

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DEL ESTADO DE MORELOS

FACULTAD DE CIENCIAS QUÍMICAS E INGENIERÍA

CENTRO DE INVESTIGACIÓN EN INGENIERÍA Y CIENCIAS APLICADAS

**“Análisis numérico de parámetros fundamentales en los brazos de actuadores chevrón con
diferentesgeometrías”**

TESIS PARA OBTENER EL GRADO DE:

LICENCIATURA EN INGENIERIA MECÁNICA

C. José Manuel Conde Bello

DIRECTOR

Dra. Margarita Tecpoyotl Torres

SINODALES

Dr. José Alfredo Rodríguez Ramírez

Dr. Gerardo Vera Dimas

Dr. Ramón Cabello Ruiz

Dr. Pedro Vargas Chablé

Dra. Margarita Tecpoyotl Torres

RESUMEN

Los Sistemas Microelectromecánicos (MEMS, por sus siglas en inglés), se dividen en dos categorías: microsensores y microactuadores. Los primeros detectan un parámetro físico de interés (por ejemplo, calor, luz, sonido, masa) y lo convierten en una señal eléctrica que puede medirse o utilizarse por un sistema eléctrico o electrónico, respondiendo de esta forma a la energía de entrada. Mientras que, los microactuadores, a partir de la energía de entrada pueden efectuar la actuación esperada en respuesta a los cambios en su entorno.

Esta tesis se enfoca en la parametrización de microactuadores chevrón con diferentes geometrías de brazos, tales como el chevrón convencional V, y los chevrones con geometrías de brazos Z, Z modificado y con regulador de movimiento rectangular. Para llevar a cabo el análisis numérico se utilizó la herramienta de software ANSYS™ Workbench, en la cual se dibujó, simuló y caracterizó a cada dispositivo implementado en silicio como material estructural, con las mismas dimensiones de anclas, flecha, ancho y largo total de brazos, para fines de comparación, identificando los parámetros de desempeño de interés que son el desplazamiento y la fuerza de reacción generadas en la punta de la flecha.

Para evitar la generación de altas temperaturas en los chevrones, se utilizó una fuente de alimentación de 1 V, produciendo temperaturas máximas del orden de los 134 °C, en una de sus anclas. La distribución de temperaturas hace que la temperatura en la flecha sea menor, siendo del orden de 106 °C, sin convección.

Durante el proceso de parametrización se consideró al grosor de la estructura, el ángulo de inclinación y el ancho de las formas geométricas agregadas a los brazos. El largo total de brazos se analizó también para observar su efecto sobre el desplazamiento y fuerza resultantes. Con este proceso se reducen los tiempos de análisis y optimizando.

Cabe señalar que, el desplazamiento máximo en la flecha correspondió al chevrón Z modificado, siendo de 8.89 μm y la fuerza de reacción máxima la alcanzó el chevrón con regulador de movimiento de 200 μm , correspondiente a 568 μN . Esto nos permite seleccionar a la geometría de brazos adecuada de acuerdo con la aplicación a la que se destinen.

Finalmente, para validar los resultados de las simulaciones, los datos obtenidos fueron comparados con los resultados analíticos, solamente en los casos de los chevrónes V y Z, debido a que sus modelos matemáticos han sido hallados en la literatura y su obtención no es trivial. Los porcentajes de error son de 9.3% para el desplazamiento, y 4.5% para la fuerza de reacción del chevrón V, respectivamente. Con respecto al chevrón Z, los porcentajes de error son de 9.96% para desplazamiento, y 1.8% para la fuerza de reacción, respectivamente, los cuales tienen magnitudes aceptables.

Para todos los chevrónes el esfuerzo fue aceptable debido a que en ningún caso estos rebasan al esfuerzo de cedencia del silicio correspondiente a 250 MPa. El chevrón que presenta el menor esfuerzo es el chevrón V, mientras que, el que tiene mayor magnitud es el chevrón Z.

Los resultados presentados pueden ser útiles para diseñadores, de acuerdo con las aplicaciones y las condiciones bajo las cuales integren a este actuador en sus sistemas.

ABSTRACT

Microelectromechanical Systems (MEMS) are divided into two categories: microsensors and microactuators. The former detect a physical parameter of interest (e.g., heat, light, sound, mass) and convert it into an electrical signal that can be measured or used by an electrical or electronic system, thus responding to the input energy. On the other hand, microactuators, based on the input energy, can perform the expected action in response to changes in their environment.

This thesis focuses on the parameterization of chevron microactuators with different arm geometries, such as the conventional chevron V, and chevrons with modified Z, Z arm geometries and with rectangular motion regulator. To carry out the numerical analysis, the ANSYSTM Workbench software tool was used, in which each device implemented in silicon was drawn, simulated and characterized as a structural material, with the same dimensions of anchors, arrow, width and total length of arms, for comparison purposes, identifying the performance parameters of interest that are the displacement and reaction force generated at the tip of the arrowhead.

To avoid the generation of high temperatures in the chevrons, a 1 V power supply was used, producing maximum temperatures of the order of 134 °C, in one of its anchors. The temperature distribution makes the temperature in the arrow lower, being on the order of 106 °C, without convection.

During the parameterization process, the thickness of the structure, the angle of inclination and the width of the geometric shapes added to the arms were considered. Total arm length was also analyzed to observe its effect on the resulting displacement and force. With this process, analysis times are reduced and optimized.

It should be noted that the maximum displacement in the deflection corresponded to the modified Z chevron, being 8.89 μm , and the maximum reaction force was reached by the chevron with a 200 μm motion regulator,

corresponding to 568 μN . This allows us to select the appropriate arm geometry according to the application for which they are intended.

Finally, to validate the results of the simulations, the data obtained were compared with the analytical results, only in the cases of chevrons V and Z, because their mathematical models have been found in the literature and their obtaining is not trivial. The error rates are 9.3% for displacement, and 4.5% for the reaction force of the chevron V, respectively. With respect to the Z chevron, the error percentages are 9.96% for displacement, and 1.8% for reaction force, respectively, both of which have acceptable magnitudes.

For all chevrons, the stress was acceptable because in no case did, they exceed the silicon yield stress corresponding to 250 MPa. The chevron with the least stress is chevron V, while the chevron with the greatest magnitude is chevron Z.

The results presented may be useful for designers, according to the applications and conditions under which they integrate this actuator into their systems.

AGRADECIMIENTOS

Agradezco a:

Al Centro de Investigación en Ingenierías y ciencias aplicadas (CIICAP) por abrirme las puertas y por el uso de sus instalaciones.

A CONACyT, por el apoyo obtenido como parte del proyecto de Ciencia Básica "Diseño, análisis e implementación de novedosos dispositivos MEM inerciales y electro-térmicos". "Proyecto Apoyado por el Fondo Sectorial de Investigación para la Educación", con número de referencia A1-S-33433.

Cabe señalar que, aunque el proyecto ya concluyó se recibieron beneficios gracias al know-how generado.

A la Dra. Margarita Tecpoyotl Torres por brindarme la oportunidad de unirme a su equipo de trabajo y por los valiosos consejos, opiniones y punto de vista que me propuso durante el tiempo de creación de este escrito.

A la Lic. Sahiril Fernanda Rodríguez Fuentes por su paciencia, conocimiento, amabilidad y las instrucciones que me brindo durante el proceso de creación de la presente tesis.

A mis compañeros de laboratorio, quienes me brindaron su apoyo y amistad, así como sus conocimientos, al Dr. Pedro Vargas Chablé, Maestro Andrés Ferrara, e Ing. Alan Jesús Estrada Cabrera.

DEDICATORIA

Para Hortencia, Jonás y Sebastián por estar conmigo y apoyarme en el delirante viaje
al que llamo vida.

ÍNDICE DE CONTENIDO

1. INTRODUCCIÓN.....	15
1.1 Introducción.....	15
1.2 Antecedentes.....	16
1.3 Hipótesis.....	17
1.4 Objetivo general.....	17
1.5 Objetivos particulares.....	18
1.6 Limitaciones.....	18
1.7 Justificación.....	18
2. MARCO TEÓRICO.....	21
2.1. Sistemas Microelectromecánicos.....	21
2.2 Microactuadores.....	21
2.3 Tipos de actuación.....	24
2.3.1 Piezoeléctrico.....	24
2.3.2 Electrostático.....	24
2.3.3 Electrotérmico.....	25
2.3.4 Aleación de memoria de forma (Por sus siglas en ingles SMA).....	25
2.4. Microactuador V.....	26
2.4.1 Modelado matemático del microactuador V.....	27
2.5 Microactuador Z.....	29
2.5.1 Modelado matemático para microactuador Z.....	30
2.6 Microactuador Z modificado.....	32
2.6 Microactuador con regulador de movimiento rectangular.....	32
2.6.1 Microactuador con regulador de movimiento rectangular de 50 μm	33
3. METODOLOGÍA.....	38
3.1 Metodología general.....	38
3.2 Metodología de simulación.....	39
4. SIMULACIÓN, CARACTERIZACIÓN Y PARAMETRIZACIÓN DE LAS DIFERENTES GEOMETRÍAS DEL ACTUADOR CHEVRÓN.....	41
4.1 Parametrización y análisis del actuador chevrón V.....	42

4.2 Parametrización y análisis del actuador chevrón Z convencional	47
4.3 Parametrización y análisis del actuador chevrón Z modificado.....	55
4.4 Parametrización y análisis del actuador chevrón con regulador de movimiento 50 μm de largo	60
4.5 Parametrización y análisis del actuador chevrón con regulador de movimiento rectangular 200 μm	65
4.6. Parametrización chevrón V y chevrón Z modificado de 16 brazos.....	70
4.6.1 Chevrón V de 8 pares de brazos.....	71
4.6.2 Chevrón Z modificado 16 brazos.....	76
5. RESULTADOS	83
6. CONCLUSIONES.....	88
Trabajo futuro	89
7. REFERENCIAS.....	90

Lista de Tablas

Tabla 2.1 Tipos de micropinzas	22
Tabla 2.2 Descripción de las variables que conforman el actuador chevrón V.	26
Tabla 2.3 Variables del microactuador Z.....	30
Tabla 2.4 Variables del actuador chevrón Z modificado.....	32
Tabla 2.5 Descripción de variables del actuador chevrón con regulador rectangular de movimiento de 50 μm	33
Tabla 2.6 Descripción de las variables del actuador chevrón con regulador de movimiento 200 μm	34
Tabla 4.1 Parámetros físicos y mecánicos del silicio (Yang S. & Xu Q, 2017), (Jui-Chang K., Hen-Wei Huang, Shu-Wei Tung, & Yao-Jo, 2014).....	42
Tabla 4.2 Resultados analíticos y numéricos del chevrón V.	47
Tabla 4.3 Resultados analíticos y numéricos con porcentaje de error, chevrón Z.	54
Tabla 4.4 Resultados numéricos del chevrón Z modificado.	59
Tabla 4.5 Resultados Numéricos del chevrón con regulador rectangular de movimiento 50 μm	65
Tabla 4.6 Resultados Numéricos del chevrón con regulador rectangular de movimiento 200 μm	69
Tabla 4.7 Resultados obtenidos para chevrón V de 16 brazos	76
Tabla 4.8 Resultados obtenidos para los dos chevrónes de 8 pares de brazos.....	81
Tabla 5.1 Resultados obtenidos finales	85
Tabla 5.2 Comparación entre chevrón V y chevrón con regulador de movimiento de 200 μm	86

Lista de Figuras

Figura 1.1. Línea del tiempo de los MEMS.....	17
Figura 2.1 Esquema de tipos de actuación (Yang & Xu, 2017) (Llewellyn-Evans, Griffiths, & Fahmy, 2020) (Griffiths, Evans, & Fahmy, 2020).....	25
Figura 2.2 Actuador chevrón V.	26
Figura 2.3 Actuador chevrón Z.....	30
Figura 2.4 Microactuador Z modificado.....	32
Figura 2.5 Microactuador chevrón con regulador rectangular de 50 μm	33
Figura 2.6 Microactuador chevrón con regulador de movimiento rectangular 200 μm	34
Figura 2.7 Microactuador chevrón brazo romboidal (México Patente nº 295737, 2008).	35
Figura 2.8 Microactuador chevrón brazo térmico pasivo (Steiner, Keplinger, Schalko, Hortschitz, & Stifter, 2015).	35
Figura 3.1 Diagrama metodología general.....	38
Figura 3.2 Diagrama metodología de simulación	39
Figura 4.1 Dimensiones de los elementos de un actuador chevrón de dos brazos.....	42
Figura 4.2 Distribución de temperatura para chevrón V.	43
Figura 4.3 Ancho de brazo contra desplazamiento.	43
Figura 4.4 Ancho de brazo contra fuerza	44
Figura 4.5 Ángulo de inclinación de brazo contra desplazamiento.	45
Figura 4.6 Ángulo de inclinación contra fuerza.	45
Figura 4.7 Largo de brazo contra desplazamiento.....	46
Figura 4.8 Grosor de la estructura contra fuerza.....	47
Figura 4.9 Dimensiones de los elementos de un actuador chevrón de 2 brazos Z convencional	48
Figura 4.10 Distribución de temperatura para chevrón brazos Z convencional.....	49
Figura 4.11 Ancho de brazo contra desplazamiento.	49
Figura 4.12 Ancho de brazo contra fuerza.....	50
Figura 4.13 Ancho de brazo contra rigidez	50
Figura 4.14 Largo de brazo contra desplazamiento.....	51
Figura 4.15 Largo de brazo contra fuerza.	52
Figura 4.16 Largo de brazo contra rigidez.....	53
Figura 4.17 Grosor de la estructura contra fuerza.....	53
Figura 4.18 Grosor de la estructura contra rigidez	54
Figura 4.19 Elementos de un actuador chevrón de dos brazos z modificado.	55
Figura 4.20 Distribución de temperatura para chevrón Z modificado.	56
Figura 4.21 Ancho de brazo contra desplazamiento	56
Figura 4.22 Ancho de brazo contra fuerza.....	57
Figura 4.23 Largo de brazo contra desplazamiento.....	58
Figura 4.24 Largo de brazo contra fuerza.	58
Figura 4.25 Grosor de la estructura contra fuerza.....	59
Figura 4.26 Elementos de un actuador chevrón de dos brazos con regulador de movimiento 50 μm	60
Figura 4.27 Distribución de temperatura para chevrón dos brazos con regulador de 50 μm ...	61

Figura 4.28 Grosor de la estructura contra fuerza.....	61
Figura 4.29 Largo de brazo contra desplazamiento.....	62
Figura 4.30 Largo de brazo contra fuerza.	62
Figura 4.31 Largo de regulador contra fuerza.	63
Figura 4.32 Ángulo de inclinación contra desplazamiento.	64
Figura 4.33 Ángulo de inclinación contra fuerza.	64
Figura 4.34 Elementos de un actuador chevrón dos brazos con regulador de movimiento 200 μm	65
Figura 4.35 Distribución de temperatura para chevrón dos brazos con regulador de 200 μm	66
Figura 4.36 Grosor de la estructura contra fuerza.....	66
Figura 4.37 Largo de brazo contra desplazamiento.....	67
Figura 4.38 Largo de brazo contra fuerza.	67
Figura 4.39 Largo de regulador contra desplazamiento.	68
Figura 4.40 Largo de regulador contra fuerza.	68
Figura 4.41 Ángulo de inclinación contra desplazamiento.	69
Figura 4.42 Ángulo de inclinación contra fuerza.	70
Figura 4.43 Distribución de temperatura chevrón V con 16 brazos.....	71
Figura 4.44 Desplazamiento chevrón V.....	72
Figura 4.45 Fuerza de reacción chevrón V.....	72
Figura 4.46 Ancho de brazo contra fuerza.....	73
Figura 4.47 Ángulo de inclinación contra desplazamiento.	74
Figura 4.48 Ángulo de inclinación contra fuerza.....	74
Figura 4.49 Largo de brazo contra desplazamiento.....	75
Figura 4.50 Grosor de la estructura contra grosor de la estructura.....	76
Figura 4.51 Distribución de temperatura microactuador Z.....	77
Figura 4.52 Desplazamiento del microactuador Z.....	77
Figura 4.53 Fuerza de reacción de microactuador Z.....	78
Figura 5.1 Distribución de temperatura contra voltaje.....	83
Figura 5.2 Temperatura máxima contra desplazamiento.....	84
Figura 5.3 Temperatura máxima contra fuerza.....	85

Capítulo 1

Introducción

En este capítulo se presenta la descripción de los objetivos específicos y generales, así como de la justificación de este trabajo, agregando la organización de cada uno de los capítulos de esta tesis.

1. INTRODUCCIÓN

1.1 Introducción

Uno de los más grandes avances en la microelectrónica que se ha desarrollado a través de las décadas y que se ha convertido en parte importante para el desarrollo e implementaciones tecnológicas se representa por: los sistemas Microelectromecánicos (MEMS, por sus siglas en inglés) teniendo su origen en los Circuitos Integrados (CI) o como coloquialmente llamados “chips o microchips”, los cuales se fabrican en una oblea semiconductor. Se constituyen por componentes eléctricos y electrónicos como: resistores, capacitores, transistores, diodos, etc.

Los MEMS son componentes vitales dentro de una amplia gama de tecnologías, lo que hace que el estudio de su rendimiento y fiabilidad operativa sea un aspecto muy crítico para su correcta funcionalidad (Cauchi, Grech, Mallia, Mollicone, & Portelli, 2019), su utilización es cada vez más presente en distintas áreas de la tecnología, de ahí la importancia de su estudio y rendimiento.

Los sistemas microelectromecánicos se dividen en dos categorías: Micro actuadores y microsensores que responden a una entrada de energía eléctrica para transformarla en energía que sea necesaria o actuar en respuesta a cambios en su entorno, respectivamente. Su tamaño oscila entre 1 μm hasta 1 mm.

Los actuadores basados en MEMS tienen una amplia gama de aplicaciones, tales como microinterruptores, microespejos y micromotores. Los esquemas de actuación más utilizados son actuación térmica, electrostática, magnética, piezoeléctrica y neumática. Se destaca la actuación térmica debido a que genera un alto nivel de desplazamiento, alta precisión, repetibilidad y simplicidad en el diseño. Esta actuación puede obtenerse de varias formas (Elbukem, Gui, Ren, Yavuz, & Khamesee, 2008), entre las más comunes, se encuentra la actuación electrotérmica, mediante la cual, se han desarrollado diversos dispositivos, (Wang, Shen., & Chen, 2015).

La actuación electrotérmica consiste en la expansión térmica de los brazos de sujeción, debido al Efecto de Joule, en presencia de corriente eléctrica. Las micropinzas electrotérmicas tienen muchas ventajas, tales como una amplia deformación, intensa fuerza de sujeción, bajo voltaje de operación y estructura compacta. Las limitaciones de los actuadores electrotérmicos están relacionadas con la alta temperatura en la región cercana a los objetivos de sujeción, por lo que deben usarse brazos de sujeción largos que disipen el calor producido por los actuadores (Iamoni & Somà, 2014).

En la siguiente subsección se presentan los antecedentes que motivación este trabajo.

1.2 Antecedentes

A partir de 1960 se empieza a experimentar con el uso de tecnologías de fabricación de circuitos integrados (IC) para desarrollar microestructuras mecánicas (Tazabekov, 2015). En la década de los 70s se logra la adopción comercial de sensores de presión y acelerómetros (Kaajakari, 2009), estos dirigidos específicamente para la industria automovilística provocando la comercialización de dispositivos MEMS a principios de los 80s. Pero fue hasta 1987 cuando se denominaron así a los MEMS como Sistemas Microelectromecánicos. A principios de la década de 1990, los MEMS se fabrican en silicio, con una tecnología de fabricación que surge a partir de los procesos de fabricación de circuitos integrados (IC). Desde entonces, se han propuesto y establecido dispositivos MEMS más complejos para el campo de aplicaciones MEMS, como aeroespacial, biomédico, automotriz, biotecnología, entre otros (Kouravand, 2011).

Desde mediados de los 1990 hasta la actualidad ha habido un gran avance en la investigación de tecnología MEMS y en los procesos de fabricación, tanto en el desarrollo y la demostración de prototipo de microsensores y actuadores para la comercialización de productos MEMS.

Se tiene registrado que a través de las décadas se ha incrementado las iniciativas de investigación de los MEMS. El diseño de microsistemas ha evolucionado. Actualmente, se fabrican una amplia variedad de dispositivos MEMS que se aplican a varios sistemas que se utilizan en la vida diaria, por ejemplo, automóviles, impresoras de inyección de tinta, cámaras fotográficas, videojuegos, etc., (Maluf & Williams, 2004), así como, en monitoreo ambiental, aplicaciones biológicas, tratamientos médicos, etc. (Cauchi y otros, 2019).

Los MEMS son el resultado de una larga historia de desarrollo tecnológico. El uso de MEMS está presente en casi todas las industrias y sistemas de uso común. En la Figura 1.1, se muestra una línea del tiempo que ejemplifica el desarrollo de los MEMS a través de las décadas.

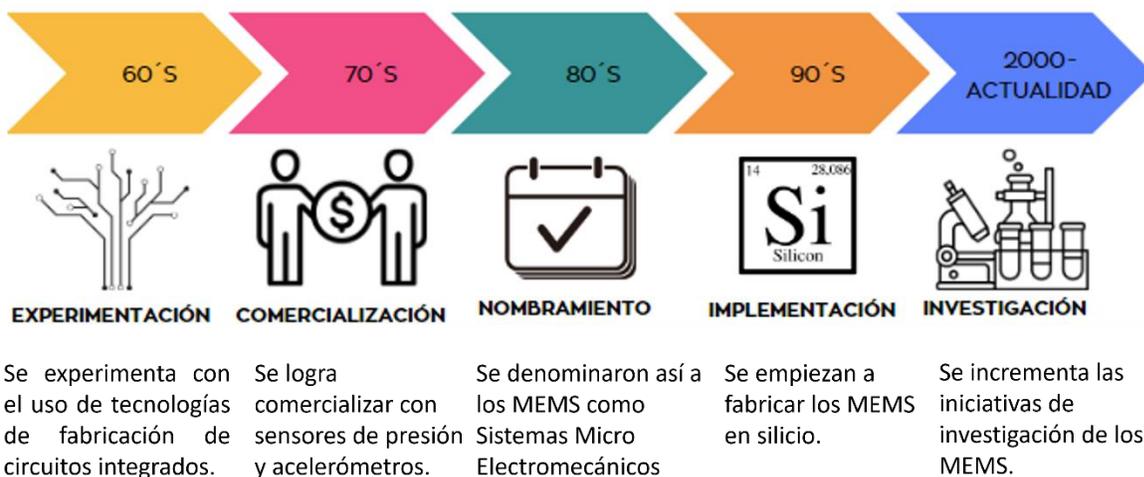


Figura 1.1. Línea del tiempo de los MEMS.

1.3 Hipótesis

Con el apoyo del análisis numérico es posible determinar y comparar los parámetros de desempeño básico de las geometrías del actuador chevrón más comunes, lo cual puede servir de base para la selección de la geometría del actuador a utilizar en una aplicación específica.

1.4 Objetivo general

Determinar los parámetros de desempeño básico de las geometrías más representativas del actuador chevrón utilizando análisis numérico.

1.5 Objetivos particulares

- Seleccionar geometrías representativas del actuador chevrón.
- Seleccionar el material para la implementación de las geometrías.
- Considerando la actuación electrotérmica, realizar las simulaciones correspondientes a las geometrías del punto uno.
- Registrar los valores de los parámetros de desempeño de los actuadores: desplazamiento, fuerza, distribución de temperatura, esfuerzo.
- Comparar los resultados obtenidos, tomando como base al actuador chevrón convencional.
- Generar recomendaciones de diseño y aplicaciones de los actuadores analizados.

1.6 Limitaciones

- Se requiere un conocimiento previo para el manejo del software Ansys™ Workbench, la dedicación de tiempo para su correcto uso es indispensable.
- Daño en el equipo de cómputo personal.
- No se cuenta con beca para la elaboración de la tesis.
- Consecuencias de contingencia sanitaria SARS(COV-2).

1.7 Justificación

Debido a que el actuador chevrón es ampliamente utilizado como parte de geometrías más complejas es recomendable diferenciar los parámetros básicos de desempeño de las geometrías más representativas de este actuador.

El conocimiento de los parámetros de desempeño de algunas de las geometrías del actuador chevrón es relevante para la selección de acuerdo con la aplicación que se vaya a utilizar, ya sea como un actuador individual o como parte de un sistema más complejo. Cabe señalar que, las geometrías se diferencian en general por la forma de los brazos que forman parte de su constitución. Es posible conocer las ventajas y desventajas de estas geometrías a partir de los parámetros básicos de desempeño. El desplazamiento, la fuerza y el esfuerzo son básicos en la selección.

El análisis numérico es una poderosa herramienta útil en nuestro caso para determinar los parámetros de desempeño mencionados. Este análisis responde a la necesidad de reducir tiempo y gastos innecesarios involucrados en el proceso de diseño y la posterior fabricación de sensores y actuadores.

Capítulo 2

Marco Teórico

En este capítulo, se muestra el marco teórico en el que se plantea el desarrollo de este proyecto. Lo que, permite identificar a algunas de las geometrías a analizar, así como familiarizarnos con sus modelos matemáticos, y observar cómo impactan los cambios en las geometrías de los brazos a la complejidad de tales modelos.

2. MARCO TEÓRICO

2.1. Sistemas Microelectromecánicos

Las tecnologías se pueden utilizar para producir estructuras, dispositivos y sistemas en la escala de micrómetros. Inicialmente, las técnicas de micromecanizado correspondieron a la industria de los circuitos integrados (IC). Actualmente, se están desarrollando muchos procesos únicos de micromecanizado específicos de MEMS (Judy, 2001).

Los MEMS combinan la función mecánica y eléctrica en dispositivos a escalas muy pequeñas. Pueden actuar como sensores, recibiendo información de su entorno o como actuadores, los sensores y actuadores se denominan transductores, que cumplen la función de transformar señales o energía de un dominio energético a otro (Shukla, y otros, 2012), (Nuryadi, Djajadi , Adiel, Aprilia, & Aisah, 2013).

Los MEMS se utilizan ampliamente en la industria automotriz, biomédica, biotecnológica, aeroespacial, etc. Encontrándolos en dispositivos de uso cotidiano como el acelerómetro, el cual es ampliamente utilizado en sistemas para la activación de las bolsas de aire. También se utilizan en teléfonos móviles, en sistemas de detección de movimiento sobre la pantalla, en impresoras, en el sistema de inyección de tinta e inclusive en proyectores (Developpement, 2019).

Los MEMS pueden actuar como sensores o actuadores, respondiendo a la información del medio que lo rodea o como actuadores, transformando algún tipo de energía de entrada comúnmente eléctrica en una acción determinada (Huber, Fleck, & Ashby, 1997).

2.2 Microactuadores

Los actuadores basados en MEMS tienen una amplia gama de aplicaciones, tales como microinterruptores, microespejos y micromotores. Los esquemas de actuación más utilizados son actuación térmica, electrostática, magnética, piezoeléctrica y neumática. Se destaca la actuación térmica, debido a que genera un alto nivel de desplazamiento, alta precisión, repetibilidad y simplicidad

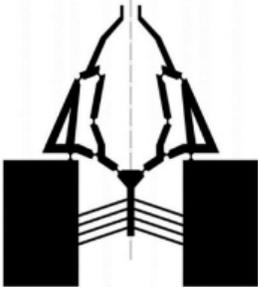
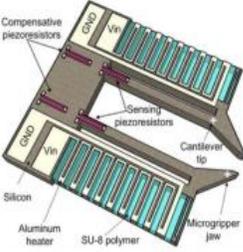
en el diseño. Esta actuación puede obtenerse de varias formas (Elbuken, Gui, Ren, Yavuz, & Khamese, 2008). Entre las más comunes se encuentra la actuación electrotérmica, mediante la cual, se han desarrollado diversos dispositivos (Wang, Shen, & Chen, 2014).

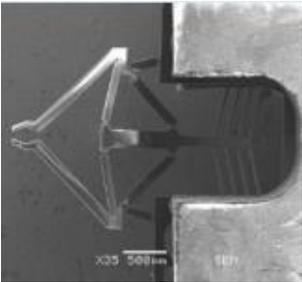
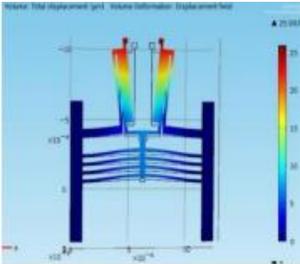
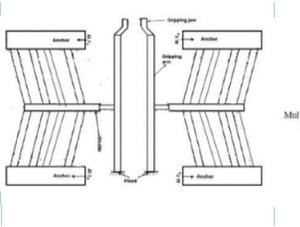
El actuador chevrón o actuador con brazos V se constituye por un arreglo de pares de brazos anclados en sus extremos exteriores con un ángulo previamente definido, unidos a un flecha o vástago movable.

Cuando los brazos se calientan, se expanden, debido al efecto de Joule, y tienden a deformarse para generar un movimiento lineal uniforme en la flecha. El ángulo previamente mencionado de los brazos direcciona el movimiento de la flecha o vástago.

Una de sus principales aplicaciones que tiene el microactuador chevrón es su implementación en el uso de micropinzas que comúnmente se diseñan para manipular objetos. En la Tabla 2.1, se presentan ejemplos de micropinzas, accionadas por microactuadores chevrón.

Tabla 2.1 Tipos de micropinzas

Nombre	Imagen	Referencia
<p>Micropinza electrotérmica impulsada por un actuador chevrón.</p>		<p>(Chu, Zhang, & Chen, 2011)</p>
<p>Micropinza electrotérmica con mandíbula grande y sensores de fuerza integrados.</p>		<p>(Chu Duc, Lau, & Creemer, 2008)</p>

<p>Micropinza SU-8 electrotérmica impulsada por actuado chevrón</p>		<p>(Zhang, Chu, Wang, & Chen, 2013)</p>
<p>Micropinza electrotérmica con sensor de contacto capacitivo integrado</p>		<p>(Ali, Shakoor, & Hassan, 2011)</p>
<p>Micropinza electrotérmica en celda de microensam blaje</p>		<p>(Vatan & Hamed, 2020)</p>
<p>Micropinza electrotérmica de diferentes materiales sobre el rendimiento de Chevrón</p>		<p>(Aravind, Ramesh, Ramya, Praveenkumar, & Kalaiarasi, 2016)</p>

Todas las micropinzas se desarrollan con diferentes diseños y diferentes tipos de actuadores, normalmente constan de un par de mordazas de sujeción, un mecanismo actuador y un método de amplificación (H., A. & A., 2020).

2.3 Tipos de actuación

Existen diferentes tipos de actuación teniendo como objetivo el aumentar su eficiencia según la situación lo demande, por ejemplo: piezoeléctrico, electromagnético, electrostático, electrotérmico y aleaciones con memoria de forma (SMA).

2.3.1 Piezoeléctrico

El efecto piezoeléctrico indica la capacidad de un determinado material para producir un voltaje eléctrico en respuesta a el esfuerzo mecánico aplicado. La piezoelectricidad fue descubierta por los hermanos Curie en 1880, y el significado de 'Piezo' proviene de la palabra griega que significa 'presionar' o 'empujar'. Los actuadores que utilizan el principio piezoeléctrico tienen alta sensibilidad, aunque pequeña fuerza impulsora y desplazamiento por unidad de voltaje. En consecuencia, una buena comprensión del principio que tiene lugar es esencial para obtener un dispositivo de alto rendimiento con uno de estos enfoques de actuación (S, Algamili Abdullah y otros, 2021).

2.3.2 Electrostático

Basada en la atracción de placas cargadas enunciando que las cargas de igual signo se repelen, mientras que las de diferente signo se atraen; o en otras palabras las fuerzas electrostáticas entre cargas de igual signo (positivo o negativo), son de repulsión, mientras que las fuerzas electrostáticas entre cargas de signos opuestos (positivo y negativo), son de atracción. Complementando con el fundamento de la ley de atracción de Coulomb, mediante la cual se calcula la fuerza eléctrica que actúa entre dos cargas en reposo. A partir de esta ley se puede predecir cuál será la fuerza electrostática de atracción o repulsión existente entre dos partículas según su carga eléctrica y la distancia que existe entre ambas. La actuación electrostática proporciona eficiencia, bajo consumo, conducción de respuesta rápida y nanoestructuras (Conrad, Schenk, Kaiser , & Langa , 2015). Se utilizan frecuentemente para actuar a micropinzas. Los actuadores electrostáticos ofrecen la frecuencia más alta respuesta con el menor consumo de energía. Sin embargo, requieren un voltaje de operación mayor (Wang Z. S., 2015)

2.3.3 Electrotérmico

El actuador electrotérmico está basado en la expansión térmica de los brazos de agarre debido al efecto Joule en presencia de corrientes eléctricas, que tiene muchas ventajas, como gran deformación, alta fuerza de recuperación, bajo voltaje de conducción y estructura compacta. Los actuadores electrotérmicos tienen aplicaciones prometedoras en MEMS, ya que, se ha demostrado que son compactos, estables, y proporcionan accionamiento de alta fuerza, desarrollándose en una variedad de configuraciones para movimientos en el plano o fuera del plano (Zhang, Yu, Liu, & Zhang, 2015).

2.3.4 Aleación de memoria de forma (Por sus siglas en inglés SMA)

Este tipo de accionamiento se caracteriza por la capacidad del material de modificar su forma, así como su tamaño, exponiéndolo a altas temperaturas y que este regrese a su forma original en ausencia de calor. El material es capaz de modificar su forma y tamaño a elevadas temperaturas y regresa a su posición original cuando se elimina el calor (Kawamoto & Tsuji, 2011). Las aleaciones que comúnmente podemos encontrar son: Au/Cu, In/Ti, Ni/Ti, NiTiNOL (Elahinia, 2015). En la Figura 2.1 se muestra un esquema representativo de los tipos de actuación y sus principales ventajas.

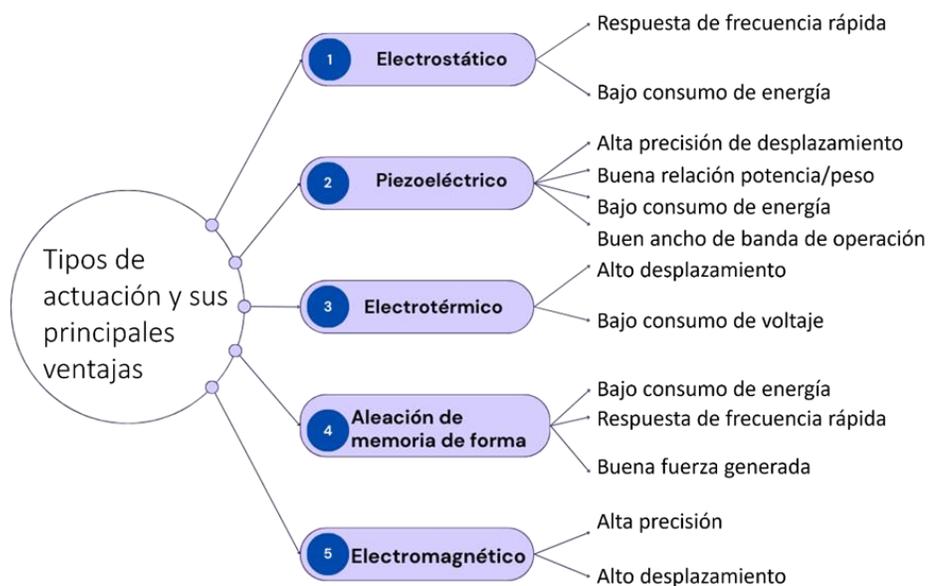


Figura 2.1 Esquema de tipos de actuación (Yang & Xu, 2017) (Llewellyn-Evans, Griffiths, & Fahmy, 2020) (Griffiths, Evans, & Fahmy, 2020).

2.4. Microactuador V

. Un actuador chevrón consiste básicamente de un arreglo de pares de brazos, anclados en sus extremos exteriores, con un ángulo inicial predefinido (θ), y una flecha, también llamada haz central, masa de prueba o vástago móvil, la cual permite el acoplamiento de los brazos. El actuador se calienta por el Efecto de Joule, debido al paso de corriente a través de la estructura, generada al aplicar una diferencia de potencial en los contactos anclados al sustrato (anclas). Cuando los brazos se calientan, se expanden y tienden a deformarse para generar un movimiento lineal uniforme en la flecha. Cuando los brazos se calientan, se expanden y tienden a deformarse para generar un movimiento lineal uniforme en la flecha. Una imagen representativa de los actuadores chevrón o actuadores térmicos con brazos V, se muestra en la Figura 2.2.

El ángulo previamente mencionado de los brazos direcciona el movimiento de la flecha o vástago. En el Tabla 2.2 se muestra la descripción de los parámetros que lo conforman.

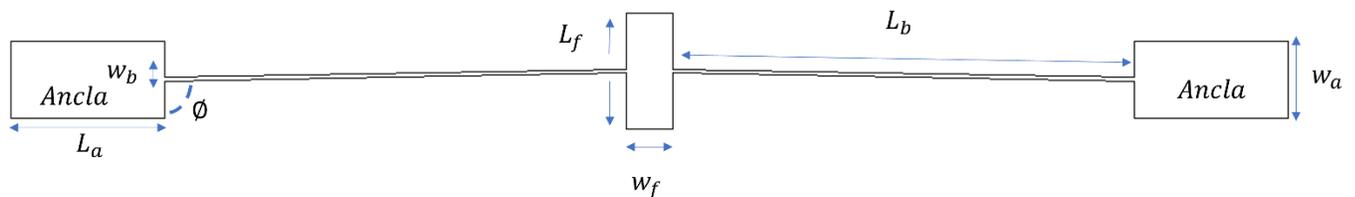


Figura 2.2 Actuador chevrón V.

Tabla 2.2 Descripción de las variables que conforman el actuador chevrón V.

Variable	Descripción
L_b	Largo de brazo
w_b	Ancho de brazo
θ	Ángulo de inclinación
w_f	Ancho de flecha

L_f	Largo de flecha
w_a	Ancho de ancla
L_a	Largo de ancla

2.4.1 Modelado matemático del microactuador V

A continuación, se presenta el modelado matemático donde de manera analítica se puede obtener el desplazamiento del actuador chevrón V, de acuerdo con la ecuación 2.1 (Yong, Corigliano, & D Espinosa, 2006), así como, la fuerza que ejerce en la flecha debido a la diferencia de temperatura.

$$U^{\Delta T} = \alpha \Delta T L \frac{S}{\left(S^2 + C^2 \frac{12I}{AL^2}\right)} \quad (2.1)$$

Donde:

α = coeficiente de expansión térmica (1/K)

ΔT = Diferencia de temperatura (°C)

S = Función seno del ángulo de apertura de cada brazo (Seno 1°)

C = Función coseno del ángulo de apertura de cada brazo (Coseno 1°)

A = Área de sección transversal del brazo (μm^2)

I = Momento de inercia (μm^4).

El momento de inercia se puede calcular mediante la ecuación 2.2.

$$I = \frac{w^3 t}{12} \quad (2.2)$$

Donde:

w = ancho de brazo (μm)

t = grosor de la estructura (μm).

La fuerza de reacción en la flecha (Kaajakari, 2009), se calcula mediante la ecuación 2.3.

$$F_y = N \alpha EA \Delta T \text{Sin } \emptyset \quad (2.3)$$

Donde:

N = Número de brazos (adimensional)

α = Coeficiente de expansión térmica (1/K)

E =Módulo de Young (GPa)

A =Área de sección transversal del brazo (μm^2)

ΔT =Diferencia de temperatura ($^{\circ}\text{C}$)

$\text{Sin } \emptyset$ =Seno del ángulo

Se entiende que la rigidez es la capacidad de un material o estructura de soportar esfuerzos sin sufrir deformaciones o desplazamiento. Por lo tanto, podemos decir que la constante de rigidez es la relación que existe entre la fuerza aplicada y el desplazamiento que esta provoca sobre el material o estructura.

La constante de rigidez se calcula a partir de la ecuación 2.4.

$$k = \frac{AE(12I \cos^2 \emptyset + AL^2 \sin^2 \emptyset)}{L^3} \quad (2.4)$$

Las variables de la ecuación 2.4 fueron descritas anteriormente.

Una alternativa para el cálculo de la fuerza de reacción a grosores pequeños se muestra en la ecuación 2.5, que se obtiene a partir de la ecuación de la rigidez sustituyendo el área de sección transversal por el desplazamiento máximo (Chiorean, Dudescu, Pustan, & Hardau, 2013).

$$F_y = \frac{U_{max}E(12I \cos^2 \beta + Al^2 \sin^2 \beta)}{l^3} \quad (2.5)$$

Donde:

U_{max} = Desplazamiento (μm).

E = Módulo de Young (GPa).

A = Área de la sección transversal del brazo (μm^2).

I = Momento de inercia de la sección transversal del brazo (μm^4).

2.5 Microactuador Z

Los actuadores en forma de V y Z comparten características comunes entre sí, ambos están configurados simétricamente y son capaces de producir movimiento rectilíneo. Por otro lado, los actuadores en forma de V se basan principalmente en la extensión del brazo o viga, mientras que los actuadores en forma de Z se basan principalmente en la flexión del brazo o viga para lograr un movimiento rectilíneo (Zhang, Yu, Liu, & Zhang, 2015).

En principio, la forma Z los actuadores son similares a los actuadores en forma de V. Los actuadores en forma Z se basan en la flexión de los actuadores simétricos en forma Z hechos inducidos por expansión térmica para lograr desplazamiento rectilíneo de la lanzadera central. Más específicamente, cuando una corriente circula a través del dispositivo, se genera calor a lo largo de las vigas debido al efecto de Joule.

Un actuador térmico en forma Z consta de dos vigas en forma Z y un vástago central; cada viga en forma Z incluye dos vigas de longitud L y una viga corta central de longitud l , con un ancho y un grosor de brazo constante. (Guan, C. & Zhu, Y., 2010), como se muestra en la Figura 2.3, la descripción de sus variables se muestra en la Tabla 2.3.

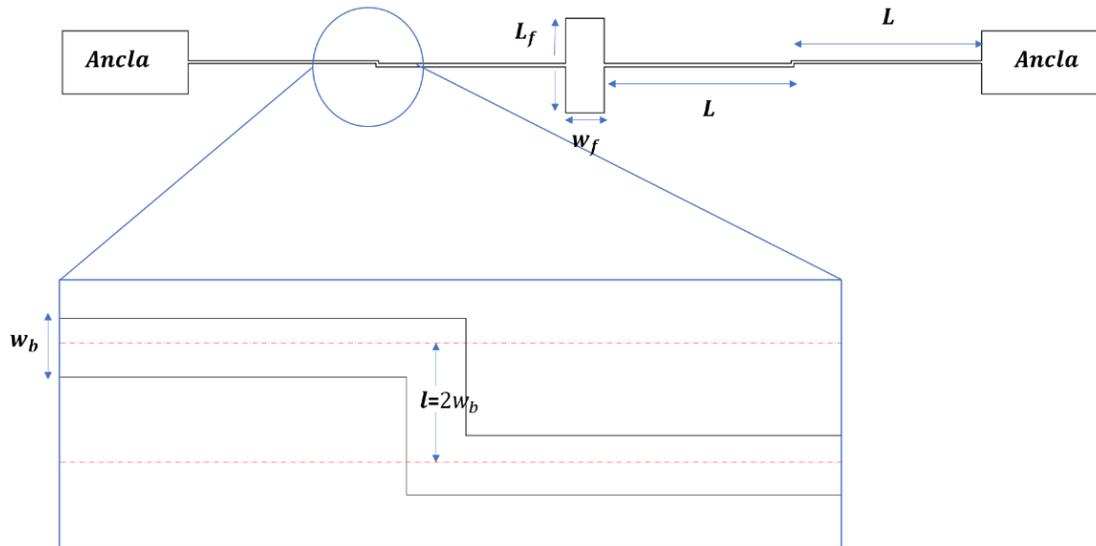


Figura 2.3 Actuador chevrón Z.

Tabla 2.3 Variables del microactuador Z.

Variable	Descripción
L_b	Largo de flecha
w_b	Ancho de brazo
l	Largo de viga central
w_f	Ancho de flecha
L_f	Largo de flecha

2.5.1 Modelado matemático para microactuador Z.

La obtención de las magnitudes de fuerza y desplazamiento en microactuador Z tiene un ligero cambio respecto a los chevrones V, esto considerando que la diferencia de geometría en los brazos influye directamente en los resultados.

Con la ecuación 2.6 podemos calcular el desplazamiento de un chevrón Z, (Guan & Zhu, 2010).

$$U_y = \frac{12 \alpha \Delta T L^3}{l^2 + 6L(l + \frac{w^2}{3l})} \quad (2.6)$$

Donde:

α = Coeficiente de expansión térmica (1/K)

ΔT = Diferencia de temperatura (°C)

L = Mitad de la longitud total de la viga

l = Longitud de la viga central

w = Ancho de la viga en todas las secciones

La fuerza de reacción puede obtenerse por el producto del número de brazos, desplazamiento y la rigidez (Guan & Zhu, 2010), mostrada en la ecuación 2.7.

$$F = nkU \quad (2.7)$$

Donde:

n = Número de pares de brazos

k =Constante de rigidez

La constante de rigidez se calcula mediante la ecuación 2.8.

$$k = \frac{EW^3h(l^3 + 2LW^2 + 6Ll^2)}{(8L^3l^3 + w^2l^4 + 16w^2L^4 + 2w^4Ll + 12L^4l^2 + 6w^2Ll^3)} \quad (2.8)$$

donde:

E =Módulo de Young

h = Grosor de la estructura.

2.6 Microactuador Z modificado

El actuador Z con ancho Z modificado correspondiente a $40w_b$, adaptado de (Guan & Zhu, 2010), se muestra en la Figura 2.4, la geometría del brazo modificado tiene brazos simétricos, sin ángulo de inclinación, en la Tabla 2.4, se muestran las variables y sus descripciones correspondientes.

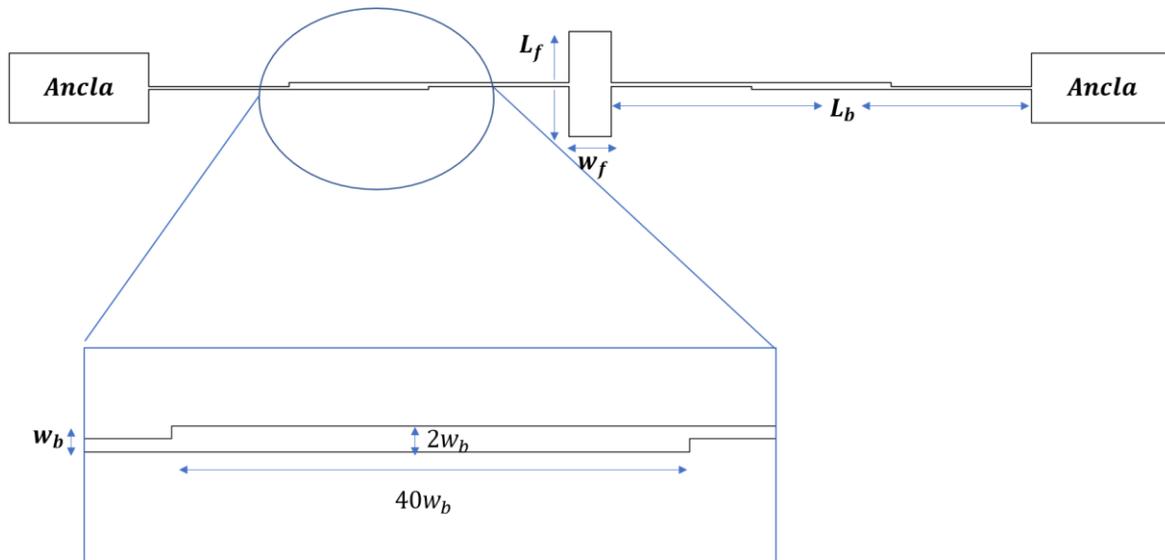


Figura 2.4 Microactuador Z modificado

Tabla 2.4 Variables del actuador chevrón Z modificado

Variable	Descripción
L_b	Largo de brazo
w_b	Ancho de brazo
$40w_b$	Ancho de brazo Z
w_f	Ancho de ancla
L_f	Largo de ancla

2.6 Microactuador con regulador de movimiento rectangular

Conociendo la información donde la modificación de geometrías en los brazos de un actuador chevrón convencional provoca cambios en los resultados de

sus parámetros, la incorporación de un regulador geométrico regular a sus brazos permite seguir analizando los cambios que estos producen (Beeby, Ensell, Kraft, & White, 2004).

2.6.1 Microactuador con regulador de movimiento rectangular de 50 μm

La implementación de geometrías regulares en el centro de los brazos puede incrementar sus parámetros de desempeño tales como el desplazamiento y fuerza, es posible realizar parametrizaciones para identificar las dimensiones más adecuadas. En la Figura 2.5 se muestra el chevrón con regulador de movimiento correspondiente a un regulador de 50 μm , en la Tabla 2.5 se muestran las descripciones de sus variables.

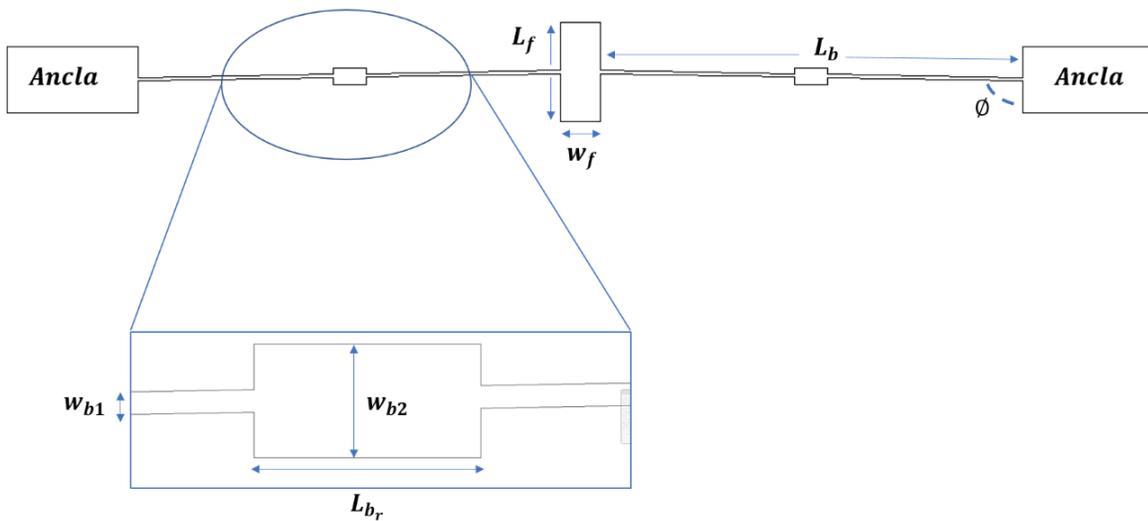


Figura 2.5 Microactuador chevrón con regulador rectangular de 50 μm .

Tabla 2.5 Descripción de variables del actuador chevrón con regulador rectangular de movimiento de 50 μm .

Variable	Descripción
L_b	Largo de brazo
w_{b1}	Ancho de brazo 1
ϕ	Ángulo de inclinación
w_f	Ancho de flecha
L_f	Largo de flecha
w_{b2}	Ancho de brazo 2
L_{b_r}	Largo de brazo regulador

Una modificación adicional a los brazos del microactuador chevrón con regulador de movimiento es incrementar la longitud del regulador de 50 μm a 200 μm , como se observa en la Figura 2.6, y la descripción de sus variables en la Tabla 2.6.

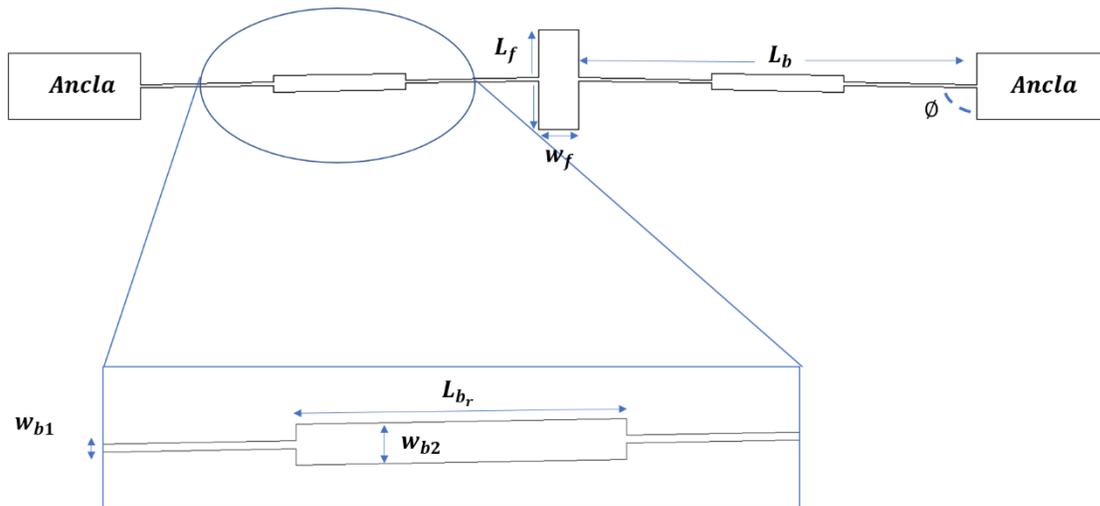


Figura 2.6 Microactuador chevrón con regulador de movimiento rectangular 200 μm .

Tabla 2.6 Descripción de las variables del actuador chevrón con regulador de movimiento 200 μm .

Variable	Descripción
L_b	Largo de brazo
w_{b1}	Ancho de brazo 1
\varnothing	Ángulo de inclinación
w_f	Ancho de flecha
L_f	Largo de flecha
w_{b2}	Ancho de brazo 2
$L_{b,r}$	Largo de brazo regulador

Existen microactuadores chevrón con modificación en la geometría de sus brazos, tal es el caso del microactuador chevrón con brazo en forma de rombo (Figura 2.7) con la intención de mejorar el desempeño termomecánico del actuador chevrón clásico se consideró la posibilidad de modificar su geometría. Anteriormente, otros trabajos se han concentrado en la optimización del actuador, a través del ajuste de parámetros geométricos como el ángulo de inclinación o la longitud y el ancho de las barras (Cragun & Howell, 1999) (Que,

Park, & Gianchandani , 1999) (Sinclair, 2000). En las figuras 2.7 y 2.8 se observan propuestas de microactuadores con diferentes geometrías en sus brazos.

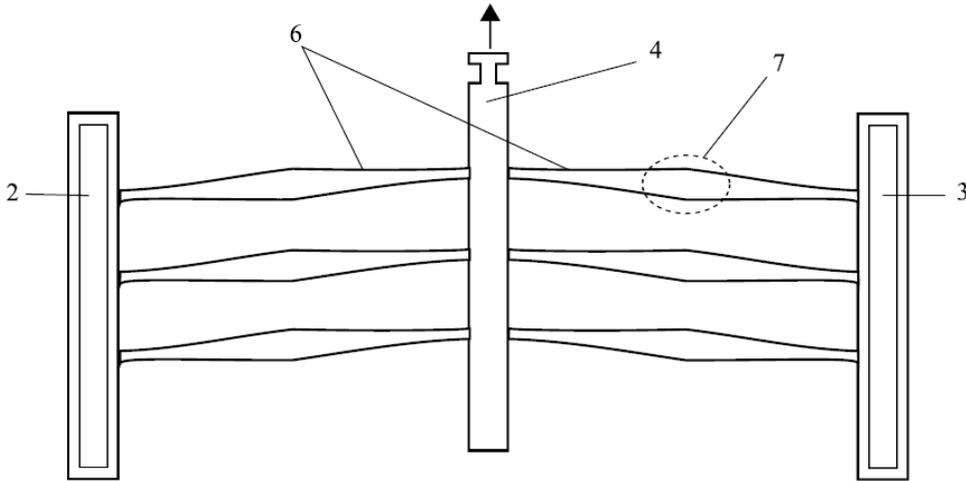
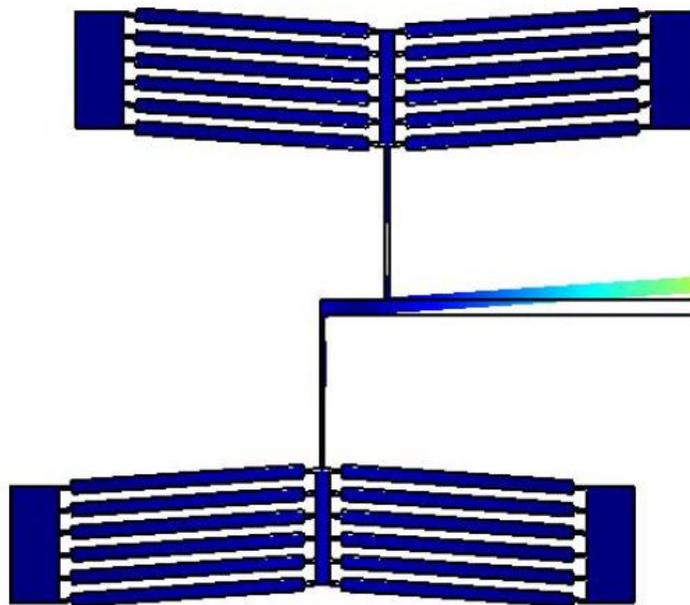


Figura 2.7 Microactuador chevrón brazo romboidal (México Patente n° 295737, 2008).



v

Figura 2.8 Microactuador chevrón brazo térmico pasivo (Steiner, Keplinger, Schalko, Hortschitz, & Stifter, 2015).

De las 7 diferentes geometrías de brazos mostradas se eligieron las que son ampliamente utilizadas en la literatura, así como aquellas de las que se dispone de su modelado matemático, ya que, debido al nivel de complejidad inherente en cada cambio realizado en la geometría del brazo, este trabajo se limita al análisis numérico, pero contar con la comparación analítica nos permite validar las aproximaciones logradas. En total se eligieron 5 geometrías de brazo.

Capítulo 3

Metodología

En este capítulo, se presenta la descripción de la metodología construida para el desarrollo de esta tesis.

3. METODOLOGÍA

3.1 Metodología general

En la figura 3.1 se muestra la metodología general. Como primer punto se describe el estado del arte que consiste en la búsqueda, lectura y análisis de la bibliografía encontrada en relación con MEMS, chevrones y tipos de actuación. También se consideró la búsqueda del modelado matemático, parámetros, relaciones y restricciones de microactuadores. A través de la identificación de sus magnitudes, así como de sus condiciones de frontera. Se lleva a cabo la simulación, considerando el dibujo, modelado y parametrización de los dispositivos. Finalmente, una vez obtenida la información, se lleva a cabo una comparación entre los resultados numéricos, así como los obtenidos teóricamente.

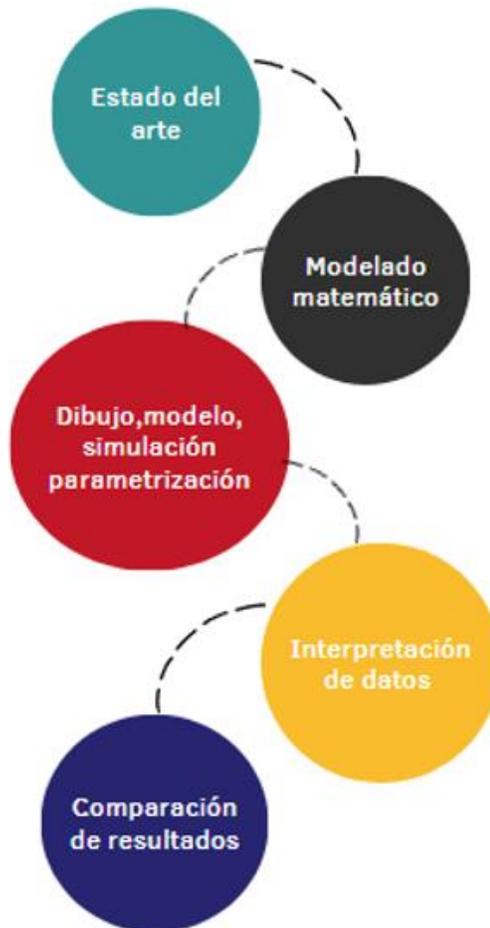


Figura 3.1 Diagrama metodología general

3.2 Metodología de simulación

En la figura 3.2 se observa la metodología llevada a cabo para el proceso de simulación que consiste en el siguiente orden, mediante el software Ansys Workbench se dibujan, simulan y parametrizan los microactuadores chevrón. Utilizando como material estructural silicio, aplicando las condiciones de frontera, parametrizando las variables de interés: ángulo de inclinación, grosor de la estructura, ancho y largo de brazo, finalmente la comparación de resultados mediante gráficos.

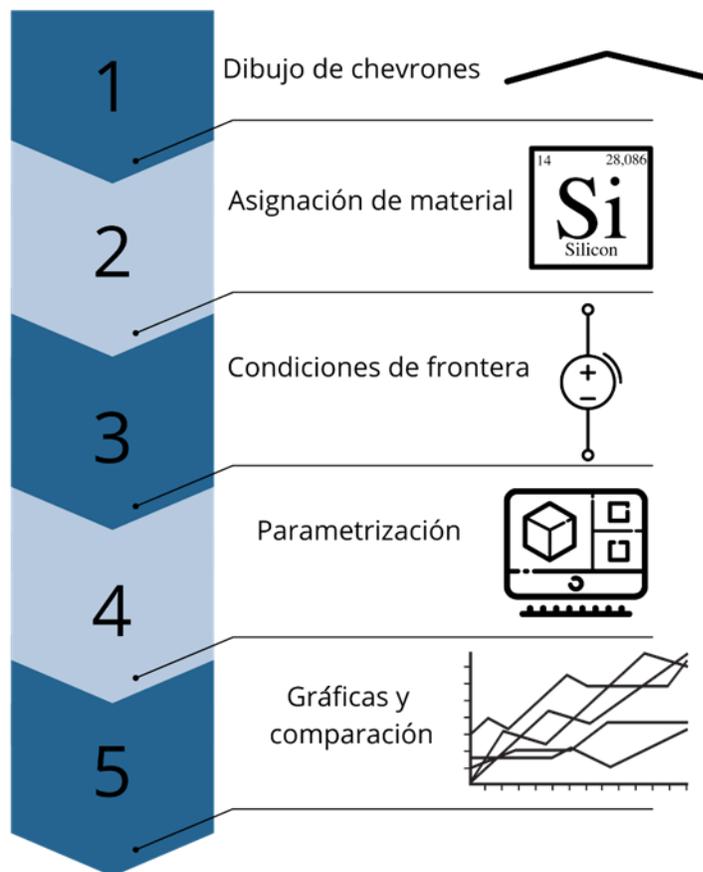


Figura 3.2 Diagrama metodología de simulación

Capítulo 4

Simulación, caracterización y parametrización

En este capítulo se presenta el análisis, simulación y la parametrización de cada uno de los diseños de actuadores chevrones que se seleccionaron en el capítulo anterior. Se consideran dimensiones y condiciones similares para llevar a cabo el análisis y la posterior comparación de resultados.

4. SIMULACIÓN, CARACTERIZACIÓN Y PARAMETRIZACIÓN DE LAS DIFERENTES GEOMETRÍAS DEL ACTUADOR CHEVRÓN.

Para llevar a cabo el diseño de un dispositivo, es necesario identificar sus parámetros fundamentales, así como los efectos de sus variaciones en el desempeño. Esto permite tomar las decisiones adecuadas sobre la configuración geométrica y sus dimensiones (ANSYS Inc., 2011). La selección de materiales también es básica en el proceso de diseño.

El apoyo del software ANSYS Workbench 2023, Origin 2008 y AutoCAD 2023, hacen posible que se realice la parametrización de los elementos de interés, de una manera sencilla y eficaz, mediante barridos paramétricos automatizados de las variables bajo análisis, con iteraciones rápidas, mediante la aplicación del Método de Elemento Finito (FEM).

Los datos generados de manera gráfica muestra resultados que permite al usuario detectar las tendencias, analizar el desempeño y, por lo tanto, se pueden elegir las magnitudes de los elementos geométricos que, sean más apropiadas, de acuerdo con los requerimientos establecidos a las necesidades de las aplicaciones. Los parámetros de desempeño a analizar fueron el desplazamiento, la fuerza de reacción y el esfuerzo para cada chevrón. Es importante mencionar que, los análisis paramétricos fueron realizados con las mismas condiciones de frontera para todos los casos: temperatura ambiente de 22 °C, diferencia de temperatura de 112 °C, voltaje máximo de 1 V. Con respecto a los parámetros geométricos, se realizaron los análisis de parametrización considerando dimensiones iguales para todos los elementos excepto para la dimensión a parametrizar. Cabe señalar que, el material estructural utilizado fue silicio, cuyas propiedades físicas y mecánicas se muestran en la Tabla 4.1.

Tabla 4.1 Parámetros físicos y mecánicos del silicio (Yang S. & Xu Q, 2017), (Jui-Chang K., Hen-Wei Huang, Shu-Wei Tung, & Yao-Jo, 2014).

Parámetros (unidad)	Descripción	Valor
ρ (kg/m ³)	Densidad	2329
E (GPa)	Módulo de Young	130.1
α (1/K)	Coefficiente de expansión térmica	2.568 e-6
κ (W/ m*K)	Conductividad térmica	148
ν (adimensional)	Razón de Poisson	0.33
C_p (J/ kg*K)	Calor específico	712
ρ (Ω ·m)	Resistividad	1.5 e-4
Punto de fusión, (°C)	Punto de fusión	1414C
Esfuerzo de cedencia, (MPa)	Esfuerzo de cedencia	250

4.1 Parametrización y análisis del actuador chevrón V.

Tomando en cuenta las dimensiones la Figura 4.1 se desarrollaron las parametrizaciones correspondientes a las magnitudes de las variables que conforman al chevrón V.

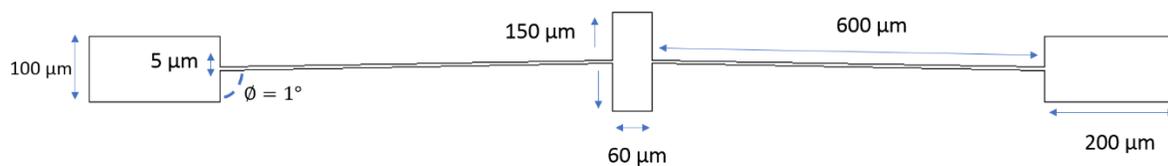


Figura 4.1 Dimensiones de los elementos de un actuador chevrón de dos brazos

El primer actuador chevrón analizado es el de brazo simétrico V. El primer análisis se llevó a cabo con un barrido de dimensiones de ancho de brazo en un rango de 5 μm a 14 μm con intervalos de 0.5 μm . En la figura 4.2 se muestra la distribución de temperatura obtenida aplicando un diferencial de potencial de 0 V a 1 V, correspondiente a 134.61 °C., obteniendo un desplazamiento numérico máximo de 7.37 μm y una fuerza de reacción numérica de 419.791 μN ,

correspondiente a 5 μm de ancho, como se muestra en las figuras 4.3 y 4.4. Para desplazamiento y fuerza, teniendo un porcentaje de error máximo del 4.5 y 8.08%, respectivamente.

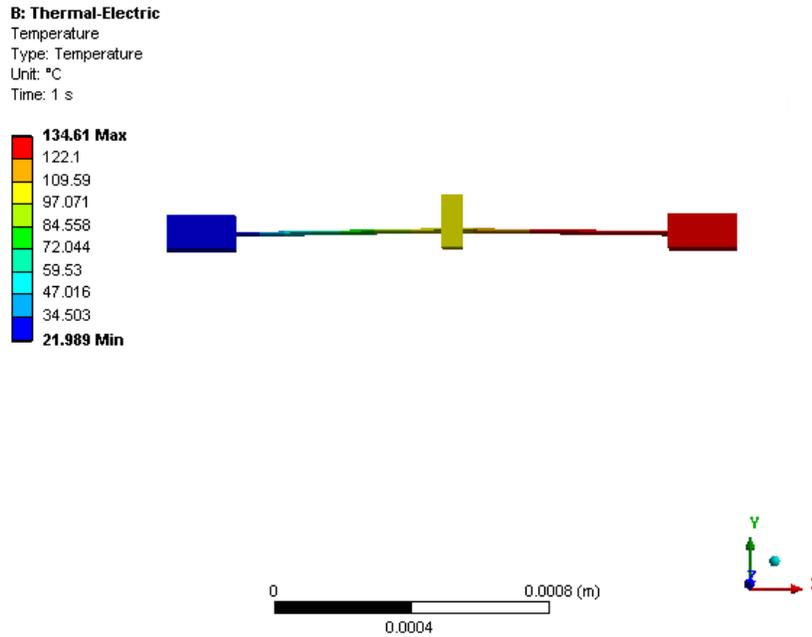


Figura 4.2 Distribución de temperatura para chevrón V.

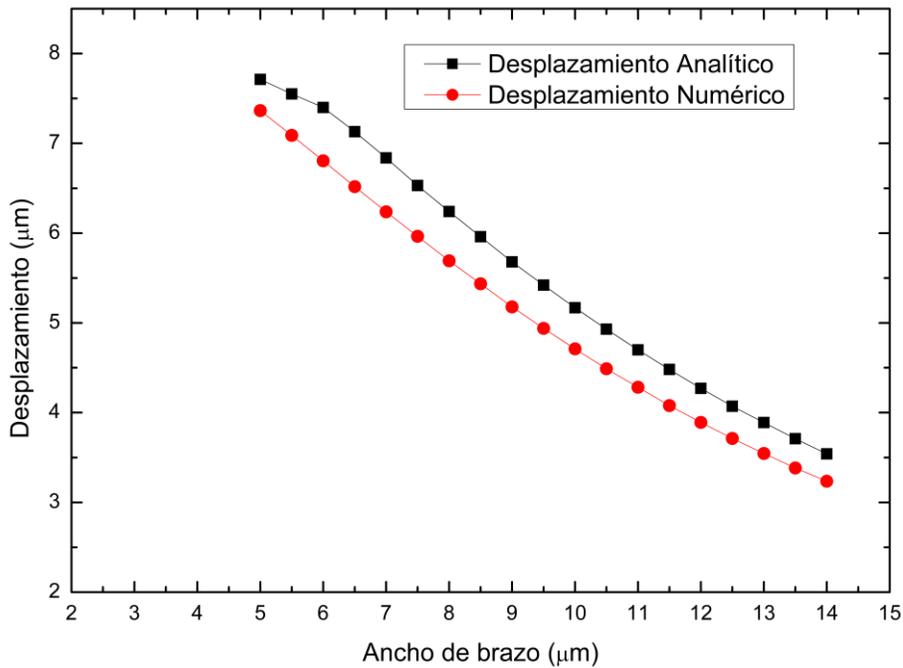


Figura 4.3 Ancho de brazo contra desplazamiento.

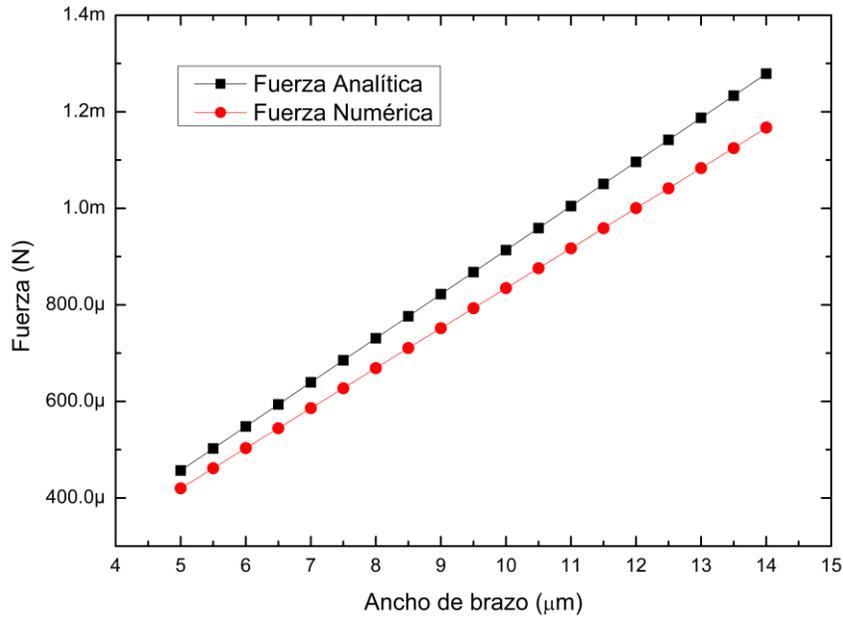


Figura 4.4 Ancho de brazo contra fuerza

En la figura 4.4, se observa cómo se mencionó anteriormente un crecimiento lineal, que no parece decaer en algún punto, debido a que, al incrementar el ancho de brazo, a su vez aumenta proporcionalmente la geometría y por lo tanto, la fuerza.

El siguiente análisis paramétrico fue para el ángulo de inclinación, donde el rango de análisis fue de 1° a 10° , con intervalos de 1° , obteniendo resultados máximos para desplazamiento numérico de $7.35 \mu\text{m}$ correspondiente 1° de inclinación y de 4.1 mN en 10° para la fuerza numérica, como se muestra en las figuras 4.5 y 4.6.

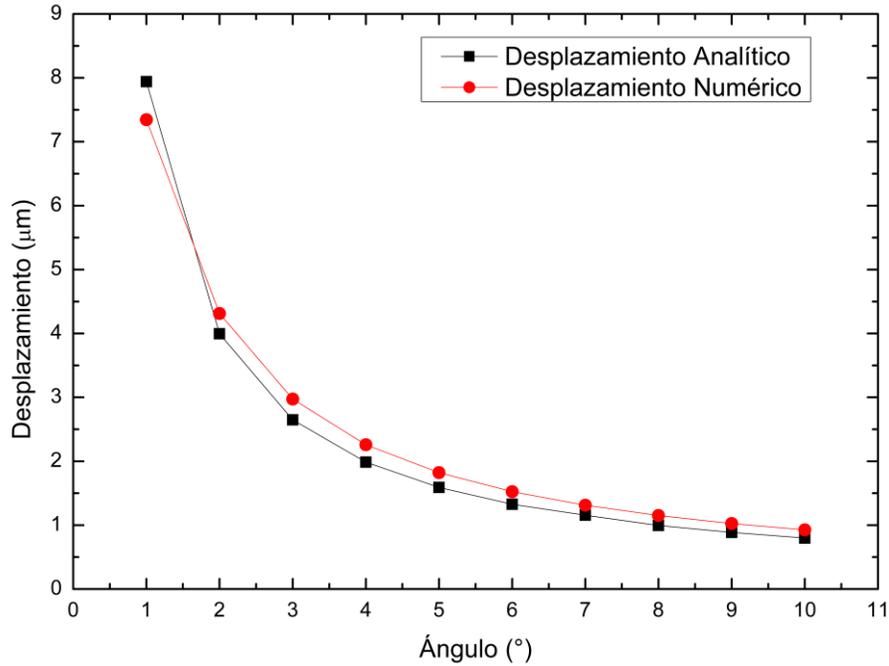


Figura 4.5 Ángulo de inclinación de brazo contra desplazamiento.

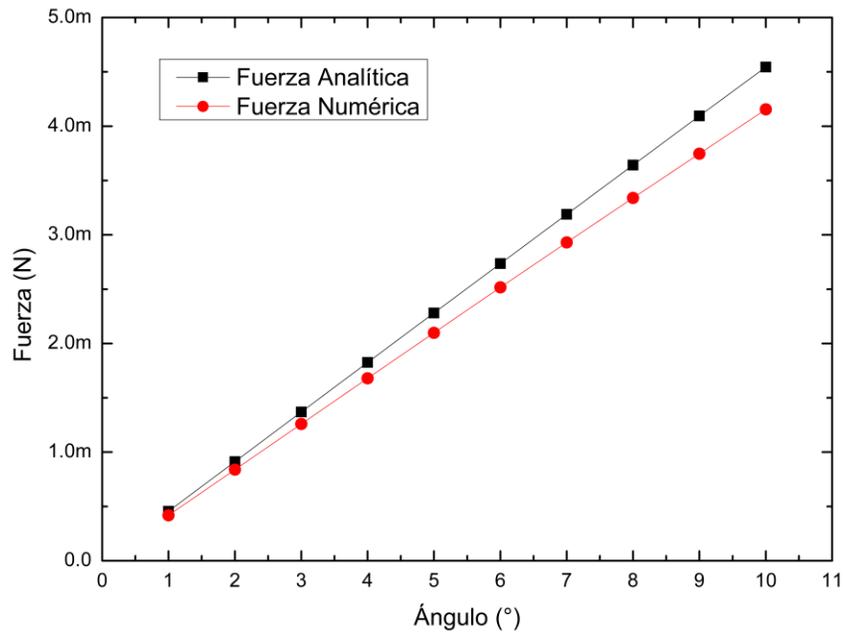


Figura 4.6 Ángulo de inclinación contra fuerza.

En la figura 4.6, se observa cómo se mencionó anteriormente un crecimiento lineal, que no parece decaer en algún punto, debido a que, al incrementar el ángulo de inclinación, se incrementa la fuerza, pero, incrementar en ángulo a gran escala podría colapsar la estructura debido a la elongación.

Posteriormente, se realizó la parametrización del largo del brazo, evaluado en un rango de 100 μm a 800 μm , obteniendo resultados significativos para desplazamiento de 10.55 μm para 800 μm de largo de brazo, como se muestra en la figura 4.7 con relación a largo del dispositivo y sus efectos sobre la fuerza, este efecto es muy pequeño, por lo que, no se incluye el gráfico.

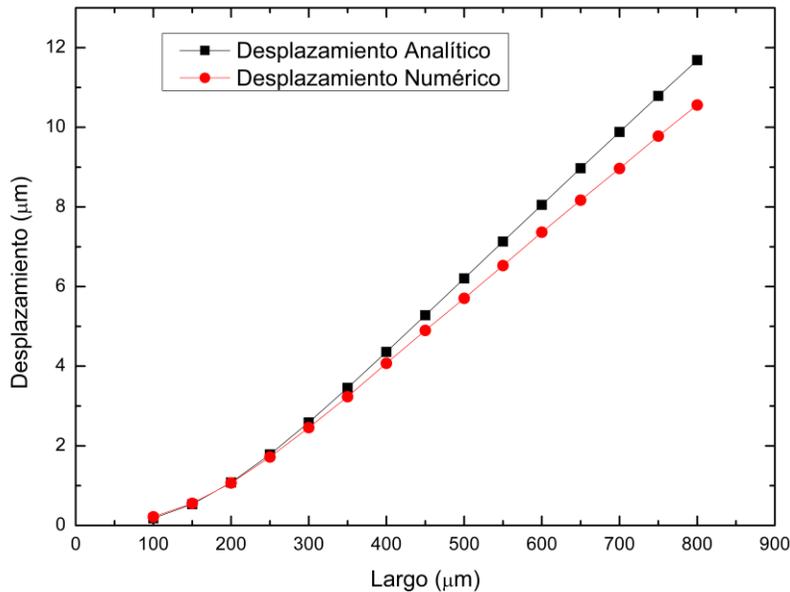


Figura 4.7 Largo de brazo contra desplazamiento.

En la Figura 4.8, se muestran las magnitudes de la fuerza al variar el grosor del dispositivo. Se observa una variación lineal creciente de 10 μm a 70 μm , en este último valor, se tiene una fuerza numérica de 419 μN con porcentaje de error de 4.5%, respecto a los resultados analíticos obtenidos. Es posible tener un decaimiento en la fuerza al incrementar a gran escala el grosor de la estructura, debido a que llegaría a ser muy pesado.

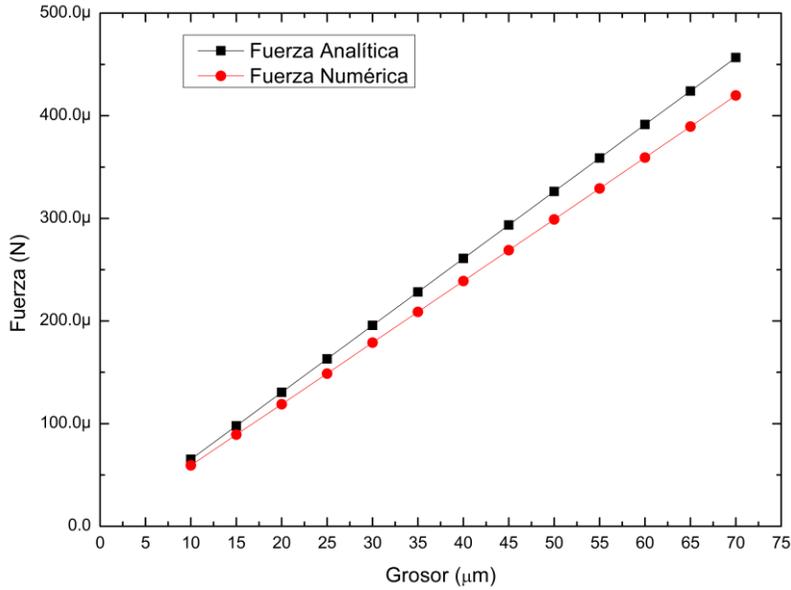


Figura 4.8 Grosor de la estructura contra fuerza

De acuerdo con las dimensiones de la figura 4.1, determinadas como competentes se obtuvieron los resultados numéricos y analíticos para desplazamiento, fuerza y esfuerzo obteniendo porcentajes de error menores al 10 %, mostrados en la Tabla 4.2, esto es, se trata de resultados aceptables.

Tabla 4.2 Resultados analíticos y numéricos del chevrón V.

Parámetro	Resultado analítico	Resultado numérico	Porcentaje de error
Desplazamiento (μm)	8.05	7.36	9.3%
Fuerza (μN)	456	419	4.5 %
Esfuerzo (MPa)	N.A.	160.38	N.A.

N.A. No Aplica.

4.2 Parametrización y análisis del actuador chevrón Z convencional

Tomando en cuenta las dimensiones la Figura 4.9, se desarrollaron las parametrizaciones correspondientes a las magnitudes de las variables que conforman el chevrón Z convencional.

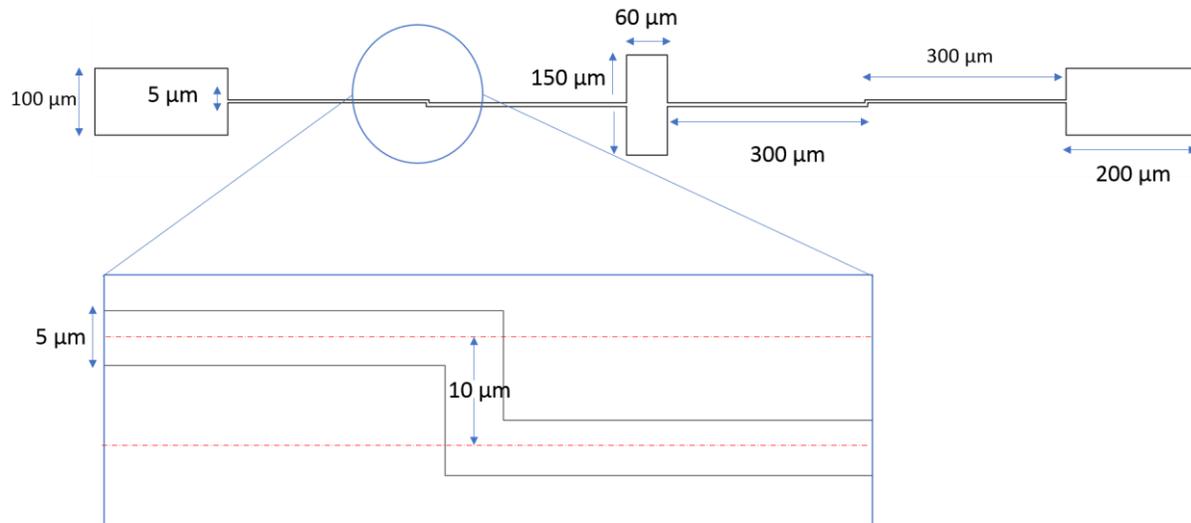


Figura 4.9 Dimensiones de los elementos de un actuador chevrón de 2 brazos Z convencional

El segundo actuador chevrón analizado es el de brazo Z convencional. El primer análisis se realizó con un barrido de dimensiones de ancho de brazo en un rango de $5\ \mu\text{m}$ a $25\ \mu\text{m}$ con intervalos de $2\ \mu\text{m}$. En la figura 4.10 se muestra la distribución de temperatura obtenida aplicando una diferencia de potencial de $0\ \text{V}$ a $1\ \text{V}$, correspondiente a $134.61\ ^\circ\text{C}$, obtenido un desplazamiento numérico máximo de $4.32\ \mu\text{m}$ y una fuerza de reacción numérica de $162\ \mu\text{N}$ en un ancho de $5\ \mu\text{m}$, como se muestra en las Figuras 4.11 y 4.12, teniendo un porcentaje de error máximo, en ese punto, de 9.96 y 1.8%, respectivamente.

Los resultados sobre el cálculo de la rigidez se pueden observar en la Figura 4.13, donde a un ancho de $5\ \mu\text{m}$, se obtiene una rigidez numérica de $36\ \text{N/m}$ y analítica de 33.86 con un porcentaje de error de 7.6%.

Cabe señalar que se considera el ancho de $5\ \mu\text{m}$, debido a que es la magnitud en la que se obtiene el mayor desplazamiento. Sin embargo, en este punto se tiene también una fuerza menor, así como, una magnitud de rigidez también menor. Las tendencias de las tres variables analizadas son similares y los rangos de error permanecen aceptables. Es la rigidez donde se tiene una coincidencia de resultados mayor.

B: Thermal-Electric

Temperature
Type: Temperature
Unit: °C
Time: 1 s

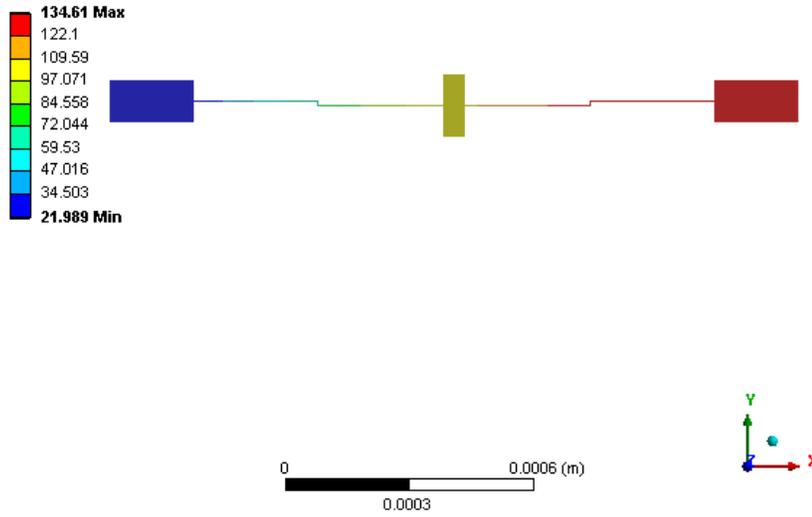


Figura 4.10 Distribución de temperatura para chevrón brazos Z convencional.

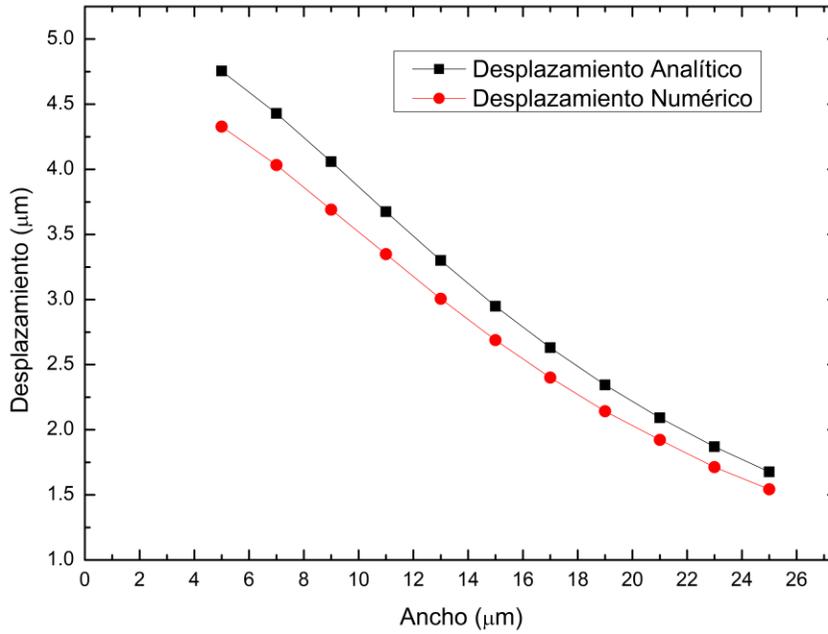


Figura 4.11 Ancho de brazo contra desplazamiento.

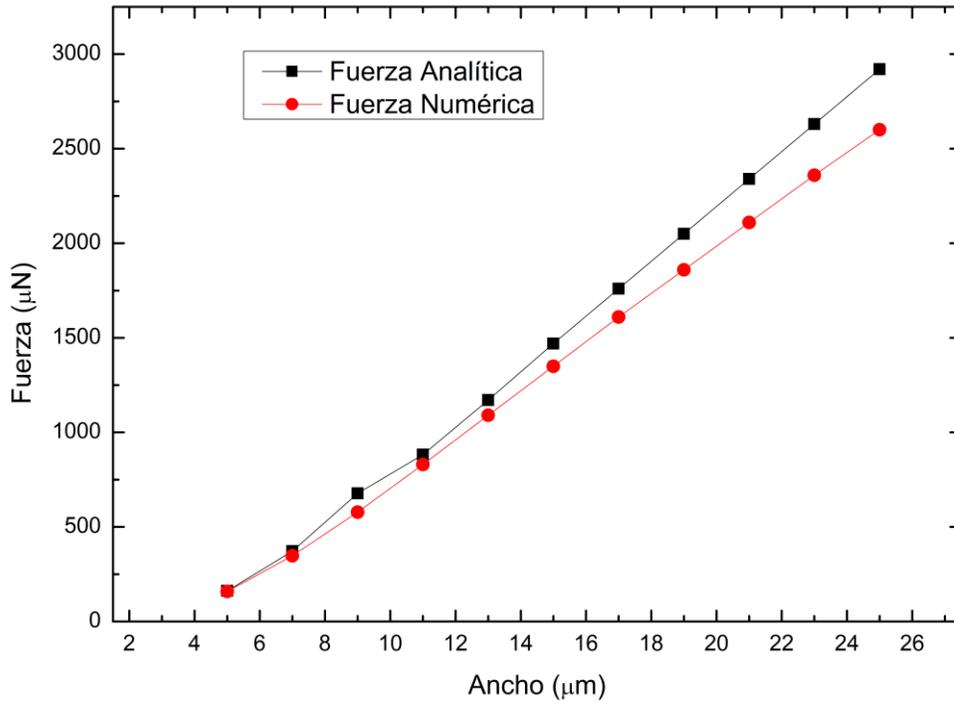


Figura 4.12 Ancho de brazo contra fuerza.

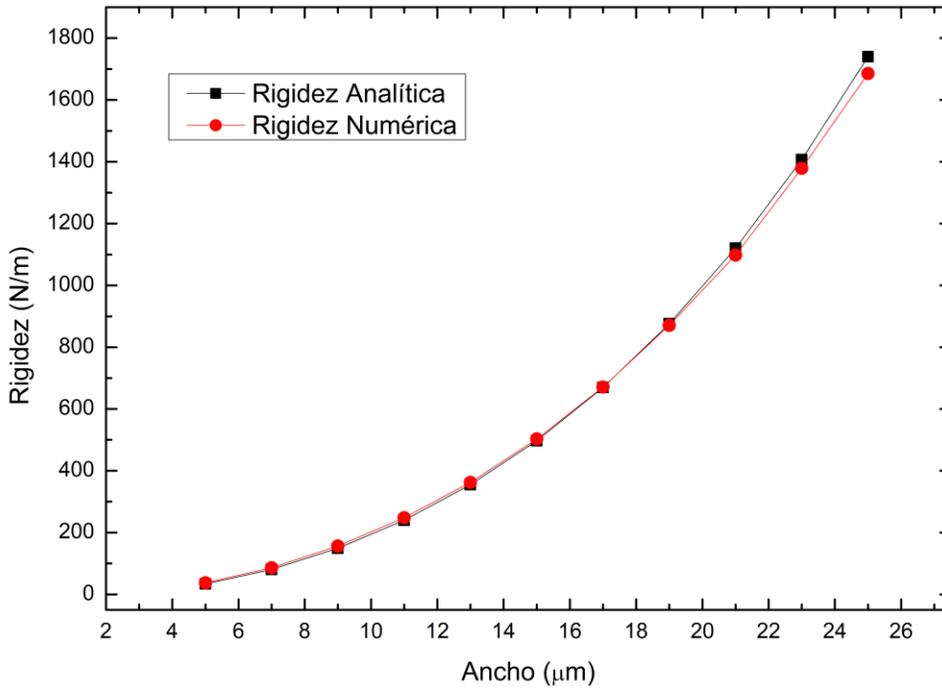


Figura 4.13 Ancho de brazo contra rigidez

Es importante mencionar que, a diferencia del actuador chevrón V y el chevrón-Z, únicamente fue posible parametrizar 3 de sus componentes: ancho de brazo, largo de brazo y grosor de la estructura, debido que este actuador no tiene ángulo de inclinación y por lo tanto, no es necesaria la parametrización.

En la Figura 4.14 se muestra el incremento del desplazamiento conforme aumenta el largo de brazo, obteniendo que para 200 μm se tiene un desplazamiento de 0.183 μm , y para 800 μm se obtuvo 8.46 μm . Cabe señalar que, se hizo la parametrización en un rango de 200 μm a 800 μm con intervalos de 100 μm . Es importante mencionar que se empezó en 200 μm , debido que en la literatura no se encuentran chevrónes con dimensiones de brazo tan pequeñas, ni superiores a 800 μm . Las aproximaciones analíticas y numéricas son muy cercanas y crecientes.

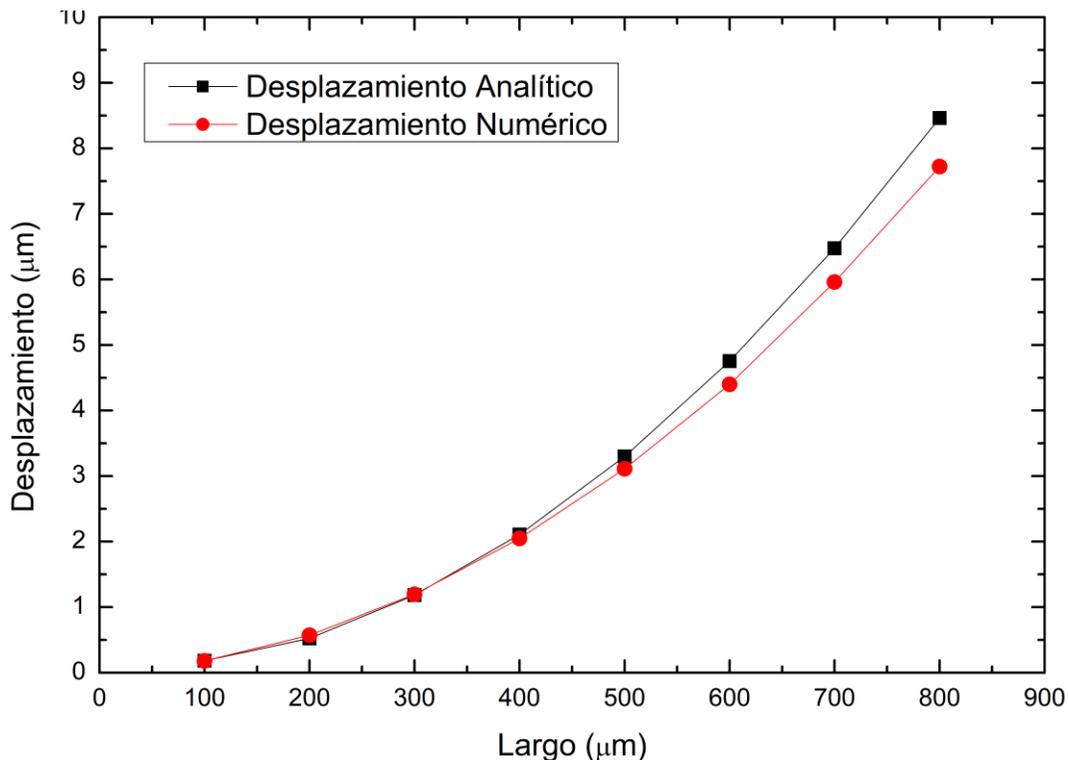


Figura 4.14 Largo de brazo contra desplazamiento.

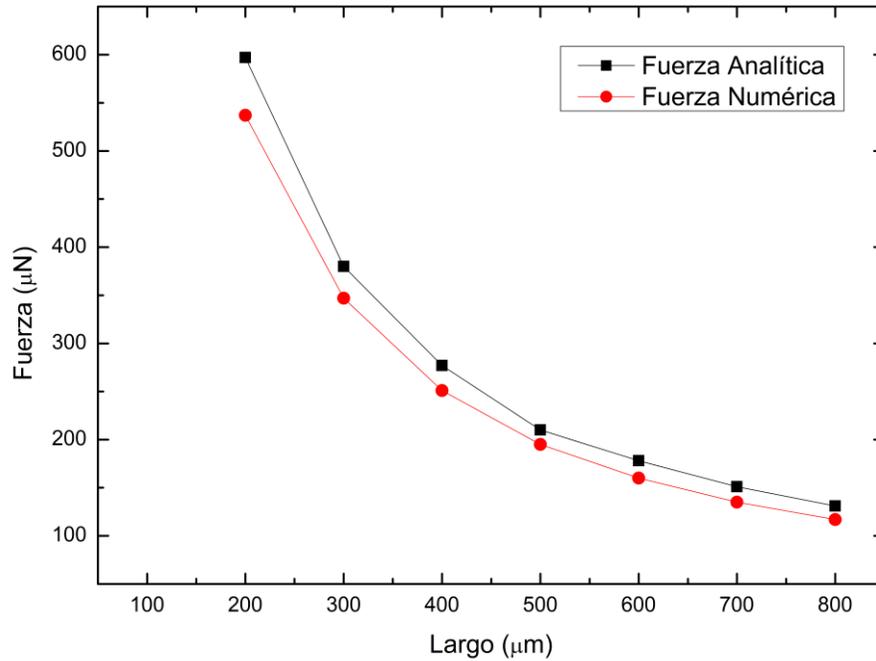


Figura 4.15 Largo de brazo contra fuerza.

En la Figura 4.15 se puede observar un comportamiento decreciente de la magnitud de la fuerza con relación al incremento en el largo de brazo. En la Figura 4.16 se aprecia un comportamiento similar cuando se analiza teniendo un decremento de la rigidez conforme aumenta el largo de brazo.

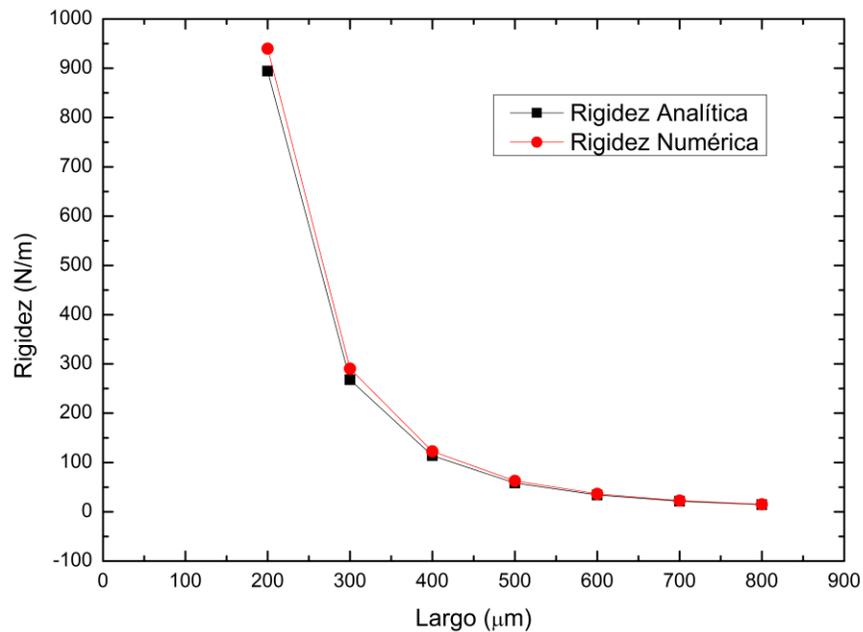


Figura 4.16 Largo de brazo contra rigidez.

En la Figura 4.17, se muestran las magnitudes de la fuerza al variar al grosor del dispositivo. Se observa una variación lineal creciente de 10 μm a 70 μm . En esta última magnitud se tiene un error de 1.8%. Con relación al grosor del dispositivo y sus efectos sobre el desplazamiento, de acuerdo con la ecuación 2.6, este efecto es muy pequeño, por lo que, no se incluye el gráfico. En la Tabla 4.3, se muestran los resultados obtenidos para su comparación con los chevrones con diferente forma de brazo.

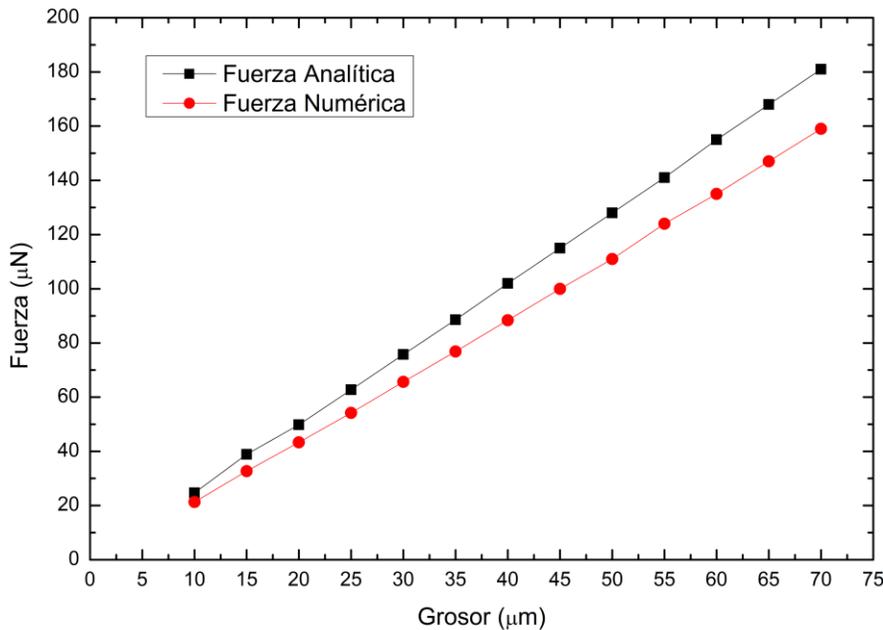


Figura 4.17 Grosor de la estructura contra fuerza.

En la Figura 4.18 puede observarse que, al aumentar el grosor del dispositivo aumenta la rigidez. Los resultados son ampliamente cercanos en particular para los grosores más bajos.

En la Tabla 4.3 se presenta la comparación entre los resultados numéricos y analíticos, para el actuador chevrón Z, donde puede apreciarse que los porcentajes de error son menores al 10%. La magnitud de error más pequeño corresponde a la fuerza.

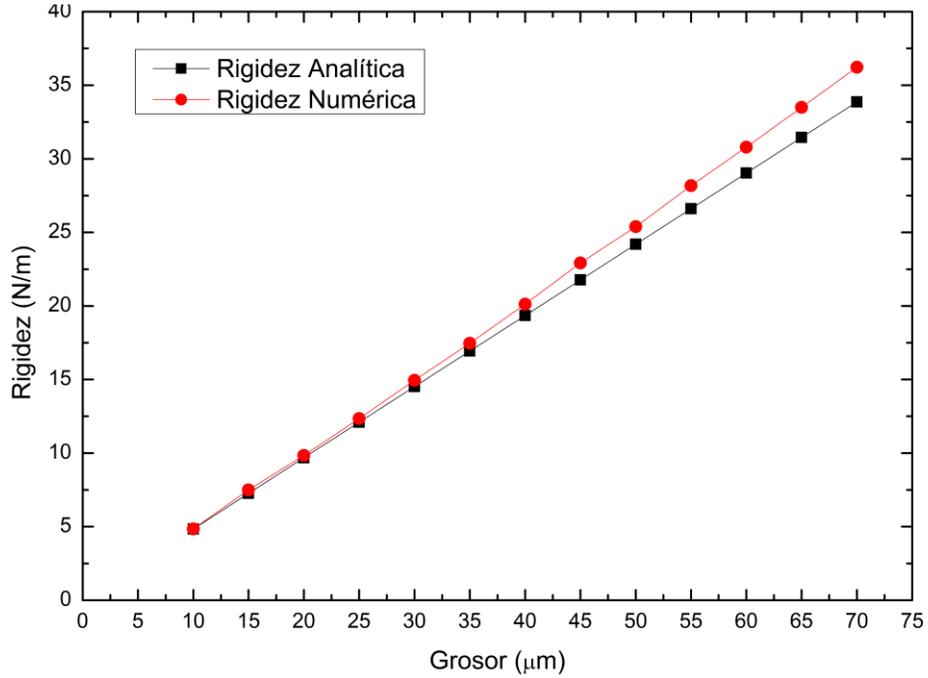


Figura 4.18 Grosor de la estructura contra rigidez

Tabla 4.3 Resultados analíticos y numéricos con porcentaje de error, chevrón Z.

Parámetro	Resultado analítico	Resultado numérico	Porcentaje de error (%)
Desplazamiento (μm)	4.75	4.33	9.96
Fuerza (μN)	162	159	1.8
Rigidez (N/m)	33.86	36.44	7.6
Esfuerzo (MPa)	N.A.	171.27	N.A.

4.3 Parametrización y análisis del actuador chevrón Z modificado.

Tomando en cuenta las dimensiones la Figura 4.19 se desarrollaron las parametrizaciones correspondientes a las magnitudes de las variables que conforman al chevrón Z modificado.

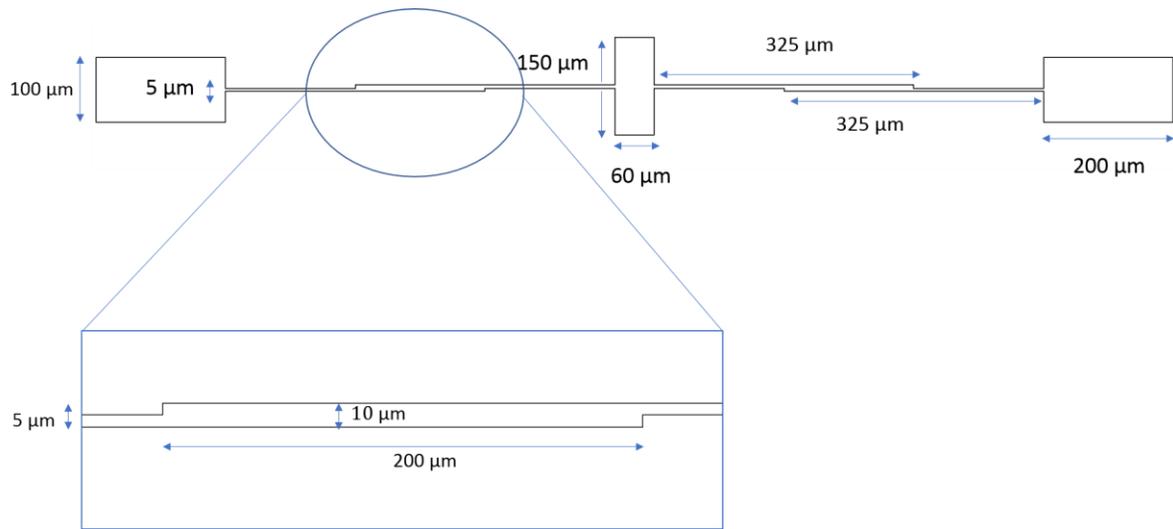


Figura 4.19 Elementos de un actuador chevrón de dos brazos z modificado.

El tercer actuador chevrón considerado es el chevrón Z modificado. El primer análisis se realizó con un barrido de dimensiones de ancho de brazo en un rango de 5 μm a 23 μm con intervalos de 2 μm. En la Figura 4.20 se muestra la distribución de temperatura obtenida aplicando una diferencia de potencial de 0 V a 1 V, donde se obtiene una temperatura máxima de 134.61 °C., alcanzando un desplazamiento numérico máximo de 8.8 μm y una fuerza de reacción numérica de 283 μN, considerando al ancho de brazo de 5 μm, como se muestra en las Figuras 4.21 y 4.22, respectivamente. Es importante mencionar que, para este tercer análisis paramétrico no se cuenta con resultados analíticos debido a que no hay modelado matemático para esta geometría y, por lo tanto, no hay comparación con los resultados numéricos.

B: Thermal-Electric

Temperature
Type: Temperature
Unit: °C
Time: 1 s

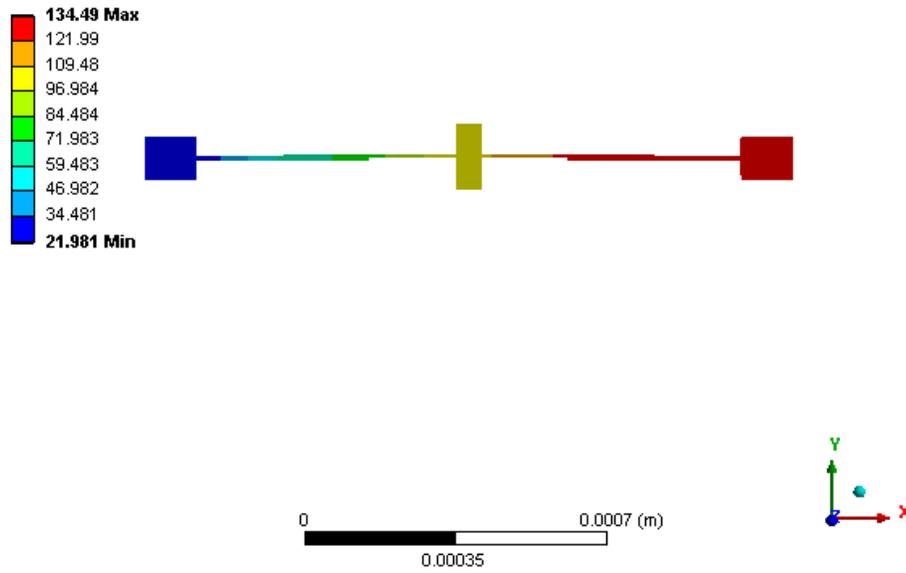


Figura 4.20 Distribución de temperatura para chevrón Z modificado.

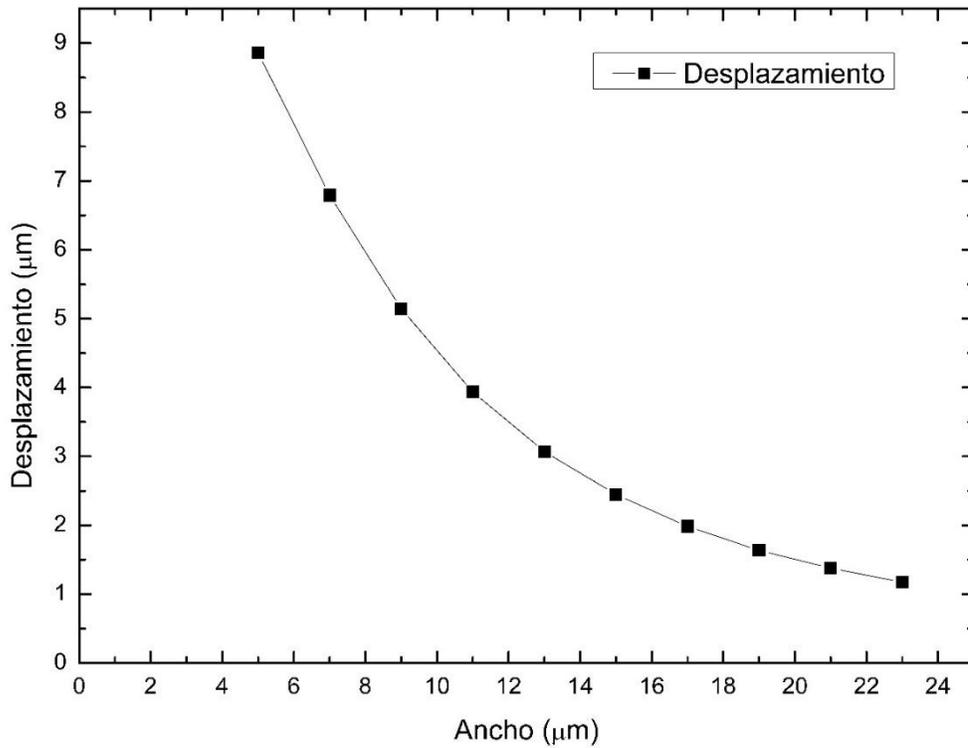


Figura 4.21 Ancho de brazo contra desplazamiento

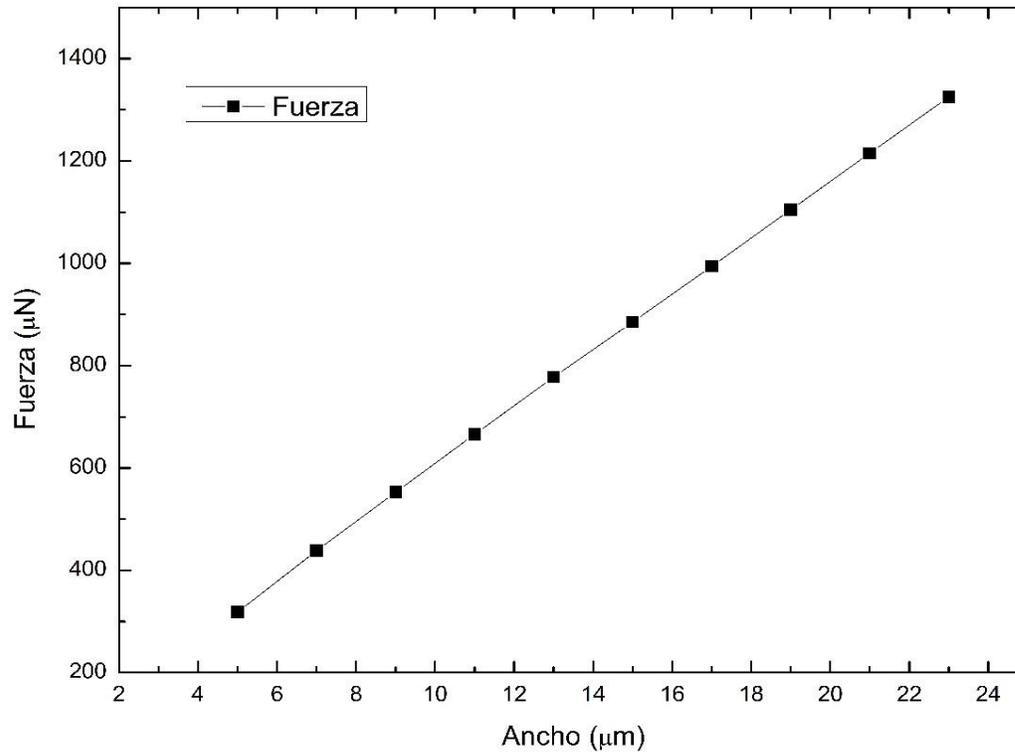


Figura 4.22 Ancho de brazo contra fuerza.

Las Figuras 4.23 y 4.24 corresponden al análisis de parametrización del largo del brazo, evaluado en un rango de 300 μm a 800 μm, para desplazamiento y fuerza, respectivamente.

En la Figura 4.23 se puede observar un comportamiento creciente del desplazamiento conforme aumenta el largo de brazo con un desplazamiento máximo de 14.9 μm en 800 μm de largo, cabe señalar que, no se recomienda largos de brazos tan grandes debido a que una longitud amplia puede ser impráctica para futuras aplicaciones, tales como algunas micropinzas, por lo que se decidió utilizar un largo de 600 μm para esta investigación.

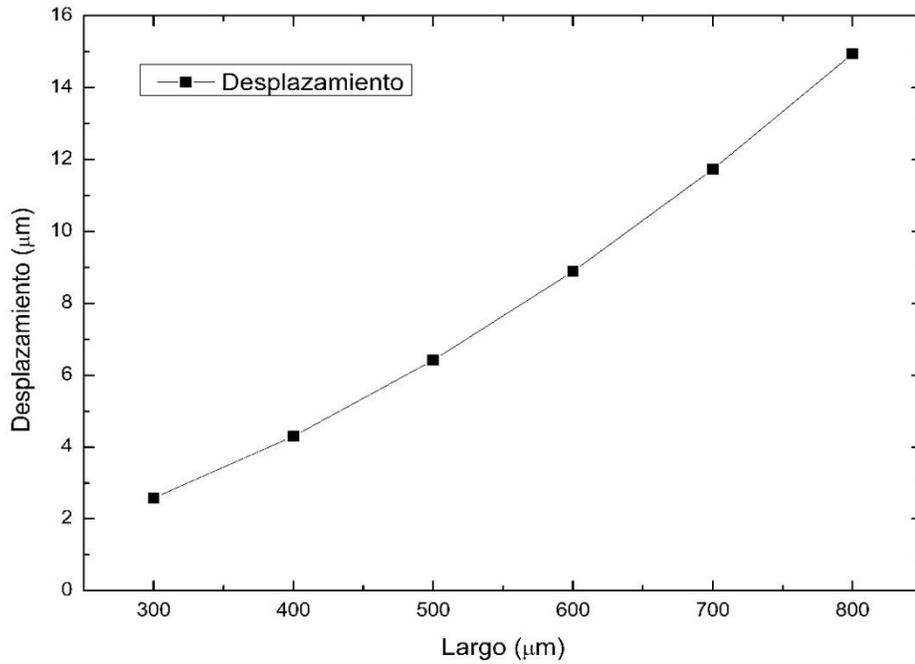


Figura 4.23 Largo de brazo contra desplazamiento.

Con respecto al comportamiento de la fuerza (Figura 4.24) se observa un decremento uniforme, es decir cuando el valor del largo de brazo aumenta la fuerza disminuye contrario al comportamiento del desplazamiento.

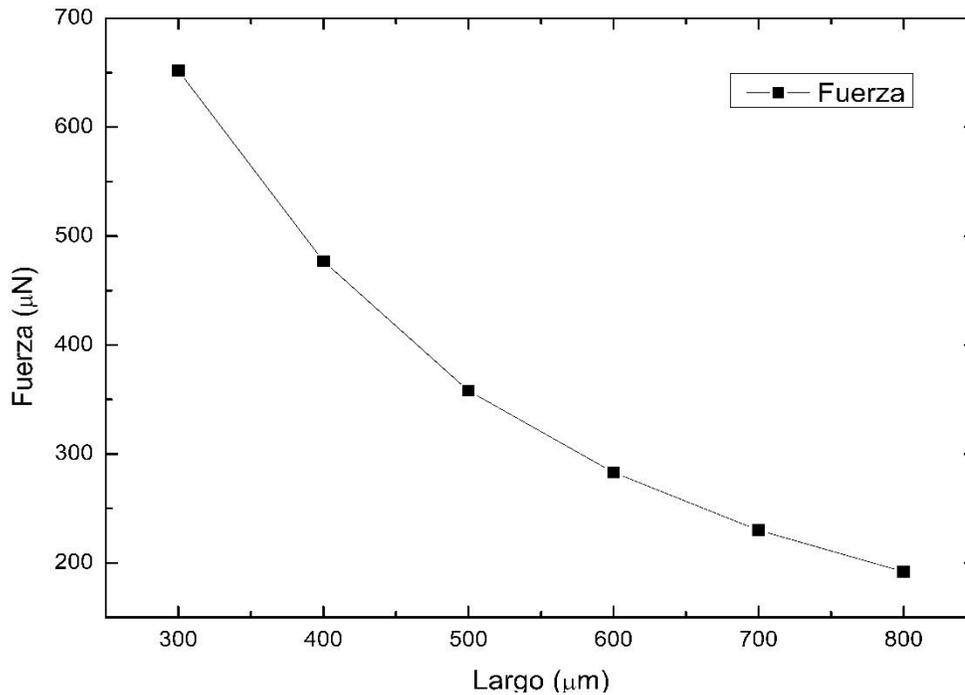


Figura 4.24 Largo de brazo contra fuerza.

Para el análisis del comportamiento del grosor de la estructura contra la fuerza se parametrizó en un rango de 10 μm a 70 μm (ver Figura 4.25). Se observa una tendencia creciente lineal, donde la magnitud máxima se encuentra en 70 μm con 283 μN . Por lo tanto, se puede decir que, conforme aumenta el grosor se incrementa la fuerza de reacción. En la Tabla 4.4 se muestran los resultados numéricos para desplazamiento, fuerza de reacción y esfuerzo correspondientes al chevrón Z modificado.

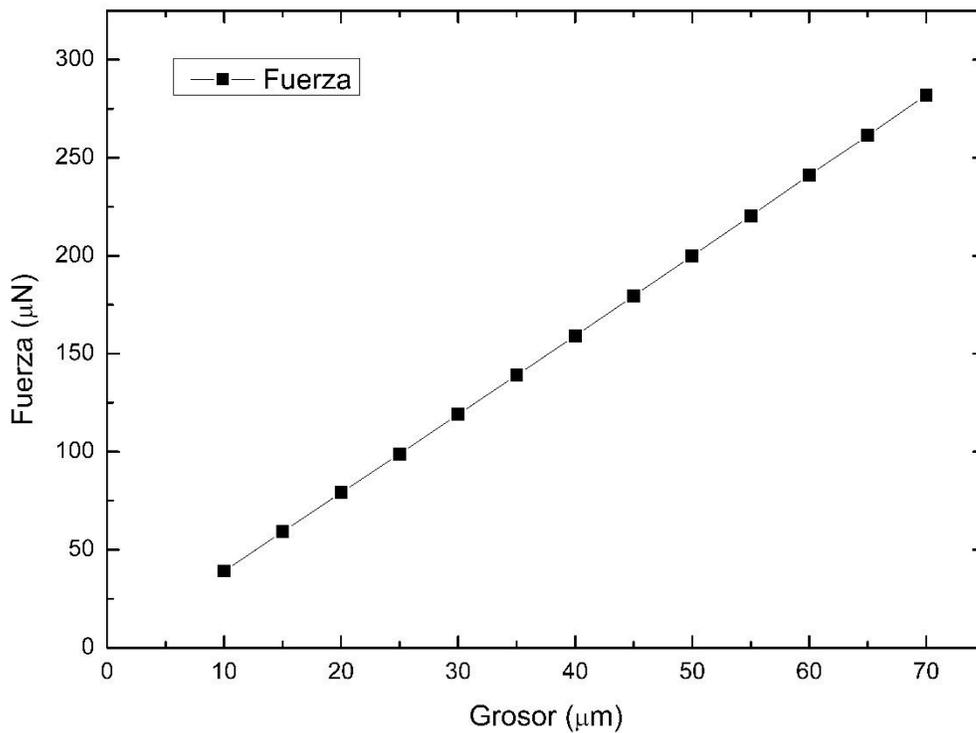


Figura 4.25 Grosor de la estructura contra fuerza.

Tabla 4.4 Resultados numéricos del chevrón Z modificado.

Desplazamiento (μm)	Fuerza (μN)	Esfuerzo (MPa)
8.89	283	164.52

B: Thermal-Electric

Temperature

Type: Temperature

Unit: °C

Time: 1 s

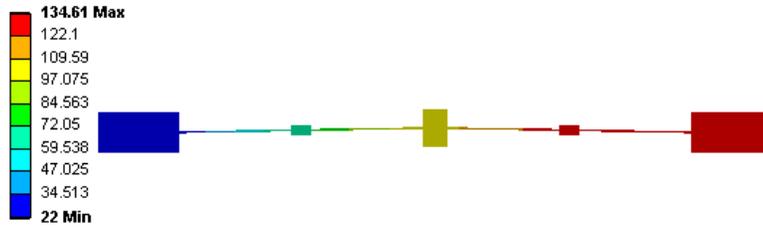


Figura 4.27 Distribución de temperatura para chevrón dos brazos con regulador de 50 μm

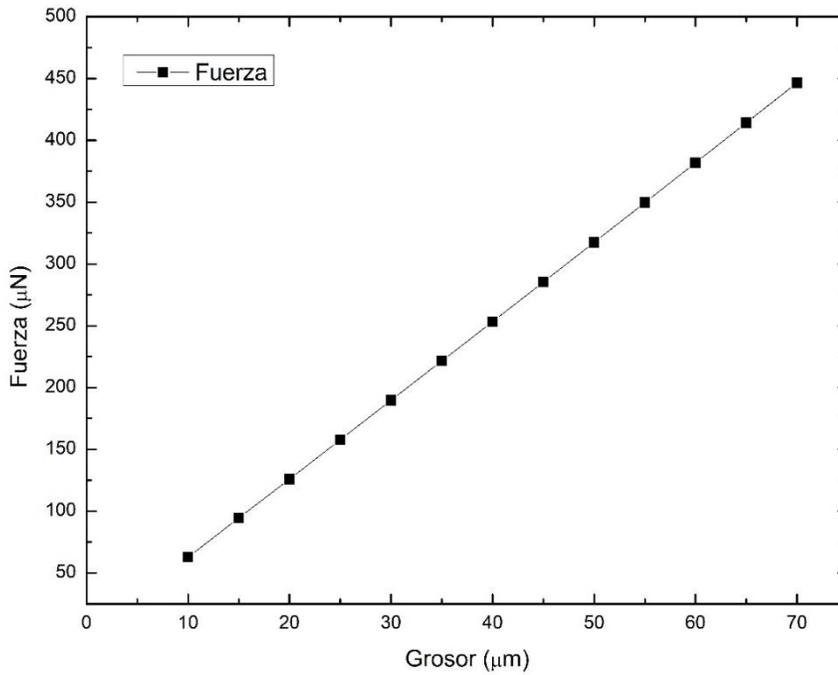


Figura 4.28 Grosor de la estructura contra fuerza

El siguiente análisis paramétrico fue para largo de brazo evaluado en un rango de 300 μm a 800 μm , obtenido resultados altos para desplazamiento y

fuerza de 10.6 μm y 433.70 μN , para un largo de brazo de 800 μm respectivamente, como se muestra en las Figura 4.29 y 4.30.

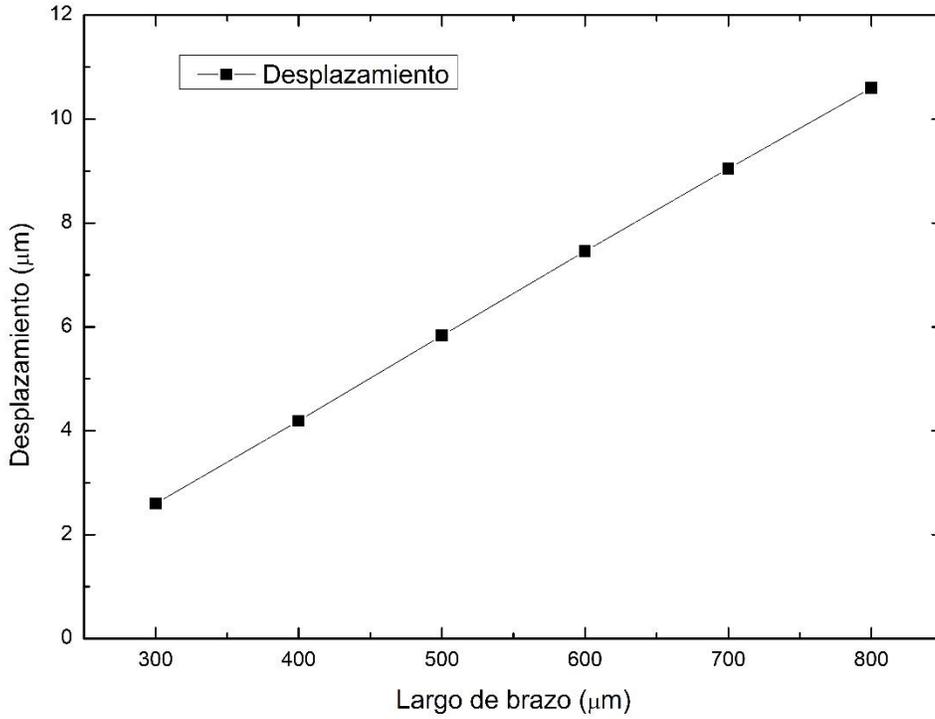


Figura 4.29 Largo de brazo contra desplazamiento.

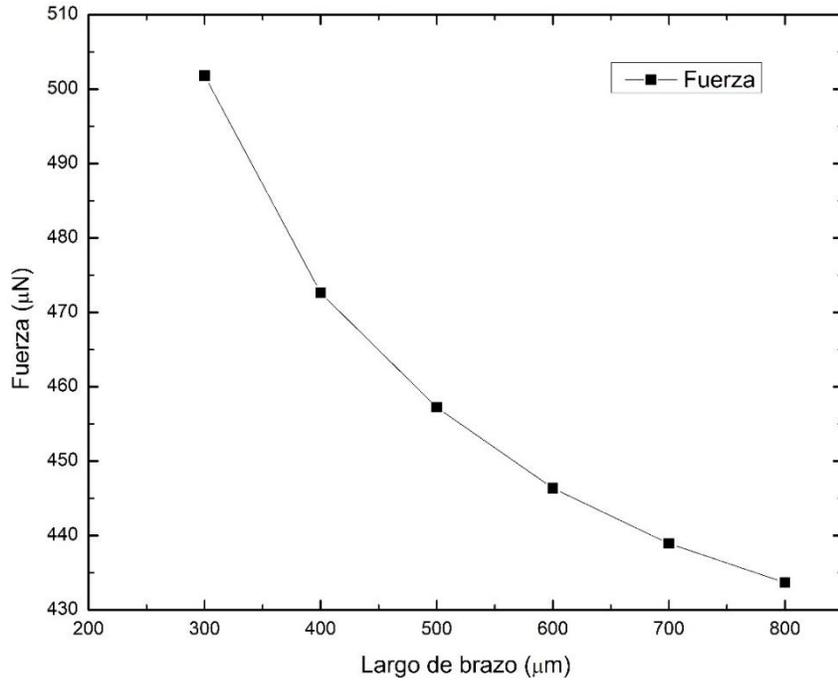


Figura 4.30 Largo de brazo contra fuerza.

Posteriormente, se realizó un barrido de largo del regulador de 10 μm a 50 μm con intervalos de 5 μm , donde se observa un incremento de fuerza a partir del aumento de tamaño del largo de brazo de regulador, obtenido los resultados más altos para desplazamiento de 7.45 μm y 446.19 μN de fuerza de reacción, para una magnitud de 50 μm , como se muestra en la Figura 4.31. El largo del regulador no tiene efecto sobre el desplazamiento.

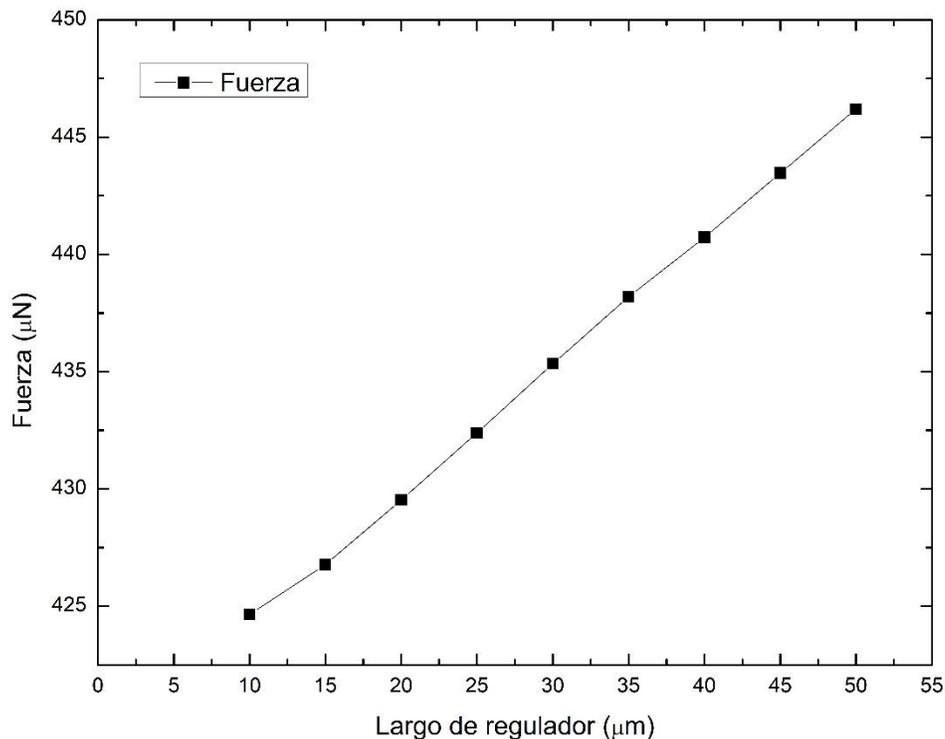


Figura 4.31 Largo de regulador contra fuerza.

Para el análisis paramétrico correspondiente al ángulo de inclinación, donde el rango de análisis fue de 1° a 10° , con intervalos de 1° . El desplazamiento numérico máximo es de 7.75 mN y corresponde a 1° de inclinación (Figura 4.32). La fuerza numérica mínima es de 0.446 mN. Cabe señalar que, la fuerza aumenta considerablemente al incrementar el ángulo a 10° como se muestra en la Figura 4.33.

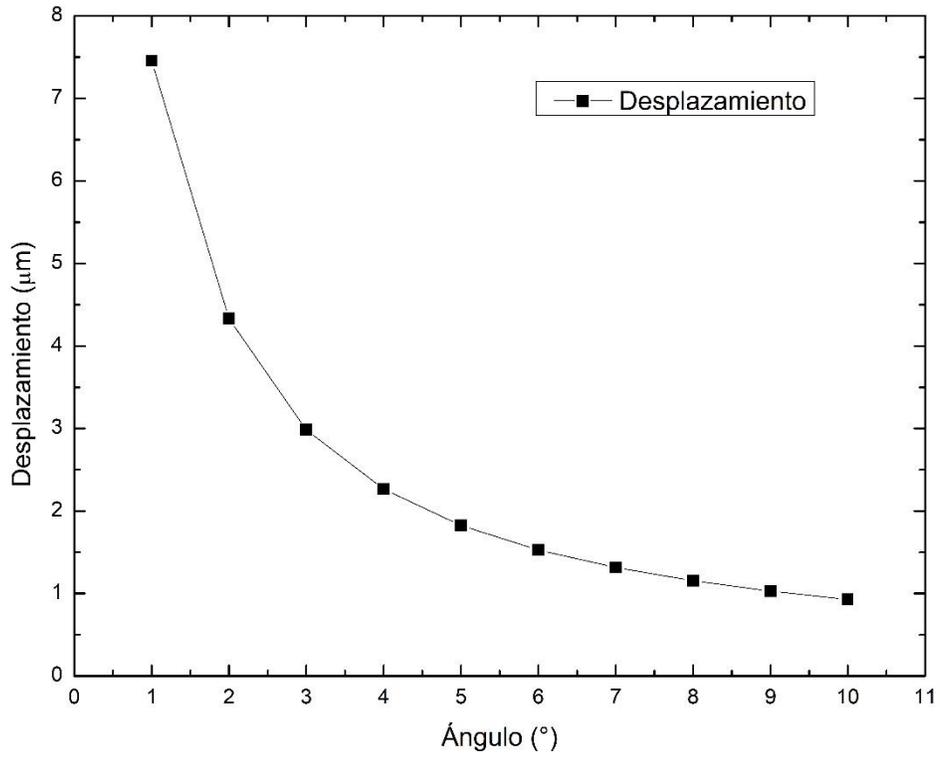


Figura 4.32 Ángulo de inclinación contra desplazamiento.

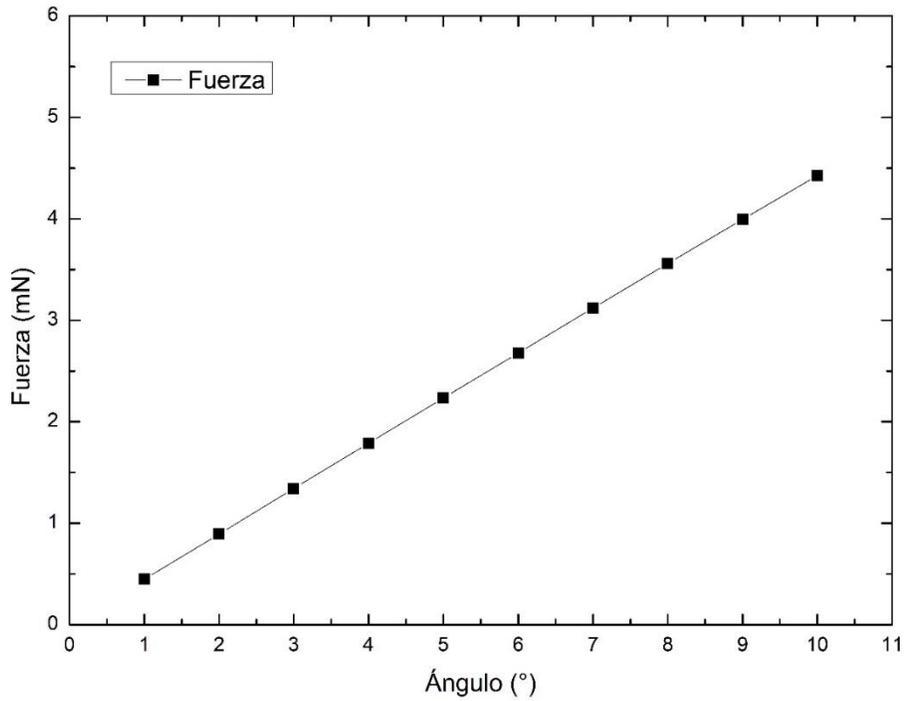


Figura 4.33 Ángulo de inclinación contra fuerza.

La Tabla 4.5 muestra los resultados obtenidos de desplazamiento, fuerza de reacción y esfuerzo para el chevrón con regulador de movimiento de 50 μm .

Tabla 4.5 Resultados Numéricos del chevrón con regulador rectangular de movimiento 50 μm .

Desplazamiento (μm)	Fuerza (μN)	Esfuerzo (MPa)
7.40	436	164.50

4.5 Parametrización y análisis del actuador chevrón con regulador de movimiento rectangular 200 μm .

Tomando en cuenta las dimensiones la Figura 4.34 se desarrollaron las parametrizaciones correspondientes a las magnitudes de las variables que conforman el chevrón con regulador rectangular de movimiento de 200 μm en los brazos.

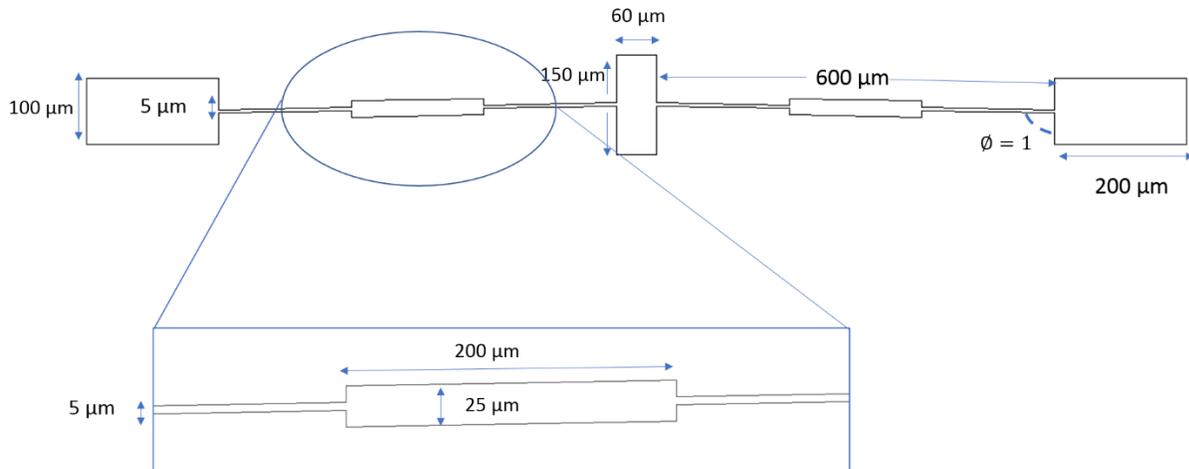


Figura 4.34 Elementos de un actuador chevrón dos brazos con regulador de movimiento 200 μm .

El ultimo chevrón a analizar tiene en cada brazo un regulador de movimiento de 200 μm de largo de brazo. En el primer análisis se considera un barrido en el grosor de la estructura de 10 μm a 70 μm con intervalos de 5 μm . En la Figura 4.35 se muestra la distribución de temperatura obtenida aplicando una diferencia de potencial de 0 V a 1 V, donde se obtiene una temperatura máxima de 134.61 $^{\circ}\text{C}$, un desplazamiento numérico 7.752 μm y una fuerza de

reacción numérica de 568.65 μN , a 70 μm de grosor, como se muestra en la Figura 4.36.

El efecto del grosor sobre el desplazamiento es despreciable.

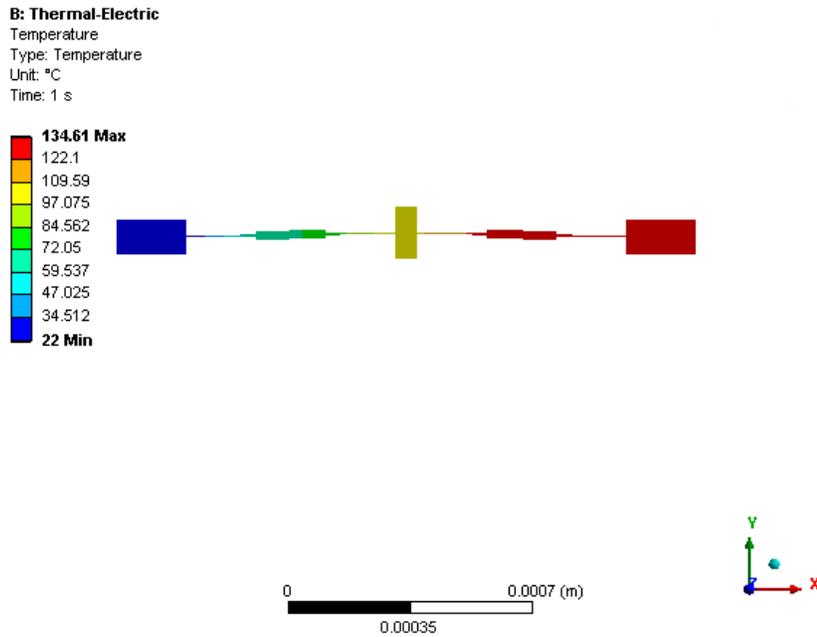


Figura 4.35 Distribución de temperatura para chevrón dos brazos con regulador de 200 μm .

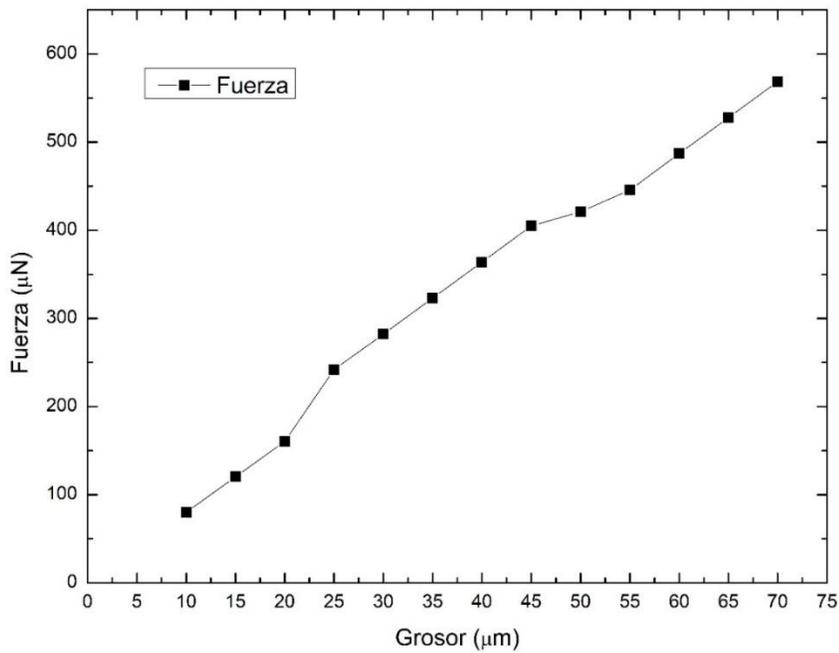


Figura 4.36 Grosor de la estructura contra fuerza.

El siguiente análisis paramétrico fue para largo de brazo evaluado en un rango de 300 μm a 800 μm , obtenido resultados altos para desplazamiento y fuerza de 10.90 μm y 516.8 μN , a una longitud de 800 μm , como se muestra en las figuras 4.37 y 4.38.

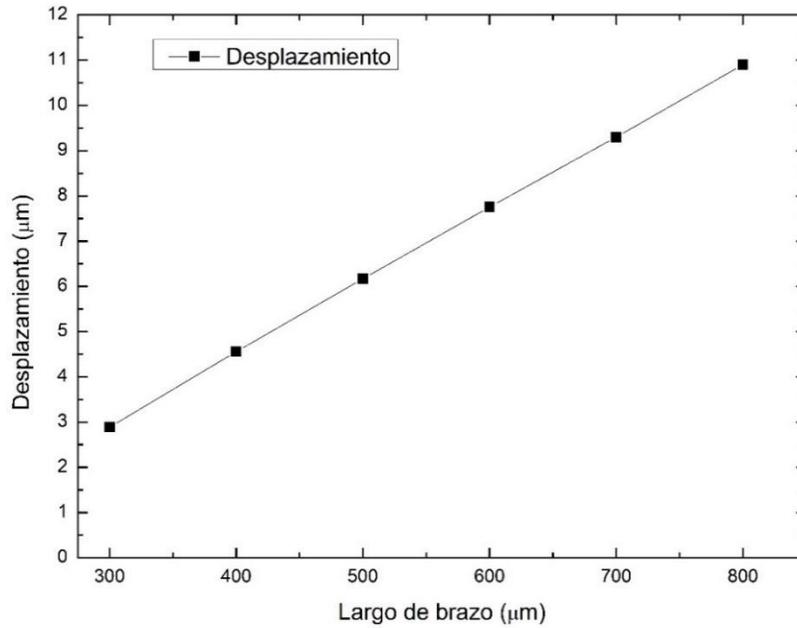


Figura 4.37 Largo de brazo contra desplazamiento.

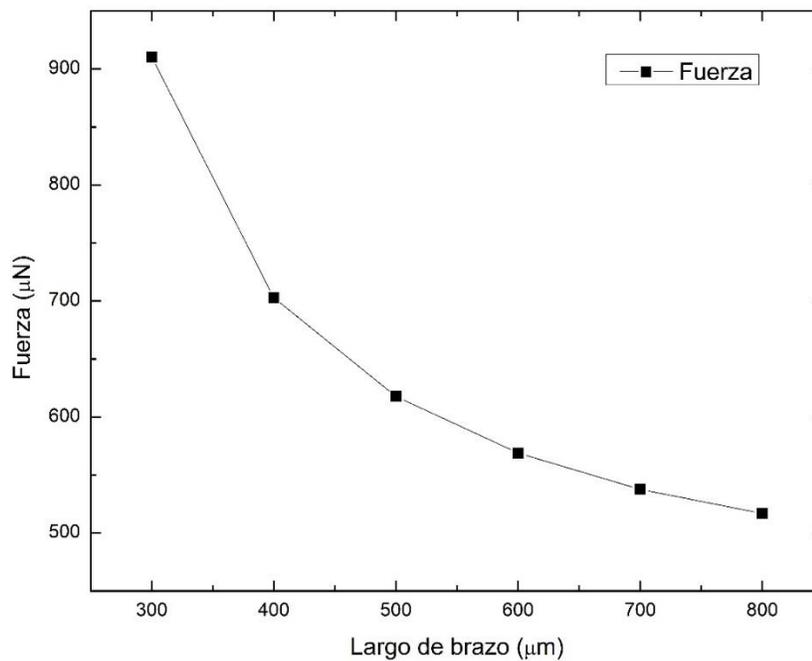


Figura 4.38 Largo de brazo contra fuerza.

El siguiente análisis fue para largo de regulador evaluado en un rango de 10 μm a 220 μm , obtenido resultados altos para desplazamiento y fuerza de 7.75 μm y 568.84 μN respectivamente, correspondiente a una longitud de 200 μm , como se muestra en las Figuras 4.39 y 4.40.

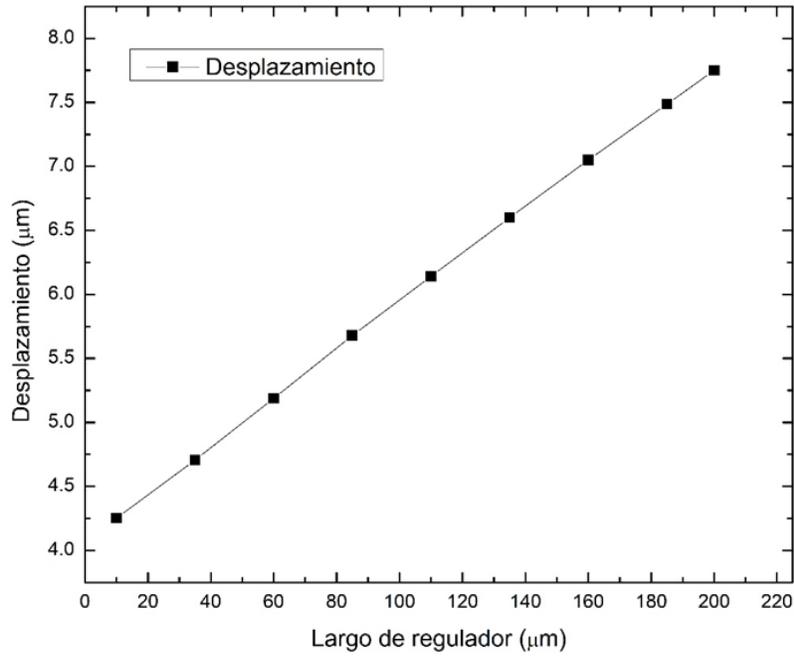


Figura 4.39 Largo de regulador contra desplazamiento.

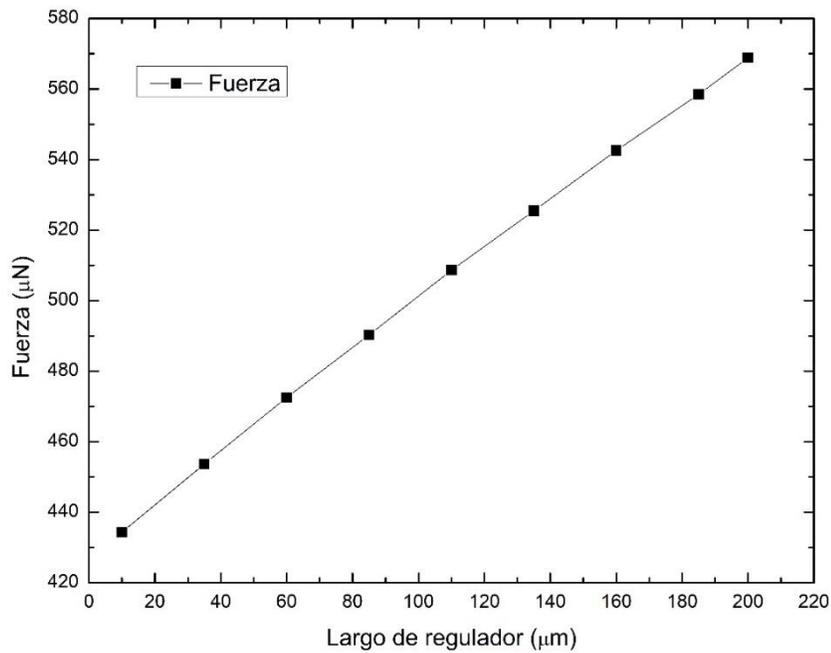


Figura 4.40 Largo de regulador contra fuerza.

Posteriormente, para el análisis paramétrico correspondiente al ángulo de inclinación, donde el rango de análisis fue de 1° a 10°, con intervalos de 1°, obteniendo un resultado máximo para desplazamiento numérico de 7.75 μm correspondiente 1° de inclinación (Figura 4.41), y un mínimo de 0.586 mN para fuerza numérica. Cabe señalar que, la fuerza aumenta considerablemente al incrementar el ángulo a 10°, como se muestra en la Figura 4.42. Los resultados para desplazamiento y fuerza del microactuador se muestran en la Tabla 4.6.

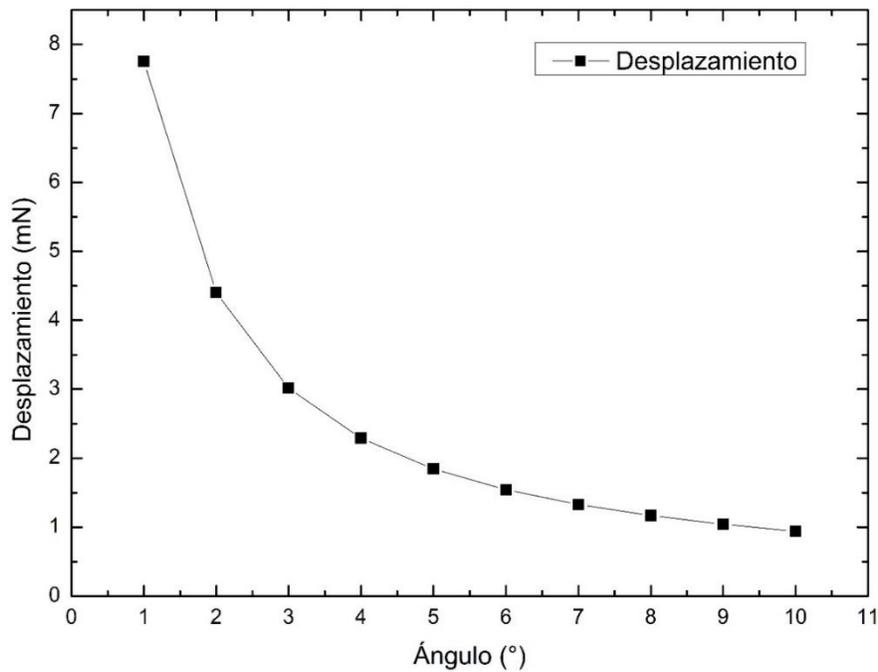


Figura 4.41 Ángulo de inclinación contra desplazamiento.

Tabla 4.6 Resultados Numéricos del chevrón con regulador rectangular de movimiento 200 μm .

Desplazamiento (μm)	Fuerza (μN)	Esfuerzo (MPa)
7.75	568	162.31

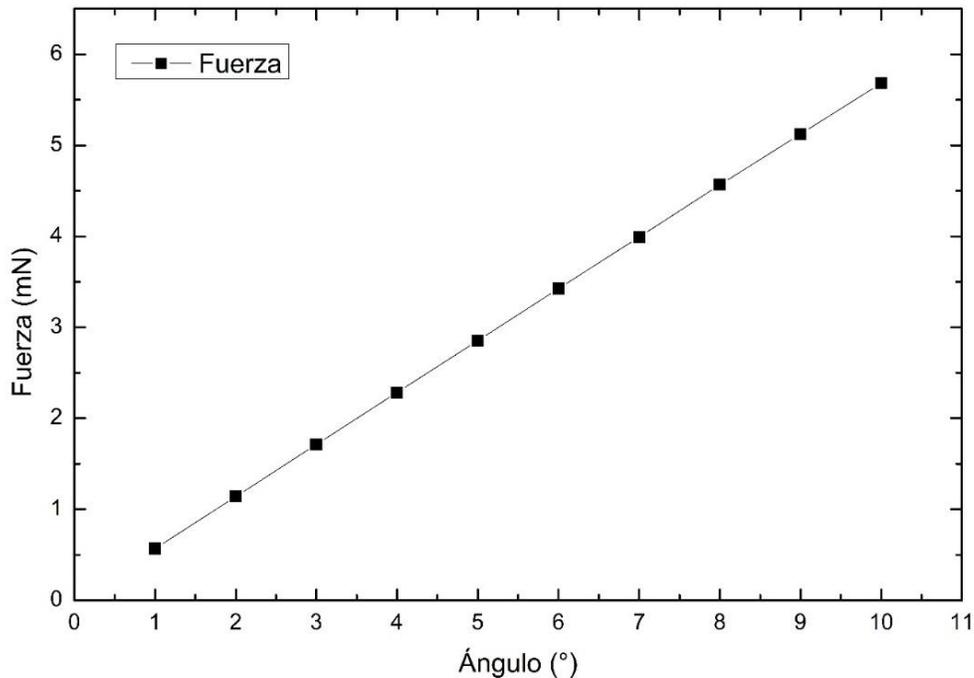


Figura 4.42 Ángulo de inclinación contra fuerza.

En la bibliografía se ha encontrado un amplio uso del actuador V, sin embargo, en los análisis realizados se observa que el actuador con el que se logra un mayor desplazamiento es el chevrón Z modificado, por lo que, se realiza también el análisis de ambas estructuras con 8 pares de brazos, que es como regularmente se integran los actuadores chevrón a otros sistemas más complejos. Cabe señalar que, se consideran nuevamente dimensiones geométricas similares, así como condiciones de frontera y material utilizado. Los chevrones analizados previamente sólo tenían un par de brazos.

4.6. Parametrización chevrón V y chevrón Z modificado de 16 brazos

Tomando en cuenta los parámetros del silicio mostrados en la Tabla 4.1. Los análisis paramétricos fueron realizados bajo las mismas condiciones de frontera para todos los casos a analizar: temperatura ambiente de 22 °C, diferencia de temperatura de 112 °C ($\Delta T = 134^\circ\text{C} - 22^\circ\text{C}$), voltaje máximo de 1 V. Con respecto a los parámetros geométricos, se realizaron los análisis de

parametrización considerando dimensiones iguales para los dos casos excepto para la parte central de los actuadores.

4.6.1 Chevrón V de 8 pares de brazos

En la Figura 4.43 se observa la distribución de temperatura para el microactuador V de 16 brazos, correspondiente a 134 °C, aplicando un voltaje máximo de 1 V. Se obtuvo un desplazamiento de 7.33 μm , y una fuerza de reacción de 3.3 mN, como se muestra en las Figuras 4.44 y 4.45.

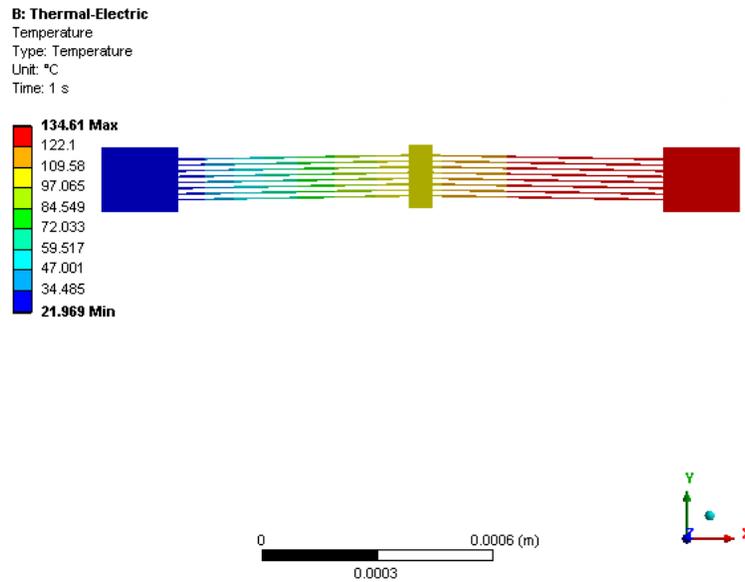


Figura 4.43 Distribución de temperatura chevrón V con 16 brazos

C: Static Structural
 Total Deformation
 Type: Total Deformation
 Unit: m
 Time: 1 s
 12/10/2023 12:04 a. m.

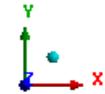
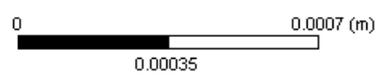
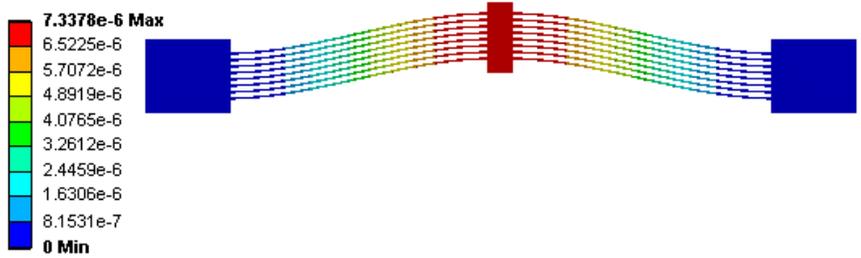
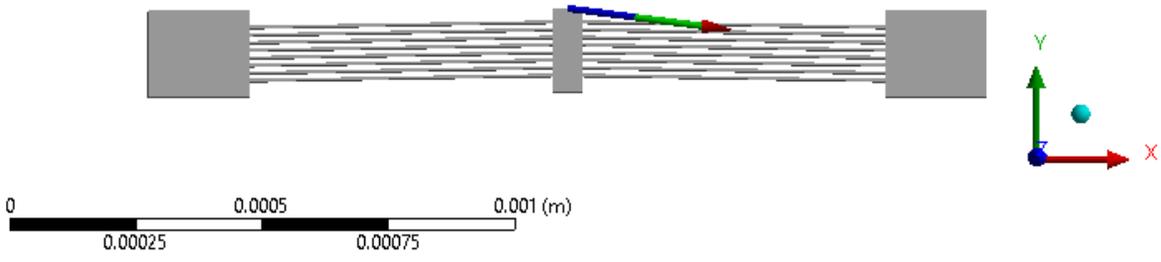


Figura 4.44 Desplazamiento chevrón V



Tabular Data					
Time [s]	Force Reaction (X) [N]	Force Reaction (Y) [N]	Force Reaction (Z) [N]	Force Reaction (Total) [N]	
1	2.5212e-002	-3.3244e-003	-1.1056e-005	2.543e-002	

Figura 4.45 Fuerza de reacción chevrón V

Las parametrizaciones se realizaron analizando: ángulo de inclinación, ancho y largo de brazo y grosor de la estructura. Se realizaron también las comparaciones de los resultados analíticos tomando en cuenta las ecuaciones

2.1, 2.2 y 2.3, respecto a los resultados numéricos, mostrando porcentajes de error aceptables menores al 10%.

El primer análisis paramétrico se realizó con el actuador chevrón de 16 brazos simétricos V, donde se realizará el primer análisis con un barrido de dimensiones de ancho de brazo en un rango de 5 μm a 31 μm con intervalos de 2 μm . Obtenido una fuerza de reacción numérica de 3.65 mN, una fuerza teórica de 3.29 mN, obteniendo así un porcentaje de error de 9.8%, correspondiente a 5 μm de ancho de brazo (ver Figuras 4.46 y 4.47). Las tendencias son similares.

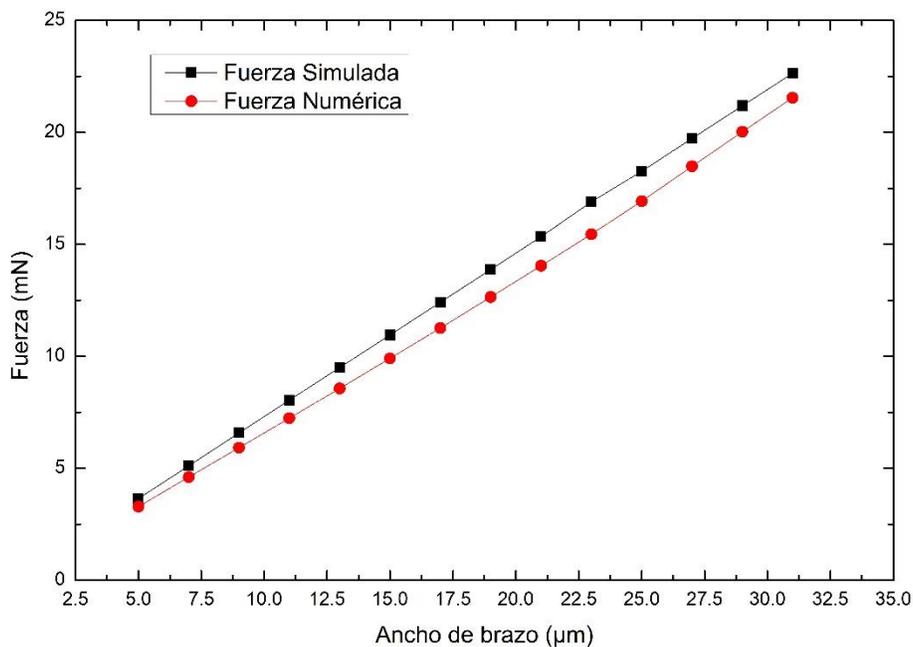


Figura 4.46 Ancho de brazo contra fuerza

El siguiente análisis paramétrico fue para el ángulo de inclinación, donde el rango de análisis fue de 1° a 10° , con intervalos de 1° , obtenido resultados máximos para desplazamiento numérico de 7.71 μm , y 7.19 μm desplazamiento teórico de correspondiente 1° de inclinación obteniendo 6.7% de error. Para fuerza de reacción se obtuvo 36.36 mN en 10° para fuerza numérica, 33.54 para fuerza teórica, con un porcentaje de error de 7.75%, como se muestra en las Figuras 4.47 y 4.48. Las tendencias en ambos, se mantienen muy cercanas, entre los casos teóricos y numéricos.

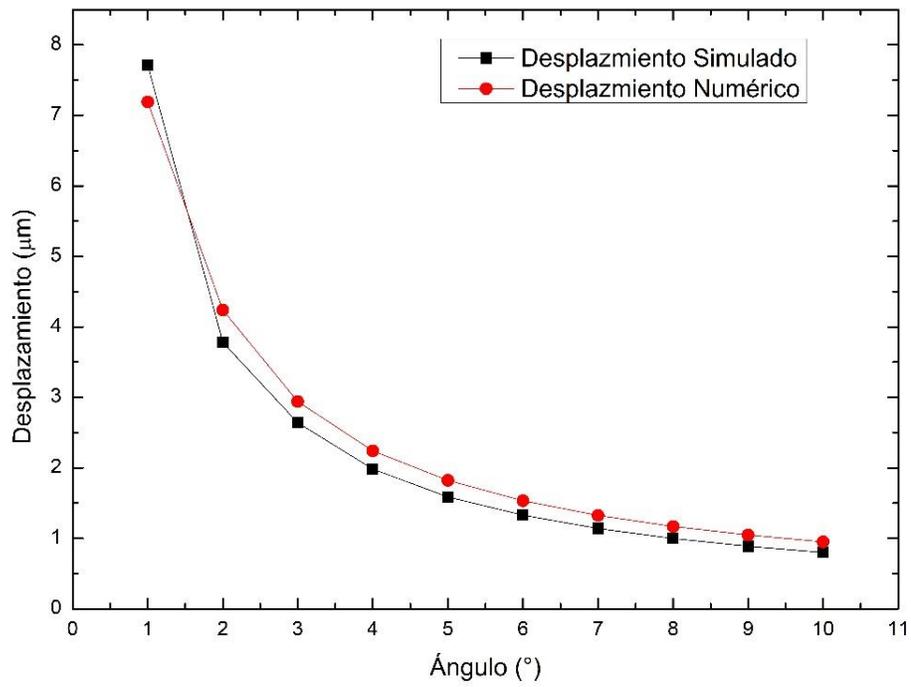


Figura 4.47 Ángulo de inclinación contra desplazamiento.

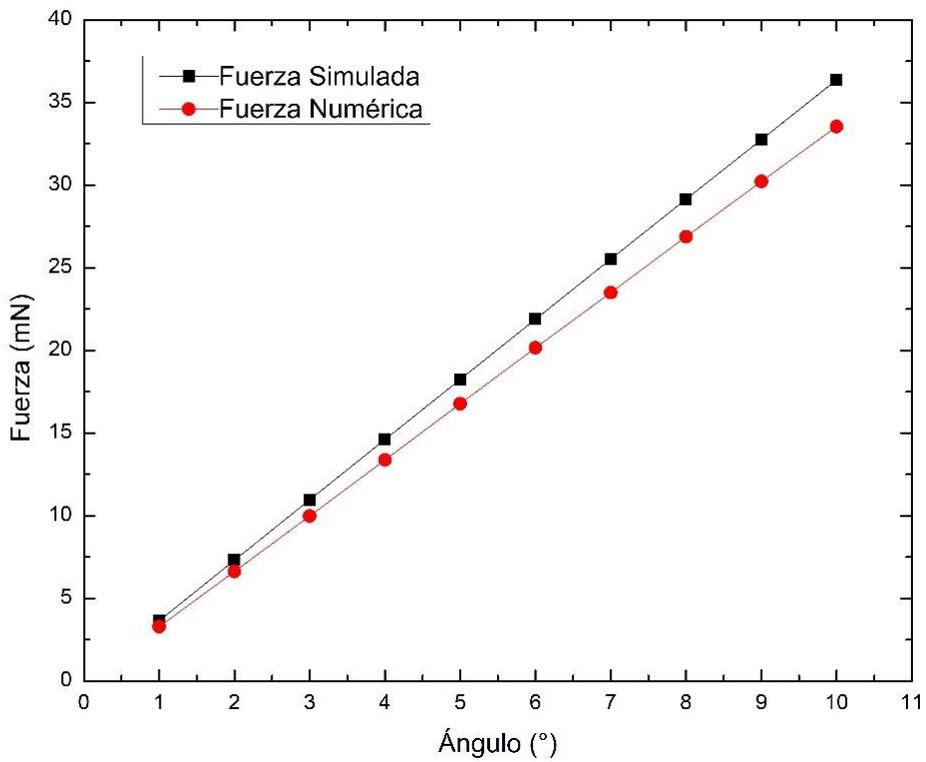


Figura 4.48 Ángulo de inclinación contra fuerza

Posteriormente, se realizó la parametrización del largo del brazo, evaluado en un rango de 100 μm a 800 μm , obtenido resultados significativos para desplazamiento numérico de 10.10 μm para 800 μm de largo de brazo, como se muestra en la Figura 4.49. El largo del dispositivo tiene un efecto muy pequeño sobre la fuerza por lo que, no se incluye el gráfico.

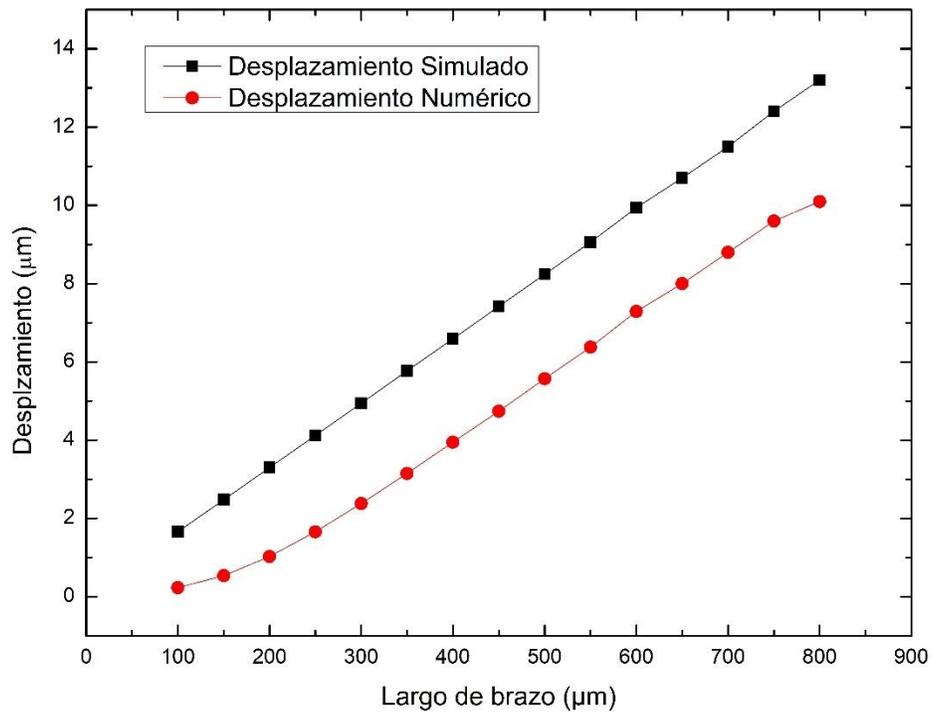


Figura 4.49 Largo de brazo contra desplazamiento

En la Figura 4.50, se muestran las magnitudes de la fuerza al variar al grosor del dispositivo. Se observa una variación lineal creciente de 15 μm a 70 μm , en este último valor, se tiene una fuerza numérica de 3.65 μN con porcentaje de error de 4.5%, respecto a los resultados analíticos obtenidos. Los resultados obtenidos se resumen en la Tabla 4.7

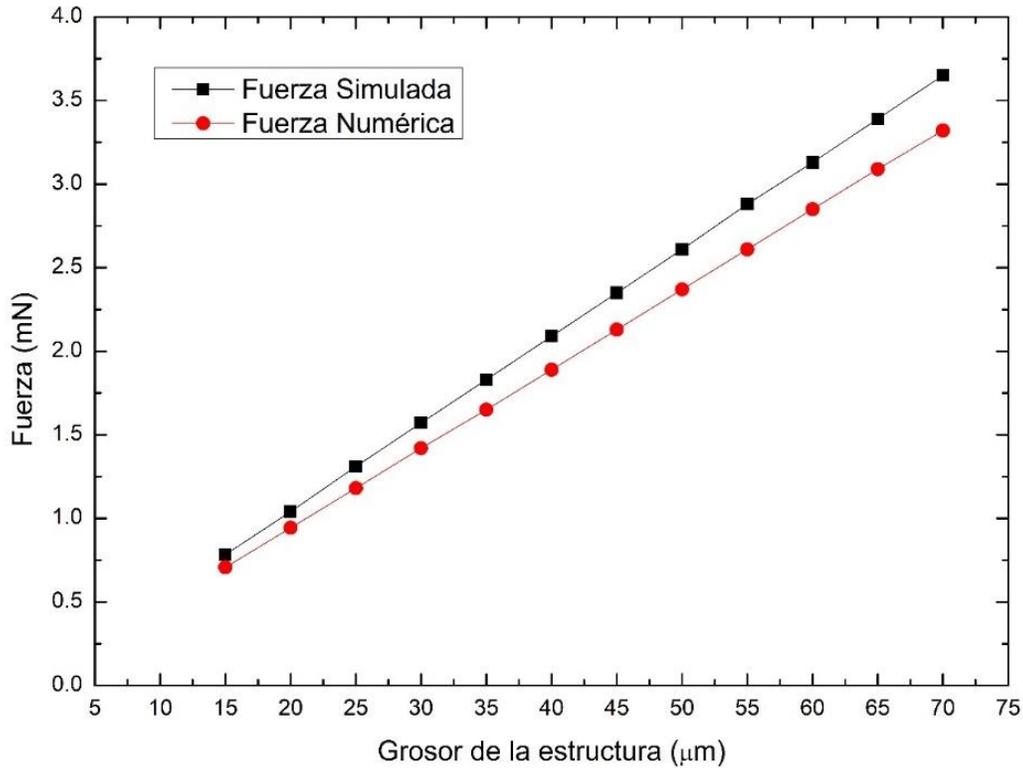


Figura 4.50 Grosor de la estructura contra grosor de la estructura

Tabla 4.7 Resultados obtenidos para chevrón V de 16 brazos

Desplazamiento (μm)	Fuerza (mN)	Esfuerzo (MPa)
7.7	3.6	271

4.6.2 Chevrón Z modificado 16 brazos

En la Figura 4.51 se observa la distribución de temperatura para el microactuador Z de 16 brazos, correspondiente a 134 °C, aplicando un voltaje máximo de 1 V generando un desplazamiento de 8.04 μm , y una fuerza de reacción de 2.2 mN, como se muestra en las Figuras 4.52 y 4.53.

B: Thermal-Electric

Temperature
Type: Temperature
Unit: °C
Time: 1 s

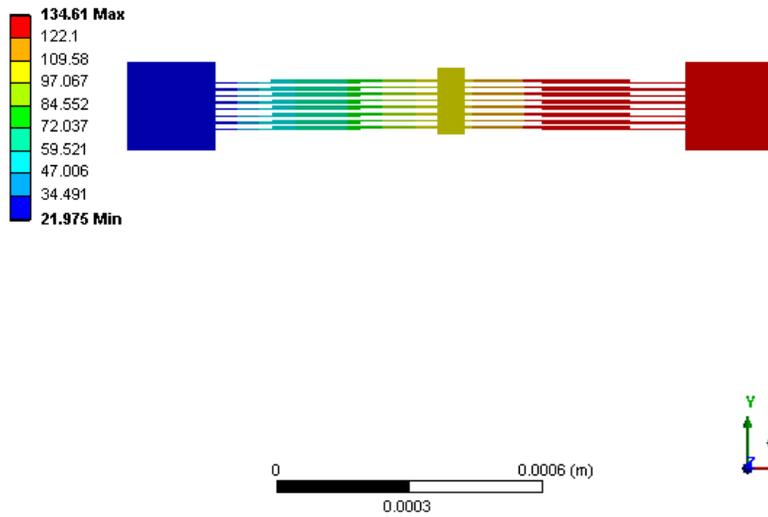


Figura 4.51 Distribución de temperatura microactuador Z

C: Static Structural

Total Deformation
Type: Total Deformation
Unit: m
Time: 1 s

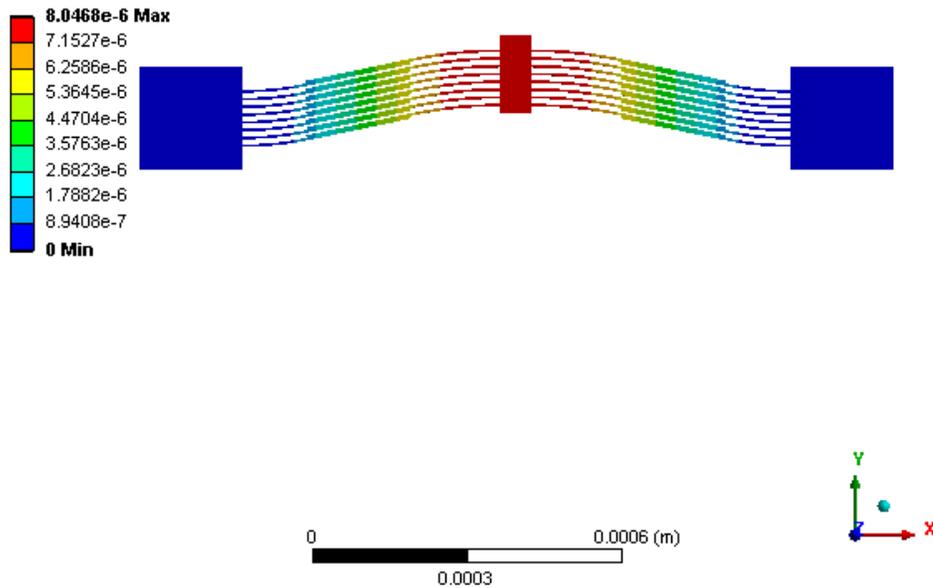


Figura 4.52 Desplazamiento del microactuador Z

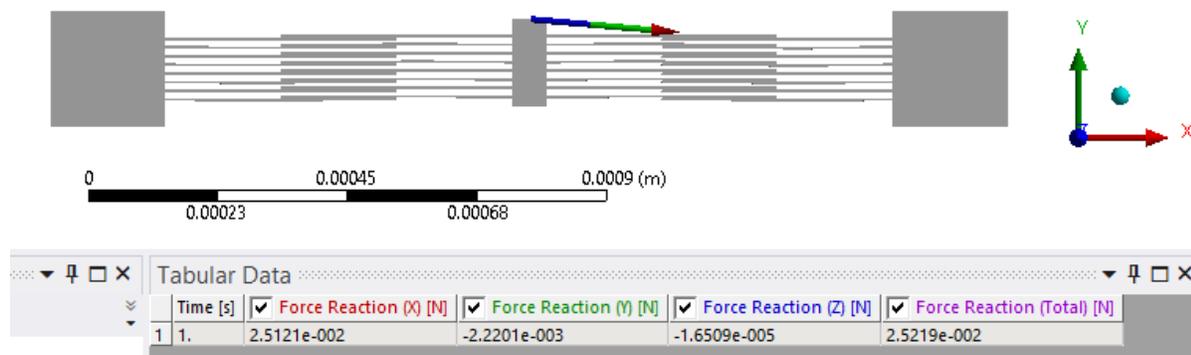


Figura 4.53 Fuerza de reacción de microactuador Z.

Las parametrizaciones se realizaron analizando las variables de interés: ángulo de inclinación, ancho y largo de brazo y grosor de la estructura. Se realizaron también las comparaciones de los resultados analíticos utilizando a las ecuaciones 2.1, 2.2 y 2.3, respecto a los resultados numéricos, mostrando porcentajes de error aceptables, menores al 10 %.

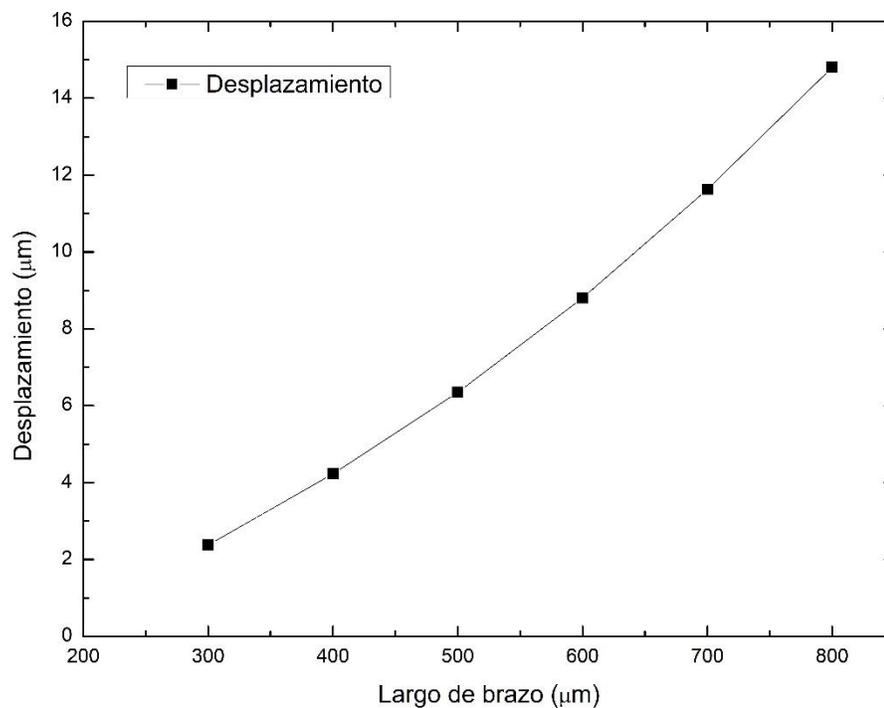


Figura 4.54 Largo de brazo contra desplazamiento de microactuador Z.

Para el siguiente análisis corresponde a la parametrización del largo del brazo, evaluado en un rango de 300 μm a 800 μm , obteniendo resultados significativos para desplazamiento numérico de 14.80 μm para un largo de brazo de 800 μm , como se muestra en la Figura 4.54. Con relación a largo del dispositivo y sus efectos sobre la fuerza, se obtuvo una magnitud de 1.53 mN, como se muestra en la Figura 4.55 a esa longitud de brazo. Esto es, a mayor longitud de brazo corresponde un mayor desplazamiento, pero una menor fuerza.

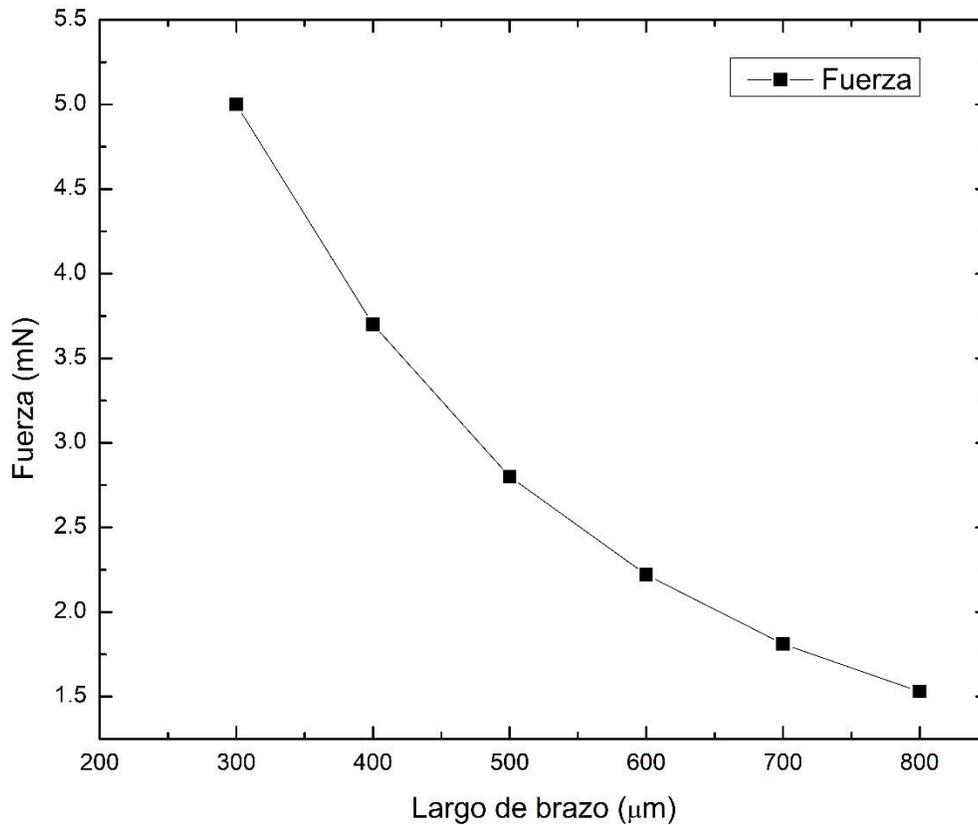


Figura 4.55 Fuerza de reacción de microactuador Z.

En la figura 4.56, se muestran los valores de la fuerza al variar al grosor del dispositivo. Se observa una variación lineal creciente de 10 μm a 70 μm , en este último valor, se tiene una fuerza numérica de 2.22 μN .

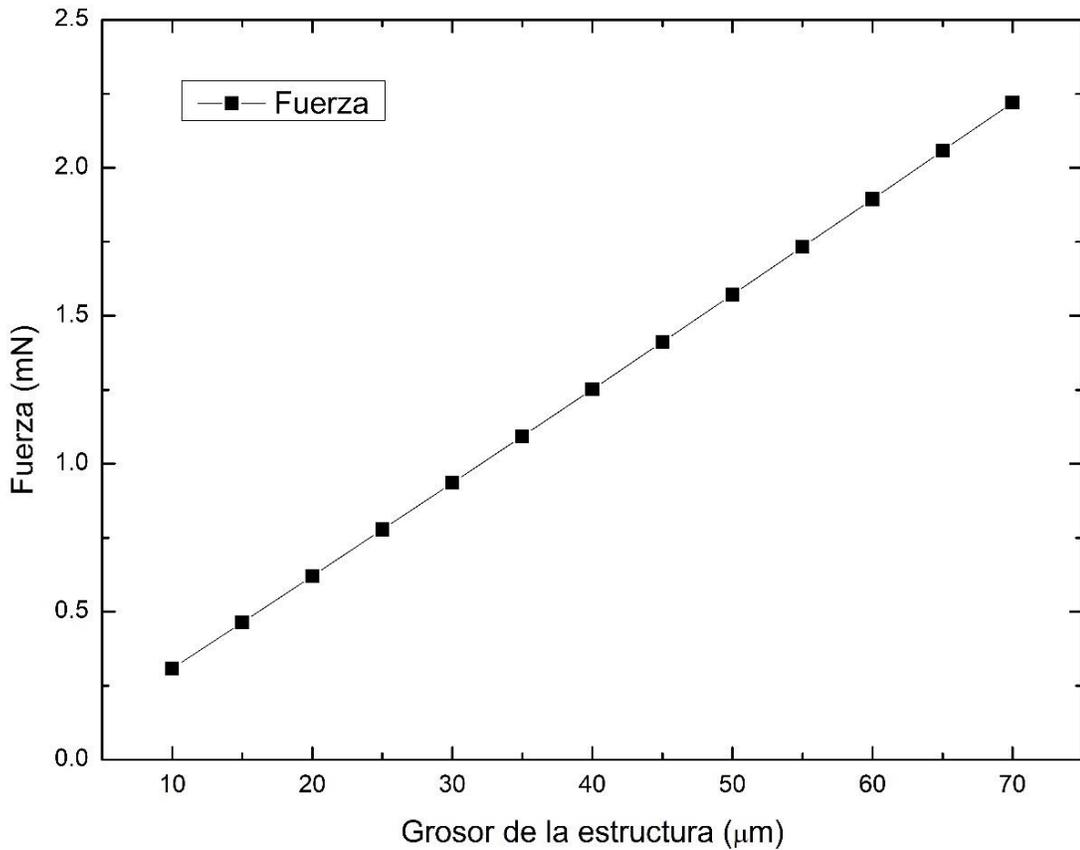


Figura 4.56 Fuerza de reacción de microactuador Z.

En relación con el ancho de brazo, debido a que grandes dimensiones pueden provocar desproporcionalidades, por lo tanto, no se incluyen dichas gráficas. En la Tabla 4.8 se muestran los resultados finales obtenidos para el chevrón Z modificado, tomando en cuenta los parámetros de interés: desplazamiento, fuerza y esfuerzo. A manera de comparación, se complementa con los datos del chevrón V. Como puedes observarse el mayor desplazamiento corresponde al actuador Z modificado, mientras que la fuerza es mayor para la geometría convencional (V), donde de manera consecuente, se incrementa el esfuerzo, superando ligeramente al esfuerzo de cedencia, como sucede en muchas geometrías reportadas en la literatura, y se consideran útiles, ya que no llegan al esfuerzo de ruptura de 7 GPa (Petersen, 1982)

Tabla 4.8 Resultados obtenidos para los dos chevrone de 8 pares de brazos

Actuador	Desplazamiento (μm)	Fuerza (mN)	Esfuerzo (MPa)
Chevrón Z modificado de 8 pares brazos	8.81	2.22	183
Chevrón V de 8 pares brazos	7.7	3.6	271
Porcentajes de incremento o disminución, (%)	14.42	37.84	48.09

Capítulo 5

Resultados

En este capítulo se presentan los resultados obtenidos, así como su descripción.

5. RESULTADOS

El análisis paramétrico se realizó sobre el voltaje, donde el rango de análisis fue 0.1 V a 1.2 V con intervalos de 0.1 V, el cual se aplicó en un actuador chevrón V de dos brazos. El resultado máximo para temperatura del dispositivo es de 187 °C, correspondiente para 1.2 y un mínimo de 22 °C para 0.1 V (Figura 5.1). Se observa un crecimiento exponencial donde conforme el valor de voltaje aumenta, el valor de la temperatura crece también. Es necesario observar que, al trabajar con temperaturas relativamente altas los materiales en los que se implementan las estructuras pueden deformarse en exceso, por lo tanto, se limita el voltaje aplicado a 0.1 V para llevar a cabo el análisis numérico. Cabe señalar que, en todos los actuadores se observaron temperaturas muy cercanas a las mostradas, cambiando solamente en algunos decimales, por lo que se consideró como representativa a la respuesta del chevrón V, en la consideración de estas referencias de temperatura, y limitar el rango de aplicación de voltaje.

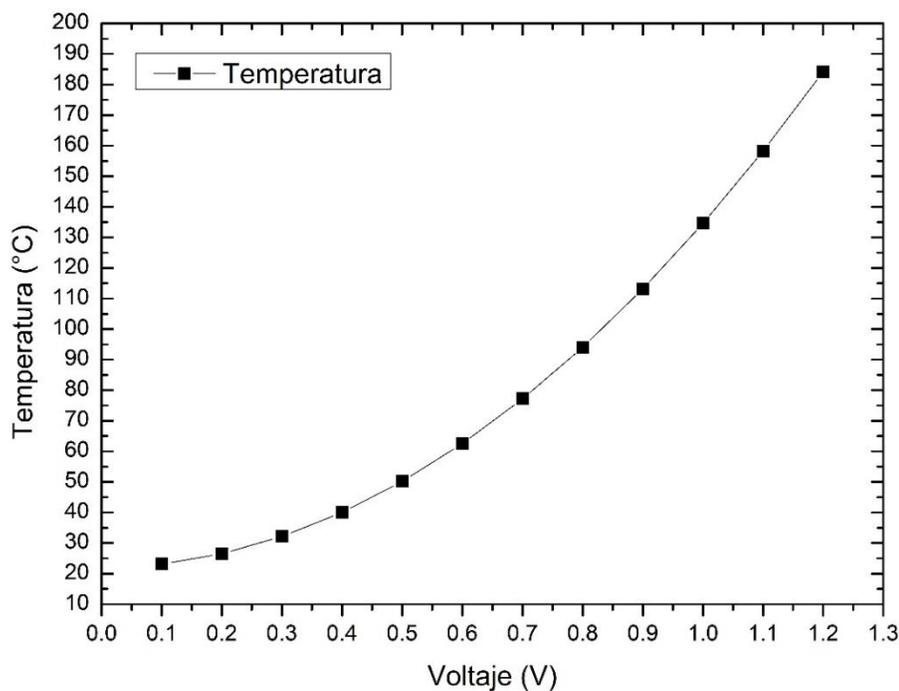


Figura 5.1 Distribución de temperatura contra voltaje

En el siguiente análisis paramétrico se consideró un barrido de temperatura, desde 24°C a 185°C con intervalos de 10°C, y se graficaron los resultados para cada uno de los actuadores, como se muestra en la Figura 5.2. Se observa que, el chevrón Z modificado es el dispositivo que tiene un desplazamiento mayor.

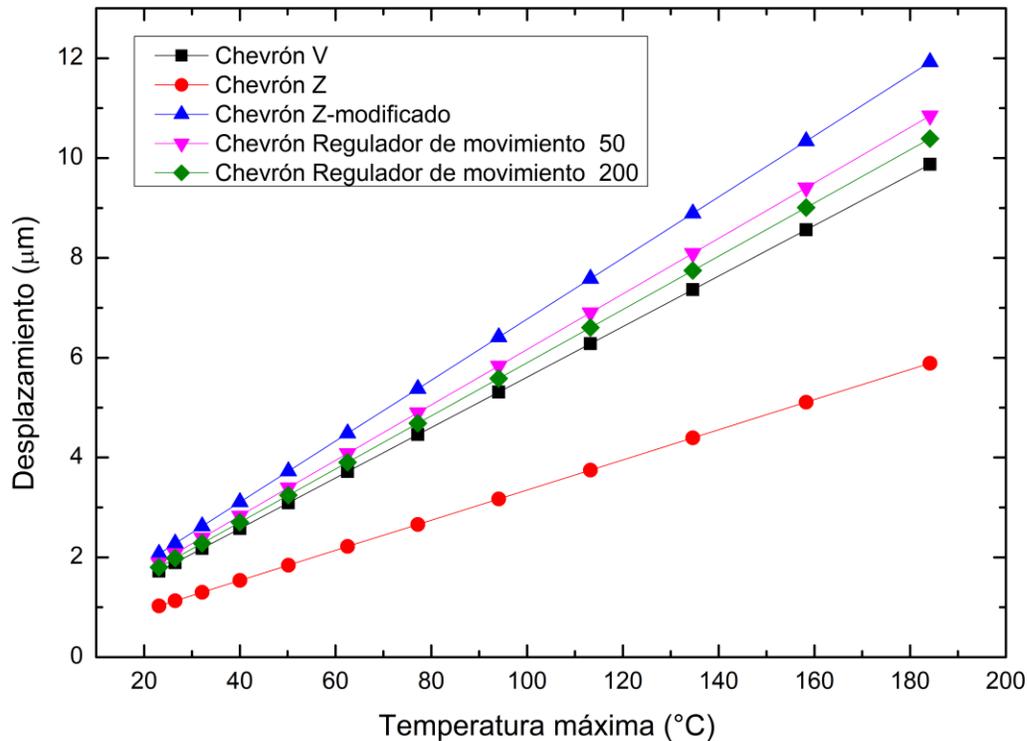


Figura 5.2 Temperatura máxima contra desplazamiento

Los resultados del análisis de la fuerza considerando a los chevrónes bajo análisis y el mismo barrido de temperatura, se muestran en la figura 5.3. Se observa que el chevrón con regulador de movimiento de 50 μm de largo es el dispositivo en el que se tiene una mayor fuerza de reacción.

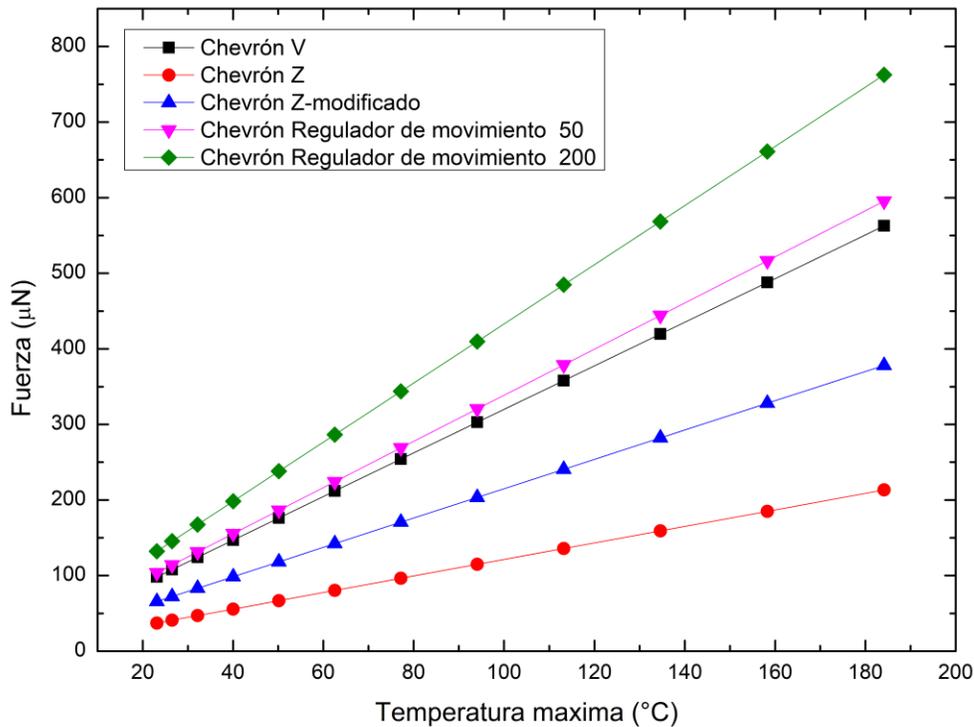


Figura 5.3 Temperatura máxima contra fuerza

En la tabla 5.1 se resumen los resultados obtenidos por medio de la parametrización de la temperatura para obtener el desplazamiento, la fuerza y el esfuerzo de cada microactuador chevrón analizado. En todos los casos se considera a un par de brazos. Los colores indican, en rojo la menor magnitud del parámetro y en verde a la mayor.

Tabla 5.1 Resultados obtenidos finales

N°	Chevrones	Desplazamiento (µm)	Fuerza (µN)	Esfuerzo (MPa)
1	Chevrón V	7.36	419	160.38
2	Chevrón Z	4.33	159	171.27
3	Chevrón Z modificado	8.89	283	164.52
4	Chevrón con regulador de movimiento 50 µm	7.40	436	164.50
5	Chevrón con regulador de movimiento 200 µm	7.75	568	162.31

Puede observarse que, la mayor magnitud de desplazamiento corresponde al chevrón Z modificado, la mayor fuerza al chevrón con regulador de movimiento de 200 μm de largo, mientras que la estructura que presenta el mayor esfuerzo es el chevrón Z.

En ocasiones se requieren pequeñas magnitudes de fuerza, puesto que se trabaja con elementos sensibles, o bien desplazamientos lo mayores posibles, por lo que se tiene un menú de referencia que puede ser de amplia utilidad.

En la búsqueda un chevrón que proporcione un balance en su respuesta podría seleccionarse al chevrón V, o al chevrón con regulador de movimiento 200 μm , ya que proporcionan magnitudes de respuesta muy similares, ligeramente mayores en el segundo caso, aunque su geometría es más compleja de implementar, lo que puede marcar la diferencia y la preferencia en la selección. Los porcentajes entre sus parámetros se muestran en la Tabla 5.2.

Tabla 5.2 Comparación entre chevrón V y chevrón con regulador de movimiento de 200 μm .

Chevrón	Desplazamiento (μm)	Fuerza (μN)	Esfuerzo (MPa)
V	7.36	4.19	160.38
Con regulador de desplazamiento de 200 μm	7.75	4.68	162.31
Porcentaje de incremento, %	5.3	11.69	1.2

Capítulo 6

Conclusiones y trabajo futuro

En este capítulo, se presentan las conclusiones y los trabajos futuros identificados, derivados del trabajo realizado.

6. CONCLUSIONES

Una vez que, cada uno de los objetivos específicos ha sido logrado, puede concluirse que el objetivo de esta tesis fue alcanzado, el cual fue determinar los parámetros de desempeño básicos de las geometrías más representativas del actuador chevrón utilizando análisis numérico.

Con el fin de agilizar y optimizar los procesos de análisis de los microactuadores chevrón, se utilizó parametrización, sobre elementos de la geometría, o bien voltaje y temperatura, ya que ellos son determinantes en la respuesta de los parámetros de interés.

El análisis de los elementos de los microactuadores de dos brazos se realizó con el software ANSYS Workbench. Es importante mencionar que, se analizaron el microactuador V, chevrón Z, chevrón Z modificado, chevrón con regulador rectangular de movimiento de 50 y 200 μm , respectivamente.

Con base en lo anterior, se determinaron los elementos de los microactuadores chevrón a parametrizar (longitud y ancho del brazo, ángulo de inclinación y grosor de la estructura). Cabe mencionar que, al variar a cada uno de los elementos, los restantes se mantienen fijos con las siguientes magnitudes: largo de brazo de 600 μm y ancho de 5 μm , ángulo de inclinación de 1° y grosor de 70 μm . Las dimensiones de la flecha consideradas son, largo 150 μm y ancho 30 μm .

A partir de la parametrización, se aplicaron diferencias de potencias de 0 a 1 V, alcanzando temperaturas máximas del orden de 134 $^\circ\text{C}$. Comparando el desplazamiento numérico máximo de cada uno de los chevrones de dos brazos se concluye que, el chevrón Z modificado alcanza el mayor desplazamiento correspondiente a 8.89 μm . La fuerza de reacción máxima fue de 568 μN para el chevrón con regulador de movimiento 200 μm y un esfuerzo máximo de 171.27 MPa para chevrón Z. Cuando se compara el desempeño de todos los actuadores de un par de brazos, de acuerdo con los resultados numéricos, se generó a la

Tabla 5.1, en la que se puede identificar su respuesta de manera sencilla. Lo que permite obtener un menú de referencia que puede ser de utilidad en los procesos de diseño en lo que se requiera integrar a un actuador chevrón. Por ejemplo, en la búsqueda un chevrón que proporcione un balance en su respuesta podría seleccionarse al chevrón V, o al chevrón con regulador de movimiento 200 μm , ya que proporcionan magnitudes de respuesta muy similares, ligeramente mayores en el segundo caso, aunque su geometría es más compleja de implementar, lo que puede marcar la diferencia y la preferencia en la selección. En estos dos casos, el mayor desplazamiento corresponde al actuador con regulador de movimiento 200 μm (en un 5.3%), mientras que la fuerza es mayor para la geometría convencional (V), por un 11.69%.

La comparación entre los resultados obtenidos de la simulación y los analíticos del actuador chevrón V y Z, que son los actuadores que tienen modelado matemático genera márgenes de error menores al 10%, lo que valida a las aproximaciones realizadas.

Se realizó, además, el análisis numérico de los actuadores chevrón V y Z modificado de 8 pares de brazos, debido a que el primero es ampliamente utilizado, mientras que el segundo cuando se analizó a un par de brazos presentó el mayor desplazamiento. Con 8 pares de brazos el mayor desplazamiento corresponde al Chevrón Z modificado, en un 14.41%, pero una menor fuerza en un 37.84. El esfuerzo de cedencia en el caso del V, supera ligeramente al de cedencia, y es el de más amplio uso.

Trabajo futuro

Constantemente se generan nuevas geometrías, por lo que, es recomendable mantener una vigilancia y actualización de la información presentada. Además, como trabajo futuro también puede ser posible caracterizar el esfuerzo de los chevrones Z convencional y modificado. Como trabajo futuro también es posible realizar un barrido para conocer el voltaje máximo que se puede aplicar, esto con base en el límite de cedencia.

7. REFERENCIAS

- Beeby, S., Ensell, G., Kraft, M., & White, N. (2004). MEMS Mechanical Sensors. *Boston: Artech House*, 128.
- Elbuken, C., Gui, L., Ren, C., Yavuz, M., & Khamese, M. (2008). Design and analysis of a polymeric photo-thermal microactuator. *ELSELVIER*, 1-7.
- Griffiths, C., Evans, H., & Fahmy, A. (2020). Microgripper design and evaluation for automated l-wire assembly: a survey. *Microsystem Technologies*, 1-24.
- Sinclair, M. (2000). "A High force Low Area MEMS Thermal Actuator. *Proc. of Intersociety Conference on Thermal and Thermomechanical Phenomena in Electronic Systems* , 127-132.
- Ali, N., Shakoor, R., & Hassan, M. (2011). Microgripper with integrated capacitive contact sensor. *. EEE 14th International Multitopic Conference*, 201-206.
- ANSYS Inc. (2011). *Optimization in ANSYS Workbench*. Obtenido de ANSYS Inc.
- Aravind, T., Ramesh, R., Ramya, S., Praveenkumar, S., & Kalaiarasi, A. (2016). Comparison of. *International Journal of Printing, Packaging & Allied Sciences, Vol. 4, No. 4.*, 2560-2566.
- Chiorean, R. S., Dudescu, M. C., Pustan, M., & Hardau, M. (2013). Analytical and numerical study on the maximum force developed by a V-beam thermal actuator. *ScienceDirect*, 359-363.
- Chu Duc, T., Lau, G.-K., & Creemer, J. (2008). Electrothermal Microgripper With Large Jaw. *JOURNAL OF MICROELECTROMECHANICAL SYSTEMS*, 1546-1555.
- Chu, J., Zhang, R., & Chen, Z. (2011). A novel SU-8 electrothermal microgripper based on the. *JOURNAL OF MICROMECHANICS AND MICROENGINEERING*, 1-15.
- Conrad, H., Schenk, H., Kaiser, B., & Langa, S. (2015). A small-gap electrostatic micro-actuator for large. *Nat Commun* 6, 1-7.
- Cragun, R., & Howell, L. L. (1999). Linear Thermomechanical Microactuators, *Microelectromechanical Systems (MEMS). Proc. of*, 181-188.
- Developement, Y. (2019). Status of the MEMS Industry. *Market & Technology*, 1-15.
- Elahinia, M. H. (2015). *Shape Memory Alloy Actuators: Design, Fabrication, and Experimental Evaluation*. USA: Wiley.
- Guan, C., & Zhu, Y. (2010). An electrothermal microactuator with Z-shaped beams. *. Micromechanics and Microengineering*, 1-10.

- Guan, C., & Zhu, Y. (2010). An electrothermal microactuator with. *JOURNAL OF MICROMECHANICS AND MICROENGINEERING*, 1-10.
- H., A., G., & A., F. (2020). Microgripper design and evaluation for automated I-wire assembly: a survey. *Microsystem Technologies*, 1745- 1768 .
- Huber, J., Fleck, N., & Ashby, M. (1997). The selection of mechanical actuators based on. *Proc. of the Royal Society A*, 2185-2205.
- Judy, J. W. (2001). Microelectromechanical systems. *SMART MATERIALS AND STRUCTURES*, 21.
- Jui-Chang K., Hen-Wei Huang, Shu-Wei Tung, & Yao-Jo. (2014). A hydrogel-based intravascular microgripper manipulated using. *Sensors and Actuators A: Physical*, 121-130.
- Kaajakari, V. (2009). *Practical MEMS*. Las Vegas : Small gear publishing.
- Kawamoto, H., & Tsuji, K. (2011). Manipulation of small particles utilizing electrostatic force . *Advanced Powder Technology Volume 22*, 602-607.
- Llewellyn-Evans, H., Griffiths, C., & Fahmy, A. (2020). Microgripper design and evaluation for automated I-wire assembly: a survey. *Microsyst Technol*, 1745–1768.
- Maluf, N., & Williams, K. (2004). *An Introduction to*. USA: ARTECH HOUSE, INC.
- Nuryadi, R., Djajadi , A., Adiel, R., Aprilia, L., & Aisah, N. (2013). Resonance Frequency Change in Microcantilever-based Sensor due to Humidity Variation. *Materials Science Forum*, 8.
- Que, L., Park, J., & Gianchandani , Y. (1999). “Bent-Beam Electro-Thermal Actuators for High Force Applications. *Proc of IEEE Intl.Conference on MEMS*, 31-36.
- S, Algamili Abdullah y otros. (2021). *Actuation and Sensing*. Malaysia: SpringerOpen.
- Shukla, S., Anand , B., Parashar, G. K., Mishra, A. P., Dubey, G. C., & Tiwari, A. (2012). Fabrication of ultra-sensitive optical fiber based humidity sensor using TiO₂ thin film. *ADVANCED MATERIALS Letters*, 6.
- Steiner, H., Keplinger, F., Schalko, J., Hortschitz, W., & Stifter, M. (2015). Highly Efficient Passive Thermal Micro-Actuator. *JOURNAL OF MICROELECTROMECHANICAL SYSTEMS*, 1-8.
- Varona, J., Tepoyotl Torres, M., & Hamoui, H. (2008). *México Patente nº 295737*.
- Vatan, H., & Hamed, M. (2020). Design, analysis and fabrication of a novel hybrid electrothermal microgripper in microassembly cell. *Microelectronic Engineering*, 1-12.
- Wang, Z. S. (2015). Design, modeling, and characterization of a MEMS electrothermal. *Microsystem Technology*, 2307-2315.
- Wang, Z., Shen, X., & Chen, X. (2014). Design, modeling, and characterization of a MEMS. *Microsyst Technol*, 1-8.
- Yang S., & Xu Q. (2017). A review on actuation and sensing techniques. *Micro-Bio Robot*, 1-14.

- Yang, S., & Xu, Q. (2017). A review on actuation and sensing techniques for MEMS-based microgrippers. *J Micro-Bio Robot*, 1-14.
- Yong, Z., Corigliano, A., & D Espinosa, H. (2006). A thermal actuator for nanoscale in situ. *Institute of Physics Publishing*, 12.
- Zhang, R., Chu, J., Wang, H., & Chen, Z. (2013). A multipurpose electrothermal microgripper for biological micro-manipulation. *Microsystem Technology*, 89-97.
- Zhang, Z., Yu, Y., Liu, X., & Zhang, X. (2015). A Comparison Model of V- and Z-shaped. *IEEE International Conference on Mechatronics*, 1025-1030.

Cuernavaca, Mor., a 16 de octubre del 2023



DR. JOSE GERARDO VERA DIMAS
DR. PEDRO VARGAS CHABLÉ
DRA. MARGARITA TECPOYOTL TORRES
DR. RAMON CABELLO RUIZ
DR. JOSE ALFREDO RODRIGUEZ RAMIREZ
P R E S E N T E

Me permito comunicarles que han sido designados integrantes del **COMITÉ REVISOR** del trabajo de:
TESIS
Titulado:

Análisis numérico de parámetros fundamentales en los brazos de actuadores chevrón con diferentes geometrías

Que presenta (el) o (la) **C. JOSE MANUEL CONDE BELLO**
Director de trabajo: **DRA. MARGARITA TECPOYOTL TORRES**
Para obtener el grado académico de: **INGENIERO MECÁNICO**

A T E N T A M E N T E
Por una humanidad culta

DRA. VIRIDIANA AYDEÉ LEÓN HERNÁNDEZ DIRECTORA

Se anexa firma electrónica

D I C T A M E N

DRA. VIRIDIANA AYDEÉ LEÓN HERNÁNDEZ DIRECTORA DE LA FCQeI
P R E S E N T E

En respuesta a su amable solicitud para emitir DICTÁMEN sobre el trabajo que se menciona, me permito informarle que nuestro voto es:

VOTO	NOMBR E	FIRMA
APROBATORIO	DR. JOSE GERARDO VERA DIMAS	
APROBATORIO	DR. PEDRO VARGAS CHABLÉ	
APROBATORIO	DRA. MARGARITA TECPOYOTL TORRES	
APROBATORIO	DR. RAMON CABELLO RUIZ	
APROBATORIO	DR. JOSE ALFREDO RODRIGUEZ RAMIREZ	

El voto del comité es aprobatorio, se anexan firmas electrónicas

VALH/ATI/srpm



UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DEL
ESTADO DE MORELOS

Se expide el presente documento firmado electrónicamente de conformidad con el ACUERDO GENERAL PARA LA CONTINUIDAD DEL FUNCIONAMIENTO DE LA UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DEL ESTADO DE MORELOS DURANTE LA EMERGENCIA SANITARIA PROVOCADA POR EL VIRUS SARS-COV2 (COVID-19) emitido el 27 de abril del 2020.

El presente documento cuenta con la firma electrónica UAEM del funcionario universitario competente, amparada por un certificado vigente a la fecha de su elaboración y es válido de conformidad con los LINEAMIENTOS EN MATERIA DE FIRMA ELECTRÓNICA PARA LA UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE ESTADO DE MORELOS emitidos el 13 de noviembre del 2019 mediante circular No. 32.

Sello electrónico

VIRIDIANA AYDEE LEON HERNANDEZ | Fecha:2023-10-25 15:53:20 | Firmante

WqLjLYalgCC08GSmvAETVAmMwAAAfoEvzAbXR7JBYLCHfzAKJU9rvkQbbVr+kVEqFDGDqDkc4aM+3elvb5XnfpGNrz9AhiXdG0WJXwEcqghcw4FIPHKol5kWZwByk5MX1Tm
zLHnEmZvc6U880rKVzhGMTzMDWdMYs87XDO5R0yu7iZJmrFW0zdExoTB86h4nodYDY0pBB9hcVATLEGPE8ilry2IV+daM7m2trYA4UZ0q6/HFhb20CYOH0vONk5tQ3m5uf/S
KeJ82gldQnFI2UJRQQMOVOOxzTHn67bv/qe7PdBl+Sl+y1pGJvwY0CTDPfAZqZqXIMhoXmPC4dAqRQ==

Puede verificar la autenticidad del documento en la siguiente dirección electrónica o
escaneando el código QR ingresando la siguiente clave:



[qvJet1uXF](#)

<https://efirma.uaem.mx/noRepudio/vRZTuaPlybSRptQok3RqcCNfE1RW06DV>





UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DEL
ESTADO DE MORELOS

Se expide el presente documento firmado electrónicamente de conformidad con el ACUERDO GENERAL PARA LA CONTINUIDAD DEL FUNCIONAMIENTO DE LA UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DEL ESTADO DE MORELOS DURANTE LA EMERGENCIA SANITARIA PROVOCADA POR EL VIRUS SARS-COV2 (COVID-19) emitido el 27 de abril del 2020.

El presente documento cuenta con la firma electrónica UAEM del funcionario universitario competente, amparada por un certificado vigente a la fecha de su elaboración y es válido de conformidad con los LINEAMIENTOS EN MATERIA DE FIRMA ELECTRÓNICA PARA LA UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE ESTADO DE MORELOS emitidos el 13 de noviembre del 2019 mediante circular No. 32.

Sello electrónico

RAMON CABELLO RUIZ | Fecha:2023-10-25 16:16:16 | Firmante

f4Oanl40QgLL6ix5+vS3QOTgTDLhBDTOr5xciUpiVwtBcmJ4gkODZXvz6PB8fMJDvVydTPhnQI76PVsFm7a1ScI2Ku6FtM/OvKtc6wUhz3+6B41fHqXW1MMmVCT+sQyo+On+bDz MxjbQujmSxLL3UUZ94CBNDUC0TvGdvOnSymCnoxLAfxhPpmNtnbyrON+XNPFX8i1ICDKKaPgngcOfZ33cOyk1SPRDeLdkoaQzyvfcUt2bhcTFj9TrNJBIGXBYw6iiMI+BZUj6EN CWaPOOE9CA6KaEp2UkCBnAs1ssvnCFbDBrko4q+maRTzjblVnm81suSfoksGezSUHyS2Fgw==

JOSE GERARDO VERA DIMAS | Fecha:2023-10-25 16:24:32 | Firmante

H5yk9QkHIEHNAwUz17PXazPh29Lrl+A1RK8zQUgOKUMMYk7XUOpGaR8GV/gTKqGISsPSvVWuAb2B+Y4/6NdQeK4Pli9v5cyBfZlzz+88mChiJa8Pnj9E4r0LhtCA7vGTpbgsh2 96B4UZ1FksF+KkCp7CEAoDy+EYcGacl9Vicochx27HJTcnXKQdspMtr5WMLWuL1Ez4tX2PuBHj6siS5eg+Y+5pD1a8Agw2AYQJkrZpDld+xWKZfVXnl6/otdc8ZVXbzuO63YMvk dTyN+ihfkWQGYsIKSKO7ZaKpNfSScbMPJ5Db0UjtDo0C0aQvmj0UCaWs96uljSeiTibu9sw==

MARGARITA TECPOYOTL TORRES | Fecha:2023-10-25 18:15:25 | Firmante

Abq1eQQCBmSSpwtA+NtoCZIXlgCdbp4oLeVtoPC4BbCERRd3zxrUhtzZaWJdA1Gxgz3BWBjypcGiYJK4kUfvCoobGr9hHsNatADkzgf4xOYZGqFCdLJBDq/n31MGpO1+5sD D3JT18WpFfKl4TFBmad+J6ppmZAF4zK6lJtU2TL/itnjHx1rRvQCQPu4XPAsgc0vxA8dkOX47O/oW9YtnEmhEvDKshDc7QSY58/R/K08KvAjV2XM1crAdVOm51eUKbtqUgTsv Ha/VXWpZ/Wqsjgi/HH0dzJLSoPjGJtCj/QNXkgmf0RCGC6TShWVydBmXD82SUFInpq3kBI7SQ==

PEDRO VARGAS CHABLE | Fecha:2023-10-25 18:39:34 | Firmante

MAK1yEIUqt+NLuedY35Uyx3mpM9IRt2zQuY8YBL4Yj8jSAagFu11bnUTDvl8gNnOo10mBZrssfz5VP65KQGrbLhNm6KDBQ3s8Qx0QRm6LVkhZ44jcrli5pMb3fXPCZqEMqFxeib AFNyJIS25Xz3Ed8JYRs06WUoOyPSKtARp8stPB7loyZKvfxckeOArLq0+6+fBvOPped7BIGg7J5bYHOTOQSRSTZqnDFe9wB2vTpaxUd3bA96xWu4rmaeZx6wbCDXELQdTKt OxYHvCLZe+Mz3EwdhzWgrQ3+7VHPErNfjT07zQA5DIWe35G0ly301tE8nvjdhx92l2bL7xgw==

JOSE ALFREDO RODRIGUEZ RAMIREZ | Fecha:2023-10-26 08:50:11 | Firmante

cRjwTAY4cB7tWeo6Qf0L+oQ1uyIZF0a8dpxLvlcXYUJLw14q5fjJnTFgJDC3kW0QKZCfHouY9u8jAYWtB12gzfif91Vpl6NYDiYK1fb/0gsI2DnKFX1dZz2lxQJyzoLbB4AaZwHH3v QbLY4EziwXi2zWPY3CYR3ApatQ0xHOcZLZzoFd5YM8sWLCitCfwenxHRsuVOYeJBqeKduwkH7/H6j+byJR1K5AP10aoAEtqY5HdGNx0xKDhdqjVtrBRMGVYtdGOyFnnKR5E0j 1JSNTqhiRAtqpnrolsWN2g45mRDPwl/2l5Yw/63fPJ+zG40WeMtNRI5h4IGYrieUi7GA==

Puede verificar la autenticidad del documento en la siguiente dirección electrónica o escaneando el código QR ingresando la siguiente clave:



W2F3ksz6b

<https://efirma.uaem.mx/noRepudio/S29NUMclqTpwFvPpQESYAC7llg3L83B4>

