

Diseño de un termo-actuador basado en alambres con memoria de forma

Jacinto Cortés Pérez, Hugo Becerril Cerón

Laboratorio de Mecánica, Centro Tecnológico Aragón, ENEP Aragón UNAM. Av. Rancho Seco s/n, Col. Impulsora, Cd. Nezahualcóyotl, Edo. de México, C. P. 57130.

jacop@correo.unam.mx.

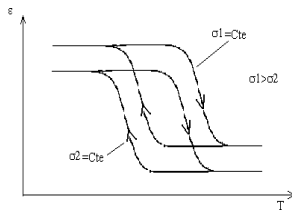
Gabriel A. Lara Rodríguez

Departamento de Materiales Metálicos y Cerámicos, Instituto de Investigaciones en Materiales. Circuito Exterior s/n, C. U., México, D. F., C. P. 04510, laragab@yahoo.com

Horacio Flores Zúñiga

Centro de Investigaciones en Materiales Avanzados. Miguel de Cervantes No. 120, Chihuahua, Chih. Mex. C. P. 31109.

hflores@yakko.cimav.edu.mx



ABSTRACT

The design of a thermo-actuator based on shape-memory Ni-Ti wires is presented in the work.

Our device is capable of continuous circular movement pulling a variable load and is activated by thermal fluctuations of any source.

KEYWORDS

RESUMEN

Se presenta el diseño de un termo-actuador que opera con energía térmica proveniente de cualquier fuente. El dispositivo está constituido por los siguientes elementos: a) dos alambres fabricados con una aleación con memoria de forma, b) un resorte helicoidal, c) un mecanismo biela-manivela corredera acoplado aun cuadrilátero articulado. Cuando los alambres con memoria de forma son calentados, por encima de su temperatura crítica A_s , se contraen debido a que sufren una transformación: martensita-austenita. Dicha contracción comprime el resorte helicoidal y a través del mecanismo dicho desplazamiento es convertido en un giro de 180° en el eslabón de salida. De manera análoga, cuando los alambres son enfriados el eslabón de salida del cuadrilátero completa un giro de 360° . Al comprimir el resorte, el dispositivo esta convirtiendo energía térmica en trabajo mecánico.

PALABRAS CLAVE

NOMENCLATURA

T = Temperatura, ϵ = deformación, s = esfuerzo, φ = desplazamiento angular, M_s = temperatura de inicio de la transformación martensítica, M_f = temperatura a la que finaliza la transformación martensítica, A_s = temperatura a la que inicia la transformación austenítica, A_f = temperatura a la que finaliza la transformación

austenítica, f = fracción volumétrica transformada, l = longitud, A = área de la sección transversal, R = matriz de rotación.

INTRODUCCIÓN

Los llamados materiales con memoria de forma (MMF) han sido estudiados de manera importante en los últimos 20 años, gracias a ello actualmente se sabe que existen algunos metales puros, cerámicos, polímeros y aleaciones metálicas que presentan este tipo de propiedades. Entre las aleaciones con memoria de forma, que actualmente son fabricadas comercialmente, se encuentran las de Cu-Al-Ni, Cu-Zn-Al y las de Ni-Ti.¹ Según se ha reportado en la literatura,¹ los MMF presentan una serie de efectos tales como: a) Efecto memoria de forma simple, b) El doble efecto memoria de forma, c) El efecto superelástico, entre otros. Dichos efectos están asociados con una transformación martensítica de tipo termoelástica la cual puede ser inducida por enfriamiento (sin esfuerzo), por esfuerzo (a temperatura constante) o por combinación de ambas (a temperatura variable y esfuerzo constante y/o variable).^{1,2}

En la figura 1 se presenta un diagrama Esfuerzo-Temperatura-Transformación donde se

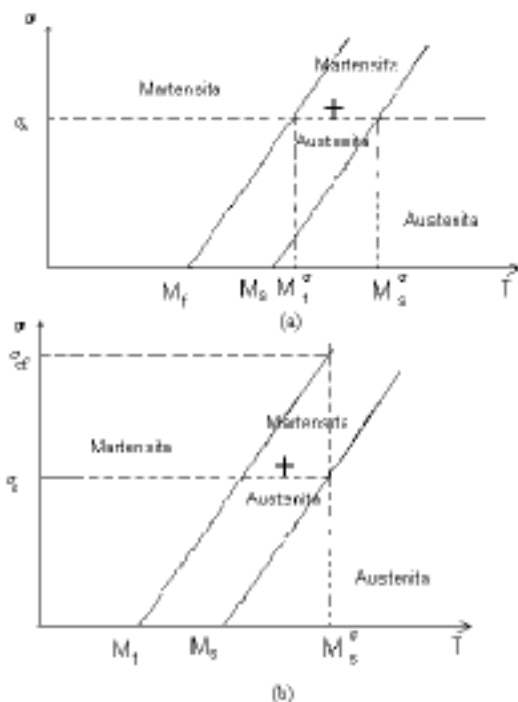


Fig. 1. Diagrama Esfuerzo-Temperatura -Transformación típico de MMF. a) Transformación a esfuerzo constante y b) a temperatura constante.

pueden apreciar los tipos de transformación martensítica citados anteriormente. En el caso en el que la transformación se induce sólo por temperatura (esfuerzo=0) la transformación inicia a una temperatura $T=M_s$ y finaliza cuando $T=M_f$.

Así mismo, en consistencia con lo reportado en la literatura,^{1,2} en la figura 1 se puede ver que cuando la transformación es inducida por esfuerzo ($T=Cte$), la transformación inicia cuando el esfuerzo alcanza un valor crítico $\sigma=\sigma_c$ y finaliza cuando alcanza el valor de $\sigma=\sigma_{cf}$. Como se puede ver en la figura 1 la magnitud de σ_c corresponde con la intersección de la isoterma M_s^σ y la línea M_s - cuya pendiente es igual a la razón de Clausius-Clapeyron. Por otro lado, en la figura 2 se presenta una curva esfuerzo deformación asociada al caso que se está discutiendo y claramente se ve que el comportamiento es no lineal y dependiente de la temperatura puesto que σ_c depende de ella. Así mismo, se ha reportado en la literatura que el comportamiento mostrado en la figura 2 varía considerablemente con la orientación cristalográfica.^{3,4}

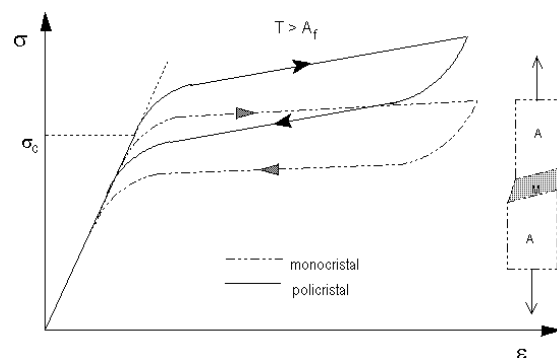


Fig. 2. Comportamiento Esfuerzo-Deformación observado en MMF.

Finalmente, se puede ver también en la figura 1 que cuando la transformación se induce por combinación de ambos, temperatura y esfuerzo, las temperaturas a las cuales inicia y termina la transformación se deslizan hacia temperaturas mayores y son llamadas M_s^σ y M_f^σ . El deslizamiento que sufren dichas temperaturas depende de la magnitud del esfuerzo aplicado. Un parámetro importante en este efecto es la deformación que sufre el material, la cual se puede apreciar en la figura 3. En la figura 3 se muestra una curva deformación-temperatura a esfuerzo constante que presentan los MMF. El comportamiento anterior constituye el prin-

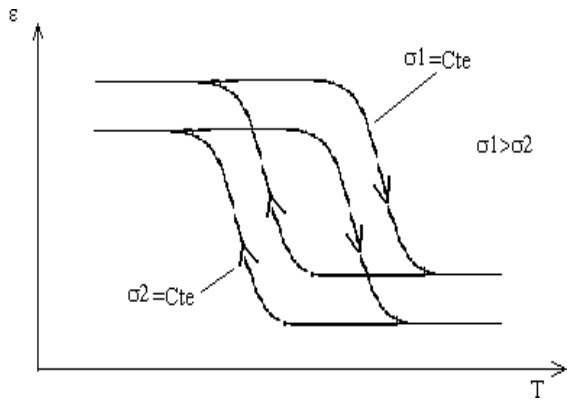


Fig. 3. Comportamiento Deformación-Temperatura, a carga constante, observado en MMF.

El principal interés en nuestro trabajo, ya que el material puede tomar dos formas predeterminadas al variar la temperatura arrastrando una carga, es decir realizando trabajo mecánico. Cabe mencionar que el comportamiento mostrado en la figura 3 presenta variaciones importantes si la magnitud de la carga no es constante y si se trata de materiales policristalinos.

El efecto mostrado en la figura 3 sugiere que es posible realizar trabajo mecánico útil a partir de fluctuaciones térmicas del ambiente, lo cual resulta de gran importancia sobre todo porque las variaciones de temperatura necesarias para que esto suceda son considerablemente bajas en comparación con las que requieren las máquinas térmicas convencionales. De hecho, es bien sabido que las temperaturas críticas de los MMF (M_s , M_f , A_s y A_f) dependen de su composición química y en algunos casos pueden ser cercanas a la del ambiente.

Es importante mencionar que para diseñar un dispositivo que aproveche las propiedades de los MMF es necesario contar con modelos matemáticos que simulen convenientemente su comportamiento.

A pesar de que se han reportado en la literatura una serie de trabajos al respecto,^{6, 7 y 8} la mayoría de los modelos propuestos resultan muy complicados aún para casos tan simples como los son la tracción, la flexión y la torsión.

En el presente trabajo se propone el diseño de un termo-actuador que aprovecha el comportamiento de los MMF mostrado en la figura 3. El dispositivo consta de un par de alambres fabricados con MMF, sujetos a tracción mediante un resorte helicoidal acoplada un mecanismo que permite convertir el desplazamiento longitudinal del resorte en giros de 180°. Para calcular el comportamiento de deformación-temperatura-esfuerzo de los alambres se empleó un modelo desarrollado por uno de los autores del presente trabajo.⁹

DESARROLLO

Diseño conceptual

Un esquema general del termo-actuador que presentamos en este trabajo se puede apreciar en la figura 4. Como se puede ver en la figura, el dispositivo consiste de un par de alambres fabricados con un MMF sujetos a tensión por medio de un resorte helicoidal que trabaja en compresión; el conjunto resorte-alambre se acopla a la corredera de un mecanismo biela-manivela-corredera, el cual a su vez se encuentra acoplado a un cuadrilátero articulado.

Inicialmente el alambre se encuentra deformado por la acción del resorte. Cuando el alambre es calentado por encima de su temperatura crítica (A_s), experimenta una contracción que comprime el resorte desplazando la corredera hacia la izquierda. El mecanismo biela-manivela-corredera convierte el movimiento longitudinal en un desplazamiento angu-

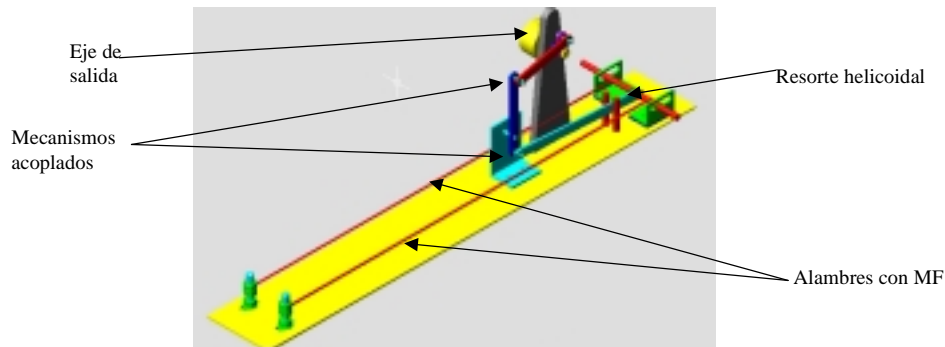


Fig. 4. Esquema general del termo-actuador.

lar de la manivela. Mediante el mecanismo de cuatro barras articuladas, el desplazamiento angular generado es convertido en un giro de 180°. Cuando el alambre es enfriado la contracción desaparece, el resorte se restituye y el mecanismo permite que se complete el giro del eje acoplado a la salida del cuadrilátero articulado. La operación del dispositivo consiste entonces, en ciclos continuos de calentamiento y enfriamiento.

El dispositivo que se propone puede ser considerado como una máquina térmica ya que convierte energía térmica en trabajo mecánico al comprimir el resorte durante el calentamiento. En este caso sólo se requiere de una fuente de calor proveniente de cualquier medio sólido, líquido o gas, cuya temperatura sea mayor que la temperatura de transformación austenítica (A_s) del material. Así mismo, la temperatura de la fuente fría debe ser menor que la temperatura de transformación martensítica (M_f) del alambre. El consumo de energía se asocia a la transferencia de calor que se requiere para que el material se caliente y/o se enfríe.

Cabe mencionar que a diferencia de las máquinas térmicas convencionales, que requieren de gases con cierta temperatura y presión, el movimiento del termo-actuador está asociado a la transformación martensítica del MMF y no a la expansión de gases. Lo anterior, confiere a dispositivos como el que presentamos la capacidad de “recuperar” energía de desecho de máquinas térmica convencionales.

CRITERIOS DE DISEÑO

Contracción de los alambres

El primer aspecto considerado para el diseño del dispositivo fue la determinación del desplazamiento de la corredera, la cual es arrastrada por el resorte cuando los alambres con memoria de forma son calentados. Como se mencionó anteriormente, fue necesario emplear un modelo que permitiera conocer el comportamiento carga-desplazamiento-temperatura del alambre, para lo cual se empleó la ecuación propuesta por Cortes :

$$\varepsilon = \left(\frac{\sigma_A}{f(k_2 - k_1) + k_1} \right)^{\frac{1}{n}} \quad f = \frac{\exp\left(\frac{T - M_s - T_c}{T_a}\right)}{1 + \exp\left(\frac{T - M_f - T_c}{T_a}\right)} \quad (1)$$

con

$$k_2 = \frac{0.99k_f - 0.01k_i}{0.99^2 - 0.01^2} \quad k_i = \left(\frac{E}{\alpha} \right)^n (\sigma_A)^{1-n}$$

$$k_1 = \frac{0.01k_f - 0.99k_i}{0.01^2 - 0.99^2} \quad k_f = \left(\frac{E}{\alpha} \right)^n \frac{\sigma_A^{1-n}}{2}$$

$$T_c = \frac{\sigma_A}{2 \frac{\partial \sigma_c}{\partial M_s^\sigma}} \quad T_a = \frac{\sigma_A}{2 \frac{\partial \sigma_c}{\partial M_s^\sigma} \ln(99)}$$

donde: σ_A es el esfuerzo aplicado, $\frac{\partial \sigma_c}{\partial M_s^\sigma}$ es la razón de Clausius-Clapeyron, E, n y α son parámetros que se toman de la curva esfuerzo-deformación a $T > A_f$ para el material empleado.

Dicho modelo aproxima el comportamiento de los MMF mediante parábolas ajustadas con valores experimentales y permite simular el comportamiento en estudio ya sea para carga, deformación o temperatura constante y/o variable. En dicha ecuación es preciso determinar σ_A en función del desplazamiento, o bien de la deformación, ya que la carga aplicada proviene del resorte y, como se sabe, depende de la compresión del mismo. Por otro lado, es preciso tomar en consideración que el esfuerzo aplicado sobre cada alambre no debe exceder de 100 MPa y que la deformación máxima recuperable depende del MMF empleado.

Primero, es preciso tomar en consideración que el alambre cambiará de forma siempre y cuando esté sujeto a una precarga proveniente del resorte. Es decir que los alambres estarán sujetos a un esfuerzo inicial, y por tanto experimentarán una deformación inicial, y esta disminuirá conforme el resorte se contraiga. Lo anterior indica que los alambres estarán sujetos a un esfuerzo variable que dependerá de la deformación.

Considerando el esquema de la figura 5 tenemos que, el esfuerzo aplicado en los alambres y la deformación del mismo pueden ser escritas como:

$$\varepsilon = \frac{l_0 - l}{l_0} \quad (2)$$

$$\sigma_A = \sigma = \frac{Kl_0}{A} \varepsilon$$

donde: l_0 es la longitud del alambre sin carga.

l es la longitud del alambre al aplicarle un esfuerzo σ

K es la constante del resorte

A es el área de la sección transversal del alambre

Considerando las restricciones de esfuerzo y deformación máximas recomendadas, para nuestro diseño supusimos como conocidos la constante del resorte y el área de la sección transversal del alambre y así de las ecuaciones (2) determinamos la longitud que deben tener los alambres (l_0) y la contracción máxima que sufrirán (l_f).

El esfuerzo y la deformación inicial de los alambres (ϵ_0) pueden ser determinadas empleando las ecuaciones (2) tomando una l_f como la longitud que adquieren los alambres al ser aplicada la precarga (s_f).

$$\begin{aligned} \epsilon_1 &= \frac{l_0 - l_f}{l_0} \\ \sigma_A &= \sigma_1 + \frac{kl_0}{A} \Delta\epsilon \\ \sigma_1 &= \frac{kl_0}{A} \epsilon_1 \end{aligned} \tag{3}$$

donde:

$$\Delta\epsilon = \epsilon - \epsilon_1$$

Como podemos ver si ϵ de la ecuación (1) es igual con $\Delta\epsilon$ de la ecuación anterior y tomado s_A de la ecuación (2) tenemos que (1) se convierte en una ecuación algebraica no lineal. Si se conocen los parámetros del material empleado, es decir: $\frac{\partial \sigma_c}{\partial M} M_s$, E , a y n , dicha ecuación puede ser resuelta para $\Delta\epsilon$ en función de la temperatura empleando algún método numérico conocido, como el de Newton-Raphson.

Conociendo $\Delta\epsilon$ es posible determinar la longitud que tomará el resorte para cada temperatura mediante la ecuación:

$$l = l_0 [1 - (\epsilon_1 + \Delta\epsilon)] \tag{4}$$

Síntesis del mecanismo

La longitud del alambre l como función de la temperatura, proporciona el comportamiento desplazamiento-temperatura de la corredera, por lo que el siguiente paso fue determinar el desplazamiento angular en la manivela. Para calcular dicho desplazamiento se empleó la siguiente ecuación propuesta por Cuenca:¹⁰

$$r(T) = R_1(p - o) + R_2 R_1(s - p) = \begin{pmatrix} r_1(T) \\ r_2(T) \end{pmatrix} \tag{5}$$

donde: o , p y s son las coordenadas de las articulaciones en la posición inicial, como se puede apreciar en la figura 6.

$$R_1 = \begin{pmatrix} \cos(\theta_1) & -\sin(\theta_1) & 0 \\ \sin(\theta_1) & \cos(\theta_1) & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix}$$

$$R_2 = \begin{pmatrix} \cos(\theta_2) & -\sin(\theta_2) & 0 \\ \sin(\theta_2) & \cos(\theta_2) & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix}$$

donde: α_1 , α_2 son los ángulos que deben girar los eslabones $p-o$ y $r-p$ para pasar de la posición inicial a una segunda posición.

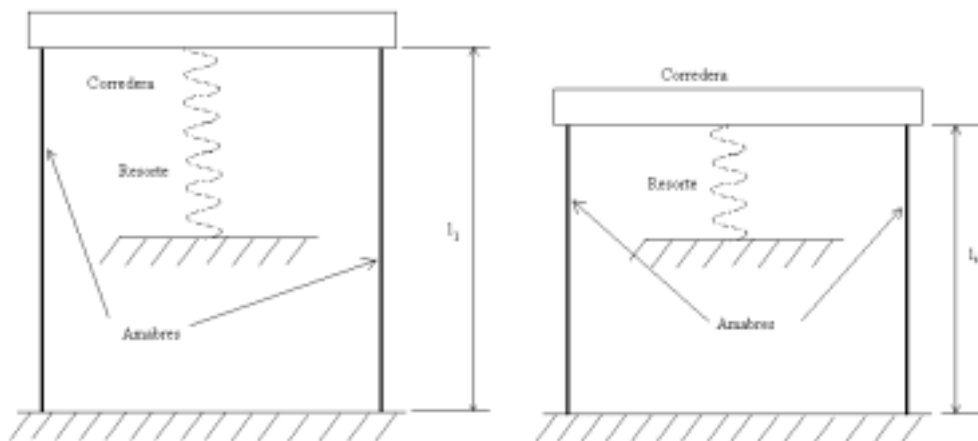


Fig. 5. Conjunto: alambres-corredera-resorte del termo-actuador.

$r_1(T)$ y $r_2(T)$ son las componentes del vector $r(T)$ que representa el desplazamiento que sufre la corredera y en nuestro caso están dadas por (4).

La ecuación 5 representa un sistema de ecuaciones no lineales y dadas las magnitudes de los eslabones podemos resolver para q_1 , q_2 empleando algún método numérico; en nuestro caso el método empleado fue el de Newton-Raphson.

Finalmente, considerando como datos: el máximo valor de α_1 de la solución de la ecuación 5 y el requerimiento de que el eslabón de salida del cuadrilátero gire 180° , se procedió a determinar la magnitud de los eslabones del cuadrilátero articulado. Para realizar lo anterior se empleó nuevamente la metodología propuesta por Cuenca¹⁰ con la siguiente ecuación:

$$R_1(s-0) + R_3(m-s) - R_4(m-n) - (n-0) = 0 \quad (6)$$

$$R_3 = \begin{pmatrix} \cos(\theta_3) & -\sin(\theta_3) & 0 \\ \sin(\theta_3) & \cos(\theta_3) & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} R_4 = \begin{pmatrix} \cos(\theta_4) & -\sin(\theta_4) & 0 \\ \sin(\theta_4) & \cos(\theta_4) & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix}$$

donde: s , m y n son las articulaciones del cuadrilátero articulado que se muestra en la figura 6, α_3 y α_4 son los ángulos que deben girar los eslabones $s-p$ y $n-m$ respectivamente; obviamente α_4 debe ser 180° y α_3 debe tomar el valor máximo de salida del mecanismo biela-manivela-corredera ($\alpha_{1máx}$). Dado lo anterior tenemos que deben darse las magnitudes de dos de los eslabones del cuadrilátero articulado para que el sistema sea consistente.

Una vez determinadas las magnitudes de los eslabones de los mecanismos: biela-manivela-corredera y cuadrilátero articulado, es posible determinar α_4 como función de la temperatura (T).

Prototipo

Empleando los criterios citados anteriormente, se calcularon las dimensiones de un prototipo del dispositivo propuesto en el presente trabajo. Las dimensiones libres del dispositivo se dieron tomando en cuenta que el prototipo sería con fines demostrativos, sin embargo es posible escalarlas para una aplicación determinada.

Los alambres empleados para construir el prototipo son de una aleación Ni-50%wtTi, aproximadamente, cuyo diámetro es 100mm y con una

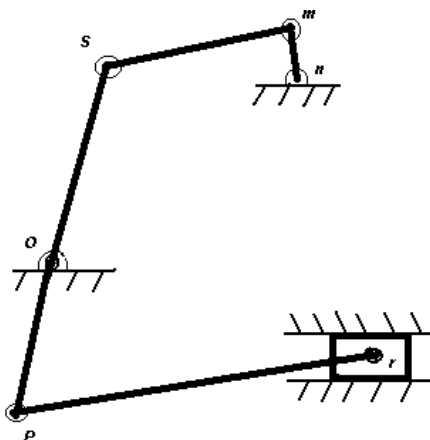


Fig. 6. Mecanismo del termo-actuador.

temperatura de activación (A_s) de 70°C . Se trata de alambres comerciales de los denominados *muscle wire* fabricado por la empresa Nitinol. Cabe mencionar que los alambres de Ni-Ti pueden ser remplazados por alambres y/o cintas de alguna aleación con memoria de forma que resulte más económica, como por ejemplo la aleación de Cu-Al-Be que ya ha sido obtenida en nuestro país.

Las dimensiones de los alambres fueron calculadas considerando un 8% de deformación, lo que brindaría unos 5 cm de desplazamiento en el resorte, lo cual es suficiente para ser percibido a la vista y es menor del 10% recomendado como máximo por el fabricante (Nitinol). Así mismo se consideró como esfuerzo máximo aplicado sobre el alambre 100MPa.

CONCLUSIONES

Se obtuvo un dispositivo capaz de realizar un movimiento circular continuo arrastrando una carga variable.

El dispositivo obtenido, opera con fluctuaciones térmicas provenientes de cualquier fuente (líquido, sólido o gas) que se encuentre a una mayor temperatura que la de activación de los alambres.

Los criterios de diseño empleados permiten controlar la posición del eslabón de salida del termo-actuador mediante la temperatura por lo que el dispositivo puede ser empleado para otros fines distintos al propuesto en el presente trabajo.

REFERENCIAS

1. C. M. Wayman, T.M. Duerig. An introduction to martensite and shape memory. Engineering Aspects of Shape Memory Alloys. London : Butterworth-Heinemann, 1990, pp. 3-20.
2. Patoor E., Berveiller M. Les alliages à mémoire de forme, Technologies de pointe. Hermes, PARIS, 1990.
3. K. Otsuka and C. M. Wayman. Superelasticity Effects and Stress-Induced Martensitic Transformations in Cu-Al-Ni Alloys. Acta Metallurgica, 24, 207-226, (1976).
4. K. Otsuka, H. Sakamoto and K. Shimizu. Successive Stress-Induced Martensitic Transformations and Associated Transformation Pseudoelasticity in Cu-Al-Ni. Acta Metallurgica, 27, 585-601, (1979).
5. E. Olaz R. Fabricación de la aleación y cintas por solidificación rápida en aleaciones Cu-Al-Be. Tesis de licenciatura en Ingeniería Mecánica, Facultad de Ingeniería UNAM (1998)
6. E. Patoor, A Eberhardt an M. Berveiller. Micromechanical Modeling of Superelasticity in Shape Memory Alloys. Proceedings of de III European Symposium on Martensitic Transformations BARCELONA, SPAIN: PLANES, (ed), J de Physique Colloque C-2, pp. 501-506, (1994).
7. S. Lecterq, G. Bourbon and C. Lexcelent. Plasticity Like Model of Martensite Phase in Shape Memory Alloys. Proceedings of de III European Symposium on Martensitic Transformations BARCELONA, SPAIN: PLANES, (ed), J de Physique Colloque C-2, p. 513, (1994).
8. Y Gillet, M., A. Meunier, V. Brailovski, F. Trochu, E. Patoor and M. Berveiller. Comparison of Thermomechanical Models for Shape Memory Alloy Spring. J de Physique IV Colloque C8, supplément au Journal de Physique III, volume 5, p. 1165 (1995).
9. J. Cortés P. Contribución al Estudio de la Pseudoelasticidad en Aleaciones con Memoria de Forma. Tesis de Maestría. DEPFI, UNAM. (1998).
10. F. Cuenca. Simulación de mecanismos empleando álgebra de números complejos. Reportes internos de investigación de la DEPFI UNAM (En preparación).