

# Modelado y control de un sistema Electrotérmico-Mecánico móvil basado en alambres musculares

Ing. Serket Quintanar-Guzmán \* Dr. Juan Reyes-Reyes \*\*  
María del Carmen Arellano-Sánchez \*\*\*

\* *Estudiante de Maestría en Ciencias en Ing. Electrónica, (e-mail:  
serket.qg@cenidet.edu.mx).*

\*\* *e-mail: juanreyesreyes@cenidet.edu.mx*

\*\*\* *Estudiante de Doctorado en Ing. Electrónica, (e-mail:  
maria\_arellano10e@cenidet.edu.mx).*

*Centro Nacional de Investigación y Desarrollo Tecnológico  
(CENIDET) , Morelos, México*

---

**Abstract:** Los alambres musculares presentan una gran alternativa en una amplia variedad de aplicaciones que requieren de bajos consumos de potencia, espacios pequeños y pesos ligeros. Sin embargo, a pesar de sus grandes cualidades, los alambres musculares presentan un comportamiento altamente no lineal con fenómenos como histéresis y saturación; estas condiciones dificultan en gran medida el modelado y desarrollo de controladores para estos dispositivos. El presente trabajo propone un nuevo actuador electrotérmico - mecánico basado en alambres musculares y un sistema de trinquete, modelado a partir de fenómenos físicos. Además se presenta un controlador basado en una ley de control tipo PI con histéresis (PIH) para el seguimiento de trayectoria de la posición angular del eje de rotación del actuador propuesto.

*Keywords:* Alambre muscular, Trinquete, Modelado por Euler-Lagrange, Histéresis, Actuador Electrotérmico-mecánico, Control no lineal, Dispositivos con memoria de forma

---

## 1. INTRODUCCIÓN

La dinámica presentada por un alambre muscular, es compleja y altamente no lineal; sin embargo, presentan una propuesta interesante para su implementación como actuadores en una amplia variedad de aplicaciones.

Entre las principales ventajas que llevan a esta afirmación son su bajo peso, bajo consumo de potencia en comparación a la fuerza que pueden producir, un volumen mínimo y ruido casi nulo durante su operación. Estas características han llevado a la comunidad científica a interesarse cada vez más en el estudio de estos materiales. Podemos encontrar en el estado del arte varias técnicas de control Gédouin et al. (2011); Ahn and Kha (2007); Tai and Ahn (2012), así como aproximaciones de modelado Dutta and Ghorbel (2005); Romano and Tannuri (2009); Tai and Ahn (2012).

Un alambre muscular, es un dispositivo hecho de aleaciones metálicas, comúnmente Níquel y Titanio (NiTi), que muestran un efecto de memoria de forma (Shape Memory Effect, SME) al someterse a cambios de temperatura.

El alambre muscular que será tratado en el presente documento es de efecto de memoria de forma unidireccional (One Way Memory Effect, OWME). El efecto de memoria de forma en estas aleaciones, es ocasionado por un cambio en la estructura interna del material. El proceso de transformación inicia con el material en fase austenita, esta fase es de gran dureza, menor ductilidad y mayor fragilidad. Al

enfriar la austenita (A) por debajo de la temperatura de transformación a martensita ( $M_s$ ) se genera un cambio de fase a martensita maclada, que termina al alcanzar la temperatura de fin de transformación ( $M_f$ ), en esta fase el material es susceptible de sufrir deformaciones al aplicar esfuerzos externos. La aplicación de este tipo de esfuerzos nos lleva a la fase martensita demaclada, donde el material ahora está constituido por martensita demaclada (M), esta fase es dúctil, blanda y tenaz. Al calentar la fase martensita, por encima de la temperatura de transformación ( $A_s$ ) comienza la transformación a austenita, misma que termina al alcanzar la temperatura de fin de transformación a austenita ( $A_f$ ) y el ciclo se repite, Dutta and Ghorbel (2005).

La principal desventaja que presentan los alambres musculares, es que tienen un comportamiento no lineal muy difícil de modelar. La no linealidad más importante que presenta este sistema, es la histéresis. Se tiene una histéresis importante ante los cambios de temperatura. En la Figura 1 se observa la curva de histéresis fracción de martensita vs. temperatura ( $T \sim R_m$ ) de un alambre muscular. Se aprecia que existe una gran diferencia entre las temperaturas de inicio (subíndice s) y fin (subíndice f) de cambio de fase.

Aunado a este problema, encontramos que el sistema presenta, además del ciclo mayor de histéresis, los ciclos menores de histéresis. Estos ciclos se encuentran contenidos dentro del lazo mayor de histéresis. Se presentan al ocurrir

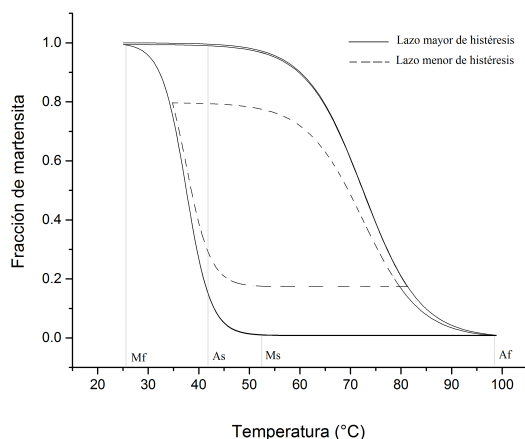


Fig. 1. Lazo mayor y menor de histéresis

ciclos de transformación de austenita a martensita (A - M) o de martensita a austenita (M - A) incompletos, durante los ciclos de trabajo del alambre muscular.

## 2. DISEÑO DEL PROTOTIPO

El diseño de este prototipo se orientó al desarrollo de un inicio de motor actuado por alambres musculares. Debido a la naturaleza intermitente del esfuerzo que el alambre muscular es capaz de proporcionar (causada por la necesidad de realizar los ciclos térmicos correspondientes para los cambios de fase), el sistema diseñado debe ser capaz de generar rotaciones en un solo sentido siempre que se actúe el alambre muscular y evitar rotación en sentido contrario durante el enfriamiento del mismo.

Por otra parte, para aprovechar la ventaja del reducido tamaño del alambre muscular, se busca desarrollar un prototipo pequeño y compacto.

Para cumplir estas necesidades en el diseño del sistema, se decide utilizar un sistema de trinquete. El sistema de la Figura 2 muestra un trinquete con dos uñas, una (rosa) llamada uña activa que es la que será movida directamente por el alambre muscular para generar movimiento, y otra (verde) que atrancará el sistema una vez que el alambre muscular no esté aplicando fuerza.

El sistema propuesto se muestra en la Figura 2.

En esta figura se muestran numerados todos los elementos necesarios para el correcto funcionamiento del prototipo:

- |                     |                       |
|---------------------|-----------------------|
| a) Trinquete        | f) Resorte            |
| b) Uña activa       | g) Eje de rotación    |
| c) Uña de atranque  | h) Resorte de torsión |
| d) Alambre muscular | i) Horse-Head         |
| e) Palanca          |                       |

La palanca (e) será el elemento que permitirá transformar el movimiento lineal del alambre muscular en una fuerza tangencial capaz de hacer girar el trinquete. Este elemento cuenta con un diseño tipo *Horse-Head* (i), este diseño permite que la fuerza del alambre muscular se transmita en la misma dirección que la fuerza proporcionada por el resorte, a través de la curvatura del *Horse-Head*, por otra parte transmite de manera perpendicular la fuerza a través de la palanca hacia el trinquete, lo que permite una

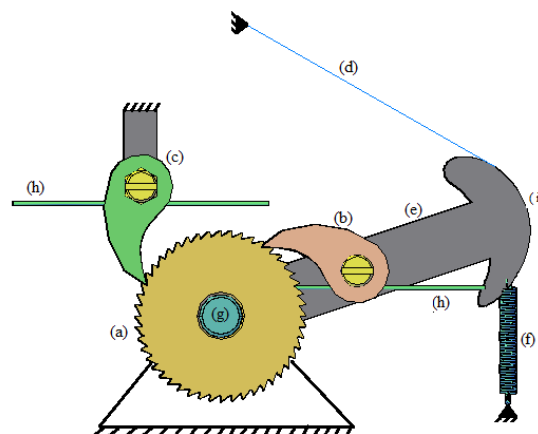


Fig. 2. Sistema actuador

máxima transferencia de energía, Neuhauser and Brauch (1987).

El resorte (f) se utiliza para generar la fuerza que deforme el alambre muscular (d) cuando se encuentra en fase Martensita. Los resortes de torsión (g) generan la fuerza para que las uñas (b) y (c) hagan presión sobre el trinquete (a), permitiendo que este pueda girar libremente en el sentido contrarreloj, pero no en sentido horario.

## 3. ELECCIÓN DE MODELO DEL ALAMBRE MUSCULAR

El modelo presentado para el comportamiento dinámico del alambre muscular, está basado en tres submodelos tomados de la literatura.

- (1) **Submodelo E-T.** Modela el comportamiento electro-térmico del sistema, ya que la técnica utilizada para el calentamiento del sistema será el efecto Joule.
- (2) **Submodelo H.** Modela el comportamiento de la histéresis propia del alambre muscular. El modelo tomado es el presentado por Ikuta en Ikuta et al. (1991)
- (3) **Submodelo M.** Submodelo del comportamiento mecánico del alambre muscular, modela esfuerzo-deformación.

*Submodelo E-T.* En el caso del submodelo E-T, se presenta un modelo lineal respecto T, de la forma mostrada en (1), tomando  $v$  como la entrada del sistema.

$$dT = \frac{hA}{\rho cV} (T_{amb} - T) + \frac{1}{\rho cVR} v^2 \quad (1)$$

### Nomenclatura

$A$	Área superficial del alambre [ $m^2$ ]
$A_{wire}$	Área transversal del alambre [ $m^2$ ]
$c$	Calor específico del alambre [ $Jkg^{-1} \circ C^{-1}$ ]
$h$	Coef. de convección del alambre [ $Wm^{-2} \circ C^{-1}$ ]
$\rho$	Densidad de masa del alambre [ $kgm^{-3}$ ]
$R$	Resistencia eléctrica [ $\Omega$ ]
$V$	Volumen del alambre muscular [ $m^3$ ]
$T$	Temperatura del alambre muscular [ $\circ C$ ]
$T_{amb}$	Temperatura ambiente [ $\circ C$ ]
$v$	Voltaje aplicado al alambre muscular [V]

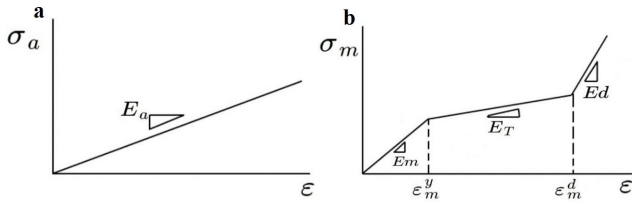


Fig. 3. (a) Relación Esfuerzo-Deformación de Austenita, (b) Relación Esfuerzo-Deformación de Martensita

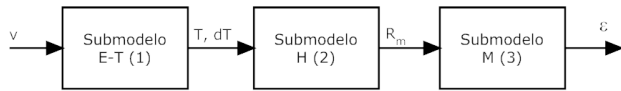


Fig. 4. Modelo a bloques de alambre muscular

**Submodelo H.** Este submodelo fue tomado del trabajo presentado por Ikuta en Ikuta et al. (1991). Este permite obtener la fracción de martensita a partir de la temperatura actual y las temperaturas de transformación de fases del alambre muscular. La histéresis es caracterizada por las temperaturas de transformación promedio y una constante (6.2) que fue obtenida empíricamente por Ikuta.

Este modelo está descrito en (2)

$$R_m = \begin{cases} \frac{R_{mf}}{1 + \exp\left[\frac{6.2}{A_f - A_s} \left(T - \frac{A_s + A_f}{2}\right)\right]} & , dT > 0 \\ \frac{R_{mi}}{1 + \exp\left[\frac{6.2}{M_f - M_s} \left(T - \frac{M_s + M_f}{2}\right)\right]} + R_{mi} & , dT \leq 0 \end{cases} \quad (2)$$

Es importante mencionar que este modelo permite representar los lazos menores de histéresis.

**Nomenclatura**

- $R_m$  Fracción de martensita
- $R_{mi}$  Fracción de martensita mínimo en enfriamiento
- $R_{mf}$  Fracción de martensita máximo en enfriamiento

**Submodelo M.** Este último submodelo se basa en un análisis por capas que propone que cada una de las fases dentro del material se encuentran agrupadas y de forma paralela, propuesto también por Ikuta en Ikuta et al. (1991), lo que permite considerar las propiedades mecánicas propias de cada fase en el análisis. Tal que

$$\sigma = (1 - R_m) \sigma_a + R_m \sigma_m \quad (3)$$

Este modelo es utilizado en un gran número de trabajos, como: Romano and Tannuri (2009); Dutta and Ghorbel (2005); Ikuta et al. (1991).

La ecuación (3) permite obtener el esfuerzo total del sistema de acuerdo a la fracción de martensita del alambre muscular. Esta consideración es importante ya que el módulo de Young de cada una de las fases es distinta y depende también de la deformación del alambre, de acuerdo la figura 3.

En resumen, el modelo del alambre muscular está formado por tres submodelos como se muestra en la figura 4.

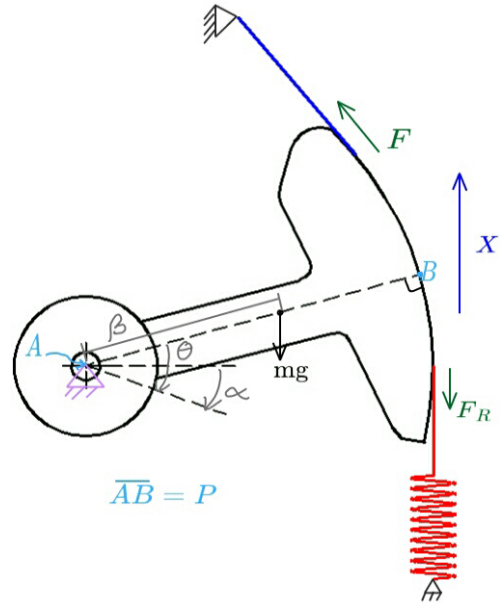


Fig. 5. Representación del prototipo

**Nomenclatura**

- $E_a$  Módulo de elasticidad en austenita [MPa]
- $E_d$  en martensita demaada [MPa]
- $E_m$  en martensita maclada [MPa]
- $E_T$  en martensita parcialmente maclada [MPa]
- $\epsilon$  Deformación total
- $\epsilon_m^d$  Deformación mínima de martensita maclada
- $\epsilon_m^y$  Deformación en martensita maclada
- $\sigma$  Esfuerzo total [MPa]
- $\sigma_a$  Esfuerzo en austenita [MPa]
- $\sigma_m$  Esfuerzo en martensita [MPa]

**4. MODELADO DEL PROTOTIPO**

El desarrollo del modelo se realizó utilizando la aproximación planteada por Romano en Romano and Tannuri (2009), donde se toma al alambre muscular como un resorte con módulo de Young variable ( $k_a$ ) y dependiente de la fracción de martensita ( $R_m$ ), y por tanto de la temperatura. Es decir:

$$k_a := k_a(T)$$

Tal que la fuerza ejercida por el alambre muscular es:

$$F = (\theta_{max} - \theta) P k_a$$

donde

$$k_a = [(1 - R_m) \cdot E_a] \cdot \frac{A_{wire}}{L_0}$$

Con estas bases se aplicó el método de Euler-Lagrange para resolver el sistema mostrado en la figura 5.

De tal forma que el modelo se realizó con  $\theta$  como la variable generalizada. Planteando la energía cinética y potencial:

$$K = \frac{1}{2} m (P\beta\dot{\theta})^2 + \frac{1}{2} J \dot{\theta}^2$$

$$P = \beta P m g \sin(\theta - \alpha) + \frac{1}{2k_r} F_r^2 + \frac{1}{2k_a} F^2$$

$$G = \frac{1}{2} b P^2 \dot{\theta}^2$$

se desarrolla el método de Euler-Lagrange y se obtiene la ecuación mostrada en (4)

$$\ddot{\theta} = \frac{k_a P^2 (\theta_{max} - \theta) - P^2 k_r \dot{\theta}}{m P^2 \beta^2 + J} - \frac{\beta P m g \cos(\theta - \alpha) - b P^2 \dot{\theta}}{m P^2 \beta^2 + J} \quad (4)$$

Esta ecuación corresponde a la aceleración de la palanca mostrada en la figura 5; sin embargo, el estado de interés es la velocidad del eje del sistema. Este eje se modela bajo las siguientes consideraciones que derivan de la dinámica propia del trinquete:

- Cuando la velocidad de la palanca es positiva el eje se encuentra acoplado a la misma, y se comporta como un solo bloque unido.
- Cuando la velocidad de la palanca es negativa, el eje se desacopla, quedando en dinámica libre, sin ninguna fuerza externa a él mismo.
- El eje no puede tener velocidades negativas, ya que la dinámica del trinquete solo permite movimientos en un solo sentido, que en este caso se considera como positivo.

#### 4.1 Función de conmutación $Z(x_3)$

El trinquete presenta una propiedad conmutativa, donde ante pares positivos es posible generar movimiento rotacional, mientras que para pares negativos, el trinquete presenta una fricción que tiende a infinito, provocando que no se pueda generar movimiento en sentido contrario.

Ya que el trinquete se encuentra acoplado mecánicamente a la palanca, elemento que puede tener velocidades negativas y positivas, es necesario proponer una función que permita modelar el momento en que estos dos elementos se mueven simultáneamente y posteriormente, el momento en que ambos se separan y quedan con sus propias dinámicas.

De esta manera se propone el uso de una función  $Z(x_3)$ , que depende del signo de la velocidad en la palanca.

Definiendo a la función  $Z$  como:

$$Z(x_3) = \begin{cases} 1, & x_3 \geq 0 \\ 0, & x_3 < 0 \end{cases}$$

Esta función puede tomar dos valores que dependen de la dirección de la velocidad de la palanca ( $x_3$ ). Cuando  $Z(x_3) = 1$ , condición que se da cuando  $x_3$  es positiva o cero, implica que palanca y trinquete se encuentran acoplados y se mueven como un sólo objeto, en otras palabras, sus dinámicas son idénticas.

Por otra parte cuando  $Z(x_3) = 0$ , encontramos que la velocidad de la palanca ( $x_3$ ) es negativa, implicando que la palanca y el trinquete se han desacoplado tienen ahora dinámicas diferentes. Es importante hacer énfasis en que, para esta condición, el trinquete queda en dinámica libre, perdiéndose toda posibilidad de realizar control sobre él en esta etapa, mientras que la palanca siempre está sujeta a la dinámica del alambre muscular.

#### 4.2 Modelo matemático

Aplicando las condiciones que llevaron a crear la función  $Z(x_3)$ , y a partir de (4), se obtiene el sistema mostrado

en (5), que representa el modelo completo del sistema del actuador.

Sea  $x = [T \ \theta \ \dot{\theta} \ \bar{\theta} \ \dot{\bar{\theta}}]^\top$ , donde:

$T$	Temperatura del alambre muscular [°C]
$\theta$	Posición angular de la palanca [rad]
$\dot{\theta}$	Vel. angular de la palanca [rad/s]
$\bar{\theta}$	Posición angular del eje de rotación [rad]
$\dot{\bar{\theta}}$	Vel. angular del eje de rotación [rad/s]

$$\dot{x} = Ax + B_1 T_{amb} + B_2 v + [I \cdot Z(x_3) \ I \cdot (1 - Z(x_3))] \cdot \begin{bmatrix} f_1(x) + g_1(x, v, T_{amb}) \\ f_2(x) + g_2(x, v, T_{amb}) \end{bmatrix} \quad (5)$$

$$A = \begin{bmatrix} -\frac{hA}{\rho c V} & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \quad B_1 = \begin{bmatrix} \frac{hA}{\rho c V} \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix}$$

$$B_2 = \begin{bmatrix} 1 \\ \frac{\rho c V R}{\rho c V R} \\ 0 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} \quad g_1(x) = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ \frac{k_a(x_1) P^2 (\theta_{max} - x_2)}{m P^2 \beta^2 + J} \\ 0 \\ \frac{k_a(x_1) P^2 (\theta_{max} - x_2)}{m P^2 \beta^2 + J} \end{bmatrix}$$

$$f_1(x) = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ \frac{-(b_1 x_3 + b_2 x_5) P^2 - \beta P m g \cos(x_2 - \alpha)}{m P^2 \beta^2 + J} \\ 0 \\ \frac{-(b_1 x_3 + b_2 x_5) P^2 - \beta P m g \cos(x_2 - \alpha)}{m P^2 \beta^2 + J} \end{bmatrix} +$$

$$\begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ \frac{-x_2 P^2 k_r}{m P^2 \beta^2 + J} \\ 0 \\ \frac{-x_2 P^2 k_r}{m P^2 \beta^2 + J} \end{bmatrix}$$

$$g_2(x) = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ \frac{k_a(x_1) P^2 (\theta_{max} - x_2)}{m P^2 \beta^2} \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix}$$

$$f_2(x) = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ \frac{-b_1 P^2 x_3 - \beta P m g \cos(x_2 - \alpha) - x_2 P^2 k_r}{m P^2 \beta^2} \\ 0 \\ \frac{-b_2 P^2 x_5}{J} \end{bmatrix}$$

**Nomenclatura**

$A_{wire}$	Área transversal del alambre NiTi [ $m^2$ ]
$b_1$	Coefficiente de fricción de palanca
$b_2$	Coefficiente de fricción del eje de rotación
$J$	Momento angular [ $kgm^2$ ]
$k_r$	Constante del resorte [ $N/m$ ]
$L_0$	Longitud nominal del alambre NiTi [ $m$ ]
$\theta_{max}$	Posición angular máxima de la palanca [ $rad$ ]

5. CONTROL PI CON HISTÉRESIS (PIH)

El objetivo de control se estableció como el seguimiento de trayectoria de la posición angular del eje de rotación del sistema mostrado en la figura 2. Con este objetivo, al modelo mostrado en (5) se le aplicó un control de tipo PI en conjunto con un bloque de histéresis, al conjunto de estos dos bloques lo llamaremos PIH. La dinámica del prototipo, específicamente la naturaleza restrictiva del trinquete, no permite que un control PI funcione por sí solo para controlar este sistema. Ya que el trinquete sólo permite movimiento en un sentido, al aplicar un PI, no se obtienen velocidades negativas en el estado  $x_5$ , por consecuencia, no se tiene una disminución en la posición angular  $x_4$  aún cuando la señal del PI disminuya o sea negativa. Por esta razón, se incluye el bloque de histéresis.

El bloque PI consiste de un control de tipo PI, constituido de tal manera que si el error se hace negativo se detiene la acumulación del error, esto se debe a que sólo se tiene control en el crecimiento de  $x_4$  pues no es posible retroceder. Por otra parte, ya que la cota superior de la velocidad que es posible alcanzar durante el seguimiento de trayectoria también es conocida, la acumulación del error se detiene al llegar a este límite y así evitar que la señal  $v'$  entre en condiciones de inestabilidad. Este bloque se describe matemáticamente como:

$$v' = k_p e + k_i \oint e dt$$

donde la integral cerrada se define como:

$$\oint e dt = \varphi \left( \int e dt \right) = \begin{cases} 0 & , e \leq 0 \\ \int e dt & , 0 < e < e_{max} \\ e_{max} & , e \geq e_{max} \end{cases}$$

El bloque de histéresis, cubre dos funciones:

- (1) Compensar la histéresis del alambre muscular.
- (2) Saturar la señal de control para respetar los límites térmicos de operación del alambre muscular.

Este bloque se encarga de que al llegar a la temperatura de operación máxima del alambre muscular, la señal de control permita el enfriamiento del alambre muscular el tiempo suficiente para que se lleve a cabo el cambio de fase dentro del alambre, permitiendo que al volver a aplicar la señal de control, se genere movimiento. Este bloque se describe matemáticamente como:

$$v = \begin{cases} v' & , dT \geq 0 \wedge T < T_{max} \\ v_{min} & , (dT < 0 \wedge T \geq T_{min}) \vee T \geq T_{max} \end{cases}$$

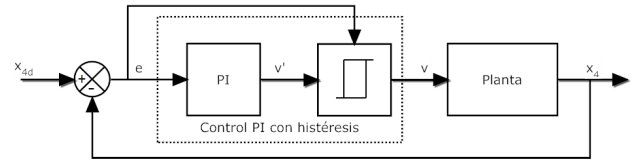


Fig. 6. Diagrama a bloques PIH

En la figura 6 se muestra el diagrama a bloques del controlador aplicado a la planta. Es importante mencionar que en el prototipo propuesto el actuador se encuentra embebido dentro de la planta, ya que el resorte y el trinquete tienen efectos directos en la dinámica del propio alambre muscular, no es posible aislar uno de otro.

6. RESULTADO DE SIMULACIÓN

Los datos utilizados para la simulación fueron tomados de la literatura y las características geométricas del prototipo propuesto. Los datos de estrés-deformación fueron tomados de Madill and Wang (1998), los datos referentes al alambre muscular se tomaron de hojas de datos proporcionadas por el fabricante, Dynalloy (2014). El resto de los datos corresponde a las características físicas del prototipo. Las ganancias para el control PIH se establecieron en:  $k_p = 2.5$  y  $k_i = 0.45$

Se aplicó una referencia tipo rampa, en tres secciones con pendiente distinta. en la figura 7 (a), se muestra el comportamiento del estado  $x_4$  frente a la referencia. Se observa que aproximadamente en los primeros 40 segundos el sistema presenta cierta dificultad para seguir la referencia, esto se debe al tiempo que la constante proporcional ( $k_p$ ) es pequeña, provocando que el sistema tarde en aumentar la señal de control ante el crecimiento del error, y por tanto el calentamiento se realice más lentamente en el primer ciclo de calentamiento.

Durante la segunda rampa, se tiene una pendiente mucho menor y puede observarse que el sistema sigue la referencia con más facilidad. Mientras tanto, en la tercera rampa, se coloca una referencia físicamente imposible de seguir por el sistema, ya que la pendiente supera la velocidad máxima que puede ser entregada por el eje de rotación, razón por la cual, aún cuando se alcanzan los límites máximos para la señal de control, no es posible seguir la referencia.

En la figura 7 (b), se observa la función del bloque de histéresis, donde una vez alcanzada la temperatura máxima establecida para el funcionamiento del alambre muscular manda una señal de voltaje mínima para permitir que el alambre se enfríe y volver a comenzar el ciclo. Es importante mencionar que la señal de control se encuentra acotada a 7 volts, evitando así inestabilidad en la señal de control.

El error de seguimiento se muestra en la figura 8. Se puede observar claramente el transitorio en el intervalo de 0 a 50 segundos. Por otra parte, una vez alcanzada la referencia el sistema mantiene un error acotado entre  $\pm 0.2$ , el cambio de signo cíclico en el error se debe a la naturaleza intermitente del sistema. En  $t=150$  seg, se observa el aumento súbito y constante del error, debido a la referencia fuera de rango.

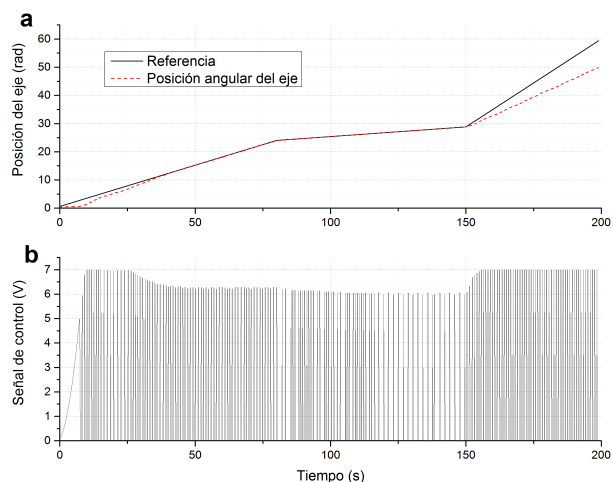


Fig. 7. (a) Posición angular del eje de rotación contra referencia de seguimiento de trayectoria, (b) Señal de control  $v$

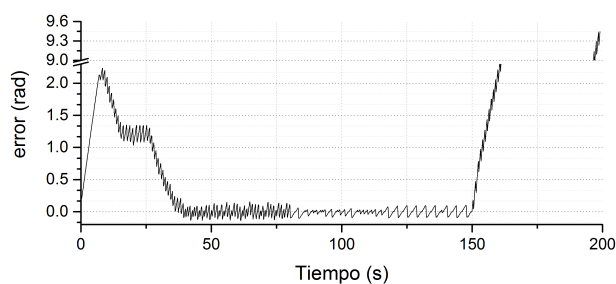


Fig. 8. Error de seguimiento para referencia mostrada en la figura 7 (a)

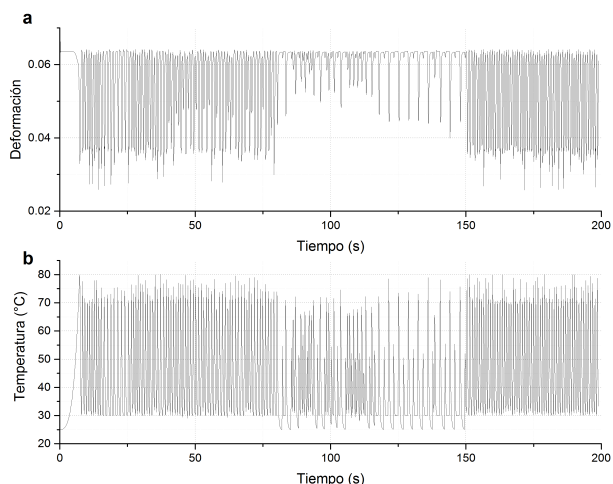


Fig. 9. (a) Deformación del alambre muscular, (b) Temperatura del alambre muscular

La figura 9 (a) muestra el comportamiento de la Temperatura ante la señal de control mostrada en la gráfica de la figura 7 (b), nótese que la temperatura se encuentra acotada entre la temperatura ambiental y la temperatura máxima establecida, gracias a la acción del bloque de histéresis

La figura 9 (b), muestra el comportamiento en la deformación del alambre muscular. Nótese que el alambre muscular trabaja por ciclos de estiramiento y contracción, como se estableció en el modelo en la sección anterior. También es importante notar que la deformación es menor y los ciclos de cambio de temperatura menor, ante una pendiente menor en la referencia, puesto que se requieren velocidades menores.

## 7. CONCLUSIONES

Se presenta el modelo matemático en espacio de estados de un actuador electrotérmico-mecánico móvil basado en alambres musculares. Este modelo altamente no lineal permite observar las dinámicas conmutadas propias del alambre muscular y el sistema de trinquete que conforman el conjunto planta-actuador. Además se propone un control de posición angular para el dispositivo actuador, basado en una ley de control PI con un bloque de histéresis que permite al controlador enfrentar las dinámicas conmutadas de la planta en cuestión.

## REFERENCES

- Ahn, K.K. and Kha, N.B. (2007). Internal model control for shape memory alloy actuators using fuzzy based preisach model. *Sensors and Actuators A: Physical*, 136(2), 730–741.
- Dutta, S.M. and Ghorbel, F.H. (2005). Differential hysteresis modeling of a shape memory alloy wire actuator. *Mechatronics, IEEE/ASME Transactions on*, 10(2), 189–197.
- Dynalloy (2014). Technical characteristics of flexinol actuators wires. URL <http://dynalloy.com/pdfs/TCF1140.pdf>. Revisado: 22 Abril 2014.
- Gédouin, P.A., Delaleau, E., Bourgeot, J.M., Join, C., Chirani, S.A., and Calloch, S. (2011). Experimental comparison of classical pid and model-free control: Position control of a shape memory alloy active spring. *Control Engineering Practice*, 19(5), 433 – 441.
- Ikuta, K., Tsukamoto, M., and Hirose, S. (1991). Mathematical model and experimental verification of shape memory alloy for designing micro actuator. In *Micro Electro Mechanical Systems MEMS '91 Proceedings. An Investigation of Micro Structures, Sensors, Actuators, Machines and Robots. IEEE*, 103–108. IEEE.
- Madill, D.R. and Wang, D. (1998). Modeling and l 2-stability of a shape memory alloy position control system. *Control Systems Technology, IEEE Transactions on*, 6(4), 473–481.
- Neuhauser, J. and Brauch, H. (1987). Pump drive for deep well pumping installations. URL <http://www.google.com/patents/US4683764>. US Patent 4,683,764.
- Romano, R. and Tammuri, E.A. (2009). Modeling, control and experimental validation of a novel actuator based on shape memory alloys. *Mechatronics*, 19(7), 1169 – 1177. Special Issue on Hardware-in-the-loop simulation.
- Tai, N.T. and Ahn, K.K. (2012). A hysteresis functional link artificial neural network for identification and model predictive control of sma actuator. *Journal of process control*, 22(4), 766–777.