

Control conmutado de un sistema mecánico lineal agonista-antagonista Switched control from a agonist-antagonist mechanical linear system

R. Cortez ^{a,*}, G. Cubas ^b, M. Sandoval ^c

^aUnidad Profesional Interdisciplinaria en Ingeniería y Tecnologías Avanzadas, Instituto Politécnico Nacional, 07340, Gustavo A. Madero, Ciudad de México, México.

^bDepartamento de Mecatrónica, Centro de Investigación y de Estudios Avanzados del IPN, 07340, Gustavo A. Madero, Ciudad de México, México.

^cUnidad Profesional Interdisciplinaria de Energía y Movilidad, Instituto Politécnico Nacional, 07340, Gustavo A. Madero, Ciudad de México, México.

Resumen

En este trabajo se presenta una propuesta para el control de un sistema mecánico lineal actuado mediante aleaciones con memoria de forma (AMF) en configuración tipo resorte utilizando un esquema de colocación tipo agonista-antagonista. El cambio de la posición generado por los resortes de AMF se basa en la existencia de un diferencial de fuerza provocado por un incremento de la temperatura en los resortes e inducido al aplicar una corriente entre sus terminales. Con la finalidad de regular la posición en el actuador se propone el uso de un control conmutado para activar el resorte correspondiente al sentido de movimiento que se requiera para alcanzar una posición específica. Se presentan resultados tanto del sistema en lazo abierto como en lazo cerrado al utilizar la ley de control conmutada.

Palabras Clave: Aleaciones de memoria de forma, control conmutado, histéresis, sistema no-lineal, agonista-antagonista

Abstract

This paper presents a proposal for the control of a linear mechanical system actuated by shape memory alloys (AMF) in a spring-like configuration using an agonist-antagonist placement scheme. The change in position generated by the AMF springs is based on the existence of a force differential caused by an increase in temperature in the springs and induced by applying a current between their terminals. In order to regulate the position in the actuator, the use of a switched control is proposed to activate the spring corresponding to the direction of movement required to reach a specific position. Results are presented for both the open-loop and closed-loop systems using the switched control law.

Keywords: Shape memory alloy, switched control, hysteresis, nonlinear system, agonist-antagonist

1. Introducción

El desarrollo de sistemas de actuación dentro del ámbito de la robótica suave ha tenido como finalidad la implementación de movimientos no tradicionales (El-Atab et al. (2020), Sachyani Keneth et al. (2021)) con la finalidad de dar lugar a robots que sean capaces de emular movimientos de alta complejidad.

Como resultado de los avances en este tipo de robótica se han encontrado diversas formas de actuación no tradicionales como lo son los motores de corriente directa, motores a pasos u otro tipo de actuadores electromecánicos (Demofonti et al. (2021)). Dentro de este tipo de actuadores para robótica suave se tienen principalmente los siguientes: Los actuadores neumáticos (Zolfagharian et al. (2020)) consisten en dispositi-

vos realizados en un material flexible con un centro hueco, tal que al introducir aire mediante presión este cambia su forma dando como resultado un movimiento que dependerá de la forma del actuador y el como se encuentra implementado mecánicamente en el robot. Los actuadores electro-estimulados (Shin et al. (2021)) consisten en un tipo especial de material que es capaz de generar una deformación en estructura mediante la aplicación de un campo eléctrico, este tipo de actuadores tienen la particularidad de que varias de las opciones desarrolladas tienen bajos niveles de toxicidad en el organismo. Por otra parte, las Aleaciones de Memoria de Forma (AMF) son un tipo especial de material que son capaces de regresar a su forma original cuando se produce un incremento de la temperatura, este incremento se puede inducir mediante la aplicación de corriente

* Autor para correspondencia: rcortezv@ipn.mx

Correo electrónico: rcortezv@ipn.mx (Ricardo Alan Cortez-Vega), gabriel.cubas@cinvestav.mx (Gabriel Cubas-Perfecto), masandovalc@ipn.mx (Marco Antonio Sandoval-Chileño)

Historial del manuscrito: recibido el 29/04/2022, última versión-revisada recibida el 13/07/2022, aceptado el 15/08/2022, publicado el 30/11/2022. DOI:<https://doi.org/10.29057/icbi.v10iEspecial6.9115>



sobre los extremos del material (Farber et al. (2020)).

A pesar de los desarrollos realizados para la implementación de técnicas no convencionales, este tipo de actuadores tienen propiedades que pueden ser de interés para la implementación de robots tradicionales. En particular las AMF se presentan como una opción prometedora para la miniaturización de sistemas robóticos dada su relación de peso/potencia generada (Mabe et al. (2020)), además de que no requieren de un control especializado del entorno como es el caso de los electroestimulados (Khan et al. (2018)) o una infraestructura adicional como es el caso de los sistemas de compresión para los actuadores neumáticos (Tawk and Alici (2021)). Por lo que un estudio de como se pueden implementar los AMF de forma que emulen los movimientos básicos de la robótica es altamente deseable, en especial ya que este tipo de materiales presentan sus propios retos como es la presencia de histéresis en la fuerza generada (Wang et al. (2021)). La implementación de una estrategia de control para un sistema del tipo agonista-antagonista requiere que cada uno de los actuadores sea activado dependiendo del sentido del movimiento deseado. A su vez ya que el material solo puede ser calentado mediante la aplicación de corriente pero no se puede enfriar de la misma manera, la estrategia de control seleccionada será un control conmutado ya que esta permitirá activa el actuador correspondiente y cuando el sentido de movimiento requerido sea intercambiado se procederá a la activación del actuador opuesto y el apagado del que se estaba siendo activado.

La estructura del siguiente trabajo será la siguiente: En la Sección 2 se presentarán los preliminares del trabajo donde se incluye una descripción de las AMF, la idea básica de un sistema agonista-antagonista y el modelo dinámico de los AMF. El modelo dinámico del sistema agonista-antagonista y la estrategia de control conmutado se presentan en la Sección 3. La Sección 4 presenta los resultados obtenidos mediante las simulaciones numéricas, se muestra tanto un caso en lazo abierto como el caso en lazo cerrado con la implementación del esquema de control conmutado. Finalmente, en la Sección 5 se presentan las conclusiones del trabajo sobre la viabilidad de la implementación del movimiento lineal mediante AMF en sistemas robóticos tradicionales.

2. Preliminares

2.1. Aleaciones de Memoria de Forma

Las Aleaciones de Memoria de Forma (AMF) son un tipo especial de material que tiene la propiedad de regresar a una forma previamente definida cuando se produce un cambio entre sus fases. Este proceso de retorno a una forma definida da como resultado un desplazamiento o movimiento de la AMF, lo que les ha permitido ser una opción viable para la implementación de sistemas robóticos suaves.

Las fases que este material presenta son dos: La fase de *martensita* durante la cual el material presenta un comportamiento plástico similar a otra clase de aleaciones como lo son el estaño-plomo, esto implica que son fácilmente maleables y solamente generan una oposición residual al proceso de deformación. Por otra parte, la fase *austenita* se caracteriza por la presencia de una configuración fija de la estructura del material provocando el retorno a una forma predefinida. El cambio entre

una forma deformada y la forma predefinida de la fase de austenita da lugar a la generación de una fuerza por parte del material en oposición a las fuerzas externas que impidan el retorno a la posición predefinida. Por otro lado, si se pasa de la fase de austenita a martensita la forma del material se conservará siempre y cuando no exista una fuerza externa que deforme el material como se muestra en la Figura 1.

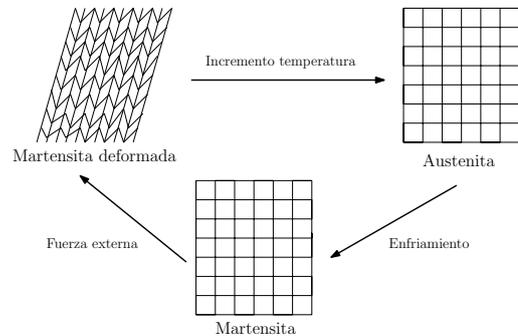


Figura 1: Esquema de cambio de fase de las AMF.

El cambio entre estas dos fases se ve generado por un cambio en la temperatura de la aleación, la fase de martensita se presenta a bajas temperaturas por lo que un proceso de calentamiento fuerza al material a entrar en fase de austenita y con ello regresar a la forma previamente programada. El que la fase de austenita se presente a temperaturas elevadas en conjunto con la naturaleza metálica los AMF permite que se fuerce el cambio de forma mediante la aplicación de corriente entre las terminales debido el efecto de Joule.

2.2. Sistema agonista-antagonista basado en Aleaciones de Memoria de Forma

Un sistema agonista-antagonista se basa en la idea de que existan dos fuentes de fuerza en contraposición que se encuentran fijas respecto a un marco de referencia propio para cada una de ellas de tal forma que un elemento intermedio denominado *posición móvil* (PM) puede desplazarse entre ambos marcos de referencia debido a la fuerza aplicada sobre el mismo como se presenta en la Figura 2. La primera de las fuentes de fuerza es llamada agonista, tal que cuando esta genera se activa y el antagonista se encuentra inactivo se producirá un desplazamiento de la PM en dirección del agonista. La segunda fuente de fuerza es llamada antagonista, cuando esta es activada y el agonista se encuentra inactivo se producirá un desplazamiento de la PM en dirección a el antagonista. Cuando tanto el agonista como el antagonista se encuentran activados, el sentido y la magnitud del desplazamiento dependerán de la relación de fuerzas generadas entre ambas fuentes de fuerza.

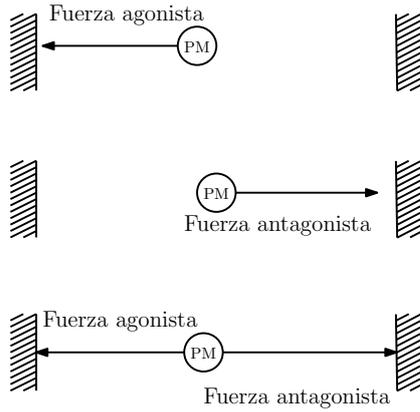


Figura 2: Esquema de funcionamiento de un sistema agonista-antagonista.

El proceso de implementación de un sistema agonista-antagonista basado en el uso de AMF requiere de que la forma previamente guardada en la aleación mediante el proceso de programación permita limitar la fuerza generada a que esta solo se manifieste sobre un eje específico de movimiento. Por ello es que se propone que la configuración de los AMF sea basada en una estructura tipo resorte (Bhatt et al. (2022)) en contracción, de tal manera que cuando este se encuentre inactivo y se comporte de manera plástica al aplicarle una fuerza de oposición su proceso de deformación sea naturalmente lineal. Cuando el resorte sea activado mediante el incremento de la temperatura el movimiento de contracción generado tendrá como resultado una fuerza lineal sobre el PM.

Para que este proceso de movimiento pueda ser llevado a cabo es necesario que tanto el resorte agonista como el resorte antagonista se encuentren sujetos a su propio marco de referencia como se muestra en la Figura 3. De igual manera estos deben sujetarse a la PM de tal manera que el efecto de las fuerzas se aplique sobre está, de tal forma provocando que el movimiento generado se deba a la relación de las fuerzas generadas por los resortes de AMF.

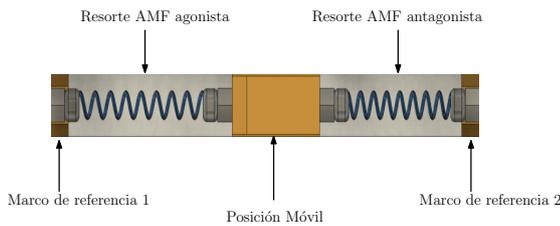


Figura 3: Esquema de estructura de un sistema agonista-antagonista utilizando AMF.

2.3. Modelo dinámico de un resorte de Aleaciones de Memoria de Forma

El modelo dinámico de un resorte basado en AMF (Cortez-Vega et al. (2018)) que permite determinar la fuerza generada por estos materiales en una configuración del tipo resorte puede ser visto como el caso clásico de un sistema no-lineal sujeto a perturbaciones (Khalil (2015)):

$$\begin{aligned} \dot{x} &= f(x, t, d) + g(u, t) \\ y &= h(x, \dot{x}, t) \end{aligned} \quad (1)$$

donde $x \in \mathbb{R}$ es el estado del sistema, el tiempo se define como t , el término $d \in \mathbb{R}$ corresponde a una perturbación externa, $u \in \mathbb{R}$ es la señal de control aplicada al sistema y el término $y \in \mathbb{R}$ es la salida del sistema.

Se considera que el estado del sistema x será la temperatura del resorte T de manera que esto se escribirá como:

$$\frac{dT}{dt} = \alpha u^2 - \beta(T - T_a(t)) \quad (2)$$

donde el término $\alpha \in \mathbb{R}^+$ y el término $\beta \in \mathbb{R}^+$ son los coeficientes de calentamiento y de disipación de calor respectivamente. El término T_a es la temperatura del ambiente donde se implemente el sistema agonista-antagonista, mientras que u corresponde a la corriente aplicada entre las terminales del resorte. Tal que $f(x, t, d) = -\beta(T - T_a(t))$ y el término $g(u, t) = \alpha u^2$.

Debe notarse que el hecho de que la señal de control se aplique de forma cuadrática representa el hecho de que independientemente del sentido de la corriente aplicada solo se puede inducir un incremento de la temperatura en el resorte. Por lo que a menos que se implemente un sistema de enfriamiento activo de forma independiente, el proceso de decremento de temperatura dependerá del coeficiente de disipación de valor β .

Las temperaturas máximas y mínimas alcanzables por el material dependerán del término de perturbación T_a , de forma que la temperatura mínima se definirá para el caso cuando $u = 0$ siendo entonces:

$$T_{\min} = T_a \quad (3)$$

Mientras que la temperatura máxima que se puede alcanzar será:

$$T_{\max} = \frac{\alpha u^2}{\beta} + T_a \quad (4)$$

Por otra parte, la función $h(\cdot)$ que expresa la salida y del sistema siendo esta la fuerza generada por resortes de AMF corresponde a un sistema de naturaleza híbrida que depende de la derivada de la temperatura para determinar la expresión a utilizar siendo descrito este fenómeno como sigue:

$$F = h\left(T, \frac{dT}{dt}\right) = \begin{cases} \frac{a_l}{1 + e^{-b_l(T-d_l)}} + c_l & \frac{dT}{dt} < 0 \\ \frac{a_u}{1 + e^{-b_u(T-d_u)}} + c_u & \frac{dT}{dt} \geq 0 \end{cases} \quad (5)$$

donde $a_l, b_l, c_l, d_l, a_u, b_u, c_u, d_u \in \mathbb{R}^+$ son los parámetros de la función de salida que describe la relación del estado de temperatura T y su derivada respecto a la fuerza generada por el resorte. La magnitud de a_l y a_u son la fuerza generada por el resorte al entrar en la fase de austenita. Los valores de b_l y b_u están relacionados a la tasa de crecimiento/decrecimiento de la fuerza, es esperable que el proceso de enfriamiento de como resultado una pérdida de fuerza a una velocidad mayor. Los términos c_l y c_u son la fuerza residual generada por el resorte cuando no está en la fase de austenita, corresponde a valores pequeños debido a el comportamiento plástico del material en la fase de martensita. Finalmente d_l y d_u son el valor de temperatura donde cada una de las etapas lleva la mitad de su decrecimiento entre el rango $[c_l, a_l + c_l]$ y $[c_u, a_u + c_u]$ respectivamente.

3. Control de sistema agonista-antagonista

3.1. Modelo dinámico del sistema agonista-antagonista

Dada la estructura mecánica presentada en la Sección 2.1 y el modelo dinámico con salida de Fuerza presentado en la Sección 2.2 se puede simplificar la posición z del PM mediante la siguiente expresión dinámica bajo condiciones ideales como:

$$\ddot{z} = \frac{1}{m}[F_n - F_a] \quad (6)$$

donde m es la masa del PM, F_a y F_n son la fuerza generada por el agonista y el antagonista respectivamente. En la Figura 4 se muestra el esquema de funcionamiento del sistema a considerar, se puede notar que z se encontrará acotado al intervalo $[0, z_{max}]$ ya que una vez alcanzada la máxima contracción no se presenta un desplazamiento adicional.

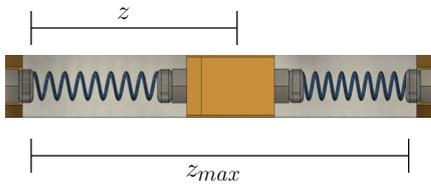


Figura 4: Cambio de posición en el sistema agonista-antagonista utilizando AMF.

Por lo que al introducir corriente como entrada en los resortes colocados se produce el incremento de la temperatura y con ello la generación de fuerza que produce el movimiento de PM.

3.2. Estrategia de control conmutado

Para regular la posición z se propone la utilización de un control conmutado que permita activar y desactivar los actuadores agonista y antagonista dependiendo de que fuerza sea necesario aplicar. Por lo que se proponen las siguientes expresiones de las leyes de control correspondientes a cada uno de ellos:

$$\begin{aligned} u_a &= \frac{K}{2} [\text{sign}(e) + 1] \\ u_n &= \frac{K}{2} [-\text{sign}(e) + 1] \end{aligned} \quad (7)$$

donde $e = z - z_d$ es el error de seguimiento respecto a la posición deseada z_d , mientras que K es un término de ganancia de la corriente suministrada tal que la T_{max} que se pueda obtener en los resortes de AMF sea suficiente como para que estos puedan entrar en la fase de austenita, sin embargo la amplitud de K debe ser limitada tal que la temperatura máxima obtenida no provoque un daño en la estructura del actuador debido a un incremento excesivo de la temperatura. La señal de control u_a se aplica al resorte agonista y la señal de control u_n se aplica al resorte antagonista. Por lo que si se desea llegar a una posición donde $e > 0$ al resorte agonista se le suministrará corriente haciendo que la fuerza de este se incremente, mientras el resorte antagonista se desenergizará provocando que exista un decremento en sus temperatura y por lo tanto empiece a generar una menor oposición al movimiento del agonista. En caso de que $e < 0$ el proceso invertirá los papeles del agonista con el antagonista.

4. Resultados de simulación

El proceso de simulación del modelo y de la ley de control resultante se realizará en el entorno de Simulink de Matlab 2021b ejecutado en una computadora con un procesador de 64-bits AMD Ryzen 5 1600X. La simulación utilizará el método de integración Runge-Kutta con un tiempo de muestreo de 0,001 s. Los valores numéricos de los parámetros utilizados dentro de las simulaciones se presentan en la Tabla 1.

Tabla 1: Parámetros utilizados en la simulación dinámica.

Parámetro del modelo dinámico	Valor numérico del parámetro
α	2
β	70
a_l	2.83
a_u	2.73
b_l	8.33
b_u	3.55
c_l	2
c_u	2.22
d_l	26
d_u	25.3
m	0.001
K	9
z_{max}	12

Los esquemas de simulación utilizados se presentan en la Figura 5 para el sistema en lazo abierto y en la Figura 6 para el sistema en lazo cerrado implementado la ley de control (7).

4.1. Simulación del sistema agonista-antagonista en lazo abierto

Al considerar el esquema de simulación en lazo abierto se implementará un par de señales de prueba para cada actuador. Al agonista se le aplicará una $u_a = 9 \sin(10t)$, mientras que al antagonista se le aplicará $u_n = 9 \sin(7t)$. Esto da como resultado el cambio de posición mostrado en la Figura 7, de este se puede notar que debido a que la señal senoidal aplicada en u_n tiene una frecuencia menor que la aplicada a u_a se tiene un desfase entre los momentos de calentamiento y enfriamiento de ambos resortes lo que da lugar a un comportamiento oscilatorio de la posición z .

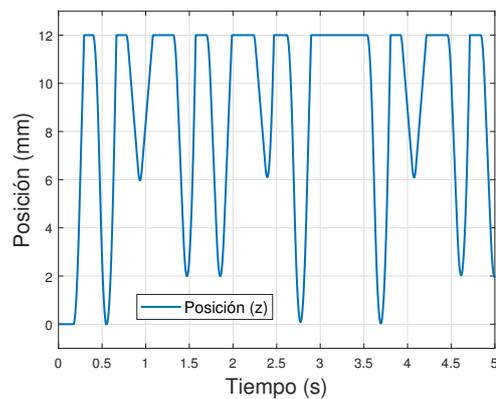


Figura 7: Cambio de posición en el sistema agonista-antagonista utilizando AMF en un esquema en lazo abierto.

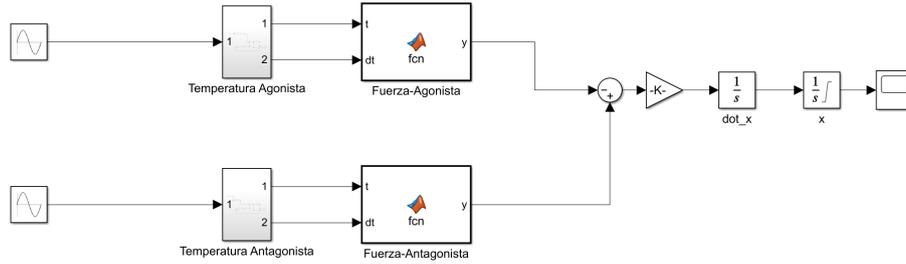


Figura 5: Esquema de simulación del sistema agonista-antagonista en lazo abierto.

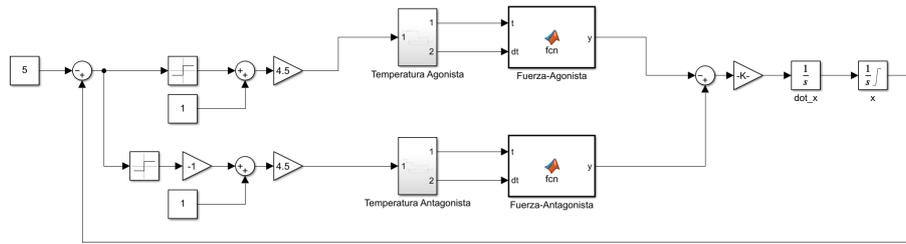


Figura 6: Esquema de simulación del sistema agonista-antagonista en lazo cerrado.

Este resultado implica que la aplicación de un esquema en lazo abierto puede llegar a provocar el cambio a la fase austenita de cada resorte dando lugar a movimientos en z , pero si no se tiene una forma coordinada que permita manejar tanto el agonista como el antagonista se requeriría de un conocimiento exacto de los parámetros del modelo y de la T_a tal que sea posible proponer un esquema en lazo abierto.

4.2. Simulación del sistema agonista-antagonista en lazo cerrado

El esquema de control (7) se utilizará para una tarea de regulación, por lo que la posición deseada se propondrá con un valor constante $z_d = 5$. De igual forma es necesario implementar diversos índices de desempeño para evaluar el comportamiento de los resultados obtenidos, por lo que se propondrá primeramente la Integral del Error Cuadrático (IEC) para evaluar el seguimiento de trayectoria definida como:

$$IEC = \int_{t_0}^{t_f} e^2 \quad (8)$$

donde t_0 y t_f corresponde al tiempo inicial y al tiempo final de la evaluación del índice de desempeño respectivamente.

Para evaluar el gasto energético se utilizará la Integral Absoluta de la Señal de Control (IASC) expresada como:

$$IASC = \int_{t_0}^{t_f} |u_a| + |u_n| \quad (9)$$

Finalmente para evaluar la presencia de castañeo se implementará la Integral Absoluta de la Derivada de la Señal de Control (IDSC) como:

$$IADSC = \int_{t_0}^{t_f} \left| \frac{du_a}{dt} \right| + \left| \frac{du_n}{dt} \right| \quad (10)$$

Se considerarán dos segmentos de tiempo para la evaluación: El primero de ellos será con $t_0 = 0$ y $t_f = 5$ para evaluar el comportamiento del controlador durante todo el proceso de regulación. El segundo segmento de tiempo es de $t_0 = 3,8$ donde este es un instante de tiempo donde la trayectoria se encuentra en una posición cercana a z_d y $t_f = 5$, de manera que se pueda evaluar el comportamiento una vez que la referencia fue alcanzada.

El proceso de seguimiento de trayectoria se puede ver la Figura 8, donde se tiene un tiempo considerable antes de que z alcance el valor de z_d e incluso una vez alcanzado este valor se tiene la presencia de oscilaciones en la posición lo cual es esperado en un control por conmutación.

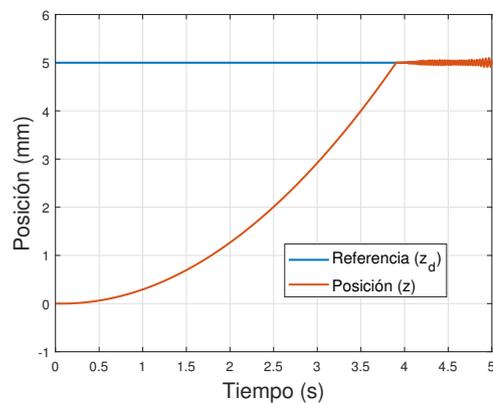


Figura 8: Cambio de posición en el sistema agonista-antagonista utilizando AMF en un esquema en lazo cerrado.

Esto se puede notar mejor al observar las señales de control en la Figura 9, donde se tiene que el actuador antagonista se mantendrá activado hasta haya sido alcanzada la referencia y a

partir de este instante de tiempo existirá la conmutación entre el agonista y el antagonista para tratar de mantener la posición z en la referencia de regulación.

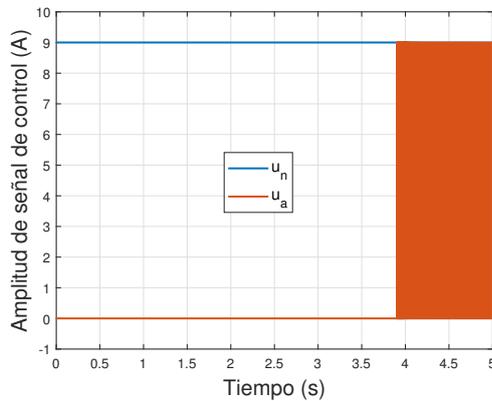


Figura 9: Señales de control del sistema agonista-antagonista utilizando AMF en un esquema en lazo cerrado.

Los resultados de las funciones de desempeño se presentan en la Tabla 2. De estos es importante mencionar que la mayor parte del error de seguimiento se tiene antes de que se alcance la trayectoria deseada, esto debido a que el IEC una vez alcanzada la referencia tiene un valor despreciable en comparación con el obtenido durante toda la simulación. El gasto energético dado por el IASC se encuentra repartido equitativamente en el tiempo por lo que no se tiene una diferencia entre el proceso de convergencia a la referencia y el proceso de mantener la posición deseada. Finalmente se puede notar que la variación del error de control evaluada por el IADSC se encuentra presente una vez que z alcanza a z_d , previamente no se tiene esta clase de variaciones.

Tabla 2: Índices de desempeño para los segmentos de tiempo.

$[t_0, t_f]$	Índice IEC	Índice IASC	Índice IADSC
$[0, 5]$	52891	45009	2142
$[3, 8, 5]$	1.4950	12009	1822

5. Conclusiones

Este trabajo demuestra que es posible utilizar las propiedades de las Aleaciones de Memoria de Forma (AMF) para controlar la posición de un elemento si se utiliza un sistema agonista-antagonista, con las simulaciones presentadas se mostró que el esquema de control propuesto es capaz de llegar a la posición deseada.

Los índices de desempeño comprueban el correcto funcionamiento del esquema de control propuesto con los AMF, la segunda etapa de los índices de funcionamiento muestran como a pesar de la existencia del castaño no se sale de control y permanece en un rango admisible tomando en cuenta que se tiene un control por conmutación.

Observando los resultados mostrados en las simulaciones, se puede comprobar que usando este esquema de control y con una correcta programación, los AMF se vuelven una excelente alternativa para poder utilizarlos como actuadores en situaciones en las que se necesita disminuir el peso del sistema, reducir el volumen de los actuadores o los medios tradicionales no son una opción.

Sin embargo, es necesario la realización de estudios posteriores donde se tome en cuenta la dinámica del actuador para determinar los requerimientos que deben cumplirse para implementación tanto mecánica como desde el punto de vista de la instrumentación electrónica.

Agradecimientos

Los autores agradecen el apoyo de la Secretaría de Investigación y Posgrado of Instituto Politécnico Nacional (SIP-IPN) por medio del proyecto SIP-20220151 del *Programa Especial de Consolidación de Investigadores*.

Referencias

- Bhatt, N., Soni, S., and Singla, A. (2022). *Mathematical Model of SMA Spring Actuator in a Miniature Flexible Tube Robot*. Springer, Singapore.
- Cortez-Vega, R., Chairez, I., Luviano-Juárez, A., and Feliu-Battle, V. (2018). A hybrid dynamic model of shape memory alloy spring actuators. *Measurement*, 114:340–353.
- Demofonti, A., Carpino, G., Zollo, L., and Johnson, M. J. (2021). Affordable robotics for upper limb stroke rehabilitation in developing countries: a systematic review. *IEEE Transactions on Medical Robotics and Bionics*, 1:11–20.
- El-Atab, N., Mishra, R. B., Al-Modaf, F., Joharji, L., Alsharif, A. A., Alamoudi, H., Diaz, M., Qaiser, N., and Hussain, M. M. (2020). Soft actuators for soft robotic applications: a review. *Advanced Intelligent Systems*, 2:2000128.
- Farber, E., Zhu, J.-N., Popovich, A., and Popovich, V. (2020). A review of niti shape memory alloy as a smart material produced by additive manufacturing. *Materials Today: Proceedings*, 30:761–767.
- Khalil, H. K. (2015). *Nonlinear control*, volume 406. Pearson New York.
- Khan, A., Khan, F. R., and Kim, H. S. (2018). Electro-active paper as a flexible mechanical sensor, actuator and energy harvesting transducer: A review. *Sensors*, 18:64–74.
- Mabe, J., Frederes, S., Hartl, D., and Carpenter, F. (2020). A direct comparison of shape memory alloy and electromechanical actuation for wing twist applications. *Smart Materials and Structures*, 20:77–113.
- Sachyani Keneth, E., Kamyshny, A., Totaro, M., Beccai, L., and Magdassi, S. (2021). 3d printing materials for soft robotics. *Advanced Materials*, 33:2003387.
- Shin, Y., Choi, M.-Y., Choi, J., Na, J.-H., and Kim, S. Y. (2021). Design of an electro-stimulated hydrogel actuator system with fast flexible folding deformation under a low electric field. *ACS Applied Materials & Interfaces*, 13:15633–15646.
- Tawk, C. and Alici, G. (2021). A review of 3d-printable soft pneumatic actuators and sensors: Research challenges and opportunities. *Advanced Intelligent Systems*, 3:2000223.
- Wang, J., Gu, X., Xu, Y., Zhu, J., and Zhang, W. (2021). Thermomechanical modeling of nonlinear internal hysteresis due to incomplete phase transformation in pseudoelastic shape memory alloys. *Nonlinear Dynamics*, 2:1393–1414.
- Zolfagharian, A., Mahmud, M. P., Gharai, S., Bodaghi, M., Kouzani, A. Z., and Kaynak, A. (2020). 3d/4d-printed bending-type soft pneumatic actuators: Fabrication, modelling, and control. *Virtual and Physical Prototyping*, 15:373–402.