Terminal 2 de termistor 2
+ V	Línea. Suministrado por Capacitor de la etapa de potencia
GND	Neutro. Suministrado por Capacitor de la etapa de potencia

3.4 Hardware para adquisición de datos e implementación de algoritmos de control

Gracias a las características de operación de las etapas de acondicionamiento de señales y de la etapa de potencia se puede utilizar cualquier plataforma de hardware que tenga 3 salidas y 2 entradas, todas ellas analógicas con un rango de operación de $\pm 10V$. Estos pueden ser DAQ's estándar, computadoras de propósito específico como myRIO, compacRIO o dSPACE, e incluso plataformas básicas como Arduino. En este proyecto se utilizó la plataforma myRIO, y en esta sección se describen sus principales características.

La plataforma myRIO, que se muestra en la figura 3.6, es un dispositivo que permite la ejecución en tiempo real de programas realizados en LabVIEW. Este dispositivo cuenta con E/S en los tres puertos con los que cuenta, y se tiene acceso a ellos a través de conectores MXP y SMP. Incluye entradas analógicas, salidas analógicas, líneas de E/S digitales, LEDs, un push-button, un acelerómetro interno, un FPGA Xilinx y un procesador dual-Core ARM Cortex-A9. Para mayor información de esta plataforma puede consultar [13].



Figura 3.6 MyRIO (Figura tomada de [13])

En la figura 3.7 se muestra un diagrama a bloques de la arquitectura interna de la tarjeta myRIO, en donde se encuentra un procesador para LabVIEW RT y un FPGA para LabVIEW FPGA conectados internamente, además se puede identificar las conexiones de los periféricos a dichos procesadores, esto es muy importante, ya que no todos los periféricos están conectados al FPGA.

Externamente se tienen dos puertos del tipo MXP, que se muestran en la figura 3.8, conocidas como puerto A y B. En estos puertos se dispone de una salida de +3.3v, 15 señales de entrada y salida digitales (DIO), 2 salidas analógicas y 4 entradas analógicas y también cuenta con señales PWM y terminales para conectar las señales de un encoder incremental, La tarjeta myRIO cuenta con un tercer puerto de entradas y salidas tipo MSP el cual se le denomina puerto C, ver figura 3.9. Este puerto cuenta con salidas de voltaje de $\pm 15v$ y 5v,

8 DIO y 2 entradas analógicas diferenciales y 2 salidas analógicas, este puerto también ofrece 2 salidas PWM y la capacidad de leer 2 encoders incrementales.

Para el control del prototipo implementado en este proyecto se utilizó el puerto C, donde se utilizaron las 2 salidas analógicas (AO0 y AO1) como controladores para la etapa de potencia, una entrada analógica (AI0) para leer la salida de voltaje del acondicionamiento de señal del encoder. También se usó el puerto A para mandar una señal analógica de 1v para el puente de Wheatstone (AO0 y AGND) y se usaron 2 entradas en analógicas para la medición de los voltajes suministraba el amplificador operacional para medir la temperatura (AI0 y AI1).

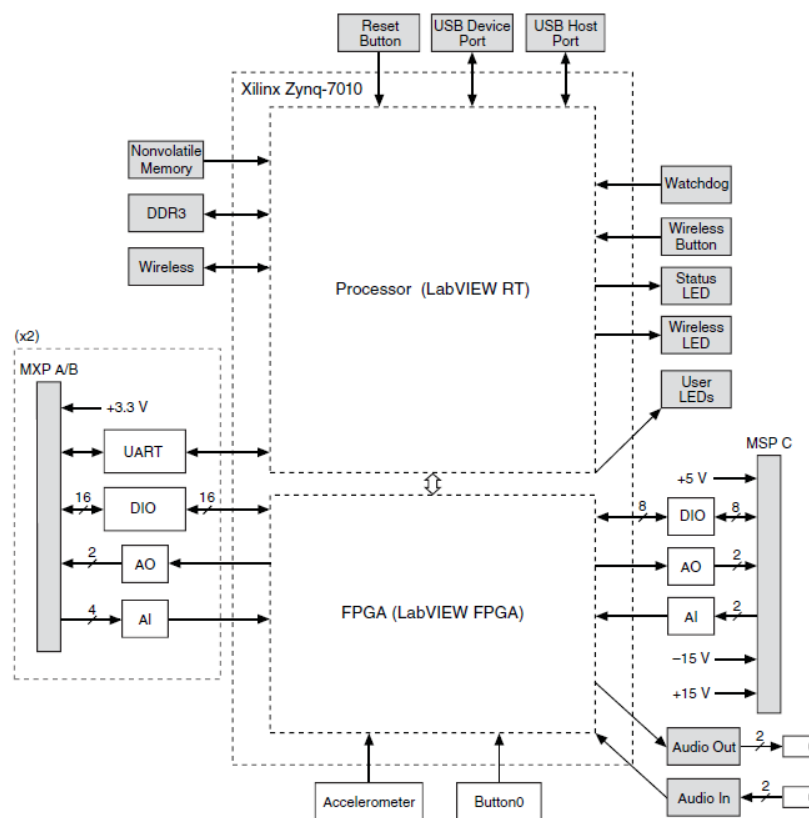


Figura 3.7 Entradas/Salidas, Software/Hardware de la tarjeta myRIO.

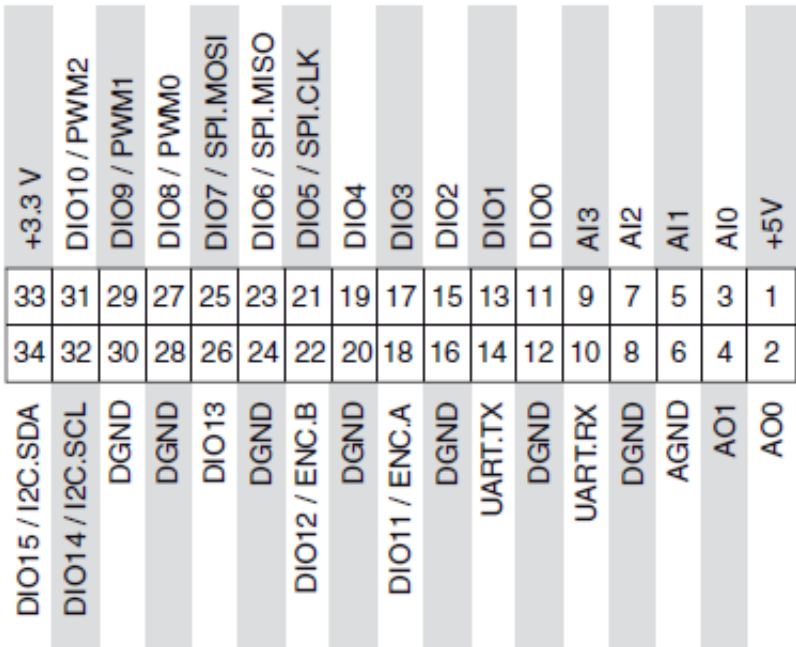


Figura 3.8 Entradas/Salidas de los puertos A y B tipo MXP.

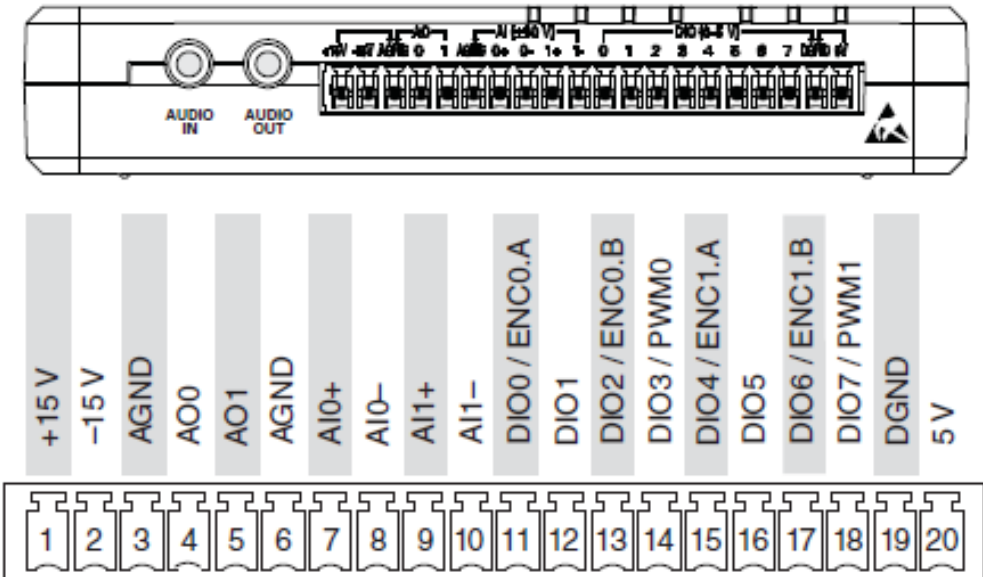


Figura 3.9 Entradas/Salidas del puerto C tipo MSP.

3.5 Celdas de Petri

Las celdas de Petri tienen como función principal enfriar los resortes de nitinol, por lo que se colocan estas celdas de manera que la parte fría quede directamente frente a ellos, con la finalidad de que estos duren la menor cantidad de tiempo posible a una temperatura elevada lo que permitirá cambiar la dirección del movimiento con mayor rapidez. La conexión de las celdas de Petri es independiente al resto de los subsistemas del prototipo, como se muestra en la figura 3.11; solo cuenta con una fuente de DC conectada a 110v, la cual genera un voltaje de 12vdc, esta fuente polariza las celdas de Petri y los abanicos que giran de tal forma que envían aire frío a los resortes.

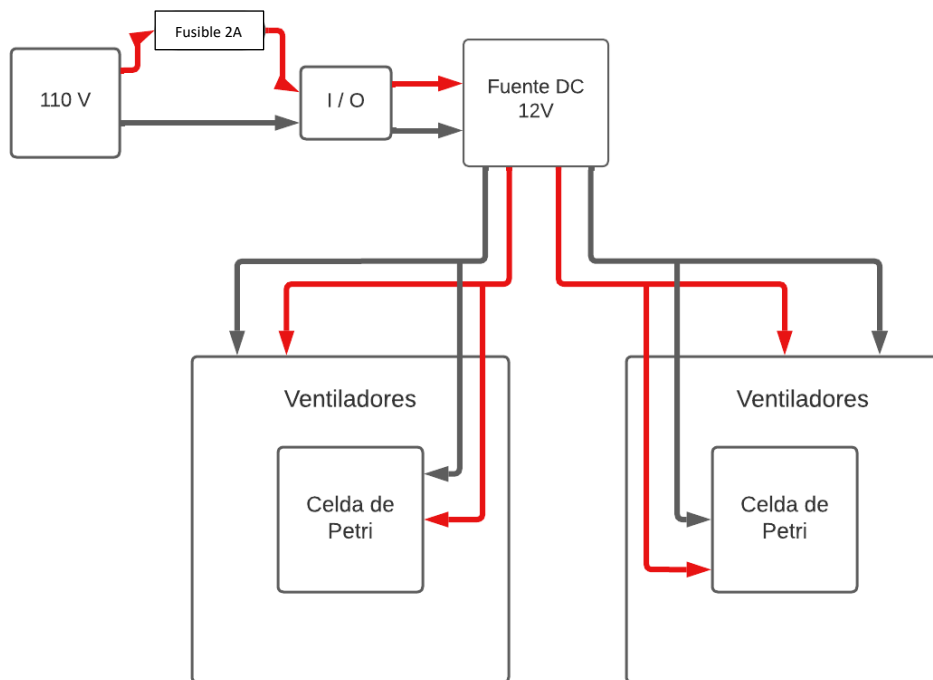


Figura 3.10 Diagrama de conexión de las celdas de Petri.

Capítulo 4. Pruebas básicas de operación

En este capítulo se describen las pruebas que se realizaron a cada subsistema que forman el actuador lineal basado en resortes de nitinol. La finalidad es asegurar su correcto funcionamiento para que posteriormente se realice un sistema en lazo cerrado basado en un controlador PID.

4.1. Prueba de la etapa de potencia

Para probar la etapa de potencia se realizaron las conexiones que se muestran en la figura 4.1. En la entrada de control para cada “motor”, señal moduladora, se conectó una salida analógica del puerto C de la tarjeta myRIO, dichas salidas pueden alcanzar niveles de $\pm 10V$. En la salida de cada “motor” de la etapa de potencia se conectó un resorte de nitinol.

Una prueba básica de operación fue la siguiente. Una vez que se realizaron las conexiones se deformaron los resortes, se aplicó 1V a la señal de control de cada resorte y se observó que los resortes recobraron su forma original debido al calentamiento producido por el flujo de corriente.

Es importante mencionar que solo se aplicarán voltajes de control positivos, ya que aplicar corrientes en otra dirección causa el mismo efecto de calentamiento. Para este fin se realizó el programa que se muestra en la figura 4.2. Aquí, el voltaje que se aplicará a la etapa de potencia se define en el panel de control del VI; si el voltaje indicado en el panel de control es positivo, el voltaje se mandará al resorte derecho, mientras que, si es negativo, se mandará al resorte izquierdo, de esta forma se puede manipular el movimiento del actuador con una sola señal de control.

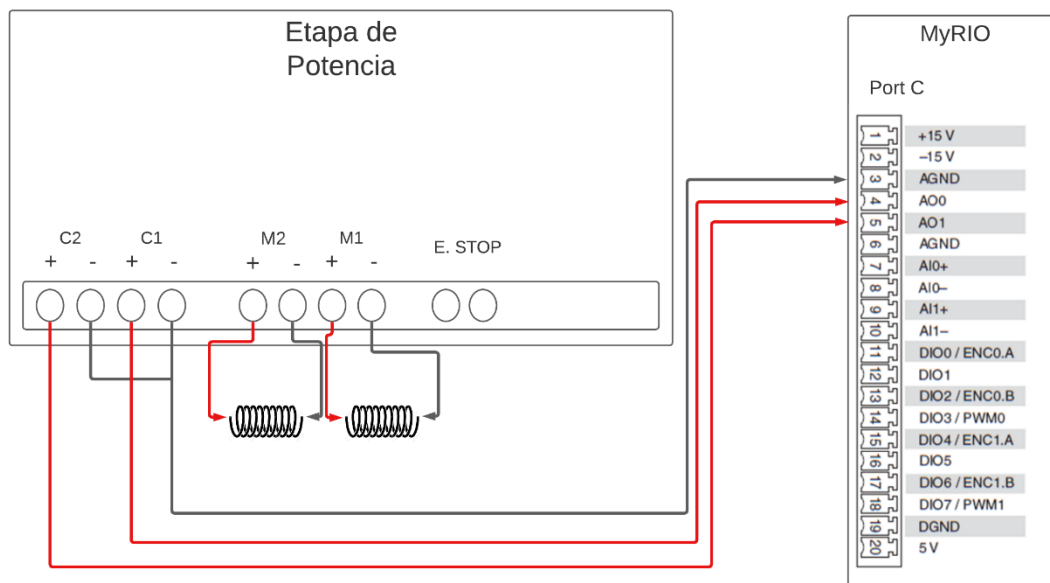


Figura 4.1 Diagrama de conexiones del controlador de la etapa de potencia para los resortes de nitinol.

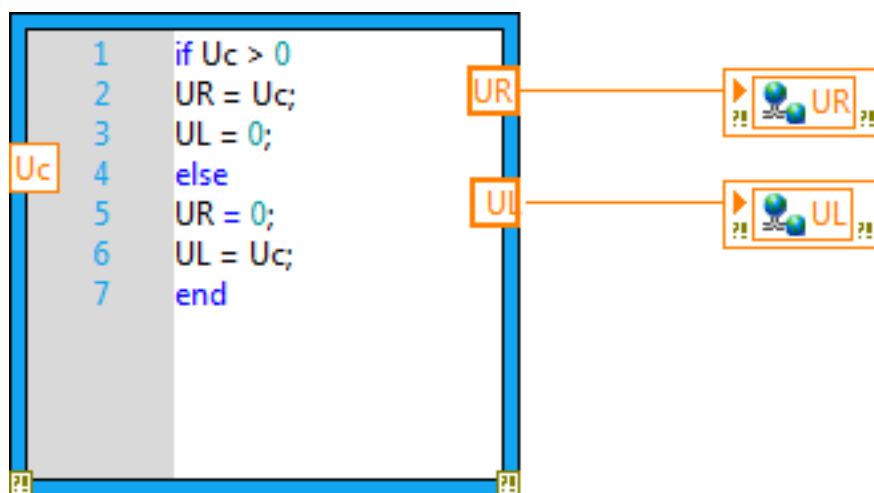


Figura 4.2 Control para etapa de potencia en LabVIEW

4.2 Prueba de sensores de temperatura y de la etapa de acondicionamiento de señales

Una vez que se probó la etapa de potencia, se instalaron los termistores en los resortes y se conectan al amplificador de instrumentación como se muestra en la figura 4.3. Para

hacer la conversión de voltaje a temperatura se implementó el programa propuesto en [12] y que se muestra en la figura 4.4.

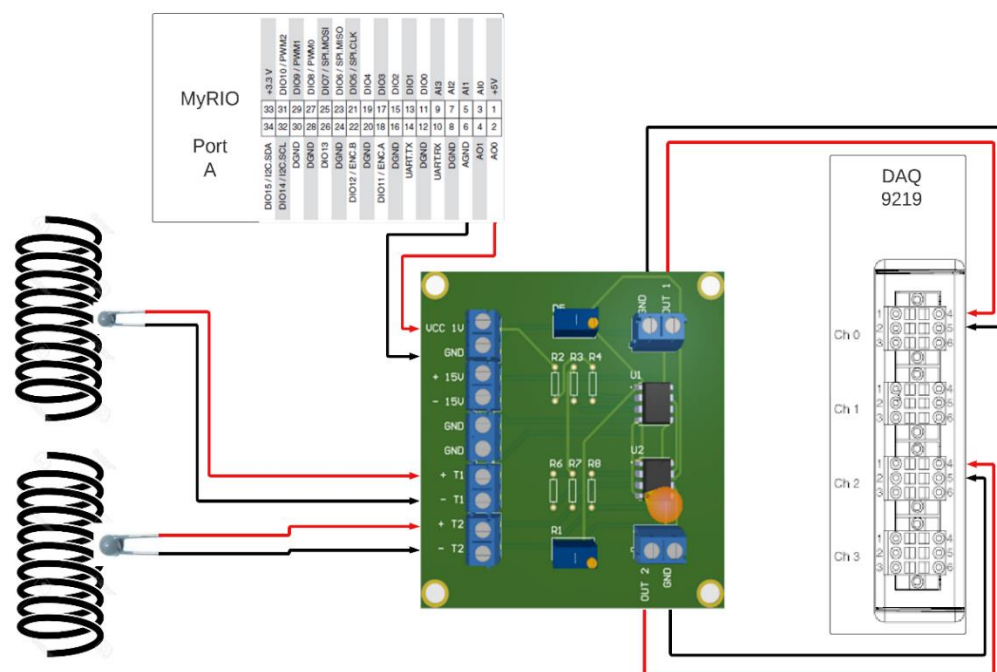


Figura 4.3 Diagrama de conexiones de amplificador de instrumentación.

```

1  vd=Vout1;
2  vi=Vout2;
3
4  Vpos
5  Vout1
6  Vout2
7  A=0.003354016
8  B=0.0002565236
9  C=0.000002605970
10 D=0.0000000632926
11
12 G=25.5
13 VR2=0.404
14 R3=9730
15 VT=1.01
16
17 DifAB1=vi/G
18 Vter=DifAB1+VR2
19 Rter=(Vter*R3)/(VT-Vter)
20 Tp=1/(A+(B*log(Rter/10000)))+(C*(log(Rter/10000)
21 T1= Tp-273.15;
22
23 DifAB=vd/G;
24 Vter=DifAB+VR2;
25 Rter=(Vter*R3)/(VT-Vter);
26 Tp=1/(A+(B*log(Rter/10000)))+(C*(log(Rter/10000)
27 T2= Tp-273.15;
28
29 Pos
30 T1
31 T2

```

Figura 4.4 Programa propuesto en [12] para la medición de temperatura.

Con la finalidad de mostrar la operación del hardware y software para medir la temperatura se realizó un proceso de modelado de la dinámica de la temperatura en los resortes. Este proceso consiste en la aplicación de voltajes en forma de escalones a la etapa de potencia, lo que genera una corriente en los resortes en forma de escalón. Se mide la evolución de la temperatura y posteriormente se realiza la aproximación de su función de transferencia.

Se aplicaron escalones de voltaje con amplitud de 0.3V a 0.55 V con incrementos de 0.05 V. Los resultados se muestran en las figuras 4.5 y 4.6 para el resorte izquierdo, mientras que los resultados para el resorte derecho se muestran en las figuras 4.7 y 4.8.

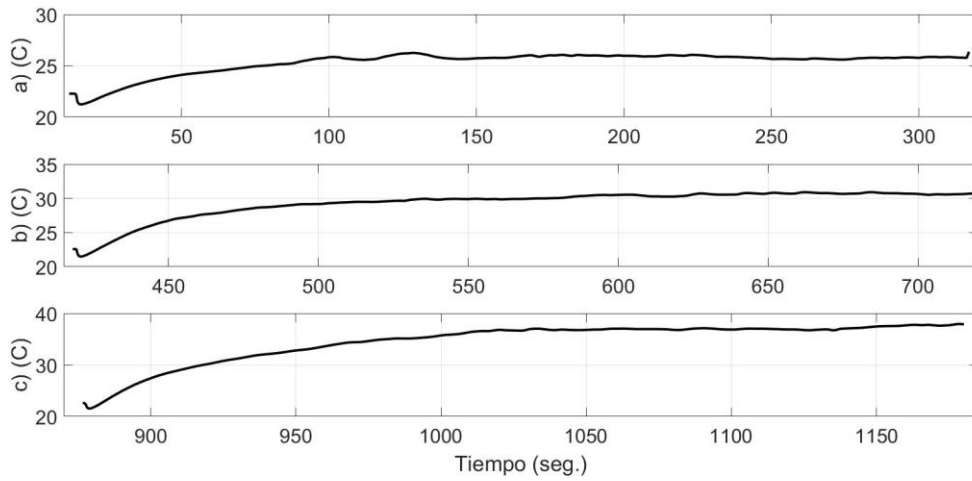


Figura 4.5. Comportamiento de la temperatura en el resorte izquierdo $T_{iz}(t)$; a) $u(t) = 0.3V$, b) $u(t) = 0.35V$, c) $u(t) = 0.4V$.

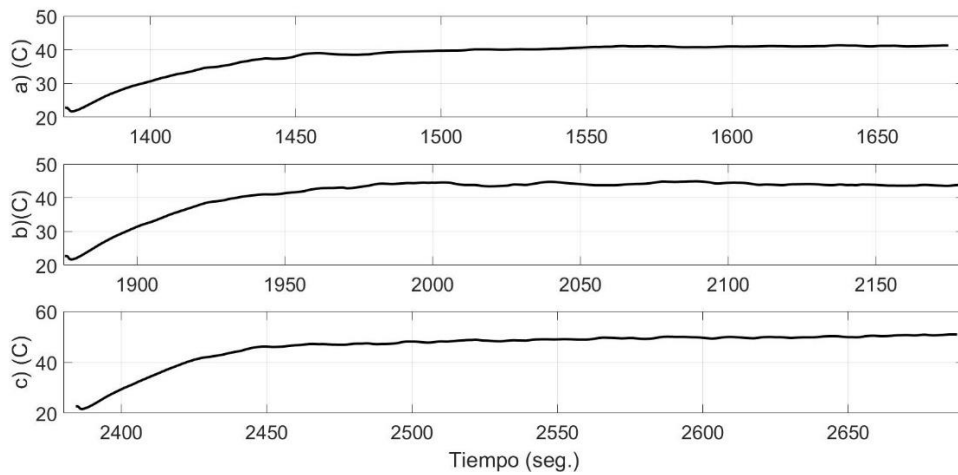


Figura 4.6. Comportamiento de la temperatura en el resorte izquierdo $T_{iz}(t)$; a) $u(t) = 0.45V$, b) $u(t) = 0.5V$, c) $u(t) = 0.55V$.

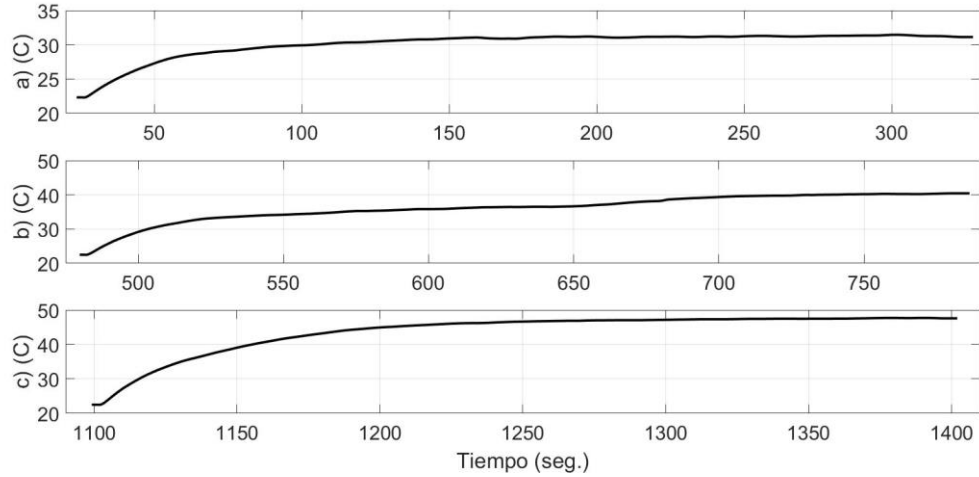


Figura 4.7. Comportamiento de la temperatura en el resorte derecho $T_{der}(t)$; a) $u(t) = 0.3V$, b) $u(t) = 0.35V$, c) $u(t) = 0.4V$.

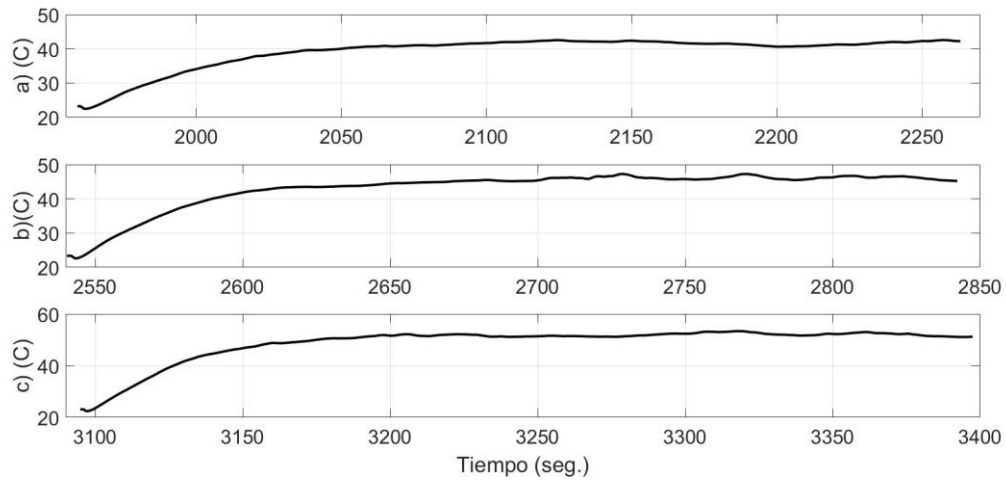


Figura 4.8. Comportamiento de la temperatura en el resorte derecho $T_{der}(t)$; a) $u(t) = 0.45V$, b) $u(t) = 0.5V$, c) $u(t) = 0.55V$.

Como se puede observar, el comportamiento de la temperatura se asimila a una respuesta de un sistema de primer orden. Por simplicidad se realizará el procedimiento del modelado considerando esta característica.

Considere la ecuación diferencial de primer orden.

$$\frac{dy(t)}{dt} + ay(t) = bu(t) \quad (4.1)$$

con condición inicial $y(0) = y_0$. Aplicando la transformada de Laplace para encontrar su solución se tiene lo siguiente

$$sY(s) - y_0 + aY(s) = bU(s),$$

asumiendo que la entrada es un escalón con amplitud A se tiene que

$$(s + a)Y(s) = \frac{bA}{s} + y_0,$$

$$Y(s) = \frac{bA}{s(s + a)} + \frac{y_0}{s + a},$$

cuya transformada inversa está dada por:

$$y(t) = \frac{bA}{a}(1 - e^{-at}) + y_0e^{-at}.$$

Definiendo a la constante de tiempo τ como

$$\tau = \frac{1}{a},$$

la respuesta se puede reescribir como

$$y(t) = \tau bA \left(1 - e^{-\frac{t}{\tau}}\right) + y_0e^{-\frac{t}{\tau}},$$

de la anterior expresión se concluye que el valor final es

$$y(\infty) = \tau bA, \tag{4.2}$$

mientras que para $t = \tau$ se tiene

$$y(\tau) = \tau bA \left(1 - e^{-\frac{\tau}{\tau}}\right) + y_0e^{-\frac{\tau}{\tau}},$$

$$y(\tau) = \tau bA(1 - e^{-1}) + y_0e^{-1},$$

$$y(\tau) = 0.632y(\infty) + 0.367y_0.$$

(4.3)

Con base a las ecuaciones 4.2 y 4.3, si se conoce $y(\infty)$ y $y(\tau)$ se pueden calcular las constantes a y b del modelo 4.1. Los resultados experimentales se muestran en las tablas 4.1 y 4.2.

Tabla 4.1. Comportamiento de la dinámica de la temperatura del resorte izquierdo $T_{iz}(t)$.

$u(t)(V)$	$y(\infty)(C)$	$y(0)(C)$	$Y(\tau)(C)$	$t_0(seg)$	$t_\tau(seg)$	$\tau(seg)$	a	b
0.3	26.05	21.23	24.255	15.95	54	38.05	0.026	2.282
0.35	30.9	21.49	27.415	420.9	458.5	37.6	0.026	2.348
0.4	37.02	21.56	31.309	879.2	930.7	51.5	0.019	1.797
0.45	41.34	21.82	34.134	1374	1416	42	0.023	2.187
0.5	44.85	21.71	36.312	1878	1916	38	0.026	2.360
0.55	50.23	21.72	39.71	2386	2422	36	0.027	2.536
					Promedio		0.025	2.251

Tabla 4.2. Comportamiento de la dinámica de la temperatura del resorte derecho $T_{der}(t)$.

$u(t)(V)$	$y(\infty)(C)$	$y(0)(C)$	$Y(\tau)(C)$	$t_0(seg)$	$t_\tau(seg)$	$\tau(seg)$	a	b
0.3	31.12	22.33	27.862	26.04	54.17	28.13	0.035	3.687
0.35	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA
0.4	47.6	22.57	38.366	1102	1146	44	0.022	2.704
0.45	42.4	22.47	35.043	1962	2005	43	0.023	2.191
0.5	47.13	22.62	38.087	2543	2582	39	0.025	2.416
0.55	53.34	22.52	41.975	3098	3131	33	0.030	2.938
						Promedio	0.027	2.787

Es importante notar que los resultados del segundo experimento en el resorte izquierdo resultaron en una curva atípica, por lo que no fue considerada para el cálculo del modelo. Finalmente, las funciones de transferencia que representa la dinámica de la temperatura en cada resorte son, para el resorte izquierdo:

$$F_{iz}(s) = \frac{0.025}{s + 2.251},$$

y para el resorte derecho:

$$F_{der}(s) = \frac{0.0274}{s + 2.787}.$$

4.2. Prueba de sensor de posición y de su etapa de acondicionamiento

El sensor de posición, el cual es un encoder incremental, se conectó a su etapa de acondicionamiento y posteriormente a una entrada analógica de la tarjeta myRIO, como se muestra en la figura 4.9. Para probar su funcionamiento lo primero fue hacer un programa para leer el voltaje de salida de la etapa de acondicionamiento, posteriormente se mueve el actuador en forma manual y se observan las variaciones de voltaje. Se hizo una caracterización de tal forma que se determinara una ecuación que convierta el voltaje a posición en centímetros la cual resultó en.

$$Pos = (5.18867924 * V_{pos}) + 6.3962264 \quad (4.4)$$

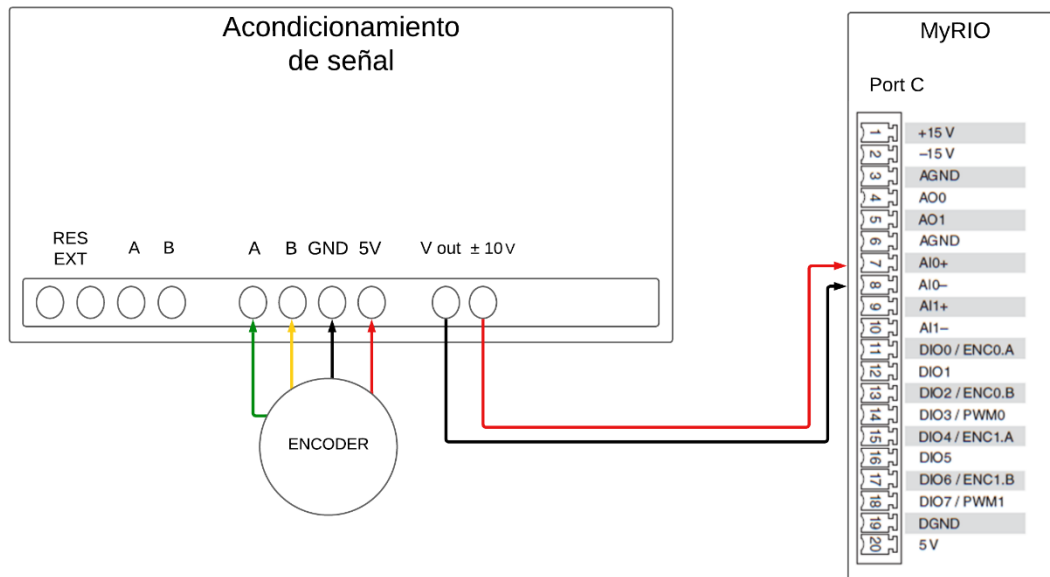


Figura 4.9. Diagrama de conexiones del sensor de posición y etapa de acondicionamiento.

4.4. Descripción de una plataforma basada en myRIO, DAQ y LabVIEW para la manipulación del actuador lineal

La plataforma para manipular el actuador lineal en lazo abierto está compuesta por software y hardware. El software está compuesto por dos programas desarrollados en LabVIEW mientras que el hardware está integrado por una tarjeta myRIO 1900 y una tarjeta DAQ 9219.

Esta sección se enfoca a la descripción del software, ya que el hardware se describió en capítulos anteriores.

Uno de los programas se ejecuta en la tarjeta myRIO, el cual se le denomina RT_pruebaTemp.vi, mientras que el segundo se ejecuta en una PC, el cual se denomina PC_pruebaTemp.vi; ambos programas se comunican por un conjunto de variables compartidas que se encuentran en un archivo denominado variablesSAMlineal.lvlib.

Los programas para controlar y analizar el comportamiento del actuador lineal basado en resortes de nitinol se muestran en las figuras 4.10 y 4.12.

El programa que se ejecuta en la tarjeta MyRIO se muestra en la figura 4.10, este se basa en una estructura plana “flat sequence” con tres pasos; en el primero se inicializan las variables que permiten una ejecución adecuada del VI, en el segundo paso se realiza el proceso principal y en el tercer paso se establecen las condiciones adecuadas en el actuador tenga cuando el programa finaliza.

Una descripción más detallada del algoritmo en los tres pasos se detalla a continuación. En primer paso solo se establece el valor de “falso” a la variable “RTStop” de tal manera que este programa no se detenga en forma inmediata.

En el segundo paso se encuentra el proceso principal el cual se basa en una estructura “control & simulation loop” esta estructura es primordial ya que permite la ejecución en tiempo real del algoritmo, además que permite el uso de algunos bloques especiales, como las funciones de transferencia, que facilitan la realización del proceso. Antes de iniciar la ejecución de la estructura de simulación y control se definen canales para lectura y escritura

de señales analógicas, que corresponden a entradas y salidas analógicas de los puertos A (AO0) y C (AO0, AO1, AI0) de la tarjeta myRIO. Estos canales leen los voltajes de la etapa de acondicionamiento de señales del encoder incremental, canal AI0 del puerto C, y generan señales de control a la etapa de potencia, canales AO0 y AO1 del puerto C, y un voltaje de referencia de 1.01V para la etapa de acondicionamiento de señales de los termistores, canal AO0 del puerto A.

Los voltajes de los amplificadores de instrumentación, que son proporcionales a las temperaturas, se adquieren en el programa que está en la PC, pero se tiene acceso a ellos a través de las variables compartidas `vout1` y `vout2`, de esta forma, en el programa que se encuentra en la tarjeta myRIO se hace la conversión de estos voltajes a temperatura en grados centígrados utilizando el programa propuesto en [12]. Finalmente, es importante mencionar que este programa no tiene un panel de control, ya que el usuario no puede interactuar directamente con él.

El programa que se ejecuta en la PC tiene dos objetivos; el primero es permitir la interacción del usuario con el programa anterior y el segundo es que, debido a la falta de entradas analógicas con un rango de $\pm 10V$ en la tarjeta myRIO, se tuvo que utilizar una tarjeta DAQ adicional, la cual no puede utilizarse dentro del programa de la myRIO, por lo que en este programa se hace la captura de los voltajes de los amplificadores de instrumentación y se escriben en las variables compartidas correspondientes.

Este programa sí cuenta con un panel de control, el cual se muestra en la figura 4.11. Como se comentaba anteriormente se utilizaron variables compartidas para interactuar entre los programas que se ejecutan en la tarjeta myRIO RT y la PC, estas variables están ligadas a los controles e indicadores adecuados para mostrarnos información en forma numérica o en forma de gráficas o introducir información a través de controles.

El diagrama de bloques de este programa se observa en la figura 4.12 el cual se basa en una estructura “While loop” y usando un canal de entradas para las DAQ, ya que se utilizando la tarjeta de adquisición de datos 9219, se captura la información de los voltajes de los

[illegible]

54

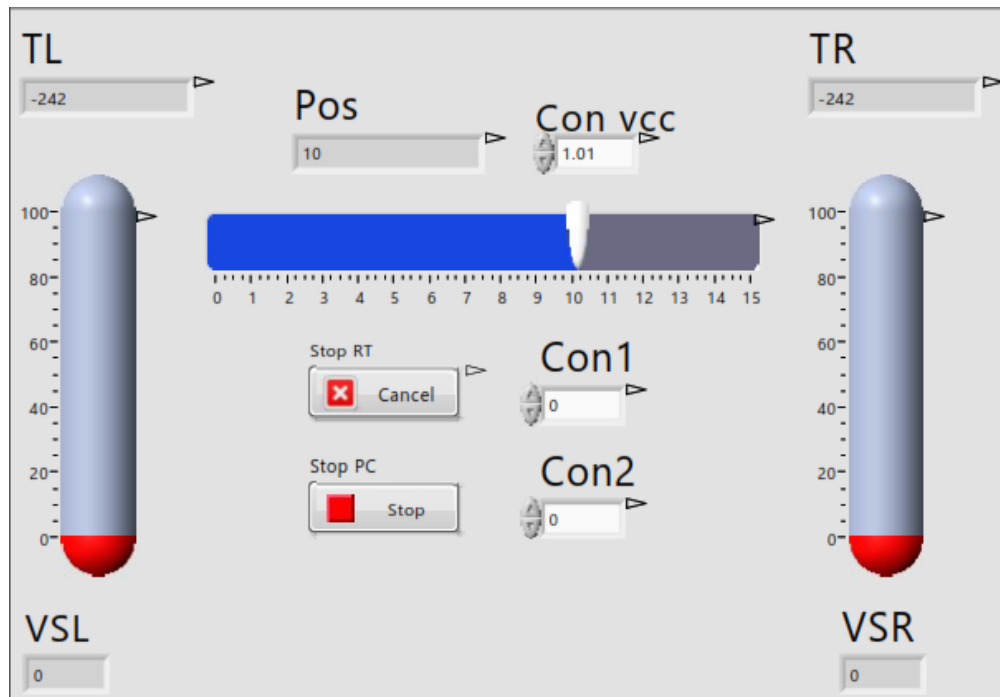


Figura 4.11 Panel Frontal de VI PC.

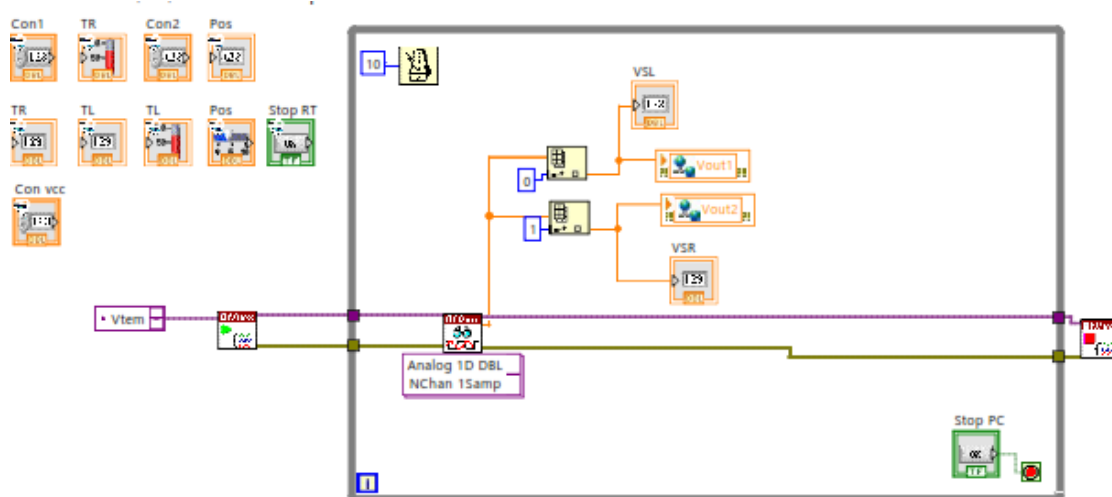


Figura 4.12 Diagrama de bloques de VI PC.

4.5. Caracterización de los resortes de nitinol

Una vez que todos los elementos que forman el prototipo se encuentran operando adecuadamente, se realiza un último experimento, el cual tiene la finalidad de analizar la histéresis que presentan los resortes de nitinol.

En la literatura se presenta principalmente la caracterización teórica y experimental del fenómeno de histéresis presente en alambres de nitinol, ver por ejemplo [24], [25] y [26]. Por otro lado, en otras publicaciones se han propuesto modelos dinámicos basados en las leyes físicas aplicables a este tipo de materiales [27], [28], sin embargo, estos modelos son demasiado complejos y no son útiles para el diseño de controladores. Finalmente, en las publicaciones que proponen algoritmos de control para mecanismos con nitinol, se proponen modelos simplificados que permiten el diseño de dichos controladores [29].

En esta sección se hace una caracterización de la constante k del resorte de nitinol con respecto a la temperatura y de esta forma identificar el lazo de histéresis que presenta. Sin embargo, en este análisis experimental se asume que solo se presentan deformaciones elásticas en el material y se desprecian las deformaciones plásticas. A pesar de esto, se considera que el resultado de esta caracterización puede ser útil en investigaciones futuras sobre el diseño de controladores.

El experimento consiste en medir la constante k del resorte para diferentes temperaturas utilizando la estructura que se muestra en la figura 4.13. Aquí un extremo del resorte se sujeta a una viga, mientras que en el otro extremo se sujeta a una masa de un peso conocido. Para cada temperatura el resorte tiene cierta longitud $y(t)$, y basados en la ecuación básica que define la fuerza que genera un resorte.

$$F_k(t) = ky(t)$$

Considerando que la dinámica del sistema alcanza su estado estable, es decir cuando el resorte alcanza una posición constante $y(t) = y_c$ y asumiendo que la fuerza $F_k(t) = mg$, entonces se tiene que.

$$k = \frac{mg}{y_c}$$

Se aplican escalones de voltaje, que ocasionan escalones de corriente, al resorte a través de la etapa de potencia y se espera a que el resorte alcance una longitud constante, se mide la temperatura y la longitud del resorte. Posteriormente se incrementa el voltaje y se vuelve a medir la temperatura y la longitud en estado estable. Este proceso se hace hasta cierta temperatura máxima y, para observar el fenómeno de histéresis, ahora se decrementa el voltaje en forma de escalones y se mide la temperatura y longitud en estado estable.

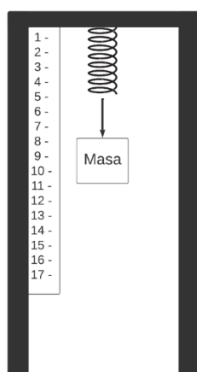


Figura 4.13 Esquema de maqueta del experimento para investigar el comportamiento de la constante k con respecto a cambios en la temperatura.

Se realizaron tres experimentos para dos masas diferentes; 0.178 Kg y 0.3169 Kg. Los resultados se muestran en la tabla 4.3 y figura 4.14 para 0.178 Kg, mientras que en la tabla 4.4 y figura 4.15 para 0.3169 Kg.

Tabla 4.3. Resultados de la medición de la constante k del resorte de nitinol con una masa de 0.178 Kg.

$T (^{\circ}C)_{exp1}$	k_{exp1}	$T (^{\circ}C)_{exp2}$	k_{exp2}	$T (^{\circ}C)_{exp3}$	k_{exp3}
25.9	58.4406667	26.7	54.788125	26	58.4406667
26.1	56.5554839	26.3	51.5652941	26	56.5554839
26.1	56.5554839	26.2	51.5652941	26	58.4406667
26.2	56.5554839	26.2	53.1278788	25.8	58.4406667
26.6	58.4406667	26.8	53.1278788	26.9	58.4406667
39.4	109.57625	39.9	97.4011111	41.2	125.23
47.4	125.23	47.7	103.130588	51.6	134.863077
53	125.23	51.4	116.881333	57.9	146.101667
56.8	134.863077	56.3	116.881333	63.5	146.101667
63	134.863077	65	134.863077	73.7	159.383636
58	134.863077	58.7	125.23	67	146.101667
55.8	125.23	56.4	125.23	60	146.101667
49.3	116.881333	50	116.881333	53.8	134.863077
41.3	109.57625	42	109.57625	47.1	125.23
27.7	56.5554839	28.2	53.1278788	32.2	60.4558621
26.3	54.788125	26.9	51.5652941	26.8	54.788125
26	53.1278788	26.2	51.5652941	26.2	54.788125
26	53.1278788	26.1	51.5652941	26.1	54.788125

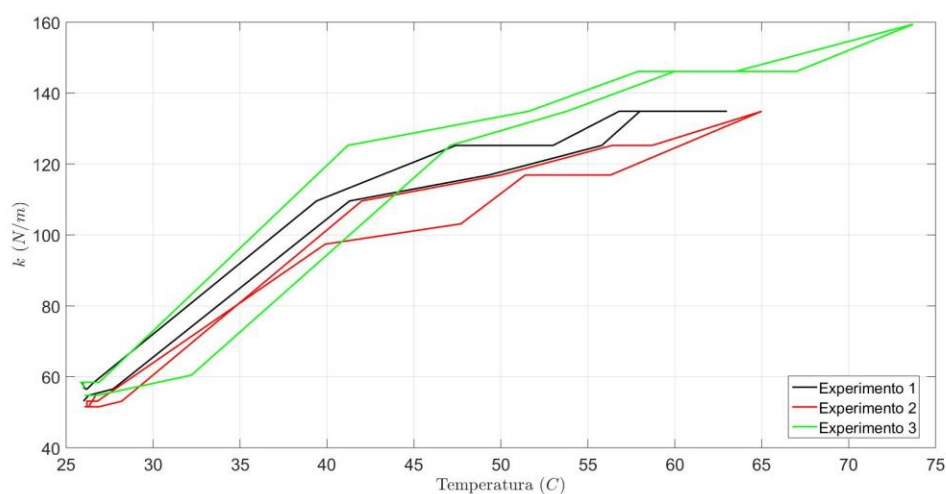


Figura 4.14. Resultados de la medición de la constante k del resorte de nitinol con una masa de 0.178 Kg. a) primer experimento, b) segundo experimento.

Tabla 4.4. Resultados de la medición de la constante k del resorte de nitinol con una masa de 0.3169 Kg.

$T (^{\circ}C)_{exp1}$	k_{exp1}	$T (^{\circ}C)_{exp2}$	k_{exp2}	$T (^{\circ}C)_{exp3}$	k_{exp3}
25.7	48.5253125	25.1	46.3525373	25.4	48.5253125
25.6	48.5253125	25.1	45.0089855	25.4	47.0548485
25.6	47.0548485	25.1	45.0089855	25.4	46.3525373
25.6	47.0548485	25.1	45.0089855	25.4	46.3525373
26.2	48.5253125	25.2	45.0089855	26	47.0548485
35.9	69.0137778	37.6	91.3417647	38.8	103.520667
43.8	115.022963	41.3	115.022963	44.8	119.446923
51.3	124.2248	48.2	129.400833	49.7	129.400833
55.8	129.400833	51.3	135.026957	53.1	129.400833
61.3	129.400833	61.1	141.164545	62	129.400833
56	129.400833	52	135.026957	53.6	129.400833
54.3	124.2248	49.7	135.026957	50	129.400833
47	124.2248	44	129.400833	45.6	124.2248
40	107.090345	40.4	124.2248	39.1	110.915
28.1	57.5114815	26	53.5451724	26.6	53.5451724
25.8	48.5253125	25.6	47.0548485	25.9	48.5253125
25.7	47.7787692	25.5	45.6708824	25.8	47.7787692
25.6	47.7787692	25.4	45.6708824	25.7	47.0548485
25.6	47.7787692	25.4	45.6708824	25.4	45.6708824

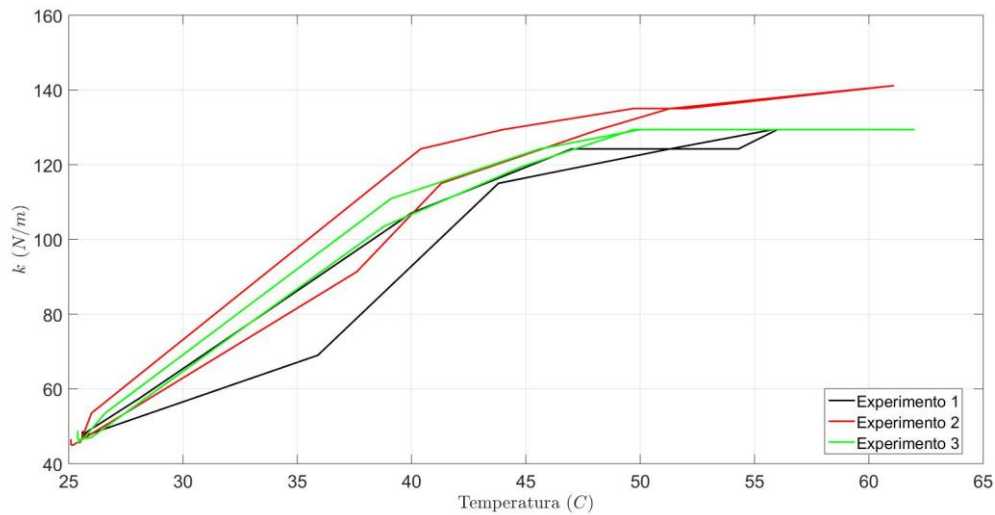


Figura 4.15. Resultados de la medición de la constante k del resorte de nitinol con una masa de 0.3169 Kg.

Es importante observar que, para ambos casos de la masa, el rango de valores de la constante del resorte toma aproximadamente el mismo rango de valores, en todos los casos se presenta un lazo de histéresis, aunque con diferente ancho todos ellos. Esto era de esperarse ya que se están despreciando diferentes fenómenos como las deformaciones plásticas y fenómenos no lineales en el comportamiento del resorte.

Capítulo 5. Implementación de un controlador PID

Con el objetivo de analizar el comportamiento del actuador en un sistema en lazo cerrado, figura 5.1, en este capítulo se aplican controladores Proporcional (P) y Proporcional - Integral (PI) para resolver los problemas de regulación y seguimiento de trayectorias. Lo que motiva a usar este tipo de controladores es que en muchos artículos recientes se han empleado variantes del controlador PID para el control de mecanismos basados en aleaciones con memoria de forma y, aunque no se obtiene un desempeño muy preciso, con estos experimentos se ilustra el comportamiento en lazo cerrado, y se establece un antecedente para que en un futuro se puedan diseñar controladores robustos que mejoren el desempeño del sistema en lazo cerrado.

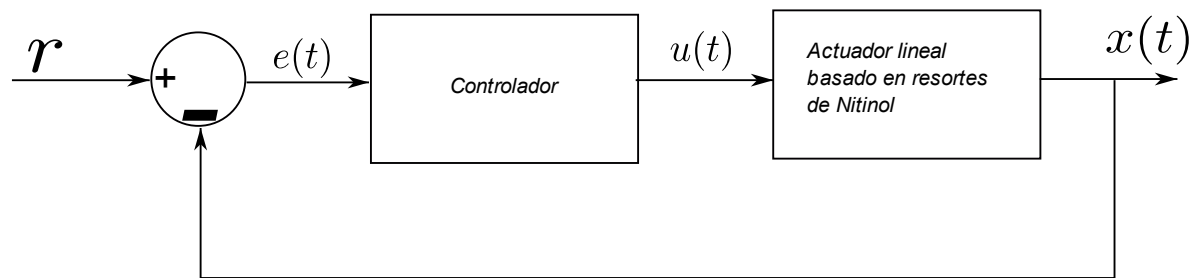


Figura 5.1. Diagrama a bloques del sistema en lazo cerrado.

En primer lugar, se aplicó un controlador proporcional para resolver el problema de regulación; $u(t) = k_p e(t)$.

En las figuras 5.2, 5.3 y 5.4 se muestra el comportamiento del sistema para $k_p = 1$. En la figura 5.2 se puede observar que la salida del actuador, línea en color rojo, trata de alcanzar a la referencia, línea en color negro, sin embargo, hay un error en estado estacionario considerable, de aproximadamente 0.5 cm. Por otro lado, la señal de control toma valores

entre $\pm 2.5V$, lo que está dentro del rango de operación de la etapa de potencia, su comportamiento se muestra en la figura 5.3. Finalmente, el comportamiento de las temperaturas en ambos resortes se presenta en la figura 5.4, aquí se puede observar que el resorte derecho alcanza mayores temperaturas a pesar de que los niveles de la señal de control en ambos resortes son muy similares y que, como se ha mostrado previamente, sus modelos dinámicos de la temperatura son muy similares. Es muy probable que esta diferencia en el comportamiento de la temperatura se debe a fenómenos no lineales que no se han considerado en el modelo.

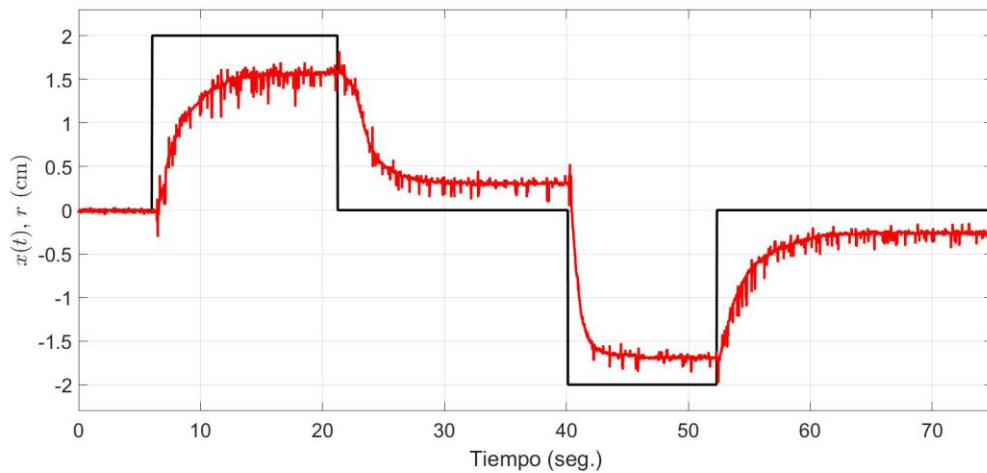


Figura 5.2. Señal de referencia, línea negra, y salida del actuador lineal, línea roja, con un controlador P donde $k_p = 1$, para resolver el problema de regulación.

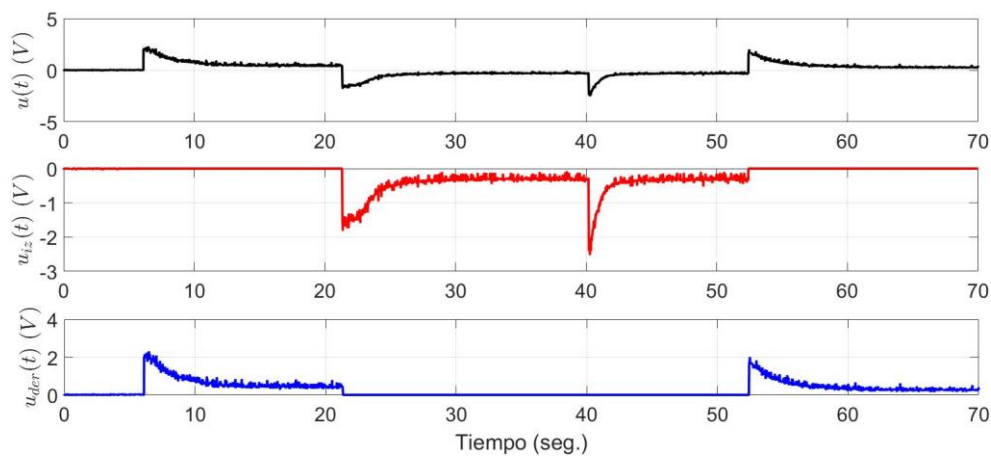


Figura 5.3. Comportamiento de las señales de control total y la que se aplica en cada resorte del actuador lineal con un controlador proporcional donde $k_p = 1$.

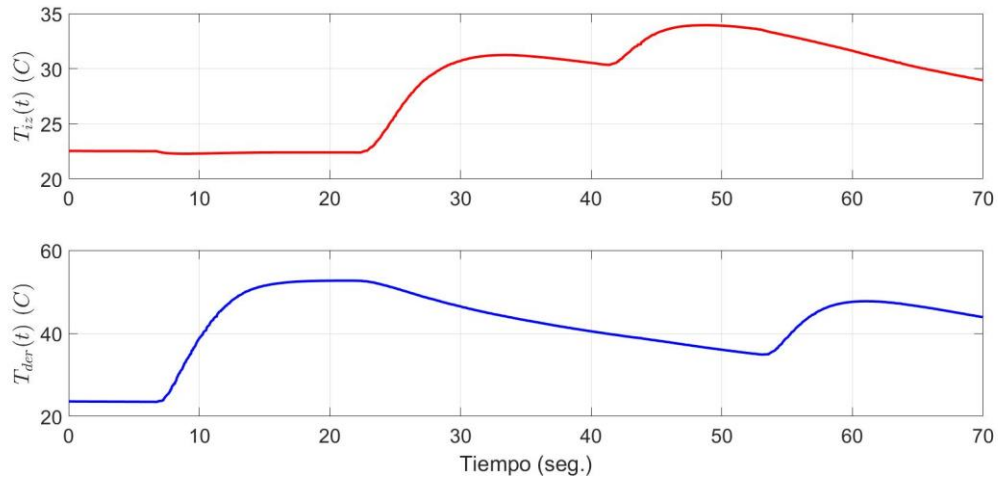


Figura 5.4. Comportamiento de la temperatura en cada resorte del actuador lineal con un controlador proporcional donde $k_p = 1$.

Para disminuir el error en estado estable se incorpora la acción integral, formando un controlador PI. El desempeño del sistema en lazo cerrado con este controlador, donde $k_p = 4$, $k_i = 0.3$, se muestra en las figuras 5.5, 5.6 y 5.7. Aquí se puede observar que el error en estado estacionario ha disminuido considerablemente, pero al mismo tiempo la señal de control ha incrementado considerablemente, alcanzando valores entre $\pm 8V$, sin embargo, la temperatura no incrementa considerablemente con respecto al caso con el controlador P.

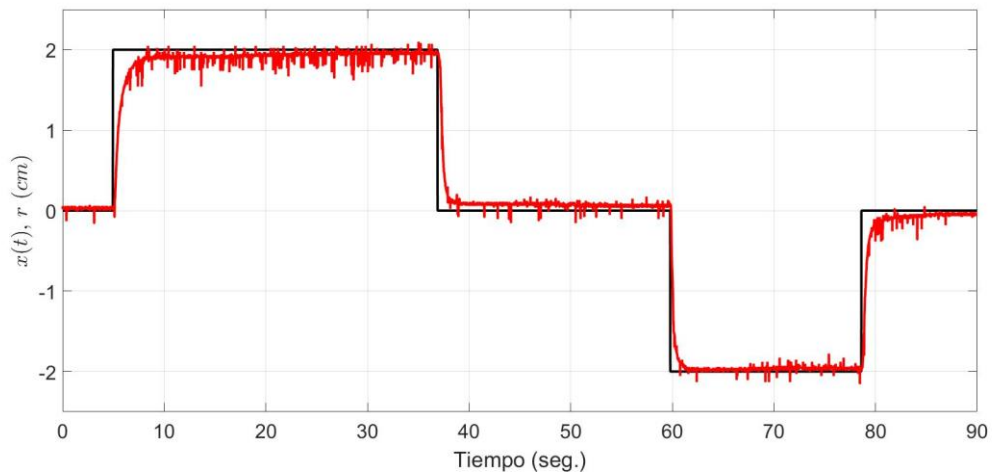


Figura 5.5. Señal de referencia y comportamiento de la salida del actuador lineal con un controlador proporcional donde $k_p = 4$, $k_i = 0.3$.

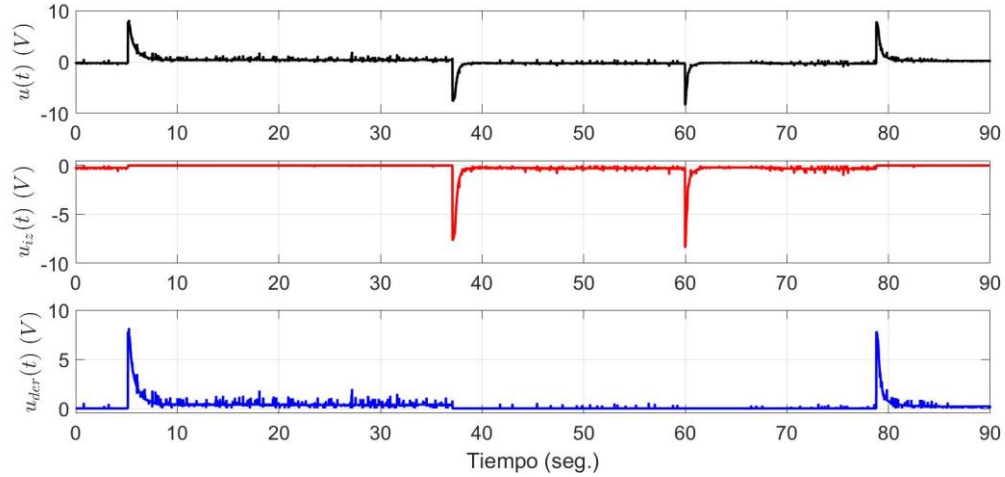


Figura 5.6. Comportamiento de las señales de control total y la que se aplica en cada resorte del actuador lineal con un controlador proporcional donde $k_p = 4$, $k_i = 0.3$.

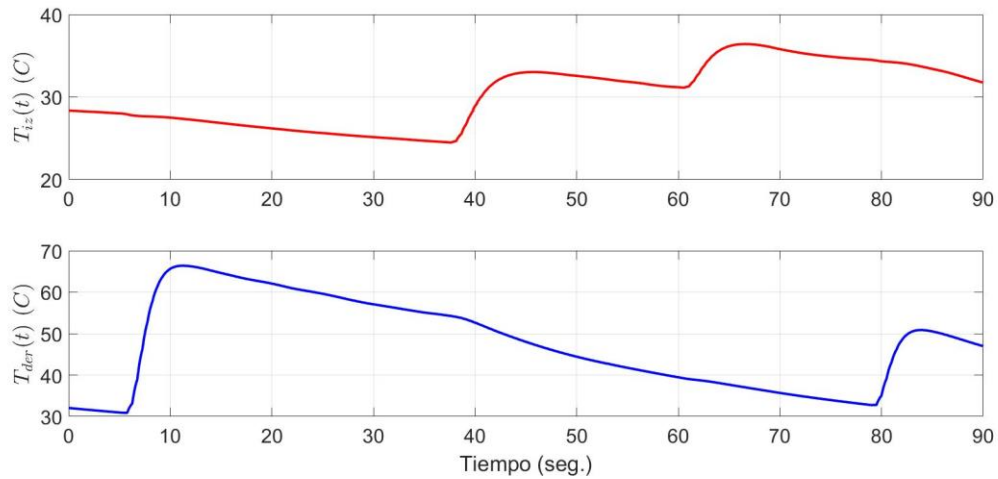


Figura 5.7. Comportamiento de la temperatura en cada resorte del actuador lineal con un controlador proporcional donde $k_p = 4$, $k_i = 0.3$.

Para el caso de seguimiento de trayectorias es bien sabido que el controlador PID o alguna de sus variantes P, PD, PI no resuelven el problema de seguimiento de trayectorias con una alta precisión, pero se puede obtener un resultado aceptable en cierto tipo de plantas aplicando una adecuada sintonización de las ganancias. A continuación, se muestran los resultados del desempeño del sistema en lazo cerrado aplicando una referencia variante en el tiempo.

En las figuras 5.8, 5.9 y 5.10 se presenta el desempeño de un controlador proporcional donde $k_p = 4$. En la figura 5.8 se observa que la posición del actuador lineal, línea roja, se aleja demasiado de la referencia, línea negra, principalmente al moverse en el sentido negativo. La figura 5.9 muestra el comportamiento de las señales de control, en donde nuevamente se observa que tienen una magnitud alrededor de $\pm 2V$. Finalmente, en la figura 5.10 se muestra el comportamiento de la temperatura en los resortes, en donde nuevamente se puede observar que el resorte derecho se calienta mucho más que el resorte izquierdo a pesar de que la magnitud de las señales de control en cada resorte es muy similar.

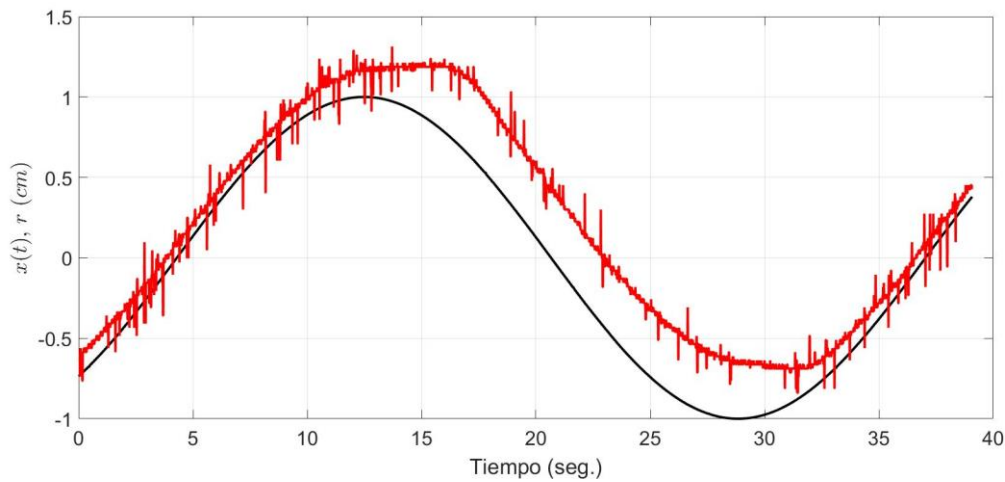


Figura 5.8. Señal de referencia y comportamiento de la salida del actuador lineal con un controlador proporcional donde $k_p = 4$.

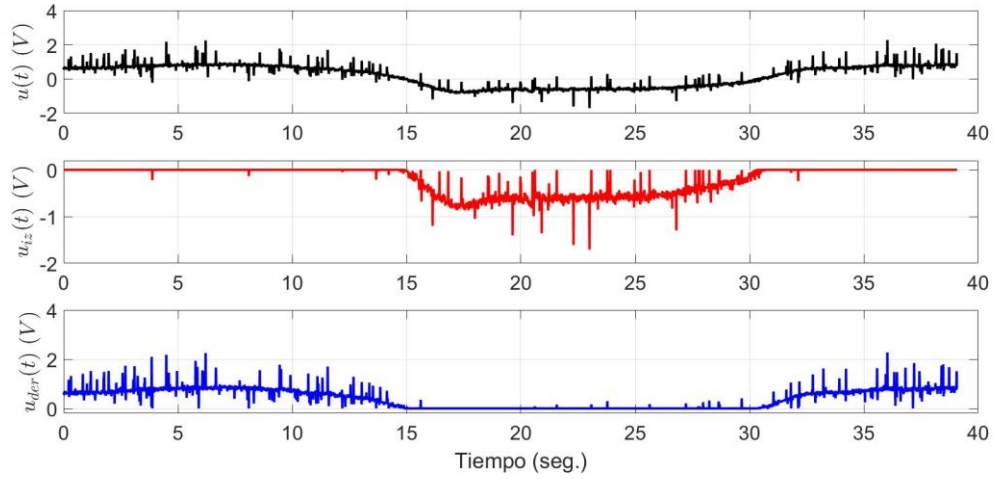


Figura 5.9. Comportamiento de las señales de control total y la que se aplica en cada resorte del actuador lineal con un controlador proporcional donde $k_p = 4$.

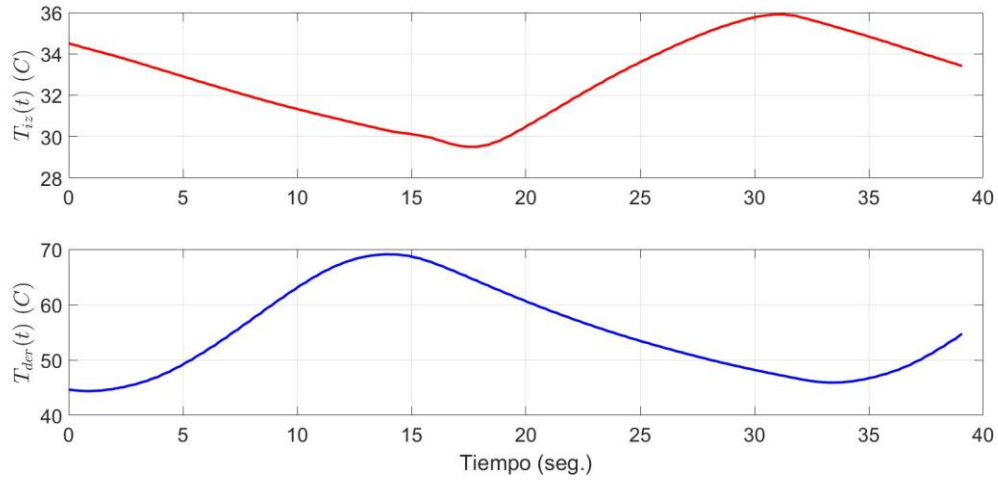


Figura 5.10. Comportamiento de la temperatura en cada resorte del actuador lineal con un controlador proporcional donde $k_p = 4$.

Para disminuir el error entre la señal de referencia y la salida del actuador se agregó la acción integral, es decir se aplica un controlador PI donde $k_p = 4, k_i = 0.3$. Los resultados del sistema en lazo cerrado se muestran en las figuras 5.11, 5.12 y 5.13. En estas figuras se puede observar que el error disminuye considerablemente, aunque el error en estado estable sigue siendo considerable. Por otro lado, a diferencia del caso de regulación, en este caso la magnitud de las señales de control no incrementa. Finalmente, el comportamiento de las temperaturas es oscilatorio con una amplitud mayor en el resorte derecho. Es

interesante notar que el comportamiento del resorte izquierdo es más parecido a una oscilación senoidal que en el resorte derecho, en donde hay más deformaciones.

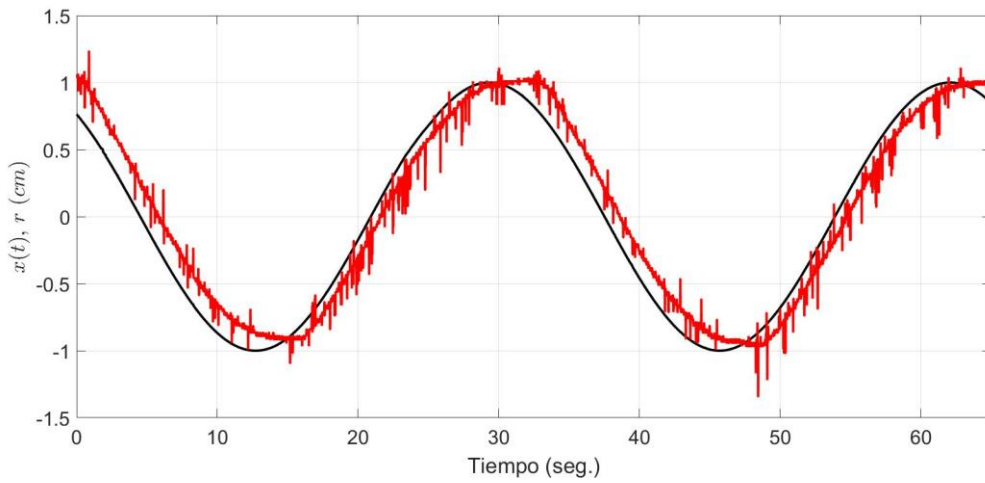


Figura 5.11. Señal de referencia y comportamiento de la salida del actuador lineal con un controlador proporcional-integral donde $k_p = 4$, $k_i = 0.3$.

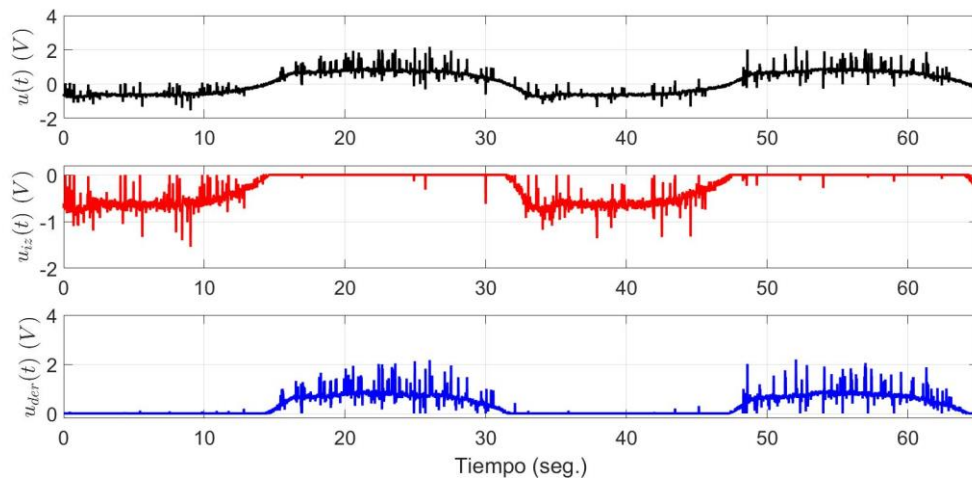


Figura 5.12. Comportamiento de las señales de control total y la que se aplica en cada resorte del actuador lineal con un controlador proporcional donde $k_p = 4$, $k_i = 0.3$.

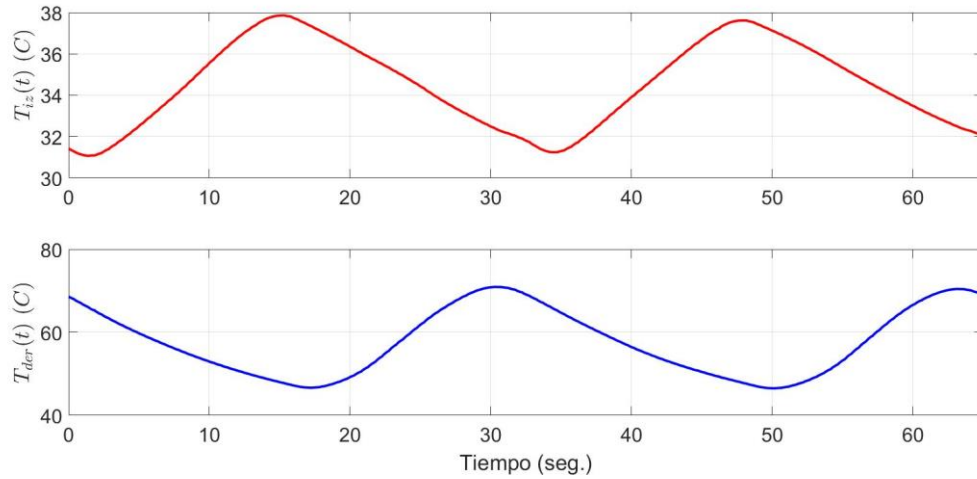


Figura 5.13. Comportamiento de la temperatura en cada resorte del actuador lineal con un controlador proporcional donde $k_p = 4$, $k_i = 0.3$.

Con estos resultados experimentales se puede concluir que el prototipo de actuador lineal basado en resortes de nitinol funciona adecuadamente y es una planta que servirá en el diseño de algoritmos de control que mejoren el desempeño del control P y PI que se ha mostrado en este trabajo.

Capítulo 6. Conclusiones y trabajo futuro

El prototipo de actuador lineal basado en resortes de nitinol que se desarrolló en este trabajo de tesis ha cumplido satisfactoriamente con las metas establecidas al inicio del proyecto, las cuales fueron diseñar y construir un actuador lineal utilizando resortes de nitinol que permitiera el desarrollo de investigaciones relacionadas al modelado del actuador, su análisis dinámico y el diseño de algoritmos de control robusto que permitan resolver los problemas de regulación y seguimiento de trayectorias.

En este sentido, con los resultados presentados en el documento, se ha mostrado que el actuador opera adecuadamente desde el punto de vista mecánico y eléctrico; permite el cambio de los resortes, así como la instalación de los sensores con facilidad. La etapa de potencia suministra la corriente que se requiere para un calentamiento rápido.

En lo que se refiere a la instrumentación, gracias a las etapas de acondicionamiento de señales para los sensores, este actuador se puede controlar con diversas plataformas como myRIO, DAQ o dSPACE, ya que todas las señales de entrada y salida son analógicas.

Finalmente, se ha ilustrado su desempeño en lazo cerrado aplicando controladores P y PI, obteniendo buenos resultados en regulación y un resultado aceptable en seguimiento de trayectorias. Aquí se pudo observar que el actuador se puede mover con rapidez una distancia considerable.

De manera general, en las palabras de un estudiante, este trabajo fue un reto personal, mental y de habilidades, ya que abrir paso a través de un tema nuevo siempre presenta muchas incertidumbres al visualizar todo lo que engloba un trabajo de este nivel. El tema me deja con demasiadas ganas de seguir descubriendo cosas nuevas e innovar, tanto en diseños y sistemas, con la intención de poder aplicar esto en un proceso real y funcional con estos materiales con memoria de forma. Me agradó realizar este proyecto y aplicar habilidades adquiridas en mi carrera y adquirir nuevos conocimientos y habilidades.

Solo al trabajar con este material se puede entender la practicidad que este puede llegar a tener en aplicaciones de ingeniería, a pesar de lo complejo que puede llegar a ser trabajar con estos materiales y en particular los resortes de nitinol.

Una de sus mayores características es la magnitud de la fuerza generada en relación con el tamaño y peso de los resortes. Así mismo, en los experimentos muestran que no es necesario demasiada corriente para poder llevar estos resortes a su mayor etapa de fuerza.

Pero las investigaciones no terminan solo en estos experimentos ya que es necesario profundizar aún más, ya que incluso mientras se realizaban los experimentos utilizando dos resortes técnicamente iguales uno parecía no tener un incremento de temperatura tan brusco en comparación del otro, lo que genera mayor velocidad en su movimiento, todo esto a pesar de que su modelo dinámico que relaciona el voltaje aplicado y su temperatura son muy similares. Esto es algo interesante ya que en [12] también se reporta este fenómeno a pesar de que el mecanismo es diferente.

Las actividades que se pueden realizar en un futuro son las siguientes. Desarrollar un modelo dinámico del actuador, incluyendo la identificación de parámetros. Este modelo debe ser útil para el desarrollo de controladores.

Una segunda actividad es el desarrollo de controladores robustos para regulación y seguimiento de trayectorias, esto seguramente implicará el desarrollo de observadores de estado que estimen las variables de estado no medidas, como la velocidad del actuador.

Por último, es investigar si este actuador puede presentar dinámica compleja, como ciclos límite y caos.

Referencias

- [1] Bolton, W. (2003). *Mechatronics: electronic control systems in mechanical and electrical engineering*. Pearson Education.
- [2] Lagoudas, D. C. (Ed.). (2008). *Shape memory alloys: modeling and engineering applications*. Springer Science & Business Media.
- [3] York, P. A., & Wood, R. J. (2019, May). Nitinol living hinges for millimeter-sized robots and medical devices. In 2019 International Conference on Robotics and Automation (ICRA) (pp. 889-893). IEEE.
- [4] Reynaerts, D., Peirs, J., & Van Brussel, H. (1999). Shape memory micro-actuation for a gastro-intestinal intervention system. *Sensors and Actuators A: physical*, 77(2), 157-166.
- [5] Britz, R., Motzki, P., & Seelecke, S. (2019, August). Scalable bi-directional SMA-based rotational actuator. In *Actuators* (Vol. 8, No. 3, p. 60). MDPI.
- [6] Joey, Z. G., Chang, L., & Pérez-Arancibia, N. O. (2021). Preisach-model-based position control of a shape-memory alloy linear actuator in the presence of time-varying stress. *Mechatronics*, 73, 102452.
- [7] Liang, C., & Rogers, C. A. (1997). Design of shape memory alloy actuators. *Journal of intelligent material systems and structures*, 8(4), 303-313.
- [8] Liang, C., & Rogers, C. A. (1997). One-dimensional thermomechanical constitutive relations for shape memory materials. *Journal of intelligent material systems and structures*, 8(4), 285-302.
- [9] Lee, S. H., & Kim, S. W. (2019). Improved position control of shape memory alloy actuator using the self-sensing model. *Sensors and Actuators A: Physical*, 297, 111529.
- [10] Sánchez Ozuna, J. A. (2019). Rehabilitación y control de un robot manipulador industrial RV-M1, Tesis de Licenciatura. Universidad Autónoma de Baja California

- [11] Free CAD Designs, Files & 3D Models | The GrabCAD Community Library. (2022). Grabcad.com. <https://grabcad.com/library/rotary-encoder-lpd3806-360bm-g5-24c-1>
- [12] Moreno Rodríguez, L.F. (2021). Control de un mecanismo rotacional de un grado de libertad utilizando la plataforma myRio y actuadores de Nitinol, Tesis Licenciatura. Universidad autónoma de baja california
- [13] Preciado-López, M. F., & Manzano, O. G. I. (2017). INTERFAZ DE DESARROLLO PARA EL SISTEMA DE HARDWARE EMBEBIDO MYRIO. *Jóvenes en la Ciencia*, 3(2), 2480-2484.
- [14] Kellogg, J. (2020). Nitinol in plain language. Kellogg's Research Labs. <https://www.kelloggsresearchlabs.com/>
- [15] Encoder Products Company. (2015). An Introduction to Encoder, Encoder Product Company. Encoder.com. <https://www.encoder.com>.
- [16] Duerig, T. W., Melton, K. N., & Stöckel, D. W. C. M. (2013). Engineering aspects of shape memory alloys. Butterworth-Heinemann.
- [17] Vishay Intertechnology, Inc. (2021). NTCLE317E4103SBA Datasheet. Recuperado el 23 de octubre de 2022. Recuperado de <https://www.vishay.com>
- [18] Patterson, G., & Sobral, M. (2007). Efecto Peltier. Departamento de Física FCEyN, Universidad de Buenos Aires. Dic.
- [19] Zayas-Gato, F., Quintián, H., Jove, E., Casteleiro-Roca, J. L., & Calvo-Rolle, J. L. (2020). Diseño de controladores PID. Universidade da Coruña, Servizo de Publicacións.
- [20] Medina, M. A. P. L., Saba, M. G. H., de Guevara Durán, M. E. L., & Silva, M. J. H. (2011). Controladores PID y controladores difusos. *Revista de ingeniería industrial*, 5(1).

- [21] ROSALENY, R. T. (2021). Encoders Ópticos. Descargado de [http://www. infoplc. net/files/documentacion/instrumentacion_deteccion/infoPLC_net_ENCODERS_OPTI COS. pdf](http://www.infoplc.net/files/documentacion/instrumentacion_deteccion/infoPLC_net_ENCODERS_OPTI COS.pdf).
- [22] Encoder Products Company. (2023). Encoder.com. [https://www.encoder.com/search- results?term=what+is+encoder+incremental](https://www.encoder.com/search-results?term=what+is+encoder+incremental)
- [23] Biomaterial, U., Biomaterial, B., Algo Gómez López, I., En, M., Felipe Díaz, I., & Castillo, D. (n.d.). *FACULTAD DE ESTUDIOS SUPERIORES CUAUTITLÁN NITINOL NITINOL NITINOL NITINOL MEMORIA DE FORMA MEMORIA DE FORMA MEMORIA DE FORMA MEMORIA DE FORMA*. http://olimpia.cuautitlan2.unam.mx/pagina_ingenieria/mecanica/mat/mat_mec/m6/Ni tinol_un%20biomaterial.pdf
- [24] Dunlop, R., & Garcia, A. C. (2002, November). A nitinol wire actuated stewart platform. In *Australasian conference on robotics and automation* (pp. 27-29).
- [25] Wang, Q., & Su, C. Y. (2006). Robust adaptive control of a class of nonlinear systems including actuator hysteresis with Prandtl–Ishlinskii presentations. *Automatica*, 42(5), 859-867.
- [26] Chen, M., & Ge, S. S. (2015). Adaptive neural output feedback control of uncertain nonlinear systems with unknown hysteresis using disturbance observer. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 62(12), 7706-7716.
- [27] Liang, C., & Rogers, C. A. (1997). One-dimensional thermomechanical constitutive relations for shape memory materials. *Journal of intelligent material systems and structures*, 8(4), 285-302.
- [28] Liang, C., & Rogers, C. A. (1997). Design of shape memory alloy actuators. *Journal of intelligent material systems and structures*, 8(4), 303-313.

- [29] Villoslada, Á., Escudero, N., Martín, F., Flores, A., Rivera, C., Collado, M., & Moreno, L. (2015). Position control of a shape memory alloy actuator using a four-term bilinear PID controller. *Sensors and Actuators A: Physical*, 236, 257-272.
- [30] *Definition of hysteresis*. (2023, March 6). Collinsdictionary.com; HarperCollins Publishers Ltd. <https://www.collinsdictionary.com/es/diccionario/ingles/hysteresis>