



DISEÑO DE UN HORNO ELÉCTRICO PARA EL MEMORIZADO DE PIEZAS SMA MEDIANTE TRATAMIENTO TÉRMICO

DESIGN OF AN ELECTRIC FURNACE FOR THE STORAGE
OF SMA PARTS BY MEANS OF HEAT TREATMENT



DISEÑO DE UN HORNO ELÉCTRICO PARA EL MEMORIZADO DE PIEZAS SMA MEDIANTE TRATAMIENTO TÉRMICO

DESIGN OF AN ELECTRIC FURNACE FOR THE STORAGE OF SMA PARTS BY MEANS OF HEAT TREATMENT

Rolando Morocho Yuquilema¹
Christian Fernando Aguagallo Coello²
Jonathan Alexis Chamba Aguilar³
Diego Ramiro Nacato Estrella⁴

¹Escuela Superior Politécnica de Chimborazo, Ecuador, rolando.morocho@esPOCH.edu.ec

²Escuela Superior Politécnica de Chimborazo, Ecuador, christian.aguagallo@esPOCH.edu.ec

³Escuela Superior Politécnica de Chimborazo, Ecuador, jonathan.chamba@esPOCH.edu.ec

⁴Escuela Superior Politécnica de Chimborazo, Ecuador, diego.nacato@esPOCH.edu.ec

RESUMEN

En este documento se presenta una revisión bibliográfica concerniente al tema de aleaciones con memoria de forma (SMA, conocido por sus siglas en inglés) y su compuesto más común, formado a partir de aleaciones Níquel y Titanio que lleva el nombre de Nitinol, todo con el propósito de proceder con el diseño de un horno eléctrico que permita satisfacer las principales características y especificaciones para la memorización de piezas elaboradas con esta aleación por medio de un tratamiento térmico respectivo. El diseño se elabora en base a la información disponible en la bibliografía referente a hornos eléctricos, materiales térmicos, controladores de temperatura, dimensionamiento y también del diseño de un dispositivo para sujetar la pieza que se tratará.

Palabras clave: SMA, Nitinol, Horno eléctrico, Resistencia térmica.

ABSTRACT

This paper presents a literature review concerning the subject of shape memory alloys (SMA) and its most common compound, formed from Nickel and Titanium alloys called Nitinol, all with the purpose of proceeding with the design of an electric furnace to meet the main characteristics and specifications for the storage of parts made with this alloy by means of a respective heat treatment. The design is elaborated based on the information available in the bibliography referring to electric furnaces, thermal materials, temperature controllers, sizing and also the design of a device to hold the piece to be treated.

Keywords: SMA, Nitinol, Electric furnace, Thermal resistance.

Recibido: 01/02/2023
Received: 01/02/2023

Aceptado: 05/04/2023
Accepted: 05/04/2023

1. INTRODUCCIÓN

Actualmente se puede encontrar a nuestro alcance materiales denominados inteligentes que cuentan con la particularidad de poder cambiar sus propiedades o incluso su forma cuando son sometidos a estímulos externos. Dependiendo de estos estímulos existen diversas formas de clasificación y la más general se basa según las fuerzas aplicadas al material, que pueden ser campos térmicos o magnéticos. Por lo cual, estos materiales se pueden clasificar en: materiales con memoria de forma, materiales electro y magneto activos, y materiales foto y cromo-activos [1] [2].

Las aleaciones con memoria de forma (SMA conocidos por su siglas en ingles " Shape Memory Alloy") son materiales considerados inteligentes ya que pueden regresar o recuperar su forma original, luego de haberse sometido a una cierta deformación; donde su principal singularidad es que cuando la fuerza que provoca la deformación, se elimina, su forma se mantiene, pero cuando se le aplica calor, para incrementar su temperatura, este material regresa a su estado original, en otras palabras, el material tiene la capacidad de "recordar" su forma después de ser deformado [3].

Existen una gran cantidad de composiciones de aleaciones que presentan el efecto de memoria de forma, pero en 1962 William J. Buehler desarrollo una aleación de níquel y titanio (Ni-Ti) con este efecto y fue denominado como NITINOL (Nickel Titanium Naval Ordnance Laboratory) siendo este el material con memoria de forma más utilizado, debido a que presenta mejores propiedades mecánicas, mejor resistencia a la corrosión o biocompatibilidad [4] [5].

El Dr. Rodolfo Mannheim .C en su investigación "Aleaciones con memoria de forma" nos dice que las principales exigencias para producir el efecto de forma son:

- a) El material debe sufrir una transformación martensita. La diferencia de volumen entre las dos fases debe ser pequeña o se producirá muchas dislocaciones para realice la diferencia de volumen. Debido al aumento de la densidad de dislocación se compactará la martensita y por lo cual no será posible una reorientación por la tensión aplicada.
- b) La estructura debe ser ordenada, la transformación de martensita a austenita dependerá de las restricciones cristalográficas; además, solo la

orientación original de austenita podrá ser obtenida al calentarse [6].

En el caso del Nitinol, existe una transición entre sus dos formas (austenita y martensita). La estructura de martensita consta de varios planos que se pueden mover. La estructura de martensita tiene 24 variantes posibles para esta transformación de manera que puede ser deformada prácticamente en cualquier dirección [7]. Cuando la aleación se calienta y vuelve a la forma austenita, los planos se deslizan hacia atrás a su posición original y la estructura vuelve a la forma de memoria. Así, el nitinol vuelve a su forma original [8].

Para lograr obtener las propiedades físicas y mecánicas requeridas para la mayoría de las aplicaciones, es necesario realizar un proceso de trabajado en frío en varios pasos, después de un pretratamiento en caliente. Sin embargo, en algunos casos el Nitinol no presenta las propiedades esperadas en estas condiciones de trabajo en frío, por lo que es necesario realizar un tratamiento térmico final a temperaturas entre 450-550°C después del último proceso de trabajado en frío. Este tratamiento se lleva a cabo en hornos de aire, vacío o en cualquier otro sistema adecuado para tal fin [9].

Un horno es un aparato que tiene la particularidad de generar calor y mantenerlo dentro de un compartimento cerrado. Los hornos varían en estructura, tamaño, capacidad y tecnología, y en la industria metalúrgica se utilizan para el tratamiento térmico de materiales, para lo cual se diseñan con materiales resistentes a altas temperaturas. También nos permite controlar y ajustar parámetros importantes como la temperatura, el tiempo o las tasas de calentamiento y enfriamiento, de esta manera, se pueden obtener ciertas propiedades mecánicas y microestructuras deseadas para su uso posterior en aplicaciones específicas [10] [11].

2. METODOLOGÍA Y MATERIALES

El trabajo que se presenta se apoya en una metodología de investigación bibliográfica de trabajos de diseños que sirve como guía en el proceso creativo. Para llevar a cabo el proyecto, se procedió a realizar un desarrollo por etapas del diseño, considerando las hojas de datos y las recomendaciones de los fabricantes de cada elemento. Una metodología rigurosa y adaptada a la realidad actual que asegura un excelente resultado en la finalización del proyecto. Es importante

destacar que el trabajo se ha dividido en fases para su adecuado desarrollo:

- A. Criterios para el memorizado de piezas de nitinol.
- B. Elementos y materiales que conforman el diseño de un horno eléctrico.
- C. Cálculos para el diseño del sistema de calentamiento.
- D. Modelo matemático del controlador PID.
- E. Diseño de la estructura del horno eléctrico.
- F. Diseño del dispositivo para sujetar las piezas dentro de la cabina del horno eléctrico.

A. CRITERIOS PARA EL MEMORIZADO DE PIEZAS DE NITINOL

La producción con NITINOL se da en 4 etapas, empezando cuando la pieza de aleación está en estado austenítico donde se gravan las características dimensionales, luego se enfría a una temperatura ambiente para llegar a la etapa martensítica, en la tercera etapa se deforma por maclaje en estado martensítico y finalmente se aumenta la temperatura a, donde la aleación recupera las dimensiones y forma original de la primera etapa [12].

La figura 1 presenta una imagen representativa de los cambios en las propiedades de una SMA durante la transformación, donde Ms, Mf, As y Af son las temperaturas a las cuales, tanto la transformación martensítica como austenítica empiezan y terminan.

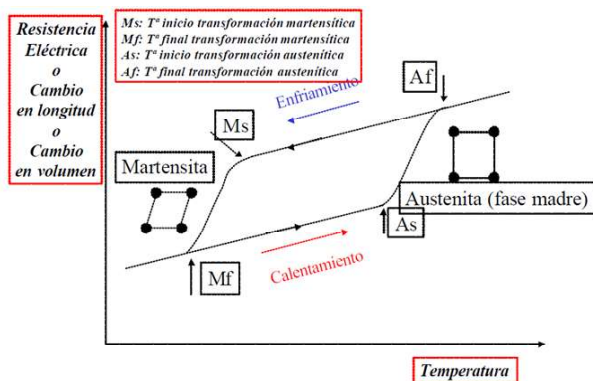


Figura 1 Representación de los cambios en las propiedades de una aleación en una transformación martensítica [13]

Para impartir una nueva forma a memorizar se suele emplear un tipo de mecanismo que permita fijar firmemente el material en su nueva forma y realizar

un tratamiento térmico. El tratamiento térmico puede ser en horno de aire, vacío, o cualquier otro sistema. La temperatura que se debe aplicar suele ser entre 450 – 550 °C, no se recomienda el sobrecalentamiento de la aleación de NiTi a temperaturas superiores a 600°C debido a la pérdida de estabilidad química. El tiempo que se emplea el tratamiento térmico debe ser lo suficiente para que toda la sección del material alcance la temperatura deseada, por lo general es recomendable hacer varias pruebas o ensayos para determinar la temperatura y tiempo más adecuados para obtener los resultados esperados. El enfriamiento tiene que ser rápido, por lo cual se recomienda el templado en agua para así poder evitar envejecimiento. En la figura 2 se puede observar un diagrama TTT de transformación de tiempo – temperatura [9] [14].

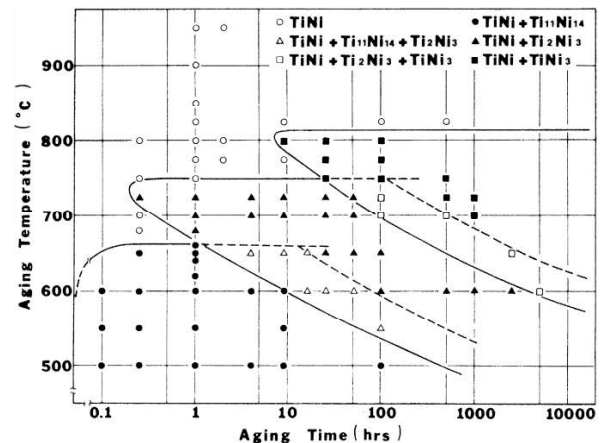


Figura 2 Diagrama TTT que describe el comportamiento de envejecimiento de la aleación [15]

B. ELEMENTOS Y MATERIALES QUE CONFORMAN EL DISEÑO DE UN HORNO ELÉCTRICO.

Los hornos eléctricos tienen la característica de trabajar en altas temperaturas para tratamientos térmicos. Existen hornos eléctricos de inducción y con resistencias eléctricas, donde estos últimos en la industria son utilizados para calentar piezas llevándolas a una temperatura superior a la temperatura ambiente [16].

Un modelo de este tipo lo podemos observar en la figura 3, donde mediante sus resistencias transforman el paso de energía eléctrica en calor el cual se aplica para incrementar la temperatura del ambiente de la cámara donde se colocará el material a tratar térmicamente. Consta de una carcasa

estructural de metal, una fuente de calor (resistencias eléctricas), una cámara de calentamiento y un controlador de temperatura (como una termocupla), como se presenta en la figura 4.



Figura 3 Horno eléctrico de resistencias [17]

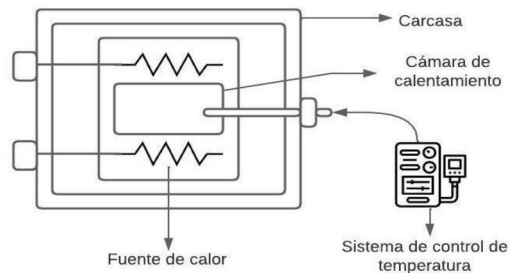


Figura 4 Elementos que conforman los hornos eléctricos [18]

1. Estructura

Entre la carcasa y la cámara de calentamiento, forman una estructura que se encuentra conformada por: capa refractaria y capa aislante, como se observa en la Figura 5.

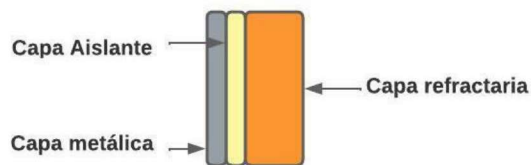


Figura 5 Estructura de un horno eléctrico [18]

Para la capa metálica suele utilizarse una estructura de acero ASTM A36 y el espesor de la chapa metálica se da por las necesidades del sistema y debe ser elegida dependiendo de los espesores disponibles. Comercialmente se puede encontrar en diferentes espesores y tamaños como se muestra en la tabla 1.

Tabla 1. Dimensiones de las planchas de acero bajo la norma ASTM A36 de la marca Dismetal [19]

Espesor	Dimensiones		Peso
	Ancho	Largo	
mm	mm	mm	kg
2	1220	2440	46.74
3	1220	2440	70.11
4	1220	2440	93.46
5	1220	2440	116.85
6	1220	2440	140.22
8	1220	2440	186.96

En la capa refractaria, por lo general se utilizan materiales refractarios fabricados para soportar gran variedad de condiciones como: temperaturas elevadas, líquidos y gases corrosivos, esfuerzos mecánicos y térmicos inducidos [20]. Este tipo de material son fabricados en calidades variadas, pero la más común de encontrarlos es en ladrillos, como se muestra en la figura 6.



Figura 6 Ladrillos refractarios [20]

Comercialmente se pueden encontrar diferentes tipos de estos ladrillos refractarios que se componen de distintas composiciones y propiedades, como se puede ver en la tabla 2.

Tabla 2 Propiedades de los ladrillos refractarios de la marca Morgan Thermal Ceramics. [20]

		JM 23	JM 26	JM 28
Máxima temperatura recomendada	°C	1260	1430	1540
Conductividad térmica (ASTM C-182) a la temperatura media de:				
400	W/m k	0.12	0.25	0.30
600	W/m k	0.14	0.27	0.32
800	W/m k	0.17	0.30	0.34
1000	W/m k	0.19	0.33	0.36

La capa aislante se ubica entre la estructura metálica y la capa refractaria; esta parte cumple la función de impedir el paso del calor de un punto a otro por conducción. Los aislantes más conocidos que se utilizan son la lana de vidrio, lana de escorias o lana mineral, hojas de aluminios, hasta temperaturas de 500 °C como se observa en la figura 7, en cambio para temperaturas más elevadas se utilizan mantas de fibra cerámica.



Figura 7 Manta de fibra cerámica [20]

En la industria comercial se puede encontrar este tipo de aislamiento con las siguientes características que se observan en la tabla 3.

Tabla 3. Propiedades y características de fibra cerámica de la marca Thermal C [20]

		Kaowool	Kaowoll RT	CeraBla nket
Conductividad térmica				
260°C	W/m k	0.06	0.06	0.06
538°C	W/m k	0.12	0.13	0.13
816°C	W/m k	0.21	0.23	0.23

2. Fuente de calor

Las resistencias eléctricas de Kanthal A-1 son adecuadas para hornos industriales, como la que se muestra en la figura 8, es una aleación de hierro, cromo y aluminio (FeCrAl) que puede alcanzar temperaturas cercanas a 1400°C. Además de poseer una alta resistividad y resistencia a la corrosión [21], mientras que una resistencia blindada puede alcanzar los 800°C. Dependiendo del tipo de horno y de su ubicación, las resistencias se pueden ubicar dentro o fuera de la estructura del mismo, y pueden funcionar por convección, radiación o una combinación de las dos.



Figura 8 Resistencia de tipo Bobina Kanthal

3. Sistema de control de temperatura

Siempre en procesos de tratamiento térmico es primordial tener un adecuado y eficiente control de temperatura. En los hornos eléctricos, la manera más útil para medir una temperatura precisa es por medio de termocuplas, como la de la figura 9.

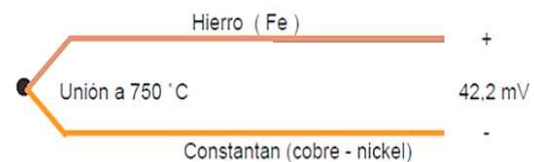


Figura 9. Termocupla o termopar

Una termocupla es un sensor de temperatura fabricado a base de dos alambres de distinto material unidos en un extremo. Al exponerse a la temperatura en la unión se presenta el efecto Seebeck, que genera voltajes en el orden de los milivoltios y que aumentan de acuerdo al incremento de la temperatura. Existen múltiples tipos de termocuplas de acuerdo a sus características, aunque alrededor del 90% de las termocuplas que se usan en la industria son de tipo J (de -210°C a 1200°C) y tipo K (desde -200°C hasta 372°C), debido a su conveniente rango de medición, su bajo costo y su disponibilidad en el mercado [22]

4. Control de temperatura

Para seleccionar el controlador de temperatura correcto se deben considerar el tipo de sensor de entrada, rangos de temperatura, tipo de salida requerida (relé electromecánico, SSR, salida analógica), algoritmos de control necesarios, número y tipo de salidas (calor, frío, alarma, límite) [23].

Los sistemas de control de temperatura básicos son el On/Off de encendido y apagado, el controlador proporcional y el controlador PID, cuya implementación dependerá del tipo de proceso a controlar, la exactitud que se pretenda obtener o los

parámetros que se prioricen para el control de temperatura.

5. Controlador PID

Este controlador de temperatura logra compensar los cambios de temperatura mediante un control integral, proporcional y derivativo, en este controlador se puede ajustar cada variable de manera individual y resultando en una inspección es mucho más precisa. Esto permite que se genere una mejor aproximación al valor de referencia y un control más estable, pues reacciona de una manera más ágil a cambios rápidos de temperatura [24] .

La figura 10 representa la respuesta de un controlador PID ante un escalón, donde la acción proporcional intenta imitar directamente el cambio en la entrada. La acción integral se incrementa a una pendiente constante desde que el valor del escalón en la entrada se mantiene constante. La acción derivativa define el escalón de entrada como un rate de cambio infinito, generando un spike que lleva la salida a la saturación [25] .

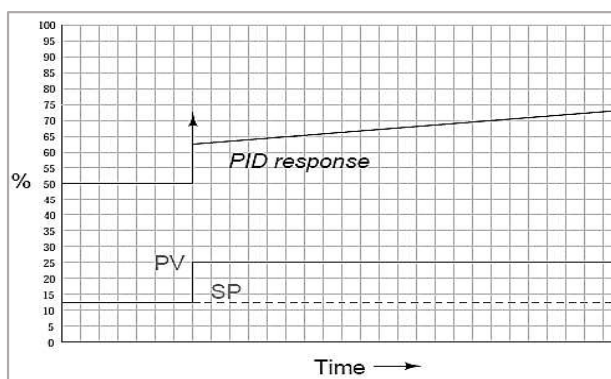


Figura 10. Control PID respuesta a un escalón [25]

C. CÁLCULOS PARA EL DISEÑO DEL SISTEMA DE CALENTAMIENTO

La cámara de trabajo de los hornos de tratamiento térmico se caracteriza por sus dimensiones útiles y por las dimensiones totales. Las dimensiones útiles conforman el espacio donde se coloca la carga, en este caso será la cámara del horno. Las dimensiones totales se definen de manera que exista un espacio libre entre el espacio ocupado por la carga y el espacio total de la cámara.

1. Dimensiones de la cámara interna del horno

$x = 0.18 \text{ m}$ (ancho), $y = 0.10 \text{ m}$ (alto), $z = 0.14 \text{ m}$ (profundidad)

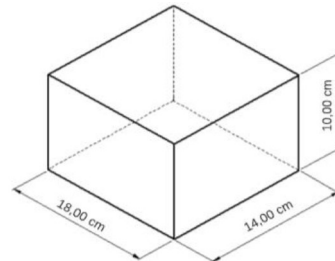


Figura 11. Dimensiones de la cámara del horno

Mediante la ecuación 1 se calcula el volumen interno de la cámara del horno

$$V_{\text{cámara}} = x * y * z \quad (1)$$

$$V_{\text{cámara}} = 0.00252 \text{ m}^3$$

El material que ingrese a la cámara del horno, no deberá sobrepasar un tercio del volumen total de la cámara interna ecuación 2

$$V_{\text{pieza}} = \frac{1}{3} V_{\text{cámara}} \quad (2)$$

$$V_{\text{pieza}} = 0.00084 \text{ m}^3$$

2. Cantidad de calor a la carga

Mediante la ecuación 3 se puede determinar la cantidad de calor a la carga. Donde la suma de calor necesario para aumentar la temperatura del aire más la cantidad de calor que absorbe el material a realizar el tratamiento, determinará el valor total de calor suministrado por el sistema hacia la carga [26].

$$Q_c = Q_A + Q_m \quad (3)$$

Donde:

Q_A : Calor debido al calentamiento del aire [W]

Q_m : Calor debido al calentamiento del material para tratamiento térmico [W]

mediante el uso de la ecuación 4, se determina la cantidad de calor necesario para el calentamiento del aire

$$Q_A = m_A * C_{pA} + \Delta T \quad (4)$$

Donde:

m_A : Masa del aire [kg]

CpA : Calor específico del aire [J/ (Kg k)]
 ΔT : Diferencia de temperaturas [K]

En la tabla 5 se especifican las propiedades del aire, que se ocuparan para realizar los cálculos, con las temperaturas que se establecieron para el diseño del horno [27].

Las temperaturas que se establecieron para el diseño del horno son: temperatura ambiente 20 °C, la cual es una temperatura promedio, la temperatura de la superficie exterior del horno 50 °C, la cual es recomendando para trabajos en la industria y la temperatura interna del horno será de 500 °C.

Tabla 5 Propiedades del aire a diferentes temperaturas [28]

Temperatura	°C	20	50	500
Densidad	Kg/m^3	1.204	1.092	0.456
Calor específico	$J/Kg K$	1007	1007	1093
Conductividad térmica	$W/m K$	0.025	0.027	0.055
Número de Prandtl	-	0.731	0.723	0.699

Se obtiene primero el valor de la masa del aire que existe en la cámara interna del horno ecuación 5, cuando dentro de ella se encuentre la pieza con el volumen máximo permitido [29].

$$mA = \rho A * VA \quad (5)$$

Donde:

ρA : Densidad del aire a 500 °C [Kg/m^3]

VA : Volumen de aire [m^3]

El volumen en el interior del horno es igual a la diferencia entre el volumen de la cámara y el volumen de la pieza ecuación 6.

$$V_A = V_{cámara} - V_{pieza} \quad (6)$$

$$V_A = 0.00168 m^3$$

Entonces

$$mA = 0.4565 \text{ Kg/m}^3 * 0.00168 m^3 = 0.00076692 \text{ kg}$$

La diferencia de temperatura será igual a la temperatura en la cámara interna menos y la temperatura ambiente, ecuación 7.

$$\Delta T = T_f - T_i \quad (7)$$

$$\Delta T = 480 K$$

Entonces:

$$QA = mA * CpA * \Delta T$$

$$QA = 402.357 J = 0.4024 KJ$$

Luego se calcula la cantidad de calor que se requiere para calentar el material que va ser tratado, por lo cual se emplea la ecuación 8 [27]

$$Q_m = m_{pieza} * Cp_m * \Delta T \quad (8)$$

Donde:

m_A : Masa de la pieza Nitinol [kg]

Cp_m : Calor específico del Nitinol [$\frac{J}{Kg k}$]

ΔT : Diferencia de temperaturas [K]

Las principales propiedades del Nitinol que será utilizado se muestra en la tabla 6

Tabla 6 Propiedades del Nitinol [30]

Material	Nitinol	
Densidad	Kg/m^3	6450
Calor específico	$J/Kg K$	620
Conductividad térmica	$W/m K$	18

La masa de la pieza de volumen máximo a tratar se obtiene mediante la ecuación 9.

$$m_{pieza} = \rho_m * V_{pieza} \quad (9)$$

Donde:

ρ_m : Densidad de la pieza [Kg/m^3]

$m_{pieza} = 5.418 \text{ Kg}$

$$Q_m = 5.418 \text{ kg} * 620 \frac{J}{Kg k} * 480k = 1612396.8 J$$

Ahora se obtiene el valor total del calor que el sistema debe suministrar a la carga en la ecuación 3

$$Q_c = Q_A + Q_m$$

$$Q_c = 1612.799 KJ = 447.99 Wh$$

3. Modelamiento matemático de transferencia de calor

Mediante la ecuación 10 se calcula el flujo de calor que se perderá a través de las resistencias térmicas. En la figura 12 se puede observar cada parte de material que conforma la pared representa una resistencia al paso normal del calor [31].

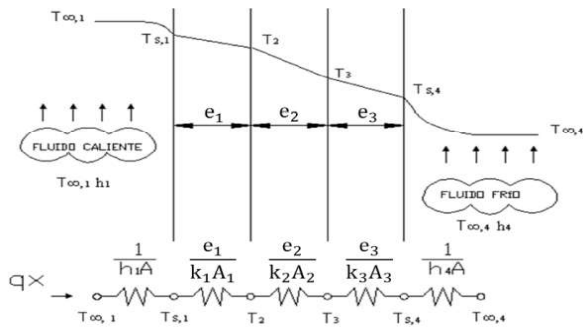


Figura 12 Esquema de pared compuesta en serie [32]

$$q = \frac{T_1 - T_5}{R_1 + R_2 + R_3 + R_4} \quad (10)$$

4. Cálculo de las pérdidas de calor

Se realiza el análisis para encontrar la potencia extra que necesitara el horno, considerando las pérdidas que se produzcan a través de las paredes, no se considerarán las pérdidas por aberturas y se despreciando la pérdida de calor al abrir y cerrar la puerta.

Para el diseño del horno se considerarán las resistencias que se exponen en la figura 13. A continuación, se detallan todos los valores conocidos para poder efectuar el análisis de las pérdidas a través de las paredes.

$T_1 = 773.15 \text{ K}$ (Temperatura pared interior del horno)
 $T_2 = 327.15 \text{ K}$ (Temperatura superficie exterior del horno)
 $T_3 = 293.15 \text{ K}$ (Temperatura ambiente)
 $e_1 = 0.060 \text{ m}$ (Espesor del ladrillo refractario)
 $e_2 = 0.060 \text{ m}$ (Espesor de la manta térmica)
 $e_3 = 0.003 \text{ m}$ (Espesor chapa de acero)
 $k_1 = 0.14 \text{ W/m K}$ (Conductividad térmica del ladrillo refractario)

$k_2 = 0.12 \text{ W/m K}$ (Conductividad térmica manta fibra cerámica)

$k_3 = 47 \text{ W/m K}$ (Conductividad térmica chapa de acero)

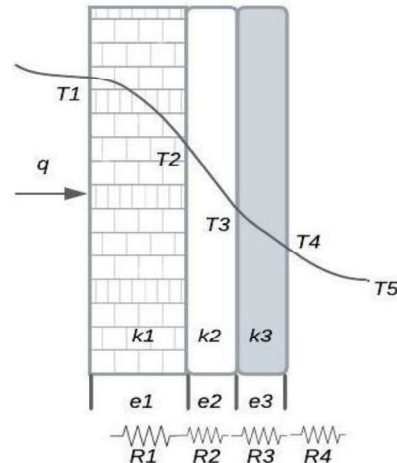


Figura 13. Corte lateral de la pared de la cámara de calentamiento [32]

Mediante las ecuaciones 11 y 12 respectivamente, se determina el valor de las resistencias térmicas por conducción en cada material y también la resistencia de calor por convección.

$$R_{cond} = \frac{e}{K \cdot A} \quad (11)$$

$$R_{conv} = \frac{1}{h \cdot A} \quad (12)$$

Donde:

R_{cond} : Resistencia de calor por conducción $[K/W]$
 e : Espesor del material $[m]$
 k : Conductividad térmica del material $[W/m K]$
 A : Área de transferencia de calor $[m^2]$
 R_{conv} : Resistencia de calor por convección. $[K/W]$
 h : Coeficiente de transferencia de calor por convección $[W/m^2 K]$.

Luego tenemos:

$$R_1 = \frac{e_1}{K_1 A_1}$$

$$R_2 = \frac{e_2}{K_2 A_2}$$

$$R_3 = \frac{e_3}{K_3 A_3}$$

$$R_4 = \frac{e_4}{K_4 A_4}$$

Donde:

R_1 : Resistencia térmica de la capa de ladrillos refractarios [K/W]

R_2 : Resistencia térmica de la capa de manta de fibra cerámica [K/W]

R_3 : Resistencia térmica de la chapa de acero [K/W]

R_4 : Resistencia de calor por convección [K/W]

A_1 : Área de transferencia de calor del ladrillo refractario [m^2]

A_2 : Área de transferencia de calor de la manta de fibra [m^2]

A_3 : Área exterior del horno [m^2]

h : Coeficiente de convección en el exterior del horno [W/m² K]

Se determinan las áreas de cada material por donde ocurre la transferencia de calor. Para este cálculo no se tomarán en cuenta las ranuras que se dejarán para la ubicación de las resistencias eléctricas en los ladrillos refractarios.

$$\begin{aligned} x_1 &= 0.30 & x_2 &= 0.325 & x_3 &= 0.32 \\ y_1 &= 0.22 & y_2 &= 0.2327 & y_3 &= 0.2327 \\ z_1 &= 0.26 & z_2 &= 0.2854 & z_3 &= 0.2894 \\ A_1 &= 2[(x_1 * z_1) + (y_1 * z_1) + (x_1 * y_1)] \end{aligned}$$

$$A_1 = 0.4024 \text{ m}^2$$

$$A_2 = 2[(x_2 * z_2) + (y_2 * z_2) + (x_2 * y_2)]$$

$$A_2 = 0.4696 \text{ m}^2$$

$$A_3 = 2[(x_3 * z_3) + (y_3 * z_3) + (x_3 * y_3)]$$

$$A_3 = 0.4832 \text{ m}^2$$

Ahora se encuentra el valor de las resistencias de calor por conducción pertenecientes a cada una de las capas que componen las paredes del horno.

$$R_1 = \frac{e_1}{K_1 * A_1} = \frac{0.06}{0.14 * 0.4024} = 1.0650 \text{ [K/W]}$$

$$R_2 = \frac{e_2}{K_2 * A_2} = \frac{0.025}{0.12 * 0.4696} = 0.4436 \text{ [K/W]}$$

$$R_3 = \frac{e_3}{K_3 * A_3} = \frac{0.003}{47 * 0.4832} = 13.2098 \times 10^{-5} \text{ [K/W]}$$

Ahora, mediante la ecuación 13 se debe encontrar el coeficiente de transferencia de calor por convección, para poder hallar la resistencia por convección del aire [27]

$$h = \frac{N_u * k}{L} \quad (13)$$

Donde:

N_u : Número de Nusselt

k : Conductividad térmica del aire [W/m K]

L : Longitud característica [m]

El valor del número de Nusselt es adimensional hace una relación de la transferencia de calor por conducción entre el fluido en contacto con la pared sólida y por convección del fluido en movimiento. Este valor se lo determina mediante la ecuación 14 [27].

$$N_u = f(G_r, P_r) \quad (14)$$

Donde:

G_r : Número de Grashof

P_r : Número de Prandtl

Empleado la ecuación 15 se determina el número de Grashof.

$$G_r = (\Delta T * \beta) \left(\frac{L^3 * \rho^3 * g}{u^2} \right) \quad (15)$$

Donde:

ΔT : Variación de temperatura entre la superficie exterior del horno y la media del ambiente [K]

β : Coeficiente de expansión térmica volumétrica [K^{-1}]

L : Longitud característica [m]

ρ : Densidad del aire [$\frac{kg}{m^3}$]

g : Gravedad [$\frac{m}{s^2}$]

u : Viscosidad absoluta [$\frac{kg}{m \cdot s}$]

Se calcula el valor de la variación de la temperatura

$$\Delta T = T_4 - T_5 = 30 \text{ K}$$

Mediante la ecuación 16 se halla el coeficiente de expansión térmica [27]

$$\beta = \frac{1}{T_4} \quad (16)$$

$$\beta = \frac{1}{323.15} = 3.0945 \times 10^{-3} \text{ K}^{-1}$$

Mediante el despeje de la ecuación 17, se encuentra el valor de la longitud característica [32]

$$L = \frac{1}{LH} + \frac{1}{LV} + \frac{1}{LL} \quad (17)$$

Donde:

LH: Longitud horizontal del horno [m]

LV: Longitud vertical del horno [m]

LL: Longitud lateral del horno [m]

Remplazando valores tenemos:

$$L = \frac{1}{\frac{1}{LH} + \frac{1}{LV} + \frac{1}{LL}} = 0.0933 \text{ m}$$

Ahora se emplea los valores de viscosidad dinámica, densidad y el valor del número de Prandtl del aire a 50 °C, la cual es la temperatura del exterior del horno, como se observa en la tabla 5.

$$Gr = (30 \times 3.0945 \times 10^{-3} \text{ kg}^{-1}) \left(\frac{(0.0933)^3 \times (1.092)^2 \times 9.81}{(1.963 \times 10^{-5})^2} \right)$$

$$Gr = 2.2889 \times 10^6$$

Mediante la ecuación 18 se calcula el número de Rayleigh [27]

$$Ra = Gr * Pr \quad (18)$$

$$Ra = 1.654416 \times 10^6$$

Finalmente, para tener el número de Nusselt, se aplica la ecuación 14 [27]

$$\text{Si } 10^4 \leq Gr * Pr \leq 10^9 \rightarrow Nu = 0.59 (Gr * Pr)^{1/4}$$

$$Nu = 0.59 (1.654416 \times 10^6)^{1/4}$$

$$Nu = 21.1598$$

Ahora aplicamos la ecuación 13 para encontrar el coeficiente de transferencia de calor

$$h = \frac{Nu * k}{L} = 6.202 \frac{W}{m^2 K}$$

Se obtiene el valor de la resistencia de calor por convección de la ecuación 12

$$R_4 = \frac{1}{h * A_3} = 0.3336 \text{ [K/W]}$$

Y últimamente con la ecuación 10 se determina la pérdida de calor total.

$$q = \frac{T_1 - T_5}{R_1 + R_2 + R_3 + R_4}$$

$$q = 260.5393 \text{ W} = 0.2605393 \text{ kW}$$

5. Rendimiento térmico del horno

En un sistema de calefacción se determina por la relación entre el calor que será aplicado a la carga y el calor entregado por el sistema donde se incluyen las pérdidas. La ecuación 19 nos permitirá encontrar el rendimiento del horno [33]

$$\eta = \frac{Q_c}{Q_c + q} \quad (19)$$

Para encontrar el rendimiento se requiere que las unidades sean compatibles, por lo tanto, el calor suministrado a la carga se lo divide para el tiempo que necesita el horno en alcanzar su temperatura máxima que es una hora.

$$\eta = \frac{447.99}{447.99 + 260.5393} = 0.6323 = 63.23\%$$

6. Cálculo de la resistencia eléctrica y corriente de trabajo

El cálculo de corriente de trabajo se lo hace mediante la ecuación 21

$$I = \frac{P}{V} = \frac{708.5086}{220} \quad (21)$$

$$I = 3.2205 \text{ A}$$

Ahora mediante la ley de ohm ecuación 22, se obtiene el valor de la resistencia requerida [34]

$$R = \frac{V}{I} = 68.3124 \Omega \quad (22)$$

Para elevar la temperatura en la cabina del horno se utiliza resistencias de Kanthal A-1, el cual está diseñado para trabajar hasta temperaturas de 1400°C. En la tabla 7 se muestran las propiedades de este material el cual se utilizará para elaborar la resistencia eléctrica.

Tabla 7. Propiedades del Kanthal A-1 [35]

Aleación	Kanthal A-1	
Resistividad a 20°C	Ωm	1.45x 10 ⁻⁶
Resistencia por metro	Ω	1.2
Diámetro del conductor	mm	2
Coefficiente de resistividad a 500 °C		1.01

El tipo de resistencia que se utilizara será del tipo de arrollado en espiral y se ubicaran en secciones de los ladrillos refractarios de tres paredes que componen la cámara del horno.

7. Cálculo de la resistencia eléctrica a la temperatura de trabajo

Se calcula mediante la ecuación 23, donde se aplica el coeficiente de resistividad a 500 °C de la tabla 7. [31]

$$\begin{aligned} RT &= C_t * R_{20} \text{ °C} \\ RT &= 1.01 * 1.2 \\ RT &= 1.212 \Omega \end{aligned} \quad (23)$$

La resistencia eléctrica cambia a 1.212 Ω /m a la temperatura máxima de trabajo máxima del horno.

8. Cálculo de la longitud del hilo a realizar la resistencia

Mediante la ecuación 24, se calcula el largo del hilo de kanthal A-1 que será necesario para fabricar la resistencia. [31]

$$\begin{aligned} L_t &= \frac{R}{RT} \\ L_t &= \frac{68.3124}{1.212} = 56.3633 [m] \end{aligned} \quad (24)$$

9. Cálculo del diámetro de la espira

Para hornos industriales existen diferentes criterios Si la temperatura de trabajo de los elementos es menor a 1000°C, entonces se tomará en cuenta: $D/\Phi = 6 - 8$.

Si la temperatura de trabajo de los elementos es mayor a 1000°C, entonces se tomará en cuenta: $D/\Phi = 5 - 6$.

Por lo mencionado, se procede a obtener el diámetro que será utilizado para el bobinado de las resistencias ecuación 25 [31].

$$\begin{aligned} D &= 6 * \Phi \\ D &= 0.0120 [m] \end{aligned} \quad (25)$$

10. Cálculo del número de vueltas o espiras

Empleado la ecuación 26 se determina el número total de vueltas que debe tener la resistencia. [31]

$$\begin{aligned} N_t &= \frac{L_t}{\pi * (D - \Phi)} \\ N_t &= 1794.099 \text{ Vueltas} \end{aligned} \quad (26)$$

D. MODELO MATEMÁTICO DEL CONTROLADOR PID

1. Modelo del proceso de calefacción

Se procede a partir del modelo del proceso de calefacción, que se puede representar utilizando la ecuación de transferencia de calor de Fourier [36], que describe la conducción de calor en un medio y se representa por la ecuación 27:

$$Q = hA(T - T_{amb}) \quad (27)$$

Donde:

Q: Es la cantidad de calor transferida (en watts).
h: Coeficiente de transferencia de calor (watts/m².K).
A: Es el área de transferencia de calor (en m²).
T: Es la temperatura en el interior del horno (en °C).
Tamb: Es la temperatura ambiente (en °C).

Para un horno con una resistencia de kanthal, se puede asumir que la transferencia de calor es proporcional a la corriente que fluye a través de la resistencia. Por lo tanto, se puede escribir como en la ecuación 28:

$$Q = kI(T - T_{amb}) \quad (28)$$

Donde:

k: Es una constante de proporcionalidad que depende de la geometría del horno y de la resistencia de kanthal (en watts/A).
I: Es la corriente que fluye a través de la resistencia de kanthal (en amperes).

2. Modelo del controlador PID

El controlador PID es un sistema de control que utiliza una combinación de tres términos para ajustar la salida del controlador y mantener la temperatura deseada en el horno. Los tres términos son:

Proporcional (P): Este término ajusta la salida del controlador en proporción al error entre la temperatura deseada y la temperatura real del horno. La ecuación 29 correspondería a la del término proporcional:

$$P = K_p(T_{deseada} - T_{actual}) \quad (29)$$

Donde:

K_p: Es la ganancia proporcional del controlador (en unidades de salida por unidad de error).

$T_{deseada}$: Temperatura deseada del horno (en °C).

T_{actual} : Temperatura real del horno (en °C).

Integral (I): Este término ajusta la salida del controlador en función del error acumulado a lo largo del tiempo. La ecuación 30 corresponde a la del término integral:

$$I = Ki \int_0^t (T_{deseada} - T_{actual}) dt \quad (30)$$

Donde:

Ki: Es la ganancia integral del controlador (en unidades de salida por unidad de error integrado).

t: Es el tiempo (en segundos).

Derivativo (D): Este término ajusta la salida del controlador en función de la tasa de cambio del error entre la temperatura deseada y la temperatura real del horno. La ecuación del término derivativo se puede escribir como la ecuación 31:

$$D = Kd \left(\frac{d}{dt} \right) (T_{deseada} - T_{actual}) \quad (31)$$

Donde:

Kd: Es la ganancia derivativa del controlador (en unidades de salida por unidad de cambio de error).

d/dt: Es la derivada respecto al tiempo.

3. Modelo del sistema de control

El modelo del sistema de control combina el modelo del proceso de calefacción y el modelo del controlador PID para formar un sistema de control de la temperatura del horno. El modelo se puede escribir de acuerdo a la ecuación 32:

$$I = \frac{1}{k} (Kp(T_{deseada} - T_{actual}) + Ki \int_0^t (T_{deseada} - T_{actual}) dt + Kd \frac{d}{dt} (T_{deseada} - T_{actual})) \quad (32)$$

Donde:

I: Es la corriente que fluye a través de la resistencia de kanthal (en amperes).

k: Es una constante de proporcionalidad que depende de la geometría del horno y de la resistencia de kanthal (en watts/A).

Kp, Ki, Kd: Son las ganancias proporcional, integral y derivativa del controlador, respectivamente (en unidades de salida por unidad de error, unidad de error integrado y unidad de cambio de error, respectivamente).

$T_{deseada}$: Temperatura deseada del horno (en °C).

T_{actual} : Temperatura real del horno (en °C).

d/dt: Derivada respecto al tiempo.

Para calcular los valores de las ganancias del controlador PID, se puede utilizar el método de Cohen-Coon.

Debido a que la temperatura del horno debe ser estar entre 450-500°C, se estima que el tiempo en que llegue desde 0°C hasta el rango de temperatura deseada sea de 2 minutos, es decir, en este periodo el sistema llegará hasta el 63.2% de temperatura de set point.

$$0.632 * (500 - 450) + 450 = 481.6 \text{ °C}$$

Este tiempo se conoce como tiempo de retardo. Se debe entonces, ajustar el controlador al valor de Kp calculado por la ecuación 33.

$$Kp = 1.2 * \frac{Td}{(Ku * P)} \quad (33)$$

Donde Ku es la ganancia crítica obtenida a partir del método de Ziegler-Nichols y P es el periodo de la respuesta del sistema al escalón de entrada.

Se debe ajustar las constantes Ki y Kd utilizando las siguientes ecuaciones:

$$Ki = \frac{Kp}{Ti} \quad (34)$$

$$Kd = Kp * \frac{Td(Td)}{4Tc} \quad (35)$$

Donde Ti es la constante de tiempo integral y Tc es la constante de tiempo de la respuesta del sistema al escalón de entrada.

Si el tiempo de retardo es de 2 minutos, la ganancia crítica Ku es de 2.4 y el periodo de la respuesta del sistema es de 2 minutos, sustituyendo este valor en las ecuaciones se obtiene:

$$Kp = 0.6 * Ku = 1.44$$

$$Ti = 4 * Td = 8 \text{ minutos}$$

$$Tc = \frac{P}{2 * pi} = 0.1592 \text{ minutos}$$

$$Ki = 0.18$$

$$Kd = 0.058$$

Estos valores iniciales se pueden ajustar mediante la experimentación en el sistema real para mejorar el desempeño del controlador y alcanzar los objetivos de control de temperatura del horno.

Respecto a este modelo, se debe buscar un controlador comercial que cumpla con los requerimientos y pueda trabajar dentro de los rangos de temperatura establecidos tanto para la resistencia de kanthal como para la temperatura necesaria para el memorizado de piezas de aleaciones con memoria de forma.

E. DISEÑO DE LA ESTRUCTURA DEL HORNO ELÉCTRICO

De acuerdo a los cálculos realizados y a las especificaciones analizadas para el diseño del horno, utilizando un software tipo CAD se plantea un prototipo que permita visualizar la estructura que se pretendería implementar para trabajar en la memorización del Nitinol.

Para la estructura interna, se plantea una cámara a base de ladrillo refractario, cuya finalidad es mantener el calor evitando pérdidas de energía y además eficiencia en el tiempo de calentamiento del horno. Las dimensiones son: (interno 180mm x 140mm x 100mm y externo 300mm x 200mm x 220mm), como se presenta en la figura 14.

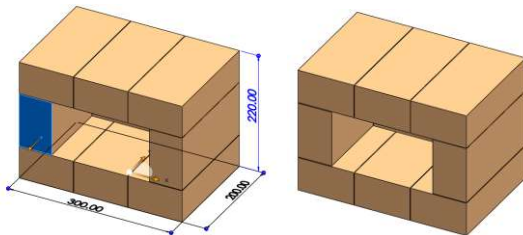


Figura 14. Estructura de ladrillo refractario [37]

Para sujetar la cámara de ladrillo, se requiere de una base metálica con ángulos, cuyas dimensiones serían aproximadamente: Medidas externas 315mm x 210mm, medidas internas 310mm x 205mm; Altura externa 270mm y altura interna 225 mm.

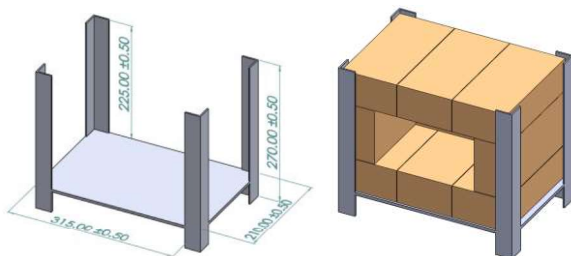


Figura 15. Estructura base angular metálica

Para proteger la estructura de ladrillo refractario y evitar el contacto directo con la persona, se requiere de una carcasa metálica, dentro de la cual se ubican

los elementos ya mencionados y además se debe colocar una capa de lana de vidrio entre el ladrillo y la carcasa para evitar pérdidas de calor. Las dimensiones de esta carcasa son aproximadamente: Medidas externas 320mm x 215mm, medidas internas 315mm x 210mm x 210mm y altura externa 235mm x 210mm x 210mm, como se presenta en la Figura 16.

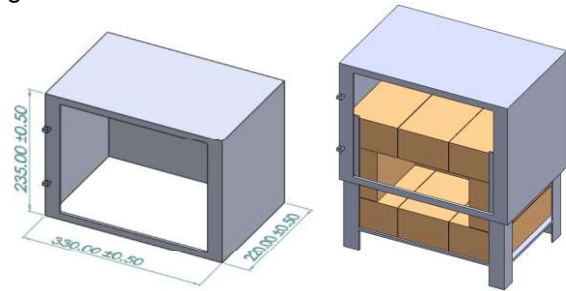


Figura 16. Carcasa metálica para el horno.

Además, se necesita de una tapa, cuyas características sean que se cierre herméticamente para que no haya fugas de calor y así se eviten problemas en el control de la temperatura. Para lo que se ha diseñado una tapa metálica con un soporte para ubicar una pieza de ladrillo refractario, con la finalidad de que evite pérdidas de calor y se mantengan las características de temperatura interna del horno. Las dimensiones de esta tapa son: Medidas externas 320mm x 230mm, mientras que las medidas para el soporte de ladrillo externas serían 220mm x 120mm e internas 200mm x 100mm.

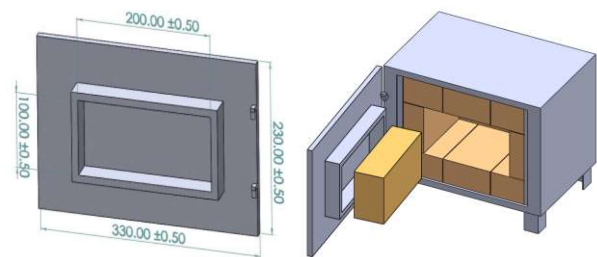


Figura 17. Estructura base angular metálica

Entonces, la estructura final del horno sería la que se muestra en la figura 18.

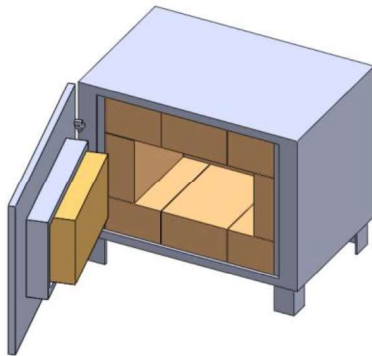


Figura 18. Estructura del Horno para el tratamiento térmico del Nitinol

F. DISEÑO DEL DISPOSITIVO PARA SUJETAR LAS PIEZAS DENTRO DE LA CABINA DEL HORNO ELÉCTRICO

1. Materiales que soportan altas temperaturas

En la Tabla 8. se muestra las aleaciones que funcionan con eficacia a temperaturas iguales o superiores a los 500 °C que debería durar 6 minutos hasta dar la forma dentro del horno. Para ello se utilizará el material de Hierro [38].

Tabla 8. Materiales que soportan diferentes temperaturas

Materiales	Temperatura
Plata	962 °C
Hierro	1538 °C
Aluminio	660 °C
Cobre	1082°C
Plomo	327°C

El material que hemos elegido para realizar el soporte para sostener el alambre dentro del horno es de Acero una aleación de hierro y carbono (AISI 1010), [39] donde estos soportes deben sostener y soportar la temperatura aplicada hasta dar la forma del material, el material seleccionado nos conviene, porque puede soportar la temperatura necesaria para el trabajo que se va realizar a más de 500 °C y este tipo de aleación soporta hasta 600 °C. [40]

2. Base para soportes

Para realizar la estructura de la base como se puede observar en las Figuras 19 y 20 las dimensiones de la base y está construido del material de Acero. Esta

base estará ubicada dentro del horno junto con los soportes que van a fijar el objeto.

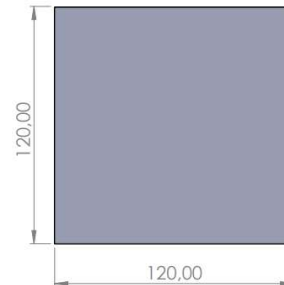


Figura 19. Base para fijar soporte con vista superior

La base tendrá unas medidas de 12X12 y un espesor de 5mm.

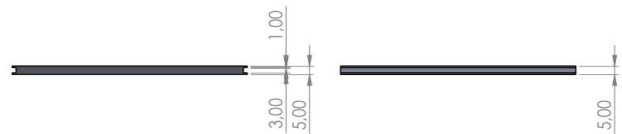


Figura 20. Base con distancia de recorrido de soporte

En la figura 21 se muestra la distancia para el recorrido de un soporte que será movable para poder ajustar en las medidas deseadas, esta distancia permitirá al soporte mover, dependiendo las medidas que tenga la pieza.

3. Dimensiones de la base

En la tabla 9 se puede observar las dimensiones de la base.

Tabla 9. Dimensiones de la base

Longitud	Medidas
Ancho	12 cm
Largo	12 cm
Espesor	12 cm

La estructura del soporte se compone de los siguientes elementos.

Placa de presión

La placa esta echa de Acero, y la función que cumple es sujetar o dar presión al objeto en la base del horno.

Estructura exterior

Material de Acero toda la estructura.

Perno

El perno está ubicado en el centro y perforado en la parte superior de los soportes, y la función que cumple es realizar la presión al objeto junto con la base.

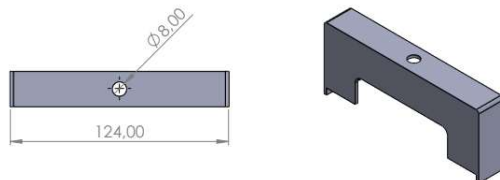


Figura 22. Estructura de soporte vista frontal y superior

El prototipo tendrá una perforación de 8mm en la parte superior para los dos pernos que serán introducidos y soldados en la placa de presión.

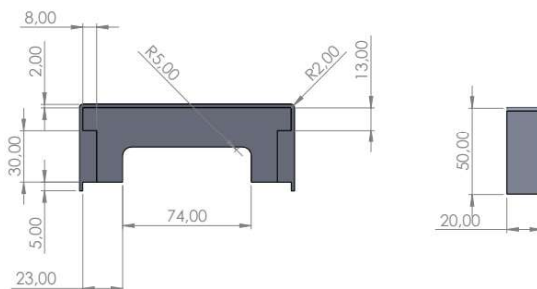


Figura 23. Medidas de soporte frontal y lateral

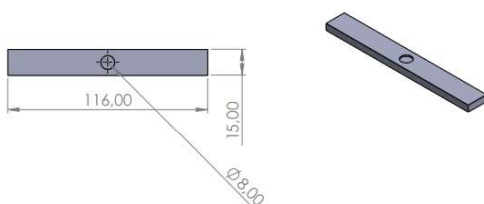


Figura 24. Placa para la presión del objeto

En la figura 24 se muestra la placa de presión, esta placa tiene la función de fijar y sostener el objeto con las ayudas de los pernos, donde harán la presión necesaria.

El diámetro del perno es de 3/8. Del material de Acero. [41]

Tabla 10. Dimensiones del perno

Longitud	Medidas
Largo	7 cm
Diámetro	3/8

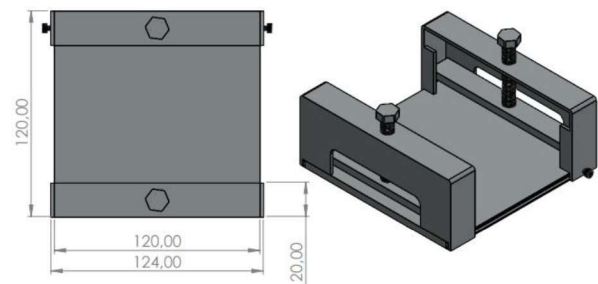


Figura 25. Ensamblaje final base, soporte y perno

En la Figura 25 se muestra el resultado final del prototipo del soporte, está compuesto de una base, placa de presión y el perno. Este será introducido en el horno junto con alambre de Nitinol ya fijado con la ayuda de este prototipo.

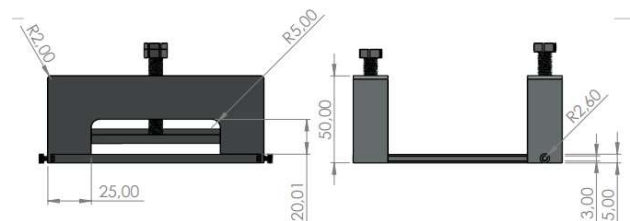


Figura 26. Resultado final del prototipo de soporte

Como se puede observar en la figura 26, un soporte se podrá regular a la distancia que deseemos, ya que este soporte se puede recorrer a una distancia de 8cm hacia el soporte izquierdo y después será ubicado dentro del horno para dar forma.

4. Dimensiones del soporte

En la tabla 11 se puede observar las dimensiones del soporte

Tabla 11. Dimensiones del soporte

Longitud	Medidas
Placa de presión	
Ancho	1.5 cm
Largo	12 cm
Espesor	5 mm
Estructura de soporte	
Ancho	2 cm
Espesor	5mm
Largo 1 y 2	12cm
Altura 1 y 2	5cm

3. RESULTADOS

De acuerdo a la bibliografía disponible, se pudo establecer que el rango de temperatura óptima para el memorizado del Nitinol, va desde 450-500°C, a diferencia de la temperatura que se le aplica posteriormente para que recupere la forma asignada. En base a estos valores se realizaron los cálculos para obtener las dimensiones de la resistencia de kanthal, la forma y estructura del horno, se definió el modelo del controlador, considerando que el controlador PID sería el más óptimo para este tipo de estructuras además de ser un sistema autoajustable. Un controlador que podría implementarse para este tipo de hornos o muflas, sería el controlador PID de la gama Rex C100, ya que es un dispositivo de control que se utiliza para regular la temperatura en sistemas de calefacción y enfriamiento, además que permite utilizar distintos métodos para el ajuste de los valores de las constantes proporcional, integral y derivativo.

4. CONCLUSIÓN

La elaboración del diseño de un horno eléctrico para tratamiento térmico del Nitinol es un proceso complejo que requiere una comprensión detallada de las propiedades térmicas y mecánicas del material, así como de las características del proceso de memorización. Es importante tener en cuenta factores como la homogeneidad de la temperatura en el horno, el control preciso de la temperatura, la velocidad de calentamiento y la protección contra la oxidación. Además, es importante considerar las necesidades específicas del proceso, como el tamaño y la forma de las piezas de Nitinol. El diseño final debe ser lo suficientemente robusto para

soportar las condiciones de tratamiento térmico y garantizar la calidad del producto final.

El controlador que se recomienda aplicar al horno diseñado, es un controlador PID, debido a que es más eficiente para el control de la histéresis que se puede presentar en este tipo de materiales y procesos, de ser el caso que se requiera controlar, ya que un controlador ON/OFF que comúnmente se aplica en la mayoría de hornos tradicionales no cuenta con estas funcionalidades.

La estructura del prototipo que se encarga de fijar y realizar la presión al objeto en la base, debe elaborarse en un material cuya temperatura de fusión sea mayor que la del Nitinol, para que pueda soportar a temperaturas altas o deseadas para el tipo de proyecto. El soporte nos ayuda a dar forma al material, además el diseño consta de un soporte móvil que ayuda a fijar al objeto ciertas distancias dependiendo de la forma dada al material.

5. REFERENCIAS

- [1] L. A. U. Maldonado, Estudio de la laeación inteligente con memoria de forma CuAlNi para determinar su aplicación industrial, Ambato, 2015.
- [2] A. C. L. R. R. P. Oscar López García, «Materiales inteligentes I/II: Introducción a los materiales del siglo XXI,» Anales de mecánica y electricidad, vol. 80, pp. 40-46, 2003.
- [3] C. M. Lampert, «Chromogenic Smart Materials,» Materials, vol. 7, n° 3, pp. 28-35, 2004.
- [4] M. M. S. G. D. B. L. Moreno, «Materiales Inteligentes: aleaciones con memoria de forma,» ResearchGate, pp. 1-32, 2009.
- [5] E. L. Cuéllar, «Una introducción a las aleaciones con memoria de forma,» Ingenierías , vol. 5, n° 16, pp. 5-11, 2002.
- [6] R. MannHeim, «Aleaciones con forma de memoria,» Remetallica, vol. 7, 2014.

- [7] G. A. Lana, Aleaciones con memoria de forma en base, España: Universidad del País Vasco, 2017.
- [8] I. A. G. López, NITINOL, UN NITINOL, UN BIOMATERIAL BIOMATERIAL CON, México: Felipe Díaz del Castillo Rodríguez, 2011.
- [9] S. d. I. F. López, Simulación numérica y correlación experimental de las propiedades mecánicas en las aleaciones con memoria de forma, Tarragona: Departamento de Resistencia de Materiales y Estructuras en Ingeniería, 2005.
- [10] H. P. O. M. P. D. Bazzana Santiago, Hornos y tratamientos térmicos, Universidad Nacional de Cuyo, 2008.
- [11] D. Gonzáles, orseño y coNSTRUccróru oe uN HoRNo DE, Quito : Universidad tecnológica equinoccial, 2016.
- [12] A. S. Bello, «El Nitinol: Un material Inteligente,» ResearchGate, pp. 1-5, 2013.
- [13] A. C. a. M. A. Sánchez, «Estudio e implementación de actuadores basados en aleaciones SMA,» Universidad Calos III, pp. 12-16, 2010.
- [14] m. k. D. W. Bartosz Wieczorek, «Método de programación de los resortes de nitinol en el espacio de la cámara del horno,» Universidad Tecnológica de Poznan, 2017.
- [15] C. W. T. H. M. Nishida, «Procesos de precipitación en aleaciones con memoria de forma TiNi casi equiatómicas. Transacciones metalúrgicas A.,» Transacciones metalúrgicas A, vol. 17, nº 9, pp. 1505-1515, 1986.
- [16] J. Méndez, DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DE UN HORNO ELÉCTRICO PARA EL SECADO DE LOS BOBINADOS DE MOTORES DE HASTA 10 HP, Quito : Escuela Politécnica Nacional, 2012.
- [17] Bautermic, Hornos eléctricos, Barcelona.
- [18] A. N. Guesi, Dimensionamiento de un horno eléctrico para tratamiento térmico de aceros, Santa Clara : Universidad Central Marta Abreu de las Villas, 2019.
- [19] D. m. p. l. i. y. construcción, «Dismetal,» [En línea]. Available: <https://dismetal.ec/productos/planchas/laminadas-en-caliente/1220-x-2440>. [Último acceso: 5 12 22].
- [20] M. T.C, Ladrillos refractarios aislantes JM, 2015.
- [21] KANTHAL, «Kanthal A-1,» de Alambre de calentamiento por resistencia y alambre de resistencia, 2021, pp. 1-3.
- [22] R. P. Areny, Sensores y acondicionadores de señal (4th ed.), Barcelona : Marcombo S.A., 2003.
- [23] O. Engineering, «Controladores de temperatura,» 2021. [En línea]. Available: <https://es.omega.com/prodinfo/controladores-de-temperatura.html#:~:text=Un%20controlador%20proporcional%20disminuye%20la,sobre pase%2C%20mantenimiento%20una%20temperatura%20estable..> [Último acceso: 12 2022].
- [24] E. J. Q. Copacondori, «Sistemas de Control de Temperatura,» 2018.
- [25] J. C. Villajulca, «Control PID en gráficos: ¿como responde el controlador ante determinados estímulos?,» 11 05 2011. [En línea]. Available: <https://instrumentacionycontrol.net/control-pid-en-graficos-como-responde-el-controlador-ante-determinados-estimulos/>. [Último acceso: 2022].
- [26] A. Chapman, Transmisión de calor, Madrid: Bellisco, 1984.
- [27] H. J.P, Transferencia de calor, New York, Estados Unidos de América : McGraw-Hill, 1976.

- [28] J. M. C. Cengel Yunus A., Mecánica de fluidos: fundamentos y aplicaciones, Primera edición ed., McGraw, 2006.
- [29] A. J. G. Yanus A. CENGEL, Transferencia de calor y masa : fundamentos y aplicaciones, McGraw-Hill, 2011.
- [30] «Material Properties of Stainless Steel and Nitinol,» [En línea]. Available: <https://destore.onlinecheaps2022.ru/content?c=nitinol%20mechanical%20properties&id=4>.
- [31] J. A. Urquiza, Hornos industriales de resistencias: teoría, cálculo y aplicaciones, Madrid : McGraw-Hill, 1994.
- [32] L. V. U. Peralta, «DISEÑO, REHABILITACIÓN Y PUESTA EN MARCHA DEL SISTEMA DE CALENTAMIENTO DEL HORNO PARA TRATAMIENTOS TÉRMICOS HASTA 1000 °C MARCA SYBRON MODELO TERMOLYNE 1500 PERTENECIENTE AL LABORATORIO DE CIENCIAS DE MATERIALES DEL DECEM,» Sangolquí , 2014.
- [33] A. E. Knowlton, Manual "Standard" del Ingeniero Electricista., México D. F : Labor S.A, 1965.
- [34] R. Boylestad, Introducción al análisis de circuitos, México D.F: Pearson Educación., 2004.
- [35] KANTHAL, KANTHAL HANDBOOK: Resistance Heating Alloys and Systems for Industrial Furnaces Hallstahammar, Suecia: PRIMATryck, 2001.
- [36] RUA, «Mecanismos de transferencia de calor,» UA, pp. 2-5, 2020.
- [37] Autores, «Estructura de ladrillo refractario,» Riobamba, 2023.
- [38] J. A. M. Sabelle, Los materiales utilizados en alta temperaturas, Concepción_Chile: UNIVERSIDAD DEL BIO-BIODEPTO. INGENIERIA MECANICA, 2012.
- [39] L. Balanzas, Clasificación Aceros, Buenos Aires: Lasarte Balanzas, 2016.
- [40] N. Cristti, Las altas temperaturas mejoran la resistencia del acero, Buenos Aires: Universidad Nacional de Lomas de Zamora, 2009.
- [41] IMPORPERNOS, La norma ASTM, Quito: Norma ASTM, 2023.