





Desarrollo de una aplicación para MATLAB® para el cálculo y la selección de alambres de NiTi en actuadores electromecánicos Development of a MATLAB® application for the calculation and selection of NiTi wires in electromechanical actuators

F. Jiménez-Navarrete ^a, L. A. Mier-Quiroga ^{a*}, E. Coutiño-Moreno ^a, D. Maldonado-Onofre ^b

^a Tecnológico Nacional de México, Tecnológico de Estudios Superiores de Jocotitlán, Carretera Toluca-Atlacomulco, Km 44.8, Ejido de San Juan y San Agustín, Jocotitlán Estado de México.

Resumen

Se presenta el desarrollo de una aplicación en MATLAB®, cuya finalidad es simplificar el proceso de cálculo y selección de alambres de NiTi (Níquel-Titanio), para su implementación como elementos de generación de potencia en actuadores electromecánicos, además de aproximar la respuesta térmica para sus condiciones de operación. El desarrollo del algoritmo del programa integra múltiples subfunciones creadas con base en el modelado mecánico, térmico y termoelectrico para los alambres de NiTi. Se comprueba la efectividad del programa en el cálculo del diámetro, la longitud y en los parámetros como la fuerza de deformación requerida al comparar los resultados obtenidos con los valores recomendados por fabricantes de alambres de NiTi.

Palabras Clave: NiTi, alambres musculares, MATLAB, aleación con memoria de forma.

Abstract

The development of a MATLAB® application is presented, which has the finality to simplify the process of calculation and selection of NiTi (Nickel-Titanium) wires, for their implementation as power generation elements in electromechanical actuators, in addition to approximate the thermal response for their operating conditions. The program algorithm development integrates multiple subfunctions created based on mechanical, thermal and thermoelectric modeling for NiTi wires. The effectiveness of the program in calculating the diameter, length and parameters such as the required deformation force is verified by comparing the results obtained with the values recommended by NiTi wire manufacturer.

Keywords: NiTi, muscle wires, MATLAB, shape memory alloy.

1. Introducción

Las aleaciones con memoria de forma se conforman por el grupo de aleaciones que presentan un fenómeno característico nombrado como Efecto de Memoria de Forma, en el que el material, por ejemplo, un alambre, al ser calentado hasta alcanzar su temperatura de activación, es capaz de recuperar su forma inicial después de presentar deformaciones inducidas en el rango de su temperatura de desactivación (Clithy, 2020). El efecto de memoria de forma es generado por la transición entre las fases de la estructura cristalina en la aleación, de martensita a austenita y viceversa al inducir cambios de temperatura en el material. Entre las aleaciones con memoria de forma más comunes se encuentran las aleaciones de Níquel-Titano (NiTi), Cobre-Zinc-Aluminio (CuZnAl), y Cobre-Aluminio-Níquel (CuAlNi). No obstante, las aleaciones de NiTi exhiben

un mejor rendimiento en sus prestaciones termomecánicas, además de ser una aleación biocompatible y con alta resistencia a la oxidación, motivos por lo que son ampliamente elegidas para aplicaciones en actuadores (Barras *et al.*, 2000), (Huang, 2002). La transición entre las fases martensita gemela, martensita no gemela y austenita en la estructura cristalina, induce un cambio en las propiedades mecánicas y en las geometrías del material, que pueden ser implementado para el diseño y la elaboración de actuadores (Gómez *et al.*, 2005), (Spaggiari *et al.*, 2011), (Sun *et al.*, 2009). El uso de actuadores accionados por componentes fabricados utilizando una aleación de NiTi, proporciona una alternativa a los métodos para el diseño de actuadores, los requerimientos mecánicos pueden expresarse en términos de fuerza, desplazamiento, rigidez, tamaño, masa, frecuencia de funcionamiento (o tiempo de respuesta), potencia, eficiencia y resolución (Huber *et al.*,

*Autor para la correspondencia: luis.mier@tesjo.edu.mx

Correo electrónico: 2016150480490@tesjo.edu.mx (Francisco Jiménez-Navarrete), luis.mier@tesjo.edu.mx (Luis Antonio Mier-Quiroga), elvis.coutino@tesjo.edu.mx (Elvis Coutiño-Moreno), daniel.maldonado@tesjo.edu.mx (Daniel Maldonado-Onofre).

1997). En el cálculo y la selección de actuadores basados en aleaciones con memoria de forma, los principales criterios técnicos de diseño son: la forma, las dimensiones del elemento actuador, las temperaturas de operación, la fuerza de actuación, el desplazamiento requerido, el ancho de banda de funcionamiento, la vida útil, la eficiencia energética y el costo (Huang, 2002), (Mohd *et al.*, 2016), (Mirvakili *et al.*, 2017).

En el cálculo y selección de los alambres de NiTi como elementos motrices en actuadores, se realiza desde la generación de un modelo que integre los parámetros de funcionamiento del actuador, basado en la búsqueda, recopilación y comparación de memorias de cálculo realizadas en trabajos donde se han implementado alambres de NiTi. Una segunda opción, es la incorporación de modelos que describan el comportamiento de las propiedades térmicas, mecánicas y termoeléctricas del material. Otra alternativa es la tabulación de los valores de fuerza y desplazamiento requeridos con los parámetros de funcionamiento recomendados por los fabricantes Dynalloy (2023), Fort Wayne Metals (2023).

Existen trabajos que aportan un análisis en el cálculo de alambres y resortes de NiTi en actuadores y mecanismos destacando los siguientes: Lai *et al.* (2013) elaboró un manipulador en miniatura de dos grados de libertad, Ganesh *et al.* (2011) construyó un mecanismo de seguimiento de sol, Holschuh *et al.* (2015) fabricó faja de compresión para ropa y Moallem *et al.* (2009) construyó un mecanismo de actuación rotatoria siendo trabajos que consideran la mayoría de los modelos del alambre de NiTi, desarrollando un modelo termomecánico, empleando calentamiento por efecto Joule, donde se relacionan los esfuerzos mecánicos y las deformaciones del alambre, con el modelo de la transferencia de calor. Por otra parte, Santiago (2002) muestra el estudio de la relación de las geometrías y de las propiedades mecánicas del alambre de NiTi con la fuerza y desplazamiento de salida generados; An *et al.* (2008) estudió la relación entre el diámetro del alambre de NiTi con la corriente eléctrica necesaria para el accionamiento, la frecuencia alcanzable y Eisakhani *et al.* (2011) presentó un modelo de la transferencia de calor en alambres de NiTi. Cabe destacar que, en los trabajos antes mencionados, los análisis desarrollados se enfocaron en una o dos características del comportamiento del alambre.

Sin embargo, no se ha encontrado trabajos de investigación, librerías de código o programas, cuyo objetivo principal sea el cálculo de las geometrías y de la respuesta térmica en los alambres de NiTi para aplicaciones en actuadores electromecánicos. Con el objetivo de únicamente estudiar y analizar el comportamiento mecánico y/o térmico del alambre, Santiago (2002) y Kurzawa *et al.* (2017), hacen referencia al desarrollo de un programa. Santiago (2002) además de recopilar las ecuaciones para el modelado mecánico de alambres y resortes fabricados con aleaciones con memoria de forma, desarrolló en Java, una calculadora para el diseño de resortes con memoria de forma. Por otro lado, Kurzawa *et al.* (2017), con base al modelo mecánico y térmico que emplearon para estudiar el comportamiento termomecánico de los actuadores de aleación con memoria de forma, desarrollaron en Visual Studio C# una calculadora para las geometrías de los alambres de NiTi.

El trabajo y programa que se presenta en este artículo, integra el modelado mecánico, térmico y termoeléctrico para alambres de NiTi.

2. Métodos

El objetivo del proyecto es el desarrollo y la programación de una aplicación de MATLAB® que permita facilitar el cálculo y la selección de alambres de NiTi para actuadores electromecánicos. Para tal propósito se requiere diseñar y desarrollar un algoritmo en un programa que integre los modelos mecánicos de Santiago (2002) y Kurzawa *et al.* (2017), térmicos de Cengel *et al.* (2015) y termo-eléctricos de Kurzawa *et al.* (2017), y Eisakhani *et al.* (2011) de los alambres de NiTi.

La metodología de cálculo comienza con la delimitación de las variables y las configuraciones mecánicas que se consideran para obtener el dimensionamiento geométrico, así como las consideraciones térmicas para realizar el análisis térmico en los alambres.

Una vez definidas las consideraciones mecánicas y térmicas, se determinaron las variables de entrada al programa, lo que implica proporcionar los parámetros de actuación requeridos y las propiedades mecánicas de la aleación de NiTi, variables con las que se obtiene el dimensionamiento del alambre. Para obtener la respuesta térmica del alambre, se ingresan las propiedades térmicas y físicas de la aleación y del aire circundante al alambre.

Tanto el dimensionamiento geométrico, como la aproximación teórica de la respuesta térmica en los alambres de NiTi accionados por efecto Joule y enfriados mediante convección forzada o natural, se describen en la siguiente sección, donde se detallan los modelos y las ecuaciones utilizadas en el programa para realizar el cálculo de los alambres de NiTi en actuadores electromecánicos.

2.1. Consideraciones Mecánicas

Los parámetros mecánicos de actuación que se toman en cuenta en el cálculo son el desplazamiento, la fuerza de actuación y la fuerza de deformación, que serán directamente percibidos por el alambre, parámetros que son representados en la Figura 1 con las variables s , F_{TA} y F_D .

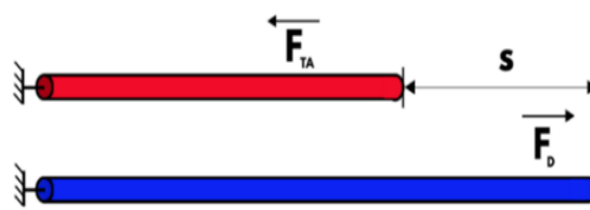


Figura 1: Parámetros mecánicos de actuación.

Para el cálculo se consideran tres configuraciones mecánicas para generar la deformación del alambre, las cuales se ejemplifican en la Figura 2.

Si la construcción final del actuador genera la deformación del alambre, sin la necesidad de integrar otro elemento de actuación, únicamente se determina la fuerza de deformación $F_D(N)$. Cuando el actuador disponga de resortes metálicos, bandas de goma u otro elemento elástico para deformar el alambre, se calcula la constante elástica mínima $k_{EE} (N/m)$. En caso de integrar un segundo alambre de NiTi, para inducir la deformación en el alambre principal, se calcula el diámetro del alambre secundario $D_2(m)$.

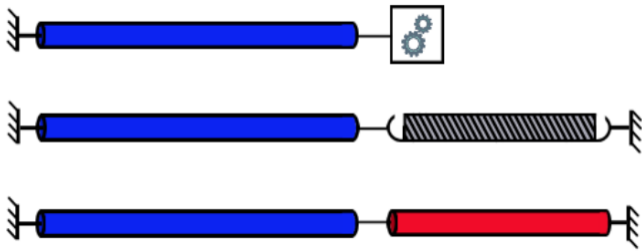


Figura 2: Configuraciones de actuación según el mecanismo de deformación (Superior: Alambre sin contra actuador, Centro: con elemento elástico, Inferior: doble alambre de NiTi).

2.2. Consideraciones Térmicas

La respuesta térmica del alambre durante el calentamiento y enfriamiento se obtiene al modelar los alambres como cilindros isotérmicos, siguiendo el método de análisis de transferencia de calor en régimen transitorio unidimensional para sistemas concentrados, donde la temperatura del fluido de enfriamiento permanecerá constante. No se consideran las variaciones en el área, volumen y los efectos de la transferencia de calor por radiación, al ser insignificantes en comparación con los efectos de la transferencia de calor por convección natural o forzada. El enfriamiento por convección natural o forzada, desde la temperatura de activación hasta la temperatura de desactivación, es descrito por Cengel et al. (2015). En contraparte, para incluir el comportamiento térmico durante el calentamiento mediante efecto Joule, considerando las pérdidas de calor al entorno por convección, se utiliza los modelos implementados por Kurzawa et al (2017) y Eisakhani et al. (2011).

3. Descripción del funcionamiento del programa

La programación de la aplicación se basa en la integración de múltiples subfunciones, que permiten la caracterización efectiva del alambre. El algoritmo utilizado y las funciones utilizadas para realizar el cálculo y la selección, se representan en el diagrama de flujo de la Figura 3.

3.1. Datos de Entrada

Los datos que se ingresan al programa, son los parámetros de actuación que obtiene el diseñador del actuador, al realizar el análisis mecánico y cinético del mecanismo que integrara los alambres de NiTi. Además de ingresar las propiedades mecánicas, térmicas y físicas, las cuales se obtienen de las hojas de datos proporcionadas por los fabricantes.

Los parámetros de funcionamiento del alambre que se ingresan al programa son el desplazamiento s (m) y la fuerza de actuación F_{TA} (N).

Respecto a las propiedades mecánicas a ingresar se corresponden al módulo de Young E_A (Pa) y E_M (Pa), al máximo esfuerzo cortante admisible σ_A (Pa) y σ_M (Pa) y la máxima deformación longitudinal ΔL (%) admisible. Se ingresan los valores de las propiedades mecánicas tanto en la fase austenita (a alta temperatura) y martensita (a baja temperatura).

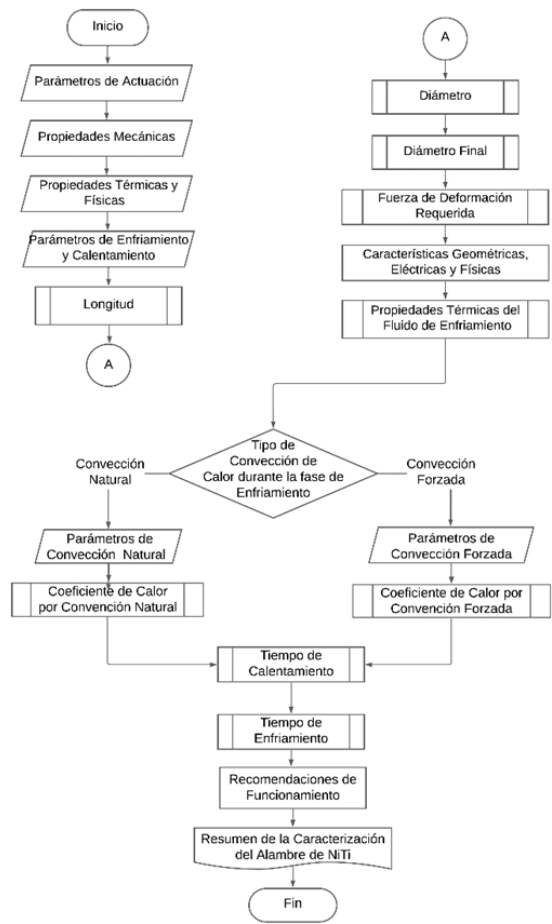


Figura 3: Diagrama de flujo del programa “NiTi Wires Calculator”.

Las propiedades térmicas que se deben proporcionar son el calor específico C_p (J/kg°C), la conductividad térmica k (W/m°C), la temperatura de activación T_A (°C), la temperatura de desactivación T_M (°C) y la temperatura del fluido de enfriamiento T_{CF} (°C). Mientras que las propiedades físicas que se ingresan, son la densidad ρ_m (kg/m³) y la resistividad eléctrica ρ_e ($\Omega \cdot m^2/m$).

La parametrización de las variables de enfriamiento, consiste en la selección del método de enfriamiento, ya sea, convección natural o convección forzada. Al seleccionarse la convección natural como método de enfriamiento, se elige entre modelo térmico propuesto por Eisakhani et al. (2011) o el modelo de Churchill que es estudiado por Cengel et al. (2015). El modelo presentado por Eisakhani et al. (2011), determina el coeficiente de transferencia de calor en función del ángulo de funcionamiento φ (rad) ingresado, con respecto al plano normal a la fuerza de gravedad. En contraparte, el modelo de Churchill determina el coeficiente de transferencia para alambres horizontales. En el caso de seleccionar enfriamiento por convección forzada, el modelo térmico a implementar es el de Churchill, para el cual, se ingresa la velocidad del fluido de enfriamiento vel (m/s).

Mientras que, la parametrización de las variables de calentamiento, consiste en ingresar la corriente eléctrica I (A), que se inducirá en el alambre.

3.2. Longitudes del alambre

Las longitudes en las temperaturas activación L_A (m) y de desactivación L_M (m), se determinan mediante (1), (2) y (3) respectivamente (Santiago, 2002), (Kurzawa et al., 2017).

$$L_A = \frac{s(1+\varepsilon_A)}{\Delta L - \varepsilon_A} \quad (1)$$

$$L_M = L_A + s \quad (2)$$

$$\varepsilon_A = \frac{\sigma_A}{E_A} \quad (3)$$

donde:

ε_A (-) = Coeficiente de deformación unitaria en la fase austenita

La máxima deformación longitudinal ΔL , es un parámetro que puede ajustarse desde 1 % hasta un valor del 8 %. Si se considera un valor del 8 %, reduce la longitud inicial del alambre, pero limita la cantidad de ciclos de operación antes del fallo. Por otro lado, un valor del 5 %, o inferior, permite al alambre funcionar miles de ciclos, pero se incrementan las longitudes de funcionamiento Santiago (2002), (Dynalloy, 2023).

3.3. Diámetro del alambre.

Acorde a la configuración de actuación seleccionada (ver Figura 4), se podrá considerar la fuerza de deformación F_D (N) requerida en el cálculo del diámetro D_c (m) de alambre.

Si el diámetro del alambre D_c , está únicamente en función de la fuerza de actuación requerida por el actuador F_{TA} , se determina usando (4) estudiada por Santiago (2002). En contraste, si se consideran los efectos de la fuerza de deformación F_D , el diámetro D_c , se obtiene empleando (5).

$$D_c = \sqrt{\frac{4F_{TA}}{\pi\sigma_A}} \quad (4)$$

$$D_c = \sqrt{\frac{4F_{TA}}{\pi(\sigma_A - \sigma_M)}} \quad (5)$$

El esfuerzo máximo admisible en alta temperatura σ_A , es una propiedad mecánica del material que está vinculada con la vida útil de funcionamiento del alambre (el número de ciclos de trabajo que puede realizar). Establecer un valor alto para el esfuerzo máximo admisible en alta temperatura, implica en una reducción del diámetro, pero disminuyendo la vida operativa antes del fallo (Santiago, 2002), (Dynalloy, 2023).

Una vez que se ha calculado el diámetro D_c , en caso de ser requerido, se realiza la búsqueda del calibre comercial próximo para el diámetro calculado D_c para determinar el diámetro final del alambre D (m), el programa internamente tiene precargados calibres comerciales de Dynalloy (2023). De lo contrario, el diámetro final del alambre D , se corresponderá al valor del diámetro calculado D_c .

El diámetro D será la variable a usar en el modelado térmico del alambre.

3.4. Fuerza de deformación

En el cálculo se consideran dos casos, uno en el que el mecanismo proporciona la fuerza de deformación F_D , y otro en el caso de que no sea suficiente la fuerza ejercida para deformar el alambre, motivo por el que se requiera integrar al dispositivo un elemento elástico (por ejemplo, un muelle o un resorte), o un alambre secundario de NiTi para efectuar la deformación sobre el alambre principal. La fuerza de deformación F_D , se calcula usando (6) (Santiago, 2002), (Kurzawa et al., 2017).

$$F_D = \sigma_M \left(\frac{\pi D^2}{4} \right) \quad (6)$$

3.5. Características geométricas y propiedades físicas

Después de determinar el diámetro D y la longitud inicial L , del alambre, la cual se corresponde a la longitud de desactivación L_M , las características geométricas a calcular son el área de la superficie de transferencia de calor A_s (m^2), el volumen V (m^3) y la longitud característica L_c (m), mediante (7), (8) y (9), respectivamente, las cuales son magnitudes que se utilizan en el modelado térmico. Mientras que, las magnitudes físicas a calcular, son la masa m (kg) mediante (10) y la resistencia eléctrica R (Ω).

$$A_s = \pi DL \quad (7)$$

$$V = \frac{\pi D^2}{4} L \quad (8)$$

$$L_c = \frac{D}{4} \quad (9)$$

$$m = \rho_m V \quad (10)$$

La resistencia eléctrica R del alambre, se calcula al usar (11), cuando se proporciona un valor general para la resistividad eléctrica del material, mientras que, se utiliza (12), cuando los fabricantes, por ejemplo, Dynalloy (2023), proporciona la resistividad eléctrica $\rho_e(D)$ ($\Omega \cdot m$) en función del diámetro del alambre.

$$R = \rho_e \frac{L}{A_T} \quad (11)$$

$$R = [\rho_e(D)] L \quad (12)$$

$$A_T = \frac{\pi D^2}{4} \quad (13)$$

donde:

A_T (m^2) = Área de la sección transversal del alambre

3.6. Propiedades de térmicas del fluido de enfriamiento

Se considera el aire circundante al alambre, como el fluido de enfriamiento, del cual se determinan sus propiedades térmicas a la temperatura de la película de contacto T_f ($^{\circ}C$). Las propiedades térmicas a calcular son: la conductividad térmica k ($W/m^{\circ}C$), la viscosidad cinemática ν (m^2/s), el número de Prandtl Pr (-) y el coeficiente de expansión volumétrica β ($1/K$). La temperatura de la película de contacto T_f , se determina mediante (14) (Cengel et al., 2015).

$$T_f = \frac{T_A + T_{CF}}{2} \quad (14)$$

3.7. Coeficiente de transferencia de calor por convección natural

El coeficiente de transferencia de calor por convección natural h_{CN} ($W/m^2\text{°C}$), es la medida de la tasa de transferencia de calor entre el alambre y un fluido de enfriamiento estacionario (o en reposo) y se calcula mediante (15).

$$h_{CN} = \frac{k}{D} Nu_{CN} \quad (15)$$

donde:

Nu_{CN} (–) = Número de Nusselt en transferencia de calor por convección natural

Para la creación del programa se consideran dos modelos térmicos para el cálculo del número de Nusselt en convección natural Nu_{CN} , de acuerdo al ángulo de inclinación φ durante el funcionamiento del alambre. Para determinar el número de Nusselt en convección natural para los alambres que operaran de manera horizontal $\varphi = 0$, se emplea (16), la cual es aplicable si el número de Rayleigh Ra (–) está dentro del rango $Ra \leq 10^{12}$ (Cengel *et al.*, 2015). En cambio, si el alambre trabaja con un ángulo de inclinación de $0 \leq \varphi \leq \pi/2$, se utiliza una correlación empírica mostrada en (17) para alambres que presentan un esfuerzo de 100 MPa y donde el número de Rayleigh Ra está dentro del rango $2.6 \times 10^{-8} \leq Ra \leq 6 \times 10^{-1}$ (Eisakhani *et al.*, 2011).

El número de Rayleigh, es la razón de las fuerzas de flotabilidad, las difusividades térmicas y de la cantidad de movimiento (Cengel *et al.*, 2015). En ambos modelos, el número de Rayleigh se calcula usando (18).

El número de Prandtl es la propiedad térmica que describe la relación entre la difusividad de la cantidad de movimiento y la difusividad térmica en el fluido.

$$Nu_{CN} = \left[0.6 + \frac{0.387 Ra^{1/6}}{[1 + [0.599/Pr]^{9/16}]^{8/27}} \right]^2 \quad (16)$$

$$Nu_{CN} = [0.03\varphi + 0.16] + [-0.1\varphi^2 + 0.03\varphi + 0.81] Ra^{[-0.03\varphi + 0.16]} \quad (17)$$

$$Ra = \frac{g\beta(T_A - T_{CF})D^3}{\nu^2} Pr \quad (18)$$

donde:

g (m/s) = Aceleración gravitatoria terrestre (9.81)

3.8. Coeficiente de transferencia de calor por convección forzada

El coeficiente de transferencia de calor por convección forzada h_{CF} ($W/m^2\text{°C}$), es la medida de la tasa de transferencia de calor entre el alambre y un fluido de enfriamiento en movimiento. Se calcula usando (19) (Cengel *et al.*, 2015).

$$h_{CF} = \frac{k}{D} Nu_{CF} \quad (19)$$

donde:

Nu_{CF} (–) = Número de Nusselt en transferencia de calor por convección forzada

El número Nusselt Nu_{CF} , en la transferencia de calor por convección forzada, se calcula empleando (20).

$$Nu_{CF} = 0.3 + \frac{0.62 Re^{1/2} Pr^{1/3}}{[1 + (0.4/Pr)^{2/3}]^{1/4}} \left[1 + \left(\frac{Re}{282000} \right)^{5/8} \right]^{4/5} \quad (20)$$

donde:

Re (–) = Número de Reynolds

El número de Reynolds Re , representa la razón entre las fuerzas de inercia y las fuerzas viscosas que actúan sobre el fluido, se calcula empleando (21).

$$Re = \frac{vel D}{\nu} \quad (21)$$

3.9. Número de Biot

Para aproximar la respuesta térmica del alambre, es fundamental determinar la aplicabilidad del análisis de sistemas concentrados, mediante el número de Biot Bi (–), que es la razón entre la convección en la superficie con respecto a la conducción dentro del cuerpo. El número de Biot Bi , se calcula empleando (22), y se recomienda que sea lo más próximo a cero (Cengel *et al.*, 2015).

$$Bi = \begin{cases} \frac{h_{CN} L_c}{k}, & \text{para conveccion natural} \\ \frac{h_{CF} L_c}{k}, & \text{para conveccion forzada} \end{cases} \quad (22)$$

En general se acepta que el análisis de sistemas concentrados es aplicable sí $Bi \leq 0.1$. Al cumplirse este criterio, se puede obtener la respuesta térmica del alambre.

3.10. Tiempo de enfriamiento

Mediante el análisis sistemas concentrados presentado en (23), se determina el tiempo requerido para descender a la temperatura de desactivación por convección natural o forzada, cuando no se induce una corriente eléctrica al alambre. Para calcular el tiempo de enfriamiento t_c (s), se emplea (24), que obtiene al despejar t de (23).

$$\frac{T_A - T_{CF}}{T_M - T_{CF}} = e^{-t \left(\frac{hA_s}{\rho C_p V} \right)} \quad (23)$$

$$t_c = - \frac{\ln[\theta]}{b} \quad (24)$$

donde:

θ (–) = Temperatura adimensional

b (1/s) = Constante de tiempo

La temperatura adimensional θ , corresponde a la relación entre la temperatura de desactivación T_M , la temperatura del fluido de enfriamiento T_{CF} y la temperatura de activación T_A . Se calcula mediante (25).

$$\theta = \frac{T_M - T_{CF}}{T_A - T_{CF}} \quad (25)$$

Por otro lado, la constante de tiempo b , se calcula mediante (26). Determina la relación entre el coeficiente de transferencia de calor h_{CN} o h_{CF} , el área de la superficie de transferencia de calor A_s , la masa m y el calor específico C_p (Cengel et al., 2015).

$$b = \begin{cases} \frac{h_{CN}A_s}{mC_p}, & \text{para conveccion natural} \\ \frac{h_{CF}A_s}{mC_p}, & \text{para conveccion forzada} \end{cases} \quad (26)$$

3.11. Tiempo de calentamiento

El tiempo de calentamiento t_h (s), desde la temperatura de desactivación, mediante calentamiento por efecto Joule y considerando las pérdidas de calor por convección al medio circundante, se calcula usando (27), que se obtiene del modelo térmico implementado en Kurzawa et al. (2017), en conjunto con los parámetros térmicos que son obtenidos en el cálculo del tiempo de enfriamiento del alambre, acorde a Cengel et al. (2015), y a Eisakhani et al. (2011).

$$t_h = \begin{cases} \frac{mC_p(T_A - T_M)}{I^2R - h_{CN}A_s(T_A - T_{CF})}, & \text{para conveccion natural} \\ \frac{mC_p(T_A - T_M)}{I^2R - h_{CF}A_s(T_A - T_{CF})}, & \text{para conveccion forzada} \end{cases} \quad (27)$$

3.12. Frecuencia de funcionamiento

Usando la relación mostrada en (28), se determina la frecuencia máxima de funcionamiento f (Hz) que podría alcanzar el alambre, sin considerar los intervalos de espera para las etapas de activación y desactivación.

$$f = \frac{1}{t_h + t_c} \quad (28)$$

3.13. Recomendaciones de funcionamiento

La corriente eléctrica mínima I_M (A), que permite calentar el alambre compensando las pérdidas de calor Q_C (W) al medio circundante o al fluido de enfriamiento se calcula mediante (29) y (30).

$$I_M \geq [Q_C/R]^{1/2} \quad (29)$$

$$Q_C = hA_s(T_A - T_{CF}) \quad (30)$$

Después de determinar la fuerza de deformación requerida F_D y de acuerdo a la elección del elemento implementado en el actuador para la deformación del alambre, se calcula la constante elástica k_{EE} mediante (31).

$$k_{EE} = \frac{F_D}{s} \quad (31)$$

Por otro lado, si se implementa un segundo alambre, el diámetro D_2 se determina mediante (32).

$$D_2 = \sqrt{\frac{4F_D}{\pi(\sigma_A - \sigma_M)}} \quad (32)$$

4. Resultados

Se presenta un panorama general de los resultados obtenidos mediante el uso del programa desarrollado, ver Figura 4, para el dimensionamiento y la aproximación teórica de la respuesta térmica del alambre en función de la fuerza de actuación, del desplazamiento de funcionamiento y de las propiedades mecánicas, térmicas, eléctricas y físicas de la aleación.

Es importante mencionar que las Figuras 5, 6, 7, 8 y 9 mostradas en esta sección, no forman parte de la interfaz gráfica en el programa desarrollado. Las Figuras 5 y 6, permiten realizar una comparación grafica entre los resultados obtenidos en el dimensionamiento del alambre al implementar el programa desarrollado con los valores recomendados por Dynalloy (2023). Mientras que las Figuras 7, 8 y 9, muestran una comparación de los resultados de la respuesta térmica del alambre para los diferentes valores de las temperaturas de operación y de las propiedades térmicas del alambre de NiTi.

La información de las propiedades mecánicas de la aleación de NiTi se muestra en la Tabla 1, mientras que en la Tabla 2, se visualizan las propiedades térmicas del NiTi. Los valores mostrados en la Tablas 1 y en la Tabla 2, corresponden a los datos proporcionados por Dynalloy (2023).

Tabla 1: Propiedades mecánicas del NiTi

Propiedad	Símbolo	Valor
Módulo de Young del NiTi en la fase austenita	E_A	83 GPa
Módulo de Young del NiTi en la fase martensita	E_M	34 GPa
Esfuerzo máximo admisible en la fase austenita	σ_A	172.37 MPa
Esfuerzo máximo admisible en la fase martensita	σ_M	68.95 MPa

Tabla 2: Propiedades térmicas y físicas del del NiTi.

Propiedad	Símbolo	Valor
Temperatura de activación.	T_A	70-90 °C
Temperatura de desactivación.	T_M	50-70 °C
Conductividad térmica de la aleación de NiTi	k_{NiTi}	18 W/m°C
Capacidad de calor específico	C_p	837.36 J/kg°C
Densidad de la aleación de NiTi	ρ_m	645 kg/m ³
Resistividad eléctrica (en función del diámetro)	ρ_e	1425-4.3 Ω/m

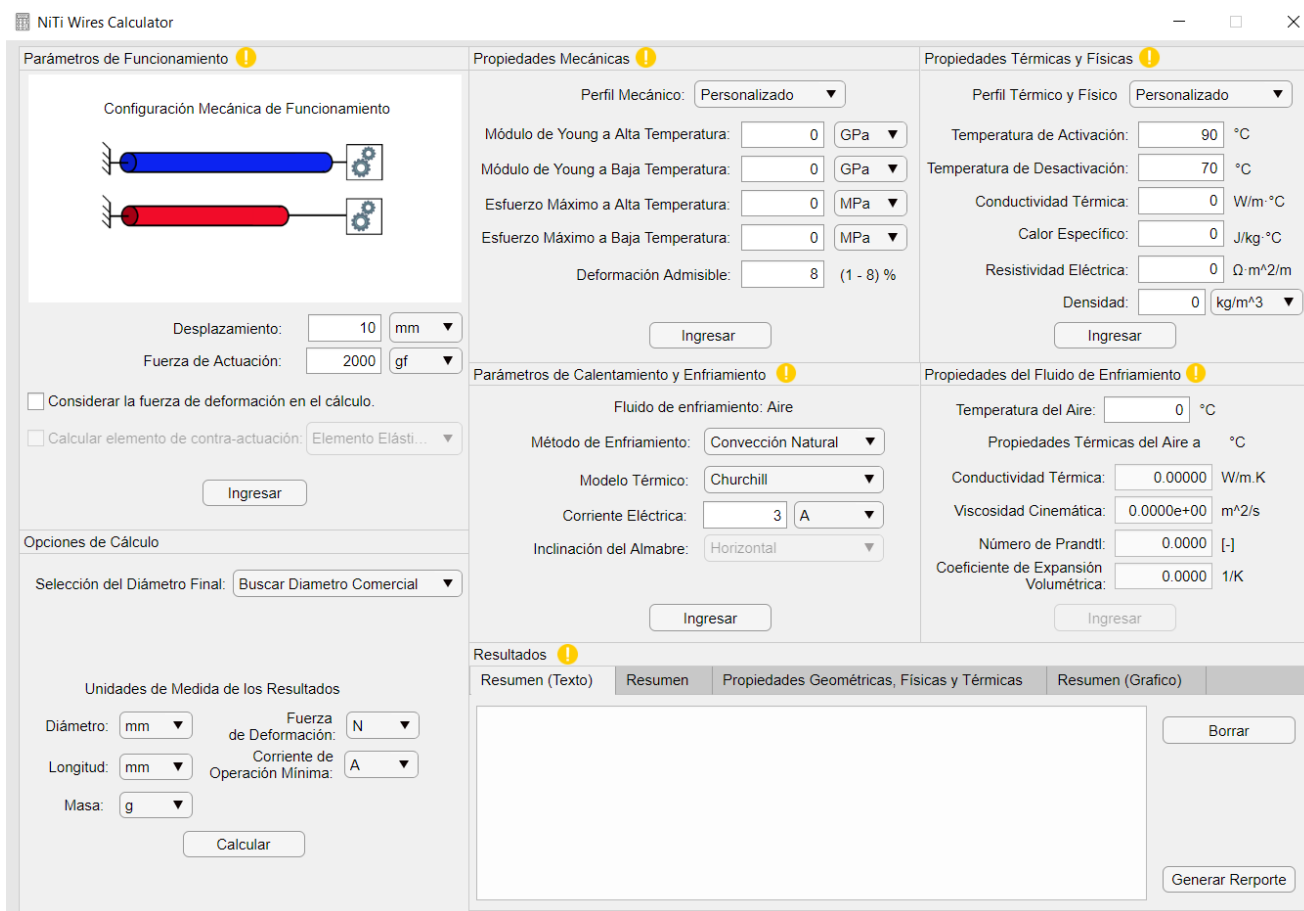


Figura 4: Interfaz principal del programa “NiTi Wires Calculator”.

4.1. Longitudes de funcionamiento.

Las longitudes de activación (al contraerse el alambre) y de desactivación (al deformarse el alambre), para un desplazamiento de 10 mm, y considerando un porcentaje de deformación longitudinal máxima del 8 %, como se observa en la Figura 5, se obtienen longitudes durante la activación de 12.86 cm y 13.86 cm durante la desactivación. Mientras que, si se configura un porcentaje del 2 %, las longitudes obtenidas son de 55.91 cm y 56.91 cm, en contracción y deformación.

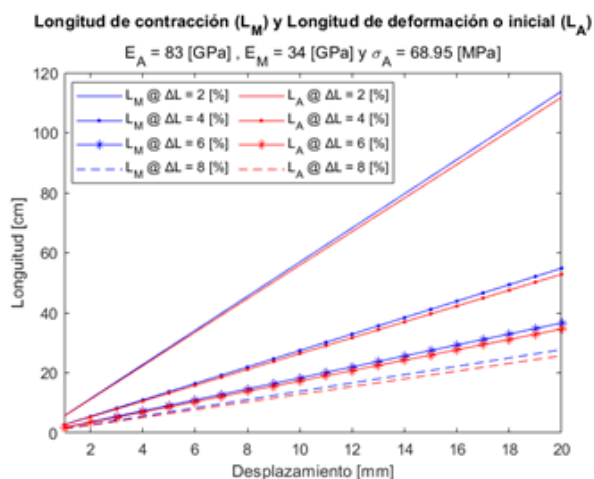


Figura 5: Longitudes del alambre de NiTi.

Los resultados mostrados en la Figura 5, permiten visualizar la comparación entre los distintos porcentajes de la máxima deformación longitudinal y así como sus efectos en las longitudes de funcionamiento del alambre. Cada conjunto de líneas corresponde a un porcentaje de deformación longitudinal máxima de 2, 4, 6 y 8 %.

4.2. Diámetro

El diámetro calculado en función de la fuerza de actuación en un rango de 1 gf a 3600 gf. Al comparar los diámetros calculados con el programa con los diámetros recomendados por Dynalloy (2023) para el mismo rango de fuerzas de actuación, se observa una variación promedio de 0.0004 mm y porcentaje de error promedio del 0.64 %.

Se representa gráficamente en la Figura 6, la comparación entre los diámetros calculados (línea negra continua) y los diámetros recomendados (línea azul punteada) en función de la fuerza de actuación requerida.

4.3. Fuerza de deformación

La fuerza de deformación requerida calculada en función del diámetro en un rango de 0.038 mm a 0.510 mm, al compararse con la fuerza de deformación requerida recomendada por Dynalloy (2023) en el mismo intervalo de diámetros se observa una variación promedio de 13.5 gf y un porcentaje de error promedio equivalente al 3.13 %.

En la Figura 7, se visualiza la comparación entre las fuerzas de deformación obtenidas mediante la aplicación desarrollada y las fuerzas de deformación recomendadas.

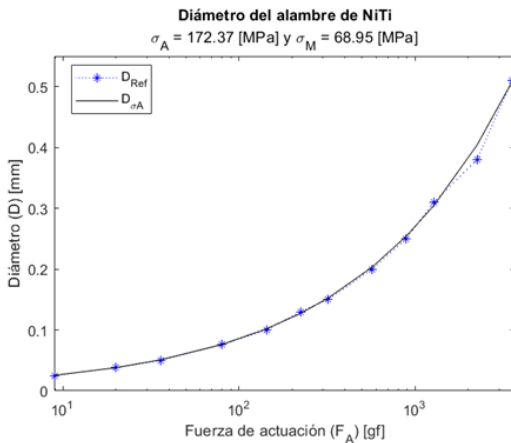


Figura 6: Diámetro del alambre de NiTi.

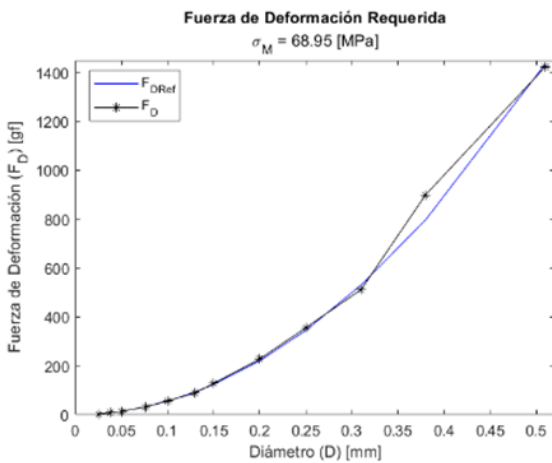


Figura 7: Fuerza de deformación requerida.

4.4. Tiempo de enfriamiento

En la Figura 8, se muestra la tendencia del tiempo de enfriamiento para temperaturas adimensionales de 0.1 hasta 0.9, los cuales corresponden para temperatura de activación de 70 °C, 90 °C y 120 °C, para temperaturas del aire de 0 °C a 35 °C y temperaturas de desactivación desde 40 °C hasta 90 °C. Se considera la constante de tiempo b de 0.1 s⁻¹ a 15 s⁻¹, rango que se corresponde para diámetros de alambre de 0.038 mm a 0.510 mm en función de coeficientes de transferencia de calor desde 1 W/m²°C hasta 1500 W/m²°C.

Por ejemplo, se calcula un tiempo de enfriamiento de 5.86 s para un alambre de 0.51 mm de diámetro y 100 mm de longitud, que funciona a una temperatura de activación de 90 °C y una temperatura de desactivación de 70 °C, enfriado por convección natural al aire ambiental a 25 °C. Para las temperaturas de funcionamiento ingresadas, se obtiene una temperatura adimensional $\theta = 0.6923$, mientras que la constante de tiempo para las geometrías y los parámetros de funcionamiento proporcionados se obtiene un valor de $b = 0.06278$ 1/s.

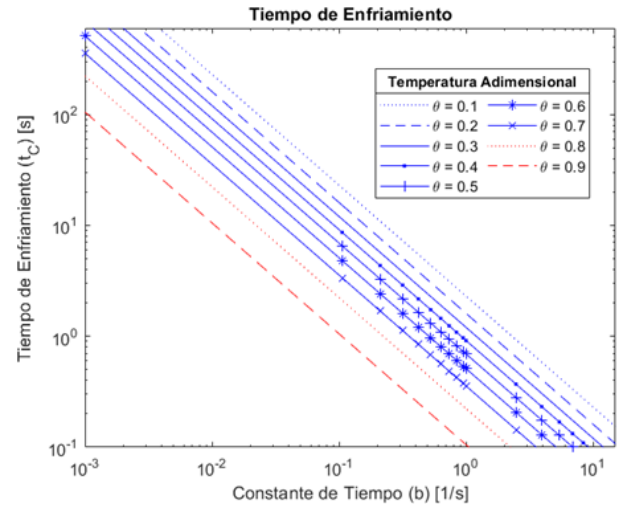


Figura 8: Tiempo de enfriamiento.

4.5. Tiempo de calentamiento

En la Figura 9, se muestra el tiempo de calentamiento en un intervalo de 60 s a 0.1 s en función de la corriente eléctrica que será inducida en el alambre, la cual cambia acorde a la longitud de alambre y a las pérdidas de calor durante el calentamiento. Los valores que se visualizan en la Figura 9 corresponden al cálculo del tiempo de calentamiento desde una temperatura de desactivación de 70 °C, hasta una temperatura de activación de 90 °C. Se consideran pérdidas de calor por convección natural al aire circundante, que se encuentra a una temperatura de 25 °C, en calibres de alambre de 0.038 mm hasta 0.510 mm, para alambres con 100 mm de longitud.

Por ejemplo, induciendo una corriente eléctrica de 2.50 A, se calcula un tiempo de calentamiento de 0.99 s para un alambre de 100 mm de longitud con un diámetro de 0.51 mm, para alcanzar una temperatura de activación de 90 °C desde una temperatura de desactivación de 70 °C, con pérdidas de calor por convección a 25 °C.

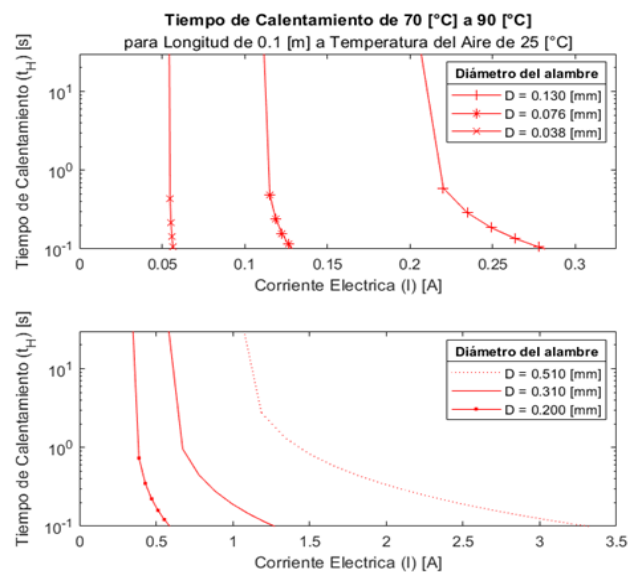


Figura 9: Tiempo de calentamiento .

The screenshot shows the 'NiTi Wires Calculator' software interface. It is divided into several sections:

- Parámetros de Funcionamiento:** Includes a mechanical configuration diagram, displacement (15 mm), and actuation force (2000 gf). There are checkboxes for 'Considerar la fuerza de deformación en el cálculo' and 'Calcular elemento de contra-actuación: Elemento Elásti...'. A 'Calcular' button is present.
- Propiedades Mecánicas:** Material: Dynalloy. Young's Modulus at high/low temperature: 83/34 GPa. Max stress at high/low temperature: 172.4/68.95 MPa. Admissible deformation: 8%.
- Propiedades Térmicas y Físicas:** Material: Dynalloy. Activation/Deactivation temperature: 90/70 °C. Thermal conductivity: 18 W/m·°C. Specific heat: 837.4 J/kg·°C. Electrical resistivity: Se determina en función del diámetro. Density: 6450 kg/m³.
- Parámetros de Calentamiento y Enfriamiento:** Fluid: Aire. Method: Convección Natural. Model: Churchill. Current: 2 A. Orientation: Horizontal.
- Propiedades del Fluido de Enfriamiento:** Air temperature: 25 °C. Thermal conductivity: 0.02790 W/m.K. Kinematic viscosity: 1.8715e-05 m²/s. Prandtl number: 0.7208. Volumetric expansion coefficient: 0.0030 1/K.
- Resultados:** A table showing calculated values:

Resumen (Texto)	Resumen	Propiedades Geométricas, Físicas y Térmicas	Resumen (Grafico)
Diámetro: 0.51 [mm]	Longitud: 207.9 [mm]	Tiempo de Calentamiento: 1.74 [s]	Razón de Transferencia de Calor: 0.94 [W]
Fuerza de Deformación: 14.09 [N]	Masa: 0.2739 [g]	Tiempo de Enfriamiento: 5.86 [s]	Potencia Eléctrica Suministrada: 3.58 [W]
		Tiempo Total de Funcionamiento: 7.59 [s]	Corriente de Operación Mínima: 1.0 [A]
		Frecuencia Máxima de Funcionamiento: 0.132 [Hz]	

Figura 10: Ejemplo de implementación del programa.

4.6. Caso de uso: Ejemplo de implementación del programa

Un actuador electromecánico para su funcionamiento requiere, en un desplazamiento de 15 mm, ejercer una fuerza total de actuación 2000 gf en donde se considera una configuración mecánica en la que ya se integra los efectos de la fuerza para deformar el alambre (ver Figura 2).

Los valores ingresados al programa de las propiedades mecánicas, térmicas y físicas del NiTi, corresponden a los datos proporcionados en las Tablas 1 y 2. Se usa una máxima deformación longitudinal del 5% para el cálculo de las longitudes de funcionamiento del alambre.

Las temperaturas de operación son las siguientes, la temperatura de activación es de 90 °C y la temperatura de desactivación de 70 °C.

El método de enfriamiento será mediante convección natural al aire ambiental, que está a 25 °C de temperatura. El alambre trabajará en posición horizontal con respecto a la superficie terrestre por lo que se empleará el modelo térmico de Churchill para cilindros horizontales y para el calentamiento del alambre se propone usar una corriente eléctrica de 2 A.

Para el caso de uso propuesto, el dimensionamiento del alambre se requiere de la siguiente forma (unidades de medida): el diámetro y las longitudes en milímetros, la fuerza de deformación en gramos fuerza, la corriente de operación en

Amperes, la masa del alambre en gramos y el tiempo de enfriamiento y calentamiento en segundos.

En la Figura 10 se muestran los resultados en la interfaz del programa para el caso de aplicación propuesto, además de mostrar la forma de ingresar los parámetros de actuación requeridos, las propiedades mecánicas, térmicas y físicas del NiTi, y la parametrización del calentamiento y de enfriamiento.

Los resultados obtenidos en el dimensionamiento del alambre para el caso de aplicación propuesto, son los siguientes: un diámetro de 0.51 mm con una longitud del cual requiere una fuerza de deformación de 1436 gf. Mientras que, se determina un tiempo de calentamiento y de enfriamiento de 1.74 s y 5.60 s respectivamente, lo que da un tiempo de funcionamiento por ciclo de 7.34 s y una frecuencia de funcionamiento de 0.132 Hz.

Conclusiones

Mediante la combinación del modelo mecánico, térmico y termoelectrónico de los alambres de NiTi, el programa desarrollado permite realizar el dimensionamiento geométrico y mecánico para los alambres de NiTi que se desempeñan como elementos generadores de fuerza y de movimiento en actuadores electromecánicos. De igual forma, la aplicación proporciona una aproximación teórica del tiempo de calentamiento y de enfriamiento para las diversas

configuraciones geometrías y de temperaturas funcionamiento válidas para la aleación de NiTi.

Al realizar la comparación de los resultados obtenidos al emplear el programa desarrollado en el dimensionamiento del alambre, y los valores recomendados por Dynalloy (2023) se encontró porcentaje de 0.64 % de diferencia al determinar el diámetro del alambre y un porcentaje promedio de diferencia de 3.13 % en la fuerza de deformación requerida.

Un bajo porcentaje de diferencia entre los valores calculados y los valores recomendados, confirma la precisión y la efectividad programa.

Por otro lado, el programa que se desarrolló, el cual integra las ecuaciones de los modelos mecánicos, térmicos y termo-eléctricos que se usan al realizar el cálculo mediante un método analítico, genera los resultados que se obtendría al implementar el método analítico.

En contraste al implementar un método analítico que consistiría desde la recopilación de las relaciones matemáticas del modelo térmico, mecánico y termoeléctrico, hasta la resolución de las mismas, donde algunas de las ecuaciones requieren calcularse con cabalidad por la cantidad de términos implícitos para su resolución. Con la aplicación desarrollada en el entorno de desarrollo gráfico “App Designer” de MATLAB, se facilita el cálculo y la selección de alambres de NiTi para actuadores electromecánicos como dispositivos generadores de fuerza y desplazamiento al integrar las ecuaciones de los modelos mecánicos, térmicos y termo-eléctricos.

Referencias

- An, L., Huang, W. M., Fu, Y. Q., & Guo, N. Q. (2008). A note on size effect in actuating NiTi shape memory alloys by electrical current. *Materials & Design*, 29(7), 1432–1437. doi: 10.1016/j.matdes.2007.09.001
- Barras, C. D. J., & Myers, K. A. (2000). Nitinol – Its use in vascular surgery and other applications. *European Journal of Vascular and Endovascular Surgery*, 19(6), 564–569. doi:10.1053/ejvs.2000.1111
- Cengel, Y. A., & Ghajar, A. J. (2015). *Natural Convection*. In *Heat and Mass Transfer* (5th ed., pp. 300–520). New York, New York: McGraw-Hill.
- Cliithy, E. (2020). Application of shape memory alloy. *Science Insights*, 33(3), 167–174. doi:10.15354/si.20.re072
- Dynalloy. (2023). Flexinol® Actuator Wire Technical and Design Data. <https://www.dynalloy.com/>
- Eisakhani, A., Ma, W., Gao, J., Ci, J., & Gorbet, R. (2011). Natural Convection Heat Transfer Modelling of Shape Memory Alloy Wire. *Smart Materials, Structures & NDT in Aerospace*.
- Fort Wayne Metals. (2023). Actuator Calculator. Actuator Calculator - Fort Wayne Metals. <https://www.fwmetals.com/actuator-calculator/>
- Ganesh, N. J., Maniprakash, S., Chandrasekaran, L., Srinivasan, S. M., & Srinivasa, A. R. (2011). Design and development of a sun tracking mechanism using the direct SMA Actuation. *Journal of Mechanical Design*, 133(7). doi:10.1115/1.4004380
- Gómez, A., & Restrepo, C. A. (2005). Cables musculares. *Revista EIA*, 3, 103–111.
- Holschuh, B., & Newman, D. (2015). Two-spring model for active compression textiles with integrated NiTi coil actuators. *Smart Materials and Structures*, 24(3), 035011. doi:10.1088/0964-1726/24/3/035011
- Huang, W. (2002). On the selection of Shape Memory Alloys for actuators. *Materials & Design*, 23(1), 11–19. doi:10.1016/s0261-3069(01)00039-5
- Huber, J. E., Fleck, N. A., & Ashby, M. F. (1997). The selection of mechanical actuators based on performance indices. *Proceedings of the Royal Society of London. Series A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences*, 453(1965), 2185–2205. doi:10.1098/rspa.1997.0117
- Kurzawa, M., & Stachowiak, D. (2017). Investigation on thermo-mechanical behavior of Shape memory alloy actuator. *Archives of Electrical Engineering*, 66(4), 751–760. doi:10.1515/ae-2017-0057
- Lai, C.M., Chu, C.Y., & Lan, C.C. (2013). A two degrees of freedom miniature manipulator actuated by antagonistic shape memory alloys. *Smart Materials and Structures*, 22(8), 085006. doi:10.1088/0964-1726/22/8/085006
- Mirvakili, S. M., & Hunter, I. W. (2017). Artificial muscles: Mechanisms, applications, and challenges. *Advanced Materials*, 30(6). doi:10.1002/adma.201704407
- Moallem, M., & Tabrizi, V. A. (2009). Tracking control of an antagonistic shape memory alloy actuator pair. *IEEE Transactions on Control Systems Technology*, 17(1), 184–190. doi:10.1109/tcst.2008.922506
- Mohd Jani, J., Leary, M., & Subic, A. (2016). Designing shape memory alloy linear actuators: A Review. *Journal of Intelligent Material Systems and Structures*, 28(13), 1699–1718. doi:10.1177/1045389x16679296
- Santiago, J. (2002). Large Force Shape Memory Alloy Linear Actuator (Mastering Thesis). University of Florida, Gainesville, Florida, EE. UU.
- Spaggiari, A., Spinella, I., & Dragoni, E. (2011). Design equations for binary shape memory actuators under arbitrary external forces. *Journal of Intelligent Material Systems and Structures*, 24(6), 682–694. doi:10.1177/1045389x12444491
- Sun, L., & Huang, W. M. (2009). Nature of the multistage transformation in shape memory alloys upon heating. *Metal Science and Heat Treatment*, 51(11–12), 573–578. doi:10.1007/s11041-010-9213-x