



Universidad Autónoma de San Luis Potosí

Facultad de Ingeniería

Centro de Investigación y Estudios de Posgrado

**Análisis y diseño de un manipulador flexible accionado
por alambres de aleación con memoria de forma**

T E S I S

Que para obtener el grado de:

Maestría en Ingeniería Mecánica

Presenta:

Ing. Jesús Ricardo Torres Saucedo

Asesor:

Dr. Gilberto Mejía Rodríguez

San Luis Potosí, S. L. P.

Febrero de 2024





18 de enero de 2024

**ING. JESÚS RICARDO TORRES SAUCEDO
P R E S E N T E.**

En atención a su solicitud de Temario, presentada por el **Dr. Gilberto Mejía Rodríguez**, Asesor de la Tesis que desarrollará Usted, con el objeto de obtener el Grado de **Maestro en Ingeniería Mecánica**. Me es grato comunicarle que en la sesión del H. Consejo Técnico Consultivo celebrada el día 18 de enero del presente, fue aprobado el Temario propuesto:

TEMARIO:

"Análisis y diseño de un manipulador flexible accionado por alambres de aleación con memoria de forma"

Introducción.

1. Manipuladores flexibles.
2. Caracterización experimental y simulación numérica de alambres de aleación con memoria de forma.
3. Modelado, simulación numérica y experimentación de un manipulador flexible accionado por un alambre de aleación con memoria de forma.
4. Evaluación de factibilidad del empleo de alambres de aleación con memoria de forma como medio de accionamiento continuo.
5. Modelado, simulación numérica y experimentación de un manipulador flexible accionado por dos alambres de aleación con memoria de forma.

Conclusiones.

Referencias.

"MODOS ET CUNCTARUM RERUM MENSURAS AUDEBO"

ATENTAMENTE

DR. EMILIO JORGE GONZÁLEZ GALVÁN
DIRECTOR

www.uaslp.mx

Av. Manuel Nava B
Zona Universitaria • CP 78290
San Luis Potosí, S.L.P.
tel: (444) 826 2330 al 39
fax: (444) 826 2336

Copia. Archivo
*etn.



UASLP
Universidad Autónoma
de San Luis Potosí



FACULTAD DE
INGENIERÍA



CENTRO DE
**INVESTIGACIÓN
Y ESTUDIOS
DE POSGRADO**

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE SAN LUIS POTOSÍ
FACULTAD DE INGENIERÍA
Área de Investigación y Estudios de Posgrado

DECLARACIÓN

El presente trabajo que lleva por título:

“Análisis y diseño de un manipulador flexible accionado por alambres de aleación con memoria de forma”

se realizó en el periodo febrero de 2022 a febrero de 2024 bajo la dirección del Dr. Gilberto Mejía Rodríguez.

Originalidad

Por este medio aseguro que he realizado el trabajo reportado, y la escritura de este documento de tesis para fines académicos sin ayuda indebida de terceros y sin utilizar otros medios más que los indicados.

Las referencias e información tomadas directa o indirectamente de otras fuentes se han definido en el texto como tales y se ha dado el debido crédito a las mismas.

El autor exime a la UASLP de las opiniones vertidas en este trabajo escrito y asume la responsabilidad total del mismo.

Este trabajo no ha sido sometido como tesis o trabajo terminal a ninguna otra institución nacional o internacional en forma parcial o total, exceptuando el caso cuando existe un convenio específico de doble titulación celebrado entre ambas instituciones.

Se autoriza a la UASLP para que divulgue este documento para fines académicos.

El autor del trabajo escrito, Jesús Ricardo Torres Saucedo

Resumen

Con el paso de los años surgió la necesidad de emplear manipuladores flexibles que puedan trabajar en zonas restringidas; siendo capaces de transformar movimiento, carga o energía a través de la deformación de sus miembros. En el presente trabajo se emplearon aleaciones con memoria de forma (SMA, por sus siglas en inglés), en específico alambres de Ni-Ti (Nitinol), para el accionamiento de un manipulador. Para modelar mediante el método de los elementos finitos (FEM, por sus siglas en inglés) el manipulador flexible, primero se caracterizaron las propiedades de los alambres, posteriormente se incorporaron al modelo para analizar los resultados del desplazamiento del manipulador, y por último estos desplazamientos se validaron. El alambre de SMA se caracterizó a partir de una prueba a tensión en un arreglo experimental para con esto ingresar los datos obtenidos a ANSYS, comprobando de manera experimental y a través de FEM la similitud del comportamiento a tensión del alambre en el diagrama esfuerzo-deformación. Mas adelante, se lograron validar los resultados de desplazamiento experimentales del manipulador accionado por un alambre de SMA a través de tres métodos, uno de ellos es el modelo FEM que incorpora el alambre de SMA en su geometría. Los otros dos modelos emplean la fuerza proveniente del alambre de SMA, estos son el modelo de cuerpo pseudo-rígido 3R y el modelo FEM sin incorporar el alambre de SMA en su estructura. Estos últimos dos modelos permitieron reducir significativamente el costo computacional. Una vez validados los desplazamientos a través de diferentes métodos se procedió a evaluar la factibilidad del empleo de alambres de SMA como medio de accionamiento continuo. Para evaluar su factibilidad se conectaron dos alambres de SMA en serie, donde se analizaron desde un punto de vista energético. El principal objetivo de evaluar su factibilidad en un arreglo en serie es observar y comprender si un alambre de SMA tiene la capacidad de deformar a otro cuando cambia de fase. Por último y ya evaluada su factibilidad se procedió a colocar dos alambres de SMA en paralelo en el manipulador, donde se compararon los desplazamientos experimentales con los modelos anteriormente mencionados. Los resultados de desplazamiento de los modelos tuvieron errores promedio menores al 5% con respecto a los resultados experimentales. Los modelos alternativos ofrecen una opción confiable para determinar el desplazamiento de un manipulador flexible accionado por alambres de SMA.

Agradecimientos

Agradezco a mis padres y hermanos por su apoyo en todo momento.

Al Dr. Gilberto Mejía por el apoyo incondicional y la confianza durante este proceso. Por otra parte, agradezco profundamente los consejos que me dio cuando más los requería. Además, agradezco el tiempo que me otorgó en el desarrollo de este trabajo y los bastos conocimientos que me compartió y me ayudó a adquirir durante este periodo de tiempo. Por último, quiero agradecerle debido a que sin su ayuda no hubiera podido desarrollar este trabajo.

Al M.I. Leonardo Torres por cada consejo y apoyo durante el desarrollo de este trabajo.

Al Ing. Cesar Romero quiero agradecerle por la paciencia, la amistad y los consejos que me brindó a lo largo de este trabajo.

Les quiero agradecer a mis sinodales debido a que me ayudaron a generarme mayor juicio sobre mi trabajo y el tiempo que me otorgaron. Además, quiero agradecerle a todo el personal académico del CIEP, debido a que me ayudaron a adquirir y desarrollar nuevas habilidades.

Agradezco al Consejo Nacional de Humanidades Ciencias y Tecnologías (CONAHCyT) por el apoyo económico brindado durante el tiempo en que se estuvo desarrollando el trabajo.

Por último, estoy más que agradecido con todo el personal de la Universidad Autónoma de San Luis Potosí, por enseñarme y guiarme en todo momento.

Dedicatoria

Para mis padres, hermanos, maestros, compañeros y amigos que me acompañaron en este proceso.

Índice

Nomenclatura.....	2
Introducción.....	6
Hipótesis	8
Justificación	8
Objetivos.....	9
Objetivo general:	9
Objetivos específicos:	9
Estructura de la tesis	9
Capítulo 1: Manipuladores flexibles.	10
1.1 Medios de accionamiento para un manipulador flexible	10
1.2 Manipuladores flexibles accionados por alambres.	13
1.3 Manipuladores flexibles accionados por alambres de SMA.....	16
Capítulo 2: Caracterización experimental y simulación numérica de alambres de aleación con memoria de forma.....	22
2.1 Efecto de memoria de forma y pseudo-elasticidad.	22
2.2 Caracterización del alambre de SMA	24
2.3 Modelo FEM de alambre de SMA.....	29
2.4 Fuerza de accionamiento de alambre de SMA.	34
Capítulo 3: Modelado, simulación numérica y experimentación de un manipulador flexible accionado por un alambre de aleación con memoria de forma	38
3.1 Modelado FEM del manipulador accionado por alambres de SMA.....	38
3.2 Modelado del manipulador a través del modelo de cuerpo pseudo-rígido 3R.	43
3.3 Modelado del manipulador incorporando fuerza de equilibrio en FEM.	50

3.4 Modelo 2D teórico ideal.	51
3.5 Resultados y comparación de modelos.	53
3.6 Diseño, fabricación y experimentación de manipulador accionado por alambres de SMA.	54
3.6.1 Fuerzas de equilibrio y desplazamiento a partir de análisis paramétrico.	61
3.6.2 Fabricación del manipulador accionado por alambres de SMA.	64
3.6.3 Desplazamiento del manipulador con un alambre de SMA.	67
3.6.4 Comparativa de resultados de desplazamiento.	69
Capítulo 4: Evaluación de factibilidad del empleo de alambres de aleación con memoria de forma como medio de accionamiento continuo.	72
4.1 Alambres de SMA conectados en serie.	72
4.1.1 Análisis analítico de la energía de deformación en alambres de SMA.	73
4.2 Modelo FEM de dos alambres de SMA conectados en serie.	75
4.3 Alambres de SMA conectados en serie experimentalmente.	78
4.4 Alambres de SMA conectados en paralelo en manipulador flexible.	81
4.5 Tiempo de calentamiento y enfriamiento de alambres de SMA.	86
Capítulo 5: Modelado, simulación numérica y experimentación de un manipulador flexible accionado por dos alambres de aleación con memoria de forma.	92
5.1 Modelado FEM del manipulador accionado por alambres de SMA en paralelo.	92
5.1.1 Fuerza y desplazamiento para un manipulador accionado por dos alambres de SMA.	95
5.2 Modelado del manipulador a través del modelo de cuerpo pseudo-rígido 3R.	99
5.3 Modelado del manipulador incorporando fuerza de equilibrio en FEM.	102
5.4 Modelo 2D teórico ideal.	104
5.5 Desplazamiento del manipulador en modelo experimental.	105

5.6 Comparación de resultados de desplazamiento.	108
5.7 Comparación entre diferentes medios de accionamiento de un manipulador flexible.	112
Conclusiones.....	118
Trabajo a futuro	120
Referencias	122
Anexo	124
A. 1 Modelo de Souza-Auricchio en ANSYS Mechanical.....	124
A. 2 Código Python para Simulación FEM sin alambre de SMA.	125

Índice de tablas

Tabla 2. 1 – Propiedades del alambre de SMA.	29
Tabla 2. 2 – Propiedades del alambre de SMA para modelado en ANSYS.....	34
Tabla 2. 3 - Caracterización de la constante del resorte	36
Tabla 2. 4 - Fuerza de alambre	36
Tabla 3. 1 – Medidas del manipulador.	39
Tabla 3. 2 – Propiedades de diversos elementos del manipulador.	40
Tabla 3. 3 – Relaciones de longitud y valores de rigidez óptimos.	44
Tabla 3. 4 – Resultados de desplazamiento de modelos	53
Tabla 3. 5 – Cálculo de errores de modelos	53
Tabla 3. 6 – Tiempo computacional	54
Tabla 3. 7 – Parámetros de la ecuación de la fuerza de equilibrio.	62
Tabla 3. 8 - Parámetros para desplazamiento.	62
Tabla 3. 9 - Resultados experimentales de desplazamiento en mm.	69
Tabla 3. 10 - Comparación de desplazamientos experimentales en mm.....	70
Tabla 3. 11 - Errores en modelos comparado con resultados experimentales.....	70
Tabla 4. 1 - Etapas de activación de alambres de SMA.	72
Tabla 4. 2 - Energías en diferentes etapas.	75
Tabla 4. 3 - Tiempo en segundos para la etapa 2	87
Tabla 4. 4 - Tiempo en segundos para la etapa 3	87
Tabla 4. 5 - Potencia y energía suministrada.....	88
Tabla 4. 6 - Balance de energía en diferentes ensayos.	89
Tabla 5. 1 - Desplazamiento de manipulador por FEM en mm.	95
Tabla 5. 2 - Parámetros para fuerza considerando dos alambres de SMA.	97
Tabla 5. 3 – Parámetros para desplazamiento considerando dos alambres de SMA cuando el alambre superior se encuentra activo.....	99
Tabla 5. 4 – Parámetros para desplazamiento considerando dos alambres de SMA cuando el alambre inferior se encuentra activo.....	99
Tabla 5. 5 – Desplazamiento de manipulador empleando el modelo 3R-PRBM en mm... 100	
Tabla 5. 6 – Desplazamiento de manipulador por FEM sin alambre de SMA en mm..... 102	
Tabla 5. 7 – Desplazamiento de Alambre Superior SA en mm..... 106	
Tabla 5. 8 – Desplazamiento de Alambre Inferior SA en mm. 107	
Tabla 5. 9 – Desplazamiento de Alambre Superior IA en mm..... 107	
Tabla 5. 10 – Desplazamiento de Alambre Inferior IA en mm. 108	

Tabla 5. 11 – Comparación de desplazamientos de Alambre Superior SA en mm.....	108
Tabla 5. 12 – Errores en modelos comparado con resultados experimentales de Alambre Superior SA.	108
Tabla 5. 13 – Comparación de desplazamientos de Alambre Inferior SA en mm.	109
Tabla 5. 14 – Errores en modelos comparado con resultados experimentales de Alambre Inferior SA.....	109
Tabla 5. 15 – Comparación de desplazamientos de Alambre Superior IA en mm.....	109
Tabla 5. 16 – Errores en modelos comparado con resultados experimentales de Alambre Superior IA.	110
Tabla 5. 17 – Comparación de desplazamientos de Alambre Inferior IA en mm.	110
Tabla 5. 18 – Errores en modelos comparado con resultados experimentales de Alambre Inferior IA.....	110
Tabla 5. 19 – Errores promedio porcentuales generales de modelos.	111
Tabla 5. 20 – Costo computacional.	111
Tabla 5. 21 - Tipos de accionamiento.....	113
Tabla 5. 22: Costo de manipular flexible accionado por alambres de SMA	113
Tabla 5. 23: Costo de manipular flexible accionado por alambres (servomotores)	114
Tabla 5. 24: Costo de manipular flexible accionado por músculos McKibben.....	114
Tabla 5. 25 - Medios de accionamiento para un manipulador flexible.	115

Índice de figuras

Figura 1. 1: Manipulador accionado por alambres de SMA.....	6
Figura 1. 2: Manipulador flexible con alambres accionado por servomotores [2].....	11
Figura 1. 3: Manipulador flexible accionado por músculos artificiales McKibben, a) manipulador y b) prototipo [4].	11
Figura 1. 4: Manipulador flexible accionado por alambres de SMA [5].....	12
Figura 1. 5: Manipulador accionado por alambres y resortes [6].	14
Figura 1. 6: Manipulador accionado por un cable [7].	14
Figura 1. 7: Manipulador accionado por alambres comunes, a) estructura de un manipulador con múltiples segmentos y subsegmentos, b) prototipo de manipulador [1].	15
Figura 1. 8: Manipulador accionado por alambres de memoria de forma, a) un segmento y b) dos segmentos [8]	17
Figura 1. 9: Catéter flexible accionado por alambres de memoria de forma [12].	18
Figura 1. 10: Estructura del manipulador con módulos de resorte [14].	18
Figura 1. 11: Modelo teórico 2D ideal, a) manipulador flexible accionado con un alambre de SMA, b) manipulador flexible accionado por dos alambres de SMA y c) resultados de emplear el modelo 2D teórico ideal considerando tres segmentos de 100 mm de longitud y 3 mm de excentricidad [5].	19
Figura 2. 1: Efecto de memoria de forma (SME), a) ciclo de memoria de forma y b) diagrama esfuerzo-deformación unitaria de prueba uniaxial de alambre SMA.	23
Figura 2. 2: Diagrama esfuerzo-deformación de prueba uniaxial de alambre SMA mostrando el fenómeno de pseudo-elasticidad.	24
Figura 2. 3: Arreglo experimental para caracterizar alambre de SMA.	25
Figura 2. 4: Ensayos a tensión, a) diagrama esfuerzo-deformación unitaria del módulo de elasticidad de la martensita (zona elástica) y b) diagrama esfuerzo-deformación unitaria del módulo tangente (zona plástica).	25
Figura 2. 5: Diagrama esfuerzo-deformación unitaria para alambre de SMA a 20°C.	26
Figura 2. 6: Ensayos a tensión, a) diagrama esfuerzo-deformación unitaria del módulo de elasticidad de la austenita, b) diagrama esfuerzo-deformación unitaria del módulo tangencial (austenita – martensita maclada) y c) diagrama de esfuerzo-deformación unitaria para alambre de SMA a 90°C.	28
Figura 2. 7: Diagrama esfuerzo-temperatura para el alambre de SMA a) pendientes CM , b) pendiente CA y c) pendientes CA	31
Figura 2. 8: Diagrama esfuerzo-temperatura y esfuerzo-deformación, a) 20°C y b) 90°C..	32
Figura 2. 9: Diagramas esfuerzo-deformación variando la temperatura.	33

Figura 2. 10: Diagrama esfuerzo-deformación unitaria para alambre de SMA por FEM y experimental a 20°C.	35
Figura 2. 11: Arreglo experimental.	35
Figura 3. 1: Manipulador.	39
Figura 3. 2: Viga sometida a carga conocida para caracterizar el módulo de elasticidad del eje central.	40
Figura 3. 3: Secuencia de simulación FEM para un manipulador con un alambre de SMA.	42
Figura 3. 4: Manipulador con un alambre de SMA, a) esfuerzos en el manipulador una vez que el alambre de SMA está activo, b) desplazamiento del manipulador una vez que el alambre de SMA está activo.	42
Figura 3. 5: Modelo de cuerpo pseudo-rígido para una viga en cantiléver [17].	43
Figura 3. 6: Fuerza de un alambre de SMA en un subsegmento analizado a través de 3R-PRBM [4].	45
Figura 3. 7: Segmento del manipulador con un alambre de SMA una vez activado.	46
Figura 3. 8: Manipulador con un alambre de SMA por 3R-PRBM, a) desplazamiento del segmento conforme se aplica la carga y b) manipulador de un segmento colocado en su posición final.	49
Figura 3. 9: Resultados a) desplazamiento y b) esfuerzo.	51
Figura 3. 10: Modelo 2D teórico ideal.	52
Figura 3. 11: Parámetros geométricos, a) vista lateral y b) vista superior.	55
Figura 3. 12: Variación de longitud de segmento, a) diagrama de fuerza de equilibrio-longitud de segmento, b) diagrama de fuerza de equilibrio-desplazamiento y c) diagrama de desplazamiento-longitud de segmento.	56
Figura 3. 13: Variación de ancho de eje central, a) diagrama de fuerza de equilibrio-ancho del eje central, b) diagrama de fuerza de equilibrio-desplazamiento y c) diagrama de desplazamiento-ancho de eje central.	57
Figura 3. 14: Variación de excentricidad, a) diagrama de fuerza de equilibrio-excentricidad, b) diagrama de fuerza de equilibrio-desplazamiento y c) diagrama de desplazamiento-excentricidad.	58
Figura 3. 15: Relación de momento con excentricidad y desplazamiento, a) diagrama momento-desplazamiento de manipulador modelado por FEM, b) diagrama momento-excentricidad ideal y c) diagrama de momento-excentricidad modelado por FEM.	60
Figura 3. 16: Diagrama de desplazamiento-pre-deformado de alambre de SMA.	60
Figura 3. 17: Superficie de interpolación para la fuerza de equilibrio en un manipulador flexible accionado por un alambre de SMA.	61

Figura 3. 18: Análisis paramétrico con un alambre de SMA en el manipulador, a) superficie de interpolación para desplazamiento en X para un manipulador flexible accionado por un alambre de SMA y b) superficie de interpolación para desplazamiento en Y para un manipulador flexible accionado por un alambre de SMA.....	63
Figura 3. 19: Discos laterales del manipulador.	64
Figura 3. 20: Fabricación y ensamblaje de componentes de un manipulador flexible, a) disco lateral fabricado por PLA y b) manipulador sin alambre de SMA.....	65
Figura 3. 21: Método de sujeción, a) elemento de sujeción de alambre de SMA, b) manipulador con alambre de SMA y c) experimento con alambre de SMA activado.	66
Figura 3. 22: Calibración y ejemplo de uso del software IC Measure, a) medida con vernier y b) medida en software.....	67
Figura 3. 23: Manipulador accionado por alambres de SMA (a) manipulador con alambre de SMA activo y (b) manipulador con alambre de SMA inactivo.....	68
Figura 4. 1: Dos alambres de SMA conectados en serie considerando su ciclo de accionamiento.....	73
Figura 4. 2: Diagramas fuerza-desplazamiento en estado martensítico a) 2% a 4% y b) 0% a 4%.....	74
Figura 4. 3: Diagramas fuerza-desplazamiento, a) 60°C a un 2% de deformación (3 mm) en la etapa 2, b) 60°C a un 4% de deformación (6 mm) en la etapa 3, c) 70°C a un 2% de deformación (3mm) en la etapa 2 y d) 70°C a un 4% de deformación (6mm) en la etapa 3.	74
Figura 4. 4: Secuencia de activación de alambres de SMA, a) alambres sin pre-deformar, b) alambres pre-deformados a un 2% de su longitud y c) alambre de SMA inferior activo sometido a 60°C.	76
Figura 4. 5: Alambres de SMA activos a diferentes temperaturas mostrando los resultados de deformación, a) 70°C, b) 75°C, c) 80°C, d) 90°C y e) 150°C.....	77
Figura 4. 6: Secuencia completa de activación a) alambres pre-deformados 2% de su longitud inicial, b) alambre inferior activo a 80°C y c) alambre superior activo a 80°C.	78
Figura 4. 7: Arreglo experimental de alambres de SMA conectados en serie.....	79
Figura 4. 8: Arreglo experimental de alambres de SMA conectados en serie, a) T = 60°C, b) T = 70°C y c) T = 80°C.	80
Figura 4. 9: Dos alambres de SMA conectados en paralelo en un manipulador flexible cuando el alambre superior se encuentra activo.....	81
Figura 4. 10: Resultados experimentales de deformación unitaria en un arreglo de dos alambres de SMA conectados en paralelo en un manipulador flexible.....	82
Figura 4. 11: Resultados de deformación en FEM, a) deformaciones de manipulador, b) deformación de alambre de SMA superior y c) deformación de alambre de SMA inferior.....	83

Figura 4. 12: Resultados de deformación en FEM, a) deformaciones de manipulador, b) deformaciones de alambre de SMA superior y c) deformaciones de alambre de SMA inferior.	84
Figura 4. 13: Resultados de deformación en cada etapa en FEM.	85
Figura 4. 14: Diagrama de temperatura-tiempo de enfriamiento de un alambre de SMA. ...	86
Figura 5. 1: Secuencia de simulación de manipulador con dos alambres de SMA.....	94
Figura 5. 2: Desplazamiento de manipulador accionado por dos alambres SMA en paralelo, a) etapa 2 y b) etapa 3.	94
Figura 5. 3: Fuerzas de accionamiento, a) alambre activo y b) alambre inactivo.	96
Figura 5. 4: Diagrama desplazamiento (δ) – longitud (L) – excentricidad (h), a) desplazamiento en X de alambre superior cuando está activo el alambre superior (SA), b) desplazamiento en Y de alambre superior cuando está activo el alambre superior (SA), c) desplazamiento en X de alambre inferior cuando está activo el alambre superior (SA), d) desplazamiento en Y de alambre inferior cuando está activo el alambre superior (SA), e) desplazamiento en X de alambre superior cuando está activo el alambre inferior (IA), f) desplazamiento en Y de alambre superior cuando está activo el alambre inferior (IA), g) desplazamiento en X de alambre inferior cuando está activo el alambre inferior (IA) y h) desplazamiento en Y de alambre inferior cuando está activo el alambre inferior (IA),.....	98
Figura 5. 5: Fuerzas con dos alambres de SMA en un subsegmento analizado a través de 3R-PRBM [4].	100
Figura 5. 6: Manipulador accionado por dos alambres de SMA empleando el modelo 3R-PRBM, a) alambre superior activo y b) alambre inferior activo.	101
Figura 5. 7: Resultados de desplazamiento para manipulador accionado por dos alambres de SMA en paralelo por el modelo FEM que no incorpora los alambres de SMA en su geometría, a) alambre superior activo y b) alambre inferior activo.	103
Figura 5. 8: Modelo 2D teórico ideal.	104
Figura 5. 9: Modelo experimental de manipulador accionado por alambre de SMA en arreglo paralelo, a) alambre de SMA inferior activo, caracterización de desplazamiento del alambre superior, b) alambre de SMA inferior activo, caracterización de desplazamiento de alambre inferior, c) alambre de SMA superior activo, caracterización de desplazamiento de alambre inferior y d) alambre de SMA superior activo, caracterización de desplazamiento de alambre superior.	106
Figura 5. 10: Manipuladores flexibles, a) manipulado flexible accionado por servomotores [2] y b) manipulador flexible accionado por músculos McKibben [4].	112
Figura 5. 11: Manipulador flexible a) dos segmentos (activado alambre superior e inferior), b) cuatro segmentos (activado superior de primer y cuarto segmento e inferior de segundo y	

tercer segmento) c) cuatro segmentos (activado primer y segundo segmento e inferior de tercer y cuarto segmento). 120

Nomenclatura

SME	=	Efecto de memoria de forma.
SMA	=	Aleación con memoria de forma.
FEM	=	Método elemento finito.
3R	=	3 uniones de revolución.
3R-PRBM	=	Modelo de cuerpo pseudo-rígido 3R.
h	=	Excentricidad [mm].
r	=	Radio de curvatura [mm].
L	=	Longitud de segmento [mm].
θ	=	Angulo de deflexión [grados].
A_f	=	Temperatura de finalización de la fase austenítica [°C].
σ_s	=	Esfuerzo de inicio de martensita maclada [MPa].
σ_f	=	Esfuerzo de fin de martensita maclada [MPa].
H	=	Módulo tangente [MPa].
E_M	=	Módulo de elasticidad de la martensita [MPa].
E_A	=	Módulo de elasticidad de la austenita [MPa].
ε_L	=	Máxima deformación residual [mm/mm].
T_{ref}	=	Temperatura de referencia [°C].
R	=	Límite elástico [MPa].
C	=	Parámetro de escalamiento de temperatura [MPa/°C].
T	=	Temperatura de simulación [°C].
C_M	=	Parámetro de escalamiento de temperatura para la fase martensítica [MPa/°C].
C_A	=	Parámetro de escalamiento de temperatura para la fase austenítica [MPa/°C].
σ_{s-AM}	=	Esfuerzo de inicio de cambio de fase de austenita a martensita [MPa].
σ_{f-AM}	=	Esfuerzo de fin de cambio de fase de austenita a martensita [MPa].
σ_{s-MA}	=	Esfuerzo de inicio de cambio de fase de martensita a austenita [MPa].
σ_{f-MA}	=	Esfuerzo de fin de cambio de fase de martensita a austenita [MPa].
$\bar{\varepsilon}_L$	=	Máxima deformación para transformación del material [mm/mm].
K	=	Constante del resorte [N/mm].
t_{disco}	=	Espesor del disco [mm].
D_{disco}	=	Diámetro de disco [mm].
t	=	Espesor del eje central [mm].
A_{eje}	=	Ancho de eje central [mm].
L_{agarre}	=	Longitud de superficie de agarre de disco lateral [mm].
A_{sup}	=	Ancho de superficie de agarre [mm].
E_{disco}	=	Módulo de elasticidad de disco lateral [GPa].
$E_{ejecentral}$	=	Módulo de elasticidad de eje central [GPa].
γ_0	=	Relación de longitud de primer eslabón.

γ_1	=	Relación de longitud de segundo eslabón.
γ_2	=	Relación de longitud de tercer eslabón.
γ_3	=	Relación de longitud de cuarto eslabón.
k_1	=	Rigidez óptima del primer resorte de torsión.
k_2	=	Rigidez óptima del segundo resorte de torsión.
k_3	=	Rigidez óptima del tercer resorte de torsión.
Q	=	Posición de la punta en modelo de cuerpo pseudo-rígido 3R.
Q_x	=	Posición de la punta en X.
Q_y	=	Posición de la punta en Y.
θ_0	=	Ángulo de deflexión total de la cadena cinemática [°].
θ_1	=	Ángulo de deflexión del segundo eslabón [°].
θ_2	=	Ángulo de deflexión del tercer eslabón [°].
θ_3	=	Ángulo de deflexión del cuarto eslabón [°].
F_x	=	Componente de fuerza en X en modelo de cuerpo pseudo-rígido [N].
F_y	=	Componente de fuerza en Y en modelo de cuerpo pseudo-rígido [N].
M_0	=	Momento en modelo de cuerpo pseudo-rígido [Nmm].
τ_1	=	Torque en el primer resorte de torsión [Nmm].
τ_2	=	Torque en el segundo resorte de torsión [Nmm].
τ_3	=	Torque en el tercer resorte de torsión [Nmm].
Q	=	Orificio distal del manipulador flexible.
H	=	Orificio proximal del manipulador flexible.
P_i	=	Posición de cada resorte de torsión.
R	=	Punto de conexión entre el eje central y segundo disco.
O	=	Origen del primer segmento.
p	=	Dirección de la fuerza de equilibrio.
T_i	=	Matriz de transformación homogénea.
F	=	Fuerza de equilibrio del manipulador en estudio paramétrico [N].
δ_x	=	Desplazamiento en X del manipulador [mm].
δ_y	=	Desplazamiento en Y del manipulador [mm].
E_{sum}	=	Energía suministrada [J].
E_{perd}	=	Energía perdida [J].
E_{SMA}	=	Energía del alambre de SMA [J].
E_{cambio_fase}	=	Energía generada por el cambio de fase [J].
$E_{\Delta T}$	=	Energía requerida para elevar la temperatura del alambre de SMA [J].
m	=	Masa del alambre de SMA [kg].
C_p	=	Calor específico a presión constante [J/kg/°C].
ΔT	=	Cambio de temperatura en el alambre de SMA [°C].
e	=	Eficiencia del alambre de SMA [%].
$F_{SMA\ Activo}$	=	Fuerza de equilibrio del alambre de SMA activo [N].
$F_{SMA\ Inactivo}$	=	Fuerza de equilibrio del alambre de SMA inactivo [N].
SA	=	Alambre de SMA superior activo.
IA	=	Alambre de SMA inferior activo.

- $\delta_x SMA Sup SA$ = Desplazamiento en X de la parte superior del manipulador cuando el alambre superior se encuentra activo [mm].
- $\delta_y SMA Sup SA$ = Desplazamiento en Y de la parte superior del manipulador cuando el alambre superior se encuentra activo [mm].
- $\delta_x SMA Inf SA$ = Desplazamiento en X de la parte inferior del manipulador cuando el alambre superior se encuentra activo [mm].
- $\delta_y SMA Inf SA$ = Desplazamiento en Y de la parte inferior del manipulador cuando el alambre superior se encuentra activo [mm].
- $\delta_x SMA Sup IA$ = Desplazamiento en X de la parte superior del manipulador cuando el alambre inferior se encuentra activo [mm].
- $\delta_y SMA Sup IA$ = Desplazamiento en Y de la parte superior del manipulador cuando el alambre inferior se encuentra activo [mm].
- $\delta_x SMA Inf IA$ = Desplazamiento en X de la parte inferior del manipulador cuando el alambre inferior se encuentra activo [mm].
- $\delta_y SMA Inf IA$ = Desplazamiento en Y de la parte inferior del manipulador cuando el alambre inferior se encuentra activo [mm].

Introducción

Los manipuladores han tenido un desarrollo extenso debido a sus capacidades. Se emplean para una variedad de tareas, destacándose especialmente en el ámbito industrial por su capacidad para simplificar labores y mejorar la productividad. Con el tiempo, ha surgido la necesidad de manipuladores flexibles capaces de trabajar en espacios restringidos. Un manipulador flexible se define como un mecanismo que puede transferir y transformar movimiento, carga o energía mediante la deformación de sus componentes. Los manipuladores flexibles pueden tener diferentes campos de aplicación tal como la industria aeroespacial o médica. En la industria medica pueden ser empleados para llevar a cabo endoscopias. Por otra parte, los manipuladores flexibles también pueden ser empleados en la industria aeroespacial, donde pueden ser usados para realizar inspecciones visuales, reparaciones o suministro de combustible.

El medio de accionamiento para un manipulador flexible depende de la aplicación que se le desee otorgar. Uno de los factores por considerar para algunas aplicaciones son el espacio y el peso que requiere la unidad de accionamiento. En búsqueda de un medio de accionamiento que permita ahorrar espacio y peso a tomado relevancia el hacer uso de materiales inteligentes, tal como lo son las aleaciones con memoria de forma. Las aleaciones con memoria de forma presentan diversas ventajas tal como el ahorro de espacio y de peso, esto debido a que únicamente es requerido hacerles pasar corriente eléctrica para elevar la temperatura del material y provocando que recupere su forma original (forma antes de ser deformado). En este trabajo, se utilizarán alambres de memoria de forma (SMA) y se evaluará la factibilidad de su empleo como medio de accionamiento continuo en un manipulador flexible. La Figura 1.1 muestra un esquema propuesto del manipulador accionado por alambres de SMA. Uno de los componentes del manipulador que se observa en la Figura 1.1 son los discos laterales, los cuales tienen la principal función de ensamblar la parte central del manipulador (eje central) y los alambres de SMA. Los alambres de SMA se pueden observar en la parte superior e inferior del manipulador (Figura 1.1). Es importante hacer mención que el eje central es de aluminio 6061 y los discos de PLA. Por otra parte, el manipulador que se observa en la Figura 1.1 podrá contar con un alambre de SMA si se requiere un actuador o dos alambres de SMA en paralelo si se requiere accionamiento continuo.

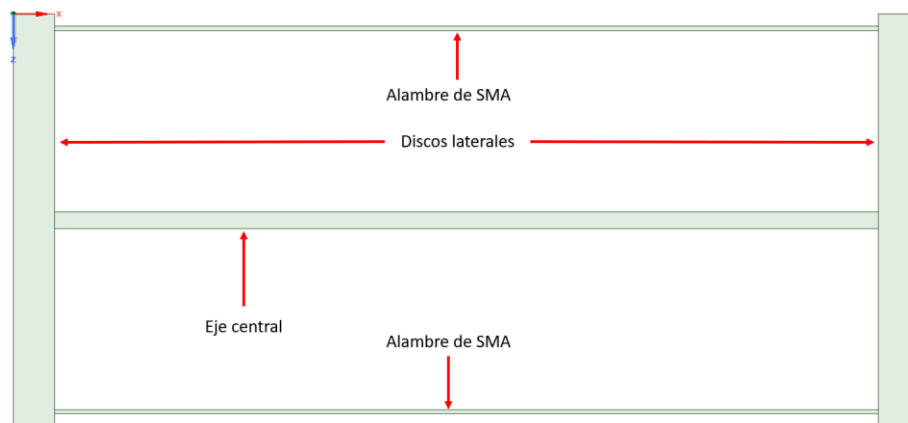


Figura 1.1:
Manipulador
accionado por
alambres de
SMA.

El manipulador flexible accionado por alambres de SMA (Figura 1.1) se modela en un principio a través del método de los elementos finitos (FEM). Es importante mencionar que es necesario caracterizar el alambre de SMA e incorporar sus propiedades mecánicas al modelo FEM, el procedimiento que se realizó se presenta en el capítulo 2. Una vez incorporadas las propiedades del alambre de SMA al modelo FEM del manipulador se estudiaron los resultados de desplazamientos y se sometieron a un proceso de validación, en donde se compararon con otros métodos para modelar el manipulador. Mas adelante, los resultados de desplazamiento experimentales del manipulador se validaron a través de tres métodos: un modelo de cuerpo pseudo-rígido 3R (3R-PRBM), un modelo FEM que incorpora el alambre de SMA en su geometría y un modelo FEM que no lo incorpora. Estos métodos no solo validaron los desplazamientos, sino que también generaron una reducción significativa en el costo computacional, lo anteriormente mencionado se presenta en el capítulo 3. Es importante hacer mención que en el capítulo 3 únicamente se trabajó con un alambre de SMA en la parte superior de la estructura del manipulador.

Mas adelante, se evalúa la factibilidad del uso de dos alambres de SMA en paralelo en la estructura del manipulador, donde se busca obtener accionamiento continuo en el manipulador cuando un alambre se encuentra activo, esta evaluación se centra en el análisis energético de cada fase del material. Para evaluar dicha factibilidad, se propuso un arreglo de dos alambres conectados en serie como una manera más simple de comprender su comportamiento cuando se encuentran sometidos a diferentes temperaturas. El principal objetivo de este arreglo es poder observar si un alambre de SMA activo tiene la capacidad de deformar un alambre inactivo, y de esta manera obtener un accionamiento continuo, lo cual se presenta en el capítulo 4. Una vez evaluada la factibilidad del empleo de los alambres de SMA en el arreglo en serie se procedió a colocar dos alambres de SMA en paralelo en la estructura del manipulador, con el objetivo de observar, comprender y analizar el accionamiento continuo del manipulador. Por otra parte, se presentan diversos métodos para modelar el desplazamiento del manipulador, con el objetivo de reducir el tiempo computacional. Lo anteriormente mencionado se presenta en el capítulo 5, en donde también se estudia cómo afecta la geometría del manipulador al desplazamiento.

Finalmente es importante hacer mención que para el caso del manipulador flexible del presente trabajo aún no se tiene planteada una aplicación específica. Se ha encontrado en la literatura manipuladores que son accionados por alambres que no están cumpliendo aún con una aplicación específica o no están manejando un objeto o material en su extremo y a pesar de esto reciben el nombre de manipulador. Un ejemplo de esto es el caso de Huang *et al.* [1] en donde emplean el nombre de manipulador a pesar de no estar manejando un objeto, el cual además presenta un comportamiento similar al de un actuador. En el presente trabajo será empleado el nombre de manipulador a pesar de que el comportamiento a analizar es más similar al de un actuador, esto debido a que únicamente se analiza la posición del manipulador una vez que el alambre fue activado. Por otra parte, es importante hacer mención que uno de los principales objetivos del presente trabajo es evaluar la factibilidad del empleo de alambres de SMA como medio de accionamiento continuo en caso de hacer uso de dos alambres de SMA conectados en paralelo en el manipulador, lo cual es un tema que no se ha encontrado en la literatura.

Hipótesis

Un manipulador flexible, equipado con dos alambres de SMA colocados en paralelo como medio de accionamiento, puede lograr un movimiento continuo mediante el calentamiento adecuado de dichos alambres de SMA.

Justificación

Comprender el comportamiento de mecanismos flexibles accionados por aleaciones con memoria de forma (SMA) resulta importante, donde es fundamental conocer y estudiar la interrelación entre los parámetros de entrada, salida y el diseño del manipulador. Uno de los parámetros de entrada que se debe de tomar en cuenta es la temperatura a la que se encontrara sometido el alambre de SMA y cómo afecta su comportamiento. Por otra parte, se deberá de considerar como parámetro de salida el desplazamiento máximo que puede tener el manipulador y como varía en función de la geometría de este mismo. Los manipuladores flexibles tienen diversas aplicaciones, especialmente en sectores como el médico o el aeroespacial. En el ámbito médico, su utilidad se destaca en cirugías que demandan un manipulador capaz de acceder y operar en áreas de difícil acceso, minimizando el riesgo de heridas durante su uso. En el sector aeroespacial, se pueden emplear para la supervisión visual al equipar la punta del manipulador con una cámara.

A pesar de haber encontrado en la literatura autores que emplean alambres de SMA como medio de accionamiento para mecanismos o manipuladores flexibles, estos presentan limitaciones, la cual es que únicamente muestran deformación unidireccional a flexión sin abordar la recuperación a la posición inicial o un accionamiento continuo para alcanzar diversas posiciones. Por ende, se evaluará la factibilidad de emplear dos alambres de SMA en paralelo en el manipulador, buscando determinar su capacidad para obtener movimiento continuo. Por otra parte, se analizará cómo la variación de parámetros geométricos afecta al desplazamiento del manipulador. Además, se expondrán diversos métodos para modelar el comportamiento de un manipulador flexible controlado por alambres de SMA, con el objetivo de minimizar el costo computacional sin comprometer la precisión del desplazamiento. Se busca mantener errores porcentuales promedio de desplazamiento por debajo del 5%.

Un aspecto destacado de éste trabajo radica en la caracterización de alambres de SMA y su implementación en un software comercial, lo cual, a pesar de encontrarse en la literatura, los autores no explican cómo realizar éste procedimiento. Asimismo, se destaca la evaluación de la factibilidad del uso de alambres de SMA en paralelo como medio de accionamiento continuo en un manipulador flexible, abordada desde una perspectiva energética, constituyendo un aporte importante en la literatura que no ha sido encontrado.

Objetivos

Objetivo general:

Análisis y diseño de un manipulador flexible empleando alambres de aleación con memoria de forma (SMA) para su accionamiento, logrando evaluar su factibilidad de empleo.

Objetivos específicos:

- Caracterizar alambre de SMA.
- Modelar, diseñar y fabricar un manipulador con un alambre de SMA como medio de accionamiento.
- Evaluar la factibilidad del empleo de dos alambres de SMA como medio de accionamiento continuo del manipulador.
- Modelar, diseñar y fabricar un manipulador con dos alambres de SMA en paralelo.

Estructura de la tesis

En el primer capítulo, se presentan los antecedentes de manipuladores flexibles accionados por alambres de aleación con memoria de forma (SMA). Se examinan trabajos previos encontrados en la literatura, destacando las diferencias con la propuesta presentada. El segundo capítulo inicia con una explicación del fenómeno de memoria de forma (SME). En ese mismo capítulo se detalla la caracterización del alambre de SMA mediante un arreglo experimental. Finalmente, se aborda como integrar estas propiedades en el software FEM de ANSYS Mechanical.

El tercer capítulo presenta diversos métodos para modelar el manipulador utilizando un solo alambre de SMA como medio de accionamiento. Se exploran tres modelos diferentes, los cuales son: el modelo de cuerpo pseudo-rígido 3R, el manipulador incorporando el alambre de SMA y sin incorporar el alambre de SMA en FEM. Se realiza una comparación de los resultados de desplazamiento y el tiempo computacional. Por último, se comparan los resultados experimentales de desplazamiento con los modelos mencionados anteriormente.

El cuarto capítulo se centra en la evaluación de la factibilidad del empleo de alambres de SMA como medio de accionamiento continuo para dos alambres conectados en serie, esto debido a que es una manera más simple de comprender su comportamiento. Se presenta un análisis energético, considerando las energías de deformación en las dos fases del material variando la temperatura a la que se encuentra el alambre de SMA. Finalmente, el quinto capítulo aborda el modelado de un manipulador flexible con dos alambres de SMA en paralelo en su estructura empleando únicamente un alambre de SMA como medio de accionamiento. Por último, se comparan los resultados de desplazamiento experimentales con el modelo de cuerpo pseudo-rígido 3R y los modelos FEM.

Capítulo 1: Manipuladores flexibles.

Los manipuladores en la actualidad abarcan una amplia gama de aplicaciones, desempeñando funciones diversas en sectores como la industria alimenticia, médica y aeroespacial, entre otros. Un manipulador se define como un dispositivo mecánico con la capacidad de manejar objetos o materiales de manera remota, especialmente en entornos desafiantes o donde la presencia humana es limitada. Es importante hacer mención que en la literatura en ocasiones es utilizado el nombre de manipulador, aunque aún no se tenga una aplicación final o no se estén manejando objetos o materiales, tal como es el caso del presente trabajo. Entre los diversos tipos de manipuladores, se destaca la categoría de manipuladores flexibles, los cuales obtienen su movilidad, ya sea total o parcial, mediante la deflexión de sus componentes.

Los manipuladores flexibles tienen aplicaciones significativas, especialmente en sectores como el médico y el aeroespacial. En el ámbito médico, su utilidad se manifiesta en diversos tipos de cirugías que requieren un manipulador capaz de acceder y operar en áreas de difícil acceso, minimizando el riesgo de heridas durante su uso. En el sector aeroespacial, estos manipuladores pueden emplearse para llevar a cabo tareas de supervisión visual, siendo posible equipar la punta del manipulador con una cámara para dicho propósito.

1.1 Medios de accionamiento para un manipulador flexible

Existen diferentes maneras de accionar un manipulador flexible, una de estas maneras es a través de alambres sin memoria de forma a los cuales en uno de sus extremos se les conecta un servomotor. Un ejemplo de este tipo de accionamiento es el trabajo que llevó a cabo Clark *et al.* [2], donde hizo uso de 12 servomotores MG996R, los cuales son empleados para accionar 12 alambres comunes. Por otra parte, el diseño de [2] consta de 3 segmentos con 4 subsegmentos, donde cada segmento contara con 4 alambres. El diseño del manipulador se presenta en la Figura 1.2, donde se observa el manipulador una vez accionado.

Por otra parte, una de las grandes desventajas de emplear servomotores como medio de accionamiento para un manipulador es el espacio requerido por la unidad de accionamiento (servomotores, microcontrolador, etc), la cual en ocasiones puede llegar a ser más grande que el mismo manipulador. Una de las ventajas de emplear este medio de accionamiento es que los servomotores son eficientes energéticamente, los cuales pueden tener hasta un 90% de eficiencia [3]. Otra de las ventajas de emplear este medio de accionamiento es que requiere poco tiempo para ser accionado el manipulador.

Otra manera de accionar un manipulador flexible es emplear músculos artificiales neumáticos que reciben el nombre de músculos McKibben. Un ejemplo de uso de músculos McKibben en un manipulador flexible es el trabajo que fue desarrollado por Peng *et al.* [4], donde hace uso de 6 músculos por cada segmento. El trabajo emplea en total 3 segmentos con 2 subsegmentos cada segmento. La estructura del manipulador se puede observar en la Figura 1.3a y en la Figura 1.3b el prototipo.

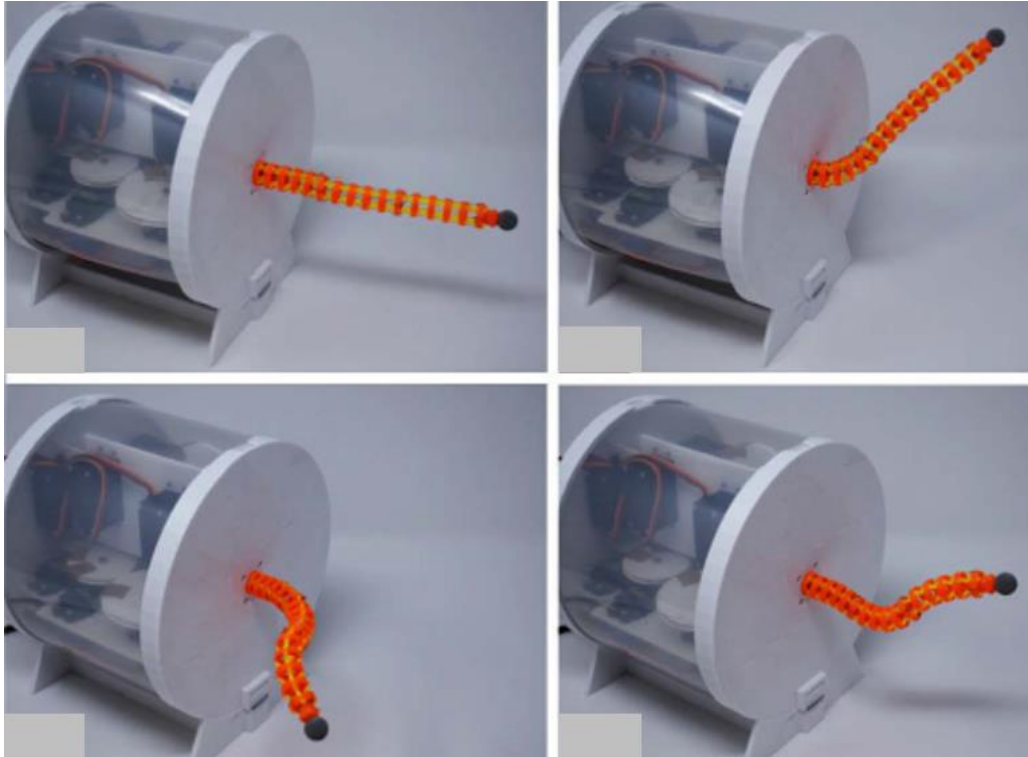


Figura 1. 2: Manipulador flexible con alambres accionado por servomotores [2].

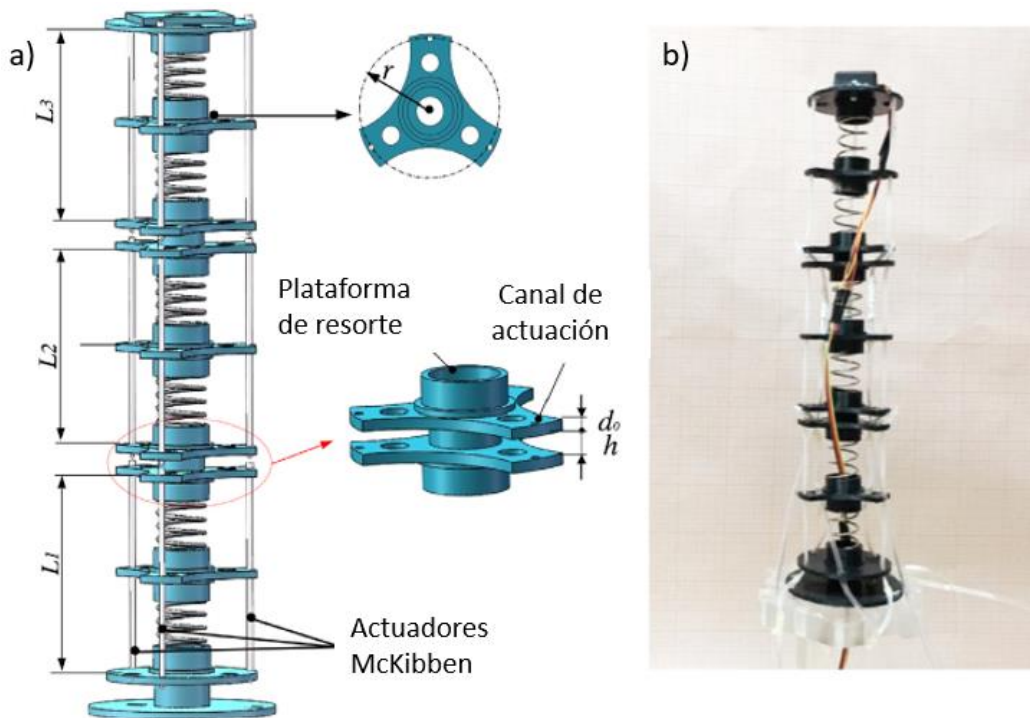


Figura 1. 3: Manipulador flexible accionado por músculos artificiales McKibben, a) manipulador y b) prototipo [4].

Una de las ventajas de emplear músculos McKibben como medio de accionamiento es el peso (sin considerar peso de componentes de la unidad de accionamiento), los cuales en ocasiones se puede despreciar. Por otra parte, la unidad de accionamiento (compresor, regulador, válvulas, etc) incrementa el peso del manipulador, lo cual es un punto por tomar en cuenta y que lo restringe para ciertas aplicaciones. Otro de los puntos destacados es que requiere 013 J para ser accionado el manipulador (sin considerar la energía que requiere el compresor). Otra de las ventajas de hacer uso de este medio de accionamiento es que requiere 0.6 segundos para ser accionado el manipulador. Por otra parte, este medio de accionamiento presenta ciertas desventajas tal como el espacio y peso requerido por la unidad de accionamiento (compresor), lo cual lo restringe a ciertas aplicaciones. Otra de sus grandes desventajas son los costos elevados que tienen los músculos McKibben.

Un medio más para accionar un manipulador flexible es el uso de alambres de SMA, los cuales serán empleados en el presente trabajo. Este medio de accionamiento únicamente ha sido empleado como actuador, por lo que únicamente ha tomado interés la posición que tiene un mecanismo una vez accionado el alambre de SMA y no un accionamiento continuo. Un ejemplo de uso de alambre de SMA como actuador que se ha logrado encontrar en la literatura es en el desarrollo de una aguja activa [4]. En el trabajo de [4] se buscó mejorar el posicionamiento de una aguja activa que es empleada para biopsias cerebrales, el cual se detallara más adelante en el presente trabajo. Otro ejemplo de uso de alambres de SMA como medio de accionamiento es el presentado por Mejía *et al.* [5], donde propone emplear los alambres de SMA para un manipulador flexible (Figura 1.4). En su trabajo propone equipar la punta del manipulador flexible accionado por alambres de SMA con una cámara esto con la finalidad de realizar inspecciones visuales en un satélite.

Una de las principales ventajas de emplear alambres de SMA como medio de accionamiento es que es económico y se puede miniaturizar, esto brindando una alternativa para aquellas industrias que no tienen altas capacidades económicas. Otro punto positivo de este medio de accionamiento es que requiere poco espacio para su almacenamiento y poco peso, lo cual lo hace ideal para la industria aeroespacial. Una de las desventajas de usar este medio de accionamiento es que energéticamente no es eficiente y que requiere mayor tiempo para un ciclo de accionamiento del manipulador, donde se debe de considerar el enfriamiento y calentamiento del alambre de SMA. Mas adelante se van a detallar y comparar cuantitativamente cada tipo de accionamiento.

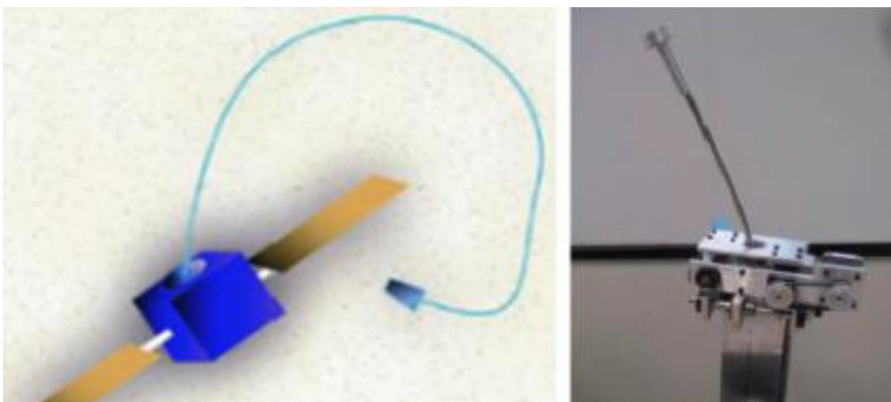


Figura 1. 4:
Manipulador
flexible accionado
por alambres de
SMA [5].

El presente trabajo hará uso de alambres de SMA como medio de accionamiento para un manipulador flexible debido a las ventajas anteriormente mencionadas. Por otra parte, no se ha encontrado en la literatura el empleo de alambres de SMA como medio de accionamiento continuo para un manipulador flexible. A continuación, se presentan trabajos encontrados en la literatura que hacen uso de alambres comunes como medio de accionamiento.

1.2 Manipuladores flexibles accionados por alambres.

Tal como se mencionó al inicio de este capítulo, los manipuladores flexibles obtienen su movilidad parcial o total mediante la deflexión de sus componentes, a diferencia de los manipuladores comunes que son rígidos en sus componentes y debido a esto se restringe su movimiento y capacidades. Un tipo particular de manipulador flexible entran en la categoría de los accionados por alambres, siendo parte de la rama conocida como robótica suave [3]. Estos manipuladores presentan una estructura análoga a la de una espina dorsal y su funcionamiento se fundamenta en la aplicación de fuerza a través de los alambres en la estructura del manipulador, logrando así la flexión de la parte central o eje central. Su apariencia recuerda a troncos y tentáculos, permitiéndoles adaptar su forma para navegar eficientemente en entornos complejos. A diferencia de los manipuladores rígidos, que podrían considerarse "vertebrados", los manipuladores flexibles pueden ser flexionados en cualquier punto de su estructura.

Estos manipuladores flexibles presentan diversas ventajas, como su bajo peso, requerimientos mínimos de espacio para almacenamiento, capacidad de colocarse con precisión en espacios reducidos y elimina la necesidad de una unidad externa de accionamiento. Estas características han despertado un gran interés en el ámbito médico, donde estos manipuladores son empleados para llevar a cabo cirugías de diversa índole, permitiendo un posicionamiento preciso según las necesidades y evitando posibles heridas en el paciente. Por otra parte, los alambres de SMA presentan ciertas desventajas, tal como la dificultad para caracterizarlos y comprender su comportamiento. Además, requiere un tiempo cercano a los 3 minutos para el enfriamiento del alambre de SMA (sin no se considera un medio de enfriamiento externo), donde se puede considerar un medio de accionamiento lento a comparación de si se hace uso de servomotores, los cuales pueden tener accionamiento continuo sin esta restricción. Aunque existen varios avances en el campo de los manipuladores flexibles, los mismos pueden clasificarse según el tipo de accionamiento, entre ellos: alambres y tubos concéntricos pre-curvados [4]. No obstante, el enfoque principal del presente trabajo se centra en los manipuladores flexibles accionados por alambres de memoria de forma (SMA).

En el ámbito médico, se presenta un caso en la Figura 1.5 del empleo de un manipulador flexible accionado por alambres, como se describe en el trabajo de Daekeun Ji *et al* [6]. Este manipulador flexible adquiere movimiento mediante alambres que son señalados en la Figura 1.5, los cuales permiten que el manipulador se flexione en el sentido que sea requerido. El propósito del manipulador radica en sostener una herramienta médica durante la ejecución de endoscopias en pacientes, con el objetivo de minimizar las posibles lesiones que podrían

surgir durante la intervención. La pinza es un componente externo, que se activa a través de una fuerza externa, la cual es completamente independiente del movimiento del manipulador. Por otra parte, el manipulador emplea resortes los cuales son colocados entre cada segmento esto con la finalidad de aproximar más el movimiento del manipulador a una curvatura constante.

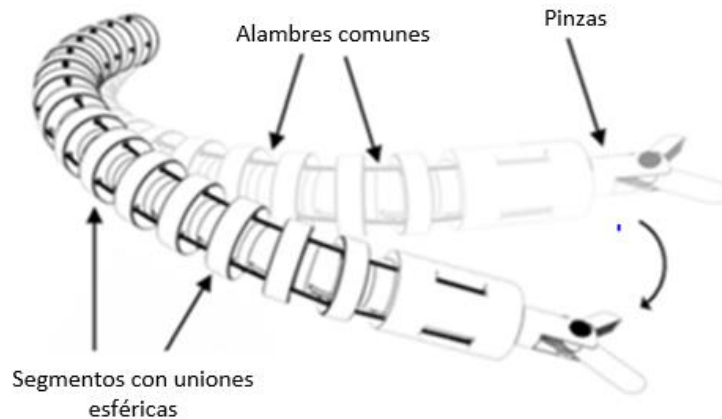


Figura 1. 5: Manipulador accionado por alambres y resortes [6].

En la literatura también se encuentran trabajos relacionados con manipuladores bioinspirados, como el estudio realizado por Sun *et al.* [7], quienes enfocaron la aplicación de manipuladores flexibles en el ámbito médico, describiendo el uso de estructuras monolíticas, como un robot flexible con apariencia y estructura similar a la de una serpiente (Figura 1.6). Además, analizaron estos mecanismos mediante modelos de cuerpo pseudo-rígido y FEM, brindando otra alternativa para poder obtener resultados de desplazamiento. El trabajo desarrollado por Sun *et al.* [7] es un caso de un manipulador que no está manejando ningún objeto o material y a pesar de eso recibe el nombre de manipulador en la literatura.

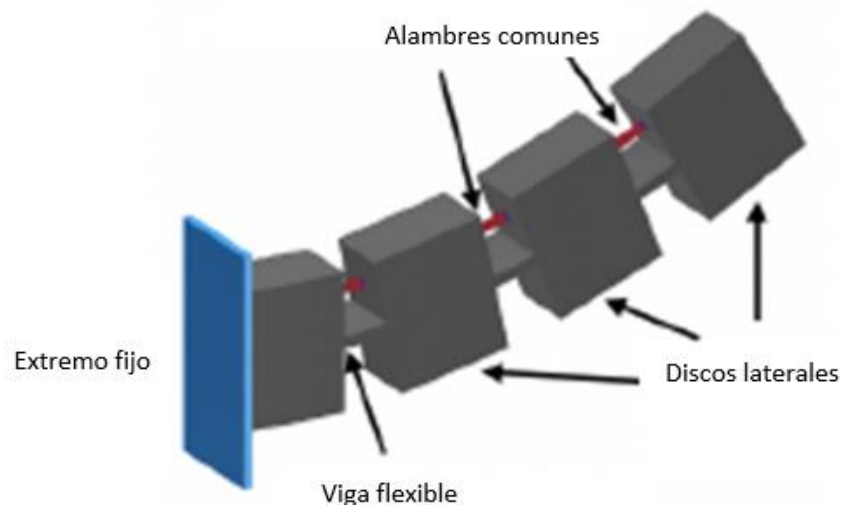


Figura 1. 6: Manipulador accionado por un cable [7].

Por otra parte, Huang *et al.* [1] llevaron a cabo el diseño de un manipulador flexible empleando alambres comunes (Figura 1.7), éste contando con 2 segmentos con 7 subsegmentos cada uno. La forma de accionamiento del manipulador es mediante la aplicación de una carga externa en el extremo izquierdo, donde compararon los resultados entre el modelo de cuerpo pseudo-rígido de múltiples segmentos y pruebas experimentales. Además, en su trabajo describieron los componentes que conforman un manipulador flexible accionado por alambres (Figura 1.7a), estos siendo los siguientes:

- Segmentos y subsegmentos, de los cuales teniendo un mayor número incrementa la complejidad del modelado y análisis, aunque mejora la precisión del movimiento.
- Eje central, el cual se flexiona cuando sufre cargas a través de los cables.
- Alambres, a través de los cuales se adquiere la fuerza de accionamiento.
- Discos acopladores, los cuales se encargan de acoplar el eje central con los alambres.

En este trabajo se empleará el modelo de cuerpo pseudo-rígido 3R para modelar el manipulador, sustituyendo la carga que se aplica a los alambres comunes para su accionamiento por una fuerza (de equilibrio) que surge al activar los alambres de SMA debido al cambio de fase de estos. El trabajo de Huang *et al.* [1] es otro caso que emplea el nombre de manipulador sin que este manejando una herramienta u objeto en su extremo, y más bien se centra en describir el movimiento en función de cargas aplicadas en su extremo izquierdo.

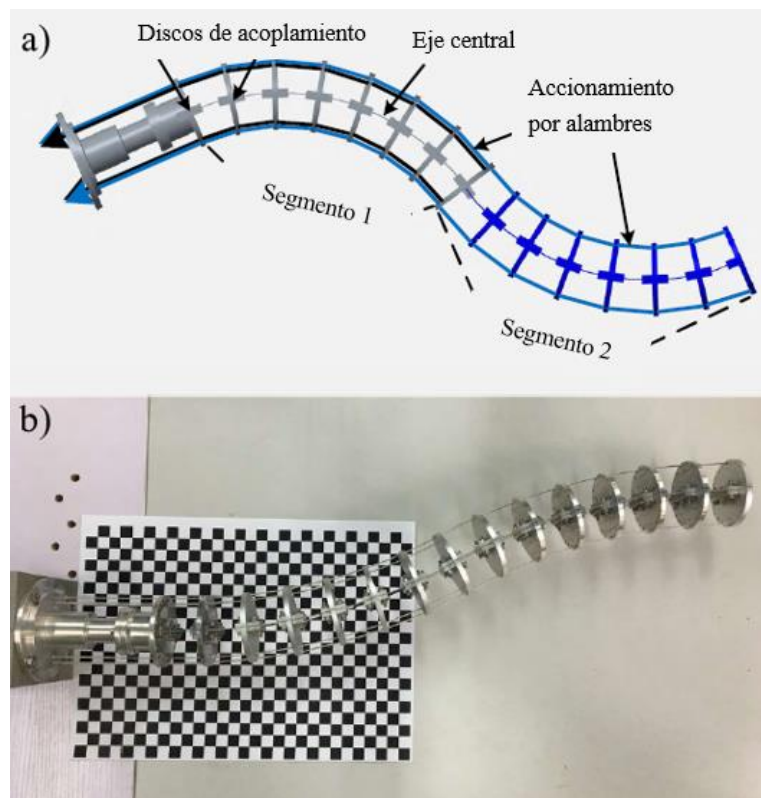


Figura 1. 7: Manipulador accionado por alambres comunes, a) estructura de un manipulador con múltiples segmentos y subsegmentos, b) prototipo de manipulador [1].

1.3 Manipuladores flexibles accionados por alambres de SMA.

Los avances en manipuladores accionados por alambres de SMA han sido escasos en la literatura, un ejemplo de esto es el trabajo de Konh *et al.* [8], [9], [10], [11], quienes emplearon alambres de SMA para desarrollar una aguja activa con el objetivo de mejorar la precisión de los movimientos, planteando su aplicación en biopsias cerebrales. El material empleado en los alambres de SMA fue de Níquel-Titanio, el cual tienen dos módulos de elasticidad dependiendo de la temperatura a la que se encuentre y debido a esto dos comportamientos mecánicos diferentes. Una de las dos fases que tiene el alambre de SMA es la martensita, la cual normalmente tiene el menor módulo de elasticidad y es estable a bajas temperaturas, para los alambres de SMA normalmente es a temperatura ambiente. La otra fase del alambre de SMA es la austenita la cual tiene un módulo de elasticidad más elevado y normalmente es estable a temperaturas más altas. Por otra parte, Konh *et al.* [4] presentan el empleo de alambres de SMA en un manipulador flexible que requiere que estos sean pre-deformados a un porcentaje de su longitud en estado martensítico (en su trabajo se considera de 2%), pasando de martensita a martensita deformada. Una vez que el alambre de SMA está pre-deformado se monta en la aguja activa y se le aplica una temperatura superior a la de transición (A_f), generando una carga al manipulador a medida que el alambre vuelve a su forma entrenada, provocando flexión en la parte central. Al comportamiento del alambre de SMA anteriormente descrito se le conoce como efecto de memoria de forma (SME).

Es importante hacer mención que en el siguiente capítulo se habla más detalladamente sobre el comportamiento del alambre de SMA bajo diferentes condiciones. Por otra parte, en el mismo trabajo [4], llevaron a cabo la creación de diversos experimentos para evaluar el comportamiento de la aguja activa, como se observa en la Figura 1.8. En la Figura 1.8a, se utiliza un solo alambre de SMA en la parte superior de la aguja, mientras que en la Figura 1.8b se emplean dos alambres de SMA en serie. Se infiere que, si la aguja tiene un alambre, se considera como de un segmento, y si cuenta con dos alambres en serie, se identifica como de dos segmentos.

Una característica clave para tener en cuenta en el diseño del manipulador es que, al aumentar la cantidad de segmentos y subsegmentos, se logra una mayor zona de trabajo y un posicionamiento más preciso de la punta del manipulador. Es relevante señalar que, Konh *et al.* [4] utilizaron solo un alambre de SMA como medio de accionamiento o dos en serie, y el análisis se centra exclusivamente en el posicionamiento cuando este alambre está activo.

Otro punto importante por destacar es que Kohn *et al.* [8] emplearon el modelo de Brinson para describir el comportamiento de sus alambres de SMA, mientras que en el presente trabajo se emplea el modelo de Souza-Auricchio que incorpora ANSYS Mechanical. Por otra parte, en Konh *et al.* [4] realizaron el estudio de la manufactura rápida y precisión de ensamblaje de la aguja activa. Además, se evaluó el rendimiento de diferentes alambres de SMA, donde se presentaron ciertas dificultades debido al comportamiento no lineal e histéresis de los alambres de SMA. Es importante hacer mención que en el trabajo de Kohn *et al.* [8], únicamente presentan el estudio de la posición cuando el alambre se encuentra activo, por lo que el alambre de SMA es empleado como un actuador.

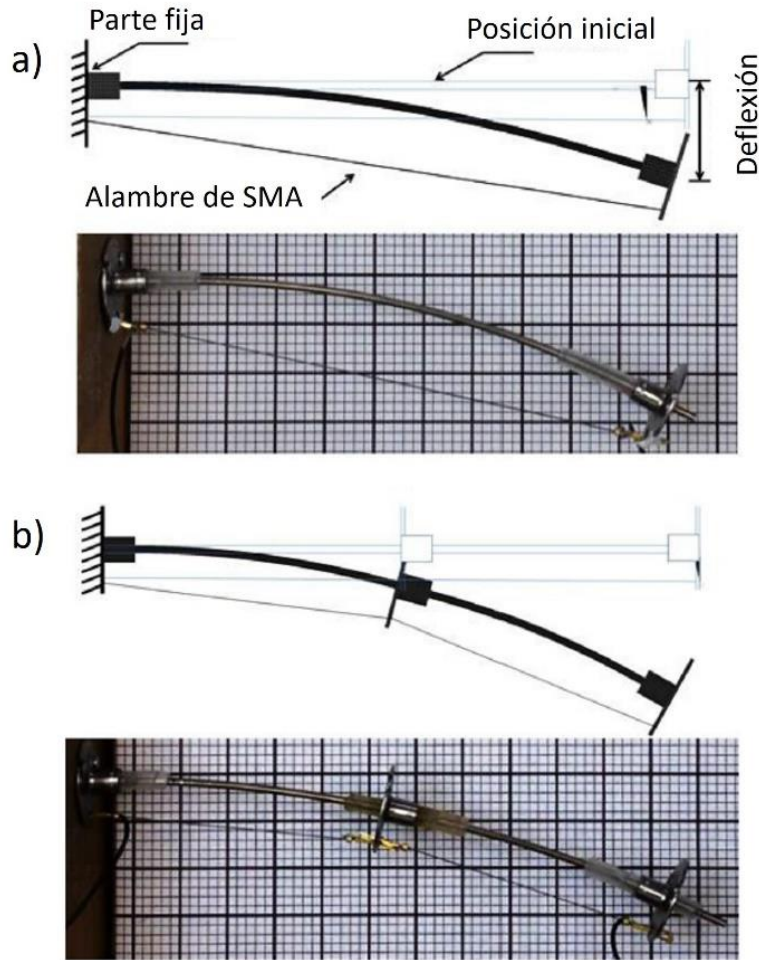


Figura 1. 8: Manipulador accionado por alambres de memoria de forma, a) un segmento y b) dos segmentos [8] .

Adicionalmente, es relevante destacar el trabajo llevado a cabo por Crews *et al.* [12], quienes se enfocaron en el desarrollo de un catéter robótico accionado por alambres de SMA para el tratamiento de enfermedades cardiovasculares. El diseño del manipulador propuesto por Crews presenta un comportamiento particular, limitándose a un movimiento similar al de un péndulo, como se ilustra en la Figura 1.9. Este manipulador incorpora una viga flexible en su centro, la cual le permite recuperar su posición inicial después de cada movimiento, y utiliza alambres de SMA de una vía para lograr este efecto. Los alambres de SMA de una vía se limitan únicamente a entrenar su forma en la fase austenítica, a diferencia de los alambres de SMA de dos vías en los cuales se puede entrenar su forma tanto en la fase martensítica como la austenítica. En el trabajo presente únicamente se emplean alambres de una vía. La Figura 1.9 presenta el modelo desarrollado por Crews *et al.* [12], destacando la notable diferencia en la geometría en comparación con el manipulador propuesto en el presente trabajo, donde la que se empleará será más similar a la geometría del prototipo de Huang *et al.* [1].

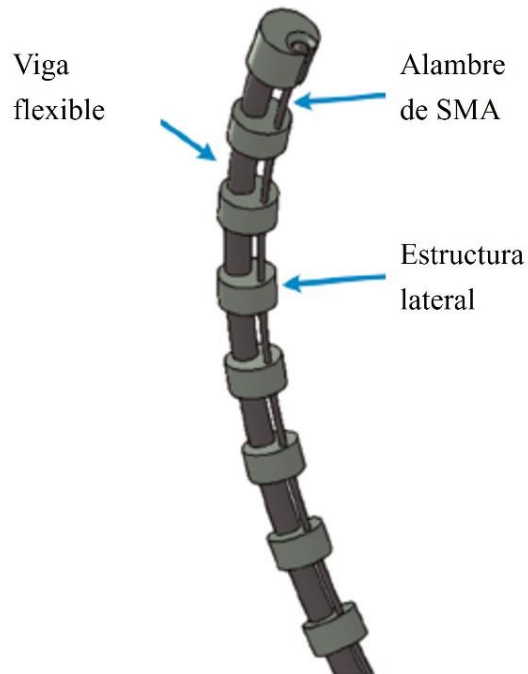


Figura 1. 9: Catéter flexible accionado por alambres de memoria de forma [12].

Por otra parte, Karmakar *et al.* [13] llevaron a cabo un análisis exhaustivo del manipulador al variar parámetros clave, tal como la excentricidad, definida como la distancia entre el eje central del manipulador y el alambre de SMA, así como la cantidad de discos acopladores entre la unión del eje central y el alambre de SMA. Dentro de este análisis, se abordó en detalle la curva característica del actuador, empleando un modelo de recuperación restringida como base para la evaluación. Este enfoque meticuloso permitió comprender cómo estas variables influyen en el rendimiento y la eficacia del manipulador.

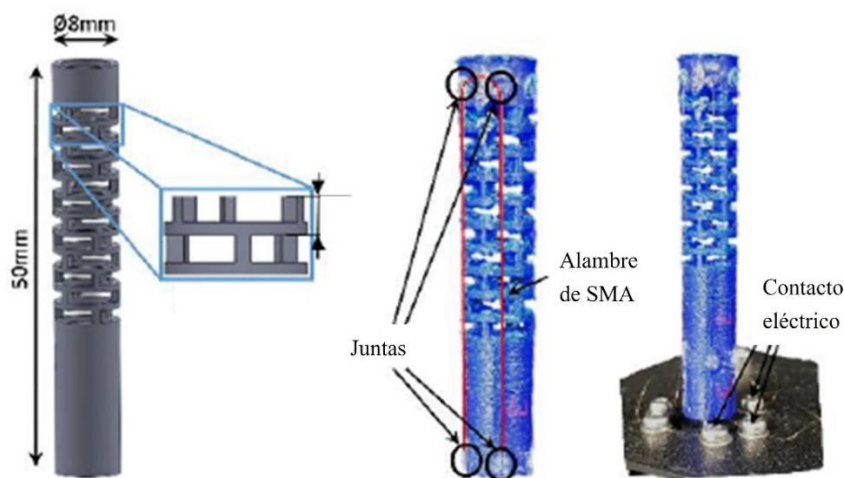


Figura 1. 10: Estructura del manipulador con módulos de resorte [14].

En una línea similar, Goergen *et al.* [14] ofrecieron una perspectiva detallada sobre el uso de alambres de SMA en la creación de diversos robots, resaltando sus ventajas, como la capacidad de miniaturización combinada con una destreza significativa. La activación de los alambres SMA se logra mediante la aplicación de corriente, eliminando la necesidad de una unidad adicional de accionamiento. El enfoque estructural del manipulador que se presenta en su trabajo se centra en módulos de resorte, como se ilustra en la Figura 1.10. Es esencial notar que esta estructura difiere de la que se emplea en el presente trabajo.

Por otra parte, Mejía *et al.* [5], presentaron en su trabajo una metodología para el diseño de manipuladores flexibles accionados por alambres de SMA. Además, se presenta un modelo 2D teórico ideal, en donde relaciona la excentricidad (h), un radio de curvatura (r) y la longitud de segmento (L) con el pre-deformado del alambre de SMA dando como resultado un ángulo de deflexión que describe el comportamiento del manipulador cuando se encuentra activo el alambre de SMA (Figura 1.11a). En la Figura 1.11a se observa un manipulador accionado únicamente con un alambre de SMA, donde la línea de color rojo es el alambre de SMA activo y las líneas negras la estructura del manipulador. En la Figura 1.11b se presenta primeramente el manipulador aun sin estar activo, en donde son representados los alambres de SMA en estado inactivo de color azul y la estructura del manipulador de color negro. Por otra parte, también en la Figura 1.11b se observa el manipulador con dos alambres de SMA cuando únicamente un alambre de SMA se encuentra activo (línea roja) generando que la fibra neutra se flexione y estire el alambre de SMA que se encuentra inactivo (línea azul).

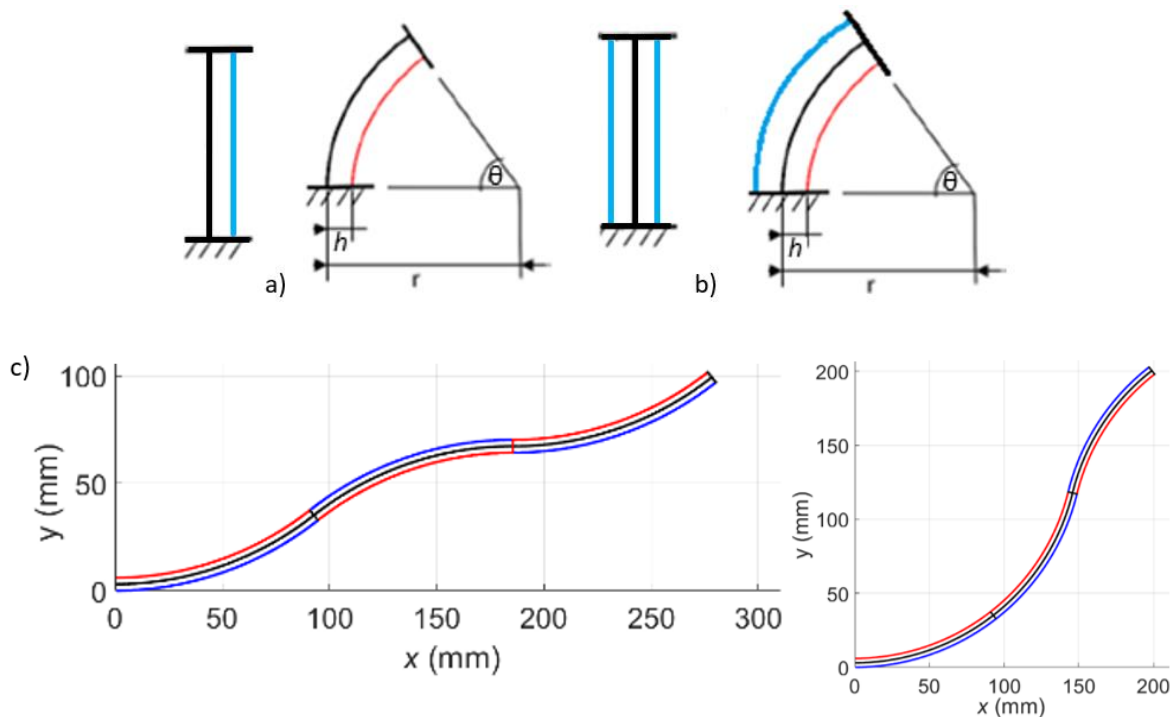


Figura 1. 11: Modelo teórico 2D ideal, a) manipulador flexible accionado con un alambre de SMA, b) manipulador flexible accionado por dos alambres de SMA y c) resultados de emplear el modelo 2D teórico ideal considerando tres segmentos de 100 mm de longitud y 3 mm de excentricidad [5].

En la Figura 1.11c se presentan los resultados de hacer uso de este modelo 2D teórico ideal. Este modelo se basa en proponer un valor para el pre-deformado del alambre de SMA (ε_{pre}), y este se relaciona con la excentricidad y el radio de curvatura con la ecuación (1).

$$r = \frac{h}{\varepsilon_{pre}} \quad (1)$$

Una vez encontrado el radio de curvatura se podrá encontrar el ángulo de deflexión que se puede observar en la Figura 1.11a, el cual se puede calcular de la siguiente forma:

$$\theta = \frac{L}{r} \quad (2)$$

Únicamente es requerido conocer que alambre de SMA se encuentra activo y a partir de eso calcular el valor de θ para poder definir la posición del manipulador en este instante. Por otra parte, Mejía *et al.* [5] en su trabajo también hace uso del modelo de cuerpo pseudo-rígido para el modelado del manipulador flexible accionado por alambres de SMA, el cual si será empleado en el trabajo presente. Además, se presenta el uso del modelo constitutivo de Brinson para los alambres de SMA y hace uso de propiedades mecánicas que ya se encuentran en la literatura. Esto último, es una de las principales diferencias con respecto al presente trabajo, en donde se encontrará las propiedades mecánicas de alambres de SMA comerciales a través de un arreglo experimental. Por último, en Mejía *et al.* [5] también se hace mención que se puede alcanzar la posición inicial del manipulador al activar ambos alambres de SMA activando ambos al mismo tiempo.

La presente investigación se inició con la caracterización de los alambres de SMA adquiridos comercialmente a través de un arreglo experimental, lo cual ya se ha hecho en la literatura, pero no se detalla como incorporar sus propiedades en un modelo FEM. Posteriormente, se abordó la tarea de incorporar estas propiedades al software comercial, en donde se empleará ANSYS Mechanical. La siguiente fase involucró la fabricación y análisis del manipulador, donde se incorporó una restricción significativa la cual es que únicamente contará con un segmento y sin subsegmentos. Mas adelante, se presentará el modelado por Elemento Finito (FEM) y el modelo de cuerpo pseudo-rígido 3R del manipulador, primeramente, limitándose a un solo alambre de SMA como medio de accionamiento. Los resultados experimentales de desplazamiento del manipulador se compararon con los modelos de cuerpo pseudo-rígido 3R y FEM.

Lo que distingue esta investigación de trabajos encontrados en la literatura es la evaluación de la factibilidad del uso de alambres de SMA como medio de accionamiento continuo. Este análisis se llevó a cabo desde una perspectiva energética, comenzando con un modelo simple donde dos alambres de SMA se encuentran conectados en serie. Una vez evaluada la factibilidad del empleo de alambres de SMA conectados en serie, se aborda un modelo más complejo que involucra dos alambres de SMA en paralelo montados en el manipulador. Por último, se compararon los resultados de desplazamiento experimentales en el manipulador con dos alambres montados en paralelo con el modelo de cuerpo pseudo-rígido 3R y los modelos FEM.

En el próximo capítulo, se detallará el proceso de caracterización del alambre de SMA y cómo se incorporaron estas propiedades mecánicas a ANSYS Mechanical. Esto con el propósito de incorporar el comportamiento de los alambres de SMA a FEM a través de sus diagramas de esfuerzo-deformación.

Capítulo 2: Caracterización experimental y simulación numérica de alambres de aleación con memoria de forma

En este capítulo se presenta la caracterización del alambre de SMA, la cual consiste en obtener sus propiedades mecánicas. El principal objetivo de conocer las propiedades del alambre de SMA es poder replicar su comportamiento en FEM y de esta forma predecir como se comportará bajo diferentes condiciones. Por otra parte, también se explica el comportamiento del alambre de SMA a diferentes temperaturas, esto debido a que presenta dos fases las cuales dependen de la temperatura. Tal como ya ha mencionado, las dos fases que presenta el alambre de SMA son las fases martensítica y austenítica. La primera fase se encuentra presente normalmente a la temperatura ambiente, mientras que la fase austenítica se encuentra estable a temperaturas más elevadas (cuando se sobrepasa la temperatura de finalización de la fase austenítica). El alambre de SMA cuenta con dos fenómenos que dependen de la temperatura, estos son el efecto de memoria de forma (SME) y pseudo-elasticidad, los cuales son explicados más a detalle a continuación.

2.1 Efecto de memoria de forma y pseudo-elasticidad.

El alambre de SMA presenta el efecto de memoria de forma (SME) y el fenómeno de la pseudo-elasticidad, los cuales se presentan bajo diferentes condiciones térmicas. El efecto de memoria de forma se presenta en la Figura 2.1. En la Figura 2.1a se presenta el ciclo de memoria de forma relacionándolo con sus dos fases (austenita y martensita) y la estructura cristalina de cada una de estas, donde el ciclo de memoria de forma inicia cuando el alambre de SMA este frío, en fase martensítica. Es importante hacer mención que deformar el alambre de SMA es más fácil en esta fase en comparación con la fase austenítica. El siguiente paso consiste en deformar el alambre de SMA en la fase martensítica, cuando el alambre es deformado pasa a ser nombrado como martensita maclada o martensita deformada. Para recuperar su forma original, es necesario calentarlo a una temperatura que se encuentre por encima de la temperatura de finalización de la fase austenítica (A_f), pasando de martensita deformada a austenita, donde recupera su forma inicial o la forma entrenada previamente. Finalmente, el alambre de SMA regresa a la fase martensítica al enfriarse, completando así el ciclo del efecto de memoria de forma (SME). En la Figura 2.1b se presenta el comportamiento del alambre de SMA bajo una prueba uniaxial a través del diagrama de esfuerzo-deformación, donde la primera pendiente corresponde al módulo de elasticidad de la martensita y la segunda a la martensita deformada (deformación plástica).

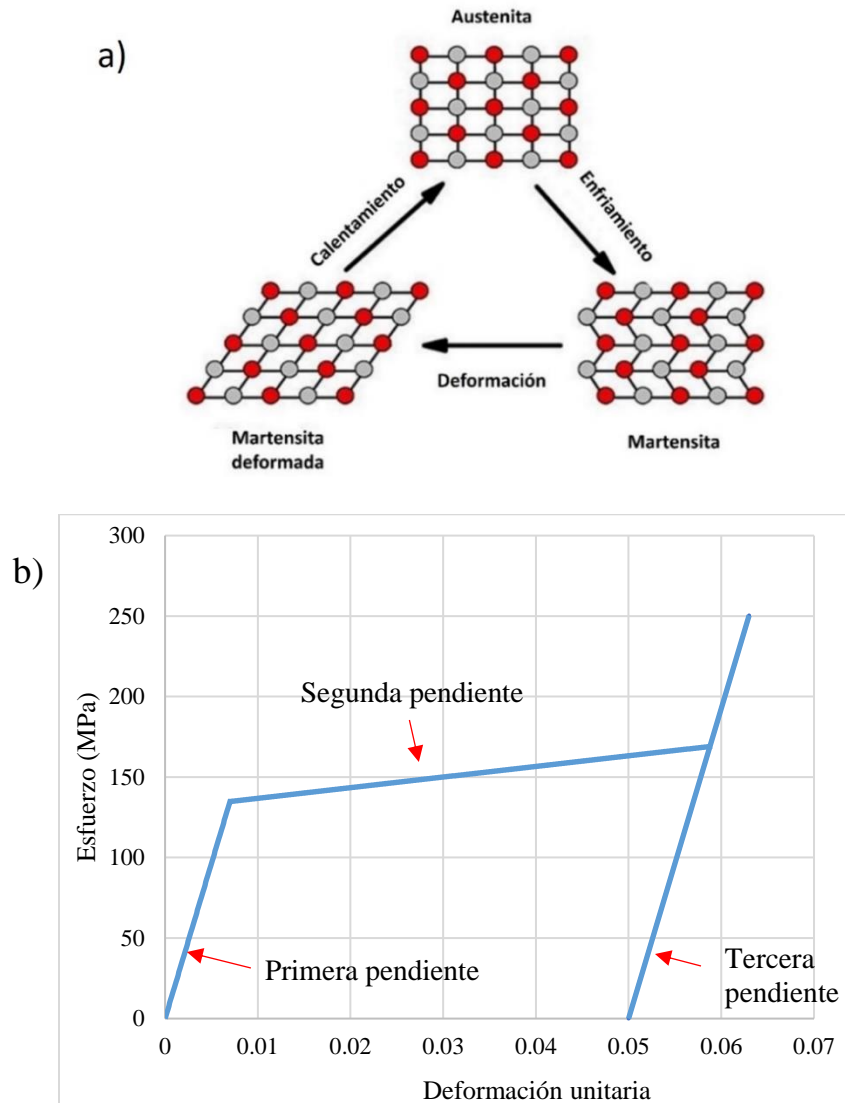


Figura 2. 1: Efecto de memoria de forma (SME), a) ciclo de memoria de forma y b) diagrama esfuerzo-deformación unitaria de prueba uniaxial de alambre SMA.

Además, el alambre de SMA tiene otro comportamiento el cual es conocido como pseudo-elasticidad. Para que este comportamiento se manifieste, es crucial que el alambre de SMA se mantenga a una temperatura superior a la temperatura de finalización de la fase austenítica. Esto implica que la pseudo-elasticidad solo se presenta cuando la fase austenítica está activa. Otra condición relevante es que, bajo este fenómeno, el alambre de SMA experimenta un cambio de fase de austenita a martensita maclada en la segunda pendiente, evidenciada en el diagrama de esfuerzo-deformación en la Figura 2.2. En esta gráfica, se observa claramente el fenómeno de pseudo-elasticidad. La primera pendiente corresponde al módulo de elasticidad de la austenita, mientras que la segunda pendiente representa el módulo tangente, donde se produce el cambio de fase de austenita a martensita deformada. La tercera pendiente señala la descarga del alambre de SMA, durante la cual únicamente está presente la

martensita maclada. Finalmente, la cuarta pendiente indica el cambio de fase de martensita deformada a austenita.

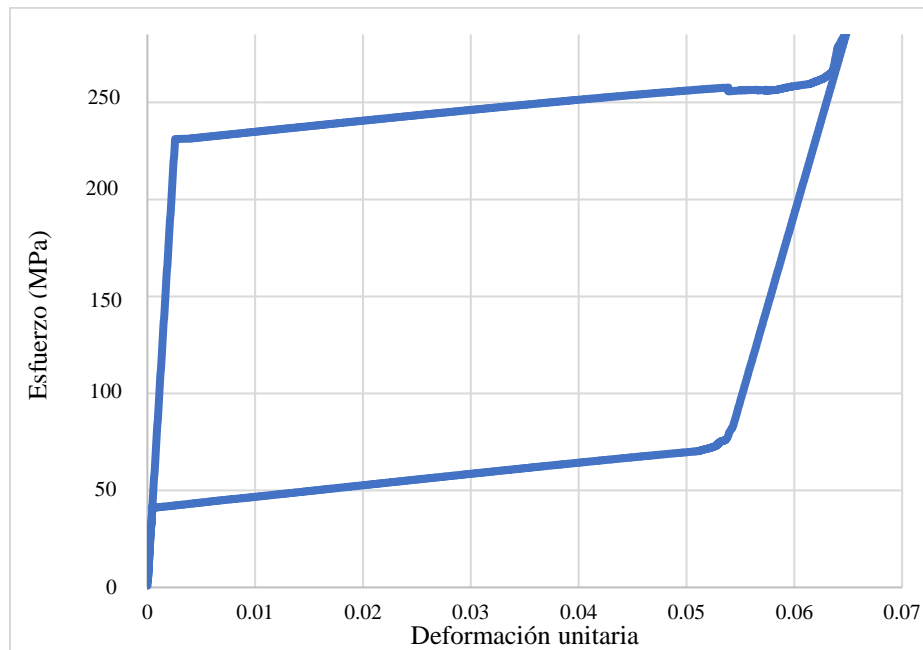


Figura 2. 2: Diagrama esfuerzo-deformación de prueba uniaxial de alambre SMA mostrando el fenómeno de pseudo-elasticidad.

2.2 Caracterización del alambre de SMA

El alambre de SMA que se caracterizó tiene una longitud de 146 mm y un diámetro de 1 mm, es de la aleación de Níquel-Titanio, comúnmente conocida como Nitinol, con una temperatura de finalización de cambio de fase (A_f) de 60°C. El proveedor del alambre de SMA es Nexmetal, el cual únicamente dio como dato la temperatura de finalización de cambio de fase austenítica. Los módulos de elasticidad de ambas fases del material (austenita y martensita) no los otorga el proveedor y debido a esto es requerido caracterizarlos.

Con el propósito de obtener las propiedades mecánicas del alambre de SMA, se diseñó y construyó el arreglo experimental que se observa en la Figura 2.3. Entre los elementos destacados de dicho arreglo experimental, se encuentra el marco de acero estructural, el cual proporciona soporte a los diversos componentes implicados en el proceso. Dos prensas constituyen otro componente, las cuales son encargadas de asegurar ambos extremos del alambre. En el extremo derecho, se integra un dinamómetro (capacidad de 50 kg) que captura la fuerza a la cual se ve sometido el alambre de SMA durante las pruebas. En el extremo opuesto se encuentra sujeto a una superficie móvil, el cual se desplaza a lo largo del marco estructural. La superficie móvil adquiere movimiento debido a la acción de un tornillo que atraviesa su estructura; así, conforme el tornillo se enrosca, ejerce una tensión gradual sobre el alambre.

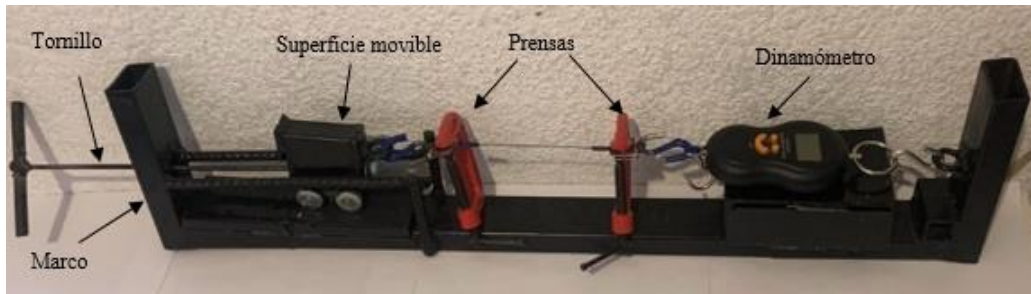


Figura 2. 3: Arreglo experimental para caracterizar alambre de SMA.

Se llevaron a cabo una serie de ensayos a tensión de manera repetitiva, específicamente a temperatura ambiente (20°C), con el objetivo inicial de garantizar la repetibilidad de los resultados obtenidos. Estos ensayos fueron realizados en la zona elástica y plástica de los alambres de SMA, donde se obtuvieron los valores de deformación a través del desplazamiento de prensa a prensa. Se realizaron 10 experimentos donde en cada uno de estos se tomaron 8 puntos de lectura en la zona elástica (Figura 2.4a) y 7 puntos de lectura en la zona plástica (Figura 2.4b), estos puntos representan la relación entre el desplazamiento y la carga que sufre el alambre de SMA. Cada una de las pruebas se desarrolló girando el tornillo hasta la deformación del alambre de SMA correspondiente a cada punto de lectura. Es importante hacer mención que se tuvo un avance de 1×10^{-3} de deformación, lo cual equivale a tener un desplazamiento de 0.146 mm en la zona elástica (Figura 2.4a). Por otra parte, se consideró un avance en la zona plástica (Figura 2.4b) de 5×10^{-3} de deformación, lo cual equivale a tener un avance en desplazamiento de 0.73 mm. Para medir el desplazamiento se hizo uso de un vernier digital con una precisión de 0.01 mm.

En la Figura 2.4a se observan 10 ensayos a tensión, los cuales son destinados a obtener la primera pendiente, que representa el módulo de elasticidad de la fase martensítica. Mientras que, en la Figura 2.4b, se visualiza la segunda pendiente, correspondiente al módulo tangente, la cual se manifiesta cuando está presente la martensita deformada. La captura de la zona plástica en estos ensayos se llevó a cabo con la intención de comprender a profundidad el comportamiento del material en presencia de la martensita maclada.

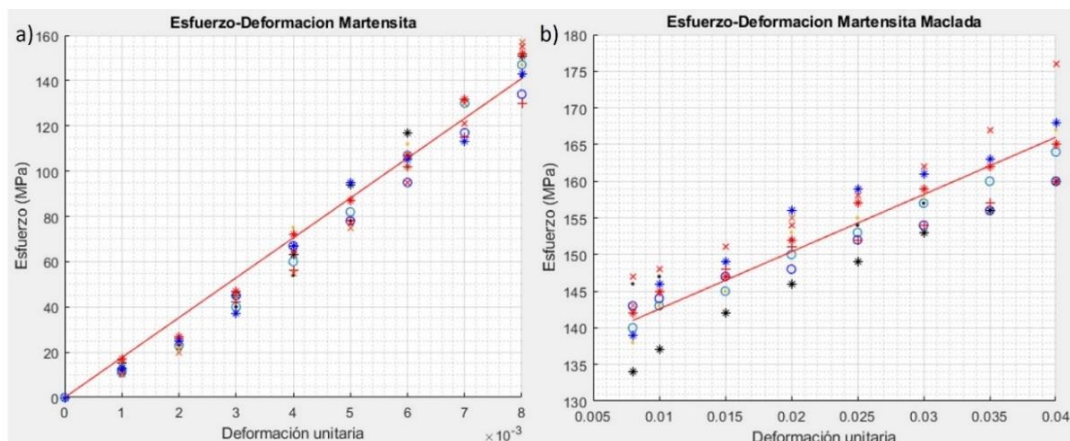


Figura 2. 4: Ensayos a tensión, a) diagrama esfuerzo-deformación unitaria del módulo de elasticidad de la martensita (zona elástica) y b) diagrama esfuerzo-deformación unitaria del módulo tangente (zona plástica).

Los resultados derivados del análisis de regresión lineal de los resultados presentados en la Figura 2.4 se observan en la Figura 2.5. La primera de estas pendientes ilustra la zona elástica del material, mientras que la segunda a la martensita maclada, la cual puede ser identificada como la zona plástica. Estas pendientes, corresponden a los valores del módulo de elasticidad de la martensita (E_M) y el módulo tangente (H) de la martensita maclada, respectivamente.

Los datos que fueron recabados de las pruebas a tensión en estado martensítico que se presentan en la Figura 2.5 son: el módulo de elasticidad de la martensita (E_M), la máxima deformación (ϵ_L) y el módulo tangente (H), los cuales tienen valores de 19.26 GPa, 0.05 y 659.93 MPa, respectivamente. El módulo de elasticidad de la martensita se encuentra a los reportados en la literatura, los cuales pueden variar desde 15 GPa hasta 32.5 GPa, tal como es el caso de [8]. Además, se extrajo el esfuerzo de inicio (σ_s) y fin (σ_f) de la martensita maclada, los cuales son de 134.96 MPa y 165.58 MPa, los cuales se encuentran señalados en la Figura 2.5. Las aleaciones de memoria de forma presentan dos diferentes fases, una de estas es la martensita que se mencionó con anterioridad y la otra es la austenita. La austenita se presenta cuando el alambre se encuentra por encima de la temperatura de transición (A_f), resultando en el fenómeno de pseudo-elasticidad. Este cambio de estructura causa que el alambre deformado, al retirarle la fuerza, recupere su forma original (antes de ser deformado) o bien una geometría entrenada previamente.

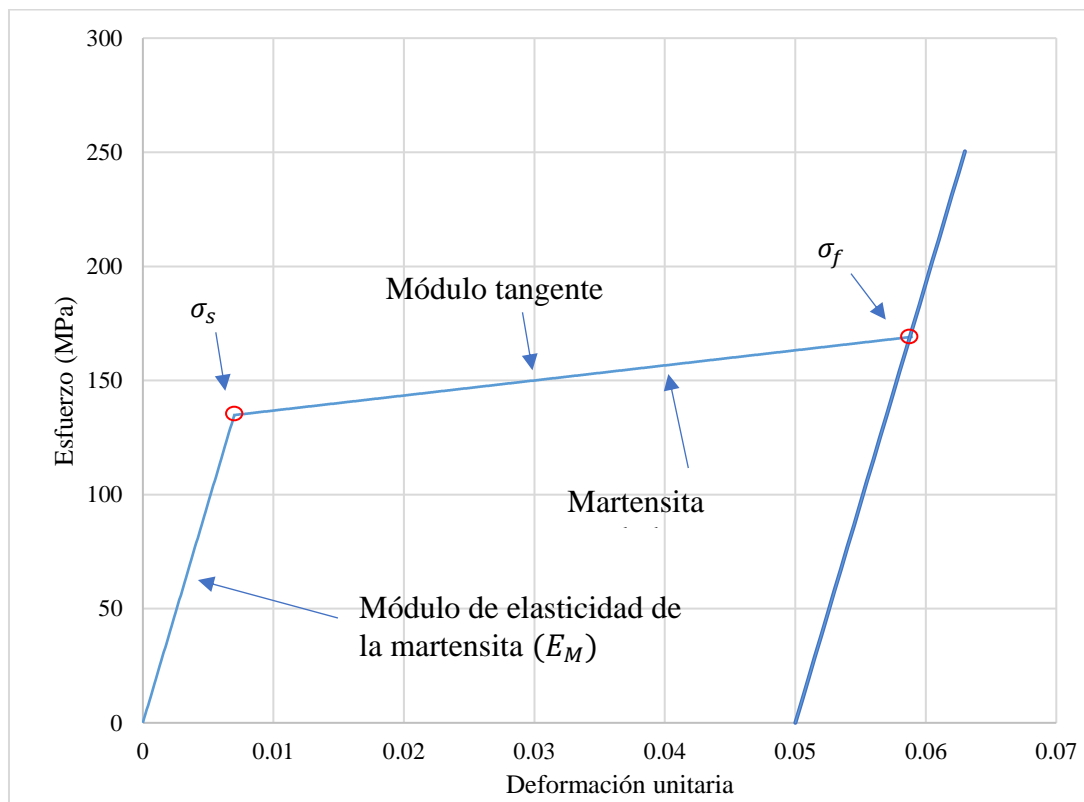


Figura 2. 5: Diagrama esfuerzo-deformación unitaria para alambre de SMA a 20°C.

Para caracterizar la fase austenítica se tuvo que mantener el alambre a una temperatura constante por encima de la temperatura de transición y realizar la prueba a tensión. Es importante hacer mención que para estos ensayos a tensión se mantuvo la temperatura constante a 90°C. Se realizaron 10 experimentos donde en cada uno de estos se tomaron 5 puntos de lectura en la primera pendiente (Figura 2.6a) y 7 puntos de lectura en la segunda pendiente (Figura 2.6b), estos puntos representan la relación entre el desplazamiento y la carga que sufre el alambre de SMA. Cada una de las pruebas se desarrolló girando el tornillo hasta la deformación del alambre de SMA correspondiente a cada punto de lectura. Es importante hacer mención que se tuvo un avance de 1×10^{-3} de deformación, lo cual equivale a tener un desplazamiento de 0.146 mm en la zona elástica (Figura 2.4a) hasta llegar al 0.5% de deformación. Por otra parte, se consideró un avance en la zona plástica (Figura 2.4b) de 5×10^{-3} de deformación, lo cual equivale a tener un avance en desplazamiento de 0.73 mm hasta alcanzar el 4% de deformación.

En la Figura 2.6a se presentan 10 ensayos a tensión que representan únicamente la primera pendiente del diagrama de esfuerzo-deformación, la cual es el módulo de elasticidad de la austenita. Además, en la Figura 2.6b de igual forma se presentan 10 ensayos a tensión los cuales representa la segunda pendiente del diagrama de esfuerzo-deformación, que es conocido como módulo tangente. El resultado de la regresión lineal de las pruebas a tensión se puede observar en la Figura 2.6c, donde la primera pendiente corresponde a la fase austenita, y la segunda pendiente corresponde al cambio de fase de austenítica a martensítica. Es importante hacer notar que la primera pendiente corresponde al módulo de elasticidad de la austenita (E_A), mientras que la segunda pendiente corresponde al cambio de fase (módulo tangente). Otro detalle a prestar atención es que el cambio de fase será de la fase austenítica a martensita maclada.

De las pruebas, uno de los datos que se obtuvo es el módulo de elasticidad de la austenita (E_A), este siendo la primera pendiente y teniendo un valor de 45.44 GPa, la cual se señala en la Figura 2.6c. Otro de los datos que se extrajo es el módulo tangente (H), la cual corresponda a la segunda pendiente en el diagrama de la Figura 2.5 y de la Figura 2.6c, con valor de 659.93 MPa, el cual representa en ambos casos el módulo de la martensita maclada. Las propiedades extraídas de los ensayos a tensión de las Figuras 2.5 y 2.6c se encuentran en la Tabla 2.1. Los datos que se presentan son los módulos de elasticidad para las dos fases del material, y la temperatura de finalización de la fase austenítica (A_f), está última siendo proporcionada por el proveedor del material. Además, se presenta el módulo tangente (H), la máxima deformación residual (ε_L) y el esfuerzo de inicio (σ_s) y fin (σ_f) de la martensita maclada.

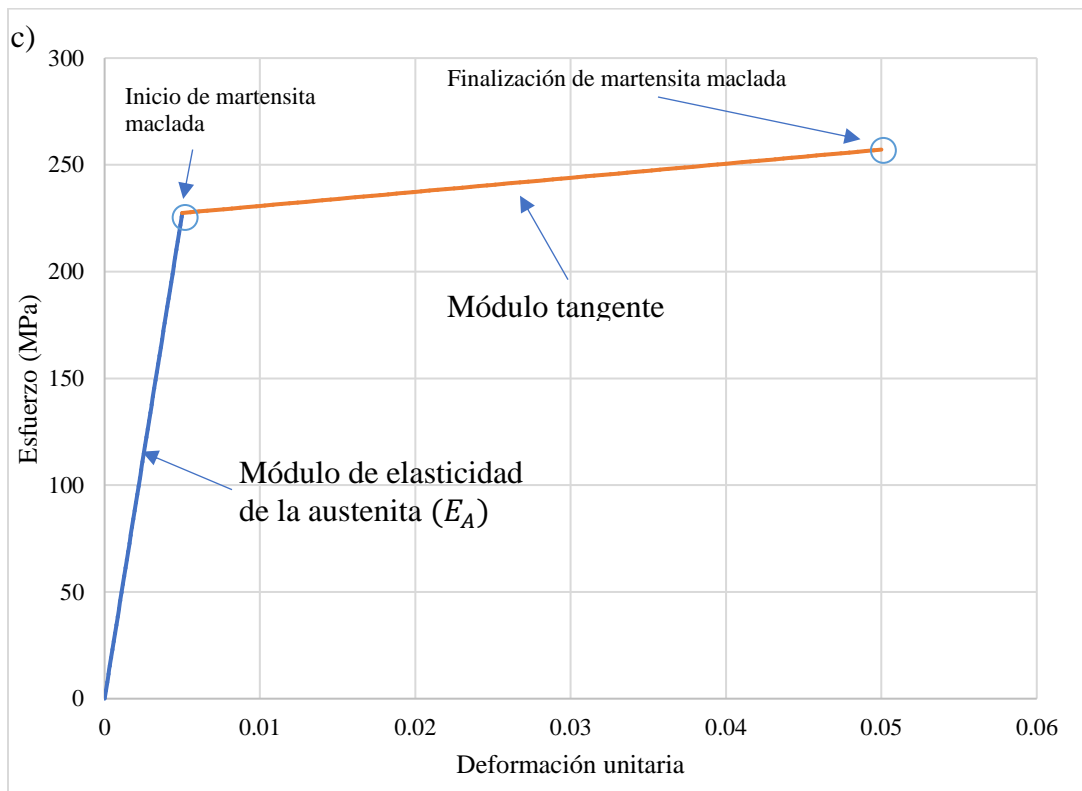
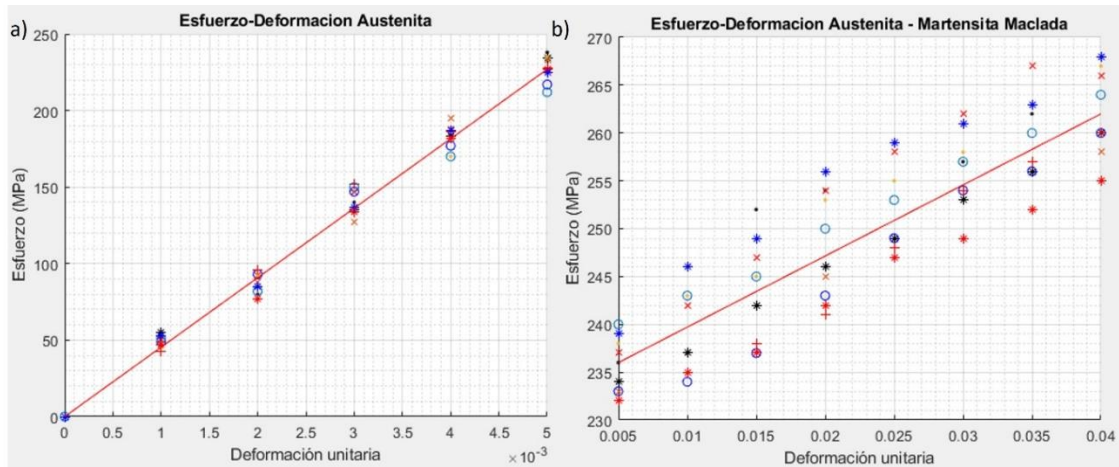


Figura 2. 6: Ensayos a tensión, a) diagrama esfuerzo-deformación unitaria del módulo de elasticidad de la austenita, b) diagrama esfuerzo-deformación unitaria del módulo tangencial (austenita – martensita maclada) y c) diagrama de esfuerzo-deformación unitaria para alambre de SMA a 90°C.

Tabla 2. 1 – Propiedades del alambre de SMA.

Esfuerzo crítico de inicio de martensita maclada (σ_s)	134.96 MPa
Esfuerzo crítico de finalización de martensita maclada (σ_f)	165.58 MPa
Módulo de elasticidad de la martensita (E_M)	19.26 GPa
Módulo de elasticidad de la fase austenítica (E_A)	45.44 GPa
Módulo tangente (H)	659.93 MPa
Temperatura de finalización de la fase austenítica (A_f)	60 °C
Máxima deformación residual (ε_L)	0.05

2.3 Modelo FEM de alambre de SMA.

El modelo del manipulador hizo uso de las propiedades que se observan en la Tabla 2.1 para el alambre de SMA. El modelo FEM fue desarrollado en ANSYS Mechanical, dentro del cual se hizo uso del modelo constitutivo de Souza-Auricchio. El modelo de Souza-Auricchio hace uso de esfuerzos para lograr los cambios de fase y la temperatura de finalización de la fase austenítica. Algunos de los valores requeridos se presentan en la Tabla 2.1, tal como el módulo tangente (H), el cual representa la segunda pendiente que se observa en los diagramas de esfuerzo-deformación. La temperatura de referencia (T_{ref}) será aquella temperatura a la que se realizó el ensayo a tensión. Además, se deberá de considerar el límite elástico o de cedencia (R), el cual es la primera pendiente del diagrama de esfuerzo-deformación de la Figura 2.5, así como el parámetro de escalamiento de temperatura (C), el cual representa el endurecimiento que sufre el material en función de la temperatura. El parámetro C está relacionado con el límite elástico (R) y con el esfuerzo de inicio de la martensita maclada (σ_s) que se solicita en el modelo del material, y la relación se presenta a través de la siguiente ecuación [15].

$$\sqrt{\frac{3}{2}} [C(T - T_{ref}) + R] = \sigma_s \quad (3)$$

Si se considera que la temperatura a la que se llevará a cabo la simulación es la misma que la temperatura de referencia, se podrá eliminar el parámetro de escalamiento. Se consideró que la temperatura de referencia (T_{ref}) y la temperatura de simulación (T) es la misma de 20°C ($T_{ref} = T$), por lo que se eliminará el parámetro de escalamiento y resulta un límite de elástico (R) con valor de 110.19 MPa.

Por otra parte, el parámetro de endurecimiento (C) se puede calcular mediante los datos extraídos de los ensayos a tensión realizados, empleando los esfuerzos correspondientes al inicio y fin de la martensita maclada, identificados en el diagrama esfuerzo-deformación a temperaturas de 20°C y 90°C (Figura 2.5 y Figura 2.6c). En la Figura 2.7c, se distinguen

cuatro pendientes, siendo las de tonalidad azul y naranja representativas de las pendientes C_M , que describen el comportamiento de la martensita en distintas condiciones térmicas. La pendiente C_M (pendiente naranja) se obtuvo calculando la pendiente con respecto a dos puntos, tomando dos temperaturas y sus correspondientes esfuerzos de inicio de la martensita maclada, resultando un valor de 1.43 MPa/°C, ver Figura 2.7a. Este valor de pendiente también se comparte con la que representa los esfuerzos de fin de martensita maclada (pendiente azul), es importante hacer mención que estos valores de esfuerzo ya habían sido encontrados con anterioridad en los ensayos a tensión anteriormente mostrados (Figura 2.5 y Figura 2.6c).

La pendiente C_A se consideró igual a la pendiente C_M , esto debido al modelo que incorpora ANSYS Mechanical. Para poder conocer la posición de la pendiente C_A se hizo uso de un dato del proveedor del material, la cual es la temperatura de finalización de la fase austenítica (A_f) que tiene un valor de 60°C y debido a esto la pendiente C_A (pendiente amarilla), deberá cruzar por esa posición cuando los esfuerzos son igual a 0, lo cual se puede observar en la Figura 2.7b. La pendiente C_A anteriormente mencionada es la que representa el esfuerzo cuando se completó el cambio de fase de martensita maclada a austenita. Por último, para encontrar la segunda pendiente C_A (pendiente gris), que describe los esfuerzos de inicio del cambio de fase de martensita maclada a austenita, se hace uso de una suposición del modelo que incorpora ANSYS Mechanical, en donde considera que la diferencia entre el esfuerzo de inicio y fin del cambio de fase de martensita maclada a austenita debe de ser constante. Lo anteriormente mencionado también se aplica para las dos pendientes C_M , en donde ya se conoce esa diferencia, por lo que únicamente aplicando esa diferencia a los esfuerzos que se presentan en la primera pendiente C_A (pendiente amarilla) se podrá encontrar la segunda pendiente C_A (pendiente gris) que representa los esfuerzos de inicio de cambio de fase de martensita maclada a austenita. Las pendientes C_A se observan en la Figura 2.7c, las cuales están representadas con el color amarillo y gris, estas indicando el comportamiento del alambre de SMA para el cambio de fase de martensita maclada a austenita.

Es crucial señalar que, debido al modelo utilizado, se efectúa una idealización donde C_A es equivalente a C_M . La pendiente resultante de esta consideración tiene un valor de 1.43 MPa/°C, proporcionando así una pendiente que relaciona el cambio en los esfuerzos de cambio de fase con respecto a la variación de temperatura.

El diagrama de la Figura 2.7c está directamente relacionado con los esfuerzos experimentados por el alambre de Nitinol, y esta conexión se exhibe de manera explícita en la Figura 2.8. En la Figura 2.8a se presenta la relación correspondiente a la fase martensítica, donde las primeras y segundas pendientes (marcadas en azul y naranja en el diagrama de esfuerzo-temperatura) representan las transiciones asociadas a la martensita, específicamente los puntos de inicio y finalización de la martensita maclada. Es relevante destacar que, al realizar un ensayo a tensión a temperatura constante, se podrán identificar los esfuerzos de cambio de fase en el diagrama esfuerzo-temperatura, el cual está relacionado con el diagrama esfuerzo-deformación.

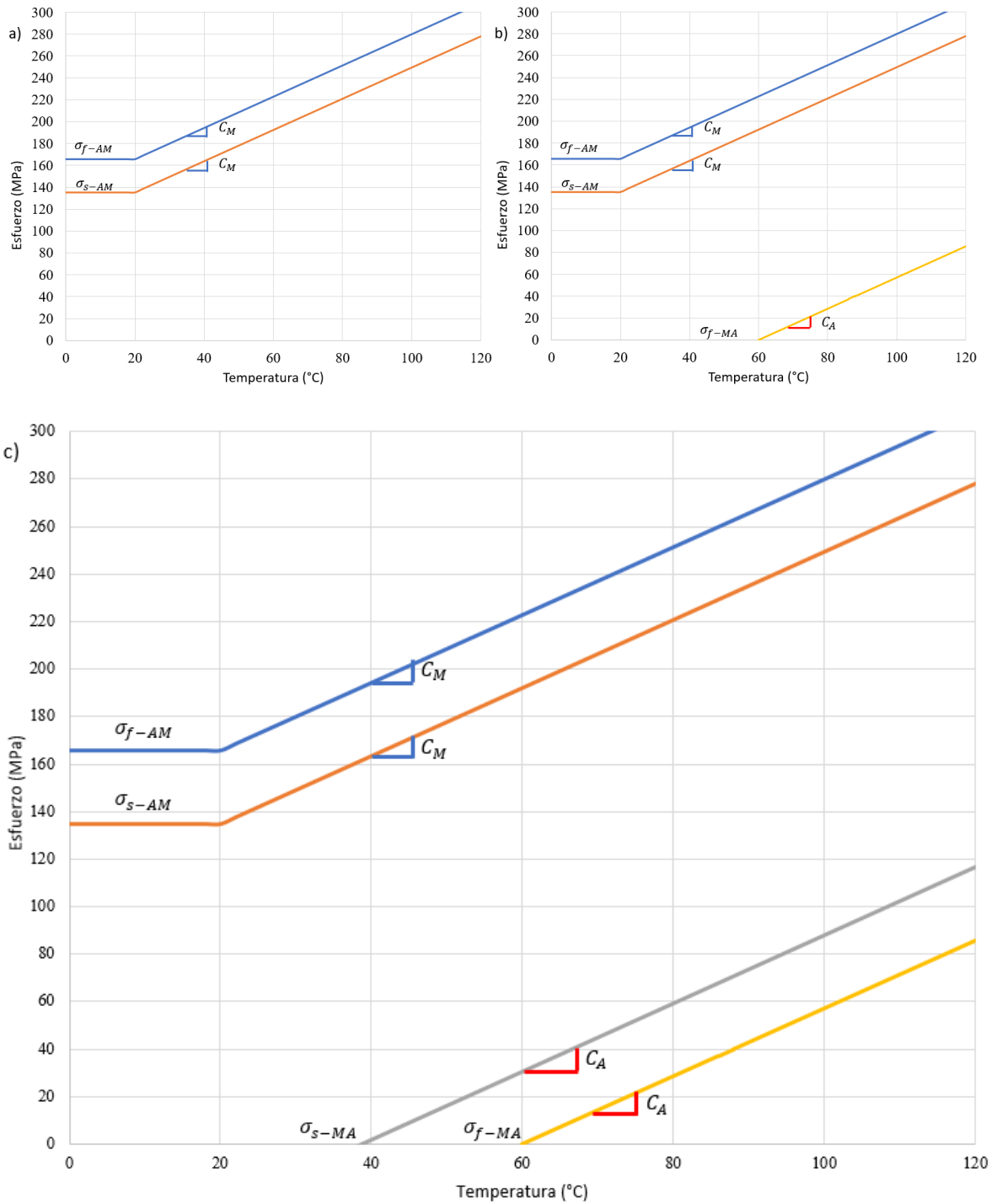


Figura 2. 7: Diagrama esfuerzo-temperatura para el alambre de SMA a) pendientes C_M , b) pendiente C_A y c) pendientes C_A .

En la Figura 2.8b el alambre de Nitinol se encuentra a 90°C, donde se manifiesta una histéresis evidente, indicativa del fenómeno de pseudo-elasticidad. Por otra parte, en la Figura 2.8b se lleva a cabo una comparativa de los esfuerzos de cambio de fase en el diagrama esfuerzo-deformación y esfuerzo-temperatura, los cuales se pueden identificar como los

puntos de cambio de pendiente. Los dos puntos más elevados señalan el cambio de fase de austenita a martensita maclada. El primer punto (228 MPa), marcando el inicio del cambio de fase austenítica a martensítica maclada (σ_{S-AM}), se evidencia en el cambio de pendiente. El segundo punto (261 MPa) representa la finalización del cambio de fase de austenita a martensita maclada (σ_{f-AM}), indicando la presencia exclusiva de martensita maclada. El tercer punto (75.8 MPa) refleja el inicio del cambio de fase de martensita maclada a austenita (σ_{S-MA}) en la parte inferior de la histéresis (descarga), y el último punto (41.3 MPa) denota la finalización del cambio de fase, donde únicamente está presente la fase austenítica (σ_{f-MA}).

Estos cuatro puntos se relacionan con el diagrama esfuerzo-temperatura como se muestra en la Figura 2.8b. Considerando una temperatura de 90°C, al ingresar al diagrama de esfuerzo-temperatura, la primera pendiente de izquierda a derecha (azul) representa el esfuerzo de finalización de la fase martensítica maclada. La segunda pendiente (naranja) señala el inicio de la fase martensítica maclada, la tercera pendiente (gris) indica el inicio de la fase austenítica durante la transición de martensita maclada a austenita, y finalmente, la cuarta pendiente (amarilla) representa la finalización del cambio de fase de martensita maclada a austenita, indicando exclusivamente la presencia de la fase austenítica.

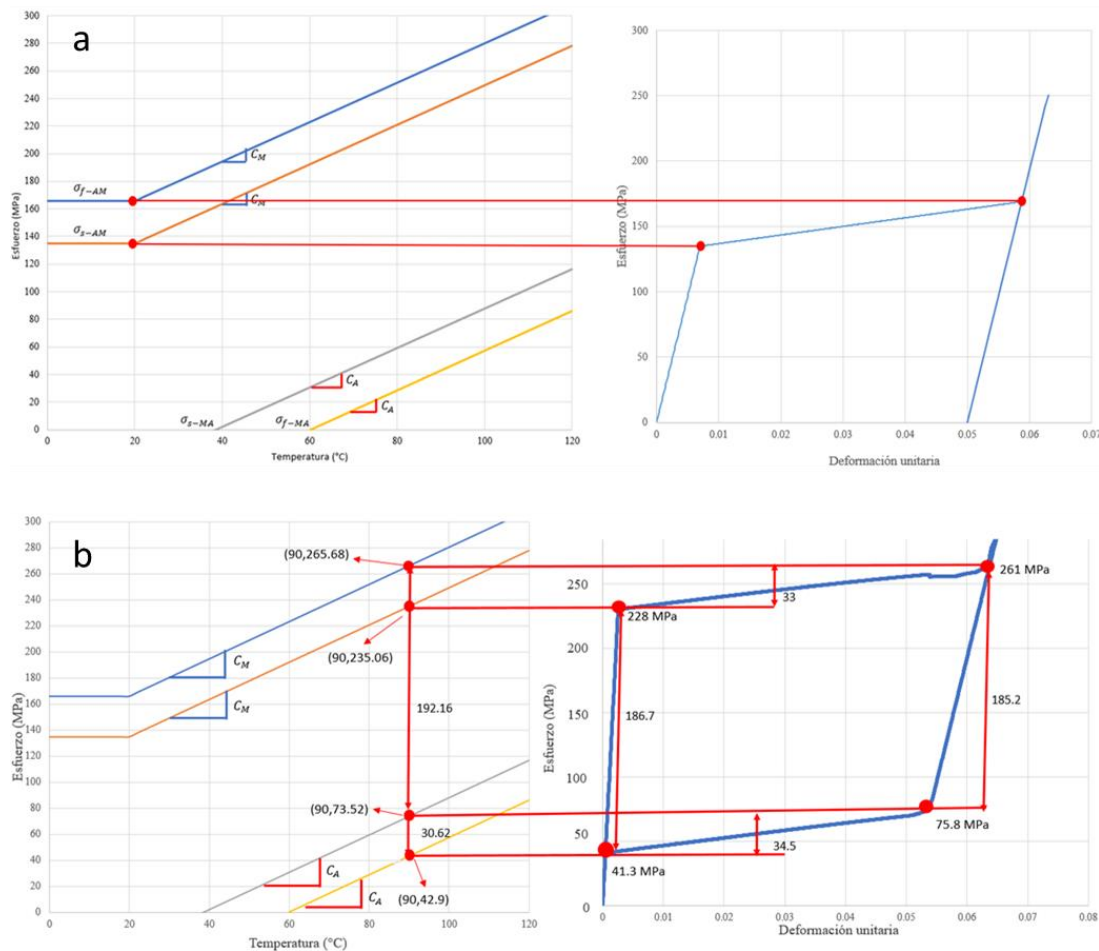


Figura 2. 8: Diagrama esfuerzo-temperatura y esfuerzo-deformación, a) 20°C y b) 90°C.

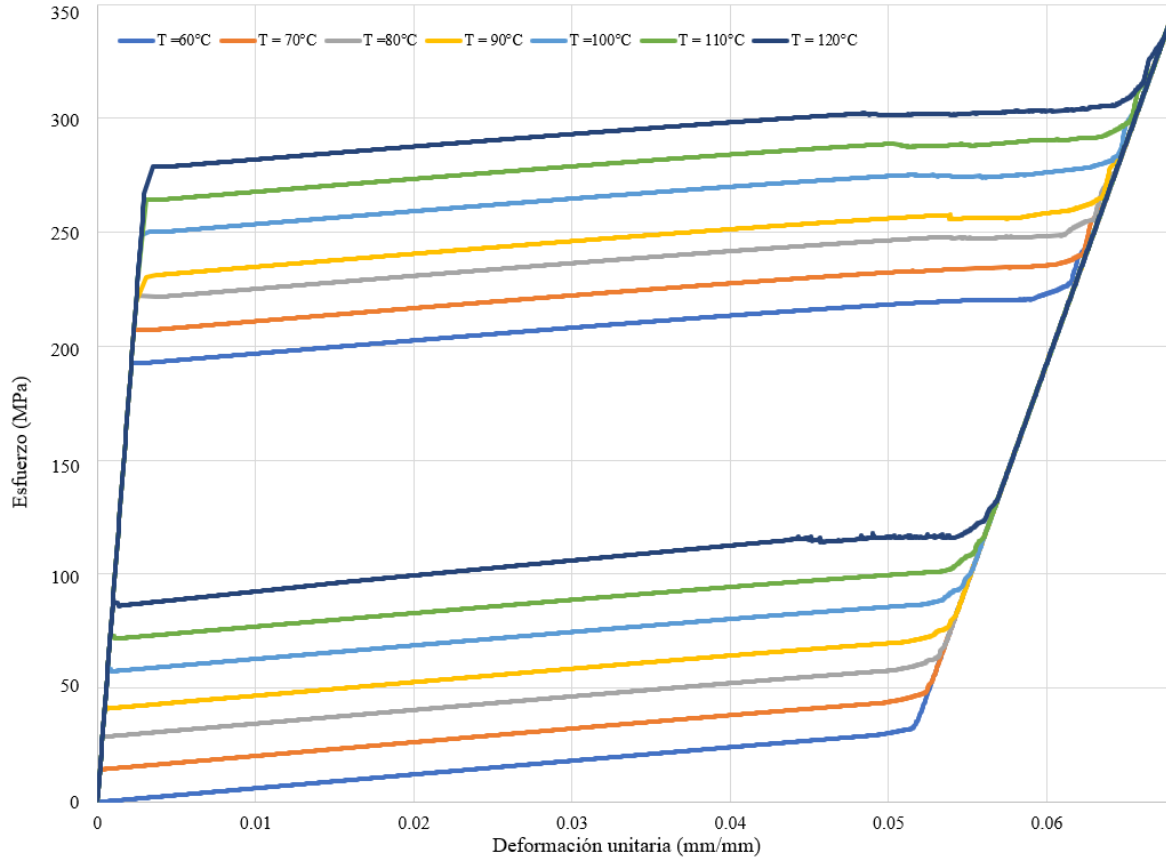


Figura 2. 9: Diagramas esfuerzo-deformación variando la temperatura.

Un aspecto importante por notar en el diagrama de esfuerzo-temperatura es la notable tendencia de incremento en los esfuerzos requeridos para llevar a cabo el cambio de fase a medida que la temperatura se eleva, fenómeno claramente evidenciado en la Figura 2.9. Por otra parte, tal como se comentará más adelante, resulta beneficioso que se eleven los esfuerzos para realizar los cambios de fase, esto debido a que la energía de deformación ira incrementando, lo cual más adelante se analizará.

En la Figura 2.9 se presentan los diagramas de esfuerzo-deformación derivados de los ensayos a tensión en FEM realizados en un rango de temperaturas desde 60°C hasta 120°C. Es importante destacar que todas estas temperaturas se sitúan por encima de la temperatura de finalización de la fase austenítica, provocando así la manifestación del fenómeno de pseudo-elasticidad.

Por último, el modelo FEM solicita la máxima deformación para transformación del material ($\bar{\epsilon}_L$), la cual se obtiene a través de ϵ_L y el empleo de la ecuación (4). El parámetro $\bar{\epsilon}_L$ tendrá un valor de 0.061 [12].

$$\epsilon_L = \sqrt{\frac{2}{3}} \bar{\epsilon}_L \quad (4)$$

Los datos ingresados en el software para modelar la prueba a tensión del alambre se pueden observar en la Tabla 2.2.

Tabla 2. 2 – Propiedades del alambre de SMA para modelado en ANSYS.

Módulo de elasticidad de la martensita (E_M)	19.26 GPa
Módulo de elasticidad de la fase austenítica (E_A)	45.44 GPa
Temperatura de finalización de la fase austenítica (A_f)	60 °C
Módulo tangencial (H)	659.93 MPa
Temperatura de referencia (T_{ref})	20 °C
Parámetro de escalamiento de temperatura (C)	1.43 MPa/°C
Limite elástico (R)	110.19 MPa
Máxima deformación residual (ϵ_L)	0.061

En la Figura 2.10 se observa el diagrama esfuerzo-deformación unitaria del alambre SMA, donde la línea roja corresponde al ensayo a tensión en ANSYS y la línea azul corresponde a los datos de la regresión lineal experimental presentado con anterioridad. La temperatura a la que se llevó a cabo el ensayo para ambos casos fue a 20°C, con lo cual la pendiente de carga y descarga corresponden a martensita.

2.4 Fuerza de accionamiento de alambre de SMA.

La caracterización de la fuerza del alambre de SMA siguió un método similar al utilizado para conocer las propiedades mecánicas en sus diversas fases. Para medir la fuerza de accionamiento, se implementó un arreglo experimental específico, el cual se puede observar en la Figura 2.11. En este diseño, se colocaron prensas en ambos extremos, estableciéndolas como condiciones de frontera fijas, y se conectó el alambre de SMA en serie con un resorte.

La elección de este arreglo experimental en lugar del presentado en la Figura 2.3 se asocia con el dinamómetro, que proporcionaba resultados inexactos al aplicar corriente al alambre de SMA, esta limitación se atribuye al aislamiento eléctrico. Dada esta situación, no resultó fiable el uso del dinamómetro para caracterizar la fuerza del alambre. El diseño alternativo para caracterizar la fuerza del alambre de SMA se presenta en la Figura 2.11.

Antes de poder caracterizar la fuerza de accionamiento del alambre, se requirió determinar la constante del resorte, para lo cual se hizo uso del arreglo experimental de la Figura 2.11. Es importante mencionar que en lugar de tener el alambre de SMA que se observa en la Figura 2.11 se colocó una carga conocida en el extremo del resorte. En este proceso, se aplicó una fuerza constante al resorte y se midió el desplazamiento. Los resultados de esta serie de 15 ensayos se observan en la Tabla 2.3.

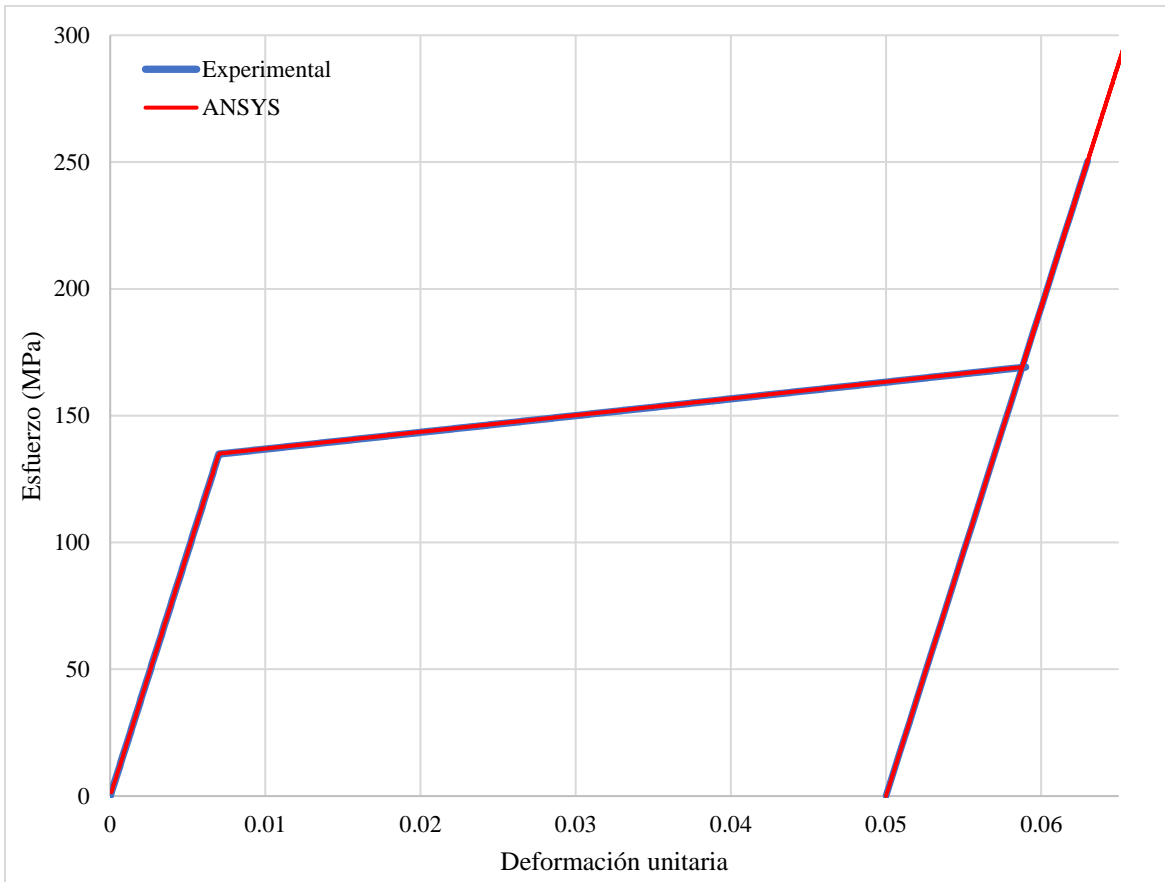


Figura 2. 10: Diagrama esfuerzo-deformación unitaria para alambre de SMA por FEM y experimental a 20°C.



Figura 2. 11: Arreglo experimental.

La constante del resorte es en promedio de 0.2672 N/mm. Con esta información, se procedió a pre-deformar el alambre SMA en un 2% de su longitud inicial mediante el arreglo experimental de la Figura 2.3. Una vez pre-deformado el alambre, éste se ubicó en el arreglo experimental de la Figura 2.11, y se activó. La activación del alambre provoca que el resorte se estirara, procediendo a medir la deformación de éste. De esta manera, con la deformación del resorte y su constante de rigidez, se obtuvo la fuerza necesaria para lograr dicho desplazamiento, resultando así la fuerza de accionamiento ejercida por el alambre SMA. En total, se llevaron a cabo 35 pruebas, y algunos de los resultados se detallan en la Tabla 2.4, donde se obtuvo una fuerza promedio del alambre de SMA de 0.5122 N.

Tabla 2. 3 - Caracterización de la constante del resorte

Prueba	Desplazamiento (mm)	Fuerza (N)	K (N/mm)
1	7.73	1.962	0.2538
2	7.37	1.962	0.2662
3	6.95	1.962	0.2823
4	6.89	1.962	0.2848
5	7.54	1.962	0.2602
6	6.83	1.962	0.2873
7	7.21	1.962	0.2721
8	7.35	1.962	0.2669
9	7.36	1.962	0.2666
10	7.24	1.962	0.2710
11	7.47	1.962	0.2627
12	7.44	1.962	0.2637
13	7.6	1.962	0.2582
14	7.81	1.962	0.2512
15	7.53	1.962	0.2606
Promedio			0.2672

Tabla 2. 4 - Fuerza de alambre

Prueba	Deformación (mm)	K (N/mm)	F (N)
1	1.93	0.2672	0.5156
2	1.92	0.2672	0.5130
3	1.86	0.2672	0.4969
4	1.88	0.2672	0.5023
5	1.95	0.2672	0.5210
6	1.88	0.2672	0.5023
7	1.98	0.2672	0.5290
8	1.99	0.2672	0.5317
9	1.86	0.2672	0.4969
10	1.92	0.2672	0.5130
Promedio			0.5122

De esta forma se concluyó con la caracterización del material, la cual será útil con la finalidad de modelar su comportamiento en conjunto con la estructura del manipulador. Esto se presentará en el siguiente capítulo donde en un principio se trabajará únicamente con un alambre de SMA como medio de accionamiento. Por otra parte, se presentarán diferentes alternativas para modelar el manipulador, donde se comparan los resultados de

desplazamiento con los experimentales. Por último, se analizará como influyen los parámetros geométricos del manipulador en el desplazamiento de este.

Capítulo 3: Modelado, simulación numérica y experimentación de un manipulador flexible accionado por un alambre de aleación con memoria de forma

En este capítulo, se exploran diversos métodos para modelar un manipulador accionado por un alambre de SMA. El primer modelo se realizó empleando FEM e incorpora el alambre de SMA en la geometría del manipulador, donde el comportamiento altamente no lineal del alambre provoca que se tenga un elevado costo computacional. Se presentan dos modelos adicionales con el objetivo de reducir dicho costo sin sacrificar significativamente los resultados de desplazamiento. Estos modelos no incorporan el alambre de SMA, en lugar de éste emplean la fuerza necesaria para alcanzar la posición final del manipulador. Dichos modelos incluyen el modelo de cuerpo pseudo-rígido 3R y un modelo en FEM que se basan únicamente en una carga dirigida.

A continuación, se introduce inicialmente el modelo FEM que incorpora la aleación con memoria de forma, detallando las condiciones de frontera y los resultados de desplazamiento del manipulador. Posteriormente, se presentan los dos modelos restantes, seguidos de una comparativa de los resultados de desplazamiento entre los diferentes modelos. Más adelante, se aborda el análisis del diseño y la fabricación del manipulador, explorando cómo los parámetros geométricos afectan el desplazamiento. Finalmente, se lleva a cabo la fabricación y experimentación con el manipulador accionado por un alambre de SMA, comparando los resultados de desplazamiento obtenidos con los tres diferentes modelos.

3.1 Modelado FEM del manipulador accionado por alambres de SMA

Después de caracterizar el alambre de SMA mediante FEM, se avanzó hacia la construcción de la estructura del manipulador. La estructura del manipulador se presenta en la Figura 3.1, donde las estructuras laterales serán nombradas discos laterales, la estructura central es el eje central y el alambre de SMA se ensamblará en la parte superior o inferior. Es importante hacer mención que en este capítulo aún se estará trabajando con un alambre de SMA en la parte superior.

Las dimensiones del manipulador se detallan en la Tabla 3.1, seleccionadas inicialmente debido a que se consideran pertinentes para su fabricación y portabilidad. Posteriormente, se llevará a cabo un análisis donde se evaluará como afectan los parámetros geométricos del manipulador al desplazamiento.

Se optó por emplear aluminio 6061 para el eje central y acero estructural para los discos laterales. El acero estructural utilizado en los discos laterales se seleccionó para prevenir deformaciones debidas a las cargas a las que son sometidos. Por otro lado, se eligió el aluminio 6061 para el eje central con el propósito de proporcionar rigidez y movilidad al manipulador, permitiendo su flexión en caso de que el alambre de SMA se encuentre activo. Para obtener el módulo de elasticidad del aluminio 6061 se sometió a una muestra de viga en voladizo sometido a flexión, teniendo como variable conocida el desplazamiento máximo y

la carga, donde únicamente se despejo el módulo de elasticidad. La viga deformada y el peso (2.40 N) al que se encontró sometido se puede observar en la Figura 3.2. Por otra parte, es importante hacer mención que la muestra de aluminio 6061 que se observa en la Figura 3.2 tiene un espesor de 0.8 mm, un ancho de 80 mm y un largo de 132 mm.

Tabla 3. 1 – Medidas del manipulador.

Espesor de disco (t_{disco})	3 mm
Diámetro de disco (D_{disco})	82 mm
Excentricidad (h)	40 mm
Espesor de eje central (t)	0.8 mm
Ancho de eje central (A_{eje})	40 mm
Longitud de superficie de agarre (L_{agarre})	3 mm
Longitud de segmento (L)	150 mm
Ancho de superficie de agarre (A_{sup})	40 mm

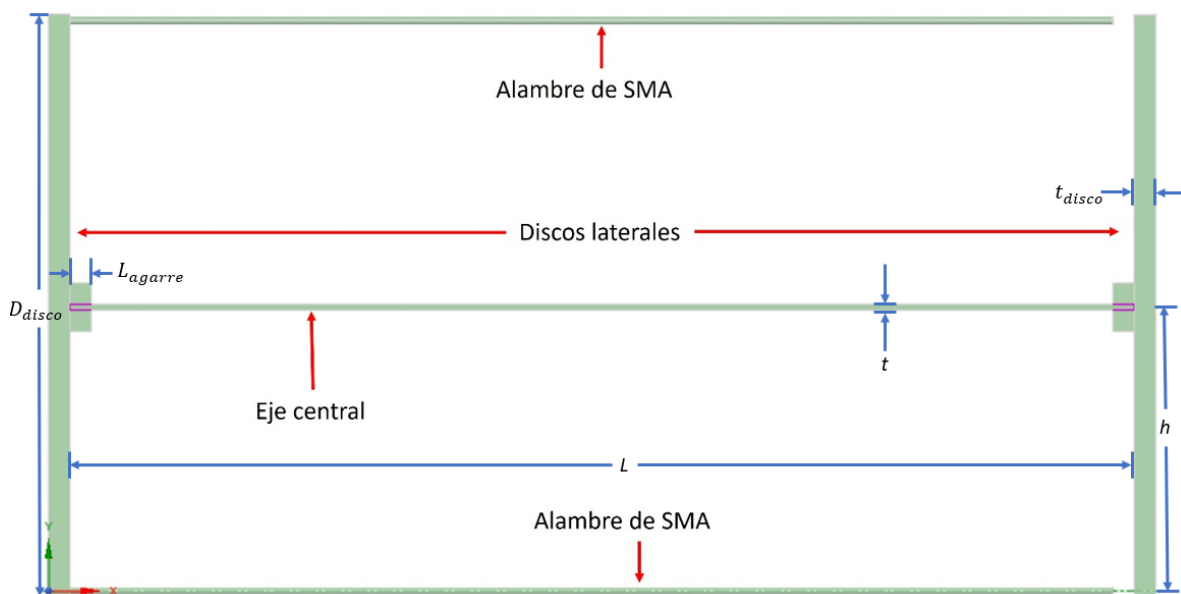


Figura 3. 1: Manipulador.



Figura 3. 2: Viga sometida a carga conocida para caracterizar el módulo de elasticidad del eje central.

El módulo de elasticidad que dio como resultado de estos experimentos es de 77.1 GPa, el cual se encuentra cercano a los que se pueden encontrar en la literatura, los cuales rondan entre 65 y 75 GPa. Las propiedades de estos componentes se presentan en la Tabla 3.2.

Tabla 3. 2 – Propiedades de diversos elementos del manipulador.

Módulo de elasticidad de discos laterales (E_{disco})	200 GPa
Módulo de elasticidad del eje central ($E_{eje\ central}$)	77.1 GPa
Coefficiente de Poisson de discos laterales	0.3
Coefficiente de Poisson del eje central	0.33

El alambre de SMA se fijó en la parte superior de la estructura del manipulador, ubicándolo entre ambos discos y pre-deformado al 2% de su longitud inicial. Es relevante señalar que las propiedades del alambre de SMA permanecen constantes a lo largo de este trabajo. Inicialmente, el alambre se encuentra a temperatura ambiente (20°C) en fase martensítica para después de ser pre-deformado pasara a martensita maclada o deformada. Para activar el manipulador, el alambre se somete a un aumento de temperatura, provocando el cambio de fase de martensita maclada a austenita. Esto hace que el alambre busque recuperar su forma inicial, generando una fuerza en el extremo superior derecho de la estructura y provocando flexión en la parte central del manipulador.

Un punto importante por tomar en cuenta es que se hizo uso de un análisis estático para el modelado del manipulador. Además, el modelo que se presenta en la Figura 3.3 es 3D. La finalidad de hacer uso de un modelo 3D es colocar en el centro del manipulador el alambre de SMA y poder variar el ancho del eje central sin afectar la geometría del alambre de SMA. Otro punto por tomar en cuenta es que el contacto que se realiza conforme avanza la simulación es un contacto “bonded”, el cual implica que ninguna de las dos superficies (extremo libre del alambre de SMA y disco lateral libre) se puedan separar [16]. El contacto entre el alambre de SMA y el disco lateral libre es activado y desactivado con una herramienta

que integra ANSYS Mechanical, la cual lleva por nombre “contact step control”. La herramienta “contact step control” permite definir si el contacto se encuentra en estado activo o inactivo en función de periodos de tiempo de la simulación. Los demás contactos que forman parte de la simulación se hizo uso de contactos “bonded” y no hacen uso de la herramienta “contact step control”. Por otra parte, en la sección de configuración de análisis del software es necesario activar en controles de no-linealidades que las matrices Newton Raphson sean no simétricas, lo cual tiene la función de facilitar la convergencia de la simulación. Lo anteriormente mencionado es una recomendación de ANSYS cuando se hace uso de aleaciones con memoria de forma. Por último, es importante hacer mención de que no se consideró el peso de los componentes (discos laterales, alambre de SMA y eje central) que forman parte del manipulador.

La secuencia experimental de ensamblaje y accionamiento del manipulador consiste en un principio en pre-deformar el alambre de SMA a un 2% de su longitud inicial. Una vez pre-deformado el alambre de SMA, se procede a realizar el ensamblaje del alambre de SMA con el manipulador. Por último, se debe de elevar la temperatura del alambre de SMA hasta sobrepasar la temperatura A_f , lo cual genera que se flexione la parte central del manipulador. La secuencia en la simulación FEM es diferente a la experimental. La secuencia en el modelo FEM (Figura 3.3) es la siguiente:

1. Realizar CAD, contactos “bonded” y definir condiciones de frontera.
 - a. Contactos “bonded” entre eje central y discos laterales.
 - b. Disco lateral izquierdo con condición de frontera fija.
 - c. Extremo lateral izquierdo de alambre de SMA fijo.
2. Aplicar desplazamiento al alambre de SMA y estructura con la finalidad de pre-deformar el alambre de SMA, donde se debe de considerar la recuperación elástica del material.
 - a. Desplazamiento en X a disco lateral derecho.
 - b. Desplazamiento en X en el extremo lateral derecho del alambre de SMA.
 - c. Activar contacto “bonded” con la herramienta “contact step control” entre alambre de SMA y disco lateral derecho.
3. Desactivar desplazamiento a la estructura y el alambre de SMA, esto con la finalidad de que únicamente prevalezca el pre-deformado del alambre de SMA.
4. Elevar la temperatura del alambre de SMA por encima de la temperatura de finalización de la fase austenítica ($A_f=60^\circ\text{C}$).

Los resultados de esta activación se ilustran en la Figura 3.4a. Además, la Figura 3.4b muestra las condiciones de frontera a las que se somete el manipulador, con un extremo del alambre y el disco izquierdo fijos. Asimismo, el otro extremo del alambre de SMA se fija al disco lateral derecho durante la simulación mediante un contacto que puede activarse o desactivarse según sea necesario. En la Figura 3.4a se puede observar como la viga central se flexiona debido a la activación del alambre de SMA, teniendo el desplazamiento más significativo en el disco libre. El desplazamiento que tiene el disco derecho (Figura 3.3b) en la parte superior tiene un valor en X de -3.04 mm y en Y de 5.54 mm.

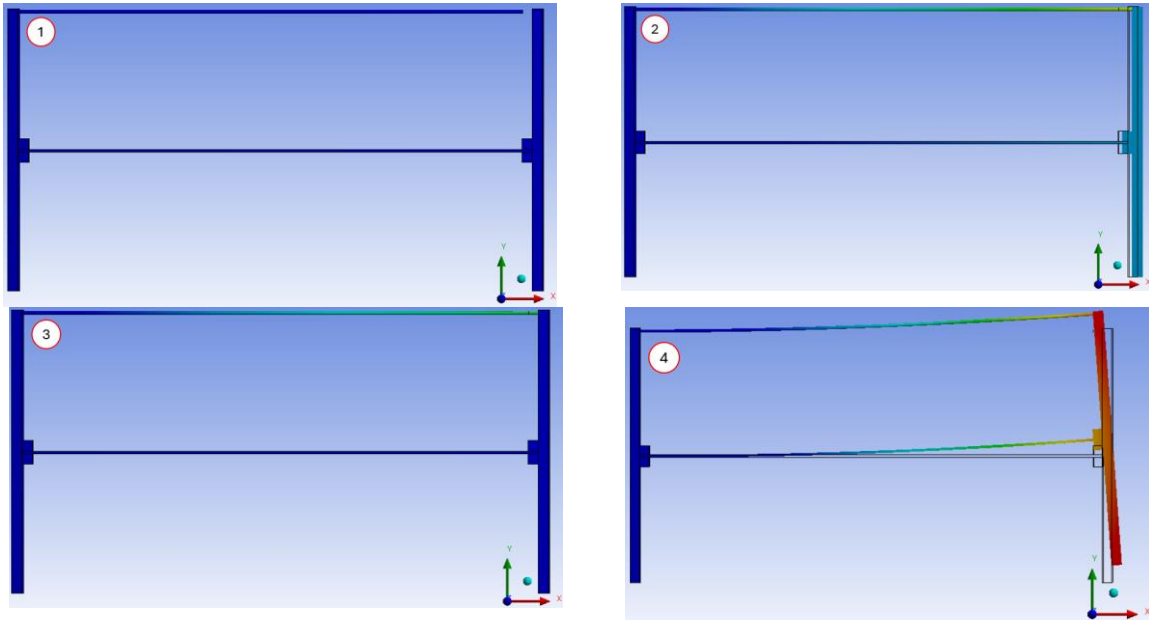


Figura 3. 3: Secuencia de simulación FEM para un manipulador con un alambre de SMA.

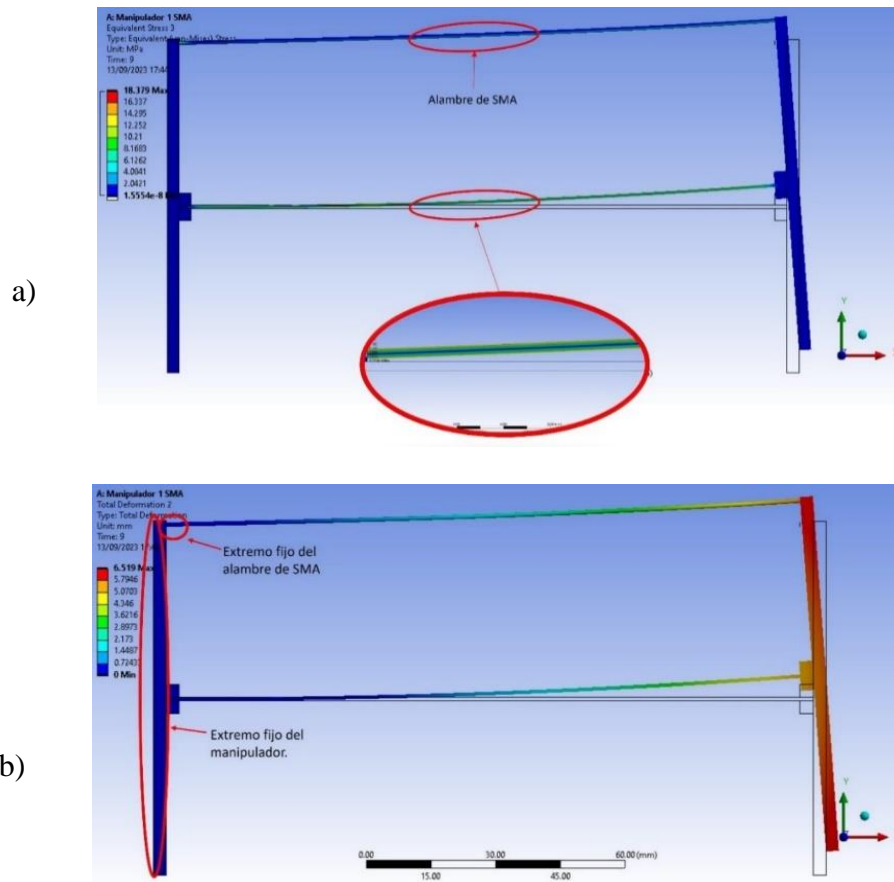


Figura 3. 4: Manipulador con un alambre de SMA, a) esfuerzos en el manipulador una vez que el alambre de SMA está activo, b) desplazamiento del manipulador una vez que el alambre de SMA está activo.

Por otra parte, el eje central tendrá la mayor cantidad de esfuerzo (Figura 3.4a) debido a que este se está flexionando, resultando en que la cara superior se esté comprimiendo y la inferior tensando, obteniendo un esfuerzo máximo en la viga central de 18.37 MPa. Por último, se extrajo la fuerza de reacción del alambre de SMA de su parte fija, que se marca con un círculo en la Figura 3.4b. La fuerza obtenida tiene una magnitud de 1.5334 N, la cual corresponde a la fuerza de equilibrio del manipulador, está siendo empleada en los modelos que se presentan a continuación. La fuerza anteriormente mencionada fue extraída del post-procesamiento de los resultados empleando la herramienta “force reaction”.

3.2 Modelado del manipulador a través del modelo de cuerpo pseudo-rígido 3R.

El modelo de cuerpo pseudo-rígido con 3 uniones de revoluta (3R-PRBM) fue desarrollado por Su [17], donde la deformación del eje se aproxima como una cadena cinemática de cuatro eslabones rígidos, tres juntas y tres resortes de torsión. El modelo se observa en la Figura 3.5, donde $\theta_1, \theta_2, \theta_3$ son los ángulos de deflexión de cada eslabón con respecto al anterior, y k_1, k_2, k_3 es la rigidez de los resortes.

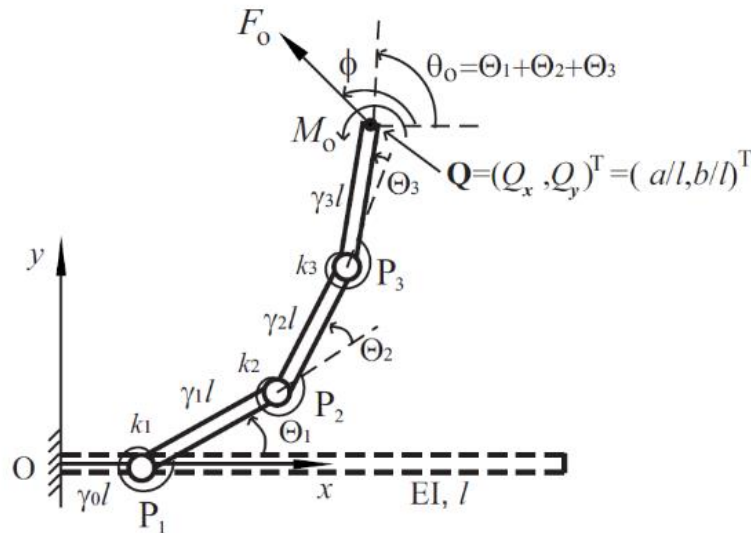


Figura 3. 5: Modelo de cuerpo pseudo-rígido para una viga en cantiléver [17].

Las relaciones de longitud $\gamma_0, \gamma_1, \gamma_2$ y γ_3 que se observan en la Figura 3.5 deben de cumplir con la ecuación (5).

$$\gamma_0 + \gamma_1 + \gamma_2 + \gamma_3 = 1 \quad (5)$$

En la Tabla 3.3 se presentan las relaciones de longitud y los valores de rigidez óptimas para el mejor ajuste al modelo teórico de deflexión de la punta en una viga bajo carga combinada de fuerza y momento, estas siendo propuestas por [17].

Tabla 3. 3 – Relaciones de longitud y valores de rigidez óptimos.

γ_0	0.1
γ_1	0.35
γ_2	0.4
γ_3	0.15
k_1	$3.51EI/l$
k_2	$2.99 EI/l$
k_3	$2.58 EI/l$

La posición de la punta es expresada como Q , que son definidas con las ecuaciones (6) – (8). La ecuación (9) es la suma de los ángulos de deflexión de cada eslabón, el cual da como resultado el valor de θ_0 .

$$Q = (Q_x, Q_y)^T = \left(\frac{a}{l}, \frac{b}{l}\right)^T \quad (6)$$

$$Q_x = \gamma_0 + \gamma_1 c_1 + \gamma_2 c_{12} + \gamma_3 c_{123} \quad (7)$$

$$Q_y = \gamma_1 s_1 + \gamma_2 s_{12} + \gamma_3 s_{123} \quad (8)$$

$$\theta_0 = \theta_1 + \theta_2 + \theta_3 \quad (9)$$

En estas ecuaciones, $c_1 = \cos(\theta_1)$, $s_1 = \sin(\theta_1)$, $c_{12} = \cos(\theta_1 + \theta_2)$, $s_{12} = \sin(\theta_1 + \theta_2)$, $c_{123} = \cos(\theta_1 + \theta_2 + \theta_3)$, $s_{123} = \sin(\theta_1 + \theta_2 + \theta_3)$. Los valores de $\theta_1, \theta_2, \theta_3$ se pueden conocer cuando se tiene una carga externa aplicada empleando la ecuación (9). En la ecuación (10) la fuerza se representa con sus componentes F_x y F_y , mientras que M_0 representa el momento aplicado. Además, τ_1, τ_2, τ_3 son los torques en los resortes de torsión,

$$\begin{Bmatrix} \tau_1 \\ \tau_2 \\ \tau_3 \end{Bmatrix} = [J^T] \begin{Bmatrix} F_x l \\ F_y l \\ M_0 \end{Bmatrix} \quad (10)$$

donde la matriz de $[J^T]$ se calcula de la siguiente forma:

$$[J^T] = \begin{bmatrix} -\gamma_1 s_1 - \gamma_2 s_{12} - \gamma_3 s_{123} & \gamma_1 c_1 + \gamma_2 c_{12} + \gamma_3 c_{123} & 1 \\ -\gamma_2 s_{12} - \gamma_3 s_{123} & \gamma_2 c_{12} + \gamma_3 c_{123} & 1 \\ -\gamma_3 s_{123} & \gamma_3 c_{123} & 1 \end{bmatrix} \quad (11)$$

Además, los torques en los resortes de torsión se pueden obtener con la ecuación (12):

$$\tau_i = k_{\theta i} \left(\frac{EI}{l} \right) \theta_i, \quad i = 1, 2, 3 \quad (12)$$

De lo anterior resulta un sistema no lineal, donde se podrán conocer los valores de los ángulos de deflexión de los eslabones de la siguiente manera:

$$[J^T] \begin{Bmatrix} F_x l \\ F_y l \\ M_0 \end{Bmatrix} - \begin{Bmatrix} k_1 \left(\frac{EI}{l} \right) \theta_1 \\ k_2 \left(\frac{EI}{l} \right) \theta_2 \\ k_3 \left(\frac{EI}{l} \right) \theta_3 \end{Bmatrix} = 0 \quad (13)$$

Para modelar el manipulador se deberá de emplear el modelo de cuerpo pseudo-rígido (3R-PRBM) modificado para la solución de segmentos del manipulador. Este trabajo únicamente soluciona un segmento con un alambre de SMA en la parte superior. El modelo modificado por Huang [1] se puede observar en la Figura 3.6.

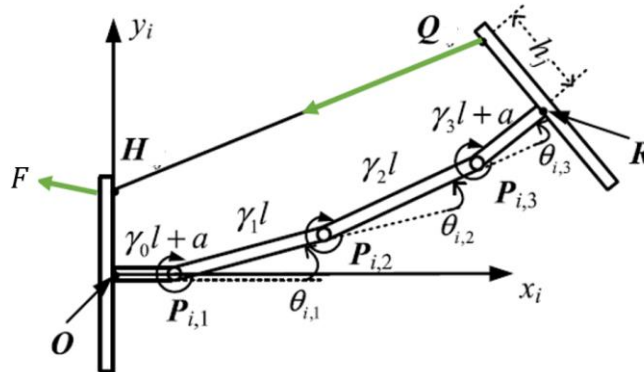


Figura 3. 6: Fuerza de un alambre de SMA en un subsegmento analizado a través de 3R-PRBM [4].

En este modelo, Q y H son los orificios distal y proximal del segmento, P_i es la posición de cada resorte de torsión en el segmento, R es el punto de conexión entre el eje central y el segundo disco acoplador, O es el origen del segundo subsegmento y θ_i es el ángulo de deflexión de cada uno de los resortes. La fuerza F (Figura 3.6) hace referencia a la fuerza, que tiene dirección hacia la parte inferior del segmento, la cual es resaltada con color verde [4]. Las longitudes de cada eslabón considerando la parte fija del eje central por el soporte de los discos se pueden expresar con las ecuaciones (14) – (17) [1].

$$l_0 = \gamma_0 l + a \quad (14)$$

$$l_1 = \gamma_1 l \quad (15)$$

$$l_2 = \gamma_2 l \quad (16)$$

$$l_3 = \gamma_3 l + a \quad (17)$$

La dirección de la carga que ejerce el alambre de SMA es denotado por p_i^j , que puede ser representada como un vector unitario de Q a H , como se muestra en la ecuación (18).

$$p = \frac{H - Q}{\|H - Q\|} \quad (18)$$

El punto Q se tendrá que dejar en función de los ángulos θ_1, θ_2 y θ_3 , donde $\theta_0 = \theta_1 + \theta_2 + \theta_3$. El ángulo θ se pueden observar en la Figura 3.7, que representa la suma de los ángulos de deflexión de cada eslabón una vez aplicada la carga.

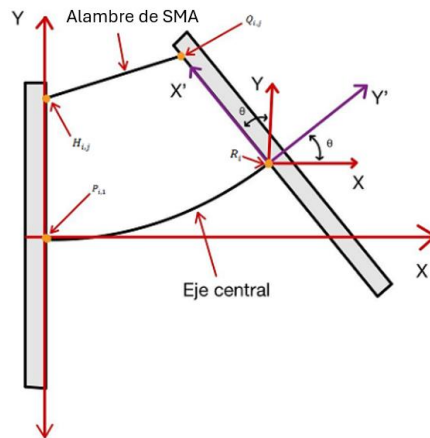


Figura 3. 7: Segmento del manipulador con un alambre de SMA una vez activado.

La posición de cada resorte de torsión y la posición $Q_{i,j}$ se puede calcular de la siguiente forma:

$$P_1 = [l_0, 0] \quad (19)$$

$$P_2 = [P_{1,x} + l_1 \cos C_1, P_{1,y} + l_1 \sin C_1] \quad (20)$$

$$P_3 = [P_{2,x} + l_2 \cos C_2, P_{2,y} + l_2 \sin C_2] \quad (21)$$

$$R = [P_{3,x} + l_3 \cos C_3, P_{3,y} + l_3 \sin C_3] \quad (22)$$

$$Q_{i,j} = [R_x + h_j \cos \theta_1 + \theta_2 + \theta_3 + 90, R_y + h_j \sin \theta_1 + \theta_2 + \theta_3 + 90] \quad (23)$$

El momento de accionamiento de cada resorte de torsión se puede obtener de la siguiente forma:

$$M_i = Fx(P_i - Q) \quad (24)$$

donde los momentos en los resortes de torsión son proporcionales a los ángulos de deflexión que se obtienen con el modelo pseudo-rígido 3R. Además, los valores de $\theta_{i,k}$ se pueden determinar de la siguiente forma:

$$k_k \theta_{i,k} = F \times (P_i - Q) \quad (25)$$

Considerando la cinemática del manipulador, las matrices de transformación homogénea (únicamente para un segmento) son consideradas de la siguiente forma:

$$T_i = T_0 T_1 T_2 T_3 T_4 \quad (26)$$

donde T_i es la matriz de transformación de O a P_1 , T_1 es la matriz de transformación de P_1 a P_2 , T_2 es la matriz de transformación de P_2 a P_3 , T_3 es la matriz de transformación de P_3 a R , y T_4 es la matriz de transformación de R a O_{i+1} . La matriz T_i es calculada de la siguiente forma:

$$T_i = \begin{bmatrix} \cos \theta_{i,j} & -\sin \theta_{i,j} & 0 & \Gamma_j \cos \theta_{i,j} \\ \sin \theta_{i,j} & \cos \theta_{i,j} & 0 & \Gamma_j \sin \theta_{i,j} \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (27)$$

donde $\theta_{i,0} = \theta_{i,4} = 0$, $\Gamma_0 = \gamma_0 l + a$, $\Gamma_1 = \gamma_1 l$, $\Gamma_2 = \gamma_2 l$, $\Gamma_3 = \gamma_3 l + a$ y $\Gamma_4 = t$. Las posiciones de cada punto del manipulador se pueden calcular por medio de los ángulos de deflexión haciendo uso de T_i , logrando así definir la configuración del manipulador. El manipulador por modelar tiene las mismas dimensiones del presentado con anterioridad en la Tabla 3.1. Los resultados del modelo 3R-PRBM se muestran en la Figura 3.8, donde la carga se aplica en la parte superior derecha. La carga que se aplicó es la extraída del modelo FEM que cuenta con el alambre de SMA, que tiene una magnitud de 1.53 N. La Figura 3.8a muestra el desplazamiento de la estructura conforme se está aplicando la carga hasta alcanzar su posición final, la cual no toma en consideración el espesor de los discos, sino únicamente muestra el perfil de movimiento de la estructura. Por otra parte, la Figura 3.8b muestra el manipulador en su posición final. Los resultados obtenidos de desplazamiento de la parte superior derecha de la estructura son -3.25 mm en X y 5.63 mm en Y. Realizando una comparativa con respecto a los resultados del modelo FEM que cuenta con el alambre de SMA que tiene desplazamientos de -3.04 mm en X y 5.53 mm en Y, se tienen errores menores al 7%. Más adelante se presentará más a detalle un análisis con respecto a estos resultados. Lo más relevante de hacer uso de este modelo es el tiempo computacional, esto dado que la simulación que cuenta con el alambre de SMA tomó un tiempo de 2.009 horas, mientras que el modelo de cuerpo pseudo-rígido 3R tomó solamente 5.78 segundos, estos siendo realizados en el mismo equipo. El tiempo computacional tomado por el modelo de cuerpo pseudo-rígido es 1251 veces menor que el del modelo FEM que cuenta con el alambre de SMA.

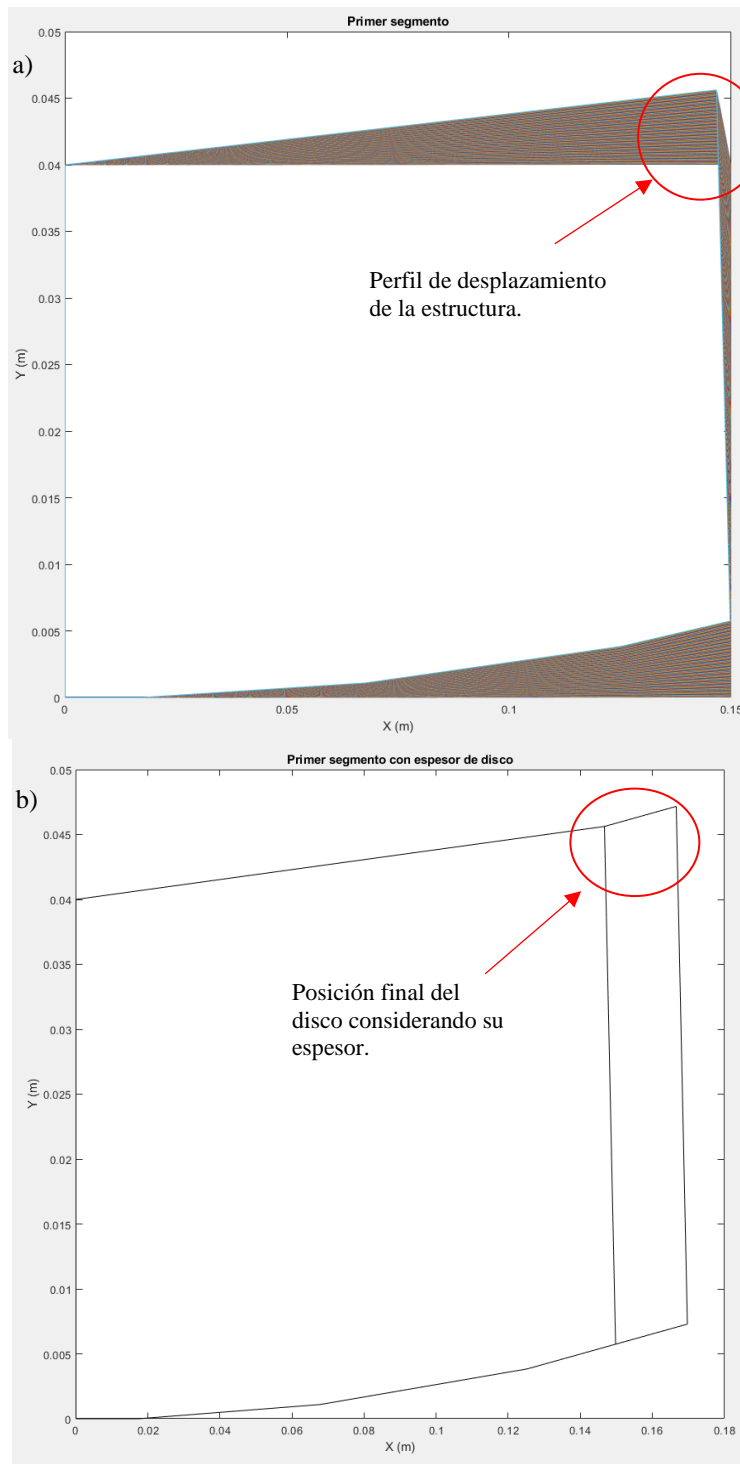


Figura 3. 8: Manipulador con un alambre de SMA por 3R-PRBM, a) desplazamiento del segmento conforme se aplica la carga y b) manipulador de un segmento colocado en su posición final.

3.3 Modelado del manipulador incorporando fuerza de equilibrio en FEM.

El modelo presentado a continuación hace uso de una fuerza dirigida de disco a disco dentro de ANSYS, el cual mantiene la misma geometría del manipulador antes presentado, la diferencia es que este modelo no incluye el alambre SMA para el accionamiento. En el modelo se considerará la fuerza necesaria para que el manipulador permanezca en equilibrio cuando el alambre se encuentre en estado activo (fase austenítica). La carga que se aplicó es la misma que se empleó para el modelo de cuerpo pseudo-rígido 3R (1.5334 N). La fuerza estará dirigida a través de un vector unitario, que siempre estará apuntando de la parte superior del disco derecho a la parte superior del disco izquierdo que se mantiene fijo.

Un punto importante por tomar en cuenta es que se hizo uso de un análisis estático. Además, el modelo que se presenta en la Figura 3.9 es 3D. La finalidad de hacer uso de un modelo 3D es que la fuerza aplicada es colocada en el centro de la línea que corresponde al ancho del disco lateral. La fuerza aplicada en el extremo libre del disco lateral libre siempre estará apuntando al centro de la línea que corresponde al ancho del disco lateral fijo. Otro punto por tomar en cuenta en la simulación es que se hizo uso de la sección de automatización en la parte de consola. En la consola fue colocado un código que fue desarrollado en Python (Anexo A.2), donde se aplica la carga conforme avanza la simulación. Es importante mencionar que en la simulación no fue requerido modificar alguna sección de no-linealidades del software. Los contactos que forman parte de la simulación son contactos “bonded” y no hacen uso de la herramienta “contact step control” que anteriormente fue empleada en el modelo FEM con el alambre de SMA.

La posición del disco derecho se obtiene a través del desplazamiento que sufre conforme se aplica la carga, donde se calcula un vector unitario que cuenta con la dirección de la fuerza. Además, la carga se aplica en función de una cierta cantidad de pasos (definida por el usuario), esta siendo aplicada en fracciones de la fuerza hasta lograr la magnitud indicada en un principio. Los resultados obtenidos se observan en la Figura 3.9. La Figura 3.9a muestra el manipulador desplazado, obteniendo el mayor desplazamiento en el disco derecho, posición donde se aplica la carga. La Figura 3.9b presenta los resultados de esfuerzo, donde el mayor esfuerzo se presenta en la parte central del manipulador, debido a la flexión resultante. El eje central tiene esfuerzos en la cara superior e inferior de 15.73 MPa. Además, en los discos se presentan los valores mínimos de esfuerzo de 1.53 Pa. Por otra parte, en el extremo superior del disco derecho se tiene un desplazamiento en X de -3.12 mm y en Y de 5.67 mm. Los resultados de desplazamiento están cercanos a los desplazamientos que sufre el manipulador cuando se incluye el alambre de SMA, donde los resultados de desplazamiento en X y Y son de -3.04 y 5.54 mm. Recordemos que el tiempo computacional de la simulación del modelo que cuenta con el alambre de SMA es de 2.009 horas, mientras que ahora con el modelo que no lo incorpora es de 172.01 segundos. El tiempo computacional de este modelo que no incorpora el alambre de SMA en su estructura es 41.18 veces menor que el del modelo que cuenta con este.

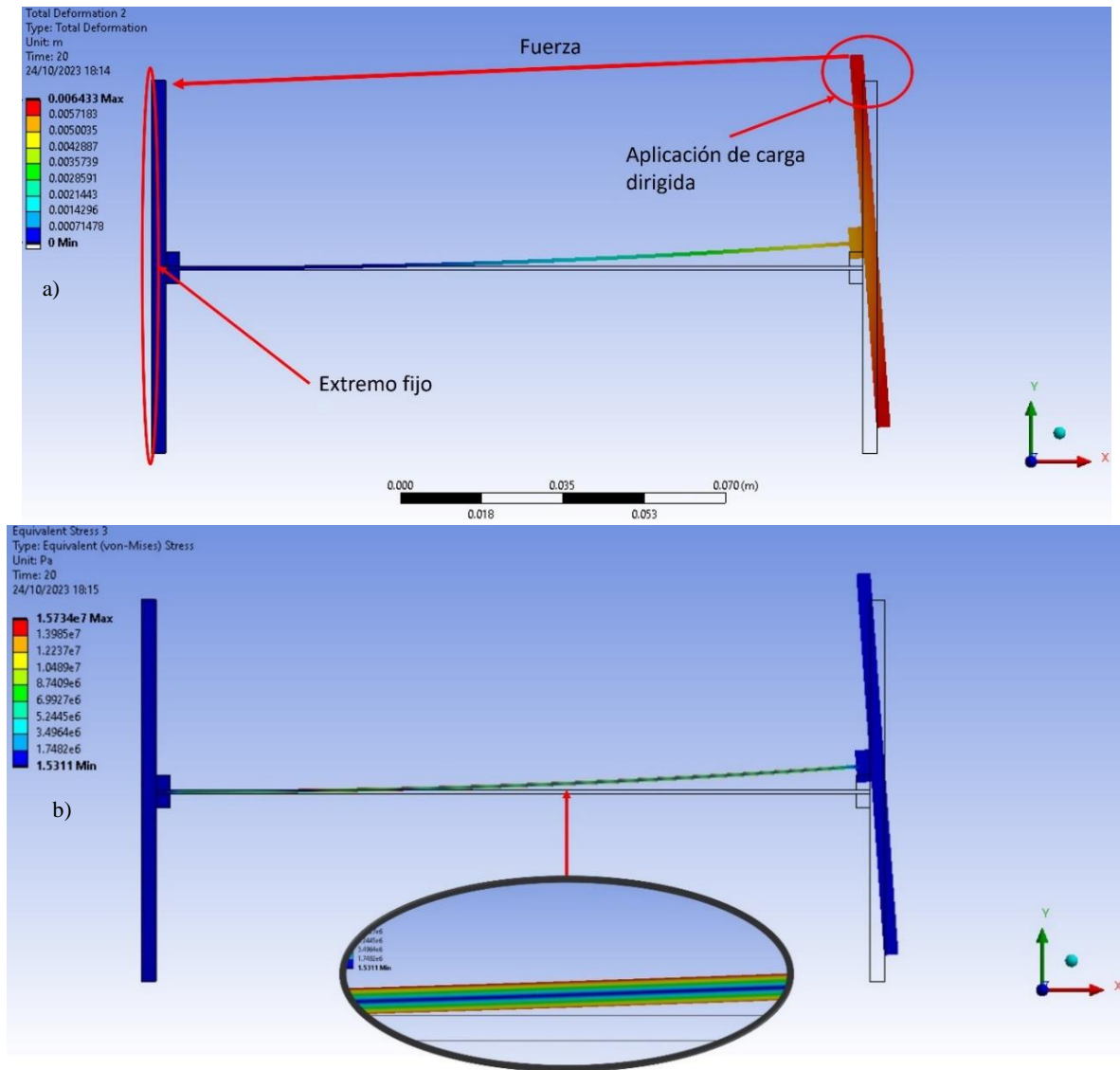


Figura 3. 9: Resultados a) desplazamiento y b) esfuerzo.

3.4 Modelo 2D teórico ideal.

Para modelo ideal se consideraron las ecuaciones que fueron presentadas por Mejía *et al.* [5], las cuales consisten en calcular el desplazamiento del manipulador con el alambre de SMA activo en función de ecuaciones que relacionan el pre-deformado del alambre, la longitud de segmento y el ángulo de inclinación. Las ecuaciones por emplear son las ecuaciones (1) y (2), las cuales ya fueron presentadas en el primer capítulo del presente trabajo. El manipulador con el alambre de SMA activo se puede observar en la Figura 3.10. En este se

observa una línea de color rojo la cual únicamente representa de manera ilustrativa el alambre de SMA activo y la estructura de color negro. El ángulo de deflexión calculado a través de las ecuaciones es de aproximadamente de 4.29° .

Es importante hacer mención que el eje de las X corresponde al desplazamiento del manipulador en Y, mientras que el eje Y al desplazamiento en X. Se obtuvo un desplazamiento en X de -3.14 mm y en Y de 5.51 mm, los cuales son cercanos a los resultados de desplazamiento en FEM, que son en X y Y de -3.04 mm y 5.54 mm respectivamente. El modelo 2D teórico ideal tiene la ventaja de que es computacionalmente económico, esto debido a que únicamente es necesario emplear dos ecuaciones. El costo computacional de este modelo es de 2.35 segundos, el cual es 3078.17 veces menor que el que corresponde al modelo FEM que incorpora el alambre de SMA en su geometría. Por otra parte, es importante hacer mención que para todos los modelos anteriormente presentados en este trabajo se hizo usó del mismo equipo de cómputo, el cual tiene es un Intel(R) Core (TM) i7-6700 CPU @ 3.40GHz 3.41 GHz con 16 GB de RAM.

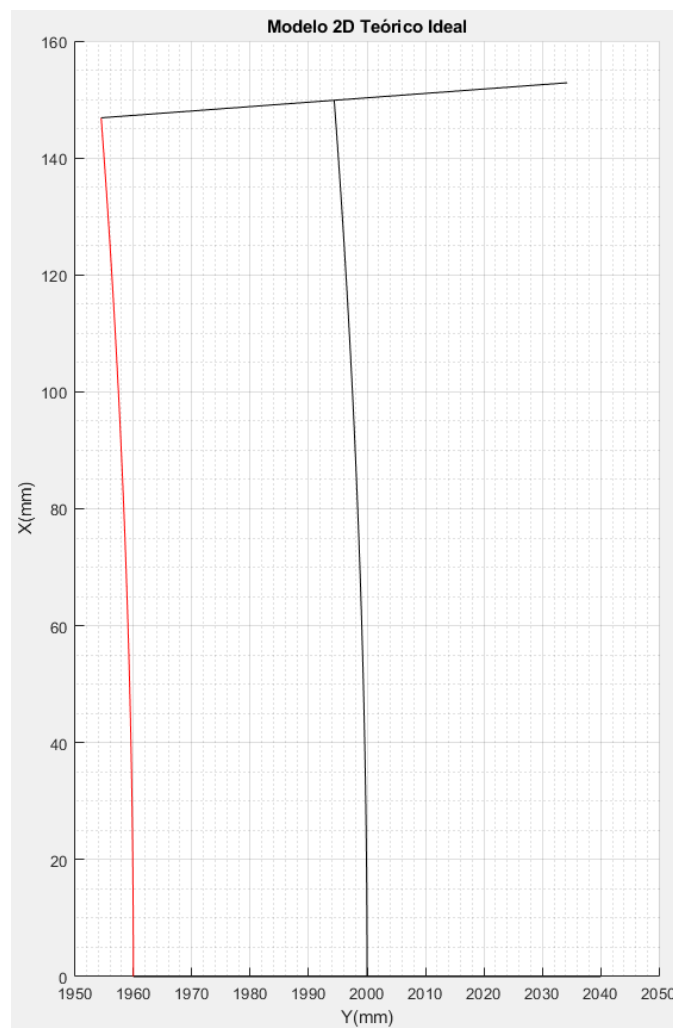


Figura 3. 10: Modelo 2D teórico ideal.

3.5 Resultados y comparación de modelos.

A continuación, se presenta una comparativa de los modelos en los resultados de desplazamiento de la parte superior del disco que no está empotrado (disco derecho). Esta comparación tiene la finalidad de conocer la fiabilidad de los diferentes métodos. En la Tabla 3.4 se presentan los resultados de desplazamiento considerando un espesor de eje central de 0.8 mm, el cual fue utilizado a lo largo de todo el trabajo.

Tabla 3. 4 – Resultados de desplazamiento de modelos

Desplazamiento	ANSYS con alambre de SMA	ANSYS sin alambre de SMA	3R-PRBM	Modelo 2D
X (mm)	-3.04	-3.12	-3.25	-3.14
Y (mm)	5.54	5.67	5.63	5.51

Los resultados anteriormente presentados se pueden considerar cercanos unos con los otros. Para conocer a más detalle la precisión de los modelos se calculó del error relativo porcentual y error absoluto, tomando como valor correcto el modelo que cuenta con el alambre de SMA. Los errores relativos y absolutos se presentan en la Tabla 3.5.

Tabla 3. 5 – Cálculo de errores de modelos

Error	ANSYS sin alambre de SMA	3R-PRBM	Modelo 2D
Error absoluto X (mm)	0.08	0.21	0.1
Error absoluto Y (mm)	0.13	0.09	0.03
Error relativo X (%)	2.49	6.51	3.12
Error relativo Y (%)	2.36	1.68	0.53

El modelo 3R-PRBM tiene el error relativo porcentual más grande en su desplazamiento, teniendo un error del 6.51%, el cual podemos considerar aún como un resultado aceptable. Por otra parte, el modelo de ANSYS que no incorpora el alambre en su estructura cuenta con errores relativos porcentuales muy pequeños, siendo estos menores a 2.49 %, el cual podría considerarse despreciable según la aplicación que se le quiera dar al manipulador. Por último, el modelo 2D teórico ideal tiene un error relativo porcentual máximo en X de 3.12%, y en Y de 0.53, los cuales se pueden considerar aceptables, esto debido a que son ecuaciones simples de comprender y emplear. Para los errores absolutos se realizó el cálculo restándole el valor del desplazamiento del modelo FEM que incorpora el alambre de SMA al valor de desplazamiento obtenido del método a comparar. El error absoluto se considera extremadamente pequeño en el caso del modelo de ANSYS que no incorpora el alambre,

mientras que con 3R-PRBM es menor a 0.2 mm. Por otra parte, el modelo 2D teórico ideal presenta errores absolutos mínimos, en donde tiene el error más pequeño de todos los modelos, el cual tiene un valor de 0.03 en Y. Finalmente, los tiempos computacionales se presentan en la Tabla 3.6, donde el menor tiempo computacional (2.35 s) corresponde al modelo 2D teórico ideal, el cual tiene los errores más pequeños comparados con el modelo 3R-PRBM. Es importante notar que el tiempo computacional requerido para la resolución del modelo que cuenta con el alambre de SMA es muy elevado comparado con los otros métodos.

Tabla 3. 6 – Tiempo computacional

	ANSYS con alambre de SMA	ANSYS sin alambre	3R-PRBM	Modelo 2D
Tiempo (s)	7233.719	172.01	5.78	2.35

3.6 Diseño, fabricación y experimentación de manipulador accionado por alambres de SMA.

Para diseñar y fabricar el manipulador, se han tenido que tomar en cuenta diversos parámetros que podrían influir en su desplazamiento. Es importante hacer mención que se realizó un estudio de sensibilidad, esto con la finalidad de observar y comprender como se relacionan los parámetros geométricos del manipulador con el desplazamiento. La meta es alcanzar el mayor desplazamiento posible con un manipulador que sea transportable y no supere los 20 cm de longitud. El objetivo principal es que el desplazamiento del manipulador sea perceptible a simple vista. Los parámetros por considerar son los siguientes:

- Espesor de eje central (t).
- Longitud de eje central o segmento (L).
- Ancho de eje central (A_{eje}).
- Excentricidad (h).

Un esquema de los diferentes parámetros a considerar se puede observar en la Figura 3.11. La Figura 3.11a se observa la vista lateral del manipulador y en la Figura 3.11b la vista superior. Se consideró como restricción el espesor del eje central debido a que se no se logró encontrar un espesor más pequeño que 0.8 mm, debido a esto permaneció como un parámetro constante. Por otra parte, se consideró una restricción más, el cual es el diámetro del disco lateral, el que no debería de ser mayor 11 cm, con la finalidad de que el manipulador sea transportable y se pueda manipular con facilidad. En el disco lateral se consideran excentricidades que van desde 2 cm hasta 5 cm. En las siguientes gráficas se presenta la variación de tales parámetros, cabe destacar que todos los valores de desplazamiento y fuerza que se presentan fueron obtenidos por el modelo FEM que incorpora el alambre de SMA.

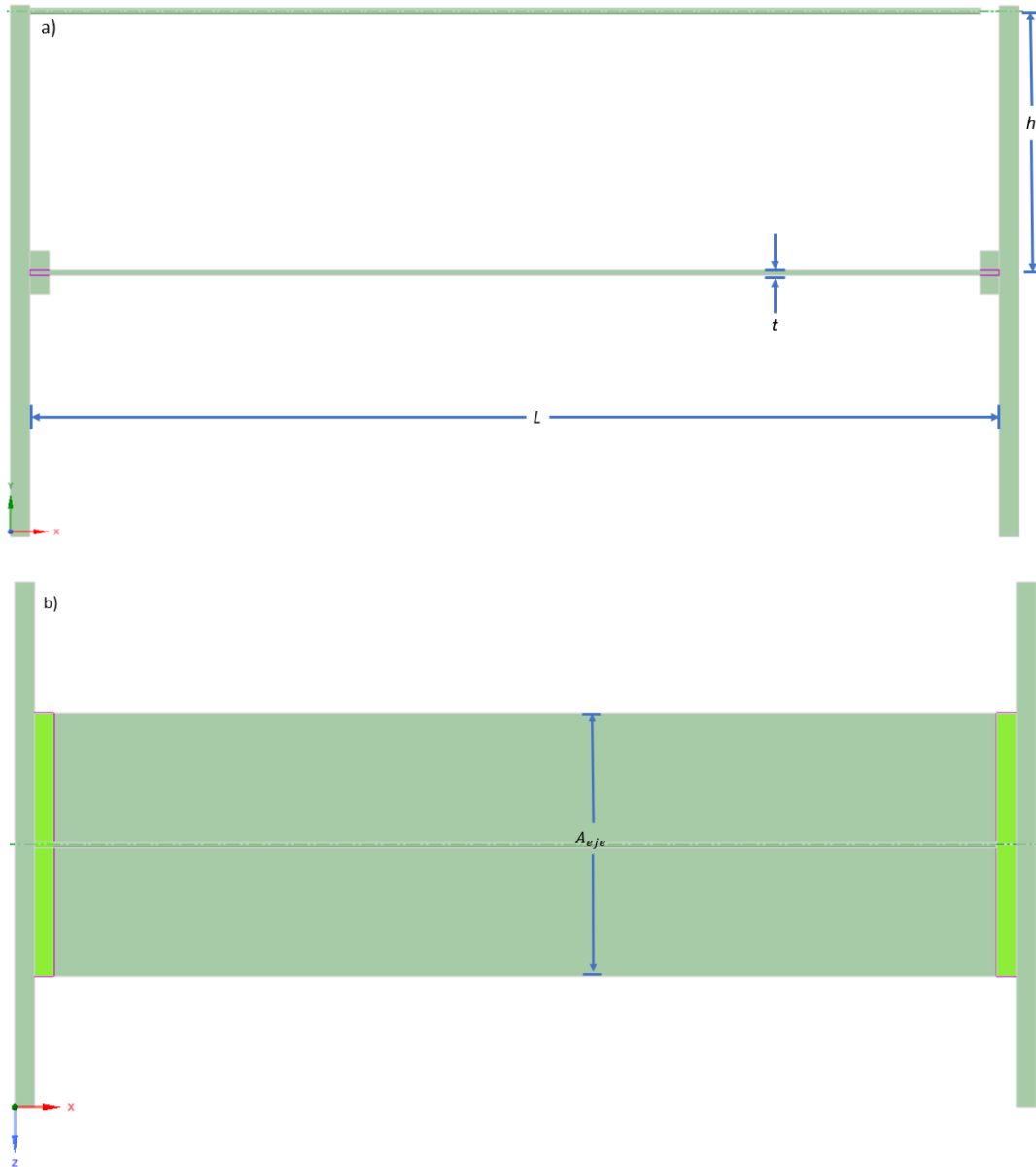


Figura 3. 11: Parámetros geométricos, a) vista lateral y b) vista superior.

La Figura 3.12 presenta los resultados de variar la longitud del segmento, manteniendo constantes los parámetros de excentricidad, ancho del eje central y espesor, los cuales tienen valores de 40 mm, 40 mm y 0.8 mm respectivamente. Se observa principalmente que a medida que se incrementa la longitud del segmento, se obtiene un mayor desplazamiento (Figura 3.12c). Asimismo, se graficó la fuerza requerida para mantener la posición final en función de la longitud del segmento, mostrando que conforme esta aumenta, la fuerza necesaria para el equilibrio disminuye (Figura 3.12a). Por otro lado, es relevante señalar que en la Figura 3.12b, tanto el desplazamiento como la longitud del segmento aumentan simultáneamente.

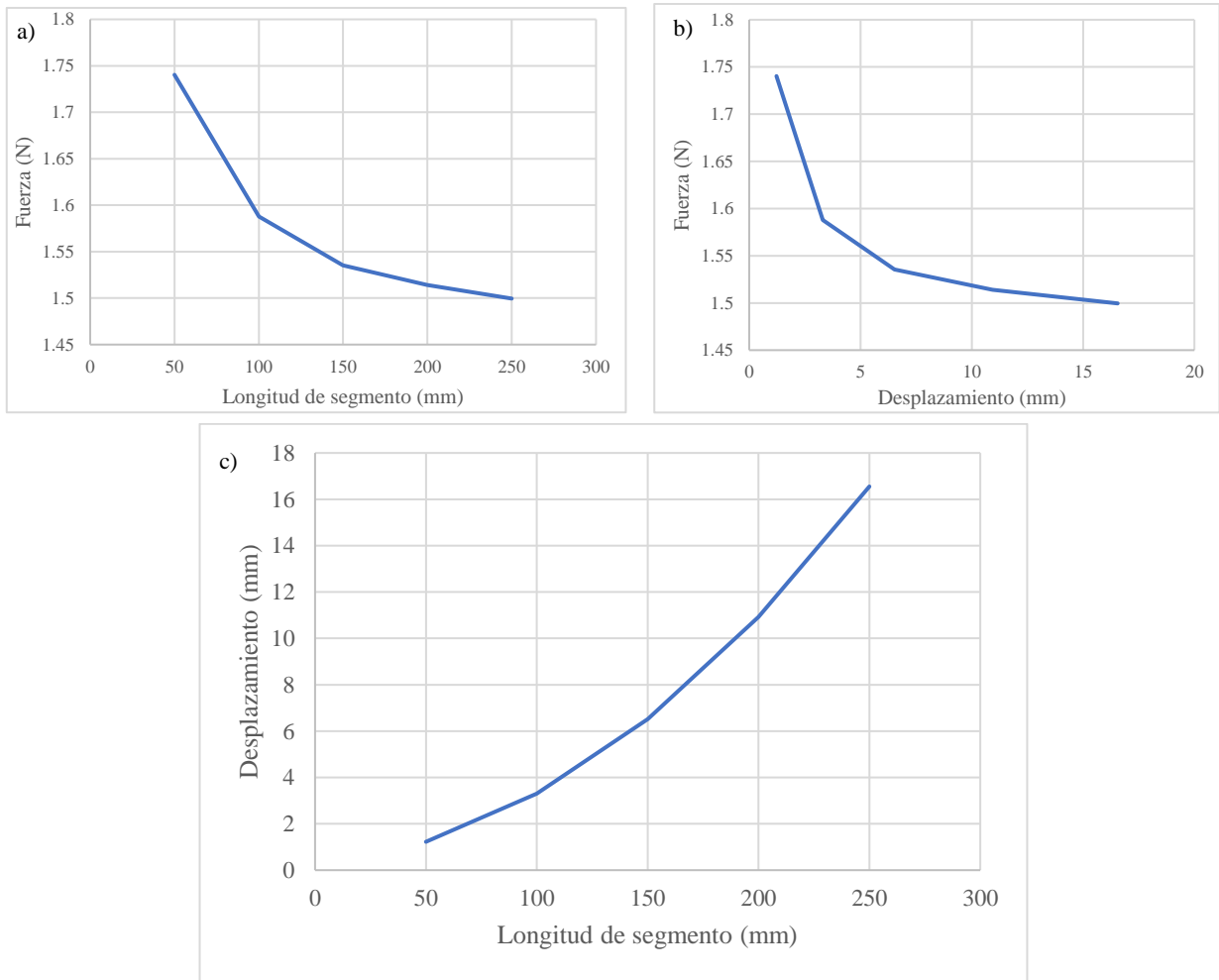


Figura 3. 12: Variación de longitud de segmento, a) diagrama de fuerza de equilibrio-longitud de segmento, b) diagrama de fuerza de equilibrio-desplazamiento y c) diagrama de desplazamiento-longitud de segmento.

Se ha seleccionado una longitud de segmento de 150 mm debido a su desplazamiento aceptable, aproximadamente 6.2 mm, y su conveniencia para la fabricación del manipulador. Luego, se procedió a analizar el ancho del segmento, manteniendo constante la longitud del segmento en 150 mm y los demás parámetros igual que en el modelo de la Figura 3.4.

La variación en el ancho del segmento no produjo cambios significativos en el desplazamiento, lo que sugiere que este parámetro no afecta de manera significativa. Los resultados se exponen en la Figura 3.13, donde se aprecia que, al aumentar el ancho del eje central, el desplazamiento del manipulador disminuye (Figura 3.13c), mientras que la fuerza requerida para mantener la posición deformada aumenta (Figura 3.13a). Es relevante señalar que, en la Figura 3.13b, se evidencia que a medida que el desplazamiento aumenta, el ancho del eje central disminuye

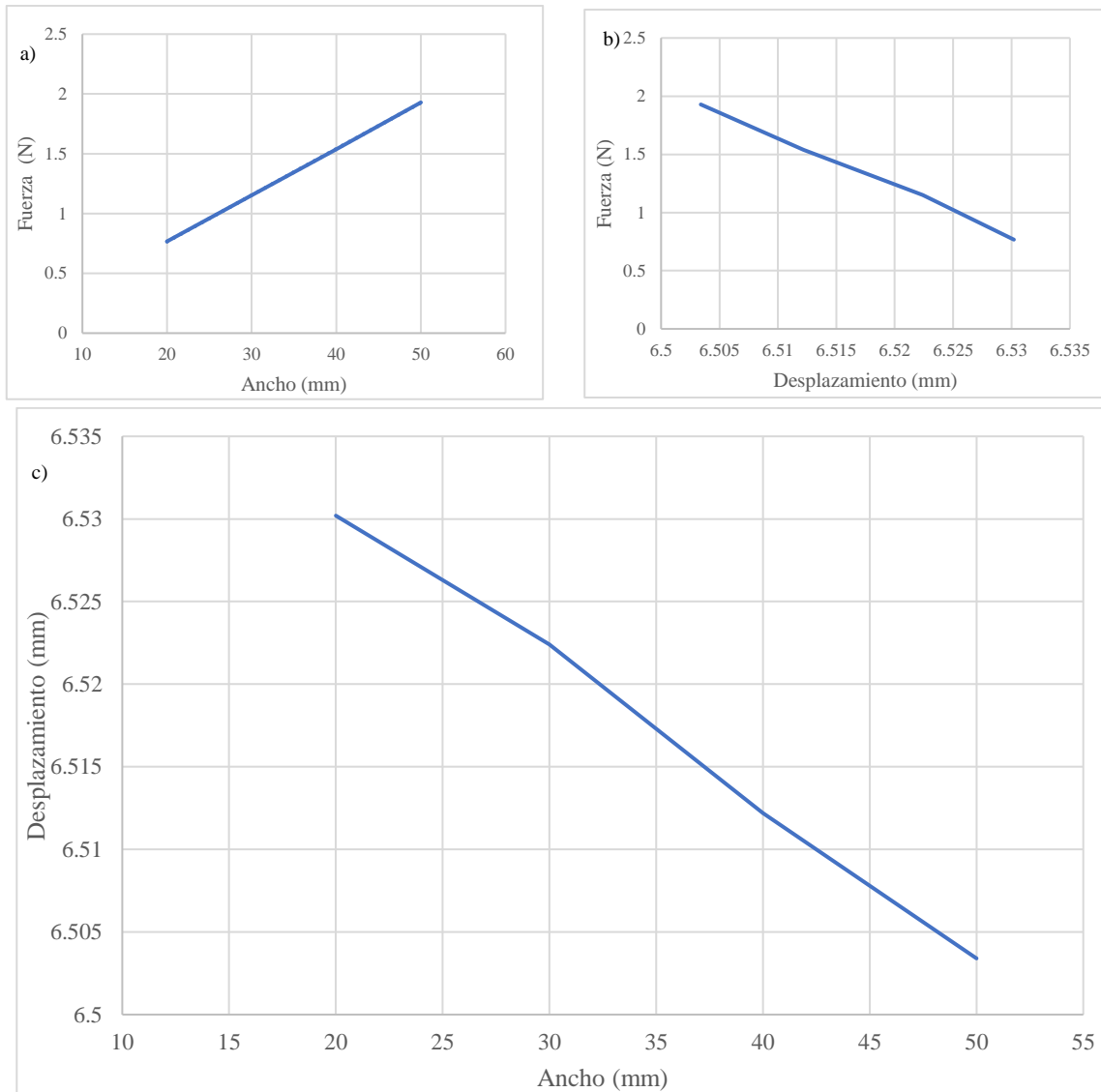


Figura 3. 13: Variación de ancho de eje central, a) diagrama de fuerza de equilibrio-ancho del eje central, b) diagrama de fuerza de equilibrio-desplazamiento y c) diagrama de desplazamiento-ancho de eje central.

Para concluir, se analiza la variación de la excentricidad del manipulador, manteniendo fijos el ancho del eje central, la longitud del eje central y el espesor, con valores de 40 mm, 150 mm y 0.8 mm respectivamente. Los resultados de este análisis se presentan en la Figura 3.14, donde se evidencia que al disminuir la excentricidad, la fuerza de equilibrio aumenta significativamente, mientras que al aumentar la excentricidad, el desplazamiento disminuye.

Es relevante destacar que en la Figura 3.14b se observa una relación inversa entre el desplazamiento y la excentricidad, donde a medida que el desplazamiento aumenta, la excentricidad decrementa.

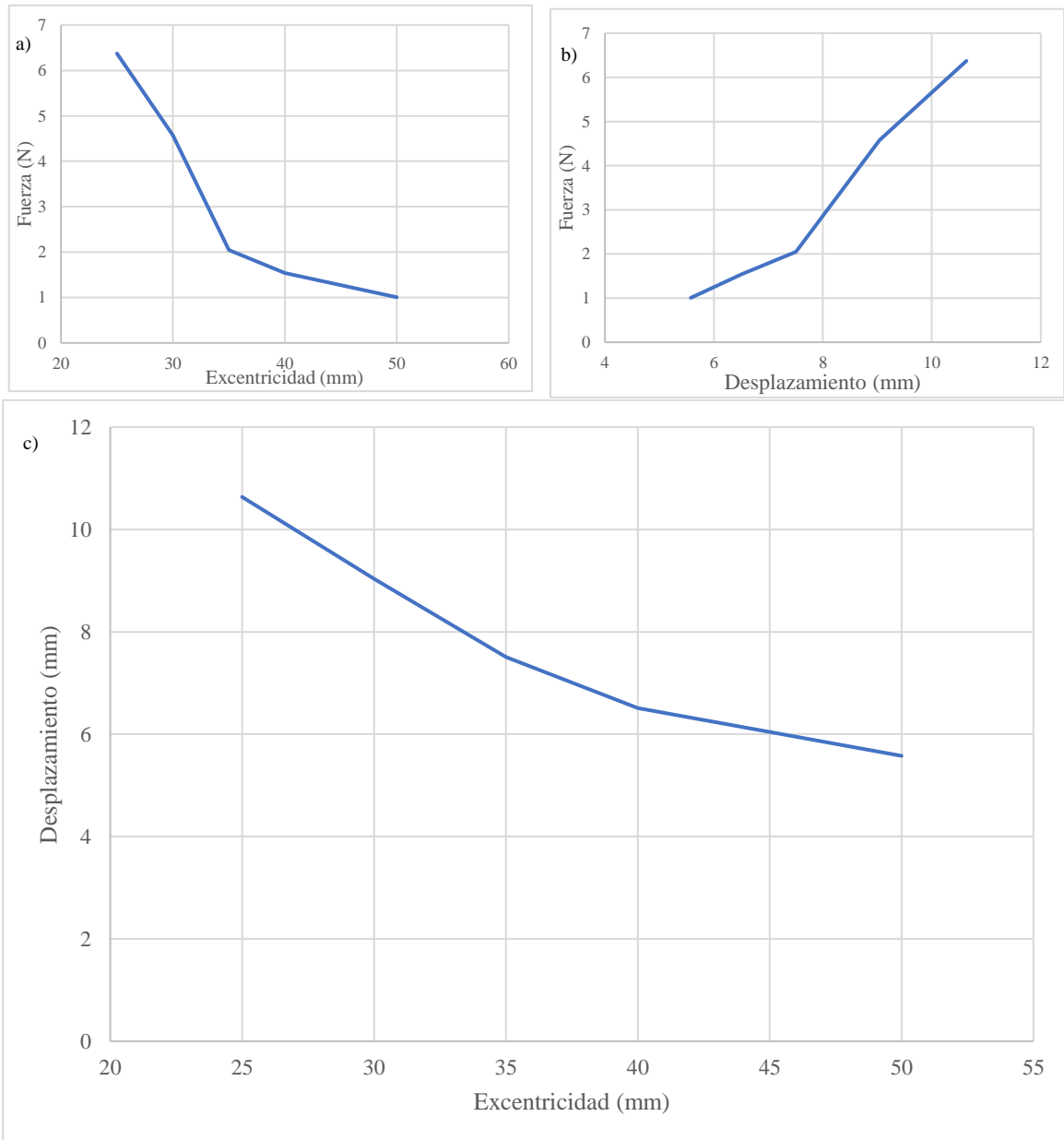


Figura 3. 14: Variación de excentricidad, a) diagrama de fuerza de equilibrio-excentricidad, b) diagrama de fuerza de equilibrio-desplazamiento y c) diagrama de desplazamiento-excentricidad.

Los resultados presentados en la Figura 3.14c suscitan incertidumbre, ya que contradicen la expectativa de un comportamiento opuesto en el manipulador. Se esperaba que el desplazamiento aumentara conforme se incrementara la excentricidad en el manipulador, basado en la suposición de que se aplicaría un mayor momento sobre la estructura. Para comprender este fenómeno, se procedió al cálculo del momento utilizando la fuerza de equilibrio proporcionada por el software y la excentricidad de cada modelo, cuyos datos se

muestran en la Figura 3.15a. La relación entre el momento y el desplazamiento se ilustra en la misma figura.

En la Figura 3.15a se evidencia que un menor momento se traduce en un menor desplazamiento. Estos resultados se vinculan con la Figura 3.15c, que muestra la relación entre el momento y la excentricidad. Se observa que una disminución en la excentricidad resulta en un aumento del momento, lo que a su vez se relaciona con la Figura 3.14a, ya que una reducción en la excentricidad implica una mayor fuerza necesaria para mantener el manipulador en su posición final. Se esperaría obtener resultados similares a los de la Figura 3.15b, donde se considera la fuerza de accionamiento del alambre de SMA, la cual se extrajo de experimentos previos y tiene un valor de 1.5334 N. Esta fuerza se multiplica por la excentricidad para obtener el momento.

En la Figura 3.15b se aprecia un aumento del momento en consonancia con el incremento de la excentricidad, lo cual es un resultado coherente y esperado. Sin embargo, en contraste, en la Figura 3.15c se observa que a medida que aumenta la excentricidad, el momento disminuye, lo que contradice el comportamiento observado en la Figura 3.15b. Estos datos indican un comportamiento inesperado en la Figura 3.15. Se esperaría que un aumento en la excentricidad condujera a un incremento en el desplazamiento, como se muestra en la Figura 3.15b. No obstante, se observa que, en realidad, conforme se reduce la excentricidad, el desplazamiento aumenta, como se muestra en la Figura 3.15c. Por lo tanto, se entiende que a medida que disminuye la excentricidad en el manipulador, el desplazamiento tiende a ser mayor. Es importante señalar que los resultados presentados en las Figuras 3.15a y 3.15c se obtuvieron mediante el modelo FEM que incorpora el alambre de SMA. Por otro lado, la Figura 3.15b únicamente representa el comportamiento esperado.

Por último, se evaluó el pre-deformado del alambre de SMA por FEM donde se pre-deformo el alambre desde un 2% hasta un 8% de su longitud inicial. Los resultados se logran observar en la Figura 3.16, donde se observa que conforme se aumenta el pre-deformado del alambre se tendrá un mayor desplazamiento el manipulador. Los resultados que se presentan en la Figura 3.16 fueron obtenidos a través del modelo FEM que incorpora el alambre de SMA. Otro factor importante por tomar en cuenta es que la longitud del segmento permaneció constante a 150 mm, por lo que se varió únicamente la longitud del alambre. Además, todos los demás parámetros permanecieron constantes tal como la excentricidad, ancho, espesor y longitud del eje central con valores de 40 mm, 40 mm, 0.8 mm y 150 mm respectivamente.

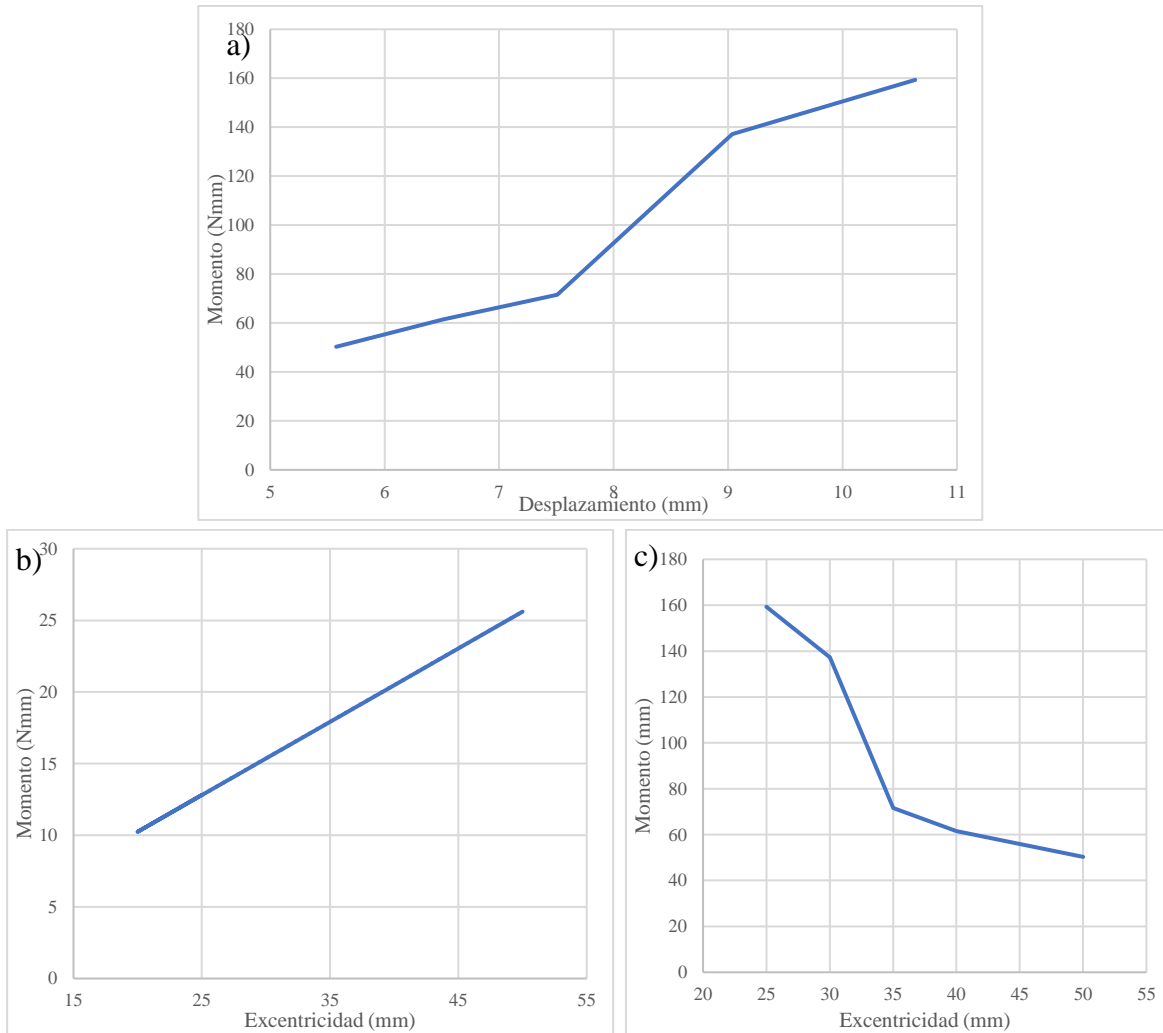


Figura 3. 15: Relación de momento con excentricidad y desplazamiento, a) diagrama momento-desplazamiento de manipulador modelado por FEM, b) diagrama momento-excentricidad ideal y c) diagrama de momento-excentricidad modelado por FEM.

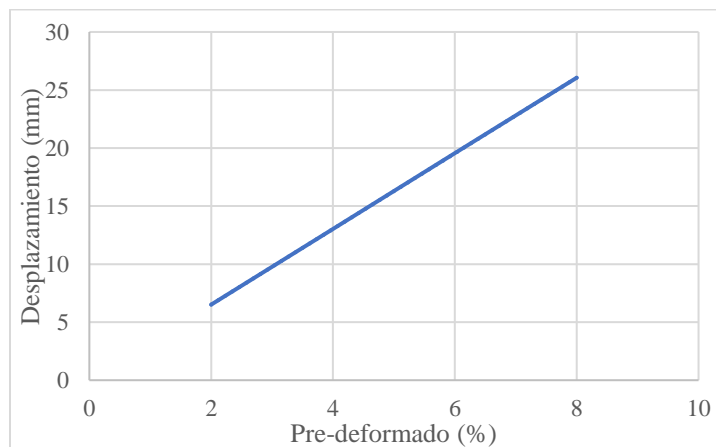


Figura 3. 16: Diagrama de desplazamiento-pre-deformado de alambre de SMA.

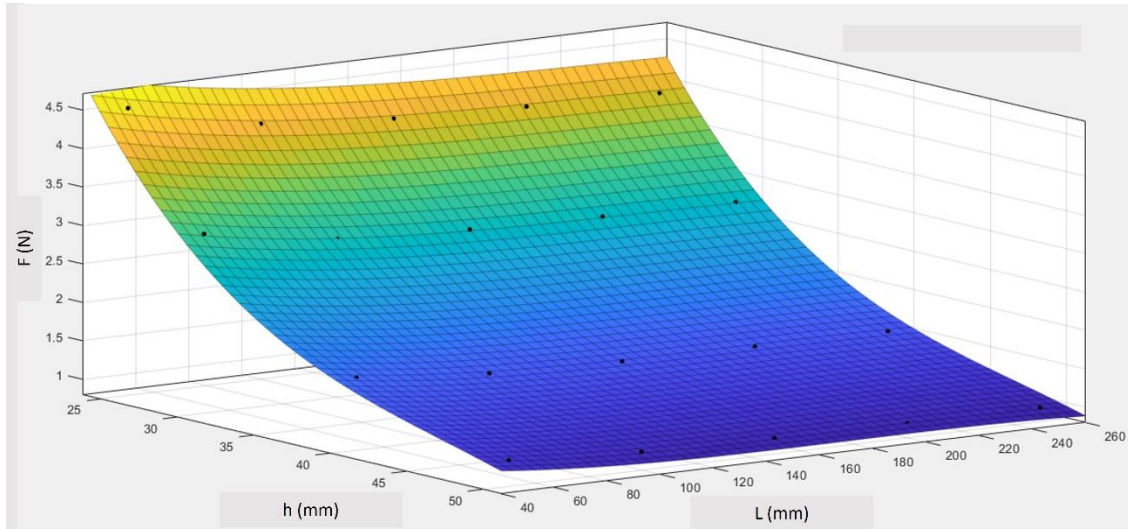


Figura 3. 17: Superficie de interpolación para la fuerza de equilibrio en un manipulador flexible accionado por un alambre de SMA.

3.6.1 Fuerzas de equilibrio y desplazamiento a partir de análisis paramétrico.

Tal como se observó en las gráficas anteriores se encontró que conforme se variaba la geometría del manipulador se veía afecta la fuerza de equilibrio. Se decidió realizar un estudio paramétrico con la finalidad de describir el desplazamiento con las variables que afectaban más el desplazamiento tal como la excentricidad y la longitud de segmento. Los resultados de los desplazamientos y las fuerzas fueron extraídos del modelo FEM que incorpora el alambre de SMA, la principal necesidad a cubrir es independizar hasta cierto punto el modelo de cuerpo pseudo-rígido 3R y el modelo FEM que no incorpora el alambre de SMA. La superficie que se obtuvo de este estudio paramétrico se muestra en la Figura 3.17, donde en el eje X se tiene la excentricidad, en el eje Y la longitud y en el eje Z la fuerza de equilibrio que se extrajo del modelo FEM que incorpora únicamente un alambre de SMA como medio de accionamiento. Se extrajo la ecuación de interpolación de la superficie, está siendo el comportamiento de la superficie que se presenta en la Figura 3.17. Por otra parte, en la Figura 3.17 se observan 20 puntos, los cuales representan 20 resultados de fuerza con diferentes combinaciones entre longitud y excentricidad del manipulador. Es importante hacer mención que la ecuación de esta superficie únicamente servirá cuando los parámetros geométricos del manipulador se encuentren dentro de los límites superiores e inferiores. Es importante hacer mención que F hace referencia a la fuerza, h a la excentricidad y L a la longitud de segmento.

Por otra parte, la ecuación de interpolación de la superficie se presenta en la ecuación (28), donde X será la excentricidad que se desee evaluar y Y la longitud del segmento.

$$Fuerza = p_{00} + p_{10}X + p_{01}Y + p_{20}X^2 + p_{11}XY + p_{02}Y^2 + p_{30}X^3 + p_{21}X^2Y + p_{12}XY^2 + p_{03}Y^3 \quad (28)$$

La ecuación de interpolación de la superficie tendrá diferentes valores constantes, estos se pueden observar en la Tabla 3.7.

Tabla 3. 7 – Parámetros de la ecuación de la fuerza de equilibrio.

Parámetro	Valor
$p00$	22.84
$p10$	-1.216
$p01$	-0.0202
$p20$	0.02416
$p11$	0.000374
$p02$	6.327e-5
$p30$	-0.0001684
$p21$	-2.069e-6
$p12$	-4.88e-7
$p03$	-7.515e-8

Además, haciendo uso del mismo estudio paramétrico se realizaron dos superficies más, las cuales describen el desplazamiento que tiene el manipulador en X y en Y, donde también se extrajeron sus ecuaciones de interpolación. Para la ecuación de desplazamiento del manipulador en X y en Y se tomarán en consideración valores constantes tal como con la ecuación de interpolación de la fuerza, estos valores son los que se muestran en la Tabla 3.8.

Tabla 3. 8 - Parámetros para desplazamiento.

Parámetro	Valor (δ_x)	Valor (δ_y)
P00	-1.732	1.233
P10	-0.01716	0.08998
P01	0.1502	-0.2832
P20	2.24E-06	0.0006098
P11	-0.0001641	-0.005511
P02	-0.004149	0.01375
P30	5.66E-10	3.60E-08
P21	-6.89E-08	-9.49E-06
P12	2.27E-06	8.27E-05
P03	3.67E-05	-1.87E-04

La ecuación para calcular el desplazamiento en X y Y del manipulador es la siguiente:

$$\delta = P00 + P10X + P01Y + P20X^2 + P11XY + P02Y^2 + P30X^3 + P21X^2Y + P12XY^2 + P03Y^3 \quad (29)$$

donde X es la longitud del segmento y Y es la excentricidad. Es importante hacer mención que es la misma ecuación para describir el comportamiento en X y en Y , lo que varía son los valores constantes que se observan en la Tabla 3.8. Las superficies que describen el desplazamiento se presentan en la Figura 3.18. La Figura 3.18a es el desplazamiento en X y la Figura 3.18b es el desplazamiento en Y del manipulador accionado por un alambre de SMA.

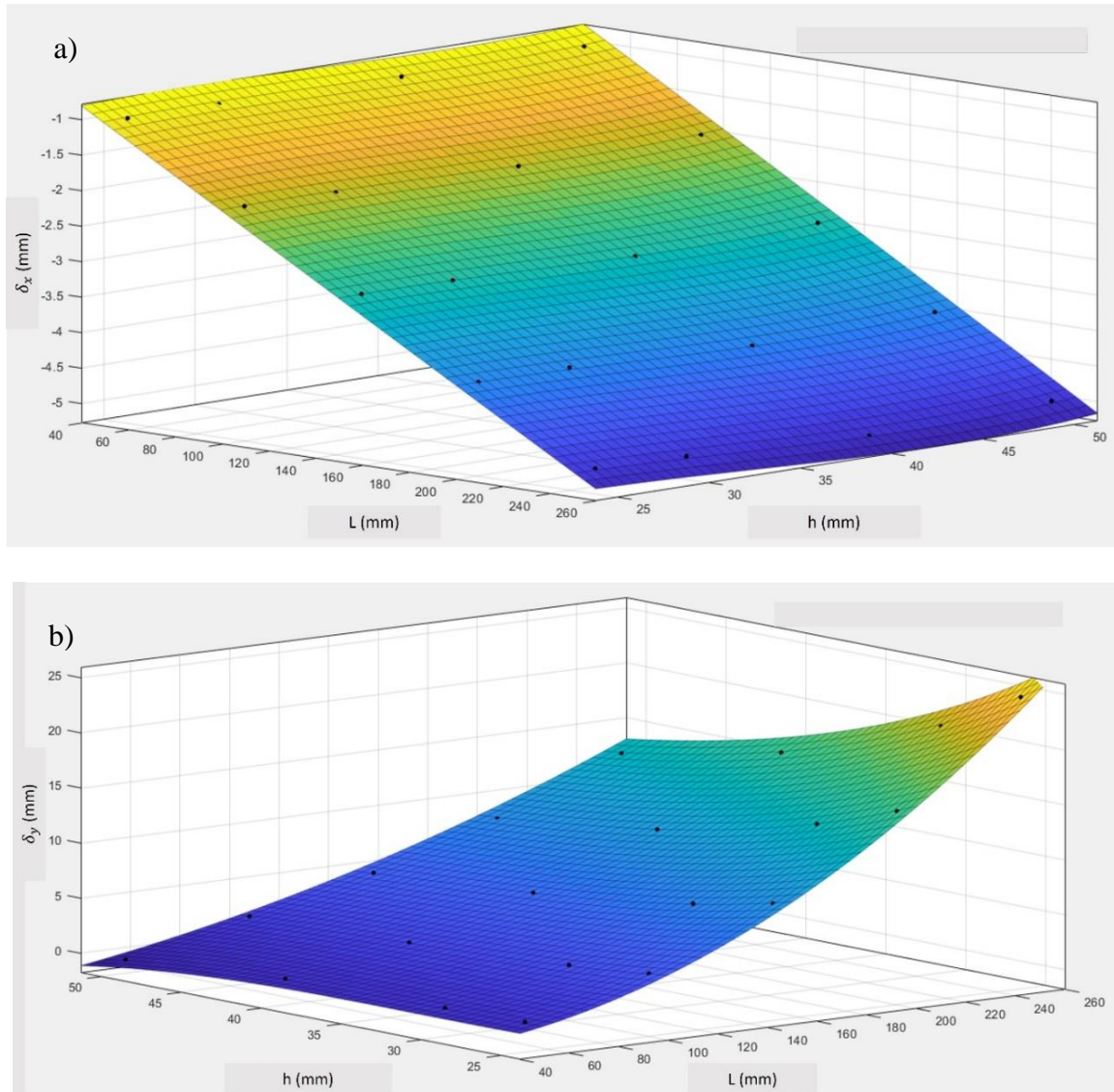


Figura 3. 18: Análisis paramétrico con un alambre de SMA en el manipulador, a) superficie de interpolación para desplazamiento en X para un manipulador flexible accionado por un alambre de SMA y b) superficie de interpolación para desplazamiento en Y para un manipulador flexible accionado por un alambre de SMA.

3.6.2 Fabricación del manipulador accionado por alambres de SMA.

Se decidió fabricar el manipulador con la finalidad de corroborar los resultados de los diferentes modelos. En la Figura 3.19 se logran observar diversos agujeros en la parte superior e inferior del disco lateral, los cuales tienen una excentricidad desde 30 mm hasta 42.5 mm, teniendo un diámetro de disco de 90 mm. Para ensamblar el eje central al disco, se le colocó un segmento extruido con forma rectangular, el que tendrá dos agujeros donde se les hará pasar tornillos y de esta manera unir el eje central con el disco lateral. Los discos fueron fabricados en PLA, uno de los principales motivos de fabricarlos por este material es el bajo costo y la facilidad de fabricación. Además, haciendo uso de este material no afectaría significativamente la movilidad del manipulador tal como si lo hiciera en caso de fabricarse con acero estructural como en los modelos FEM, donde se vería afectado el desplazamiento del manipulador debido al peso de los discos. El disco tiene un espesor de 10 mm y tiene diferentes agujeros que le permitirán fijarse a una superficie y hacer pasar el alambre de SMA en diferentes posiciones. Por otra parte, el eje central es de aluminio 6061, el cual tiene una longitud de 150 mm, ancho de 40 mm y un espesor de 0.8 mm, los cuales se definieron con anterioridad en las gráficas previamente presentadas. Se unieron los discos y el eje central por medio de dos pernos por cada disco, dando un total de 4 pernos, la posición de estos agujeros se puede observar en la Figura 3.19.

Los componentes que forman parte del manipulador se presentan en la Figura 3.20. La Figura 3.20a se presenta el disco lateral. Por último, se presenta la Figura 3.20b donde se observa el manipulador ya ensamblado siendo fijado en un costado por medio de pernos a una superficie de madera, y de fondo se observa una superficie cuadrículada que permitirá observar el desplazamiento del manipulador con mayor facilidad.

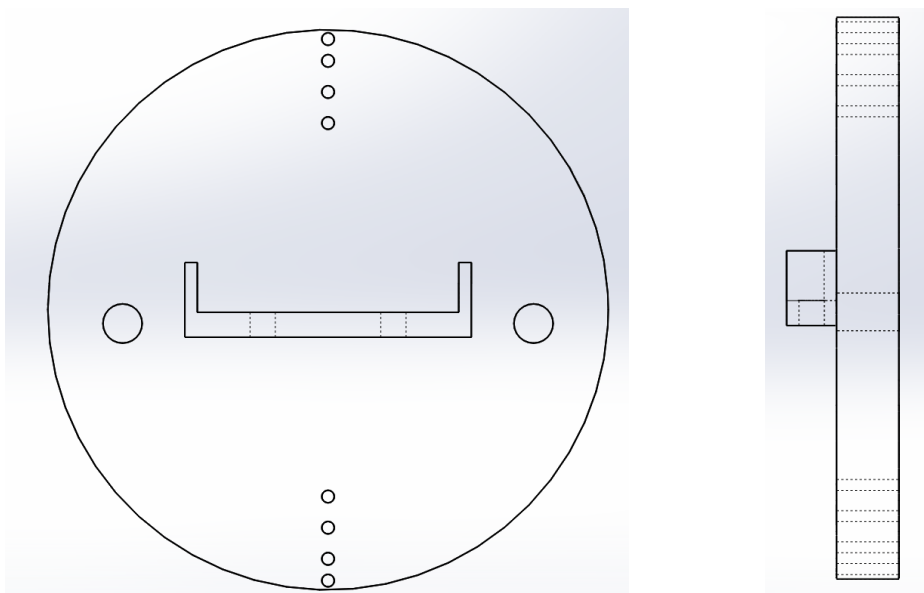


Figura 3. 19: Discos laterales del manipulador.

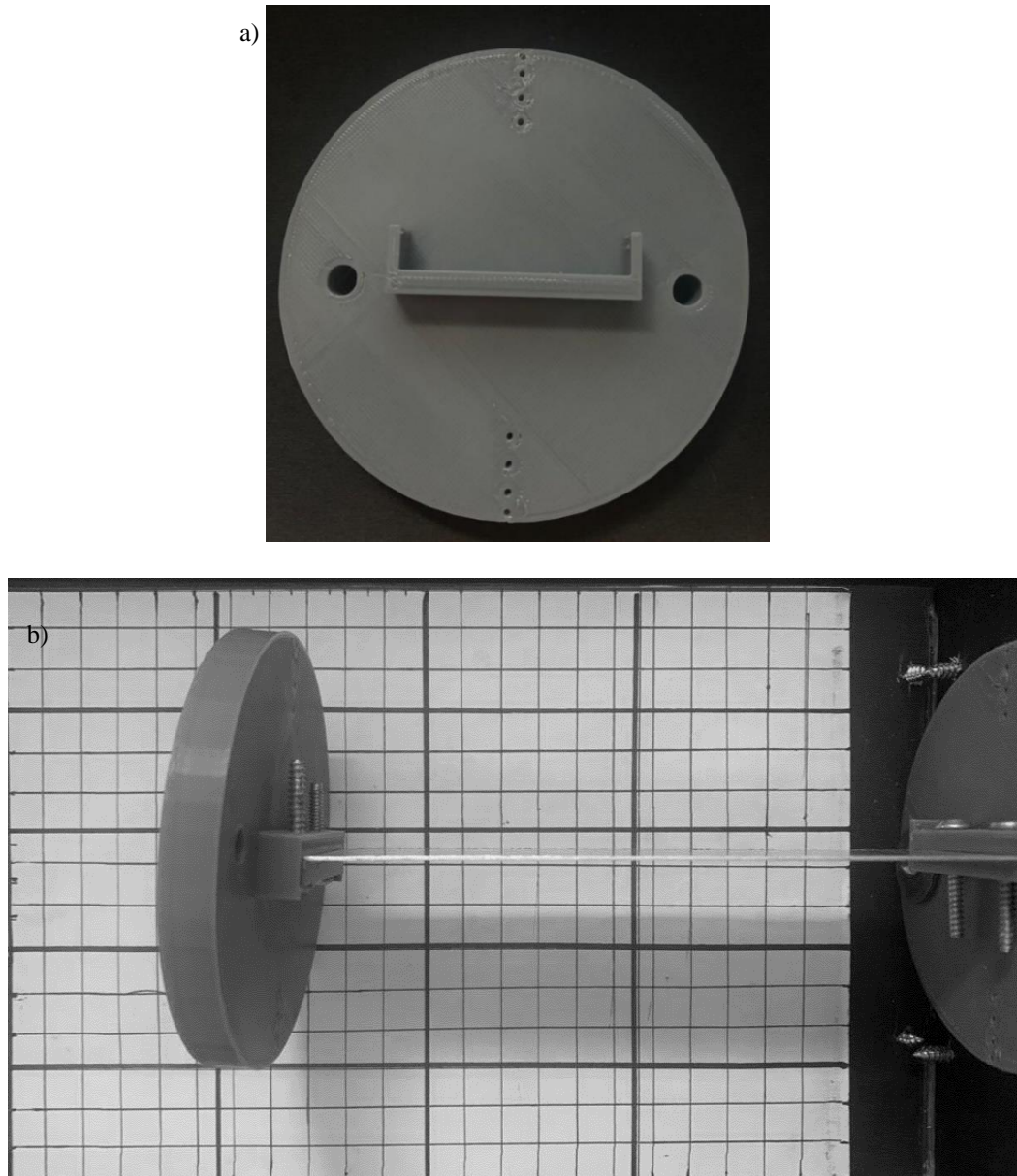


Figura 3. 20: Fabricación y ensamblaje de componentes de un manipulador flexible, a) disco lateral fabricado por PLA y b) manipulador sin alambre de SMA.

Para lograr ensamblar el alambre en la estructura del manipulador se colocó en el disco lateral libre dos elementos de sujeción, mientras que del extremo fijo se colocó únicamente uno. Los elementos de sujeción (clemas) aprisionan el alambre a través de dos tornillos, el elemento anteriormente mencionado se logra observar en la Figura 3.21a, mientras que en la Figura 3.21b se logra observar el alambre ya colocado en el manipulador. Se llevaron a cabo experimentos con la finalidad de observar si el método para fijar el alambre cumplía con su función, debido a esto se pre-deformo el alambre un porcentaje elevado de su longitud inicial, el resultado de tal experimento se logra observar en la Figura 3.21c. La Figura 3.21c se

aprecia el manipulador con el alambre activado, generando flexión en la parte central y teniendo un desplazamiento significativo. La finalidad de estos experimentos fue observar si este método de sujeción de alambre sería útil, lo cual se logró corroborar a través de marcas que fueron colocadas al costado del elemento de sujeción, donde estas marcas permanecieron en la misma posición.

El desplazamiento que observa en la Figura 3.21c no fue caracterizado, únicamente se usó con la finalidad de conocer si el método de sujeción del alambre tenía la capacidad de soportar las cargas bajo un caso extremo, por lo que no se documentó que tan pre-deformado estaba el alambre antes de su montaje.

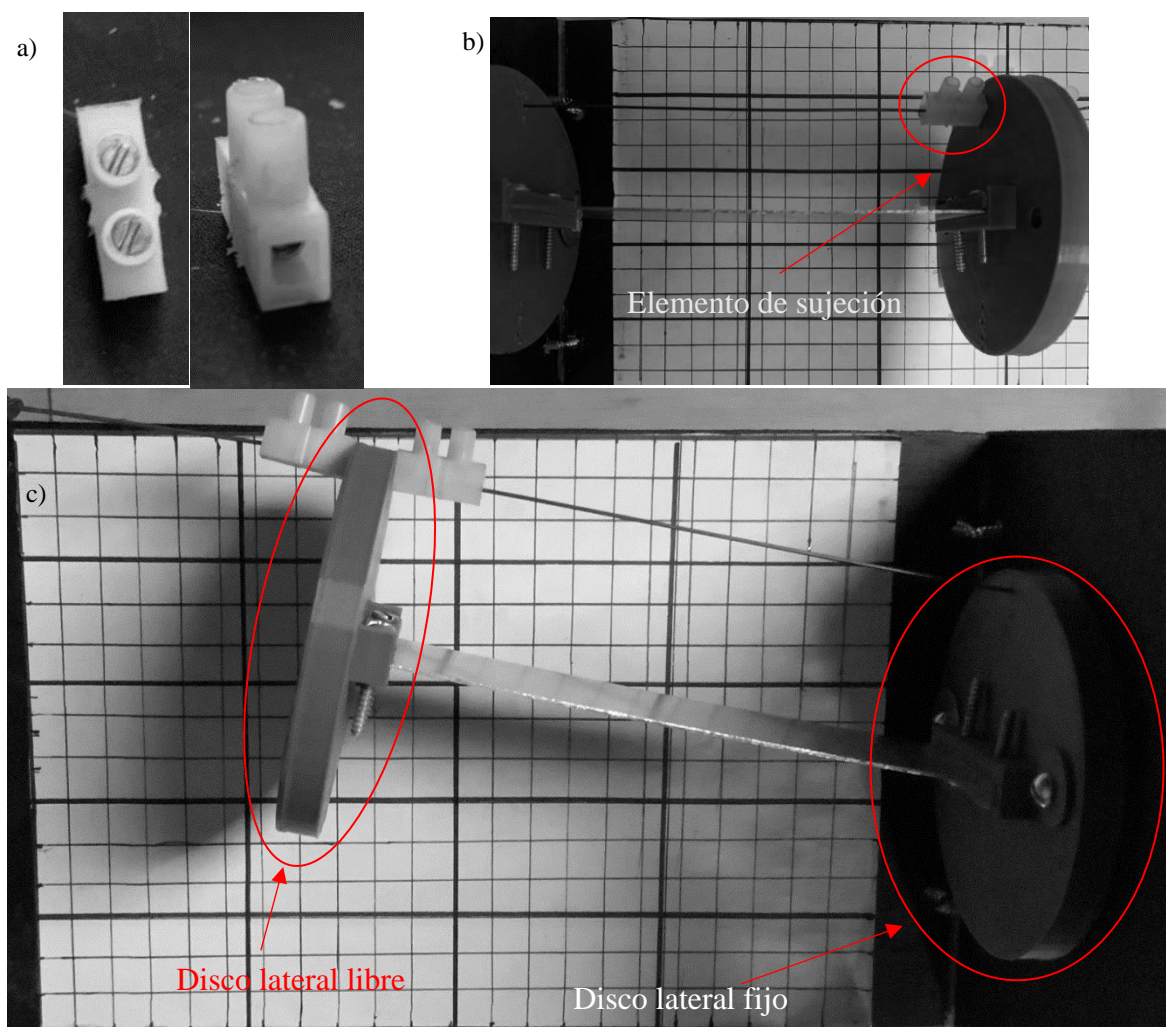


Figura 3. 21: Método de sujeción, a) elemento de sujeción de alambre de SMA, b) manipulador con alambre de SMA y c) experimento con alambre de SMA activado.

3.6.3 Desplazamiento del manipulador con un alambre de SMA.

Una vez lograda la fabricación del manipulador y desarrollado una manera en la que se puede montar el alambre de SMA sin que se desplace, se procedió a caracterizar el desplazamiento del manipulador. Es importante hacer mención que las características geométricas del manipulador han sido respetadas a lo largo de todo el presente trabajo y esto implica en que pueden ser comparados los desplazamientos de los modelos presentados con anterioridad. Para caracterizar el desplazamiento del manipulador se hizo uso del software IC Measure, el cual es de uso libre. En un principio para validar el uso de este software se decidió realizar una prueba, con la que se pudiera medir la longitud del alambre una vez activado, esta prueba se puede observar en la Figura 3.22.

En la Figura 3.22a se observa la medida obtenida empleando el vernier, la cual es de 145.77 mm. Por otra parte, en la Figura 3.22b se observa la medida que se obtiene a través del software, la cual es de 144 mm. En la Figura 3.22 se observa que está cercana la longitud que marca el vernier y la longitud del software, donde se tiene un error aproximado del 1.22 %. Por otra parte, es importante hacer mención que se hizo uso de la cámara de un iPhone XR, la cual tiene una cámara gran angular de 12 MP y una apertura $f/1.8$.

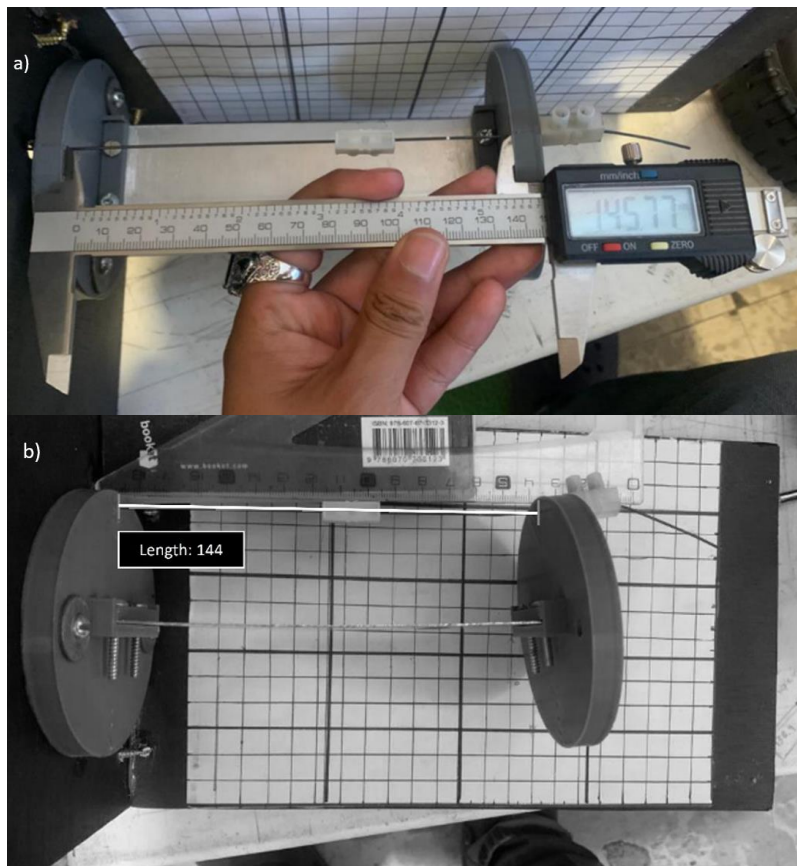


Figura 3. 22: Calibración y ejemplo de uso del software IC Measure, a) medida con vernier y b) medida en software.

La secuencia experimental para el ensamblaje y accionamiento del manipulador consiste en un principio en pre-deformar el alambre de SMA a un 2% de su longitud inicial con el arreglo experimental presentando en la Figura 2.3, donde se considera una longitud inicial de 147 mm y 150 mm pre-deformado al 2%. Una vez pre-deformado el alambre de SMA, se procede a realizar el ensamblaje del alambre de SMA con el manipulador. El ensamblaje del alambre de SMA con los discos laterales se lleva a cabo empleando dos clemas (Figura 3.21b). Las clemas son colocadas en cada extremo del alambre de SMA. Por último, se debe de elevar la temperatura del alambre de SMA hasta sobrepasar la temperatura A_f , lo cual genera que se flexione la parte central del manipulador. Es importante hacer mención que para elevar la temperatura del alambre de SMA se hizo uso de una fuente de alimentación.

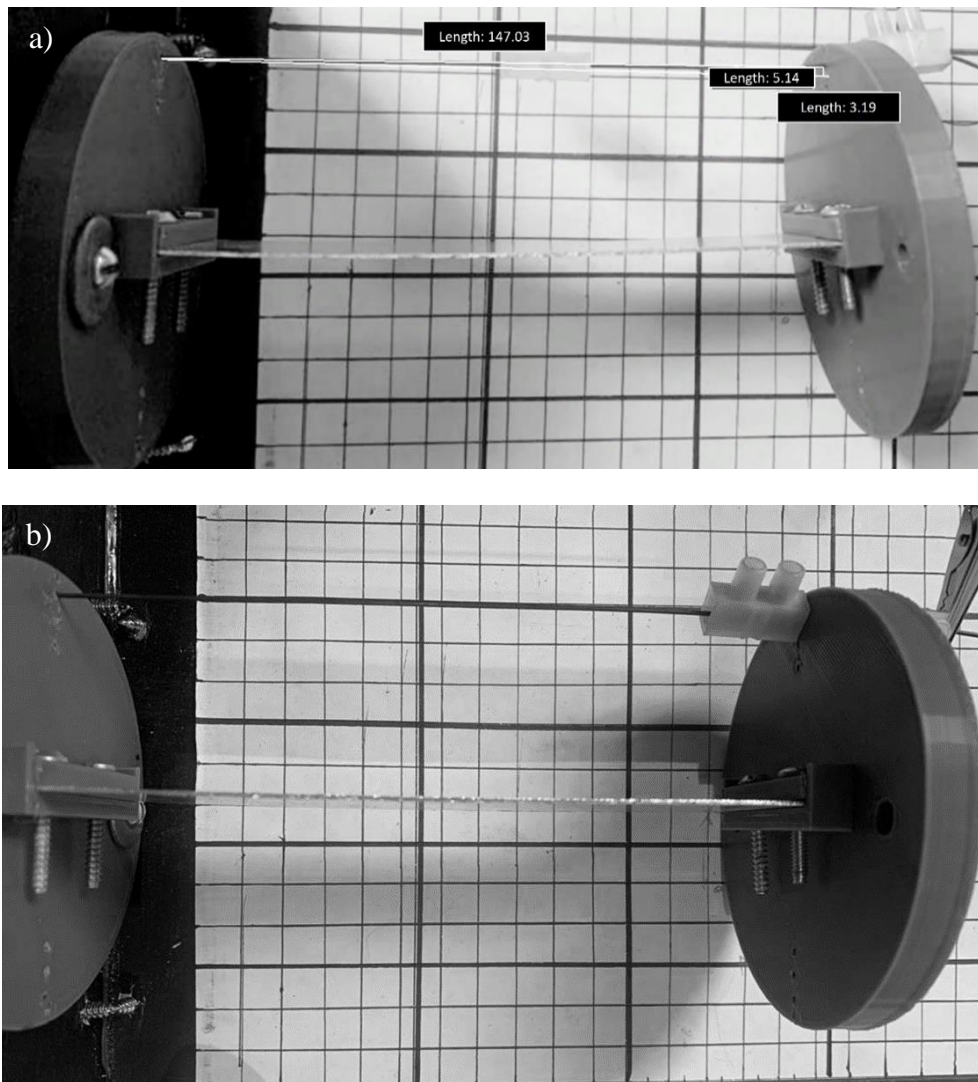


Figura 3. 23: Manipulador accionado por alambres de SMA (a) manipulador con alambre de SMA activo y (b) manipulador con alambre de SMA inactivo.

En la Figura 3.23 se presenta el manipulador ya accionado con un alambre de SMA en la parte superior y debido a que éste está activado presenta flexión en la parte central. La forma en que se caracterizó el desplazamiento del manipulador fue en un principio calibrar el software, esto se logra considerando una medida que ya es conocida y que además tenga la misma profundidad comparado con lo que se va a medir. Para el caso del manipulador se calibró con una medida que fue marcada sobre el alambre. Mas adelante se procedió a realizar una línea recta, la cual representa cuando el alambre de SMA no está activo y únicamente se encuentra pre-deformado. Es importante hacer notar que esta recta en este caso tendrá una longitud de 150 mm y una vez que está realizada tal recta se procede a realizar una línea que vaya a lo largo del alambre de SMA activo. Una vez realizada la recta a lo largo del alambre de SMA únicamente se debe de realizar una recta horizontal que vaya desde el final de la recta de 150 mm hasta la del alambre activo, el cual representara en desplazamiento en X. El desplazamiento en Y únicamente consiste en unir la recta que se realizó en X con la recta que representa el alambre activo. De igual forma en la Figura 3.23a se observan específicamente las rectas anteriormente mencionadas y en la Figura 3.23b el manipulador antes de que el alambre se encuentre activo.

Se realizaron ensayos de manera repetitiva donde se buscaron replicar los montajes (pre-deformado del alambre de SMA) y la activación del alambre, los resultados de estos ensayos experimentales se pueden observar en la Tabla 3.9. En este se presentan los desplazamientos en X y Y, los cuales pueden ser comparados con los resultados de los modelos anteriormente presentados en este capítulo. La Tabla 3.9 también presenta los promedios de los desplazamientos, los cuales serán los que son comparados con los modelos que fueron desarrollados con anterioridad.

Tabla 3. 9 - Resultados experimentales de desplazamiento en mm.

Ensayo	Desplazamiento X	Desplazamiento Y	Desplazamiento
1	-3.17	5.21	6.11
2	-3.18	5.37	6.24
3	-3.28	5.25	6.20
4	-3.13	5.50	6.33
5	-3.26	5.25	6.18
6	-3.24	5.38	6.28
7	-3.14	5.35	6.21
8	-3.13	5.52	6.35
9	-3.18	5.39	6.27
10	-3.16	5.69	6.51
Promedio	-3.19	5.39	6.27

3.6.4 Comparativa de resultados de desplazamiento.

La comparativa de los resultados de desplazamiento de los diferentes modelos con los resultados experimentales se presentan en la Tabla 3.10, donde en un principio parecieran similares.

Tabla 3. 10 - Comparación de desplazamientos experimentales en mm.

Modelo	Desplazamiento X	Desplazamiento Y	Desplazamiento Total
ANSYS sin SMA	-3.12	5.67	6.47
ANSYS SMA	-3.04	5.54	6.32
Experimental	-3.19	5.39	6.45
3R-PRBM	-3.25	5.63	6.50
2D ideal	-3.14	5.51	6.34

De igual forma como se llevó a cabo con anterioridad, se calcularon los errores absolutos y relativos porcentuales en la Tabla 3.11, esto con la finalidad de conocer que tan certeros o que tan lejanos se encuentran con respecto al modelo experimental.

Tabla 3. 11 - Errores en modelos comparado con resultados experimentales.

Error	ANSYS sin SMA	3R-PRBM	ANSYS SMA	2D ideal
Error absoluto X (mm)	0.07	0.06	0.15	0.05
Error absoluto Y (mm)	0.28	0.24	0.15	0.12
Error relativo X (%)	2.33	1.90	4.93	1.66
Error relativo Y (%)	4.99	4.32	2.69	2.18

El modelo 2D ideal tiene un comportamiento similar al experimental en donde se tuvo errores relativos porcentuales pequeños los cuales son en X de 1.66% y en Y de 2.18%, los cuales se pueden considerar aceptables. Una de las ventajas que tiene el modelo 2D teórico ideal es que tiene un costo computacional mínimo. Por otra parte, las ecuaciones a emplear son simples y da una buena aproximación del comportamiento que tiene el manipulador. Además, se observa que el modelo FEM que incorpora la aleación con memoria de forma es el que presenta uno de los mayores errores relativos porcentuales, el cual está cerca del 5% en X. A pesar de presentar un error relativo porcentual significativo, no representa una distancia que sea grande, esto se puede observar en los errores absolutos en X, el cual es 0.15 mm, lo cual puede ser despreciable en caso de que la aplicación lo permita. Además, se observa que uno de los modelos que más se aproxima a los resultados experimentales es el modelo de cuerpo pseudo-rígido, teniendo un error máximo del 4.32% en el desplazamiento en Y y este modelo es uno de los que tiene tiempo computacional menor. Por último, en el modelo FEM que no incorpora el alambre de SMA presenta errores que rondan entre un 2% y 5% los cuales podrían considerarse aceptables dependiendo de la aplicación.

En el siguiente capítulo se presenta la evaluación de la factibilidad del empleo de alambre de SMA como medio de accionamiento, donde se explicará a través de energías de deformación si un alambre de SMA tiene la capacidad de deformar otros conectados en serie y paralelo.

Capítulo 4: Evaluación de factibilidad del empleo de alambres de aleación con memoria de forma como medio de accionamiento continuo.

En este capítulo, se presenta la evaluación de la factibilidad del empleo del alambre de SMA como medio de accionamiento. La evaluación consiste en un principio en conectar dos alambres de SMA pre-deformados en serie. Una vez conectados los dos alambres, se activará (austenita) un alambre mientras el otro permanece desactivado (martensita), el propósito de esto es observar si el alambre activo posee la energía suficiente para deformar al inactivo. Este enfoque se ha seleccionado por su simplicidad, ya que proporciona una comprensión más clara del comportamiento de los alambres de SMA sometidos a diversas temperaturas desde una perspectiva energética.

Adicionalmente, se presentarán resultados analíticos que incluirán el cálculo de las áreas bajo las curvas de los diagramas de fuerza-desplazamiento, los cuales representan las energías disponibles o necesarias en cada fase. Posteriormente, se procederá a realizar una comparativa entre datos experimentales de deformación y de la simulación por FEM de dos alambres conectados en serie. Por último, se abordará un modelo más complejo en donde se compararán resultados de deformación experimentales y de FEM de dos alambres de SMA conectados en paralelo.

Un aspecto importante por considerar es que ambos alambres serán conectados en serie o paralelo una vez que hayan sido pre-deformados en un 2% de su longitud inicial. Esto implica que, idealmente, cuando se active uno de los alambres, buscará retornar a un 0% de deformación, mientras que el otro absorberá la deformación del alambre que recupero su forma inicial.

4.1 Alambres de SMA conectados en serie.

El ciclo de movimiento idealizado de dos alambres de SMA conectados en serie con 2% de deformación con respecto a su longitud inicial se presenta en la Tabla 4.1.

Tabla 4. 1 - Etapas de activación de alambres de SMA.

Etapas	Alambre 1	Alambre 2
1	2%	2%
2	0%	4%
3	4%	0%

Se debe de prestar atención a esto debido a que el porcentaje de deformado que tiene el alambre de SMA es con respecto a su longitud inicial, además estos serán colocados sobre el manipulador y en el arreglo de alambres en serie con un 2% de deformación. Debido a que ambos alambres están conectados en un arreglo en serie el comportamiento de uno afectará el otro. Otro punto importante por tomar en cuenta es que en la etapa 2 el alambre 1 de SMA será activado y éste intentará recuperar su longitud inicial pasando del 2% a 0% de deformación. Como consecuencia se espera que el alambre 2 de SMA se vea afectado por el

comportamiento del primer alambre esto generando que se estire un 2% de la longitud que tenía en la etapa 1, pasando de 2% a 4% de deformación. En la tercera etapa se activará el alambre de SMA que cuenta con un 4% de deformación, este regresando a 0% (alambre 2), mientras que el alambre 1 debido a la recuperación del alambre 2 deberá de deformarse un 4%. Es importante recordar que esto es una hipótesis idealizada del comportamiento de los alambres de SMA si son conectados a través de una estructura rígida, el ciclo de accionamiento se presenta en la Figura 4.1.

4.1.1 Análisis analítico de la energía de deformación en alambres de SMA

El diagrama de fuerza-desplazamiento en estado martensítico se observa en la Figura 4.2, donde las áreas que representan la cantidad de energía que es requerida están resaltadas con un contorno rojo. La Figura 4.2a presenta la cantidad de energía necesaria para deformar un alambre de SMA de 2% al 4% en estado martensítico, la cual es de 0.3692 J (etapa 2). La Figura 4.2b presenta la cantidad de energía necesaria para lograr deformar un alambre de SMA de 0% al 4% en estado martensítico, la cual es de 0.6965 J (etapa 3). Un punto por tomar en cuenta es que los diagramas de fuerza-desplazamiento fueron extraídos del modelo FEM. Un detalle importante por tomar en cuenta es que el alambre de SMA con el que se está trabajando tiene una longitud de 147 mm, debido a esto el 2% de su longitud inicial representa un desplazamiento de 3 mm y un 4% es de 6 mm.

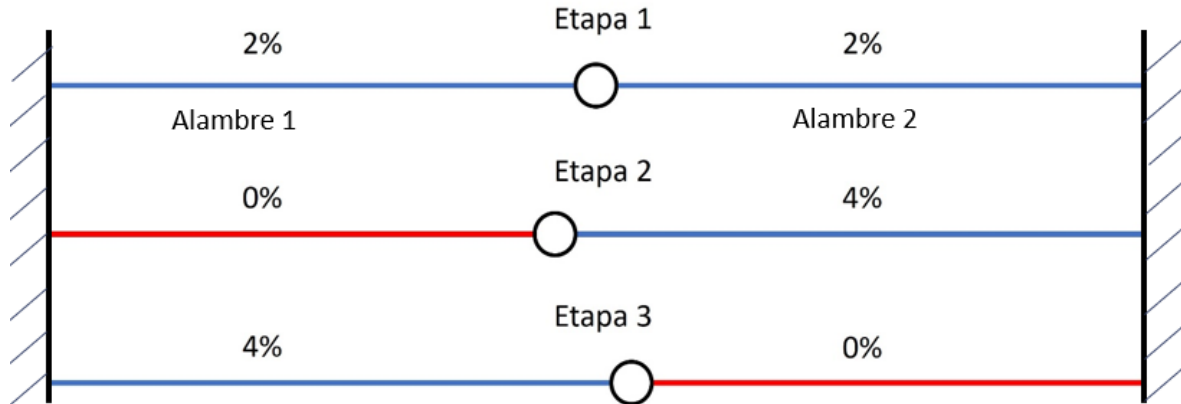


Figura 4. 1: Dos alambres de SMA conectados en serie considerando su ciclo de accionamiento.

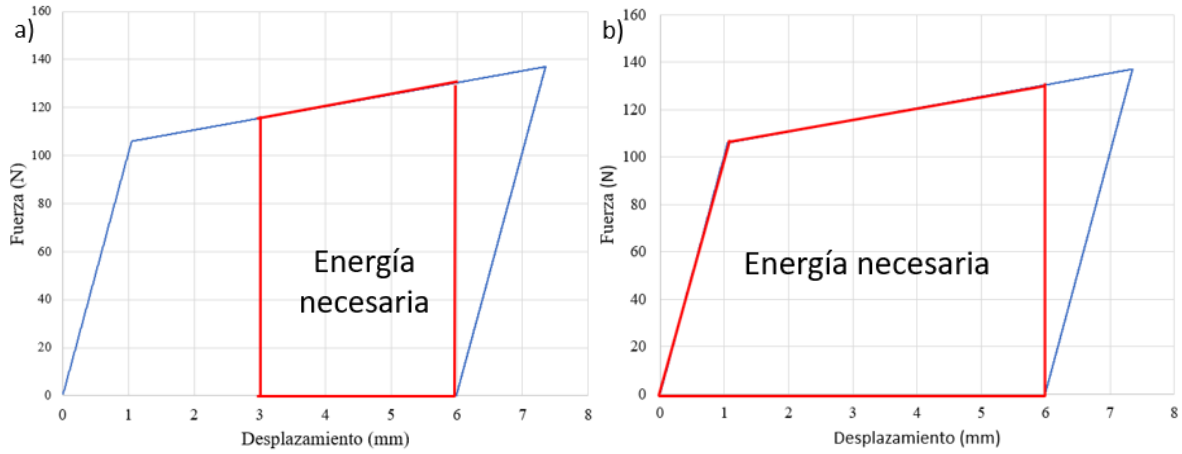


Figura 4. 2: Diagramas fuerza-desplazamiento en estado martensítico a) 2% a 4% y b) 0% a 4%.

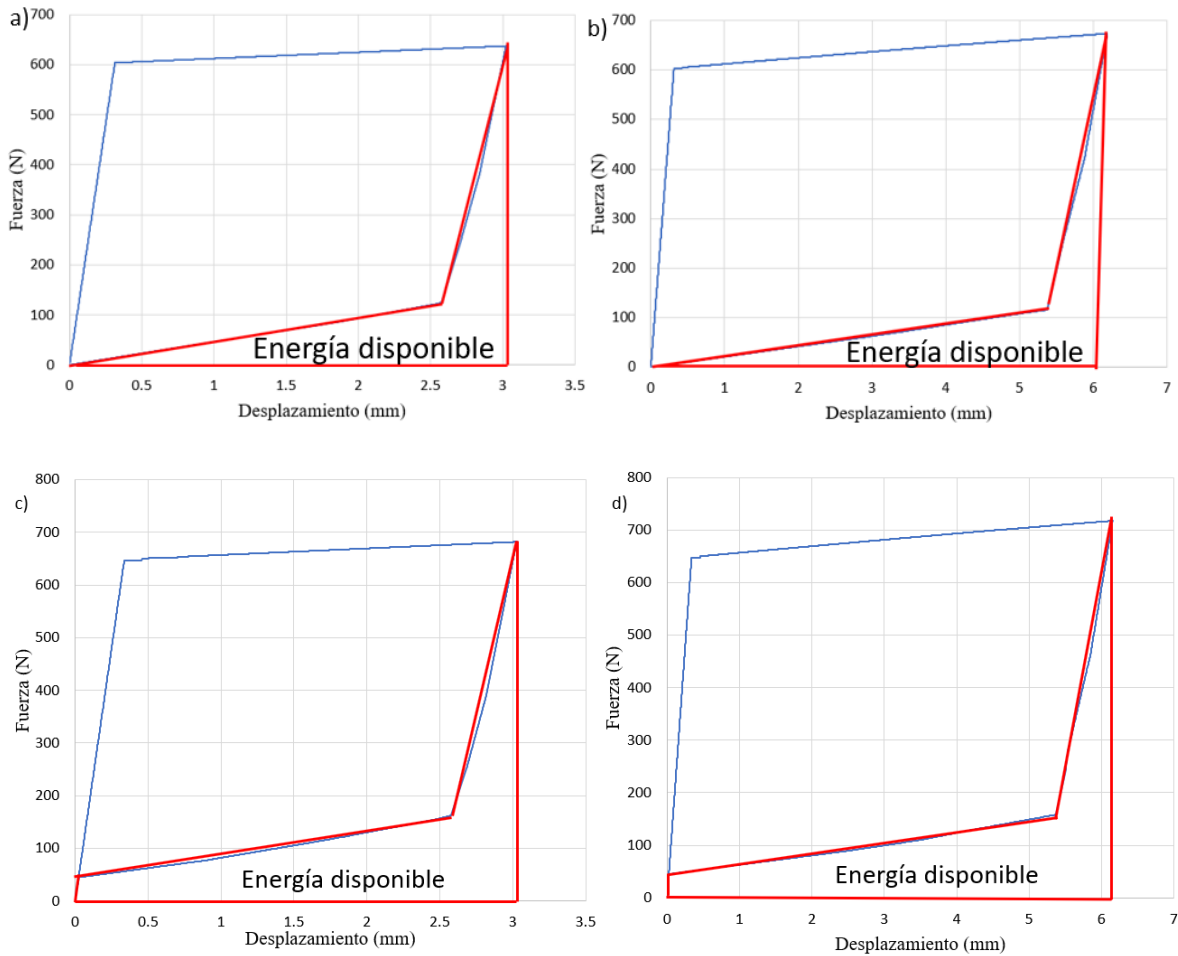


Figura 4. 3: Diagramas fuerza-desplazamiento, a) 60°C a un 2% de deformación (3 mm) en la etapa 2, b) 60°C a un 4% de deformación (6 mm) en la etapa 3, c) 70°C a un 2% de deformación (3mm) en la etapa 2 y d) 70°C a un 4% de deformación (6mm) en la etapa 3.

El diagrama de fuerza-desplazamiento a 60°C y 70°C se presentan en la Figura 4.3, los cuales representan la cantidad de energía que dispone el alambre en el cambio de fase de martensita maclada a austenita al predecirse el efecto de memoria de forma. La Figura 4.3a presenta la cantidad de energía que tiene disponible un alambre de SMA que quiere recuperar su forma desde un 2% al 0% de deformación este resultando en 0.3225 J (etapa 2). En la Figura 4.3b se presenta la cantidad de energía que tiene disponible un alambre de SMA que quiere recuperar su forma desde un 4% al 0% de deformación (etapa 3), está teniendo un valor de 0.5956 J. En la Figura 4.3c y 4.3d se presenta la cantidad de energía con la que cuenta el alambre de SMA cuando se encuentra a una temperatura de 70°C. En Figura 4.3c se presenta la cantidad energía con la que dispone un alambre de SMA que quiere recuperar su forma desde un 2% hasta 0% de deformación (etapa 2), la cual es de 0.4423 J. En la Figura 4.3d se presenta la cantidad de energía con la que dispone el alambre de SMA cuando el alambre de SMA pasa de 4% a 0% de deformación, está teniendo un valor de 0.859 J (etapa 3).

En la Tabla 4.2 se observa una comparativa de la cantidad de energía que requiere el alambre para deformarlo por cada etapa y la cantidad de energía con la que dispone el otro alambre durante el efecto de memoria de forma a diferentes temperaturas. Se observa que la cantidad de energía con la que cuenta el alambre a 60°C no será la suficiente mientras que para 70°C ya deberá de contar con la suficiente energía para deformar el otro alambre que se encuentre en estado inactivo (fase martensítica). Es importante hacer mención que se presentan dos columnas, una hace referencia a la energía disponible, la cual es la energía que tiene el alambre que va a estar activo durante el efecto de memoria de forma (la energía que tiene el alambre de SMA cuando se realiza el cambio de fase de martensita maclada a austenita). La columna que se titula como energía necesaria representa la energía que es requerida para lograr deformar un alambre de SMA en estado martensítico de un 2% al 4% (etapa 2) y de 0% a 4% (etapa 3) de deformación. Tal como se observa en la Tabla 4.2, para la etapa 2 y 3 es necesario que el alambre que se active se encuentre por encima de los 70°C esto con la finalidad de que se logre tener un accionamiento continuo en serie.

Tabla 4. 2 - Energías en diferentes etapas.

Etapa	Temperatura (°C)	Energía disponible (J)	Energía necesaria (J)
2	60	0.323	0.369
	70	0.442	
3	60	0.596	0.697
	70	0.859	

4.2 Modelo FEM de dos alambres de SMA conectados en serie.

Una vez que se corroboró analíticamente la factibilidad del empleo de alambres de SMA a través de los diagramas, donde se hace mención que se contará con la suficiente energía para que un alambre activo deforme a otro en estado inactivo, se procedió a realizar el arreglo de dos alambres de SMA conectados en serie de forma experimental y FEM. En principio se trabajó con el modelo FEM, donde se consideraron las propiedades anteriormente planteadas. En las condiciones de frontera se consideró un extremo fijo en ambos alambres y se realiza

el calentamiento una vez que se realizó el contacto entre ambos alambres pre-deformados a un 2% de su longitud. Una vez pre-deformados los alambres se continuó con el calentamiento del alambre inferior. Esta secuencia se puede observar en la Figura 4.4, donde en la Figura 4.4a los alambres aún no están pre-deformados. En la Figura 4.4b los alambres están pre-deformados a un 2% de su longitud inicial y se encuentra activo el contacto. Por último, en la Figura 4.4c el alambre inferior se activa éste siendo calentado a 60°C.

Es importante hacer mención que en este modelo FEM se hizo uso del contacto anteriormente empleado en el modelo FEM que incorpora el alambre de SMA, el cual se encuentra su explicación en el capítulo 3. El contacto que se emplea es un contacto “bonded”, el cual se activa y desactiva empleando la herramienta “contact step control” que se incorpora en ANSYS Mechanical. En un principio los alambres de SMA no se encuentran pre-deformados y el contacto se encuentra inactivo. Una vez que ambos alambres de SMA se encuentran pre-deformados se procede a activar el contacto empleando la herramienta anteriormente mencionada. Por otra parte, fue requerido activar en la sección de configuración de análisis del software en controles de no-linealidades que las matrices Newton Raphson sean no simétricas, lo cual tiene la función de facilitar la convergencia de la simulación. El activar que las matrices Newton Raphson no sean simétricas es una recomendación del proveedor del software.

En la Figura 4.4c se observa que el alambre inferior de SMA (activo) no se recupera por completo, esto debido a que el alambre de SMA inactivo tiene deformación de 3.246% y debería de ser cercano a 4%. Debido a lo anteriormente planteado se procedió a elevar más la temperatura del alambre activo, esto con la finalidad de que exista una recuperación completa del alambre activo. En la Figura 4.5 se presentan diferentes modelos, donde los alambres de SMA son activados a diferentes temperaturas.

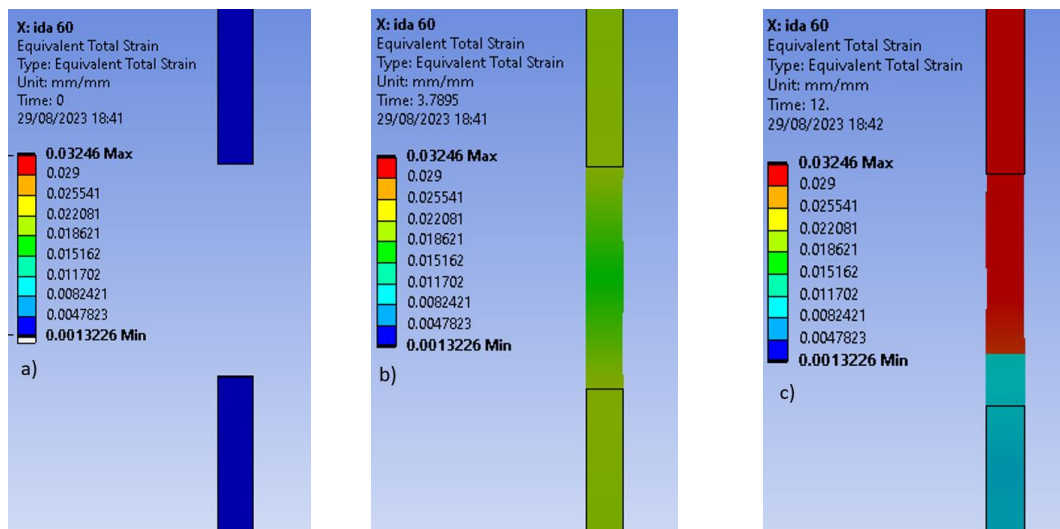


Figura 4. 4: Secuencia de activación de alambres de SMA, a) alambres sin pre-deformar, b) alambres pre-deformados a un 2% de su longitud y c) alambre de SMA inferior activo sometido a 60°C.

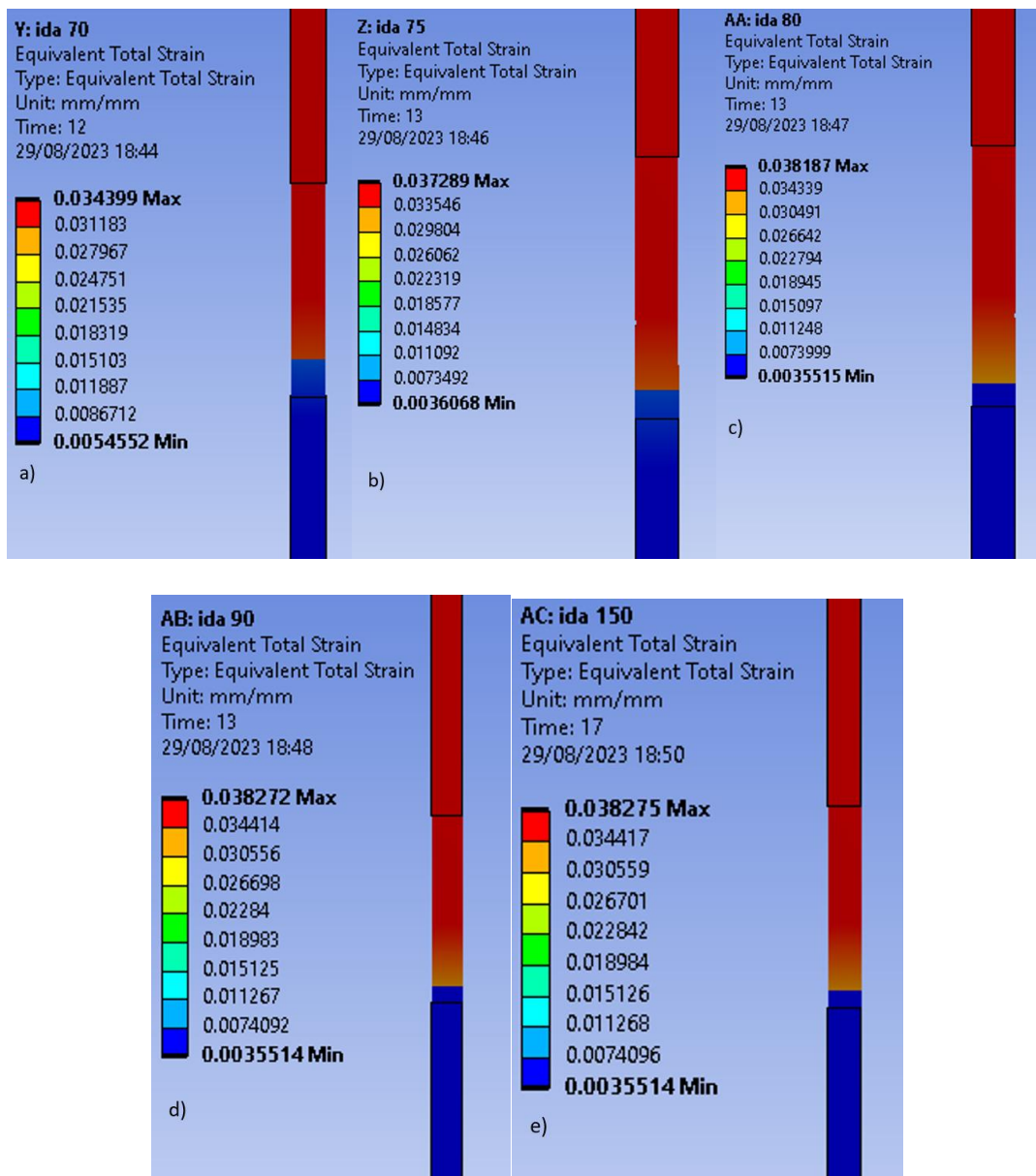


Figura 4. 5: Alambres de SMA activos a diferentes temperaturas mostrando los resultados de deformación, a) 70°C, b) 75°C, c) 80°C, d) 90°C y e) 150°C.

En la Figura 4.5c se observa que la máxima deformación que se logra recuperar es a 80°C. Por otra parte, también se realizaron modelos a 90°C y 150°C esto con la finalidad de observar que la deformación no variara significativamente. Por otra parte, esto se considera una buena aproximación, debido a que los diagramas de fuerza-desplazamiento consideran que existe una recuperación completa en la etapa dos a 70°C, mientras que en el modelo FEM se obtuvo a 80°C. Uno de los motivos por los cuales se podría atribuir esta variación es debido a las idealizaciones que se realizan en el modelo en donde se consideran las pendientes C_M y C_A iguales. Una vez que se completó la etapa 2, se procedió con la etapa 3, donde la secuencia del modelo se presenta en la Figura 4.6.

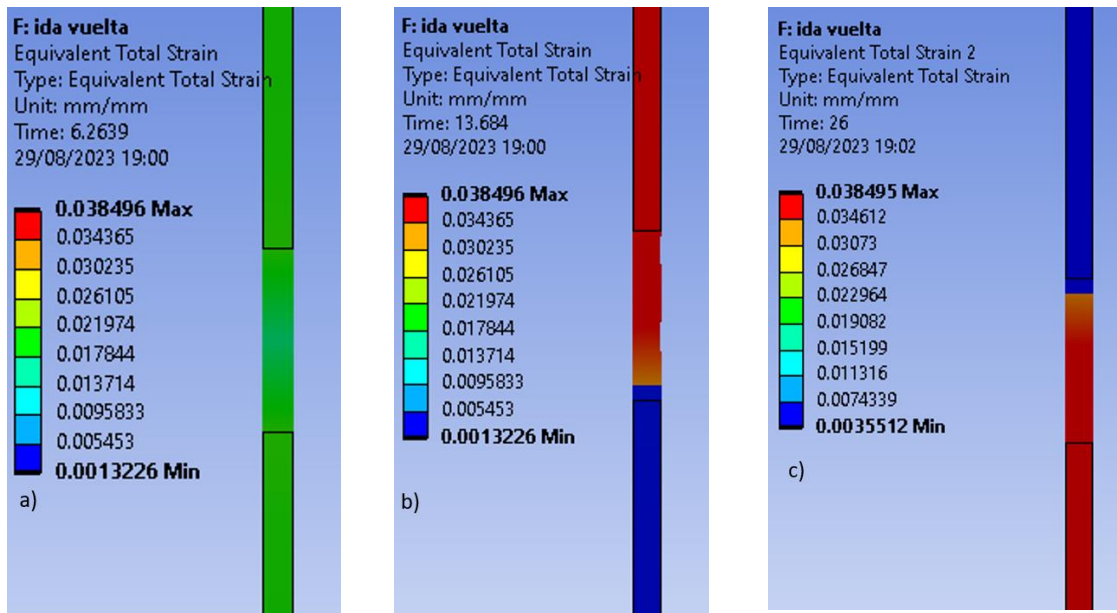


Figura 4. 6: Secuencia completa de activación a) alambres pre-deformados 2% de su longitud inicial, b) alambre inferior activo a 80°C y c) alambre superior activo a 80°C.

En la Figura 4.6 se consideró una temperatura de 80°C y las mismas condiciones de frontera que en la Figura 4.4. En la Figura 4.6a se observan los alambres pre-deformados, mientras que en la Figura 4.6b se activó el alambre inferior. Por último, en la Figura 4.6c se observa el alambre superior activo, así completando las tres etapas anteriormente planteadas. En la Figura 4.6 se observa una recuperación casi completa para cuando el alambre superior o inferior se encuentran activos. Se puede atribuir principalmente que no existe una recuperación completa debido a que en la Figura 4.6 el alambre que había sido activado ya se encuentra a temperatura ambiente (20°C). Debido a lo anteriormente planteado se puede considerar que después de una etapa de calentamiento el alambre de SMA que había sido estirado presenta recuperación elástica, donde su punto de equilibrio está cercano a cuando tiene un 3.849% de deformación.

En la Figura 4.6a se observa ambos alambres pre-deformados a un 2% de su longitud inicial, mientras que en la Figura 4.6b se observa el alambre inferior activo con un valor cercano a 0.13 % de deformación y el alambre superior (inactivo) con un valor cercano a 3.84% de deformación. Por último, en la Figura 4.6c el alambre superior activo tiene un valor cercano a 0.35% de deformación y el alambre inferior (inactivo) con 3.84% de deformación.

4.3 Alambres de SMA conectados en serie experimentalmente.

Una vez que resulto factible el empleo de los alambres de SMA como medio de accionamiento a través del modelo FEM y las energías de deformación para un arreglo en serie, se trabajó con el modelo experimental en donde se conectaron los dos alambres en serie a través de un elemento que aprisiona el alambre de SMA, el cual emplea tornillos. Por otra

parte, el elemento de aprisionamiento no permite el paso de corriente de un alambre a otro mientras se activa únicamente uno. Este sistema de aprisionamiento es muy similar al que se presentó con anterioridad para ensamblar los alambres de SMA con la estructura del manipulador. El arreglo experimental se observa en la Figura 4.7, donde se debe de tomar en cuenta que el extremo de los alambres de SMA que no se observa y se señalan en la figura son consideradas como condiciones de frontera fijas. Por otra parte, es relevante hacer mención que para elevar la temperatura del alambre de SMA se hizo uso de una fuente de alimentación, con la que se puede regular el voltaje.

Se analizaron las deformaciones de los alambres de SMA, donde se empleó una longitud calibrada. Se decidió analizar desde el punto de vista de deformaciones esto con la finalidad de conocer mejor el comportamiento de los alambres de SMA. Por otra parte, se consideró una medida calibrada que se intentó pre-deformar a un 2% de su longitud inicial. Otro punto importante por tomar en cuenta es que también se varió la temperatura, esto con la finalidad de conocer bien el comportamiento de los alambres a diferentes temperaturas, los resultados se pueden observar en la Figura 4.8. Es importante hacer mención que el eje Y es la deformación de los alambres de SMA y el eje X es el número de ensayo.

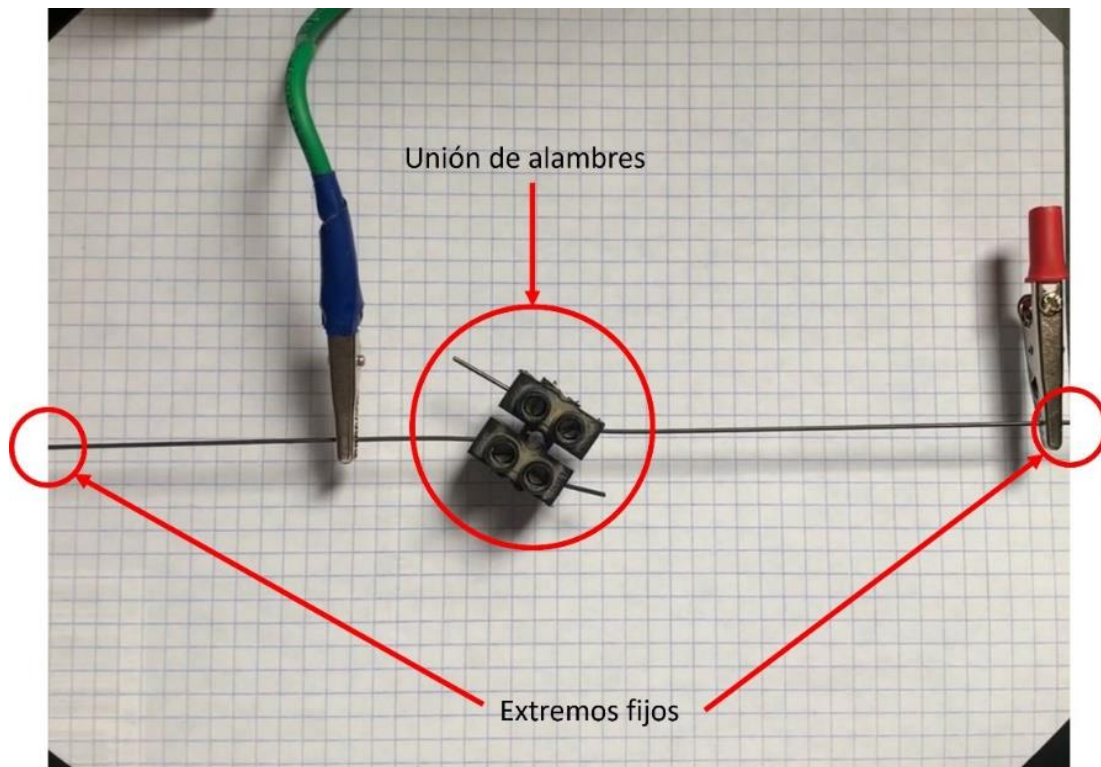


Figura 4. 7: Arreglo experimental de alambres de SMA conectados en serie.

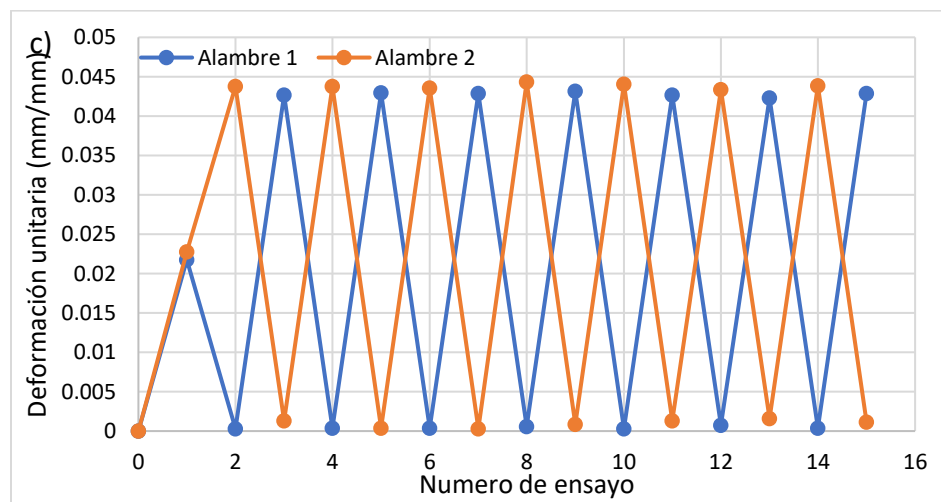
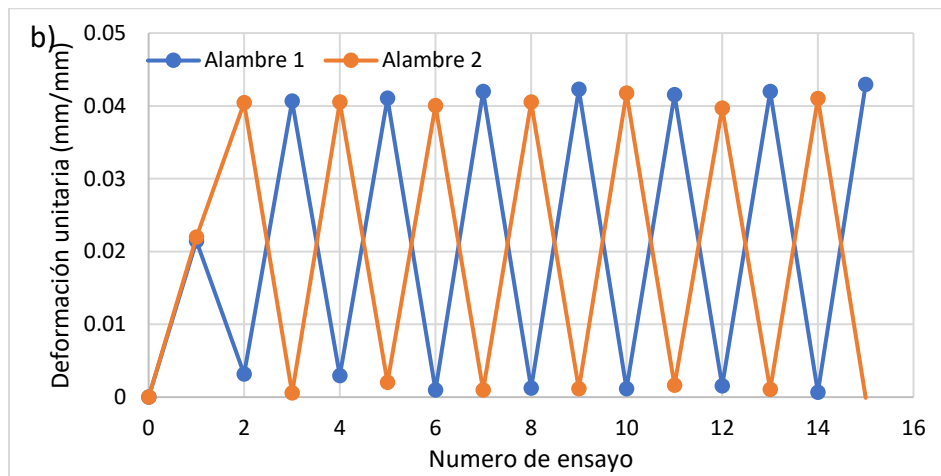
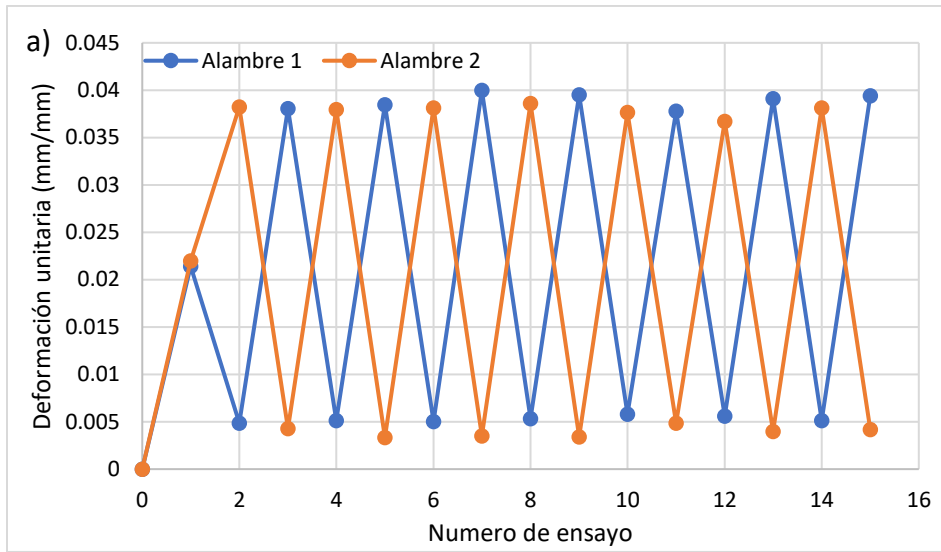


Figura 4. 8: Arreglo experimental de alambres de SMA conectados en serie, a) $T = 60^{\circ}\text{C}$, b) $T = 70^{\circ}\text{C}$ y c) $T = 80^{\circ}\text{C}$.

Como se puede observar en los resultados obtenidos en la Figura 4.8a se tiene una recuperación casi completa a los 60°C. Principalmente se logra observar que conforme se incrementa la temperatura la recuperación del alambre es mayor, esto debido a que tiene una mayor cantidad de energía tal como se puede observar en la Figura 4.8b y c. Por otra parte, es importante hacer mención que a partir de los 70°C (Figura 4.8b) el alambre de SMA activo (austenita) tiene la capacidad de estirar a otro alambre de SMA en estado inactivo (martensita) en cualquiera de las 2 etapas (etapa 2 y 3).

4.4 Alambres de SMA conectados en paralelo en manipulador flexible.

Una vez evaluada la factibilidad del uso de alambres de SMA como medio de accionamiento para un arreglo en serie, se procedió a realizar el mismo procedimiento para cuando estos se encuentran en paralelo. Se colocaron dos alambres de SMA en paralelo en la estructura del manipulador, donde se analizó desde un punto de vista de deformaciones. Para poder conocer la deformación que el alambre de SMA tiene en cualquiera de las tres etapas, se tuvo que considerar una medida calibrada, esta medida calibrada (longitud de caimán a caimán) se puede observar en la Figura 4.9. La medida calibrada se estuvo midiendo a lo largo del proceso empleando un vernier, en donde es importante hacer mención que las medidas que se tomaron fueron una vez que el alambre activo se había enfriado. En la Figura 4.9 se observa cuando se encuentra en la Etapa 2, eso implica que el alambre de SMA superior se encuentra activo.

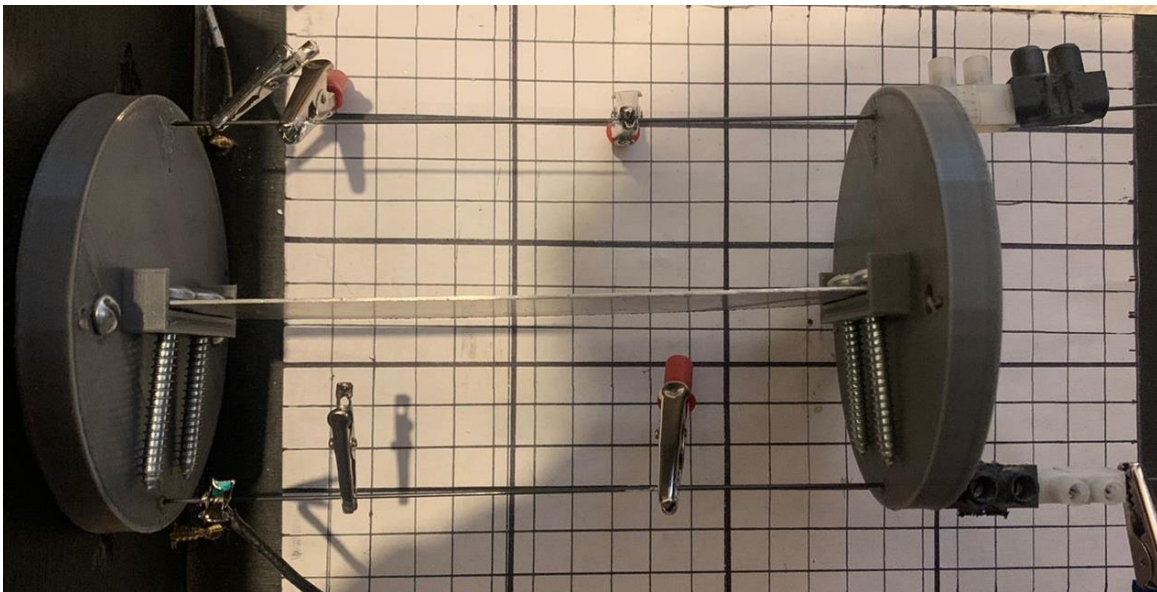


Figura 4. 9: Dos alambres de SMA conectados en paralelo en un manipulador flexible cuando el alambre superior se encuentra activo.

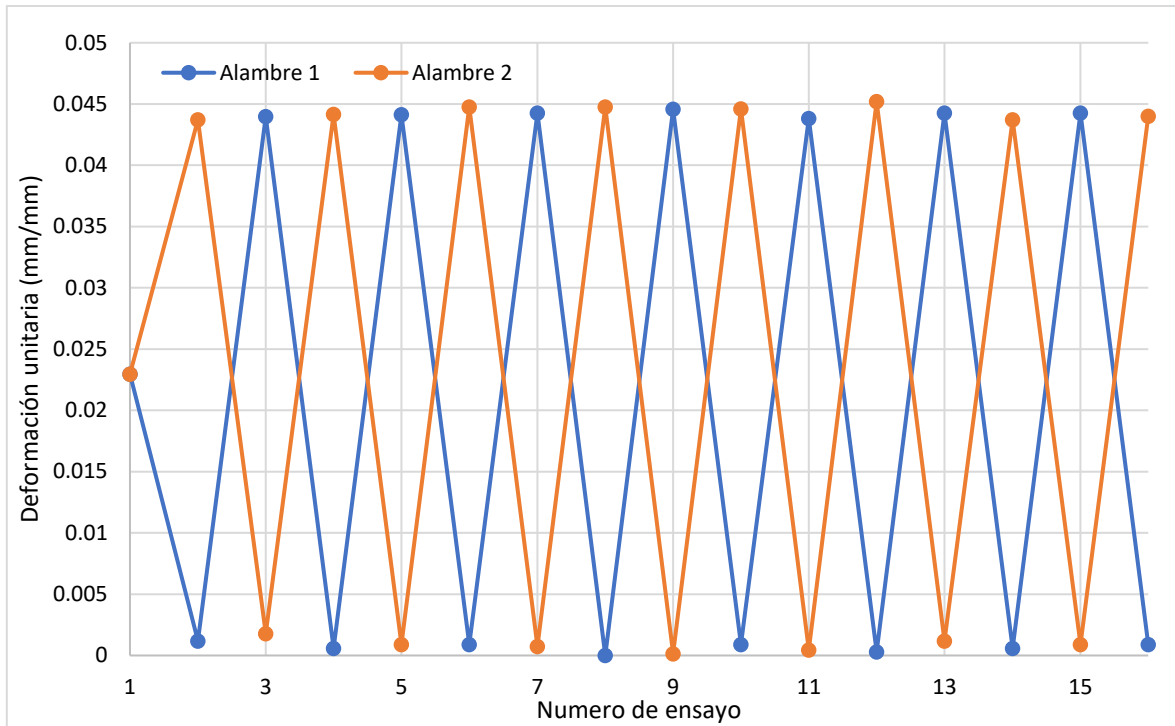


Figura 4. 10: Resultados experimentales de deformación unitaria en un arreglo de dos alambres de SMA conectados en paralelo en un manipulador flexible.

Los resultados de los experimentos realizados se pueden observar en la Figura 4.10, donde en un principio se observa que existe casi una recuperación completa del alambre que se encuentra activo. Es importante hacer mención que ambos alambres en un principio se encontraron deformados aproximadamente a un 2.2% de la longitud calibrada. Por otra parte, la línea de color azul representa un alambre de SMA y la naranja el otro alambre. Además, en la Figura 4.10 se observa que cuando el alambre de SMA que se encuentre activo intentara regresar casi a 0% de deformación, provocando que el alambre que se encuentra inactivo absorba la deformación del alambre que se activó. Lo anteriormente planteado se presenta en la Figura 4.10, donde en el ensayo 2 se activa el alambre 1, lo cual genera que regrese a casi 0% de deformación y el alambre inactivo (alambre 2) quede cercano a un 4.5 % de deformación.

Por otra parte, se realizó el mismo procedimiento en ANSYS, en donde se respetaron las medidas y propiedades del manipulador presentado en el capítulo 3. Las medidas y propiedades de los componentes que integran al manipulador se pueden observar detalladamente en la Tabla 3.1 y Tabla 3.2. Únicamente tomó interés la deformación y debido a eso únicamente se presentan en la Figura 4.11 las deformaciones del manipulador y los alambres en la Etapa 2 (cuando el alambre de SMA superior se encuentra activo y el alambre inferior esta inactivo). En la Figura 4.11a se observa la deformación en el manipulador y en la Figura 4.11b y c se muestra el alambre superior e inferior respectivamente. Es importante hacer mención que se buscó replicar el mismo experimento que se presentó anteriormente, debido a esto los alambres de SMA superior e inferior se pre-deformaron a un 2.2% de su longitud inicial. Es importante hacer mención que este modelo FEM se debe de tomar las

mismas consideraciones que el modelo FEM que incorpora un alambre de SMA que fue presentado en el capítulo 3. La única diferencia con el modelo presentado en el capítulo 3, es que se cuenta con dos alambres de SMA, lo cual implica que se hace uso dos veces de la herramienta “contact step control” y dos contactos “bonded”.

En principio se observa que el alambre que se activó (alambre superior) regresa casi a cero de deformación (Figura 4.11b), mientras que el alambre inferior (Figura 4.11c) absorbe la deformación que tenía en un principio el alambre superior (Figura 4.11b). Por otra parte, en la Figura 4.11a se observa que los discos laterales no se ven deformados debido a las cargas que se encuentran sometidos. El alambre inferior tiene una deformación en porcentaje de 4.32% y el superior es de 0.1147%, lo que quiere decir que si se cuenta con la suficiente energía de pasar de la Etapa 1 a la Etapa 2 en un arreglo en paralelo en el manipulador. Debido a lo anteriormente planteado se continuó con el ciclo de accionamiento, en donde ahora corresponde activar el alambre inferior y observar si este cuenta con la suficiente energía para lograr deformar el alambre superior que se encontrara inactivo (Figura 4.12). En la Figura 4.12a se observa la deformación en el manipulador cuando el alambre inferior se encuentra activo, mientras que en la Figura 4.12b y c son las deformaciones del alambre superior e inferior respectivamente.

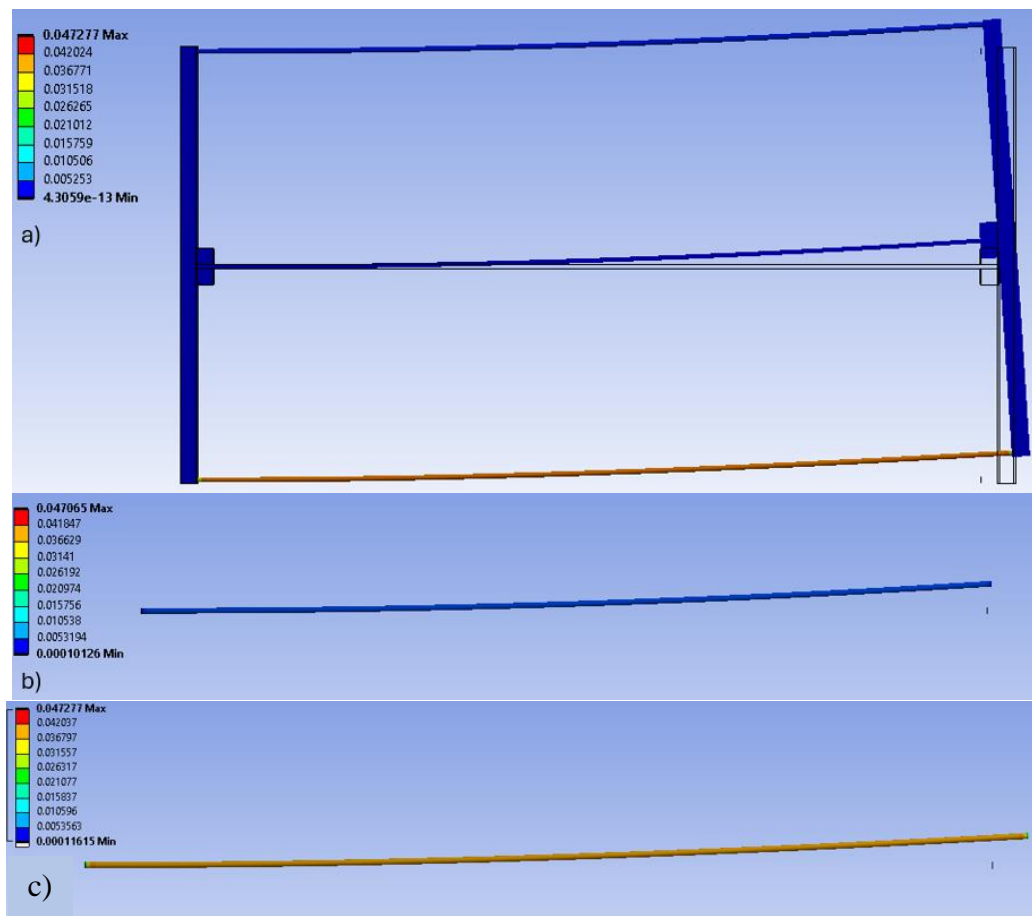


Figura 4. 11: Resultados de deformación en FEM, a) deformaciones de manipulador, b) deformación de alambre de SMA superior y c) deformación de alambre de SMA inferior.

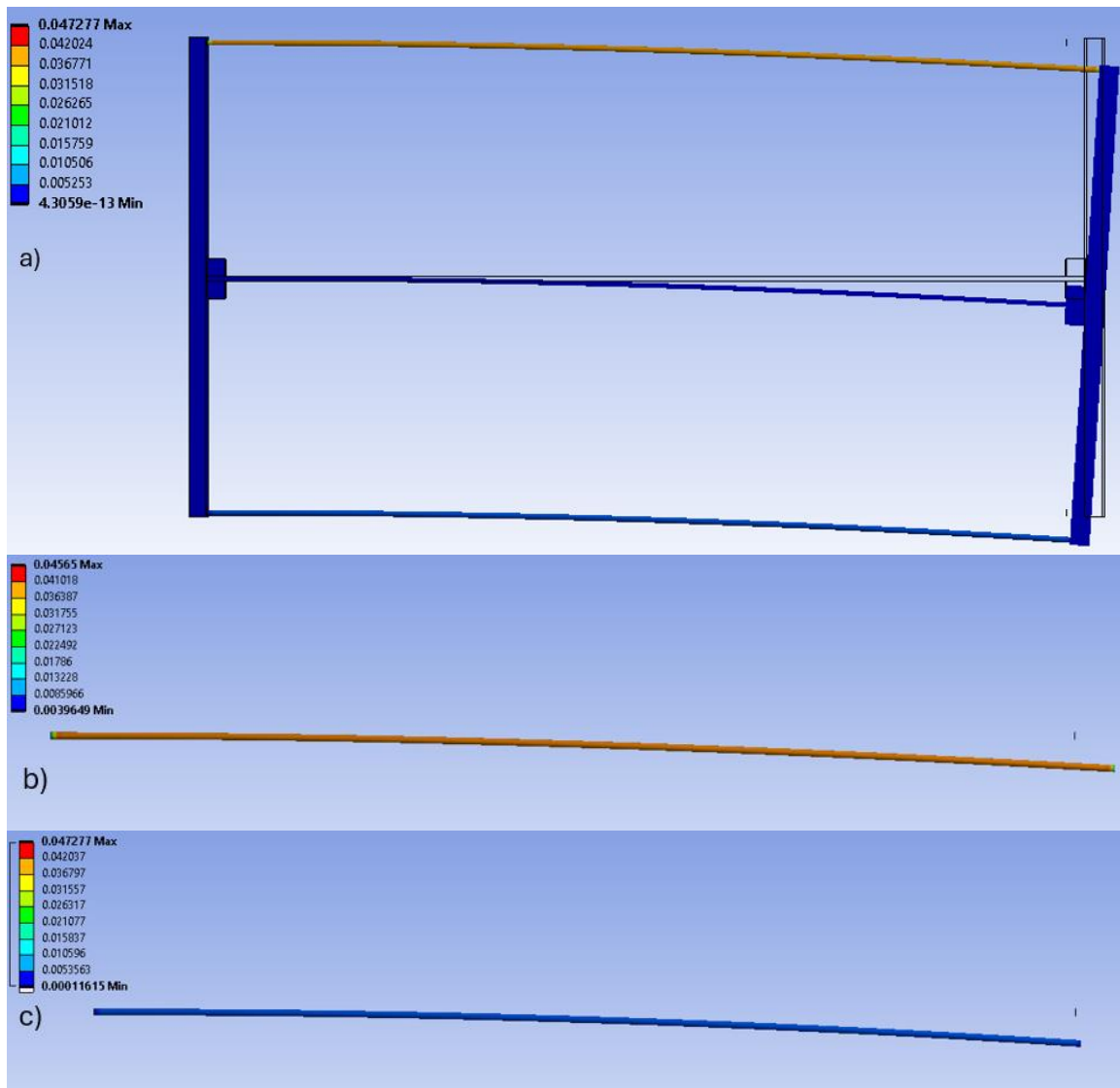


Figura 4. 12: Resultados de deformación en FEM, a) deformaciones de manipulador, b) deformaciones de alambre de SMA superior y c) deformaciones de alambre de SMA inferior.

En la Figura 4.12a se observa que los discos laterales no presentan una deformación significativa, se encuentran cercanos a 0. En la Figura 4.12b se observa el alambre superior que en un principio se encontraba cercano al 0% de deformación y ahora en la Etapa 3 tiene un valor de 4.31 % (Figura 4.12b) de deformación. El alambre inferior (Figura 4.12c) se encuentra cercano a cero, teniendo un valor de 0.145% de deformación en porcentaje. Es importante hacer mención que en el modelo FEM para lograr tener un accionamiento continuo deberán de elevarse el alambre de interés a una temperatura de 80°C tal como fue en el caso del arreglo en serie que se realizó en FEM. Se deduce que se tendrá accionamiento continuo a 80°C debido a que los resultados del modelo FEM de dos alambres conectados en serie permitieron accionamiento continuo a esa temperatura. Además, se iteró la temperatura en el modelo FEM que incorpora los dos alambres de SMA en paralelo y a 80°C se logró

tener accionamiento continuo. Por otra parte, en la Figura 4.13, se presenta el ciclo de deformaciones con respecto a su etapa, esto con la finalidad de mejorar la comprensión de los resultados anteriormente planteados. Es importante recordar, que en ambos alambres comienzan con un 2.2% de deformación y debido a esto en la etapa 1 cuentan con esta deformación.

De esta forma se puede concluir que conforme se eleva la temperatura a la que se encuentra sometido el alambre de SMA, incrementará la cantidad de energía que tiene disponible para deformar otro cuerpo. Por otra parte, también se puede concluir que se tienen resultados similares en los diagramas de fuerza-desplazamiento (energías de deformación) y los resultados experimentales en un arreglo de alambres conectados en serie en los cuales se podrá tener accionamiento continuo a partir de los 70°C de dos alambres conectados en serie. Además, se observó que en FEM existe un ligero desfase en cuanto a la cantidad de energía que tiene este mismo, donde se observa claramente que existe una recuperación completa a los 80°C, está siendo una diferencia de 10°C con respecto a los otros modelos. Este desfase se le puede atribuir a las idealizaciones que realiza el software al incorporar las propiedades mecánicas de los alambres de SMA. Por otra parte, se logró tener un movimiento continuo para un arreglo en serie y en paralelo de dos alambres de SMA, esto brindando una alternativa para accionamiento continuo en un manipulador flexible. Es importante hacer mención, que para este momento aún no se analizan los desplazamientos del manipulador, sino más bien tomaron interés únicamente las energías de deformación y deformaciones que tienen los alambres de SMA bajo diferentes condiciones térmicas.

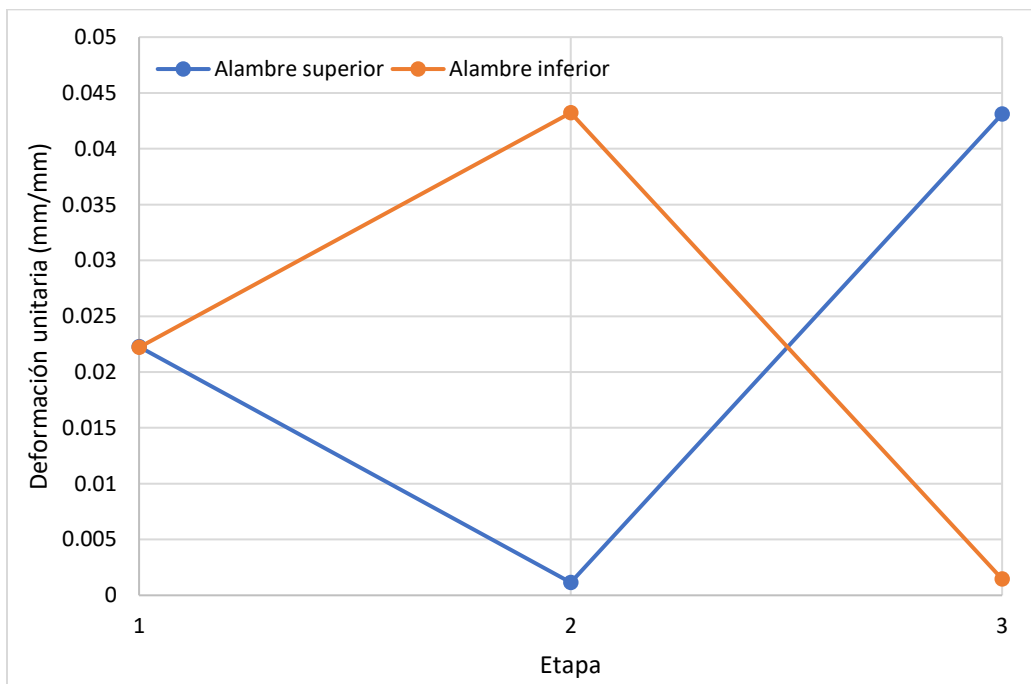


Figura 4. 13: Resultados de deformación en cada etapa en FEM.

4.5 Tiempo de calentamiento y enfriamiento de alambres de SMA

En las etapas 2 y 3 se debe de considerar el tiempo requerido para calentar el alambre de SMA y el tiempo de enfriamiento para lograr que el alambre de SMA regrese a una temperatura en la que se encuentre en la fase martensítica, donde la suma promedio de estos dos tiempos es el tiempo total promedio requerido por cada etapa. Es importante hacer mención que para comenzar con la etapa 2 se deberá de calentar el alambre de SMA por encima de 70°C, el cual será el tiempo de calentamiento. Una vez que se calentó el alambre de SMA se procederá a enfriar hasta la temperatura ambiente esto con la finalidad de que ambos alambres se encuentren en la fase martensítica (tiempo de enfriamiento) y poder comenzar con la etapa 3 (calentamiento de alambre de SMA inferior). Ya completada la etapa 2 se procederá a calentar el alambre inferior y de esta forma comenzar con la etapa 3, donde se deberá de considerar el tiempo de calentamiento. Por último, se deberá de considerar el tiempo de enfriamiento para que el alambre regrese a su fase martensítica y así completando un ciclo de accionamiento del manipulador y la etapa 3. Es importante hacer mención que para el calentamiento del alambre de SMA se hizo uso de una fuente de alimentación con la que se le regulo el voltaje.

En la Figura 4.14 se presentan la gráfica de temperatura contra tiempo del alambre de SMA después de haberlo calentado a 70°C, donde se observa un comportamiento similar al de una ecuación exponencial durante el enfriamiento. Además, en esta también se observa que donde se requiere mayor tiempo es para pasar de 30 °C a 20°C (temperatura ambiente), que corresponde a la última etapa de enfriamiento. El enfriamiento que se presenta en la Figura 4.14 corresponde únicamente a un ensayo.

En la Tabla 4.3 se presentan 10 ensayos experimentales que corresponden al tiempo de calentamiento a 70°C y enfriamiento para la etapa 2. Un punto por tomar en cuenta es que se presentan dos columnas de tiempo de enfriamiento una corresponde a 20°C que es la temperatura ambiente y otra a 27°C que idealmente ya el alambre se encuentra en la fase martensítica. El tiempo de enfriamiento que se empleará para conocer el tiempo total de la etapa es el de la columna de enfriamiento de 27°C. Se puede observar en la Figura 2.7c que a 27°C ya únicamente se encuentra presente la martensita.

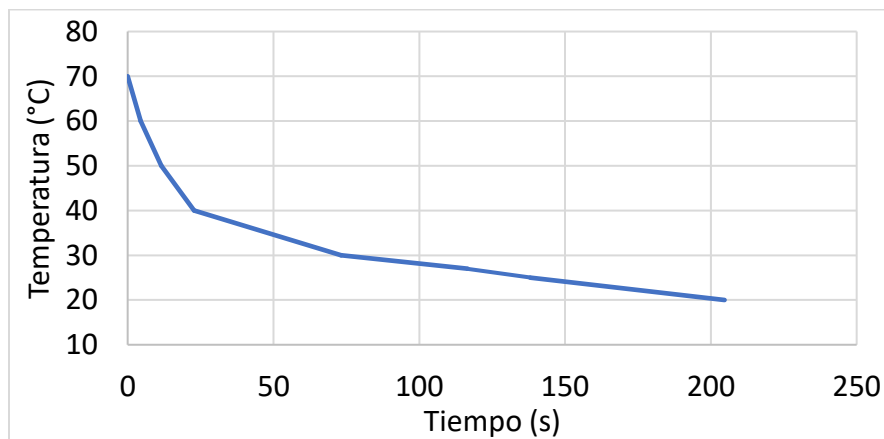


Figura 4. 14: Diagrama de temperatura-tiempo de enfriamiento de un alambre de SMA.

El tiempo total promedio para completar la etapa 2 (Tabla 4.3) se puede considerar de 130.24 segundos, con un tiempo de calentamiento promedio de 12.24 segundos y de enfriamiento promedio de 118 segundos.

Tabla 4. 3 - Tiempo en segundos para la etapa 2

Ensayo	Calentamiento	Enfriamiento (20°C)	Enfriamiento (27°C)
1	12.27	204	119
2	12.64	197	113
3	12.72	203	111
4	11.77	205	120
5	11.92	207	122
6	12.16	201	119
7	12.06	212	128
8	12.82	202	114
9	11.67	207	121
10	12.4	201	113
Promedio	12.24	203.9	118
Total		130.24	

En la Tabla 4.4 se presentan 10 ensayos que corresponden al tiempo de calentamiento y enfriamiento para la etapa 3. Para completar la etapa 3 se requiere un tiempo total de 141.67 segundos, que corresponde a un tiempo de calentamiento promedio de 12.97 segundos y de enfriamiento de 128.7 segundos. El tiempo total para que el manipulador tenga un accionamiento continuo es de 271.61 segundos, este siendo la suma de los totales promedio de la etapa 2 y 3.

Tabla 4. 4 - Tiempo en segundos para la etapa 3

Ensayo	Calentamiento	Enfriamiento (20°C)	Enfriamiento (27°C)
1	13.28	216	121
2	12.42	202	124
3	13.97	205	128
4	12.83	195	126
5	13.3	203	129
6	12.68	190	133
7	13.16	198	128
8	12.06	191	132
9	13.29	192	130
10	12.69	202	136
Promedio	12.97	199.40	128.7
Total		141.67	

Es importante hacer mención que si se incrementa la cantidad de potencia que se le suministra al alambre de SMA el calentamiento y el accionamiento del manipulador será más rápido. Debido a esto se presenta Tabla 4.5, la cual corresponde a la relación entre el tiempo de accionamiento a 70°C del alambre de SMA con la potencia suministrada. Una vez conociendo el tiempo de calentamiento y la potencia que se le aplicó al alambre de SMA, se podrá conocer la cantidad de energía suministrada (E_{sum}) para activar el alambre de SMA a 70°C. Por otra parte, es importante hacer mención que se hizo uso de una fuente de alimentación para el calentamiento del alambre de SMA con la que se podía regular la cantidad de potencia suministrada.

Tabla 4. 5 - Potencia y energía suministrada.

Ensayo	P (W)	t (s)	E_{sum} (J)
1	12.78	12.24	156.43
2	12.78	12.97	165.76
3	14.5	11.04	160.08
4	20.4	7.82	159.53
5	23.4	6.79	158.89
6	25.43	5.84	148.51
7	35.57	4.16	147.97
8	38.74	3.98	154.19
9	38.75	3.85	149.19
10	38.82	3.73	144.80
Energía suministrada promedio			154.53

Tal como se observa en la Tabla 4.5 se tiene una energía promedio suministrada de 154.53 J, la cual forma parte de la ecuación (30), la cual representa el balance de energía.

$$E_{sum} - E_{perd} = E_{SMA} \quad (30)$$

En esta ecuación E_{perd} hace referencia a las pérdidas, E_{sum} es la energía que se le suministra de la fuente de alimentación al alambre de SMA y E_{SMA} corresponde a la energía del alambre de SMA, donde la energía almacenada en el alambre de SMA se expresa con la siguiente ecuación.

$$E_{SMA} = E_{cambio_de_fase} + E_{\Delta T} \quad (31)$$

El término $E_{cambio_de_fase}$ corresponde a la energía que tendrá disponible el alambre de SMA cuando realiza el cambio de fase de martensita maclada a austenítica, la cual depende de la etapa en la que se encuentre el manipulador. Para la etapa 2 se tiene una energía de 0.442 J y en la etapa 3 de 0.859 J a 70°C. Por otra parte, $E_{\Delta T}$ corresponde a la energía que se requiere para elevar el alambre de SMA desde 20°C hasta 70°C, la cual se puede expresar con la ecuación (32).

$$E_{\Delta T} = mC_p\Delta T \quad (32)$$

La masa del alambre de SMA (m) fue despejada a partir de la ecuación de densidad. La densidad del alambre de SMA es de 6450 kg/m^3 , la cual fue extraída de [8]. La masa tiene un valor de $7.446 \times 10^{-6} \text{ kg}$. El C_p es el calor específico, el cual tiene un valor de $837 \text{ J/kg/}^\circ\text{C}$ y fue extraído de [8]. Por otra parte, ΔT será la diferencia entre 70°C y 20°C . Haciendo uso de la ecuación (32) da como resultado un valor para $E_{\Delta T}$ de 31.16 J .

En la Tabla 4.6 se presenta la relación entre las energías anteriormente presentadas, donde se calcula la energía perdida y la eficiencia (e) que tiene el uso de los alambres de SMA como medio de accionamiento para un manipulador flexible. Se observa en la Tabla 4.6 que se tiene una eficiencia promedio del 20%, la cual se obtiene de la división de E_{SMA} sobre E_{sum} .

Thrasher *et al.* [22] realizó el cálculo de la eficiencia de los alambres de SMA como actuador, donde obtuvo eficiencias entre 2.2% y 8.1%. Mas adelante, Motzki *et al.* [21] buscó mejorar la velocidad y la eficiencia energética de los alambres de SMA como medio de accionamiento, donde hace mención que con altos niveles de voltaje se obtendrá un accionamiento más rápido. En su mismo trabajo [21], lograron tener mejoras en el tiempo de accionamiento de los alambres de SMA, los cuales tienen hasta 40ms con un voltaje cercano a 24V. Por otra parte, [21] presenta una eficiencia hasta de 80%. Por último, Arias *et al.* [23] estudiaron también la eficiencia de los alambres de SMA como medio de accionamiento, donde busco mejorar la eficiencia con la finalidad de emplearlos para robots enfocados en la industria médica o aeroespacial. Arias *et al.* [23] concluye que la eficiencia de los alambres de SMA como medio de accionamiento depende específicamente de la configuración en la que sean empleados. Por otra parte, Arias *et al.* [23] hace mención que conforme se incrementan la cantidad de alambres de SMA en la configuración o mecanismo que se desee actuar la eficiencia energética ira decrementando. En base a los trabajos anteriormente presentados se puede concluir que la eficiencia obtenida se encuentra dentro un rango aceptable a comparación de los trabajos encontrados en la literatura. La eficiencia de los alambres de SMA depende específicamente de la configuración empleada y las condiciones térmicas en los que se realizaron los experimentos [23].

Tabla 4. 6 - Balance de energía en diferentes ensayos.

Ensayo	E_{sum} (J)	E_{SMA} (J)	E_{perd} (J)	e (%)
1	156.43	31.53	124.90	20.16
2	165.76	31.86	133.90	19.22
3	160.08	31.86	128.55	19.70
4	159.53	31.86	127.67	19.97
5	158.89	31.86	127.03	20.05
6	148.51	31.86	116.65	21.45
7	147.97	31.86	116.11	21.53
8	154.19	31.86	122.33	20.66
9	149.19	31.86	117.33	21.35
10	144.80	31.86	112.94	22.00
Promedio	154.53	31.79	122.74	20.61

Durante el empleo del manipulador, el mayor tiempo se da durante la etapa de enfriamiento (128.7 s), lo cual puede ser un factor por considerar. Es importante hacer mención que se encontró que se requiere un tiempo promedio de enfriamiento de 128.7 segundos para la etapa 3 y 118 segundos para la etapa 2. Además, se requiere un tiempo promedio de calentamiento de aproximadamente de 12 segundos para ambas etapas, donde el tiempo total promedio es de 130.24 segundos para la etapa 2 y 141.67 segundos para la etapa 3. La cantidad de tiempo requerida para poder completar un ciclo de accionamiento puede ser un factor por considerar en caso de hacer uso de alambres de SMA como medio de accionamiento. Por otra parte, se pierde una cantidad de energía significativa, donde se hace la suposición que es debido a convección. Uno de los puntos relevantes a tomar en cuenta de este capítulo es que se logró tener accionamiento continuo cuando el alambre de SMA se logra elevar a la temperatura de 70°C experimentalmente y a 80°C en FEM. El accionamiento de un manipulador por alambres de SMA brinda una alternativa más para el accionamiento continuo del manipulador, donde uno de los puntos principales a destacar es el poco peso que tienen los alambres de SMA.

En el siguiente capítulo se analizarán los desplazamientos del manipulador flexible con dos alambres de SMA en paralelo, en donde se compararán los resultados experimentales de desplazamiento con los modelos que fueron empleados con anterioridad en el capítulo 3. Por otra parte, también se buscará analizar cómo afectan los parámetros geométricos al desplazamiento del manipulador.

Capítulo 5: Modelado, simulación numérica y experimentación de un manipulador flexible accionado por dos alambres de aleación con memoria de forma

El modelado del manipulador con dos alambres de SMA en paralelo resulta fundamental para poder conocer las capacidades que tiene este mismo bajo diferentes condiciones. En el capítulo anterior se presentó una discusión que habla acerca de la factibilidad del empleo de alambres de SMA como medio de accionamiento continuo en serie o paralelo.

En este capítulo, se exploran diversos métodos para modelar un manipulador con dos alambres de SMA en paralelo. El primer modelo corresponde al modelo FEM que incorpora el alambre de SMA en la geometría del manipulador, pero debido al comportamiento altamente no lineal del alambre este tiene un elevado costo computacional. Se presentan dos modelos adicionales con el objetivo de reducir dicho costo sin sacrificar los resultados de desplazamiento, donde se busca tener errores promedio menores al 5%. Estos modelos prescindirían del alambre de SMA, empleando en su lugar las fuerzas necesarias para alcanzar una posición específica. Dichos modelos son el modelo de cuerpo pseudo-rígido 3R y el modelo en FEM que no incorpora el alambre de SMA en su geometría, los cuales ya fueron presentados en el capítulo 3. Es importante tomar en cuenta que se deben de considerar dos fuerzas apuntando con dirección al disco anterior, esto debido a que una será la fuerza que ejerce el alambre durante su activación y la otra una fuerza que restringe el desplazamiento, la cual representa el alambre inactivo.

A continuación, se introduce inicialmente el modelo FEM que incorpora el alambre de aleación con memoria de forma, detallando las condiciones de frontera y los resultados de desplazamiento del manipulador. Posteriormente, se presentan los dos modelos restantes y se aborda el análisis del diseño del manipulador, explorando cómo los parámetros geométricos afectan el desplazamiento y las fuerzas aplicadas al manipulador. Finalmente, se experimenta con el manipulador accionado por un alambre de SMA, comparando los resultados de desplazamiento obtenidos con los tres diferentes modelos.

5.1 Modelado FEM del manipulador accionado por alambres de SMA en paralelo.

Se emplearon las mismas características geométricas que fueron presentadas en la Tabla 3.1 y de igual forma las propiedades que fueron caracterizadas en el capítulo 2. La diferencia únicamente con respecto a los modelos que se presentaron en el capítulo 3 es que en este capítulo se cuenta con dos alambres de SMA en paralelo.

En el capítulo 4 se presentó que se puede recuperar casi completamente un alambre de SMA estirando a otro, donde además se encontró que si es factible emplear dos alambres de SMA en paralelo en la estructura de un manipulador para que se tenga accionamiento continuo. Por otra parte, es importante hacer mención que bajo ciertas temperaturas el alambre de SMA no contará con la suficiente energía para deformar al otro, pero si se logra incrementar la temperatura lo suficiente se obtendrá un manipulador que cuente con movimiento continuo.

Una de las principales desventajas del modelo FEM que incorpora ambos alambres de SMA es el excesivo costo computacional que tiene, esto debido a que se están modelando dos alambres de SMA, lo cual implica tener altas no linealidades.

En la Figura 5.1 se observa la secuencia de la simulación del manipulador flexible con dos alambres de SMA. La secuencia en el modelo FEM es la siguiente (Figura 5.1):

1. Realizar CAD, contactos “bonded” y definir condiciones de frontera.
 - a. Contactos “bonded” entre eje central y discos laterales.
 - b. Disco lateral izquierdo con condición de frontera fija.
 - c. Extremo lateral izquierdo de ambos alambres de SMA fijo.
2. Aplicar desplazamiento a los alambres de SMA y estructura con la finalidad de pre-deformar el alambre de SMA, donde se debe de considerar la recuperación elástica del material.
 - a. Desplazamiento en X a disco lateral derecho.
 - b. Desplazamiento en X en el extremo lateral derecho de los alambres de SMA.
 - c. Activar contactos “bonded” con la herramienta “contact step control” entre los alambres de SMA y disco lateral derecho.
3. Desactivar desplazamiento a la estructura y los alambres de SMA, esto con la finalidad de que únicamente prevalezca pre-deformado en los alambres de SMA.
4. Elevar la temperatura del alambre de SMA superior por encima de la temperatura de finalización de la fase austenítica ($A_f=70^{\circ}\text{C}$) y dejar enfriar a la temperatura de 20°C (etapa 2).
5. Elevar la temperatura del alambre de SMA inferior por encima de la temperatura de finalización de la fase austenítica ($A_f=70^{\circ}\text{C}$) y dejar enfriar a la temperatura de 20°C (etapa 3).
- 6.

En la Figura 5.2 se observa el manipulador accionado por alambres de SMA en sus dos fases de activación. La primera fase (etapa 2) es cuando el alambre superior esta activo (Figura 5.2a) y la segunda (etapa 3) cuando el inferior esta activo (Figura 5.2b). Otro punto por tomar en cuenta es que cuando el alambre superior este activo (fase austenítica) el alambre inferior estará inactivo (fase martensítica).

Se decidió evaluar el comportamiento del manipulador teniendo dos puntos de evaluación, los cuales serán específicamente en la fibra neutra del alambre de SMA (superior e inferior) en donde realiza el contacto con el disco lateral libre. Los resultados de desplazamiento se pueden observar en la Tabla 5.1, donde se presentan según sus etapas y la posición donde fueron evaluados. El desplazamiento en X de la parte superior cuando el alambre de SMA superior se encuentra activo es de -2.26 mm y el desplazamiento en Y es de 4.09 mm, mientras que el desplazamiento de la parte inferior en X es de 2.18 mm y el desplazamiento en Y es de 4.08 mm. Por otra parte, cuando el alambre inferior se encuentra activo la parte inferior tiene un desplazamiento en X de -2.22 mm y en Y de -4.07 mm, mientras que el desplazamiento de la parte superior es de 2.17 mm en X y -4.09 mm en Y. Es importante prestar atención a estos resultados debido a que estos serán comparados con los demás modelos, donde principalmente se busca tener una reducción significativa en el costo computacional.

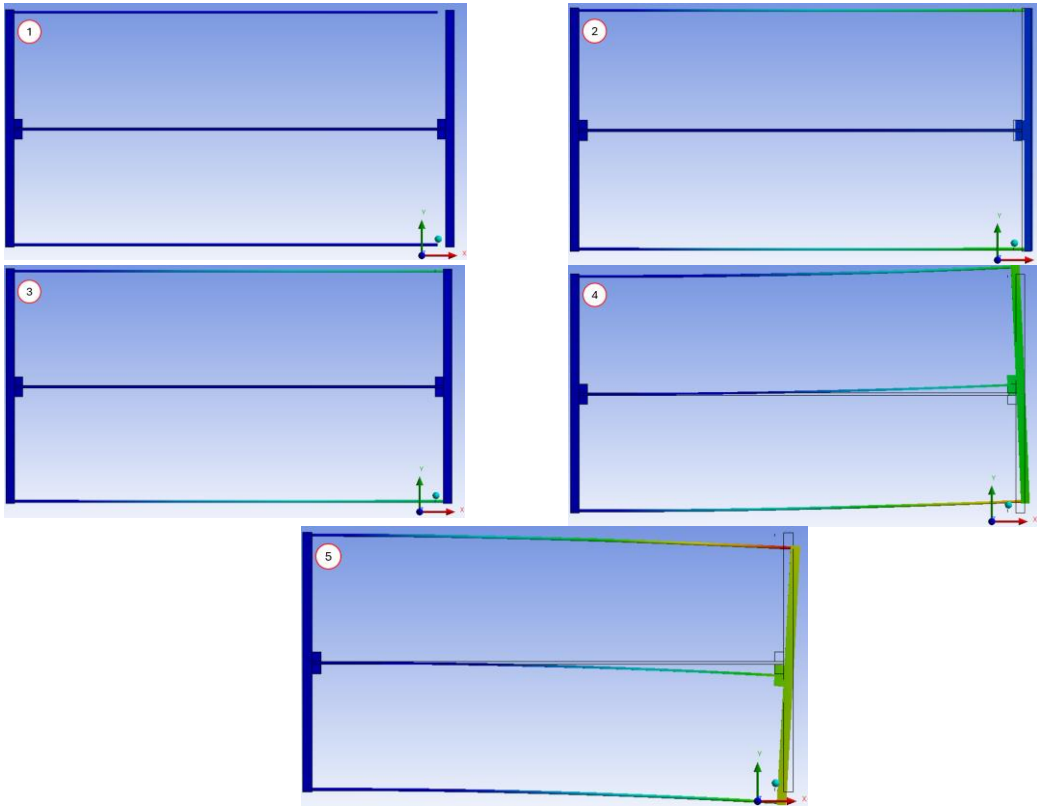


Figura 5. 1: Secuencia de simulación de manipulador con dos alambres de SMA.

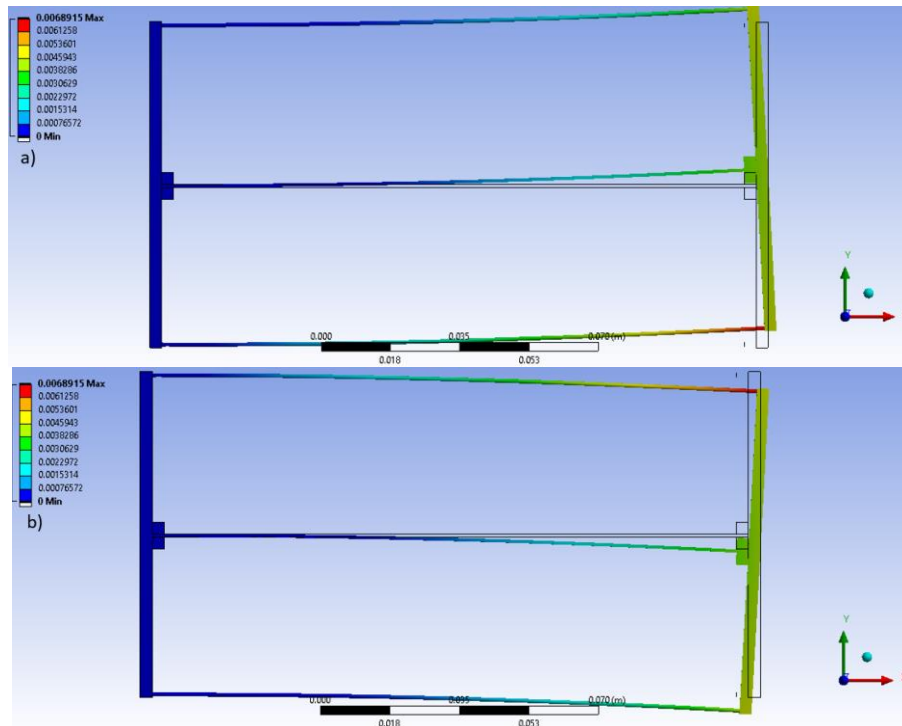


Figura 5. 2: Desplazamiento de manipulador accionado por dos alambres SMA en paralelo, a) etapa 2 y b) etapa 3.

Por otra parte, y como se ha hecho mención a lo largo de este trabajo los otros dos modelos hacen uso de la fuerza de equilibrio del manipulador. Se tendrán dos fuerzas de equilibrio, una que se opone al desplazamiento y otra que se va a favor del desplazamiento, la primera mencionada corresponderá al alambre que no está activo y la segunda al que si lo está. La fuerza del alambre que este activo es de 107.96 N y del inactivo de 105.16 N, las cuales serán empleadas para los dos modelos alternativos que se presentarán a lo largo de este capítulo. Las fuerzas anteriormente mencionadas fueron extraídas del post-procesamiento de los resultados empleando la herramienta “force reaction”. Por otra parte, el tiempo computacional es de 3.05 horas, donde es importante hacer mención que el principal objetivo de realizar los demás modelos es reducir este costo computación sin llegar a afectar significativamente los resultados de desplazamiento del manipulador.

Tabla 5. 1 - Desplazamiento de manipulador por FEM en mm.

Etapa	Parte superior		Parte inferior	
	Desplazamiento X	Desplazamiento Y	Desplazamiento X	Desplazamiento Y
2	-2.261	4.090	2.174	-4.095
3	2.189	4.086	-2.226	-4.077

5.1.1 Fuerza y desplazamiento para un manipulador accionado por dos alambres de SMA

Se procedió a realizar un análisis paramétrico de la geometría del manipulador en FEM, tal como se llevó a cabo en el capítulo 3 pero ahora considerando dos alambres de SMA conectados en paralelo. La finalidad de emplear dos alambres de SMA es lograr obtener un movimiento continuo en el manipulador. El análisis paramétrico de la geometría del manipulador dio como resultado diferentes superficies, las cuales describen la fuerza o el desplazamiento del manipulador. Tal como se mencionó con anterioridad, los parámetros geométricos a variar únicamente serán la excentricidad y la longitud de segmento, esto debido a que son los parámetros que afectan más significativamente el desplazamiento del manipulador. En la Figura 5.3 se observan las superficies que corresponden al análisis paramétrico, es importante hacer mención que se trabajó con longitudes de segmento que van desde 50 mm hasta 250 mm. Por otra parte, en la Figura 5.3 se observa que las excentricidades se variaron desde 25 mm hasta 50 mm, con las cuales se realizaron diferentes combinaciones entre longitudes y excentricidades. Otro punto importante por tomar en cuenta es que las superficies que se observan en la Figura 5.3 corresponden a las ecuaciones de interpolación de las superficies. La Figura 5.3 toma en consideración un total de 20 puntos, cada punto representa una combinación diferente entre longitud y excentricidad, a partir de estos 20 puntos resulta la superficie de interpolación. La Figura 5.3a corresponde a la fuerza del alambre activo (F SMA Activo) y la Figura 5.3b corresponde a la fuerza del alambre que se encuentra inactivo (F SMA Inactivo).

La ecuación que corresponde a la fuerza de accionamiento del alambre que se encuentra activo e inactivo se presenta en la ecuación (33). En la ecuación (33) se presentan diferentes parámetros, estos parámetros escalares varían en función de si se desea conocer la fuerza del

alambre activo o inactivo. Es importante hacer mención que en la ecuación (33), X es la longitud y Y la excentricidad. Los valores de parámetros se presentan en la Tabla 5.2.

$$F = p_{00} + p_{10}X + p_{01}Y + p_{20}X^2 + p_{11}XY + p_{02}Y^2 + p_{30}X^3 + p_{21}X^2Y + p_{12}XY^2 + p_{03}Y^3 \quad (33)$$

En la Tabla 5.2 se presentan los valores de los parámetros que se asignan debido a la aproximación de la superficie, donde la primera columna corresponde al nombre del parámetro. La segunda columna corresponde a los parámetros de la fuerza del alambre activo y la tercera al valor de la fuerza del alambre que no se encuentra activo.

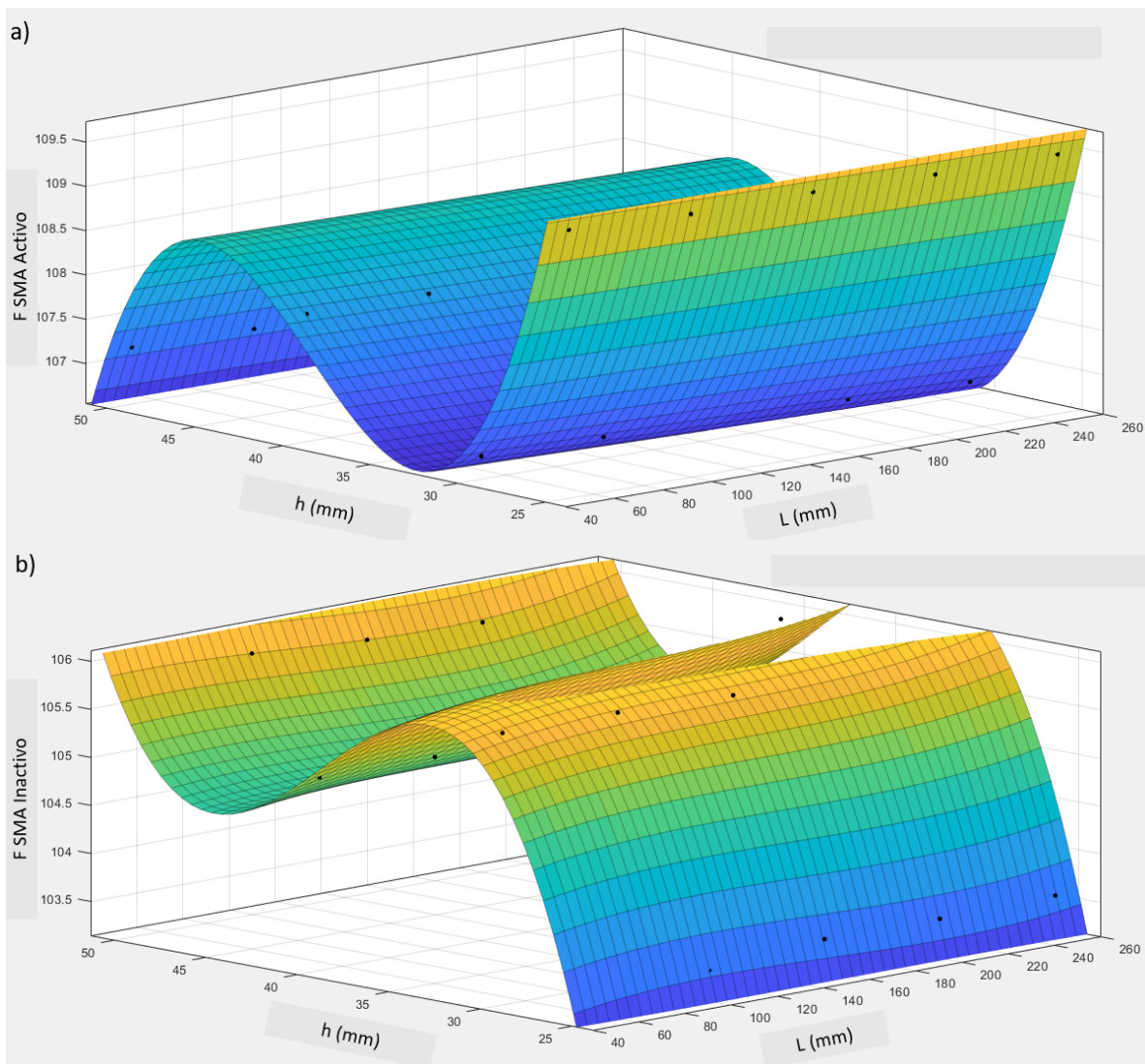


Figura 5. 3: Fuerzas de accionamiento, a) alambre activo y b) alambre inactivo.

Tabla 5. 2 - Parámetros para fuerza considerando dos alambres de SMA.

Parámetro	Valor ($F_{SMA \text{ Activo}}$)	Valor ($F_{SMA \text{ Inactivo}}$)
p00	221.6	15.32
p10	0.002446	-0.002403
p01	-9.394	7.309
p20	2.278E-8	-7.833E-8
p11	-0.0001728	0.000766
p02	0.2508	-0.1937
p30	-8.473E-10	1.417E-7
p21	9.611E-09	5.559E-7
p12	2.338E-06	-1.261E-05
p03	-0.002174	0.001674

Las superficies que se observan en la Figura 5.4 corresponden a los desplazamientos en X o Y de la parte superior e inferior cuando el alambre superior o inferior estén activos dependientes de la excentricidad (h) y longitud (L). Tal como se mencionó con anterioridad se tienen diferentes superficies para describir el desplazamiento en X o Y, donde además van a depender específicamente si se desea conocer la posición de la parte superior o inferior del manipulador, más específicamente donde está realizando el contacto el alambre de SMA con el disco lateral libre. Por otra parte, también va a variar el desplazamiento dependiendo de si el alambre superior o inferior se encuentre activo. Tomando en consideración los desplazamientos en X y Y en el alambre superior e inferior y que dependen de la etapa o el alambre que se encuentre activo dan como total 8 superficies las cuales se pueden observar en la Figura 5.4. Es importante hacer mención que SA hace referencia a que el alambre superior esta activo y IA a que el alambre inferior esta activo.

De igual forma como fue el caso de las superficies de la fuerza del alambre activo e inactivo se tienen un total de 20 puntos y a partir de estos es que resulta la ecuación de la superficie (ecuación 34). Es importante hacer mención que cada punto es el resultado de una combinación diferente de longitud y excentricidad, lo cual da un resultado diferente de desplazamiento en X y Y en el manipulador. La ecuación de las superficies se presenta a continuación, la cual es la misma para todas las superficies la única diferencia es que se modifican los parámetros en función del desplazamiento que se desee.

$$\delta = P00 + P10X + P01Y + P20X^2 + P11XY + P02Y^2 + P30X^3 + P21X^2Y + P12XY^2 + P03Y^3 \quad (34)$$

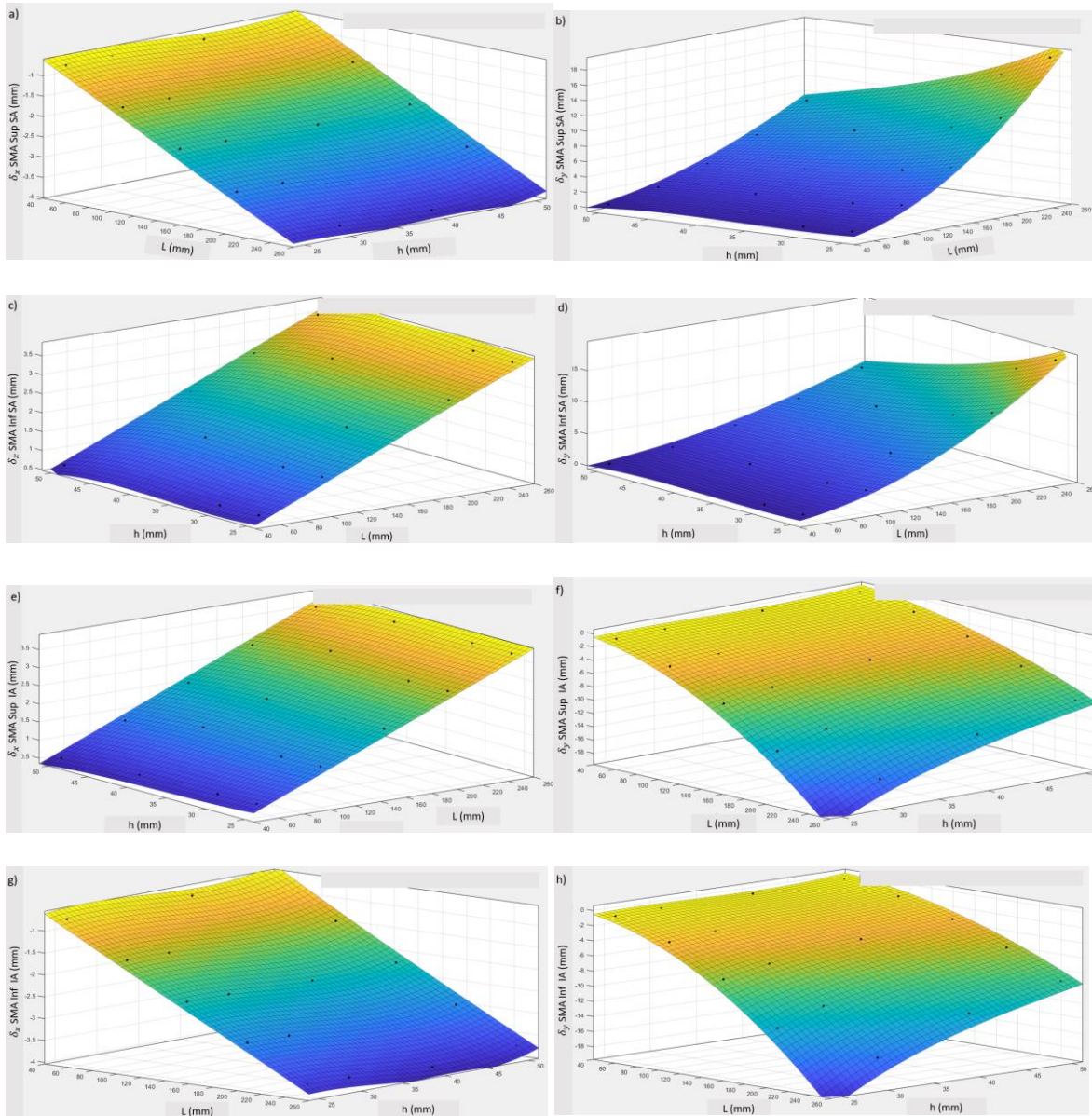


Figura 5. 4: Diagrama desplazamiento (δ) – longitud (L) – excentricidad (h), a) desplazamiento en X de alambre superior cuando está activo el alambre superior (SA), b) desplazamiento en Y de alambre superior cuando está activo el alambre superior (SA), c) desplazamiento en X de alambre inferior cuando está activo el alambre superior (SA), d) desplazamiento en Y de alambre inferior cuando está activo el alambre superior (SA), e) desplazamiento en X de alambre superior cuando está activo el alambre inferior (IA), f) desplazamiento en Y de alambre superior cuando está activo el alambre inferior (IA), g) desplazamiento en X de alambre inferior cuando está activo el alambre inferior (IA) y h) desplazamiento en Y de alambre inferior cuando está activo el alambre inferior (IA),

En la Tabla 5.3 se presentan los parámetros que corresponden cuando el alambre superior esta activo.

Tabla 5. 3 – Parámetros para desplazamiento considerando dos alambres de SMA cuando el alambre superior se encuentra activo.

Parámetro	Valor ($\delta_{X SMA Sup SA}$)	Valor ($\delta_{Y SMA Sup SA}$)	Valor ($\delta_{X SMA Inf SA}$)	Valor ($\delta_{Y SMA Inf SA}$)
P00	-3.609	6.046	3.329	5.488
P10	-0.01143	0.05465	0.01079	0.05566
P01	0.3243	-0.6285	-0.3009	-0.5824
P20	-7.238E-6	0.0004748	7.179E-6	0.0004749
P11	-0.0001896	-0.003384	0.0002091	-0.003444
P02	-0.0009328	0.02081	0.008728	0.01959
P30	2.325E-8	-7.463E-8	-2.736E-8	-7.519E-8
P21	-6.484E-8	-6.076E-6	9.908E-8	-6.072E-6
P12	2.941E-6	4.522E-5	-3.279E-6	4.598E-5
P03	8.514E-5	-0.0002138	-8.16E-5	-0.0002034

En la Tabla 5.4 se presentan los parámetros que corresponden cuando el alambre inferior esta activo.

Tabla 5. 4 – Parámetros para desplazamiento considerando dos alambres de SMA cuando el alambre inferior se encuentra activo.

Parámetro	Valor ($\delta_{X SMA Sup IA}$)	Valor ($\delta_{Y SMA Sup IA}$)	Valor ($\delta_{X SMA Inf IA}$)	Valor ($\delta_{Y SMA Inf IA}$)
P00	1.443	-6.456	-4.116	-6.473
P10	0.01219	-0.05746	-0.01125	-0.05769
P01	-0.1186	0.6689	0.369	0.6703
P20	2.797E-6	-0.0004697	3.294E-6	-0.0004703
P11	0.0001392	0.003487	-0.0002619	0.003504
P02	0.003176	-0.02199	-0.01051	-0.02203
P30	-3.92E-9	6.391E-8	-1.167E-8	6.601E-8
P21	-4.632E-9	6.113E-6	1.269E-7	6.101E-6
P12	-1.775E-6	-4.673E-5	2.822E-6	-4.691E-5
P03	-2.942E-5	0.0002254	9.684E-5	0.0002259

5.2 Modelado del manipulador a través del modelo de cuerpo pseudo-rígido 3R.

Para obtener resultados de desplazamiento por el modelo de cuerpo pseudo-rígido 3R se tuvieron que considerar las dos fuerzas que se ven implicadas durante el proceso de activación del manipulador tal como fue mencionado con anterioridad, estas dos fuerzas se pueden observar en la Figura 5.5. Una de las fuerzas será debido a la activación del alambre de SMA y la otra corresponde a la reacción del alambre que se está deformado (alambre inactivo).

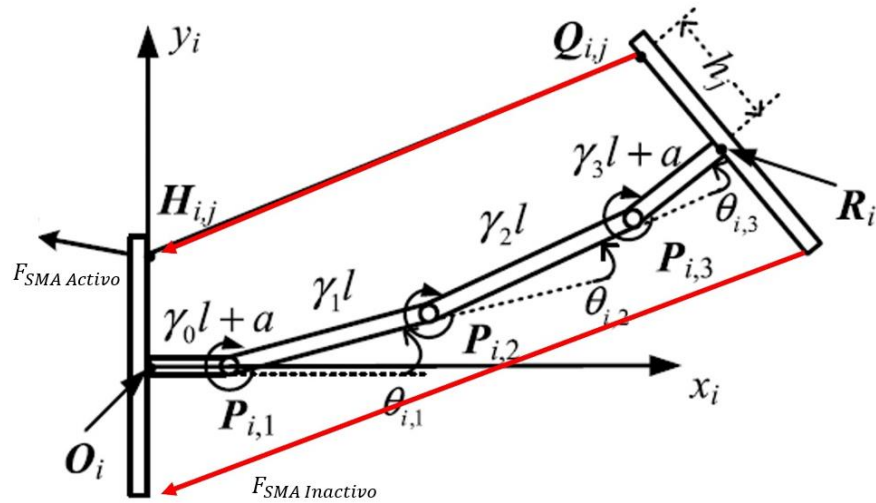


Figura 5. 5: Fuerzas con dos alambres de SMA en un subsegmento analizado a través de 3R-PRBM [4].

Los resultados de desplazamiento se pueden observar en la Figura 5.6. La Figura 5.6a corresponde a cuando el alambre superior esta activo, y la Figura 5.6b cuando el inferior está activo. Un punto por tomar en cuenta es que ambas fuerzas aplicadas al manipulador son grandes, por lo que se tuvieron que aplicar por fracciones hasta completar ambos valores de fuerza. Además, es relevante mencionar que el valor de fuerza para el alambre de SMA que se encuentra activo es de 107.96 N, mientras que para el alambre de SMA inactivo de 105.16 N.

Los resultados de desplazamiento del modelo 3R-PRBM se pueden observar en la Tabla 5.5. Por otra parte, se puede observar que estos están cercanos a los que fueron obtenidos con el modelo FEM que incorpora el alambre de SMA, donde más adelante se compararán y se calcularán los errores. Por último, el costo computacional del modelo de cuerpo pseudo-rígido es de 616.9 segundos, el cual es 15.62 veces menor que el modelo FEM que incorpora el alambre de SMA.

Tabla 5. 5 – Desplazamiento de manipulador empleando el modelo 3R-PRBM en mm.

Etapa	Parte superior		Parte inferior	
	Desplazamiento X	Desplazamiento Y	Desplazamiento X	Desplazamiento Y
2	-2.11	3.84	2.19	-3.94
3	2.13	3.94	-2.15	-3.84

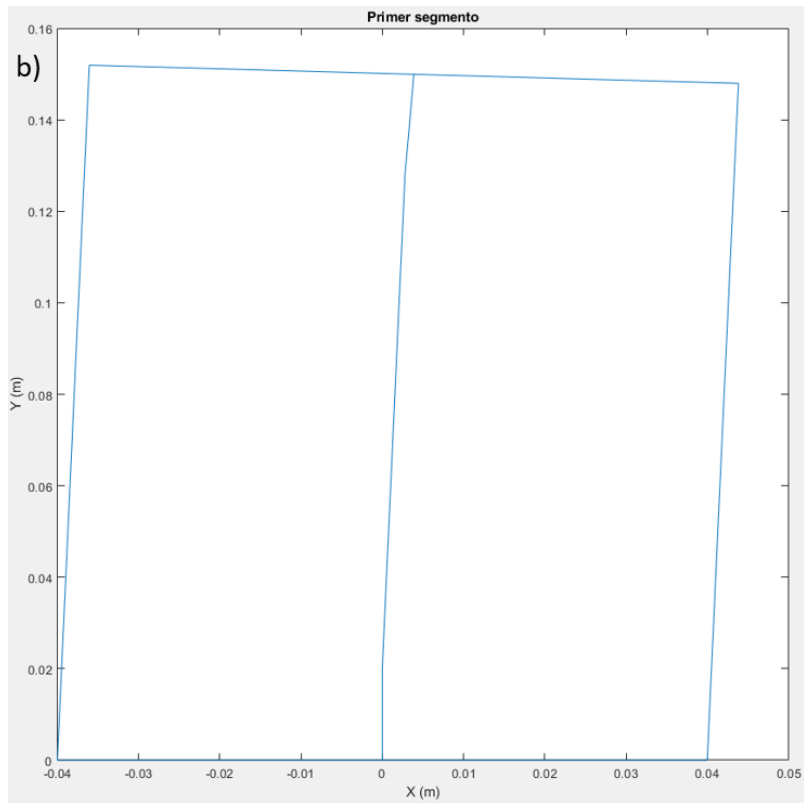
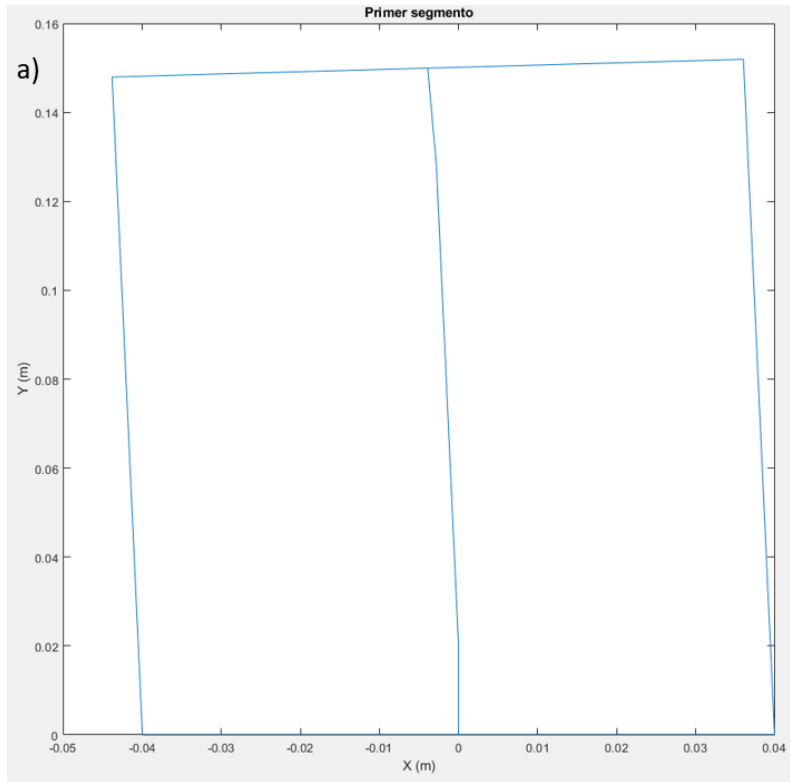


Figura 5. 6: Manipulador accionado por dos alambres de SMA empleando el modelo 3R-PRBM, a) alambre superior activo y b) alambre inferior activo.

5.3 Modelado del manipulador incorporando fuerza de equilibrio en FEM.

Se realizó el modelado del manipulador considerando directamente las fuerzas de equilibrio de los dos alambres de SMA a través del modelo en ANSYS. La única diferencia con respecto al modelo que fue presentado en el capítulo 3 es que en este se deben de considerar dos fuerzas, tal como fue en el caso del modelo de cuerpo pseudo-rígido 3R que fue presentado con anterioridad. Las fuerzas que son empleadas son de 107.96 N para el alambre que se encuentre activo y de 105.16 N para el alambre que se encuentra inactivo. Los valores de fuerza son extraídos de los modelos FEM que incorporan los alambres de SMA en su geometría o bien se pueden extraer empleando la ecuación (33), con la cual se puede calcular la fuerza del alambre activo e inactivo respectivamente. Por otra parte, es importante hacer mención que se hace uso de las mismas condiciones para el modelado que fueron planteadas en el capítulo 3 para el modelo FEM que no incorpora el alambre de SMA, donde la única diferencia es que ahora se deberán de incorporar dos fuerzas de equilibrio. En la Figura 5.7 se presentan el manipulador activado en su etapa dos (Figura 5.7a) y en su etapa 3 (Figura 5.7b). En cuanto a las condiciones de frontera se considera únicamente un extremo fijo del disco que es marcado en la Figura 5.7a, un disco libre (disco derecho) y además dos fuerzas aplicadas que siempre estarán apuntando al disco anterior.

Los resultados de desplazamiento del modelo de ANSYS que no incorpora el alambre de SMA se presenta en la Tabla 5.6. Además, se observa en la Tabla 5.6 que los resultados de desplazamiento del modelo de ANSYS que no incorpora el alambre de SMA son cercanos con los que se presentaron con anterioridad en el modelo FEM que incorpora el alambre de SMA. Más adelante se compararán los resultados de desplazamiento de los diferentes modelos y se calcularán los errores.

Tabla 5. 6 – Desplazamiento de manipulador por FEM sin alambre de SMA en mm.

Etapa	Parte superior		Parte inferior	
	Desplazamiento X	Desplazamiento Y	Desplazamiento X	Desplazamiento Y
2	-2.29	4.11	2.17	-4.12
3	2.28	4.28	-2.36	-4.28

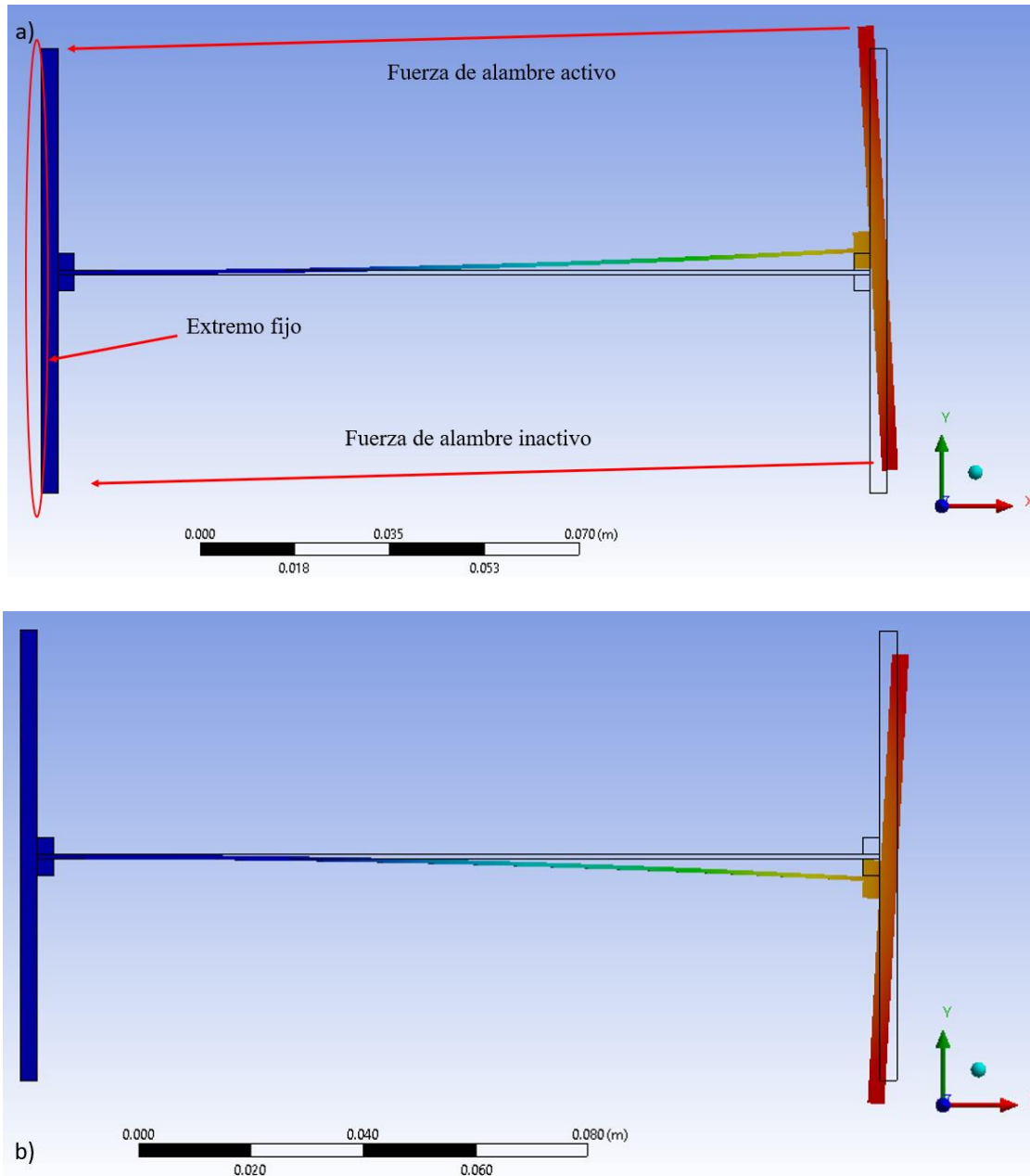


Figura 5. 7: Resultados de desplazamiento para manipulador accionado por dos alambres de SMA en paralelo por el modelo FEM que no incorpora los alambres de SMA en su geometría, a) alambre superior activo y b) alambre inferior activo.

Por otra parte, el costo computacional que requiere este modelo es de 186.39 segundos, el cual es 51.72 veces menor que el modelo FEM que incorpora el alambre de SMA. Es importante destacar la reducción del costo computacional, esto debido a que es significativamente menor al modelo FEM que incorpora el alambre de SMA y además al modelo de cuerpo pseudo-rígido 3R. El principal motivo por el que es mucho menor al costo computacional del modelo de cuerpo pseudo-rígido 3R es porque en este modelo no es necesario ir aplicando la fuerza por fracciones, lo cual es un punto a favor de este modelo.

5.4 Modelo 2D teórico ideal.

El modelo 2D teórico ideal ya fue presentado con anterioridad en el capítulo 3, donde se obtuvieron resultados que tenían una buena aproximación a los resultados de desplazamiento experimentales cuando se considera un alambre de SMA como medio de accionamiento. En la Figura 5.8 se observa un esquema del manipulador cuando el alambre superior se encuentra activo. Por otra parte, en la Figura 5.8 se observa una línea color rojo, la cual representa el alambre de SMA que se encuentra activo para alcanzar esa posición. Además, se observa una línea color azul, la cual en este caso está representando el alambre de SMA que se encuentra inactivo (alambre inferior). Por último, las líneas negras representan la estructura del manipulador. Los desplazamientos son los mismos que cuando se considera un alambre de SMA activado, los cuales son en X de -3.14 mm y en Y de 5.51 mm. Los desplazamientos son exactamente los mismos esto debido a que no se considera la fuerza que se opone al movimiento del manipulador, lo que genera que tenga una curvatura constante. Por otra parte, también se encontró que cuando se consideran dos alambres de SMA en la estructura del manipulador, este no tendrá el mismo radio que es calculado a través de la ecuación (1). Debido a lo anteriormente planteado, el modelo 2D teórico ideal no puede ser empleado en caso de que se quieran tener valores precisos de desplazamiento. Es importante realizar una comparativa con el modelo FEM que incorpora el alambre de SMA en su geometría, el cual tiene un desplazamiento en X en el alambre de SMA que se encuentra activo de -2.14 mm y el modelo teórico ideal de -3.13 mm, lo que implica que tiene un error relativo porcentual del 31% y un error absoluto de 0.99 mm. Por otra parte, el desplazamiento en Y en el alambre de SMA es de 4.005 mm mientras que el modelo 2D teórico ideal es de 5.51 mm, lo cual se traduce en un error relativo porcentual de 27.31% y un error absoluto de 1.50 mm. Los errores porcentuales y relativos pueden ser significativos en caso de aplicaciones en las que se requiera una precisión elevada en el movimiento del manipulador.

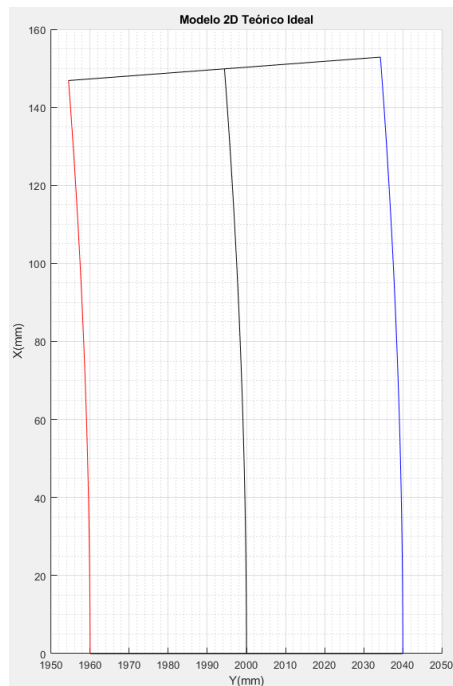
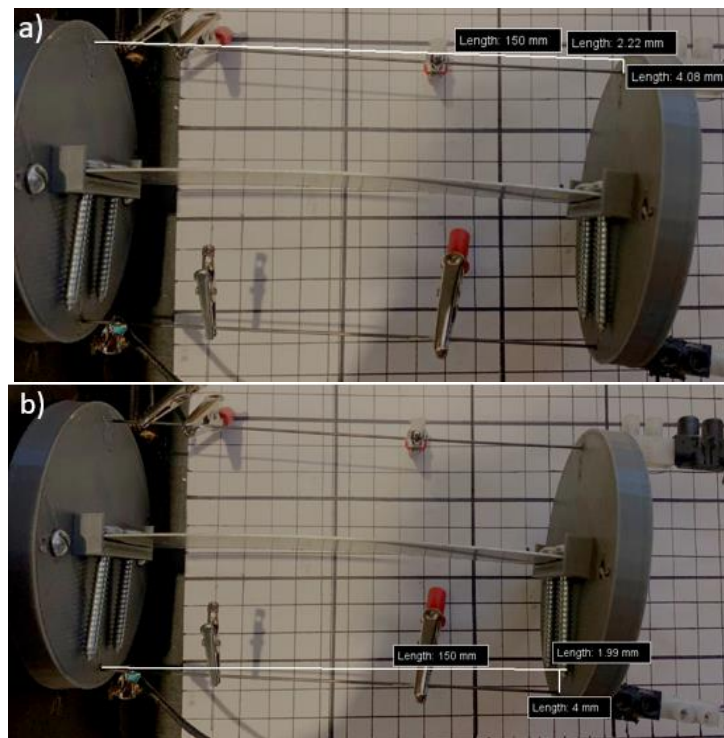


Figura 5. 8: Modelo 2D teórico ideal.

5.5 Desplazamiento del manipulador en modelo experimental.

Para caracterizar los desplazamientos del manipulador experimentalmente se llevó a cabo el mismo procedimiento que se realizó en el capítulo 3. La diferencia con este modelo es que únicamente se llevó a cabo la calibración con la longitud de caimán a caimán que se observa en la Figura 5.9. El procedimiento comenzó con realizar una recta que representa el alambre de SMA cuando aún no está activo y se encuentra pre-deformado a un 2% de su longitud inicial. Mas adelante, se continuó con realizar una recta que represente el desplazamiento en X (recta horizontal), tal como se observa en la Figura 5.9a donde el desplazamiento en X es de 2.22 mm. Por otra parte, también se realizó una recta que represente el desplazamiento en Y (recta vertical), donde el valor en la Figura 5.9b es de 4.08 mm. En la Figura 5.9a se observa el desplazamiento del manipulador cuando el alambre inferior se encuentra activo y el superior inactivo, donde únicamente se caracterizó el desplazamiento que sufre el alambre que se encontraba inactivo (alambre superior). En la Figura 5.9b se está caracterizando el desplazamiento que sufre el alambre el alambre que se encontraba activo (alambre inferior). Es importante hacer mención que las fotografías que son presentadas es cuando ambos alambres ya se encuentran fríos, esto implica que con anterioridad se elevó la temperatura del alambre que se encontraba activo hasta sobre pasar la temperatura de finalización de la fase austenítica, que en el caso de la Figura 5.9a y b es el alambre inferior. En la Figura 5.9c se presenta el manipulador cuando el alambre superior se encuentra activo y se caracteriza el desplazamiento del alambre inactivo (alambre inferior). Por último, en la Figura 5.9d se presenta cuando el alambre superior se encuentra activo y se caracteriza el desplazamiento del alambre que se activó (alambre superior).



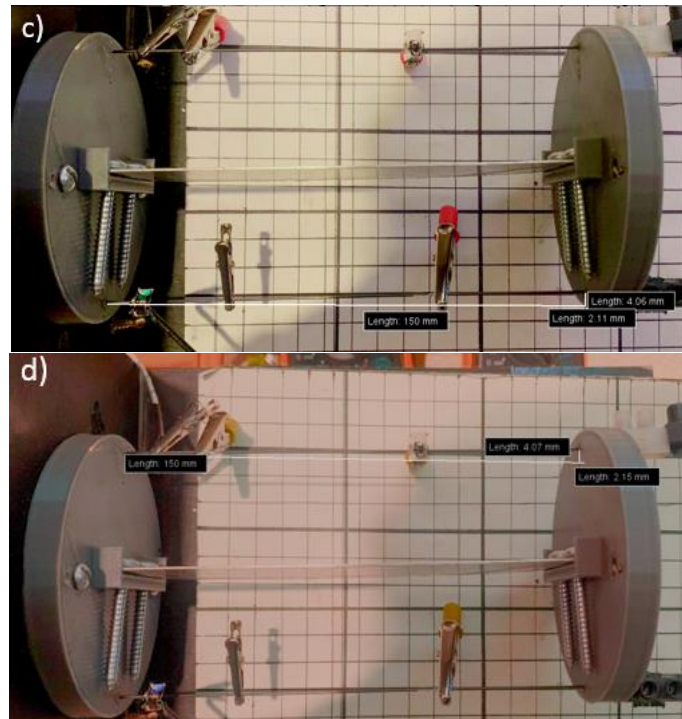


Figura 5. 9: Modelo experimental de manipulador accionado por alambre de SMA en arreglo paralelo, a) alambre de SMA inferior activo, caracterización de desplazamiento del alambre superior, b) alambre de SMA inferior activo, caracterización de desplazamiento de alambre inferior, c) alambre de SMA superior activo, caracterización de desplazamiento de alambre inferior y d) alambre de SMA superior activo, caracterización de desplazamiento de alambre superior.

Los resultados de desplazamiento del alambre de SMA superior cuando se encuentra activo se presentan en la Tabla 5.7. Es importante hacer mención que se realizó un total de 10 ensayos, donde se promediaron los 10 resultados de desplazamiento en X y Y. Los resultados promedio de desplazamiento en X son de -2.143 mm y en Y de 4.008 mm. Por otra parte, es importante recordar que SA hace referencia a alambre superior activo.

Tabla 5. 7 – Desplazamiento de Alambre Superior SA en mm.

Experimental			
Ensayo	Desplazamiento X	Desplazamiento Y	Desplazamiento
1	-2.04	3.95	4.45
2	-2.19	3.79	4.38
3	-2.17	4.06	4.60
4	-2.15	4.07	4.59
5	-2.08	4.1	4.60
6	-2.22	3.94	4.52
7	-2.15	4.15	4.67
8	-2.29	3.86	4.49
9	-2.1	4.25	4.74
10	-2.04	3.92	4.42
Promedio	-2.143	4.008	4.55

Los resultados de desplazamiento del alambre de SMA inferior cuando se encuentra activo el alambre superior se presentan en la Tabla 5.8. Los resultados promedio de desplazamiento en X son de 2.108 mm y en Y de 4.028 mm.

Tabla 5. 8 – Desplazamiento de Alambre Inferior SA en mm.

Experimental			
Ensayo	Desplazamiento X	Desplazamiento Y	Desplazamiento
1	2.11	4.06	4.58
2	2.14	4.02	4.55
3	2.06	4.12	4.61
4	2.12	3.98	4.51
5	2.19	4.12	4.67
6	2.05	4.11	4.59
7	2.03	3.81	4.32
8	2.12	3.88	4.42
9	2.18	4.16	4.70
10	2.08	4.02	4.53
Promedio	2.108	4.028	4.55

Los resultados de desplazamiento del alambre de SMA superior cuando se encuentra activo el alambre inferior se presentan en la Tabla 5.9. Los resultados promedio de desplazamiento en X son de 2.224 mm y en Y de -4.071 mm. Es importante recordar que IA hace referencia a alambre inferior activo.

Tabla 5. 9 – Desplazamiento de Alambre Superior IA en mm.

Experimental			
Ensayo	Desplazamiento X	Desplazamiento Y	Desplazamiento
1	2.22	-4.08	4.64
2	2.29	-4.04	4.64
3	2.18	-4.13	4.67
4	2.13	-4.02	4.55
5	2.23	-4.18	4.74
6	2.29	-4.12	4.71
7	2.24	-3.95	4.54
8	2.32	-4.09	4.70
9	2.18	-4.02	4.57
10	2.16	-4.08	4.62
Promedio	2.224	-4.071	4.64

Los resultados de desplazamiento del alambre de SMA superior cuando se encuentra activo el alambre inferior se presentan en la Tabla 5.10. Los resultados promedio de desplazamiento en X son de -2.216 mm y en Y de -4.018 mm.

Tabla 5. 10 – Desplazamiento de Alambre Inferior IA en mm.

Experimental			
Ensayo	Desplazamiento X	Desplazamiento Y	Desplazamiento
1	-1.99	-4	4.47
2	-2.2	-4.05	4.61
3	-2.28	-4.07	4.67
4	-2.19	-4.06	4.61
5	-2.28	-3.99	4.60
6	-2.16	-4.02	4.56
7	-2.27	-3.95	4.56
8	-2.24	-3.98	4.57
9	-2.3	-4.05	4.66
10	-2.25	-4.01	4.60
Promedio	-2.216	-4.018	4.59

5.6 Comparación de resultados de desplazamiento.

La comparativa de los resultados de desplazamiento de los diferentes modelos con los resultados experimentales del alambre superior cuando este se encuentra activo se presentan en la Tabla 5.11.

Tabla 5. 11 – Comparación de desplazamientos de Alambre Superior SA en mm.

Modelos	Desplazamiento X	Desplazamiento Y	Desplazamiento
Experimental	-2.14	4	4.54
ANSYS dos SMA	-2.26	4.09	4.67
ANSYS Fuerza	-2.29	4.10	4.70
3R-PRBM	-2.10	3.83	4.38
2D ideal	-3.13	5.51	6.34

Por otra parte, se presentan los errores absolutos y relativos porcentuales en la Tabla 5.12, donde es importante considerar que el desplazamiento correcto son los resultados experimentales que se presentaron en la Tabla 5.11. Lo principal que se observa es que los errores son pequeños, el único error que es grande es el del modelo 2D ideal el cual ya se explicó con anterioridad. El error más grande que tienen los modelos sin considerar el modelo 2D es el caso del modelo de ANSYS sin SMA el cual tiene un error de 6.45%.

Tabla 5. 12 – Errores en modelos comparado con resultados experimentales de Alambre Superior SA.

Error	ANSYS sin SMA	3R-PRBM	ANSYS SMA	2D ideal
Error absoluto X (mm)	0.14	0.03	0.11	0.99
Error absoluto Y (mm)	0.10	0.17	0.08	1.50
Error relativo X (%)	6.45	1.61	5.21	31.70
Error relativo Y (%)	2.47	4.4	2.01	27.25

La comparativa de los modelos con los resultados experimentales de desplazamiento del alambre inferior cuando el alambre superior se encuentra activo se presentan en la Tabla 5.13.

Tabla 5. 13 – Comparación de desplazamientos de Alambre Inferior SA en mm.

Modelos	Desplazamiento X	Desplazamiento Y	Desplazamiento
Experimental	2.11	4.03	4.55
ANSYS dos SMA	2.17	4.10	4.64
ANSYS Fuerza	2.17	4.12	4.65
3R-PRBM	2.19	3.94	4.50
2D ideal	2.86	5.73	6.41

Además, se presentan los errores absolutos y relativos porcentuales correspondientes en la Tabla 5.14, donde es importante considerar que el desplazamiento correcto son los resultados experimentales que se presentaron en la Tabla 5.13. El error más grande que tienen los modelos sin considerar el modelo 2D es el caso del modelo de 3R-PRBM el cual tiene un error de 3.56%. Por otra parte, se observa que el modelo que tiene mejor precisión en ambos desplazamientos es el caso del modelo de ANSYS que no incorpora el alambre de SMA en su geometría. Además, el modelo que tiene menor error relativo porcentual en Y es el modelo de ANSYS que incorpora el alambre de SMA en su geometría.

Tabla 5. 14 – Errores en modelos comparado con resultados experimentales de Alambre Inferior SA.

Error	ANSYS sin SMA	3R-PRBM	ANSYS SMA	2D ideal
Error absoluto X (mm)	0.05	0.07	0.06	0.74
Error absoluto Y (mm)	0.08	0.09	0.06	1.7
Error relativo X (%)	2.74	3.56	3.04	26.2
Error relativo Y (%)	2.14	2.28	1.63	29.76

La comparativa de los modelos con los resultados experimentales de desplazamiento del alambre superior cuando el alambre inferior se encuentra activo se presentan en la Tabla 5.15.

Tabla 5. 15 – Comparación de desplazamientos de Alambre Superior IA en mm.

Modelo	Desplazamiento X	Desplazamiento Y	Desplazamiento
Experimental	2.22	-4.07	4.64
ANSYS dos SMA	2.19	-4.09	4.64
ANSYS Fuerza	2.28	-4.28	4.85
3R-PRBM	2.13	-3.94	4.48
2D Ideal	2.86	-5.73	6.41

Además, se presentan los errores absolutos y relativos porcentuales correspondientes en la Tabla 5.16, donde es importante considerar que el desplazamiento correcto son los resultados experimentales que se presentaron en la Tabla 5.15. El error más grande que tienen los modelos sin considerar el modelo 2D es el caso del modelo de ANSYS que no incorpora el alambre de SMA en su geometría el cual tiene un error de 4.97%. Por otra parte, el modelo que tiene los errores más pequeños es el modelo de ANSYS que incorpora el alambre de

SMA que tiene un error máximo de 1.56%, la gran desventaja de este método es que tiene un costo computacional cercano a las 3 horas.

Tabla 5. 16 – Errores en modelos comparado con resultados experimentales de Alambre Superior IA.

Error	ANSYS sin SMA	3R-PRBM	ANSYS SMA	2D ideal
Error absoluto X (mm)	0.05	0.09	0.03	0.63
Error absoluto Y (mm)	0.21	0.13	0.01	1.66
Error relativo X (%)	2.49	4.41	1.56	22.14
Error relativo Y (%)	4.97	3.37	0.36	29.01

Por último, se presenta la comparativa de los modelos con los resultados experimentales de desplazamiento del alambre inferior cuando el alambre inferior se encuentra activo se presentan en la Tabla 5.17.

Tabla 5. 17 – Comparación de desplazamientos de Alambre Inferior IA en mm.

Modelos	Desplazamiento X (mm)	Desplazamiento (Y)	Desplazamiento
Experimental	-2.21	-4.01	4.58
ANSYS dos SMA	-2.22	-4.07	4.64
ANSYS Fuerza	-2.35	-4.27	4.88
3R-PRBM	-2.15	-3.83	4.40
2D ideal	-3.13	-5.51	6.34

Por otra parte, se presentan los errores absolutos y relativos porcentuales correspondientes en la Tabla 5.18, donde es importante considerar que el desplazamiento correcto son los resultados experimentales que se presentaron en la Tabla 5.17. El error más grande que tienen los modelos sin considerar el modelo 2D es el caso del modelo de ANSYS que no incorpora el alambre de SMA en su geometría el cual tiene un error de 6.07%. Además, el modelo que tiene los errores más pequeños es el modelo de ANSYS que incorpora el alambre de SMA que tiene un error máximo de 0.47%.

Tabla 5. 18 – Errores en modelos comparado con resultados experimentales de Alambre Inferior IA.

Error	ANSYS sin SMA	3R-PRBM	ANSYS SMA	2D ideal
Error absoluto X (mm)	0.14	0.06	0.01	0.92
Error absoluto Y (mm)	0.25	0.17	0.05	1.49
Error relativo X (%)	6.05	3.06	0.47	29.37
Error relativo Y (%)	6.07	4.66	1.45	27.07

En la Tabla 5.19 se presentan los resultados promedio de todos los errores porcentuales anteriormente presentados, en donde se destaca que el modelo que presenta los menores errores es el modelo FEM que incorpora los alambres de SMA en su geometría. Por otra parte, se observa que el modelo que tiene el mayor error quitando el modelo 2D teórico ideal es el modelo de ANSYS que no incorpora el alambre de SMA.

Tabla 5. 19 – Errores promedio porcentuales generales de modelos.

Modelo	Errores promedio porcentual (%)
ANSYS SMA	1.49
ANSYS sin SMA	4.04
3R-PRBM	3.15
2D ideal	28.15

Por último, se presenta una comparativa con respecto a los costos computacionales de cada uno de los diferentes modelos, la cual se puede observar en la Tabla 5.20. El modelo que tarda menos en dar una respuesta es el modelo 2D teórico ideal, lo cual es de esperarse debido a que únicamente se requieren dos ecuaciones para obtener el desplazamiento del manipulador, pero presenta los errores más elevados. Por otra parte, el modelo que tiene un costo computacional menor descartando al modelo 2D teórico ideal es el modelo de ANSYS que no incorpora el alambre de SMA en su geometría, el cual tarda 200.85 segundos, pero es el modelo que tiene los errores porcentuales más grandes. El modelo de cuerpo pseudo-rígido 3R con anterioridad había sido el que tenía el menor costo computacional y en este caso se elevó, el motivo de que creciera este es que requiere aplicar la fuerza en fracciones esto con la finalidad de que se tenga un comportamiento correcto. El modelo de ANSYS que incorpora el alambre de SMA en su geometría tiene el costo computacional más elevado, lo cual era de esperarse esto debido a las no linealidades que tiene el material y los contactos entre los componentes, pero es el modelo con menores errores porcentuales.

Tabla 5. 20 – Costo computacional.

	ANSYS con alambre de SMA	ANSYS sin alambre	3R-PRBM	Modelo 2D
Tiempo (s)	10980	200.85	660.25	2.35

5.7 Comparación entre diferentes medios de accionamiento de un manipulador flexible.

Una vez que se logró tener un manipulador flexible con accionamiento continuo con alambres de SMA y presentar diferentes alternativas para modelarlo, se procede a realizar una comparativa con diferentes medios de accionamiento para un manipulador flexible. Uno de los métodos de accionamiento más comunes para un manipulador flexible es emplear servomotores conectados a alambres comunes, la principal desventaja de emplear este tipo de accionamiento es que requiere un espacio significativo (Figura 5.10a). En ocasiones la unidad de accionamiento (servomotores y controladores) puede llegar a requerir más espacio que el mismo manipulador. Otro método de accionamiento común para manipuladores flexibles es hacer uso de músculos neumáticos McKibben (Figura 5.10b), los cuales son una alternativa para poder miniaturizar un manipulador y el cual requiere poca energía (0.13 J). Una de las principales desventajas de emplear este tipo de accionamiento es el costo elevado de los músculos McKibben (\$1079.1 MX). Por otra parte, el accionamiento por músculos McKibben en promedio puede llegar a tener una eficiencia cercana al 20%, la cual es similar a los alambres de SMA.

Un ejemplo de los accionamientos para un manipulador flexible anteriormente mencionados se puede observar en la Figura 5.10. En la Figura 5.10a se presenta un manipulador flexible accionado por alambres comunes empleando servomotores, donde se observa a simple vista lo anteriormente mencionado de que el manipulador es más pequeño que el mecanismo de accionamiento (controladores y servomotores). En la Figura 5.10b se presenta el accionamiento de un manipulador flexible empleando músculos McKibben, los cuales son accionados a través del suministro de aire de un compresor. El uso del compresor representa una restricción significativa para este medio de accionamiento, siendo una de las principales desventajas.

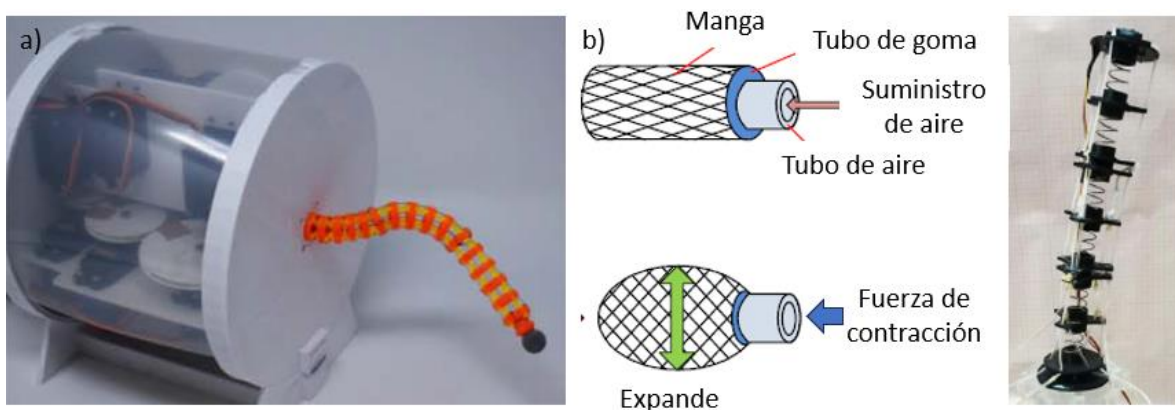


Figura 5. 10: Manipuladores flexibles, a) manipulador flexible accionado por servomotores [2] y b) manipulador flexible accionado por músculos McKibben [4].

Los métodos para el accionamiento del manipulador flexible se observan en la Tabla 5.21, donde los datos presentados fueron encontrados en la literatura.

Tabla 5. 21 - Tipos de accionamiento.

Característica	Alambres de SMA	Servomotor (MG996R) [3]	Músculos McKibben
Energía durante accionamiento (J)	154.53	15.17	0.13
Eficiencia aproximada (%)	21	90	22 [18]
Peso (g)	0.07	55	0.04 [4]
Tiempo de accionamiento (s)	3.73	0.14	0.6 [4]
Costo aproximado (\$MX)	173.18 x metro	100 x unidad	1079.1
Costo total de manipulador (\$MX)	856.84	1,129.57	2,727.77
Vida útil (ciclos de activación)	50,000 [19]	107,143	100,000 [20], [21]

Se observa en la Tabla 5.21 que el método de accionamiento que requiere mayor tiempo son los alambres de SMA (3.73 s), el tiempo requerido se podría llegar a reducir si se le aplica una mayor cantidad de energía para lograr el cambio de fase. El que requiere menor tiempo para el accionamiento del manipulador es el servomotor (0.14 s), pero la gran desventaja de hacer uso de este tipo de accionamiento es el espacio que requieren todos los componentes que están involucrados en el accionamiento del manipulador. Por otra parte, se observa que el alambre de SMA (21 %) tiene una eficiencia similar a los músculos McKibben (22 %) y el medio de accionamiento que tiene mayor eficiencia son los servomotores (90 %). La eficiencia de los alambres de SMA se presentó en el capítulo 4, la cual es similar a los encontrados en la literatura. En la literatura [22], [23], [24] se hace mención de que la eficiencia depende de las condiciones bajo las que se encuentren sometidos los alambres de SMA, las cuales pueden llegar a variar desde 10% hasta 85%.

Tabla 5. 22: Costo de manipular flexible accionado por alambres de SMA

Componente	Costo (\$ MX)
Impresión 3D (dos discos laterales, PLA)	200
Alambre de SMA (400 mm)	69.27
Madera	20
Clemas (10.25 x clema)	82
Tornillos y tuercas (6 tornillos y tuercas)	20
Controlador de temperatura	264
Termopar tipo K	94
Relé encapsulado	90
Lamina (eje central, área = 6000 mm ²)	17.57
Costo total (\$ MX)	856.84

Tabla 5. 23: Costo de manipular flexible accionado por alambres (servomotores)

Componente	Costo (\$ MX)
Impresión 3D (dos discos laterales, PLA)	200
Servomotor (MG996R)	200
Madera	20
Clemas (10.25 x clema)	82
Tornillos y tuercas (6 tornillos y tuercas)	20
Microcontrolador	312
Servo Driver	278
Lamina (eje central, área = 6000 mm ²)	17.57
Costo total (\$ MX)	1,129.57

Tabla 5. 24: Costo de manipular flexible accionado por músculos McKibben

Componente	Costo (\$ MX)
Impresión 3D (dos discos laterales, PLA)	200
Músculo McKibben	2158.2
Madera	20
Tornillos y tuercas (6 tornillos y tuercas)	20
Microcontrolador	312
Lamina (eje central, área = 6000 mm ²)	17.57
Costo total (\$ MX)	2,727.77

Lo más destacable de hacer uso de los alambres de SMA es que la inversión (sin considerar fuente de alimentación, Tabla 5.22) que se debe de llevar a cabo para tener un manipulador flexible es menor que los demás métodos de accionamiento (\$ 856.84 MX). Por otra parte, el que requiere menor cantidad de energía para su accionamiento son los músculos McKibben (sin considerar el compresor, regulador y la válvula proporcional), pero se debe de llevar a cabo una inversión significativa (Tabla 5.24) comparado con los demás métodos (\$ 3378.2 MX). Otro punto importante por tomar en cuenta es que los métodos para accionar un manipulador flexible con menor peso son los musculo McKibben (0.04 g) y los alambres de SMA (0.07 g). Debido a lo anteriormente mencionado los alambre de SMA pueden ser viables para aplicaciones en donde sea un requisito que el peso sea mínimo.

En la Tabla 5.22 se presentan las ventajas y desventajas de manera cualitativa de los diferentes medios de accionamiento. La Tabla 5.22 ayuda a comprender bajo que circunstancias es recomendable hacer uso cada medio de accionamiento y que consideraciones se deben de tomar en cuenta. Una de las principales consideraciones a tomar en cuenta de hacer uso los alambres de SMA es el tiempo de enfriamiento, lo cual lo puede restringir ciertas aplicaciones.

Tabla 5. 25 - Medios de accionamiento para un manipulador flexible.

Medio de accionamiento	Ventajas	Desventajas
Alambres de SMA	Poco peso Poco espacio Control simple de accionamiento Económicos	Baja eficiencia energética Tiempo de accionamiento Tiempo de enfriamiento Difícil de caracterizar y comprender
	Económicos (únicamente servomotores) Fácil acceso para su compra Alta eficiencia energética Poco tiempo de accionamiento	Requiere espacio considerable Peso elevado Costo elevado de fabricación de manipulador
Músculos McKibben	Poco peso (únicamente músculos) Poco espacio (únicamente músculos) Poco tiempo de accionamiento	Costo elevado Requiere espacio y peso considerable la unidad de accionamiento Baja eficiencia energética

Una potencial aplicación para un manipulador flexible accionado por alambres de SMA es en la industria aeroespacial, donde puede ser utilizado para realizar inspecciones visuales, reparaciones o suministro de combustible. Por otra parte, se ha propuesto en la literatura [5] integrarle a un nanosatélite un manipulador flexible accionado por alambres de SMA, donde se le puede colocar en un extremo del manipulador una cámara. En la industria médica se tiene como potencial aplicación su uso para realizar endoscopias, esto debido a la biocompatibilidad que tienen los alambres de SMA con el cuerpo humano [8]. Por otra parte, se ha propuesto en la industria médica, el empleo de manipuladores flexibles para realizar procedimientos endovasculares [25], la cual es una posible aplicación para este medio de accionamiento debido a la capacidad de miniaturización que puede tener un manipulador flexible accionado por alambres de SMA. Se puede lograr miniaturizar un manipulador flexible accionado por alambres de SMA debido a que no se requiere un actuador externo.

Un punto importante por tomar en cuenta es que la vida del alambre de SMA depende del pre-deformado. En la literatura se recomienda tener carreras del 4% de deformación con respecto a su longitud inicial, lo que implica que el alambre de SMA en un principio debe de estar pre-deformado al 2% [5], esto en caso de que se cuente con dos alambres de SMA en paralelo y se desee accionamiento continuo. Si se incrementa el pre-deformado del alambre de SMA se puede llegar a reducir la vida, donde se recomienda no sobrepasar el 8% de deformación [26]. Por otra parte, se debe de considerar que una vez que el alambre cumpla con su ciclo de vida (ciclos de activación y desactivación), se deberá de ensamblar uno nuevo,

este siendo un factor importante por considerar. Se han encontrado trabajos donde se detalla que la cantidad de ciclos de vida y la eficiencia de los alambres de SMA dependen específicamente bajo las condiciones que se encuentren trabajando [27], [22], [23], [24], este siendo un punto por considerar si se desea diseñar un manipulador flexible accionado por alambres de SMA. Además, se ha encontrado en la literatura que un alambre de SMA puede llegar a tener hasta 50,000 ciclos de activación cuando se encuentra sometido a un pre-deformado del 4%. Por otra parte, se decrementa la vida del alambre de SMA conforme se encuentra más pre-deformado, donde se ha encontrado que se puede llegar a reducir hasta 35,000 ciclos de activación si se tiene un 7% de pre-deformado [19]. Debido a lo anteriormente planteado el pre-deformado es un factor importante por considerar en el diseño y la fabricación de un manipulador flexible accionado por alambres de SMA. La principal desventaja de usar alambres de SMA es la cantidad de energía requerida para su accionamiento (154.53 J) y los tiempos de enfriamiento (128.7 s), los cuales se podrían compensar con los costos requeridos para fabricar el manipulador (\$ 856.84 MX) y la miniaturización que se puede llevar a cabo haciendo uso de los alambres de SMA como medio de accionamiento para un manipulador flexible. En la siguiente sección se presentan las conclusiones y el trabajo a futuro.

Conclusiones

En el presente trabajo de tesis se logró analizar y diseñar un manipulador flexible accionado con un alambre de SMA, donde se diseñó en función de cómo diferentes parámetros geométricos del manipulador pueden afectar al desplazamiento. Por otra parte, se logró comprender el comportamiento de los alambres de SMA en función de la temperatura a la que se encuentren sometidos. Además, se logró evaluar la factibilidad del empleo de alambres de SMA como medio de accionamiento continuo considerando dos alambres de SMA en la estructura del manipulador, lo cual valida la hipótesis planteada en un principio. Específicamente, se concluye lo siguiente:

- El modelo 3R-PRBM y el modelo FEM que no incorpora el alambre de SMA redujeron significativamente el tiempo computacional comparado con el modelo FEM que incorpora el alambre de SMA. El costo computacional del modelo FEM que incorpora el alambre de SMA es aproximadamente de 3 horas, mientras que el modelo FEM que no incorpora el alambre de SMA es cercano a los 2 minutos. Por otra parte, el modelo 3R-PRBM tiene un costo computacional aproximadamente de 11 minutos. Los resultados de desplazamiento del manipulador que tienen estos modelos alternativos son cercanos con los resultados experimentales. El modelo FEM que no incorpora el alambre de SMA tiene 4.04% de error promedio porcentual, mientras que el modelo 3R-PRBM tiene un error cercano al 3.15%. Debido a esto se concluye que ambos modelos son una alternativa confiable para el modelado del manipulador.
- Resulta factible el uso de alambre de SMA como medio de accionamiento continuo para un manipulador flexible. Esto se concluye después de un análisis energético donde se encontró que un alambre de SMA activo cuenta con la suficiente energía para deformar un alambre de SMA inactivo en un arreglo en serie y paralelo. A través de este estudio energético se concluye que se puede tener ciclos de accionamiento continuos en un manipulador accionado por alambres de SMA. Una de las principales desventajas que tiene el uso de alambres de SMA como medio de accionamiento para un manipulador flexible es el elevado costo energético ($E_{sum}=154.53$ J y $e = 20.61\%$) que tiene este medio de accionamiento, el cual se puede amortiguar con el bajo costo (\$958.18 MX, sin considerar fuente de alimentación) que se requiere para la fabricación de un manipulador accionado por alambres de SMA comparado con los demás medios de accionamiento.
- El uso de alambres de SMA como medio de accionamiento es una alternativa por tomar en cuenta cuando se exige un manipulador que requiera poco espacio para su almacenamiento. Además, debido a que no requiere actuadores externos se puede llegar a miniaturizar, lo que brinda una alternativa para aplicaciones donde se esté trabajando en lugares estrechos. Una de las principales desventajas del empleo de alambres de SMA es que resulta lento para su accionamiento (3.73 s), pero debido a esto mismo se puede tener un mayor control sobre el desplazamiento que tiene el manipulador.

Trabajo a futuro

Se propone como trabajo a futuro los siguientes puntos:

- Proponer y diseñar un método de enfriamiento para los alambres de SMA, esto con la finalidad de mejorar los tiempos requeridos para completar ciclos de accionamiento.
- Implementar más segmentos y subsegmentos en los modelos alternativos (modelo de cuerpo pseudo-rígido 3R y modelo FEM que no incorpora los alambres de SMA).
- Comprender como se relacionan las fuerzas de accionamiento en función de que alambre de SMA se encuentre activo y la cantidad de segmentos y subsegmentos, esto con la finalidad de emplear los modelos alternativos.
- Buscar alcanzar posiciones específicas a través de diferentes combinaciones de accionamiento de los alambres de SMA en un manipulador flexible (Figura 5.11), donde los puntos naranjas son indicativos del alambre de SMA activo.

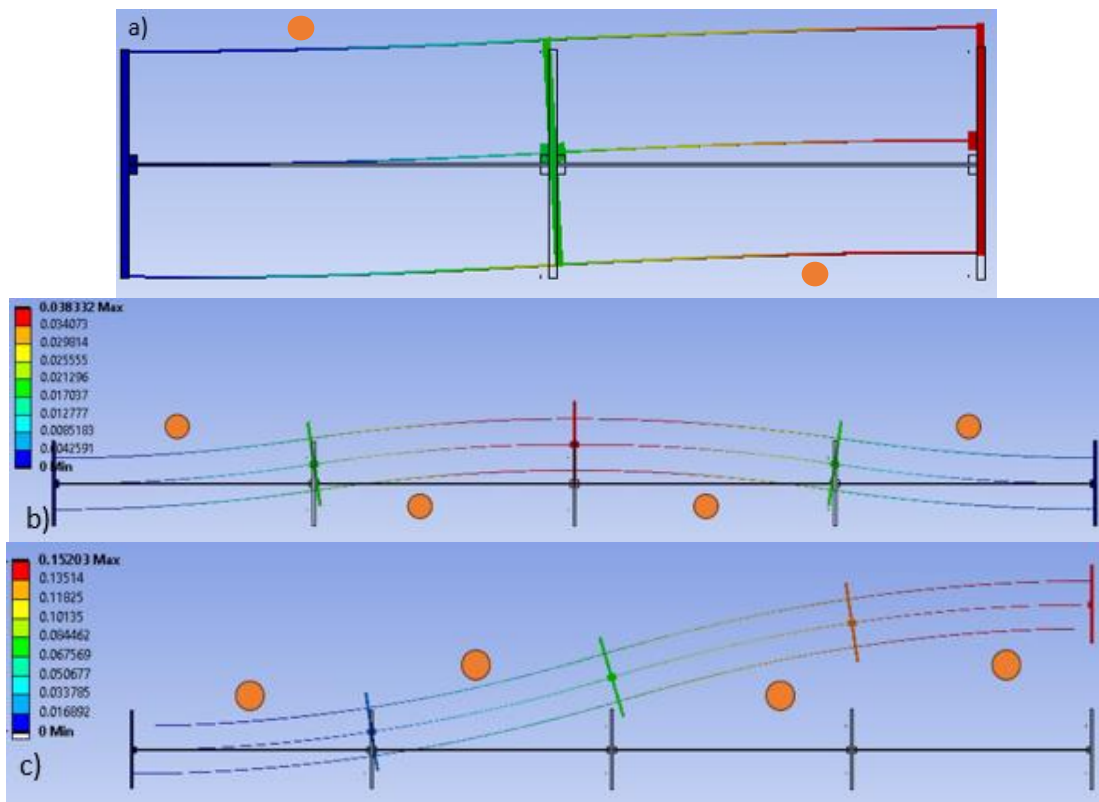


Figura 5. 11: Manipulador flexible a) dos segmentos (activado alambre superior e inferior), b) cuatro segmentos (activado superior de primer y cuarto segmento e inferior de segundo y tercer segmento) c) cuatro segmentos (activado primer y segundo segmento e inferior de tercer y cuarto segmento).

Referencias

- [1] S. Huang, D. Meng, Y. She, X. Wang, B. Liang, and B. Yuan, “Statics of Continuum Space Manipulators with Nonconstant Curvature via Pseudorigid-Body 3R Model,” *IEEE Access*, vol. 6, pp. 70854–70865, 2018, doi: 10.1109/ACCESS.2018.2881261.
- [2] A. B. Clark, V. Mathivannan, and N. Rojas, “A Continuum Manipulator for Open-Source Surgical Robotics Research and Shared Development,” *IEEE Trans Med Robot Bionics*, vol. 3, no. 1, pp. 277–280, Feb. 2021, doi: 10.1109/TMRB.2020.3041391.
- [3] “MG996R High Torque Metal Gear Dual Ball Bearing Servo.”
- [4] Y. Peng *et al.*, “Development of continuum manipulator actuated by thin McKibben pneumatic artificial muscle,” *Mechatronics*, vol. 60, pp. 56–65, Jun. 2019, doi: 10.1016/j.mechatronics.2019.05.001.
- [5] G. Mejía Rodríguez, J. A. Ferrer Pérez, J. Alberto, R. Aguilar, D. Frederik De Lange, and * Autor, “Metodología para el diseño de mecanismos flexibles activados por alambres de aleación con memoria de forma,” SOMIM, Pachuca, Hidalgo, México, Sep. 2021.
- [6] D. Ji, T. H. Kang, S. Shim, S. Lee, and J. Hong, “Wire-driven flexible manipulator with constrained spherical joints for minimally invasive surgery,” *Int J Comput Assist Radiol Surg*, vol. 14, no. 8, pp. 1365–1377, Aug. 2019, doi: 10.1007/s11548-019-01976-4.
- [7] Y. Sun, D. Zhang, Y. Liu, and T. C. Lueth, “FEM-Based Mechanics Modeling of Bio-Inspired Compliant Mechanisms for Medical Applications,” *IEEE Trans Med Robot Bionics*, vol. 2, no. 3, pp. 364–373, Aug. 2020, doi: 10.1109/TMRB.2020.3011291.
- [8] B. Konh, N. V. Datla, and P. Hutapea, “Feasibility of Shape Memory Alloy Wire Actuation for an Active Steerable Cannula,” *Journal of Medical Devices, Transactions of the ASME*, vol. 9, no. 2, Jun. 2015, doi: 10.1115/1.4029557.
- [9] B. Konh, M. Honarvar, and P. Hutapea, “Design optimization study of a shape memory alloy active needle for biomedical applications,” *Med Eng Phys*, vol. 37, no. 5, pp. 469–477, May 2015, doi: 10.1016/j.medengphy.2015.02.013.
- [10] B. Padasdao and B. Konh, “Shape Memory Alloy Actuators in an Active Needle - Modeling, Precise Assembly, and Performance Evaluation,” *Journal of Manufacturing Science and Engineering, Transactions of the ASME*, vol. 143, no. 2, Feb. 2021, doi: 10.1115/1.4047737.
- [11] S. Karimi and B. Konh, “Self-sensing feedback control of multiple interacting shape memory alloy actuators in a 3D steerable active needle,” *J Intell Mater Syst Struct*, vol. 31, no. 12, pp. 1524–1540, Jul. 2020, doi: 10.1177/1045389X20919971.
- [12] J. H. Crews and G. D. Buckner, “Design optimization of a shape memory alloy-actuated robotic catheter,” *J Intell Mater Syst Struct*, vol. 23, no. 5, pp. 545–562, Mar. 2012, doi: 10.1177/1045389X12436738.
- [13] S. Karmakar, N. Kalita, and A. Banerjee, “Optimum placement of shape memory alloy wire actuator,” *Proc Inst Mech Eng C J Mech Eng Sci*, vol. 231, no. 7, pp. 1272–1291, Apr. 2017, doi: 10.1177/0954406216665134.

- [14] Y. Goergen *et al.*, “Shape memory alloys in continuum and soft robotic applications,” in *ASME 2019 Conference on Smart Materials, Adaptive Structures and Intelligent Systems, SMASIS 2019*, American Society of Mechanical Engineers (ASME), 2019. doi: 10.1115/SMASIS2019-5610.
- [15] A. C. Souza, E. N. Mamiya, and N. Zouain, “Three-dimensional model for solids undergoing stress-induced phase transformations,” 1998.
- [16] Ansys, “Introduction to Contact.”
- [17] H. J. Su, “A pseudorigid-body 3r model for determining large deflection of cantilever beams subject to tip loads,” *J Mech Robot*, vol. 1, no. 2, pp. 1–9, May 2009, doi: 10.1115/1.3046148.
- [18] Popovic B. Marko, *Biomechatronics*. Elsevier, 2019. doi: 10.1016/c2016-0-04132-3.
- [19] M. M. Sherif and O. E. Ozbulut, “Tensile and superelastic fatigue characterization of NiTi shape memory cables,” *Smart Mater Struct*, vol. 27, no. 1, Jan. 2018, doi: 10.1088/1361-665X/aa9819.
- [20] N. D. Naclerio and E. W. Hawkes, “Simple, low-hysteresis, foldable, fabric pneumatic artificial muscle,” *IEEE Robot Autom Lett*, vol. 5, no. 2, pp. 3406–3413, Apr. 2020, doi: 10.1109/LRA.2020.2976309.
- [21] B. Tondu, “Modelling of the McKibben artificial muscle: A review,” *J Intell Mater Syst Struct*, vol. 23, no. 3, pp. 225–253, Feb. 2012, doi: 10.1177/1045389X11435435.
- [22] P. Motzki, T. Gorges, M. Kappel, M. Schmidt, G. Rizzello, and S. Seelecke, “High-speed and high-efficiency shape memory alloy actuation,” *Smart Mater Struct*, vol. 27, no. 7, Jun. 2018, doi: 10.1088/1361-665X/aac9e1.
- [23] M. A. Thrasher, A. R. Shahin\$, P. H. Mecklts, and J. D. Jones, “Efficiency analysis of shape memory alloy actuators,” 1994. [Online]. Available: <http://iopscience.iop.org/0964-1726/3/2/019>
- [24] J. Arias Guadalupe, D. Copaci, D. Serrano Del Cerro, L. Moreno, and D. Blanco, “Efficiency analysis of SMA-based actuators: Possibilities of configuration according to the application,” *Actuators*, vol. 10, no. 3, 2021, doi: 10.3390/act10030063.
- [25] IEEE Robotics and Automation Society., *2005 IEEE International Conference on Robotics and Automation (ICRA) : Barcelona, Spain : 18-22 April, 2005*. IEEE, 2005.
- [26] Flexinol, “F1140Rev M NICKEL-TITANIUM ALLOY PHYSICAL PROPERTIES.” [Online]. Available: www.dynalloy.com
- [27] C. N. Saikrishna, K. V Ramaiah, B. Vidyashankar, and S. K. Bhaumik, “Functional fatigue in NiTi shape memory alloy wires-A comparative study,” 2021.

Anexo

A.1 Modelo de Souza-Auricchio en ANSYS Mechanical.

La aleación con memoria de forma se basa una ecuación (35), la cual es un modelo termo mecánico 3D para el cambio de fase,

$$\psi(\varepsilon, T, \varepsilon_{tr}) = \frac{1}{2}(\varepsilon - \varepsilon_{tr}) : D : (\varepsilon - \varepsilon_{tr}) + \tau_M(T) \|\varepsilon'_{tr}\| + \frac{1}{2} h \|\varepsilon'_{tr}\|^2 + I_{\varepsilon'_{tr}}(\varepsilon'_{tr}) \quad (35)$$

donde:

- D = Tensor de rigidez elástico del material.
- ε = Tensor de deformación total.
- ε_{tr} = Tensor de transformación total.
- $\tau_M(T)$ = Función positiva y monótonicamente creciente de la temperatura.
- β = Parámetro del material.
- T = Temperatura
- T_o = Temperatura de referencia.
- h = Parámetro del material relacionado con el endurecimiento.
- $I_{\varepsilon'_{tr}}(\varepsilon'_{tr})$ = Función de indicador.
- R = Limite elástico.
- m = Parámetro dependiente del tipo de carga (cambia en función si está en tensión o compresión)

Los parámetros solicitados de ANSYS para el modelado de la aleación con memoria de forma se pueden observar en la Figura A.1.1.

Property	Value	Unit	
<input checked="" type="checkbox"/> Isotropic Elasticity			
Derive from	Young's Modulus and Poisson's Ratio		
Young's Modulus		MPa	} Propiedades elásticas de la austenita
Poisson's Ratio			
Bulk Modulus		Pa	
Shear Modulus		Pa	
<input checked="" type="checkbox"/> Shape Memory Effect			
Hardening Parameter		MPa	
Reference Temperature		C	
Elastic Limit		MPa	
Temperature Scaling Parameter		MPa K ⁻¹	
Maximum Transformation Strain		m m ⁻¹	
Martensite Modulus		MPa	
Lode Dependency Parameter			

A.1.1: Datos solicitados por ANSYS Mechanical Workbench.

Algunas de las premisas que se consideraron en el modelo de elemento finito, fue que los discos laterales no sufrían deformación debido a que se consideró el módulo de elasticidad de un acero estructural. Por otra parte, no se considero el peso de los diferentes componentes. Además, el software lleva a cabo la idealización que la pendiente C_A y C_M son iguales.

A. 2 Código Python para Simulación FEM sin alambre de SMA.

```
#Número 7 en caso de ser ensamble, número 6 en caso de ser un solo sólido.
analysis = Model.Children[7]
mesh = Model.Mesh
solu = analysis.Solution
anset = analysis.AnalysisSettings
nset = Model.NamedSelections

#Se define función para buscar “named selections” por nombre
def NsByName(name):
    for ns in nset.Children:
        if ns.Name == name:
            return ns

#Se define función para buscar cosas en “solution” por nombre.
def ResultsByName(name):
    for res in solu.Children:
        if res.Name == name:
            return res

#Se define función para configurar los “substeps” en cada “step”.
def Substep(numsubsteps):
    ansetAutomaticTimeStepping = AutomaticTimeStepping.On
    ansetInitialSubsteps = numsubsteps
    ansetMinimumSubsteps = numsubsteps
    ansetMaximumSubsteps = numsubsteps

#Se define vector unitario para la dirección entre dos coordenadas en X y Y.
def GetUnitVect(coordin,coordfin):
    dist_x = coordfin[0] - coordin[0]
    dist_y = coordfin[1] - coordin[1]
    dist = (dist_x**2 + dist_y**2)**(0.5)

    i = dist_x / dist
    j = dist_y / dist
    return [i,j]

#Aqui se eliminan fuerzas preexistentes.
for elem in analysis.Children:
    if elem.GetType() == Ansys.ACT.Automation.Mechanical.BoundaryConditions.Force:
        elem.Delete()

#Se buscan los “Deformation Probe” como referencia para las coordenadas de la fuerza.
probeX = ResultsByName("Deformation Probe X")
probeY = ResultsByName("Deformation Probe Y")
```

```

#Aqui se crea la fuerza.
force = analysis.AddForce()
force.DefineBy = LoadDefineBy.Components
force.Location = NsByName("force_line")

#Aqui se define la fuerza a aplicar y el número de steps a utilizar para dividir la aplicación.
Force_apply = 5 #Aqui se pone la fuerza total a aplicar
steps = 15

time_vct = [Quantity("0[s]")]
force_array_x = [Quantity("0[N]")]
force_array_y = [Quantity("0[N]")]

#Se obtienen las coordenadas del centroide para la referencia de las fuerzas.
fl_centroid =
DataModel.GeoData.GeoEntityById(NsByName("force_line").Location.Ids[0]).Centroid
rl_centroid =
DataModel.GeoData.GeoEntityById(NsByName("ref_line").Location.Ids[0]).Centroid

with Transaction():
    #Se borran los resultados generados para iniciar desde 0.
    solu.ClearGeneratedData()

    for i in range(1, steps + 1):
        #Se define el número de steps para cada iteración en función de i.
        anset.NumberOfSteps = i
        anset.CurrentStepNumber = i
        Substep(1)

        #Se obtiene la coordenada deformada para cada iteración.
        def_x = float(probeX.XAxisDeformation.ToString()[:-4])
        def_y = float(probeY.YAxisDeformation.ToString()[:-4])
        def_coord = [fl_centroid[0] + def_x, fl_centroid[1] + def_y]

        #Se obtiene la fuerza a aplicar y las componentes en X y Y.
        force_scaled = Force_apply * i / steps #Calculamos la fracción de fuerza a aplicar en
        el step
        vector_dir = GetUnitVect(def_coord,rl_centroid)
        force_x = force_scaled*vector_dir[0]
        force_y = force_scaled*vector_dir[1]
        time = Quantity(str(i) + "[s]")

    #Se añaden las cargas nuevas al vector de fuerzas y tiempos.

```

```
force_array_x.append(Quantity(str(force_x) + "[N]")) #Agregamos al vector de fuerza
el nuevo vector a calcular para este step
force_array_y.append(Quantity(str(force_y) + "[N]")) #Agregamos al vector de fuerza
el nuevo vector a calcular para este step
time_vct.append(time)

#Se agregan los valores de cargas y tiempo a la fuerza.
force.XComponent.Inputs[0].DiscreteValues = time_vct
force.YComponent.Inputs[0].DiscreteValues = time_vct

force.XComponent.Output.DiscreteValues = force_array_x
force.YComponent.Output.DiscreteValues = force_array_y

#Se manda a solucionar la nueva iteración.
solu.Solve()
```