



INAOE

**Caracterización de Microactuadores Tipo
Chevron Fabricados con la Tecnología
PolyMEMS-INAOE**

Por:

Carlos Ramón Báez Álvarez

Tesis sometida como requisito parcial
para obtener el grado de

**MAESTRO EN CIENCIAS EN LA
ESPECIALIDAD DE ELECTRÓNICA.**

En el

**Instituto Nacional de Astrofísica,
Óptica y Electrónica.**

Noviembre 2011
Tonantzintla, Puebla

Supervisada por:

Dr. Mónico Linares Aranda
Investigador Titular del INAOE

Dr. Wilfrido Calleja Arriaga
Investigador Titular del INAOE

©INAOE 2011

Derechos Reservados

El autor otorga al INAOE el permiso de reproducir y distribuir
copias de esta tesis en su totalidad o en partes



Resumen

En los laboratorios de microelectrónica y el laboratorio de innovación en MEMS (LIMEMS) del INAOE, se cuenta con la tecnología PolyMEMS-INAOE, mediante la cual se pueden fabricar micro-estructuras MEMS con una dimensión mínima de 5 micrómetros (μm). Entre estas estructuras se han fabricado actuadores de efecto Joule, o actuadores electro-termo-mecánicos, sin embargo, estos no han sido caracterizados por completo. El objetivo de la presente tesis es caracterizar mediante varios métodos el actuador de efecto Joule de tipo chevron, obteniendo sus principales parámetros de funcionamiento y desempeño. Para este propósito se presenta inicialmente una explicación de la conformación y el principio de funcionamiento del actuador tipo chevron. Se describe la importancia de realizar la caracterización de dichos actuadores y se presentan algunas técnicas que se han utilizado para la medición de los parámetros de estos actuadores. Con ayuda de un modelo analítico y de simulación, se obtiene el desempeño de los actuadores como una primera aproximación, y se realiza un análisis de variación de parámetros (conductividad, módulo de Young, coeficiente de expansión térmica, entre otros), para observar cómo se ve afectado su desempeño, y un análisis donde se modifican los elementos que lo conforman (número de brazos y dimensiones del vástago). Se determina la fuerza de empuje, y se observa la distribución de temperatura en las estructuras electro-termo-mecánicas chevron. En los actuadores fabricados, se mide el desplazamiento generado y sus dimensiones para poder validar los resultados analíticos y de simulación. Se analizan y se comparan los resultados analíticos, de simulación y experimentales para verificar que los modelos utilizados aportan información coherente sobre el funcionamiento y desempeño de los actuadores bajo estudio. Finalmente se propone una técnica “on chip” para medir indirectamente la fuerza de dichos actuadores.

Abstract

PolyMEMS-INAOE is a surface micromachining technology for micromechanics device fabrication, which is based on polysilicon films as structural material and featured by 5-microns as minimum size. This technology offers fabrication capacities of electrostatic and Joule effect actuators, residual stress test structures, and some other specific purpose structures. Currently, some of such structures are under characterization and modeling.

The objective of this M. Sc. Thesis is stated as follows: Using several approaches, the study is conducted in order to obtain the characterization of chevron type actuators; this purpose is attained considering several key device parameters and polysilicon structural properties. In the pursuit of this goal, the lay out, fabrication details, characterization techniques, and physics of operation, all of them were considered.

The chevron actuators were analyzed based on both, analytic and simulation techniques, and additionally considering a parameter analysis approach (polysilicon conductivity, Young's modulus, thermal expansion coefficient, etc.). The simulation process comprises variations in the chevron mechanical arrangement: length arms, mechanical angle, and width/length of the shuttle. This broad simulation task was performed in order to analyze some issues related with operating temperature distribution, pushing force, and overall displacement.

In the last stage of this study, several actuators were experimentally analyzed, both on wafer and also mounted on PCB. Simulation and analytic approach were validated.

Finally, a proposed "on-chip" design for measuring the pushing force of these actuators is discussed.

Agradecimientos

En primer lugar quiero agradecerle a Dios por haberme dado lo necesario para salir adelante hasta este momento de mi vida.

A mis padres Juan Carlos y Margarita Sandra, a mis hermanas Sandra y Karina, y a mi abuelita Graciela, por haberme apoyado y brindado su compañía en cada momento.

A mi familia Sulma y Sofía, que han confiado en mí, y me han brindado su amor y cariño incondicional.

Al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (CONACYT) por la beca de maestría con número de registro 235195.

Al INAOE que me ha permitido crecer profesionalmente y me ha brindado el apoyo con los servicios que ofrece.

A mis asesores, el Dr. Mónico Linares Aranda y el Dr. Wilfrido Calleja Arriaga, quienes confiaron en mí y me guiaron en el desarrollo de este trabajo.

Al personal del laboratorio de microelectrónica en especial a Ignacio Juárez y a Rafael Rodríguez por su apoyo durante las mediciones realizadas, y a Manuel Escobar por el apoyo con Coventor.

A mis sinodales, la Dra. María Teresa Sanz Pascual, el Dr. Carlos Zúñiga Islas, y el Dr. Francisco Javier De la Hidalga Wade por su tiempo dedicado.

A mis compañeros, amigos y profesores que he conocido en el INAOE, ya que con sus comentarios y apoyo durante la maestría he crecido profesional y personalmente.

Índice

Resumen	i
Abstract.....	iii
Agradecimientos	v
Índice	vii
Prefacio.....	xi
Capítulo 1. Introducción	1
1.1. Introducción a MEMS.....	1
1.2. Micro-Actuadores.....	3
1.2.1. Características del Actuador Chevron.....	4
1.2.2. Importancia de la Caracterización y el Modelado.....	6
1.3. Indicador de Fuerza.....	8
1.3.1. Técnicas de medición de Fuerza.....	8
1.3.2. Un sensor Piezo-resistivo.....	10
1.4. Resumen	12
Capítulo 2. Metodología.....	13
2.1. Micro-actuadores	13
2.2. Modelo Analítico	15
2.2.1. Desplazamiento Generado.....	16
2.2.2. Variación y Distribución de la Temperatura.....	17
2.2.3. Fuerza	22
2.2.4. Variación de Parámetros y Características del Actuador	25
2.3. Modelo de Simulación.....	26

2.3.1.	Desplazamiento y Temperatura.....	27
2.3.2.	Fuerza Total	28
2.3.3.	Fuerza de Empuje	29
2.3.4.	Comportamiento de Actuadores en Cascada	31
2.3.5.	Influencia del Vástago	32
2.3.6.	Simulación de los Actuadores Fabricados en el INAOE	37
2.4.	Modelo Experimental.....	38
2.4.1.	Chip Fabricado	39
2.4.2.	Caracterización Geométrica de las Estructuras.....	40
2.4.3.	Mediciones Eléctricas	41
2.4.4.	Medición del Desplazamiento Generado	42
2.5.	Resumen.....	46
Capítulo 3.	Resultados	49
3.1.	Resultados Analíticos.....	49
3.1.1.	Desplazamiento	49
3.1.2.	Temperatura	50
3.1.3.	Fuerza	51
3.1.4.	Variación de Parámetros	52
3.2.	Resultados de Simulación.....	59
3.2.1.	Actuadores en Cascada	60
3.2.2.	Influencia del Vástago	63
3.2.3.	Representación Eléctrica de un Chevron	67
3.2.4.	Actuadores Fabricados.....	68
3.3.	Resultados Experimentales.....	74

3.3.1. Caracterización Geométrica de las Estructuras	75
3.3.2. Mediciones Eléctricas.....	77
3.3.3. Desplazamiento Medido.....	78
3.4. Comparación y Análisis de los Resultados	79
3.4.1. Desplazamiento.....	79
3.4.2. Temperatura.....	82
3.4.3. Fuerza	83
3.5. Técnica Para Medir Fuerza.....	85
3.6. Resumen	92
Capítulo 4. Conclusiones y Trabajo Futuro.....	95
4.1. Conclusiones	95
4.2. Trabajo Futuro y Sugerencias.....	96
Apéndice A: Cómo Simular Actuadores de Efecto Joule en COVENTOR Ware.	99
Apéndice B: Consideración de las Pérdidas de Temperatura en el Simulador	111
Apéndice C: Diseño del Indicador de Fuerza.....	119
Índice de Figuras	137
Índice de Tablas.....	143
Referencias.....	145

Prefacio

En la actualidad, el constante desarrollo e innovación de las aplicaciones en áreas científicas, industriales, médicas, aeroespaciales y muchas otras, han motivado la integración de sistemas cada vez más completos en un solo chip (“systems on chip”), lo cual a su vez ha motivado la reducción de las dimensiones con el fin de integrar una mayor cantidad de componentes en una misma área, y por el otro lado, explotar al máximo las técnicas de diseño y caracterización para lograr mejoras en los dispositivos. En los últimos años, el integrar circuitería electrónica junto con sensores/actuadores, ha dado lugar a los Sistemas Micro-Electro-Mecánicos, lo cual ha sido posible debido al trabajo de integración, diseño y caracterización de cada elemento que forma parte del sistema.

En el laboratorio de microelectrónica del INAOE se han fabricado micro-estructuras MEMS, que funcionan mediante efecto Joule (principalmente estructuras bimorfas y tipo chevron), las cuales pueden utilizarse en micro-espejos, sistemas de engranajes, micro-posicionadores entre otros. Sin embargo para lograr utilizarlos en una aplicación dada, se requiere que estén bien caracterizadas para brindar confiabilidad y un buen desempeño. El desarrollo de esta tesis se enfoca precisamente en caracterizar un micro-actuador electro-termo-mecánico tipo chevron.

El proceso de caracterización se realiza con el equipo, instrumentos de medición o dispositivos necesarios, para conocer a fondo el funcionamiento y desempeño de algún dispositivo; y considerando que en ocasiones no se cuenta con el equipo necesario, es en estas situaciones cuando se deben buscar alternativas de solución que brinden información válida sobre el desempeño de dicho actuador.

Es con estos argumentos que se plantea el presente trabajo de tesis, en donde se realiza la caracterización considerando las características principales de los actuadores tipo chevron. Para lograr este objetivo, la tesis es organizada de la siguiente forma:

En el capítulo 1 se describen las partes que conforman a un chevron, su funcionamiento, y las principales figuras de mérito para conocer su desempeño. También se describen algunas técnicas utilizadas para medir la fuerza que ejercen dichos actuadores.

En el capítulo 2 se investigan y analizan alternativas que permitirán conocer el funcionamiento y desempeño de los actuadores. Mediante el uso correcto de modelos analíticos y de simulación, se logra una primera aproximación al funcionamiento de un chevron. Utilizando actuadores fabricados mediante el proceso PolyMEMS-INAOE, se describe una metodología de caracterización.

El capítulo 3 presenta el análisis y comparación de los resultados, en donde se validan los modelos utilizados. Se describe la propuesta de una técnica para medir la fuerza, considerando utilizar circuitería CMOS y microestructuras en una misma oblea.

Las conclusiones y el trabajo futuro se presentan en el capítulo 4.

Capítulo 1. Introducción

En este capítulo se conocerá lo que es un actuador tipo chevron, sus componentes y su principio de funcionamiento. Se discutirá la importancia de realizar el modelado y la caracterización de estos actuadores, y se expondrá brevemente la teoría para proponer una técnica que sirva para medir la fuerza de estos actuadores por medio de una señal eléctrica de referencia.

1.1. Introducción a MEMS

MEMS o Sistemas Micro-Electro-Mecánicos, son en la actualidad parte de nuestra vida cotidiana, se encuentran en el automóvil (acelerómetro, sensor de presión), en el celular (sensores de movimiento), las impresoras (en los cabezales de inyección de tinta), entre muchos otros. Su nombre indica las dimensiones con las que se fabrican (micrómetros, NEMS si se utilizan dimensiones nanométricas). Se encuentran conformados por sensores, actuadores, circuitería electrónica de control y mecanismos que interactúan entre sí para lograr una determinada actividad. Sin embargo un MEMS puede no contener todos estos componentes ya que depende de la aplicación que se desea realizar. Para visualizar mejor lo que es un MEMS se presenta en la Fig. 1.1 un acelerómetro tri-axial como estructura mecánica, junto con su correspondiente circuitería de control [1].

En México, obtener este tipo de sistemas es una tarea que se encuentra en desarrollo. En el INAOE se cuenta con la tecnología PolyMEMS, que es un proceso de fabricación de micro-estructuras MEMS y que utiliza el polisilicio como material estructural. Con este proceso se han fabricado diversas estructuras [2, 3], así como sensores y monitores de esfuerzo [4].

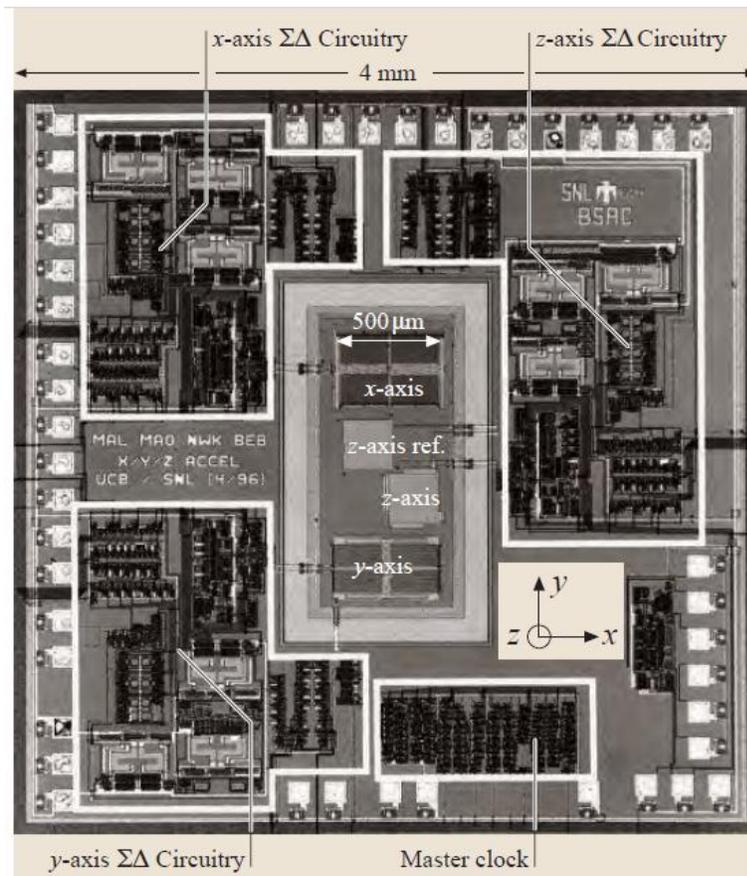


Fig. 1.1 Fotografía de un acelerómetro fabricado mediante micro-maquinado superficial de polisilicio con interface de control integrada. Fotografía tomada de [1].

La tecnología PolyMEMS permite por el momento fabricar solamente estructuras MEMS, sin embargo es un proceso compatible con la tecnología CMOS-INAOE para fabricar circuitos integrados. Se espera en un futuro no muy lejano poder fabricar sistemas como el de la Fig. 1.1. Sin embargo no introducir circuitería electrónica no es una limitante para el desarrollo de nuevas aplicaciones, ya que hay empresas internacionales que ofrecen procesos que, de forma similar, fabrican solamente micro-estructuras. En la Fig. 1.2 se observan imágenes de estructuras del proceso PolyMEMS del INAOE, así como estructuras fabricadas con el proceso SUMMIT-V de Sandia Labs.

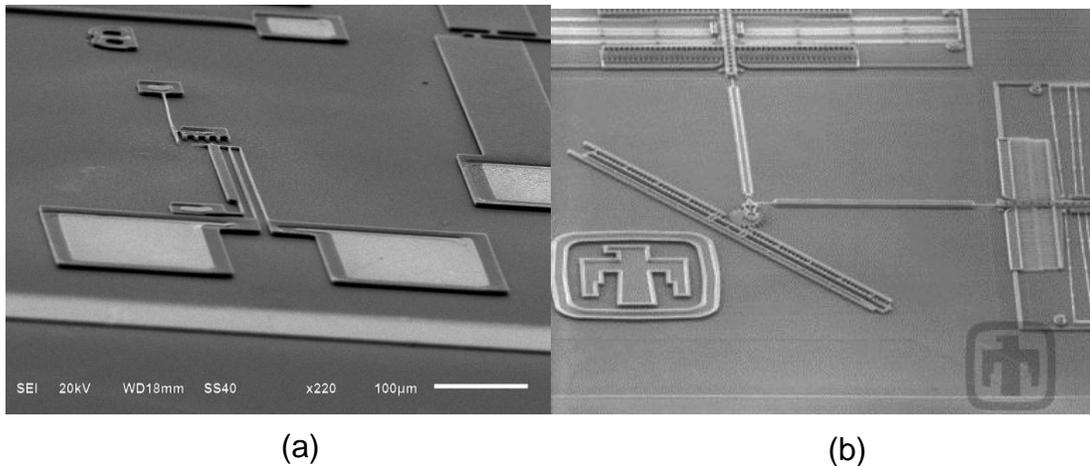


Fig. 1.2 (a) Fotografía de un actuador de efecto Joule (PolyMEMS [4]). (b) Fotografía de una cremallera lineal, donde se observan dos actuadores Joule y un engrane (SUMMIT-V <http://mems.sandia.gov/gallery/images.html>).

1.2. Micro-Actuadores

Uno de tantos elementos que conforman un MEMS son los micro-actuadores. Cuando se va a hablar sobre micro-actuadores de cualquier tipo, es conveniente entender lo que significa un actuador. Un actuador es un dispositivo que transforma algún tipo de energía (eléctrica, mecánica, térmica, etc.), en una acción determinada para un sistema o conjunto de dispositivos que funcionan en armonía para generar una aplicación determinada. En gran escala un actuador puede ser una prensa hidráulica, una válvula o algún dispositivo que permita manipular elementos o fenómenos que el hombre no puede realizar por sí mismo. Es el mismo caso cuando se habla de micro-actuadores, que debido principalmente a sus dimensiones, le dan al hombre la capacidad de manipular parámetros físicos que se encuentran por debajo de sus posibilidades. En los últimos años se ha venido explotando cada vez más el uso de micro-actuadores, principalmente en el área automotriz, médica y electrónica, sin embargo su aplicación no se limita a las áreas mencionadas. Claro que existe una gran

variedad de actuadores que funcionan bajo determinado fenómeno físico, pero sus aplicaciones pueden ser muy amplias con solo realizar alguna ligera modificación para adaptar algún actuador en un sistema particular. Sin embargo, si se desea utilizar un micro-actuador determinado, se debe de conocer su funcionamiento y sus características. En el INAOE se cuenta con el proceso PolyMEMS que permite fabricar micro-estructuras de polisilicio, y las aplicaciones se encuentran en fase de desarrollo. Hasta el momento se han fabricado actuadores de efecto Joule (chevron y bimorfos), pero no han sido completamente caracterizados, ni modelados para alguna aplicación determinada. Para lograr una buena logística al desarrollar una tecnología completa de MEMS, se deben ir cumpliendo objetivos específicos que conlleven al desarrollo o innovación en micro-sistemas. En el desarrollo de este trabajo se ha elegido utilizar un tipo de actuador denominado chevron con el cual se realizarán diferentes pruebas y técnicas para su caracterización.

Este tipo de actuadores, también conocidos como micro-actuadores termo-mecánicos lineales [5], o actuadores en forma de V [6], son conocidos por ofrecer grandes fuerzas de salida, con la limitante de desplazamientos relativamente pequeños ($10\mu\text{m}$ - $20\mu\text{m}$). Su configuración permite obtener fácilmente el desplazamiento o fuerza deseados para alguna aplicación determinada. Este tipo de actuador funciona debido a la expansión térmica de un material dado [7].

1.2.1. Características del Actuador Chevron

En la Fig. 1.3 se presenta el esquema de un actuador tipo chevron. Su funcionamiento es sencillo y es el siguiente: al aplicar una diferencia de potencial entre los contactos anclados del actuador, circulará una corriente eléctrica en la estructura, lo que generará una expansión de los brazos

debida al efecto Joule, la cual a su vez producirá un desplazamiento del vástago direccionado gracias al ángulo inicial θ . Este ángulo se forma entre el eje longitudinal del brazo y la perpendicular al eje del vástago. En la Fig. 1.3 se muestra un actuador chevron de 6 brazos, o visto de otra manera, un actuador conformado por 3 dispositivos chevron, en donde cada chevron está formado de 2 pares de brazos.

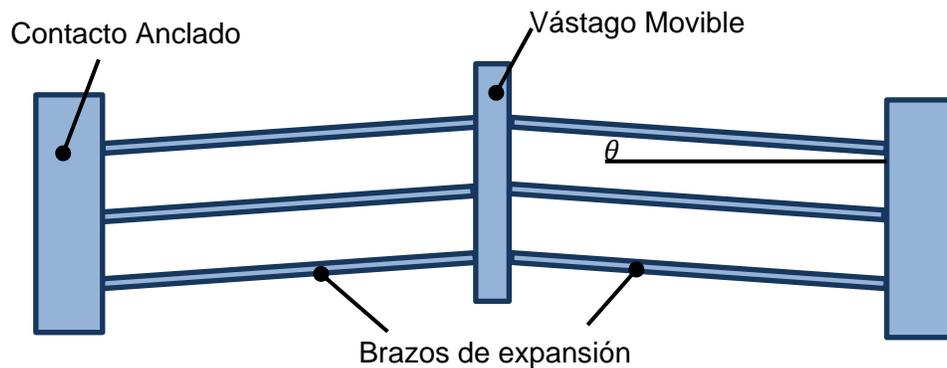


Fig. 1.3 Esquema de un actuador tipo chevron de 6 brazos. Los brazos y el vástago se encuentran suspendidos.

La función del vástago no solo es la de unir a los brazos, sino también dirige el impulso mecánico, y su terminación en punta (plana o angulada) proporciona una superficie para ejercer una fuerza determinada hacia otro elemento de un sistema mecánico dado. La fuerza que ejerza el chevron estará determinada por el número de brazos que lo conformen. En el desarrollo de este trabajo se abordará el tema de la fuerza de los chevron, sin embargo de forma introductoria se puede decir que el ángulo inicial influye en la fuerza y el desplazamiento del actuador de forma inversa.

En este trabajo se considera la “*fuerza total*”, como la fuerza que requiere el actuador, a partir de su estado en reposo (sin energizar), para alcanzar un determinado desplazamiento.

La “*fuerza de empuje*” es la fuerza que el actuador puede ejercer a una superficie perpendicular al desplazamiento del actuador. Esta fuerza disminuye conforme el actuador genera mayor desplazamiento.

1.2.2. Importancia de la Caracterización y el Modelado

Los micro-actuadores tipo chevron se pueden utilizar en sistemas de engranajes, micro-válvulas, micro-posicionadores, o en sistemas de RF. Su aplicación está limitada por el desplazamiento generado, ya que existen otros tipos de actuadores que pueden generar desplazamientos mayores a costa de entregar fuerzas pequeñas. Por otro lado, el chevron puede ejercer una mayor cantidad de fuerza dependiendo de su diseño, y es en donde entra en juego la habilidad del diseñador para utilizar uno u otro tipo de actuador. Sin embargo para pensar en utilizar un determinado actuador, se debe de conocer a fondo su funcionamiento y desempeño, y esto sólo es posible mediante técnicas de caracterización.

En electrónica, la caracterización permite conocer de forma experimental el comportamiento de componentes, dispositivos o sistemas; requiere de las técnicas, aparatos, instrumentos u otro equipo de medición adecuado para lograr ese fin. En el caso particular de caracterizar un micro-actuador de efecto Joule se necesita conocer el parámetro que se quiere medir y contar con más de un diseño del actuador para tener un punto de comparación.

Para caracterizar un actuador tipo chevron se debe conocer el desplazamiento, la temperatura y la fuerza de empuje, y realizar una comparación con diversas configuraciones, ya sea diferente número de brazos, diferentes ángulos iniciales, diferentes longitudes de brazo etc. Para lograr el objetivo se requieren de instrumentos de medición específicos como

puede ser una cámara de alta resolución junto con un software particular para medir el desplazamiento [8, 9, 10], utilizar una micro-punta para aplicar una fuerza controlada al actuador y poder medir la fuerza de empuje [11] o una cámara de infrarrojos que permita medir la temperatura en la estructura del actuador [6]. Muchos otros trabajos utilizan estructuras fabricadas junto con el actuador para medir el desplazamiento, como puede ser un vernier, un sensor piezoresistivo [23], entre otros. Para medir la fuerza existen varios métodos, entre ellos la medición de la deflexión de una viga suspendida [9, 13] o llegar a diseñar una estructura interna que mida la fuerza [14].

En el laboratorio de microelectrónica del INAOE se puede medir el comportamiento eléctrico del actuador, así como medir el desplazamiento generado; sin embargo, como se mencionó anteriormente, es necesario conocer su fuerza y la temperatura en su estructura. En la ausencia de instrumentos o equipo para realizar la medición de los parámetros faltantes es importante buscar una, o varias alternativas para conocer los demás parámetros de los actuadores. Es en este contexto, cuando utilizar un modelo analítico y/o de simulación que pueden brindar un apoyo para conocer el comportamiento de un actuador. Usar estos métodos no se considera una técnica de caracterización como tal, sin embargo con la ayuda de mediciones experimentales del desplazamiento generado se pueden validar los métodos y considerar que los resultados analíticos y de simulación son buenas aproximaciones. Las referencias [8, 15, 16] son ejemplos de trabajos que utilizan el modelado para explicar el comportamiento de los actuadores y a su vez realizar la comparación con los resultados experimentales. En nuestro caso, utilizar un modelo de simulación es la opción con la que además de obtener los parámetros se obtiene una vista en 3D de lo que sucede con el actuador, y así se puede comenzar con el análisis de estos actuadores, para posteriormente pensar en alguna técnica de caracterización.

1.3. Indicador de Fuerza

Como se ha mencionado anteriormente, para poder caracterizar un actuador tipo chevron es necesario contar con técnicas de medición adecuadas para un parámetro definido. La fuerza de empuje es uno de los parámetros más difíciles de medir en un chevron, debido a sus desplazamientos considerablemente pequeños para la fuerza que ejercen. Por ello es de utilidad pensar en un esquema de medición que permitiera medir la fuerza de una forma efectiva. Para lograr este fin se deben conocer los diversos métodos existentes para medir la fuerza. A continuación se hablará de técnicas o métodos de medición “on-chip” para conocer la fuerza de los actuadores.

1.3.1. Técnicas de medición de Fuerza

La forma más sencilla para medir la fuerza de empuje de un actuador es [17 y 18] utilizando una viga anclada en uno de sus extremos, y aplicando la fuerza en el extremo voladizo, tal y como se ilustra en la Fig. 1.4. La fuerza aplicada generará una deflexión de la viga, y la magnitud de la deflexión será el indicador de la magnitud de la fuerza.

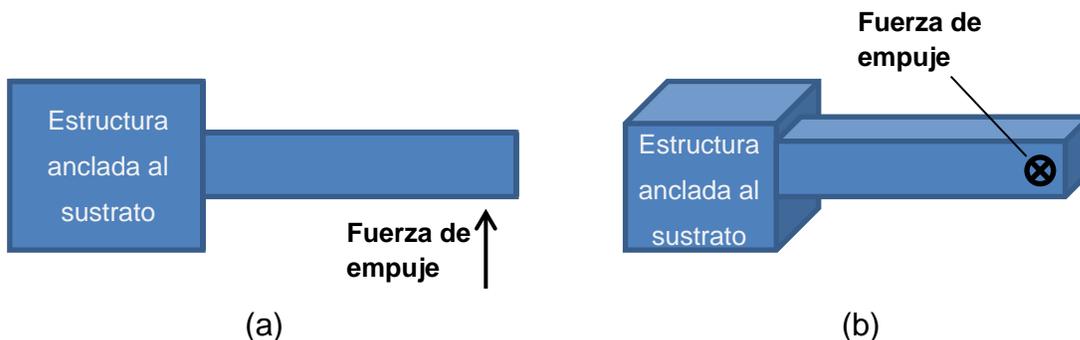


Fig. 1.4 Viga anclada en un extremo para el cálculo de la fuerza de empuje. (a) Vista superior, (b) vista en perspectiva 3D.

Mediante esta técnica, la fuerza se aplica de forma transversal a la vista superior de la viga. Los puntos más importantes a considerar son que:

- La barra tiene una longitud mucho mayor que las dimensiones de su sección transversal, y que la deformación debida a su propio peso es despreciable.
- Que el área de sección transversal de la barra no cambia cuando se dobla. Cuando el espesor de la barra es pequeño comparado con el radio de curvatura dado por la flexión, la sección transversal cambia muy poco.

Con estas condiciones se puede realizar el cálculo de la fuerza por medio de la ecuación (1.1).

$$F = \frac{3 \delta E I}{L^3} . \tag{1.1}$$

En donde F representa la fuerza aplicada, δ representa la deflexión, E es el módulo de Young, y L es la longitud de la barra. Esta ecuación ha sido aplicada en varios trabajos para el cálculo de la fuerza de los chevron [5, 19].

Otro de los métodos desarrollados para medir la fuerza es el presentado en [20], donde utilizan el efecto piezo-resistivo del polisilicio para formar una resistencia kelvin que cambie su magnitud cuando se ve influenciada por la fuerza.

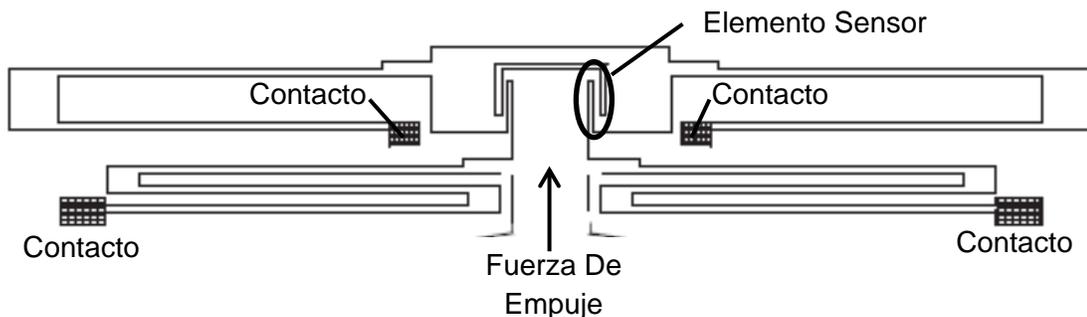


Fig. 1.5 Resistencia Kelvin utilizada para medir la fuerza de un chevron. Tomado de [20].

El esquema de esta técnica para medir la fuerza se presenta en la Fig. 1.5. Este método requiere de cuatro puntas para medir la variación de la resistencia debida a la fuerza del chevron.

Otro de los métodos utilizados por los laboratorios Sandia para medir la fuerza de los actuadores es la presentada en la Fig. 1.6, donde se observa una microfotografía de barrido de electrones de un indicador de fuerza unido al actuador a ser probado. Este método requiere de una punta de prueba externa para poder aplicar una fuerza controlable. Una descripción del funcionamiento de este método se encuentra en [6 y 21].

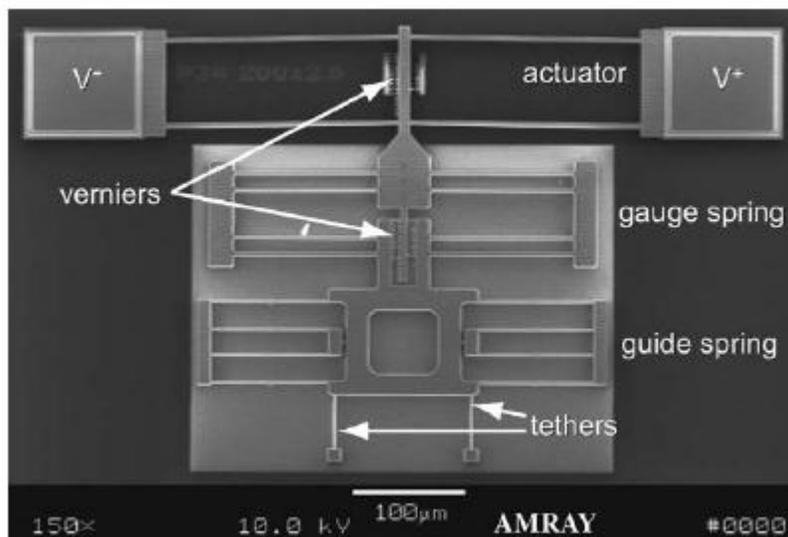


Fig. 1.6 SEM de un indicador de fuerza tomado de [21].

1.3.2. Un sensor Piezo-resistivo

La resistencia que presenta un área de sección transversal A de un material determinado para una fuerza externa F es definida como esfuerzo σ_m (ecuación 1.2), y es el término principal cuando se habla de un sensor de fuerza [17].

$$\sigma_m = F/A. \quad (1.2)$$

En la actualidad existe una gran variedad de indicadores de esfuerzo los cuales han sido diseñados para alguna aplicación en específico. Existen indicadores foto-elásticos, de laca frágil, de rayos X, mecánicos, ópticos, extensómetros e indicadores eléctricos [22, 23]. Por supuesto, se puede implementar más de uno de los indicadores anteriores para obtener una aproximación más exacta del esfuerzo. Si se quiere diseñar un indicador de esfuerzo para alguna aplicación en particular, se debe considerar las características más importantes con las que el indicador trabajará. Algunas de ellas son:

- Habilidad de medir esfuerzos de manera precisa bajo condiciones estáticas y dinámicas.
- Dimensiones pequeñas para aplicaciones integradas.
- Independencia con la temperatura.
- Respuesta línea al esfuerzo.
- Confiable

La mayor cantidad de estas características definen a un sensor ideal, sin embargo no siempre es posible cumplir con todas ellas. Para el propósito de este trabajo se propone que el indicador detecte la fuerza ejercida por el actuador y genere una respuesta eléctrica que pueda ser medida con facilidad mediante instrumentos de medición convencionales. Considerando que el material estructural es de propiedades piezoresistivas, es una buena opción para poder ser utilizada como principio de funcionamiento del indicador de fuerza, además en una resistencia es más fácil de compensar las variaciones de temperatura. La piezo-resistividad se define como el cambio en la resistencia que sufre un material cuando se ve sometido a una fuerza externa [17, 24]. Esta propiedad también relaciona directamente la fuerza aplicada con un cambio de resistencia.

1.4. Resumen

El actuador tipo chevron es un dispositivo capaz de generar un desplazamiento del orden de unos cuantos micrómetros, con la característica de ejercer grandes cantidades de fuerza. Es de suma importancia conocer los parámetros del actuador para poder aplicarlo en algún sistema determinado, por lo que se debe buscar una forma de obtenerlos. Como primera aproximación se pueden utilizar métodos que permitan observar con ciertas idealidades el comportamiento del actuador. En este trabajo los métodos analíticos y de simulación serán comparados a la medición experimental del desplazamiento generado para validar una técnica de caracterizar la fuerza del actuador.

La técnica propuesta para medir la fuerza de un chevron se basa en las propiedades piezoresistivas del polisilicio, material estructural con el cual está fabricado el actuador. Considerando que en un futuro el proceso de fabricación incluirá en un mismo sustrato circuitería CMOS y estructuras MEMS, se pensó en diseñar un puente de wheatstone compuesto por resistencias de estructuras suspendidas, en donde en una de ellas el chevron ejercerá la fuerza que provocará el cambio en el valor resistivo de la resistencia. Para medir la variación en el puente de wheatstone se utilizará un amplificador con el propósito de demostrar que es posible obtener micro-actuadores inteligentes.

En el capítulo 2 se presentará la metodología a seguir para el desarrollo de este trabajo, presentando los modelos analíticos, de simulación y experimentales. En el capítulo 3 se analizarán los resultados obtenidos y se comprenderá de una mejor forma el funcionamiento de los actuadores tipo chevron. También se presenta una técnica para medir la fuerza que ejercen dichos actuadores. Por último en el capítulo 4 se concluyen los resultados del trabajo desarrollado y se propone el trabajo futuro y sugerencias.

Capítulo 2. Metodología

Para conocer el comportamiento de un micro-actuador existen diversos métodos o técnicas de caracterización de diferente complejidad, sin embargo la elección de algún método depende de la exactitud requerida y del tiempo disponible para llevarlo a cabo. El contar con un buen actuador depende del proceso de fabricación, que brinde repetitividad y reproducibilidad; en otras palabras, contar con un buen actuador requiere, además del diseño, que este bien caracterizado. Sin embargo, el proceso de caracterización es una tarea que requiere de conocerlos teóricamente, de los instrumentos de medición adecuados, de los modelos, etc., y de una correcta manipulación de los soportes mecánicos de los actuadores (obleas), para no provocarles algún daño durante su manipulación experimental. En ocasiones el equipo de medición es sumamente costoso o no se tiene al alcance, y es en estas situaciones cuando un simulador de elementos finitos, junto con un modelo de simulación y/o un modelo analítico es de utilidad. Entre los diferentes métodos, los analíticos y los de simulación brindan una buena aproximación al comportamiento de los micro-actuadores siempre que se utilicen de manera adecuada. Para ello se debe conocer lo mejor posible los fenómenos físicos que influyen en el accionar del actuador, las propiedades de los materiales con los cuales se encuentre fabricado, y tener un buen conocimiento de su funcionamiento. Probablemente no se considere válida una caracterización que no sea obtenida de forma experimental, sin embargo sí se pueden obtener datos importantes sobre el comportamiento del actuador.

2.1. Micro-actuadores

Para el desarrollo del presente trabajo se utilizaron tres diseños de actuadores tipo chevron contenidos en el chip PolyMEMS V-B [4] y fabricados utilizando la tecnología PolyMEMS del INAOE [4]. Las

características de diseño de estos actuadores se presentan en la Tabla 2.1, donde se observa que los diseños son similares, siendo las únicas variaciones: el ángulo inicial y la longitud del vástago. Con los datos de esta tabla se genera el patrón geométrico (layout) correspondiente para poder ser fabricados siguiendo el procedimiento descrito en [2].

Conocer las propiedades del material con que se fabrican los actuadores es de suma importancia cuando se quiere obtener una respuesta más aproximada a la realidad al utilizar un modelo determinado, por ello en la Tabla 2.2 se presentan las propiedades del material (polisilicio) que se utilizaron en el desarrollo de este trabajo.

Los datos de la Tabla 2.2 han sido obtenidos de diversas fuentes [25, 26], con excepción del esfuerzo residual y la conductividad eléctrica que se obtuvieron experimentalmente en [2].

Tabla 2.1 Dimensiones de los actuadores fabricados.

Características	Tipo 1	Tipo 2	Tipo 3
Número de brazos	8	16	16
Angulo	10	10	6
Espesor (μm)	2.5	2.5	2.5
Longitud del brazo (μm)	300	300	300
Ancho del brazo (μm)	5	5	5
Separación entre brazos (μm)	25	25	25
Longitud del Vástago (μm)	96	217	240
Ancho del Vástago (μm)	18	18	18

Tabla 2.2 Propiedades físicas del Polisilicio (material estructural de los actuadores).

Propiedades del Material	Valor	Unidades
Módulo de Young	162	GPa
Densidad	2.33e-15	Kg/ μm^3
Esfuerzo Residual	-10	MPa
TCE	2.8e-6	1/K
Conductividad Térmica	3.3e+7	pW/ μmK
Calor Específico	713	J/KgK
Conductividad Eléctrica	0.1	S/ μm
Temperatura de Fusión	1688	K

2.2. Modelo Analítico

El modelo analítico es una forma rápida y eficiente de obtener una aproximación del comportamiento de una estructura cuando se utiliza el modelo adecuado. Un actuador tipo chevron se puede visualizar como una figura geométrica, en donde los brazos, el vástago, y la horizontal formada por esos dos componentes representan las aristas de la estructura. De la Fig. 2.1, fácilmente se observa que tomando en cuenta la mitad del actuador se forma un triángulo rectángulo en donde cualquier cambio de dimensiones será regido por el teorema de Pitágoras y las leyes de los triángulos. Así, el análisis de un actuador tipo chevron simétrico, es una tarea relativamente sencilla.

2.2.1. Desplazamiento Generado

Considerando al actuador como una figura geométrica 2-D, a continuación se analizará su comportamiento. En la Fig. 2.1 se observa el esquema geométrico utilizado donde sólo es necesario modelar uno de los brazos del actuador (siempre que el diseño sea simétrico) de longitud L formando un ángulo inicial θ respecto a la horizontal x , y formando una distancia y del extremo del brazo a la horizontal. Cuando las terminales (extremos de los brazos) del actuador se energizan con determinado potencial se generará un incremento en la longitud del brazo ΔL debido al efecto Joule, y el actuador generará un desplazamiento Δy perpendicular a la horizontal.

Observando el esquema se deduce, por simple trigonometría, el desplazamiento en la ecuación (2.1). Todos los términos de esta ecuación son conocidos dependiendo del diseño, con excepción de ΔL .

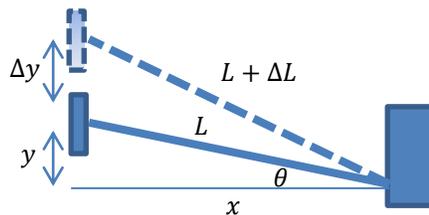


Fig. 2.1 Esquema del actuador tipo chevron utilizado para el modelo analítico.

$$\Delta y = \sqrt{(L + \Delta L)^2 - x^2} - y. \quad (2.1)$$

El incremento ΔL es una elongación que se obtiene de la ecuación de expansión térmica lineal:

$$\Delta L = L \alpha \Delta T, \quad (2.2)$$

donde el coeficiente de expansión térmica lineal α depende del material utilizado, y ΔT representa la variación de temperatura de la cual se hablará en la siguiente sección.

2.2.2. Variación y Distribución de la Temperatura

Para el modelado del actuador, es importante y necesario conocer también la temperatura que existe en la estructura, ya que es un parámetro que depende de la posición y del tiempo. Como se sabe, el calor generado en un material por el cual circula una corriente eléctrica viene dado por el cuadrado del voltaje entre la resistencia eléctrica del material. En otras palabras, cuando circula una corriente eléctrica por un material los electrones inyectados por la fuente de alimentación colisionan con los átomos del material transfiriéndoles energía en forma de calor [27, 28]. Esa es la única fuente de calor de nuestro actuador y produce un cambio de temperatura en el material. La magnitud de la temperatura no es la misma a lo largo de la estructura, debido a los modos de transferencia de calor: conducción, convección y radiación; lo que provoca que en diversas regiones del actuador se encuentren sumideros de temperatura. Existen trabajos sobre el análisis térmico de estos actuadores [8, 15, 16, 29], donde se ataca el problema en diversos caminos. Entre ellos, se encuentran trabajos similares sobre la distribución de temperatura. Algunos requieren de estructuras específicas para realizar mediciones experimentales, las cuales se incluyen dentro del modelo, por lo que este tipo de modelos no serán de utilidad para el presente trabajo. Pensando en utilizar un modelo sencillo que brindara una mejor información sobre los fenómenos físicos que existen en la estructura del actuador, se eligió el modelo presentado en [8] donde se considera el flujo de calor longitudinal, las pérdidas de calor en el perímetro, la generación de calor debida a la corriente y la masa térmica. De esta forma, la ecuación

que rige el cambio de temperatura a lo largo del i -ésimo brazo [8], está dada como:

$$\frac{\partial T_i(x)}{\partial t} = \frac{k_{poly}}{C_{poly} \rho} \frac{\partial^2 T_i}{\partial x^2} - \frac{k_{aire} P_i / 2}{C_{poly} \rho A_i \Delta z} (T_i - T_\infty) + \frac{V_i^2 / R_i}{C_{poly} \rho A_i L_i}. \quad (2.3)$$

Donde k_{poly} y k_{aire} son la conductividad térmica del polisilicio y del aire, respectivamente; C_{poly} es el calor específico, ρ es la resistividad, Δz es la separación de la estructura suspendida respecto del sustrato, P_i , A_i , R_i , V_i y T_i son el perímetro, el área de sección transversal, la resistencia, el voltaje y la temperatura respectivamente, en uno de los brazos del actuador; T_∞ es la temperatura del ambiente en el que se encuentre el actuador.

Despreciando el término dependiente del tiempo en la ecuación (2.3), se puede encontrar una expresión para la variación de la temperatura con respecto a la posición, resultando en la siguiente ecuación diferencial de segundo orden:

$$\frac{\partial^2 T_i}{\partial x^2} = \frac{k_{aire} P_i / 2}{k_{poly} A_i \Delta z} (T_i - T_\infty) - \frac{V_i^2 / R_i}{k_{poly} A_i L_i}. \quad (2.4)$$

Para una mejor manipulación de esta ecuación se realizó el cambio de variable $A = \frac{k_{aire} P_i / 2}{k_{poly} A_i \Delta z}$ y $B = \frac{V_i^2 / R_i}{k_{poly} A_i L_i}$, obteniéndose la siguiente solución general:

$$\Delta T(x) = C1 \cosh(\sqrt{A} x) + C2 \sinh(\sqrt{A} x) + \frac{B}{A}. \quad (2.5)$$

La ecuación (2.5) requiere ser evaluada con las condiciones de frontera específicas, para que se encuentre una solución completa y obtener la temperatura a lo largo del brazo del actuador.

2.2.2.1. Condiciones de Frontera

Es importante analizar la estructura del actuador de tal forma que el modelo represente correctamente las condiciones de frontera de una mejor manera. Ya que interesa la distribución de temperatura a lo largo del actuador, la o las consideraciones a tomar en cuenta son los sumideros de temperatura y las regiones que no presenten un calentamiento debido a su baja resistencia al flujo de corriente. Por lo general, las regiones de sumidero de temperatura las constituyen los contactos que se encuentran anclados al sustrato (extremos de los brazos L y $-L$). Son considerados sumideros de temperatura porque la resistencia eléctrica que presentan ante el flujo de corriente es muy pequeña y al tener una superficie mayor en contacto directo con el sustrato hay una transferencia de energía mayor que la que se genera en esa región. También, dependiendo del diseño del actuador, se pueden presentar regiones que no estén ancladas al sustrato en donde la generación de calor por efecto Joule sea menor, debido a que el área transversal presenta una menor resistencia eléctrica ante el flujo de corriente. Esto es muy común en los actuadores de brazo caliente y brazo frío (Bimorfos [30]). El brazo frío debe su nombre a sus dimensiones de mayor tamaño en comparación con el brazo caliente, ya que el brazo caliente es más estrecho que el brazo frío, al circular una corriente a través del actuador se genera una alta densidad de corriente provocando una mayor expansión debido al calor generado. Esta característica se puede encontrar en los chevron cuando el vástago es diseñado con una sección transversal lo suficientemente amplia, y la relación entre el ancho del vástago y el ancho del brazo es mayor para obtener una disipación de energía tan grande como el diseño lo requiera.

A continuación se presentan los diferentes casos:

- a) $\Delta T(L)=0$ y $\Delta T(-L)=0$: Este es el caso ideal cuando el vástago no existe (Fig. 2.2). Cuando se evalúa la ecuación (2.4) con estas condiciones de frontera, la solución es la siguiente:

$$\Delta T(x) = \frac{B}{A} - \frac{B \cosh(\sqrt{A} x)}{A \cosh(\sqrt{A} L)}, \quad (2.6)$$

la cual permite generar un perfil de temperatura a lo largo del brazo como el que se presenta en la Fig. 2.2. Se observa que la máxima temperatura se obtiene al centro del actuador, mientras que en las regiones de los contactos (sumideros), la diferencia de temperatura es nula.

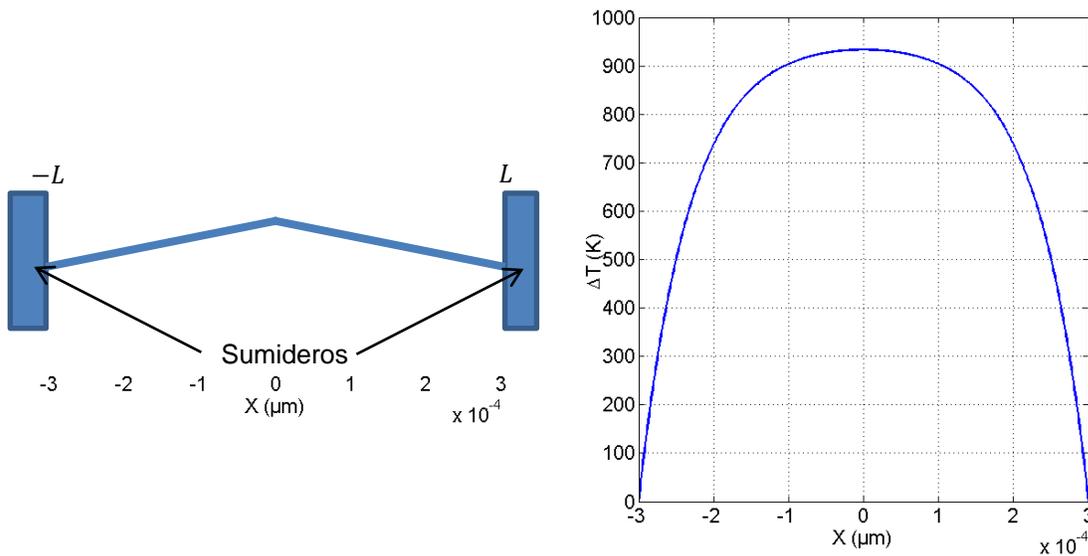


Fig. 2.2 Esquema de un chevron con ausencia del vástago y el perfil térmico que genera cuando se energiza con 5 volts.

- b) $\Delta T(L) = 0$ y $\Delta T(0) = 0$: Con estas condiciones de frontera se indica que existe una región entre cada brazo donde no se genera ningún
-

cambio de temperatura, es decir, el vástago es de dimensiones grandes en comparación con los brazos. Cuando la ecuación (2.4) se resuelve con estas condiciones iniciales se obtiene el perfil de temperatura mostrado en la Fig. 2.3, y la solución queda de la siguiente forma:

$$\Delta T(x) = B(e^{\sqrt{A}x} - 1)(e^{\sqrt{A}L} - e^{\sqrt{A}x}) / A(e^{\sqrt{A}x})(e^{\sqrt{A}L} + 1). \quad (2.7)$$

Ahora se observa en el perfil de temperatura generado que a la mitad del brazo se encuentra un máximo de temperatura, y que tanto al inicio como al final del mismo se encuentra una diferencia de temperatura igual a cero.

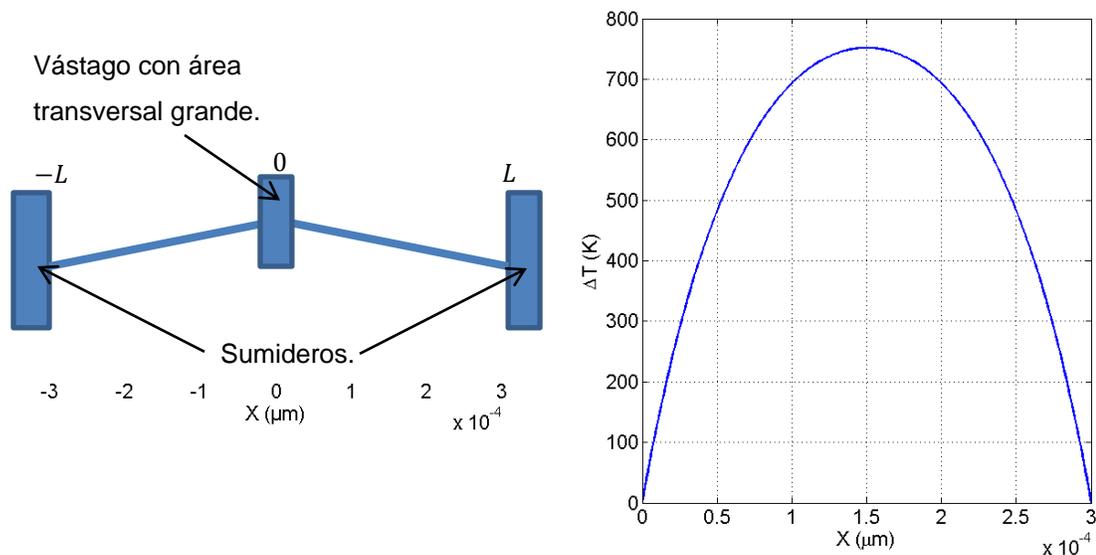


Fig. 2.3 Esquema y perfil térmico de un chevron con vástago que presenta un área grande perpendicular al flujo de corriente.

Con lo anterior se consiguió obtener un perfil de temperatura a lo largo de la estructura para entender la forma en que ésta se distribuye. Sin embargo, aún es necesario realizar un mayor análisis para la ecuación (2.2)

que requiere de una variación de temperatura ΔT , igual a la diferencia entre la temperatura final T_F y la temperatura inicial T_I . Dado que en el brazo del actuador se presenta una temperatura diferente dependiendo de la posición, entonces en la ecuación (2.5) previamente resuelta, debe realizarse la integral de la temperatura a lo largo de la longitud del brazo con las condiciones de frontera adecuadas. En las ecuaciones (2.8) y (2.9) se presentan los resultados de integrar las ecuaciones (2.6) y (2.7), respectivamente.

$$\Delta T = \left[1 - \frac{\tanh(\sqrt{A} L)}{\sqrt{A} L} \right] \frac{B}{A}. \quad (2.8)$$

$$\Delta T = \left[\frac{e^{\sqrt{A} L}(\sqrt{A} L - 2) + \sqrt{A} L + 2}{\sqrt{A} L (e^{\sqrt{A} L} + 1)} \right] \frac{B}{A}. \quad (2.9)$$

Con este procedimiento se obtendrá un promedio de temperatura en el brazo del actuador, el cual se utilizará para conocer el desplazamiento que genera el chevron.

2.2.3. Fuerza

Para poder realizar el análisis de la fuerza que ejerce una estructura se tiene que partir de los fenómenos físicos que la originan.

Sea una barra del mismo material con el que se fabrican los actuadores (polisilicio), de longitud L y sección transversal A (representando el brazo del actuador), la cual sufre una deformación en una sola dimensión (lineal) como se muestra en la Fig. 2.4. Tomando en cuenta que el módulo de Young E relaciona el esfuerzo y la deformación en un material [25] se tiene la ecuación (2.10), donde la deformación $\varepsilon = \Delta L/L$ y el esfuerzo $\sigma = F/A$

(tensión axial ya que se considera que la deformación es lineal), permitirán encontrar la fuerza que se genera en un brazo del actuador.

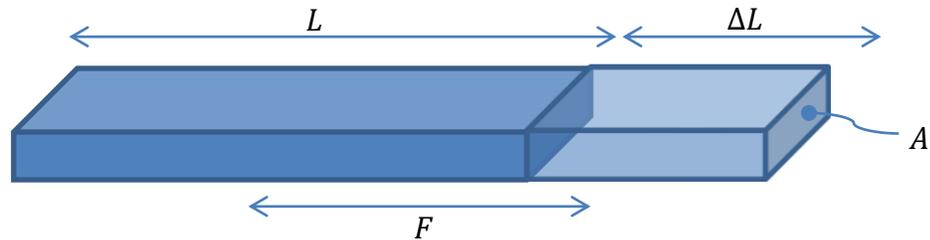


Fig. 2.4 Esquema de una barra de polisilicio que sufre una deformación lineal (exagerada) y genera una fuerza en dirección de la deformación.

$$E = \frac{\sigma}{\varepsilon} = \frac{F/A}{\Delta L/L}. \quad (2.10)$$

Despejando el término de fuerza de la ecuación (2.10) y utilizando la ecuación (2.2) se obtiene una expresión más completa (ecuación 2.11) que depende únicamente de la variación de temperatura que se obtuvo previamente en las ecuaciones (2.8) y (2.9).

$$F = \frac{E \Delta L A}{L} = E \alpha \Delta T A. \quad (2.11)$$

Esta ecuación forma parte de la solución para conocer la fuerza total en este tipo de actuadores, ya que solamente se necesita conocer las dimensiones y propiedades del material, e introducir la variación de temperatura, bien obtenida mediante mediciones, cálculos u aproximaciones. Mediante la ecuación (2.11) se obtiene la fuerza que genera un solo brazo del actuador (misma que se muestra en la Fig. 2.4), por lo que se debe considerar el esquema presentado en la Fig. 2.5 para hacer una aproximación de la fuerza total en el actuador. La fuerza total es la fuerza que el actuador necesita para generar un movimiento, incluyendo la fuerza

que puede aplicar a un objeto o superficie que se interponga en la trayectoria de su movimiento.

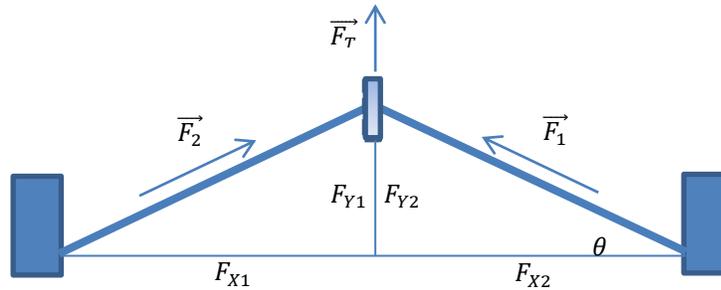


Fig. 2.5 Esquema de un chevron seccionado para aproximar la fuerza total F_T en el actuador.

Si se considera un actuador simétrico, existirán fuerzas encontradas \vec{F}_1 y \vec{F}_2 , en la estructura del actuador, que dependiendo del ángulo inicial θ resultará en una fuerza \vec{F}_T la cual desplazará al actuador dependiendo de la magnitud de la fuerza. Ya que idealmente las componentes en x se anulan, siempre y cuando las características de los brazos sean idénticas, la fuerza total es la suma de las componentes en y . Descomponiendo las fuerzas en sus componentes cartesianos y realizando la suma algebraica, se tiene:

$$\vec{F}_1 = (F_{X1}, F_{Y1}) , \vec{F}_2 = (F_{X2}, F_{Y2}) , \quad (2.11)$$

$$F_X = F \cos(\theta_F) , F_Y = F \sin(\theta_F), \quad (2.12)$$

$$\vec{F}_T = \vec{F}_1 + \vec{F}_2 = F_{X1} - F_{X2}, F_{Y1} + F_{Y2} . \quad (2.13)$$

Considerando que el actuador es completamente simétrico y que $F_{Y1} = F_{Y2}$:

$$\vec{F}_T = N 2 F \sin(\theta_F). \quad (2.14)$$

La ecuación (2.14) es la necesaria para conocer la fuerza total en el actuador, donde N representa el número de pares de brazos que conforman al actuador, F es la fuerza que se obtiene de la ecuación (2.10) y θ_F es el ángulo que depende del desplazamiento generado por el actuador:

$$\theta_F = \sin^{-1} \left(\frac{y + \Delta y}{L + \Delta L} \right). \quad (2.15)$$

2.2.4. Variación de Parámetros y Características del Actuador

Se realizó la variación de ciertos parámetros y características para entender el comportamiento del actuador cuando estas cambian. Esto con el fin de poder realizar un diseño óptimo para alguna aplicación determinada. Para cada parámetro se eligió un valor nominal sobre el cual se realizó la variación en un determinado porcentaje con el fin de identificar posibles variaciones en el proceso que afecten las propiedades de los materiales y por ende el desempeño del actuador. El porcentaje de variación del ángulo de grabado y la resistividad se consideraron de acuerdo con [2], en donde se describe el proceso PolyMEMS V-B. La conductividad térmica, que depende de la estructura del material, y el coeficiente de expansión térmica se variaron en un amplio rango [25, 26], ya que no existen datos experimentales del proceso. El módulo de Young es un caso particular ya que se puede aplicar cualquier valor en el rango que presenta (de 150 a 170 GPa que es un rango de valores obtenidos comúnmente en MEMS), y dado que no se tiene una referencia del material fabricado se observó el comportamiento. Las características del actuador como lo son el ancho del brazo, la longitud del brazo, el espesor entre otras, se eligieron principalmente por cuestiones de diseño, y su rango de variación fue determinado cualitativamente.

2.3. Modelo de Simulación

CoventorWare es el software utilizado en el presente trabajo para desarrollar el modelo de simulación del actuador tipo chevron. Al igual que el modelo analítico, brindará información sobre el comportamiento del actuador y al mismo tiempo se podrán observar los resultados de la simulación en un modelo tridimensional que representará una aproximación al comportamiento real. Los pasos detallados sobre el correcto modelado de un actuador de efecto Joule se presentan en el Apéndice A. En la Fig. 2.6 se muestra el modelo de simulación de un actuador tipo chevron indicando las superficies debidamente nombradas para poder ser utilizadas en la interface del simulador.

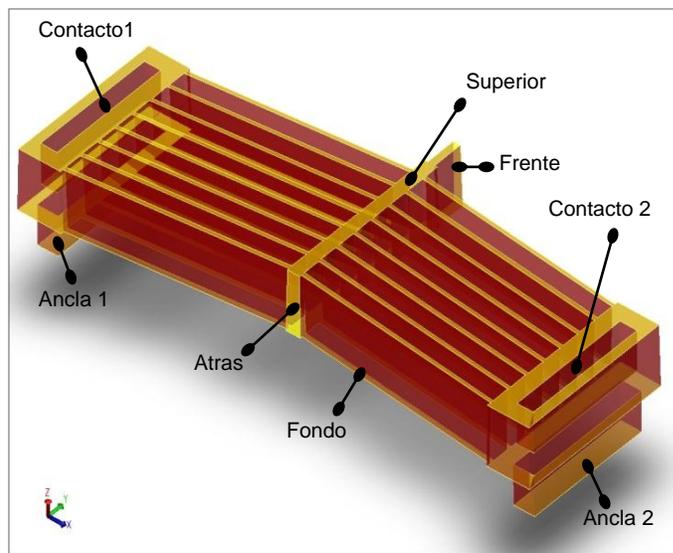


Fig. 2.6 Modelo de simulación de un chevron tipo 3 con las superficies nombradas para su posterior utilización al determinar condiciones de frontera.

Conocer el comportamiento del actuador es una tarea necesaria cuando se desea realizar un diseño en particular. En ocasiones no se dispone de los instrumentos de medición adecuados para obtener los parámetros de los actuadores, por lo que la utilización de modelos de

simulación se vuelve una herramienta muy útil. Por medio de simulación se puede conocer a priori el comportamiento del actuador y comparar con datos experimentales, para obtener una aproximación de los parámetros necesarios de diversas configuraciones de un actuador.

2.3.1. Desplazamiento y Temperatura

Una de las ventajas que se tienen cuando se utiliza un modelo de simulación es que una vez desarrollado el modelo basta con definir las condiciones iniciales para obtener una respuesta del posible comportamiento del actuador. Para conocer el desplazamiento generado, basta con definir una diferencia de potencial entre las terminales del actuador, como si se tratase de una medición experimental, y definir las condiciones de frontera que indiquen el funcionamiento del actuador, las cuales pueden ser: pérdidas de temperatura, superficies ancladas, entre otras. Para que el software simule el desplazamiento del actuador requiere primero calcular la temperatura generada, por lo que con una sola simulación se obtienen ambos datos. En la Fig. 2.7 se muestra la ventana del software utilizada con las condiciones iniciales consideradas. La última fila de la Fig. 2.7 indica el modo de pérdidas de temperatura que debe sufrir la estructura. Estas consideraciones se detallan en el Apéndice B.

El voltaje aplicado se puede definir con los incrementos necesarios para un análisis determinado. Para este caso particular se usaron incrementos de un volt. Esta forma de definir una simulación es en cierta forma como realizar una medición experimental, ya que es análogo a tener el actuador fabricado. Por ello, cuando se aplica un potencial al actuador, el simulador interpreta todos los fenómenos físicos que se han definido con anterioridad, dependiendo fuertemente de las propiedades físicas del material, las cuales también se detallan en el Apéndice A.

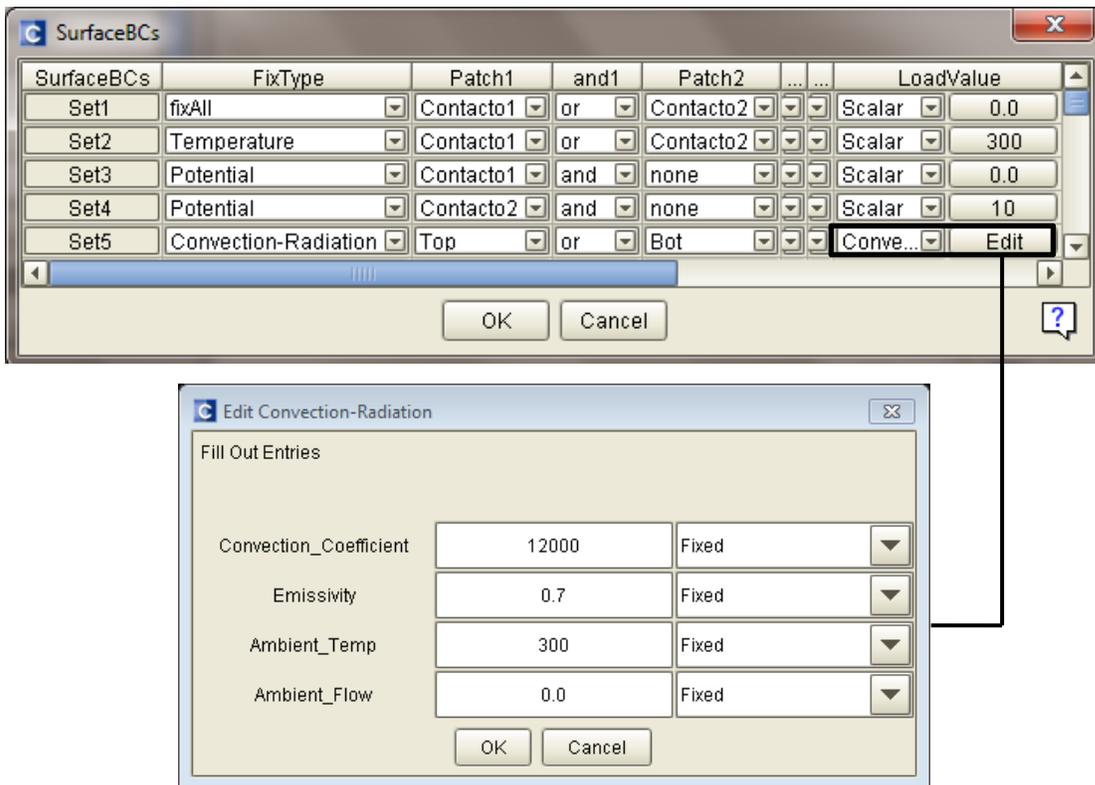


Fig. 2.7 Condiciones iniciales para obtener la temperatura y el desplazamiento generado.

2.3.2. Fuerza Total

En esta etapa de simulación se obtendrá la fuerza que existe en el actuador, que será la fuerza que se obtuvo en la sección 2.2.3. Para tal efecto es necesario especificar las condiciones del análisis, que en esta ocasión es termo-mecánico, y las cuales se muestran en la Fig. 2.8. Se observa que para obtener la fuerza total, el actuador debe mantenerse en reposo (sin energizar) y aplicar una fuerza incremental en la parte posterior del vástago para obtener un desplazamiento debido a esa fuerza. La fuerza debe definirse en dirección negativa sobre el eje Y. De esta forma se obtendrán datos de fuerza contra desplazamiento, los cuales se analizan junto con los datos de desplazamiento contra voltaje con el fin de obtener una relación que brinde información más fácil de visualizar: fuerza contra voltaje. El concepto

de fuerza total es explicado en el término fuerza de retorno (“backforce”) en [5] y se refiere a la fuerza que existe en el actuador a un determinado desplazamiento. Para la simulación se realizaron incrementos en la fuerza de 100 μ N hasta alcanzar un determinado desplazamiento del actuador.

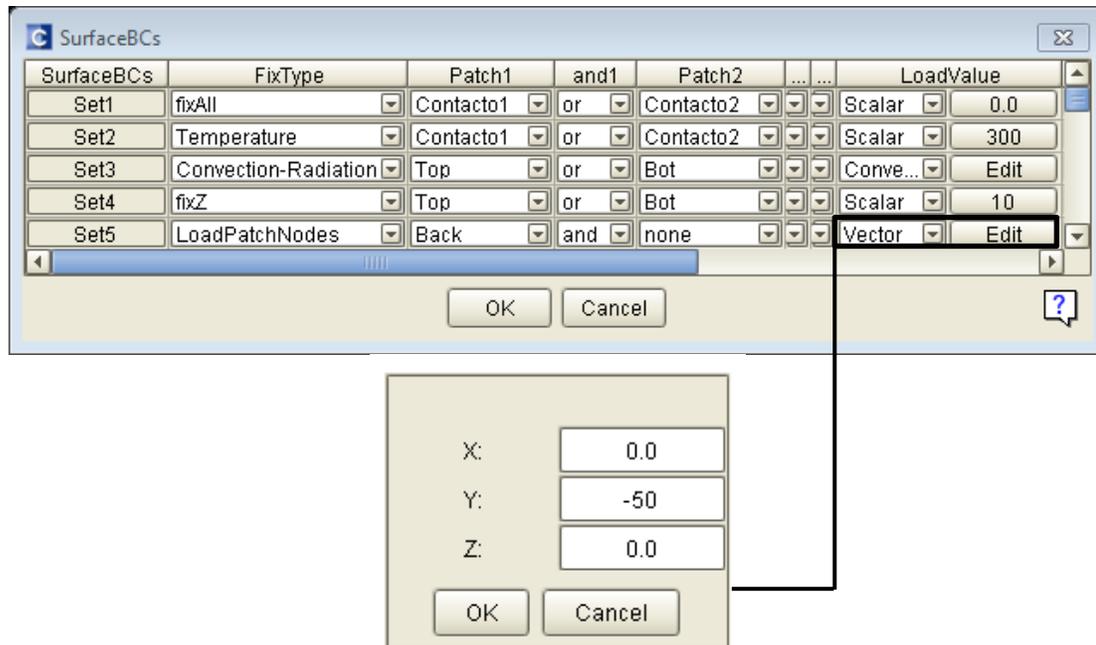


Fig. 2.8 Condiciones iniciales para el cálculo de la fuerza total.

2.3.3. Fuerza de Empuje

Cuando el actuador hace contacto con alguna superficie, ejercerá cierta fuerza que intentará desplazar o deformar esa superficie que se interpone. Sin embargo la fuerza total, obtenida anteriormente, no brinda esta información, ya que la fuerza de empuje depende de la distancia inicial que exista entre el actuador y la superficie. Es por ello que se requiere del software de simulación para conocer una aproximación de la fuerza de empuje. El procedimiento de simulación se presenta a continuación:

- 1) El actuador debe energizarse para generar un desplazamiento determinado.
- 2) Aplicar una fuerza incremental en la parte frontal del vástago y anotar el desplazamiento que existe en el actuador con la fuerza aplicada.
- 3) Conforme se incremente la fuerza el actuador comenzará a perder desplazamiento y se obtendrá la fuerza máxima cuando la fuerza aplicada provoque que el actuador regrese a su posición en reposo (cero desplazamiento).

En la Fig. 2.9 se muestran las condiciones iniciales necesarias en un análisis electro-termo-mecánico para conocer la fuerza de empuje del actuador. En este caso la fuerza definida debe ir en dirección positiva sobre el eje Y (caso contrario de la Fig. 2.8).

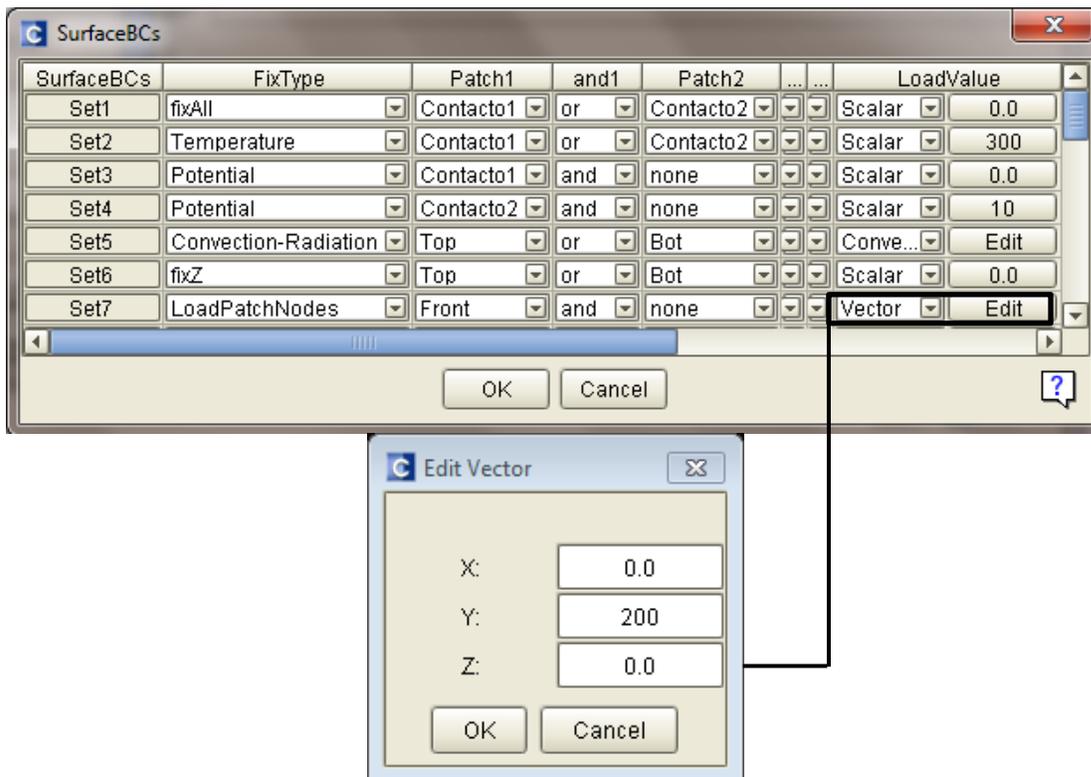


Fig. 2.9 Condiciones iniciales para el cálculo de la fuerza de empuje.

La fuerza obtenida brinda una idea de la fuerza que puede ejercer el actuador a una superficie, y por ello se determinó un incremento de $200\mu\text{N}$, ya que generalmente estos actuadores presentan grandes fuerzas del orden de miliNewtons (mN). Esta configuración permitirá un análisis más rápido y con un menor consumo de CPU.

2.3.4. Comportamiento de Actuadores en Cascada

Si se analiza la expresión para el desplazamiento de un actuador (ecuación (2.1)), se observa que en ningún momento se hace mención del número de brazos en el actuador, por lo que se considera que idealmente el número de brazos no influye en el desplazamiento generado; sin embargo, sí influye directamente en la fuerza que el actuador pueda generar (ecuación 2.14). Por esta razón se consideró un par de brazos como modelo base, donde cada brazo tiene una longitud de $300\mu\text{m}$ de largo, $5\mu\text{m}$ de ancho y $3\mu\text{m}$ de espesor, además de que cada brazo tiene un ángulo inicial de 6 grados. Estas características son similares a las que se utilizan en los actuadores de la Tabla 2.1 con el fin de utilizar los resultados de este análisis para aportar mayor información sobre los actuadores fabricados. En la Fig. 2.10 se presentan las diversas configuraciones simuladas que van desde uno a cinco pares de brazos conectados en cascada. El vástago se diseñó con un ancho de $5\mu\text{m}$ y una longitud de $30\mu\text{m}$ ($12.5\mu\text{m}$ delante y atrás) para cada par de brazos; la separación entra cada par de brazos fue entonces de $25\mu\text{m}$. De las configuraciones mostradas se obtuvo el desplazamiento, la temperatura y la fuerza que presentan. Se espera que todas las configuraciones tengan el mismo desplazamiento y la misma temperatura, y que la fuerza sea en múltiplos del modelo base conforme al número de pares de brazos en cascada.

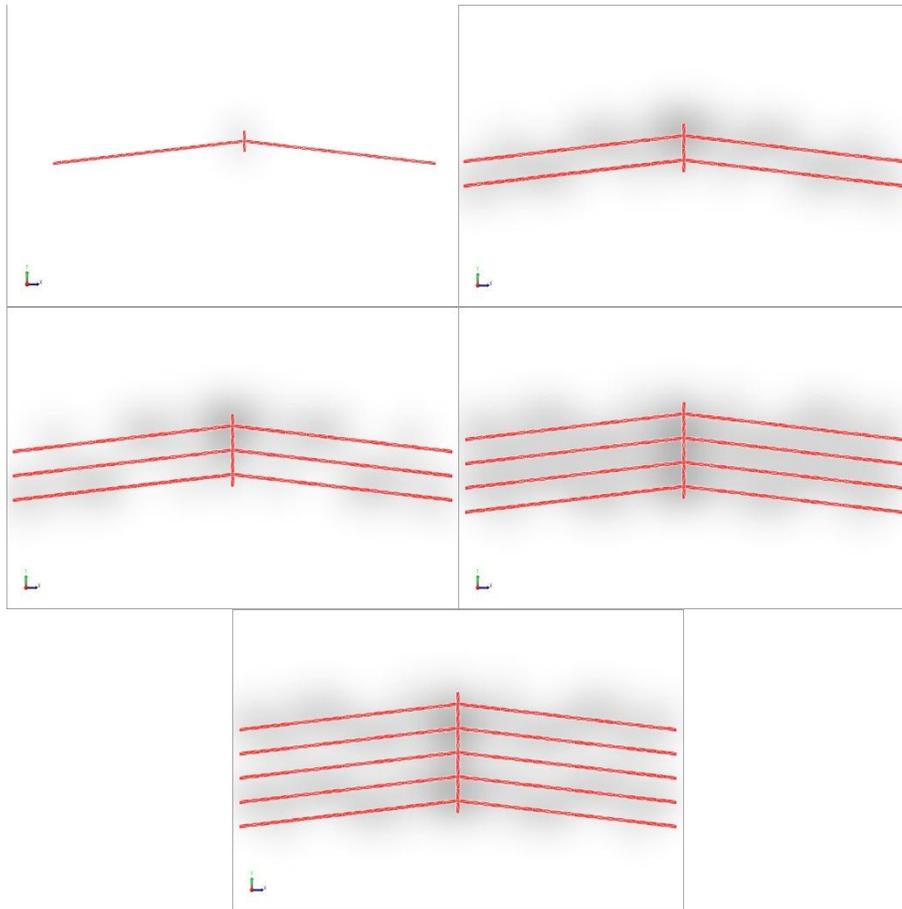


Fig. 2.10 Configuraciones utilizadas para analizar el comportamiento de actuadores tipo chevron en cascada.

2.3.5. Influencia del Vástago

Para conocer la influencia mecánica de las dimensiones del vástago se procedió a simular un vástago conectado a dos brazos de 300µm de longitud desviados un ángulo inicial de seis grados. Primero se fijó la longitud y se realizó una variación del ancho. Después se fijó el ancho y se realizó la variación de la longitud. Se espera que el actuador se comporte de acuerdo a la ecuación (2.16) que representa la resistencia de una barra sólida.

$$R = \frac{\rho L}{A}. \quad (2.16)$$

En la Fig. 2.11 se muestra el esquema del chevron indicando la nomenclatura utilizada para cada parte del actuador. La determinación de los nombres para cada parte de la estructura fue de acuerdo con el flujo de corriente (para los brazos) considerando el área de la sección transversal al flujo de corriente.

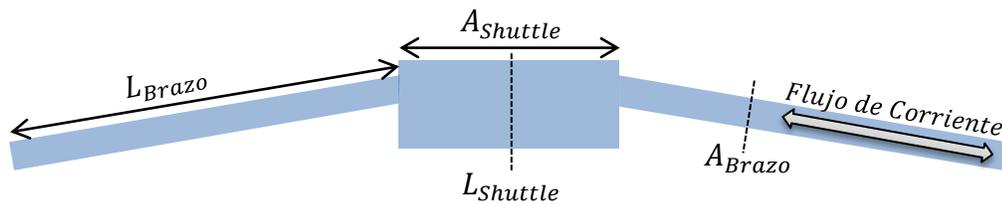


Fig. 2.11 Esquema de un chevron utilizado para el análisis del vástago.

Variación del Ancho del Vástago

Se determinó que la longitud del vástago fuera una aproximación de los actuadores fabricados. Se utilizó un par de brazos conectados mediante un vástago de $30\mu\text{m}$ de longitud (similar a la sección 2.3.4), y se realizaron simulaciones que van desde $1\mu\text{m}$ hasta $80\mu\text{m}$ de ancho en el vástago, considerando que las únicas funciones que realiza es la de mantener unidos a los brazos asegurando una dirección de desplazamiento, y proporcionar una superficie para el contacto físico con otras superficies. Se realizó la simulación del desplazamiento, temperatura y fuerza para cada configuración mostrada en la Fig. 2.12, donde además se puede apreciar la distribución de temperatura que existe en las estructuras. Se puede observar que la temperatura en el vástago es menor conforme aumenta de dimensiones y es debido a que un ancho mayor representa una menor resistencia al flujo de corriente que circula a través de él, ya que el área de sección transversal se vuelve mucho mayor en el vástago que en los brazos. Con esto, el calor

generado en el vástago es menor y la temperatura del material también lo es, funcionando al mismo tiempo como un sumidero de temperatura, en donde al existir una diferencia de temperatura entre el vástago y los brazos, existe una transferencia de calor mayor, lo que provoca que la temperatura de los brazos disminuya conforme el vástago sea de mayores dimensiones [28]. También es importante observar que conforme el vástago es más ancho, la temperatura máxima se concentra hacia el centro de los brazos.

Variación de la Longitud del Vástago

Se realizaron simulaciones variando la longitud del vástago dejando el ancho en un valor fijo de $18\mu\text{m}$, ya que es la longitud con la que se diseñaron los actuadores de la tabla 2.1. Las configuraciones utilizadas se muestran en la Fig. 2.13 en donde se observa que la longitud se varió desde $5\mu\text{m}$ hasta $85\mu\text{m}$. De igual forma se simularon las configuraciones presentadas en la Fig. 2.13 variando la longitud del vástago para obtener el desplazamiento generado, la temperatura y la fuerza. Se observa que del mismo modo que al variar el ancho del vástago, en cada configuración exista una variación en el desempeño debido al efecto electro-térmico que representa modificar las dimensiones del vástago. Cuando se realizó la variación del ancho del vástago se explicó el porqué del cambio de temperatura al aumentar las dimensiones, y en este caso, al variar la longitud del vástago, también se presenta el mismo comportamiento.

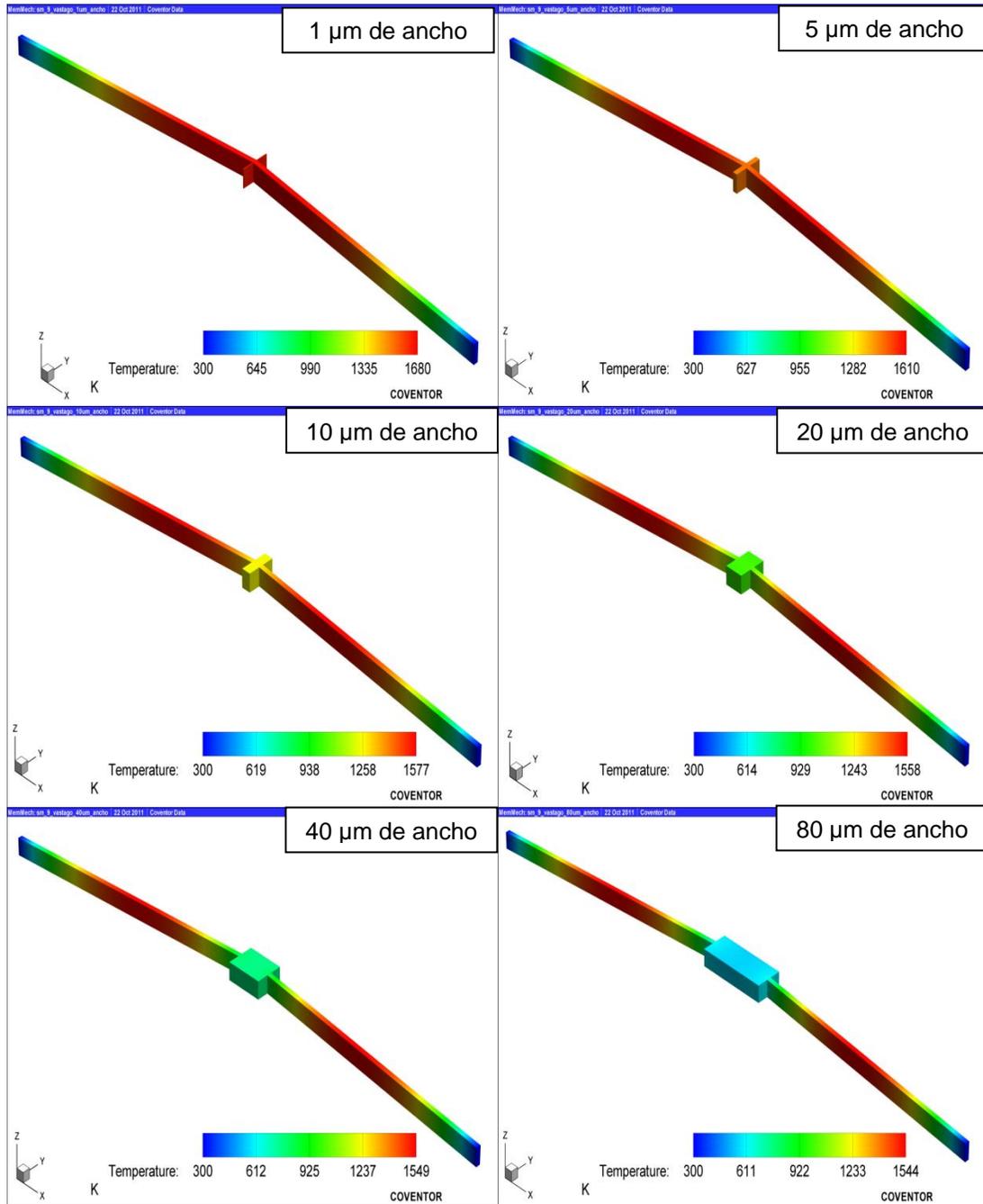


Fig. 2.12 Modelo 3D mostrando la distribución de temperatura de las configuraciones, en función del ancho del vástago, cuando se aplican 10 volts.

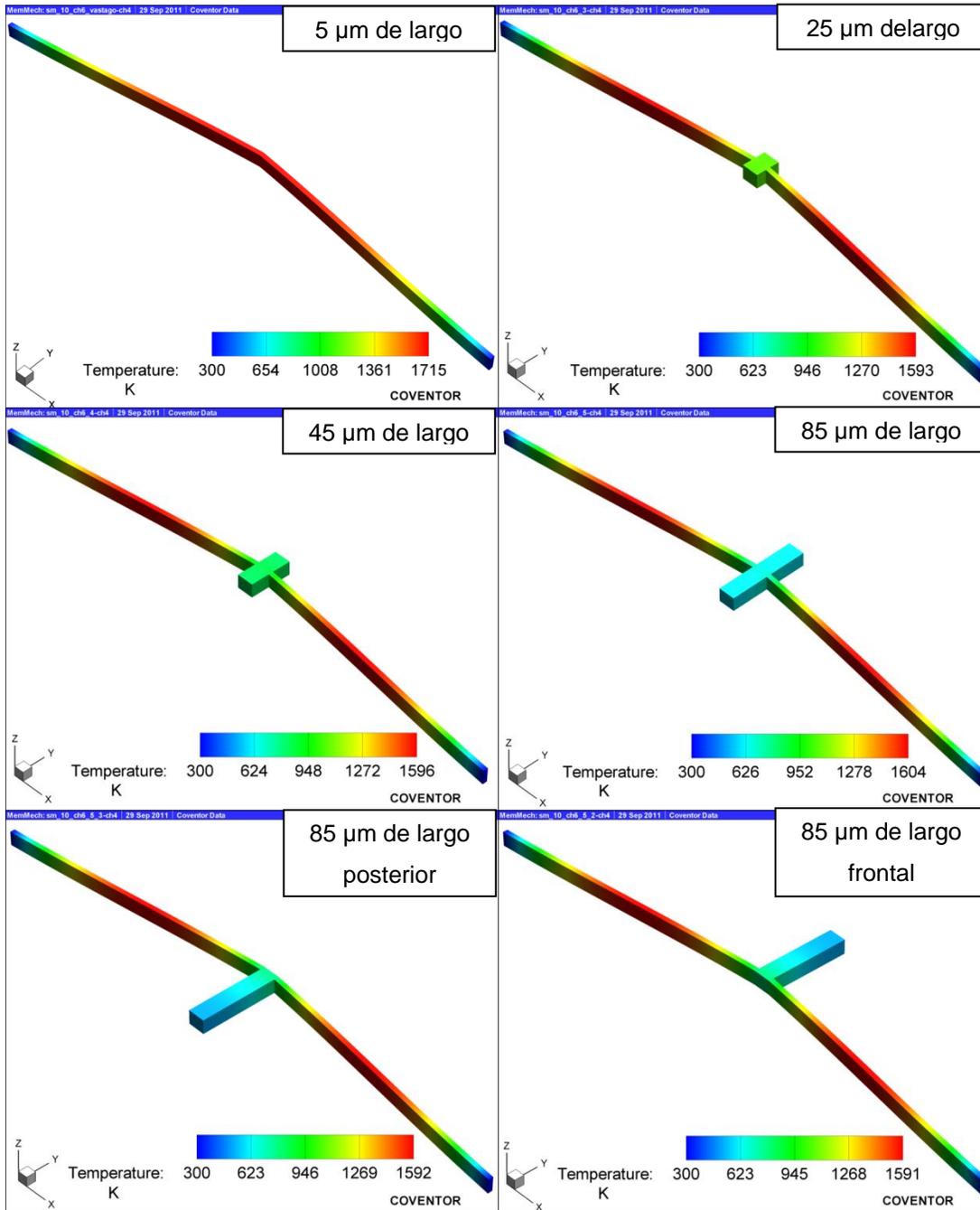


Fig. 2.13 Modelo 3D de las diferentes configuraciones variando la longitud del vástago. Los actuadores se energizaron con 10 volts y se muestra su distribución de temperatura.

2.3.6. Simulación de los Actuadores Fabricados en el INAOE

Esta sección corresponde la simulación del comportamiento de los actuadores fabricados en el INAOE descritos en la tabla 2.1 y considerando las propiedades de los materiales (tabla 2.2) con los que se fabricaron. También se consideró incluir en el modelo las dimensiones reales de los actuadores, las cuales se detallarán más adelante, para obtener una mejor aproximación con los resultados experimentales. En la Fig. 2.14 se presenta el modelo de simulación y la microfotografía de las estructuras de los actuadores fabricados. Los modelos de simulación muestran dos colores: el rojo es el material estructural polisilicio, y el azul representa el metal depositado para el contacto eléctrico. La obtención de estos modelos se realizó siguiendo los pasos descritos en el Apéndice A, con lo que se observa que los modelos de simulación resultan ser idénticos a los actuadores fabricados.

Con estos modelos se realizaron diferentes simulaciones para obtener el desplazamiento, temperatura y fuerzas en los actuadores. Se utilizó un rango de voltajes pequeño (1 - 10 volts) para obtener el comportamiento del actuador. Este rango de voltaje será aplicado a los actuadores fabricados para tener un punto de comparación, y evitar una posible destrucción debida a corrientes muy altas en sus estructuras, considerando también que la temperatura alcanzada mediante simulaciones resulta alrededor de los 1400 K.

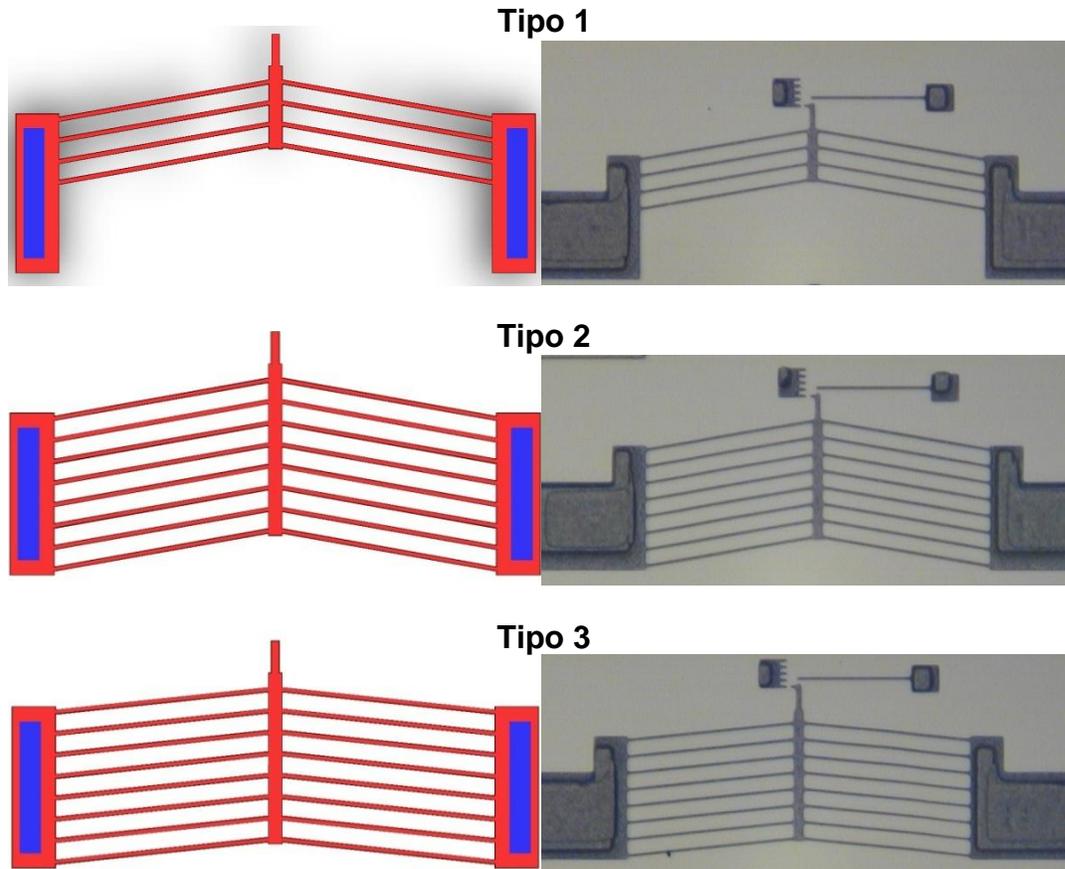


Fig. 2.14 Modelo y microfotografía de los actuadores fabricados donde se observa que el modelo es una réplica de los chevrones existentes.

2.4. Modelo Experimental

Utilizar un modelo experimental es sinónimo de caracterización, ya que las técnicas para obtener el comportamiento del actuador involucran utilizar fuentes de alimentación y técnicas de medición. La caracterización es una técnica empleada para conocer el comportamiento de un dispositivo y su posible optimización, ya sea para alguna aplicación determinada o para comercializar algún sistema. Debido a ello, en el presente trabajo se utilizaron los actuadores fabricados como modelos experimentales que servirán como punto de comparación con los modelos analíticos y simulados.

2.4.1. Chip Fabricado

En la Fig. 2.15 se muestra el patrón geométrico (layout) del circuito integrado de pruebas (chip) etiquetado PolyMems V-B [4] y fabricado, donde se indican las estructuras que se utilizaron durante la caracterización. Es importante señalar que de acuerdo con la tabla 2.1, las estructuras 7 y 8 corresponden al Tipo 2 (8 pares de brazos con un ángulo inicial de 10 grados), los actuadores 9 y 10 corresponden al Tipo 1 (4 pares de brazos con ángulo inicial de 10 grados), y los actuadores 19 y 20 corresponden al Tipo 3 (8 pares de brazos con ángulo inicial de 6 grados).

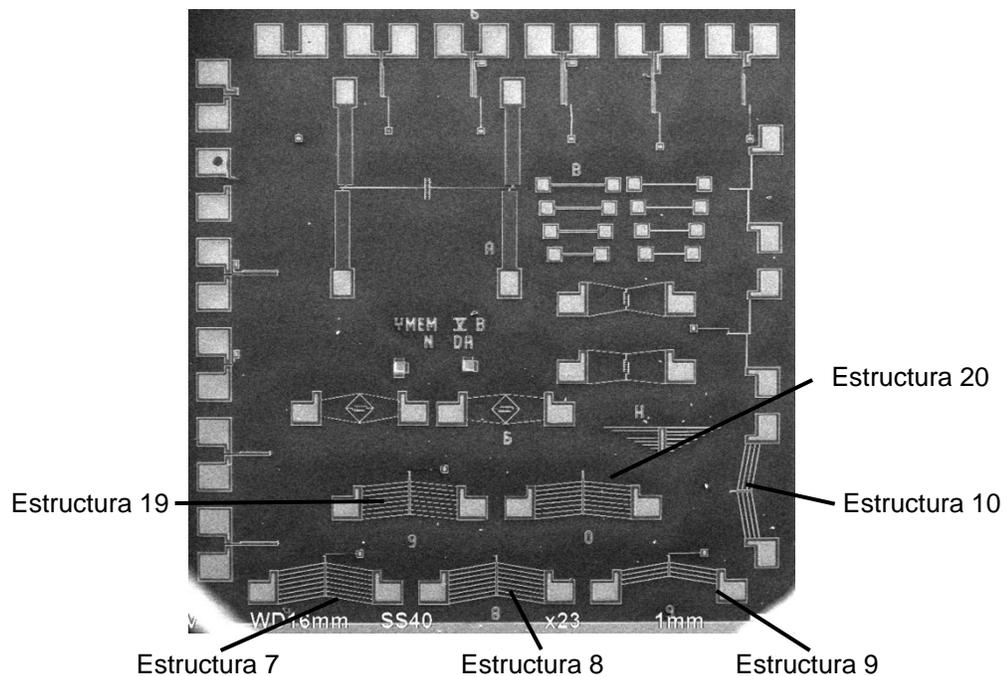


Fig. 2.15 Microfotografía SEM del chip PolyMEMS V-B indicando los chevron fabricados.

2.4.2. Caracterización Geométrica de las Estructuras

Utilizando un microscopio marca “Leitz Orthoplan”, se procedió a medir con la mayor magnificación disponible (100X), las dimensiones de los actuadores de acuerdo a lo detallado en el proceso de fabricación [2]. En [2] se describe que al momento de formar las estructuras mediante el grabado por plasma, se generan paredes con un ángulo de 70° respecto de la horizontal, lo que provoca que la sección transversal de la estructura presente una forma de trapecio, tal como se muestra en la Fig. 2.16 y en donde se indican las dimensiones esperadas.

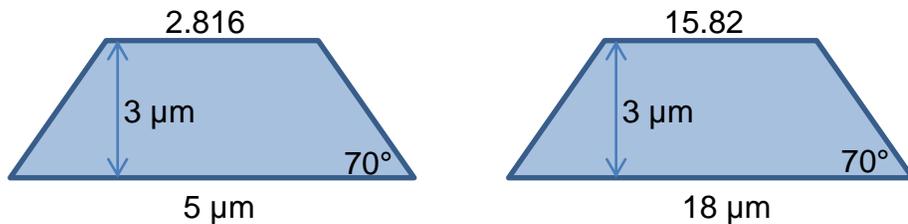


Fig. 2.16 Sección transversal de los brazos del chevron (izquierda) y del vástago (derecha).

En la Fig. 2.17 se muestra el esquema de medición utilizado. Las mediciones se realizaron ópticamente bajo microscopio (orthoplan) con ayuda de una lente graduada, en donde cada segmento de graduación utilizado con la lente de 100X de magnificación brinda la posibilidad de medir dimensiones de $0.5\ \mu\text{m}$. Esa misma dimensión es la incertidumbre que existe al momento de realizar la medición. Al mismo tiempo se capturó una microfotografía con la ayuda de la cámara CCD y se analizó para corroborar las dimensiones, utilizando como referencia las estructuras de mayores dimensiones que es en donde se tiene una incertidumbre menor respecto de las dimensiones de los brazos.

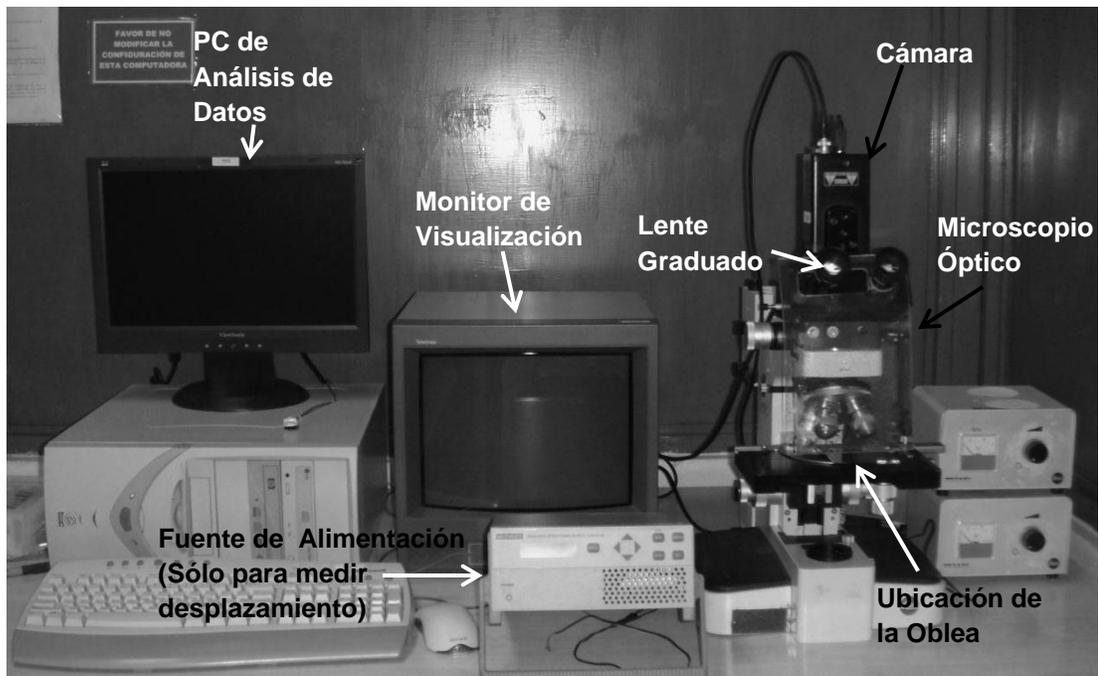


Fig. 2.17 Esquema utilizado para medir la definición de las estructuras.

2.4.3. Mediciones Eléctricas

En el laboratorio de microelectrónica del INAOE se cuenta con el equipo necesario para realizar mediciones eléctricas a los circuitos integrados. Se encuentran disponibles estaciones de prueba manuales, semiautomáticas, fuentes de voltaje/corriente de 4 puntas, software de medición entre otros. Con ayuda de este equipo se procedió a realizar las pruebas de corriente contra voltaje a los actuadores tipo chevron para observar su comportamiento, el cual se espera sea puramente resistivo. Se eligió un rango de voltajes pequeño (± 5 volts) para asegurar que el actuador no sufriera daños físicos (roturas en los brazos, colapsos, etc.). Esta medición se realizó utilizando el esquema presentado en la Fig. 2.18, con el fin de corroborar el contacto eléctrico en el actuador y para diferenciar a los actuadores que funcionan correctamente de aquellos que no funcionan.

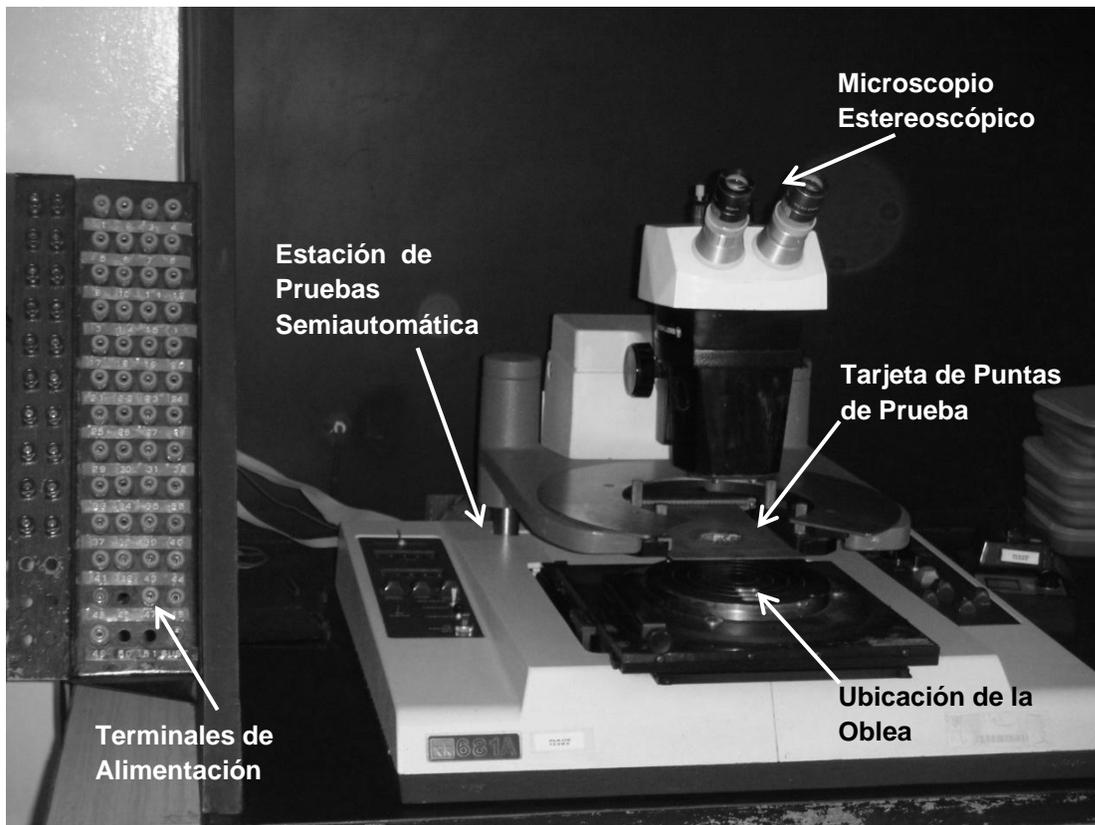


Fig. 2.18 Esquema utilizado para realizar las mediciones eléctricas.

2.4.4. Medición del Desplazamiento Generado

Para medir el desplazamiento que generan los actuadores tipo chevron, los chips se colocaron en placas de circuito impreso (PCB) y se realizó el alambrado procurando que el alambre no formara curvas muy altas para evitar el contacto con el lente del microscopio y así poder energizar al actuador. El esquema de medición es el mismo que el presentado en la Fig. 2.17. En la Fig. 2.19 se muestran formas de alambrado. Una vista general del chip colocado en un PCB, alambrado, y con las conexiones requeridas para energizar los actuadores se presenta en la Fig. 2.20.

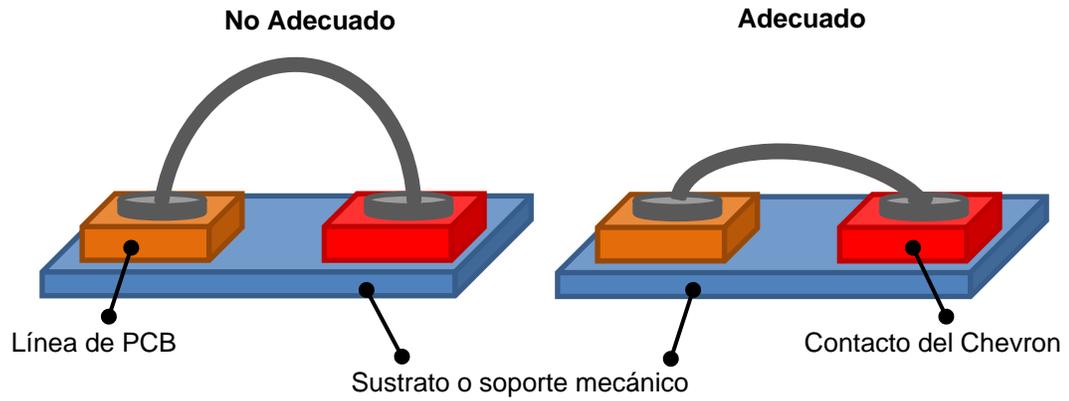


Fig. 2.19 Ilustración de la forma adecuada de alambrear para realizar la medición del desplazamiento de los actuadores al microscopio.

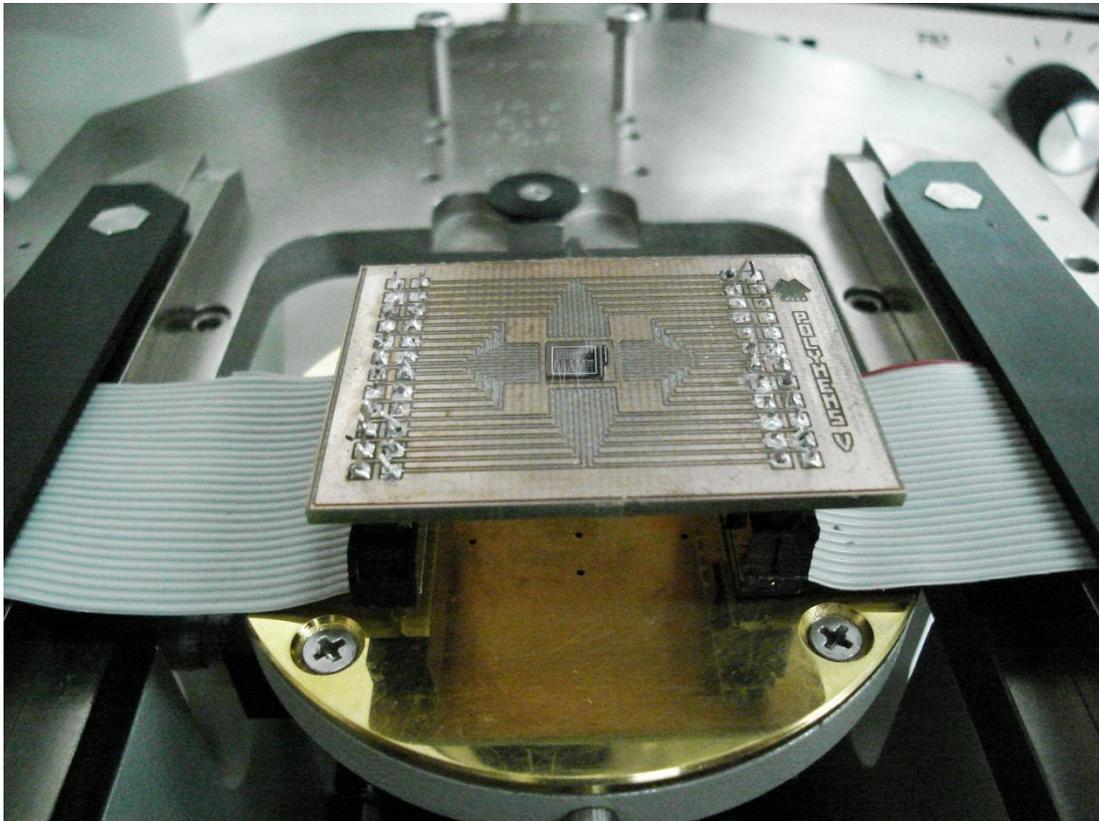


Fig. 2.20 Vista general del chip montado y alambreado en placa de circuito impreso.

En la Fig. 2.21 se observa a detalle el alambrado de estructuras en las cuales el proceso de alambrado repercutió en destruir parcialmente los pads. También se observa que el tamaño de la conexión respecto del pad, es considerable. La curvatura formada por los alambres se observa ligeramente ya que es una vista superior.



Fig. 2.21 Detalle del alambrado sobre los pads de los actuadores.

El microscopio cuenta con una lente graduada que dependiendo del objetivo utilizado puede brindar un rango de medición adecuado para el propósito de este trabajo. Lo mejor es utilizar la mayor resolución posible. Los objetivos de mayor magnificación son de 50X y 100X con los cuales se

pueden medir dimensiones mínimas de $1\mu\text{m}$ y $0.5\mu\text{m}$ con su respectiva incertidumbre.

El proceso de medición se realizó aplicando incrementos de un volt hasta un máximo de 10 volts realizando la medición en cada incremento y observando el comportamiento del actuador para detectar cualquier anomalía en su funcionamiento o indicio que indique que la estructura se encuentra funcionando cerca del límite antes de dañarse de forma permanente. Las fallas de funcionamiento pueden observarse en forma de una deformación no deseada de los brazos del actuador (buckling) [5], o incluso se puede llegar a presentar incandescencia irregular en los brazos del actuador. En la Fig. 2.22 se muestran algunas anomalías en el funcionamiento del actuador que pudieron ser fotografiadas. Por lo general al momento en que se presentan este tipo de anomalías, las estructuras se degradan con mayor rapidez y en ocasiones al intentar reproducirlas, las estructuras se destruyen. No obstante, existen ciertos casos en los que se pueden generar estas anomalías o indicios de mal funcionamiento. Un ejemplo de ello se muestra en la Fig. 2.22(b), en donde la ausencia de contacto de 3 de los 8 brazos del actuador provoca que la corriente se distribuya solamente en 5 de ellos, y se pueda observar principios de incandescencia en los demás brazos. En la Fig. 2.22(a) se observa el desplazamiento anormal de un actuador que resulta después de aplicar cierto voltaje, las fuerzas generadas en cada brazo ya no se suman para actuar con un desplazamiento normal.

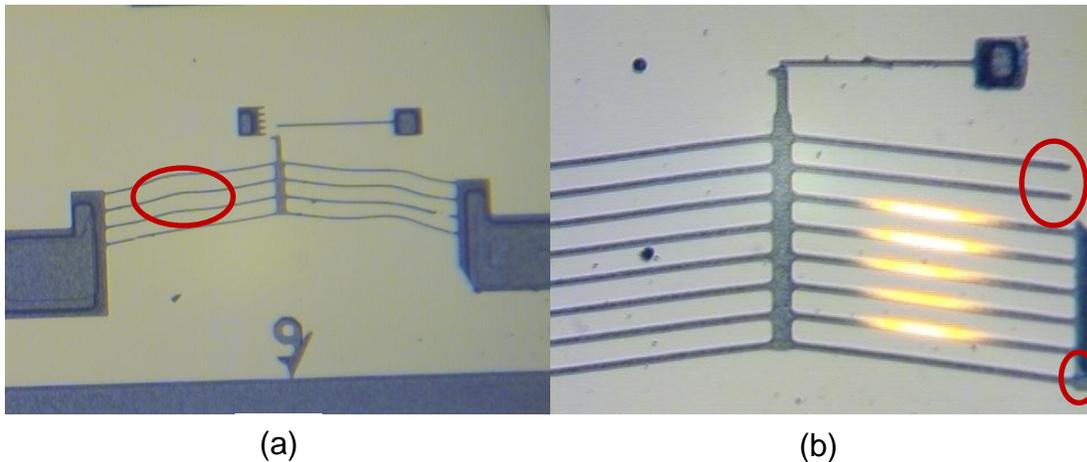


Fig. 2.22 Anomalías o indicadores de posible destrucción de las estructuras. (a) Deformación anormal de los brazos. (b) Principios de incandescencia irregular; en círculos rojos se indican los brazos que no hacen contacto, uno de ellos por fractura del contacto, y los otros dos por ausencia de material de contacto.

Poder identificar a tiempo estos indicadores de una posible falla, ayuda a evitar la destrucción de los actuadores. Debido a algunas de estas fallas de funcionamiento se determinó energizar hasta un máximo de 9 volts a estos actuadores.

2.5. Resumen

En este capítulo se ha descrito la metodología a seguir para conocer lo mejor posible el comportamiento (desplazamiento, temperatura y fuerza), de los actuadores tipo chevron fabricados en el INAOE.

La razón principal por la cual se buscaron modelos que describieran el comportamiento de un actuador tipo chevron fue para entender su desempeño y poder realizar una mejor caracterización a los actuadores que se fabriquen en un futuro. Otra de las razones es la de lograr generar un

diseño óptimo para una aplicación determinada, en donde el desplazamiento generado, la fuerza, y el área a utilizar serán las condiciones del diseño.

El modelo analítico brinda una aproximación rápida del comportamiento, sin embargo el modelo utilizado considera la transferencia de calor en una sola dimensión a lo largo de la longitud de los brazos. Otra es que se considera que el alargamiento de los brazos debida al efecto Joule mantiene la estructura de los brazos en línea recta. A pesar de las idealidades utilizadas, otro factor importante en el resultado del modelo analítico es determinar correctamente las condiciones de frontera para evaluar la temperatura en el actuador, ya que, como se presentó en la sección 2.2.2, estas condiciones repercutirán directamente en los resultados obtenidos. Sin embargo se presentaron los dos casos extremos que se pueden encontrar en un chevron, por lo tanto no puede existir ningún resultado que no se considere entre estas condiciones de frontera; es decir, el chevron puede no llevar consigo un vástago, o por el contrario, tener un vástago diseñado de tal forma que disipe la misma cantidad de calor que en los contactos.

El modelo de simulación brinda información que proviene del análisis de elementos finitos, mediante el cual fue posible conocer un mayor número de características como la fuerza de empuje, la influencia del vástago en el chevron, y la distribución de temperatura.

El modelo experimental servirá para conocer el desplazamiento generado y como punto de comparación para validar el modelo analítico y el de simulación.

Capítulo 3. Resultados

En esta sección se presentan los resultados obtenidos al seguir la metodología presentada en el capítulo 2. Primero se presentarán los resultados para cada modelo comenzando con el analítico, después el simulado y por último el experimental. Posteriormente se realiza una comparación de los resultados por medio de las figuras de mérito del actuador (desplazamiento generado, temperatura y fuerza), con el fin de validar los modelos comparados con el experimental. A continuación se presentan los resultados obtenidos de acuerdo con la metodología descrita en la sección 2.2.

3.1. Resultados Analíticos

Se utilizó un rango de 0 a 10 volts para obtener el comportamiento del desplazamiento generado, la temperatura, la fuerza y la variación de los parámetros.

3.1.1. Desplazamiento

La gráfica mostrada en la Fig. 3.1 muestra el desplazamiento generado por los actuadores al utilizar la ecuación (2.1). De acuerdo con esta gráfica se aprecia que el actuador tipo 3 genera el mayor desplazamiento, lo que se debe al menor ángulo inicial de los brazos respecto de la horizontal. Los actuadores tipo 1 y 2 generan el mismo comportamiento (no existe diferencia), ya que sus diseños concuerdan en las dimensiones de cada parte del actuador.

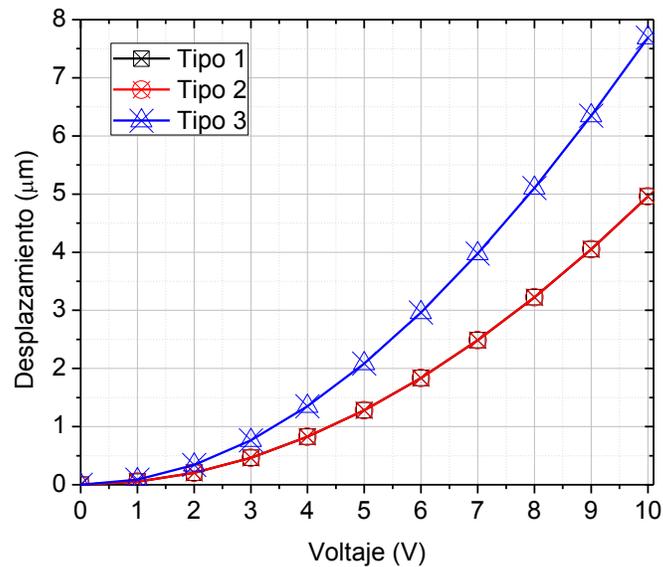


Fig. 3.1 Desplazamiento obtenido de forma analítica para los actuadores fabricados.

3.1.2. Temperatura

En la Fig. 3.2 se muestra el promedio de temperatura en los actuadores, la cual se obtuvo mediante la ecuación (2.9). En esta ecuación se utilizan las condiciones de frontera indicadas: los extremos de los brazos del chevron como sumideros de temperatura. Si bien esto no es del todo cierto para los actuadores fabricados considerados en este trabajo, de acuerdo con la metodología descrita en la sección 2.3.5, se conoce que la temperatura existente en el vástago es más cercana a la temperatura ambiente, por lo que utilizar estas condiciones de frontera es una aproximación más cercana que considerar que en el vástago existe la temperatura máxima del actuador. No se observa diferencia alguna entre el promedio de temperatura de uno u otro tipo de actuador, lo cual es debido a que los brazos de todos los actuadores son de las mismas dimensiones.

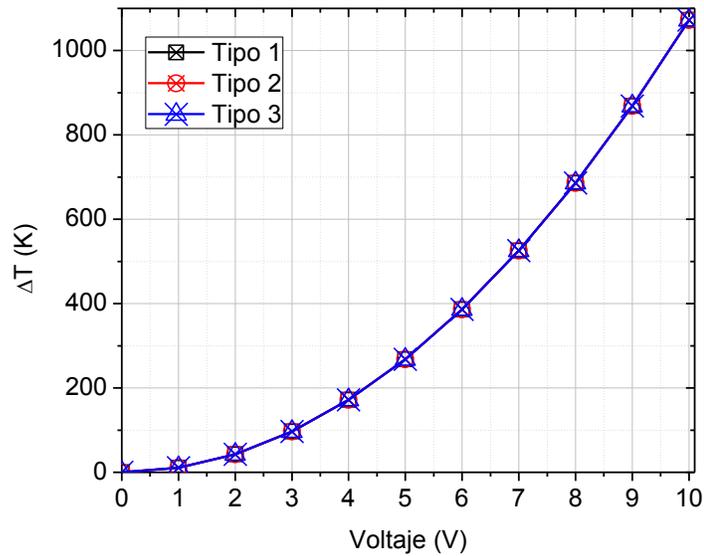


Fig. 3.2 Temperatura promedio en la estructura de los actuadores, referenciada a 300K.

3.1.3. Fuerza

La fuerza que existe en los actuadores, obtenida mediante la ecuación (2.14), se muestra en la Fig. 3.3. Como se puede observar, esta fuerza depende del ángulo formado por los brazos respecto de la horizontal y del número de brazos que conforman al actuador. Se observa también que a mayor número de brazos existe una mayor fuerza en los chevron, como es el caso del actuador tipo 2. Se puede verificar también que un ángulo inicial mayor representa para el actuador generar una fuerza mayor, y viceversa.

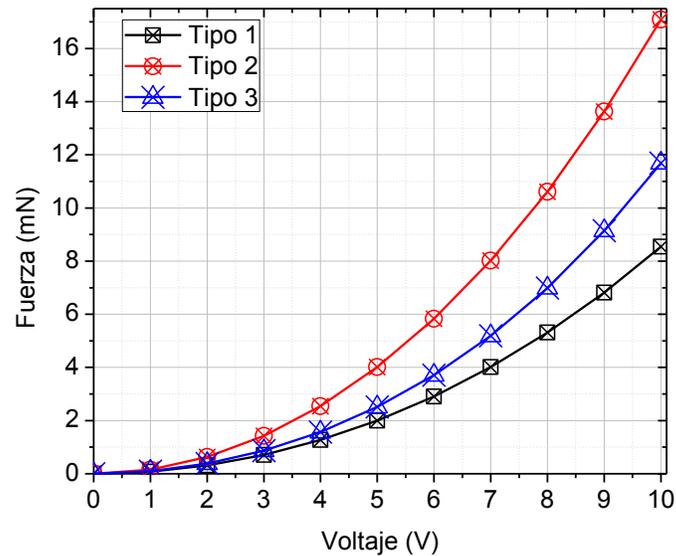


Fig. 3.3 Fuerza analítica respecto del voltaje aplicado.

3.1.4. Variación de Parámetros

Los resultados obtenidos al variar los parámetros y características del actuador se resumen en la Tabla 3.1. Los datos de la tabla 3.1 representan los parámetros que varían con el proceso de fabricación. El ancho de los brazos del actuador se consideró como un parámetro variante con el proceso debido a que en muchas ocasiones existe un sobre-grabado o algún otro detalle durante el proceso que resulta en dimensiones diferentes a las especificadas en el layout. La separación del sustrato y el espesor pueden ser modificados en el proceso PolyMEMS V-B; sin embargo en procesos industriales es muy complicado poder variar estos parámetros. En las Fig. 3.4 a 3.13 se presentan los resultados analíticos obtenidos al aplicar variación de los diversos parámetros y un voltaje fijo de 3 volts por brazo, o 6 volts entre las terminales del chevron; este voltaje fijo representa una condición segura de operación con una respuesta significativa. En las figuras que no se presenta alguna gráfica del comportamiento del actuador, es debido a que no

existe una variación con ese parámetro; por ejemplo: en la Fig. 3.8 no se muestra la gráfica de la temperatura, ya que siempre se mantiene constante.

Tabla 3.1 Información de la variación de parámetros.

Parámetro	Rango de variación	Valor utilizado en simulación \pm porcentaje de variación.	Porcentaje de influencia (\pm %), respecto al valor de simulación. *		
			Temperatura	Desplazamiento	Fuerza
Ángulo de grabado	45 – 90	70 \pm 2.1% [6]	2.91%	2.67%	7.9%
Ancho del brazo (μm)**	2 – 8	5 \pm 20%	11.85%	10.93%	38.69%
Resistividad ($\Omega.\mu\text{m}$)	5 – 15	10 \pm 10% [6]	10.15%	9.27%	11.78%
Conductividad térmica (W/mK)	30 – 35	33 [7]	0.98%	0.9%	1.09%
Coefficiente de expansión térmica ($\mu\text{m}/\text{m.K}$)	20 – 28	28 [7]	--	26.77%	31.8%
Módulo de Young (GPa)	150 – 170	160	--	--	6.24%
Separación del sustrato (μm)	0.5 – 4	2 \pm 25%	21.89%	20.09%	25.18%
Espesor (μm)	1 – 6	3 \pm 33.33%	15.29%	14.14%	39.15%
Ángulo Inicial	1° – 30°	6 \pm 66.66%	--	62.23%	43.59%
Longitud del brazo (μm) ***	60 – 500	300 \pm 16.66%	31 %	10.02%	36.52%

*El cálculo se realizó obteniendo la desviación estándar y calculando el porcentaje respecto del valor de simulación.

** Aun siendo un parámetro que se puede modificar como se quiera, se consideró una variación de -20% al momento de definir la estructura, así como el efecto que sufre debido a los pasos del proceso posteriores.

*** Este parámetro tiene un mínimo que depende de las características de diseño. El valor mínimo es aquel que no genera valores imaginarios.

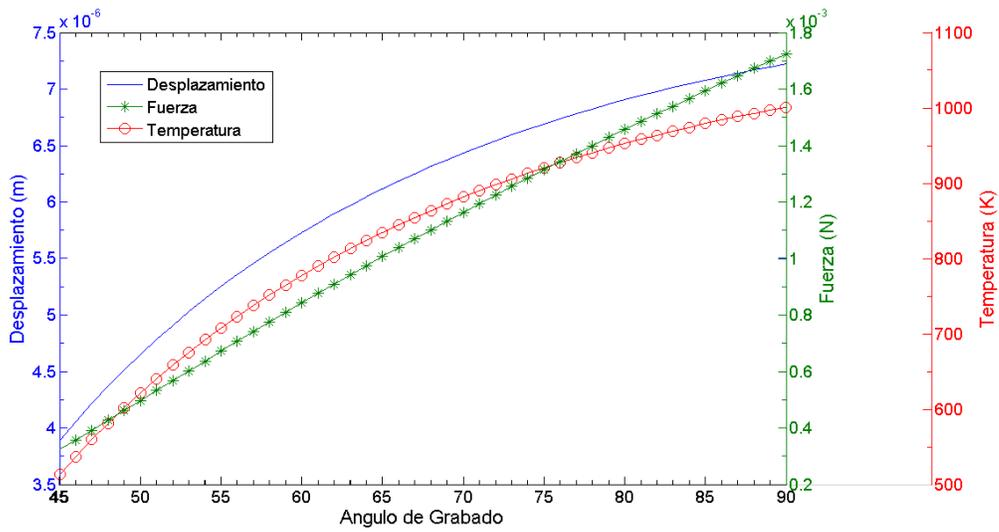


Fig. 3.4 Comportamiento de un chevron al variar el ángulo de grabado (respecto de la horizontal).

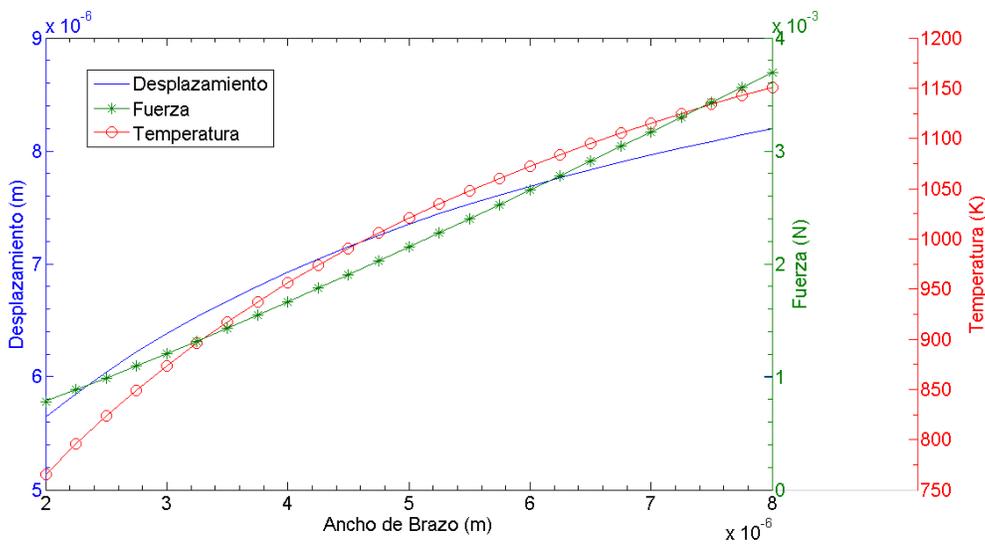


Fig. 3.5 Comportamiento de un chevron al variar el ancho del brazo.

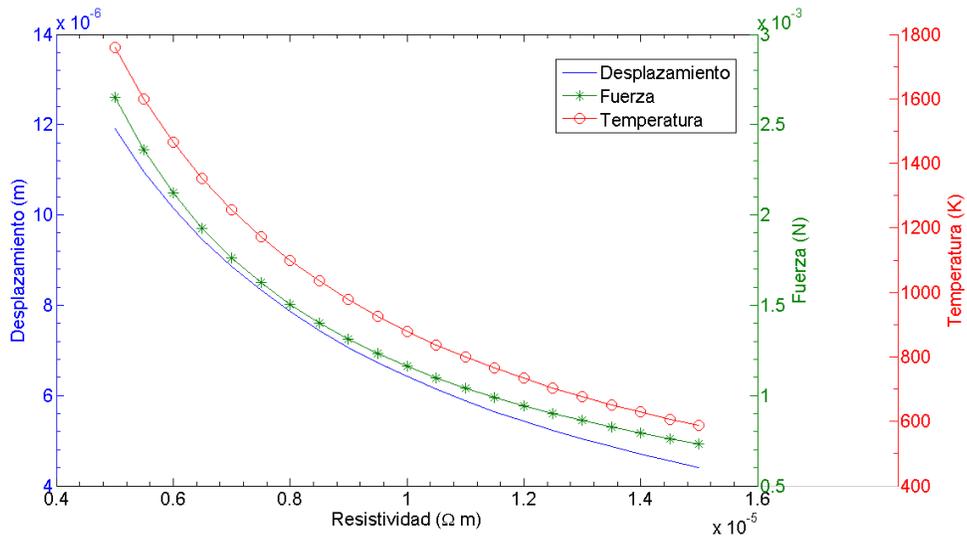


Fig. 3.6 Comportamiento de un chevron al variar la resistividad del polisilicio.

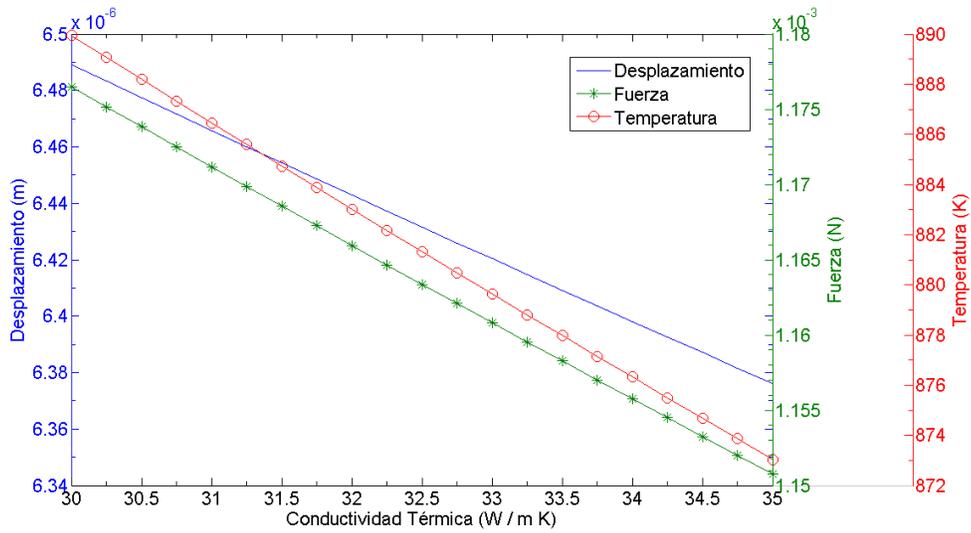


Fig. 3.7 Comportamiento de un chevron al variar la conductividad térmica.

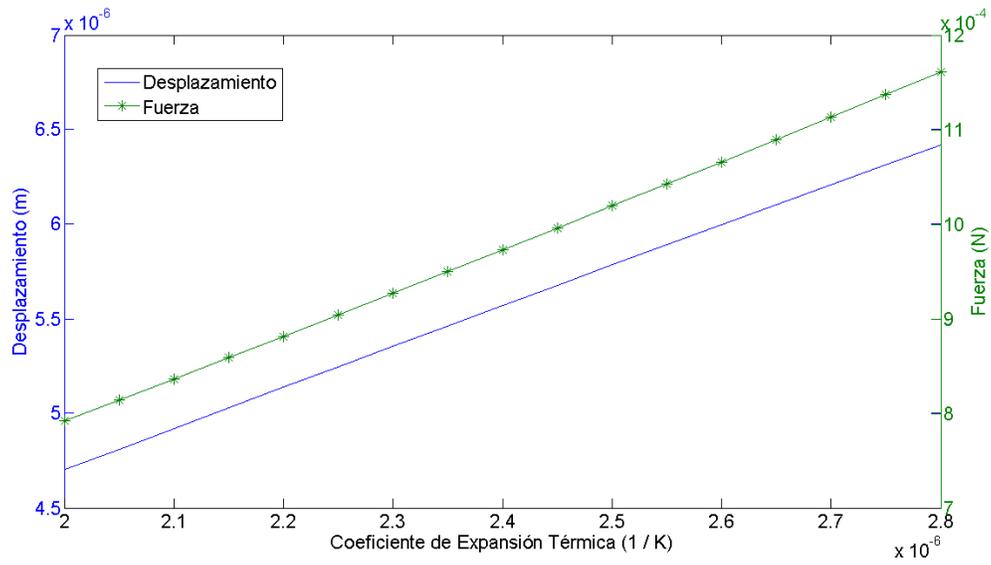


Fig. 3.8 Comportamiento de un chevron al variar el coeficiente de expansión térmica.

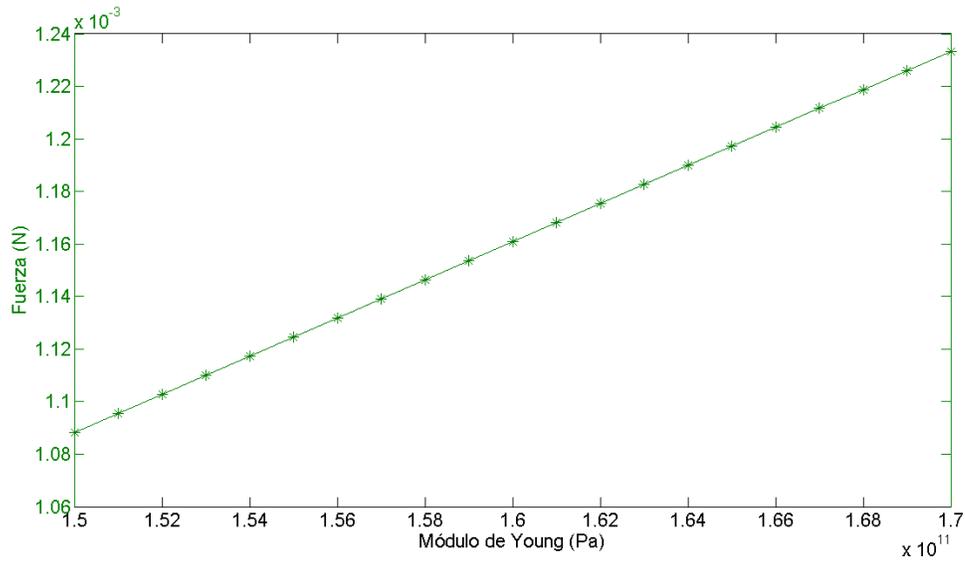


Fig. 3.9 Comportamiento de un chevron al variar el módulo de Young.

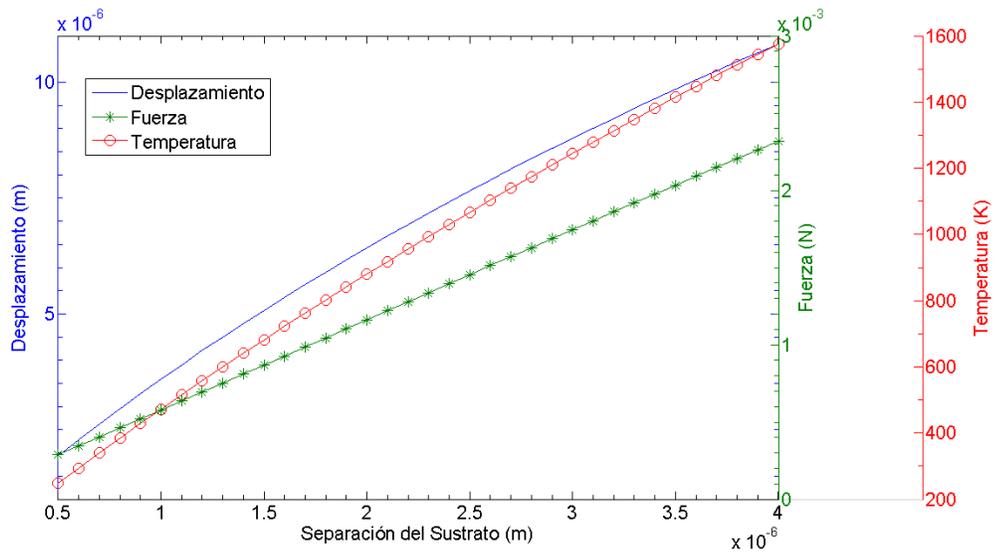


Fig. 3.10 Comportamiento de un chevron al variar la separación que existe entre la micro-estructura y el sustrato.

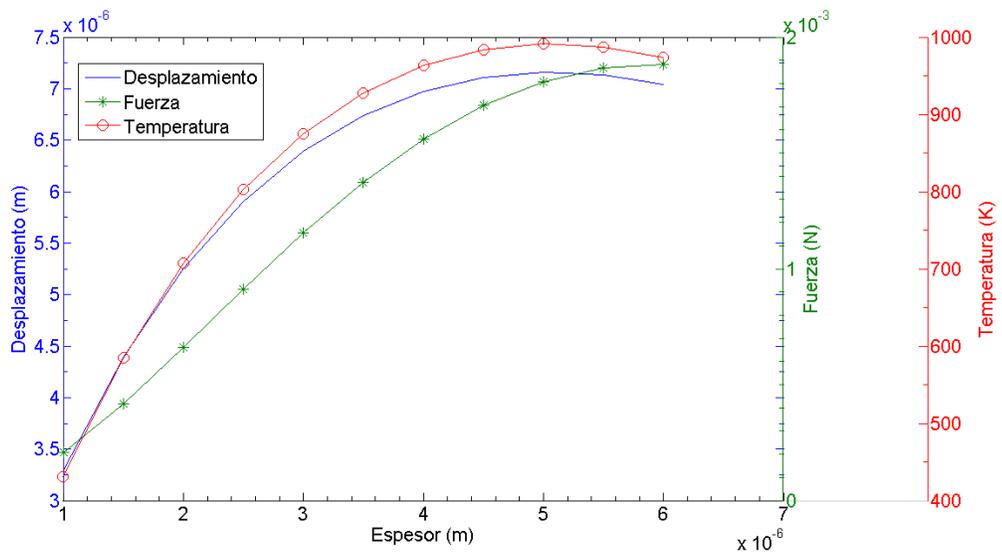


Fig. 3.11 Comportamiento de un chevron al variar el espesor de la micro-estructura.

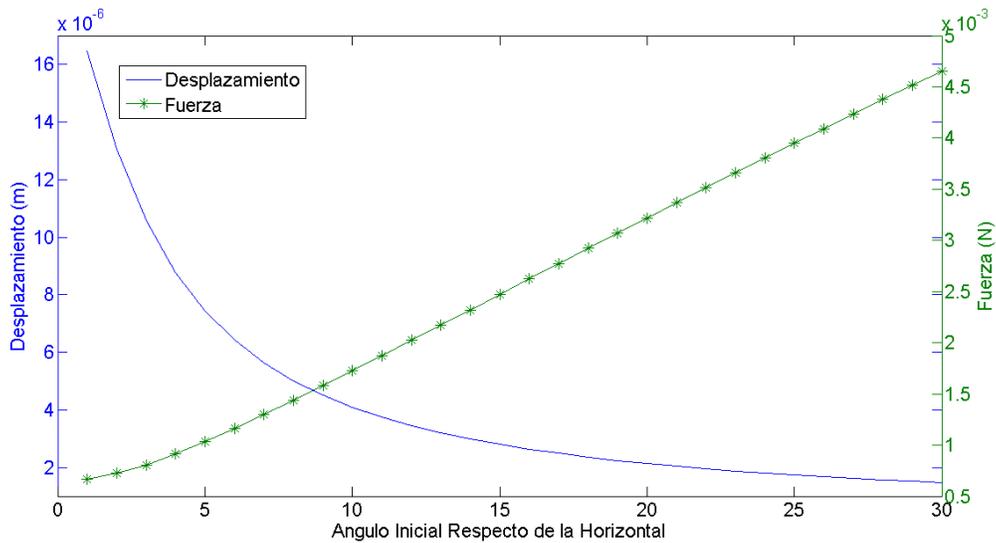


Fig. 3.12 Comportamiento de un chevron al variar el ángulo inicial respecto de la horizontal de los brazos del actuador.

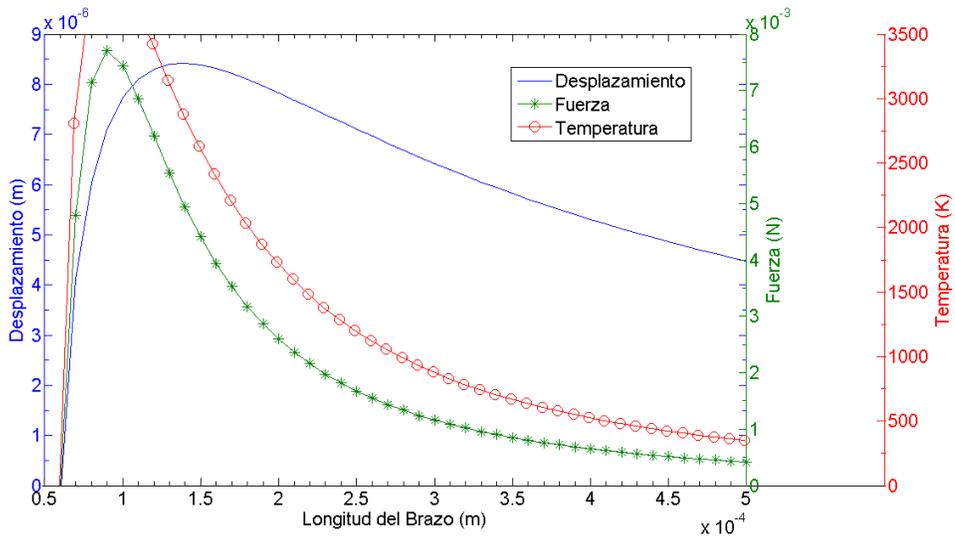


Fig. 3.13 Comportamiento de un chevron al variar la longitud del brazo.

A partir de las diferentes gráficas presentadas es fácil observar que al variar uno u otro parámetro el comportamiento del actuador se ve afectado, ya sea en temperatura, desplazamiento y fuerza o solamente alguno de ellos. Esta información es útil para buscar una mejora en el desempeño de los

actuadores así como para justificar las diferencias existentes entre la simulación y los resultados experimentales.

Una interpretación global de los datos obtenidos en las gráficas se presenta a continuación:

- El ángulo de grabado del material estructural brindará un aumento en temperatura, desplazamiento y fuerza cuando se generen paredes de 90° o cercanas a ello.
- Si varía la resistividad del material en $1\Omega\cdot\mu\text{m}$, el actuador generará una variación de $1\mu\text{m}$ en su desplazamiento, afectando la temperatura en alrededor de 500 K y la fuerza variará aproximadamente $200\mu\text{N}$.

Los dos ejemplos anteriores son solamente para ilustrar la forma de interpretar los resultados, ya que todos presentan comportamientos diferentes tanto en magnitud como en la forma en que afectan el comportamiento del actuador.

3.2. Resultados de Simulación

En esta sección se presentan los resultados de los modelos de simulación al utilizar Coventor Ware siguiendo la metodología descrita en la sección 2.3. Se utilizó una simulación del proceso PolyMEMS V-B para generar los modelos 3-D considerando las dimensiones esperadas de los actuadores, así como las propiedades de los materiales de la tabla 2.2. Se obtuvo el desplazamiento, la temperatura y la fuerza de cada configuración chevron. Es importante señalar que para obtener los resultados de esta sección se tuvo que realizar un análisis sobre la forma en que el simulador interpreta las pérdidas de temperatura, debido a que las primeras simulaciones arrojaban resultados exageradamente ilógicos (por ejemplo: desplazamientos generados de $50\mu\text{m}$). El detalle de este análisis se presenta

en el Apéndice B, ya que de no haberse realizado, el trabajo de simulación no se hubiera podido llevar a cabo.

3.2.1. Actuadores en Cascada

El desplazamiento generado por el actuador al aplicarle un barrido de voltaje de 0 a 10 volts se presenta en la Fig. 3.14 donde se puede observar que no existe una variación evidente entre las diversas configuraciones del actuador.

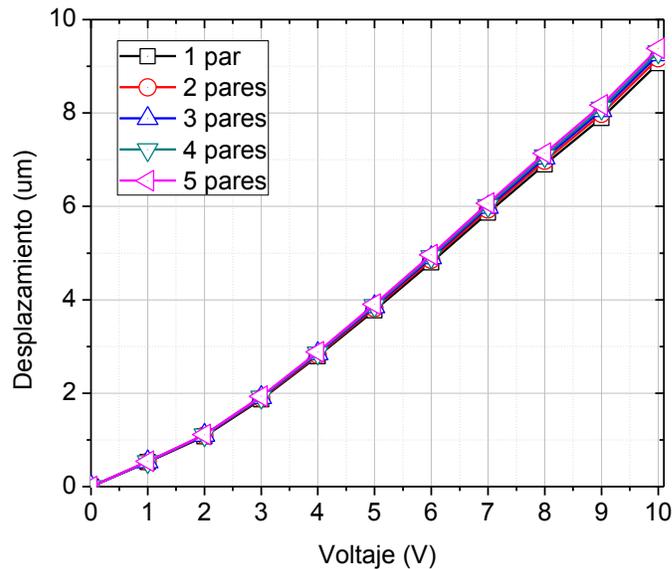


Fig. 3.14 Desplazamiento de los actuadores simulados en cascada de la Fig. 2.10.

En la Fig. 3.15 se muestra la temperatura máxima de operación de las diferentes configuraciones, donde la temperatura de todas las configuraciones es la misma. Esto puede explicarse debido a que cada brazo comparte la misma proporción del vástago, es decir que a partir del modelo de un brazo, se generan las demás configuraciones (2 pares de brazos, 3 pares etc.). Los esquemas presentan un perfil intermedio entre las dos

condiciones de frontera presentadas en la sección 2.2.2.1. Una visualización en modelo 3D de la distribución de temperatura se presenta en la Fig. 3.16.

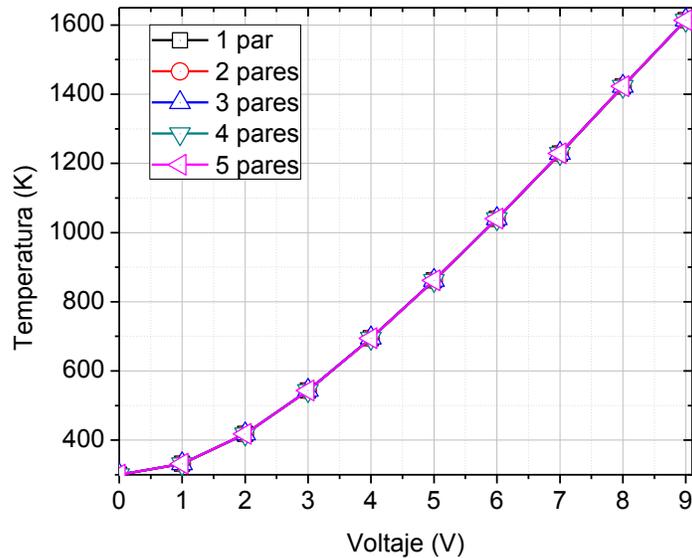


Fig. 3.15 Temperatura máxima en las diferentes configuraciones.

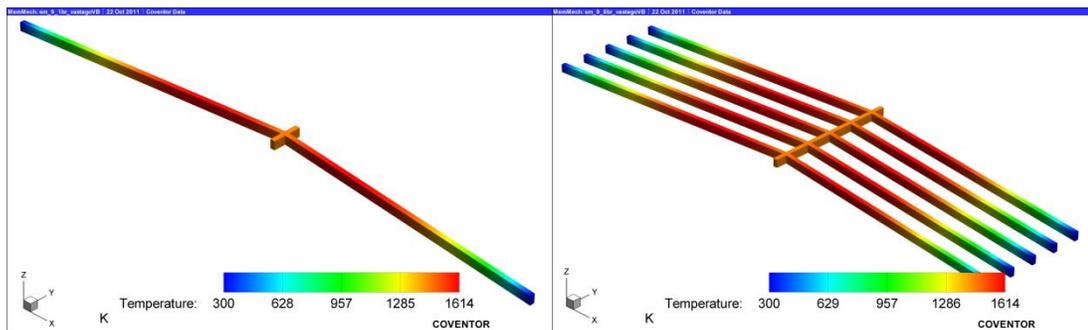


Fig. 3.16 Distribución de la temperatura en un solo par de brazos (izquierda) y en cinco pares de brazos (derecha).

La Fig. 3.17 muestra la fuerza total que generan las diversas configuraciones. Se observa que la fuerza aumenta proporcionalmente con el número de brazos. En la Fig. 3.18 se muestra que existe una relación lineal de la fuerza generada con el número de brazos. Se observa también en

ambas figuras que al elegir cualquier valor en el eje de las X, las líneas que interceptan son múltiplos de la fuerza dependiendo del número de brazos. Por ejemplo, si se elige el voltaje de 8 volts en la Fig. 3.18, observamos que para 1 par de brazos se tiene una fuerza aproximada de 2mN, para 2 pares 4mN, para 3 pares 6mN, y así sucesivamente.

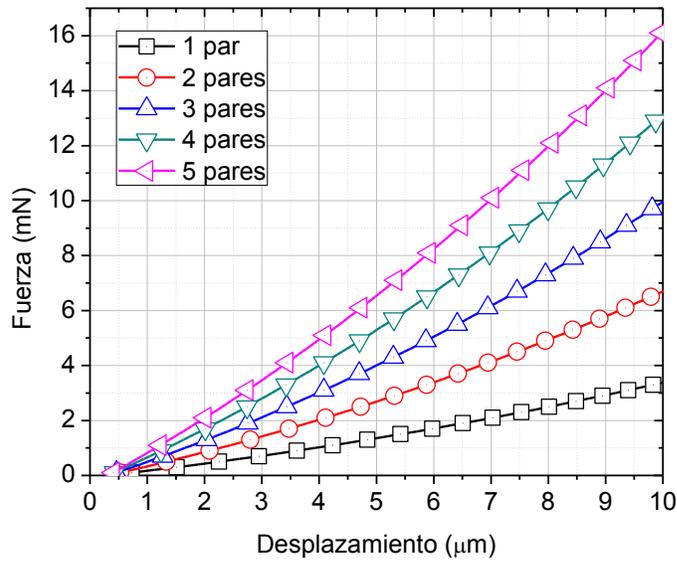


Fig. 3.17 Fuerza total generada en las diferentes configuraciones.

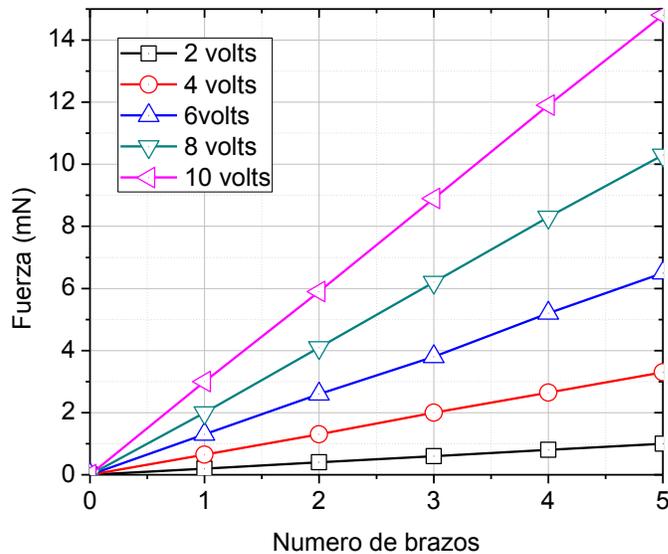


Fig. 3.18 Fuerza vs número de brazos para valores de voltaje fijos.

De esta forma se corrobora que al conectar actuadores tipo chevron en cascada se ve afectada únicamente la fuerza que existe en el mismo, manteniendo el mismo desplazamiento y misma distribución de temperatura.

3.2.2. Influencia del Vástago

La gráfica de la Fig. 3.19 muestra el desplazamiento generado al variar el ancho del vástago. Se observa que conforme aumenta el ancho del vástago el desplazamiento generado es menor. Sin embargo la diferencia entre el desplazamiento cuando se tiene $1\mu\text{m}$ y $80\mu\text{m}$ de ancho, es de apenas $1.25\mu\text{m}$, por lo que se puede considerar que no tiene influencia.

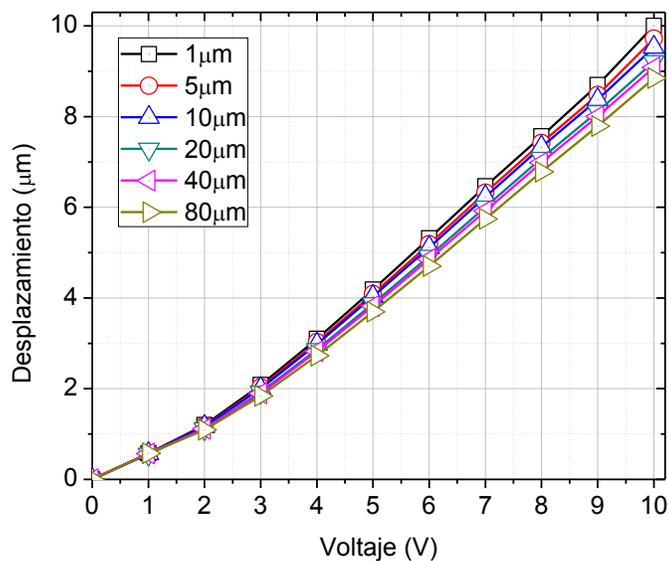


Fig. 3.19 Desplazamiento generado al variar el ancho del vástago.

La Fig. 3.20 muestra la gráfica de la temperatura máxima en las estructuras simuladas. En esta gráfica se observa que la ecuación (2.16) se cumple ya que al tener un ancho mayor se obtiene una mayor resistencia y por lo tanto una menor potencia eléctrica; y dado que la temperatura se

relaciona con la corriente eléctrica mediante la potencia, queda justificado el comportamiento de la temperatura máxima.

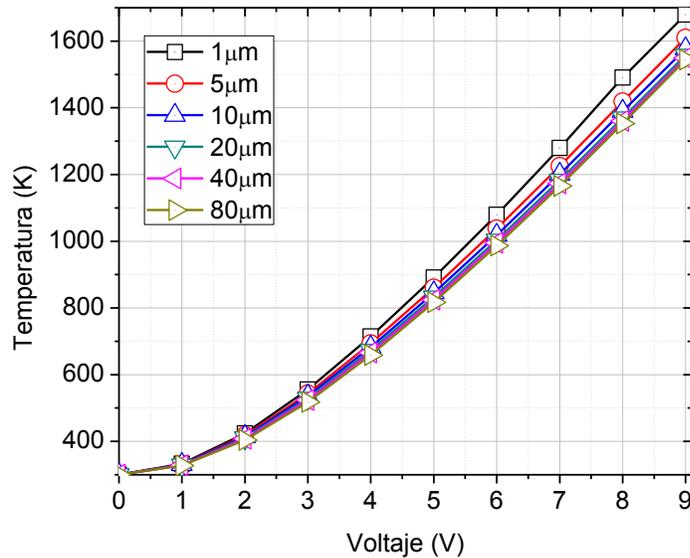


Fig. 3.20 Máxima temperatura en las configuraciones simuladas con diferente ancho del vástago.

En la Fig. 3.21 se muestra la fuerza generada por los actuadores al variar la longitud del vástago. La variación de la fuerza entre las diferentes configuraciones es mínima, lo que indica que la fuerza dependerá de la distancia que alcance el actuador. Interpretando al mismo tiempo las gráficas 3.19 y 3.21 se concluye que a un determinado voltaje se obtienen diferentes valores de fuerza que se encuentran fácilmente en la gráfica de fuerza del actuador (Fig. 3.21).



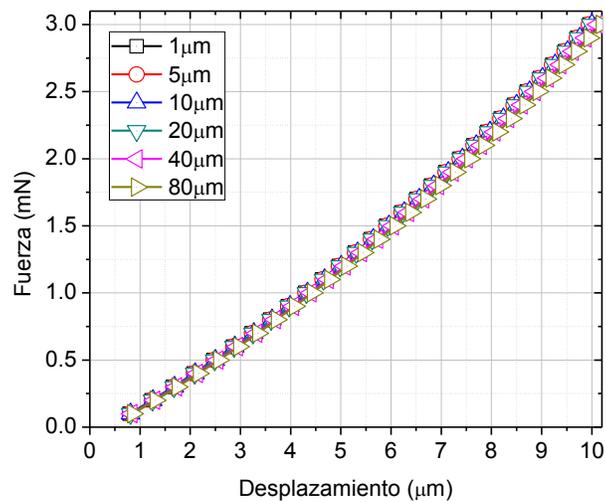


Fig. 3.21 Fuerza total dependiendo de las dimensiones del ancho del vástago.

En la Fig. 3.22 se presenta el desplazamiento que generan las diferentes configuraciones variando la longitud del vástago. Es de esperar que mientras el vástago sea de mayor tamaño, el desplazamiento generado sea menor debido a que se disipa una mayor cantidad de temperatura y los brazos sufren un menor alargamiento por efecto Joule.

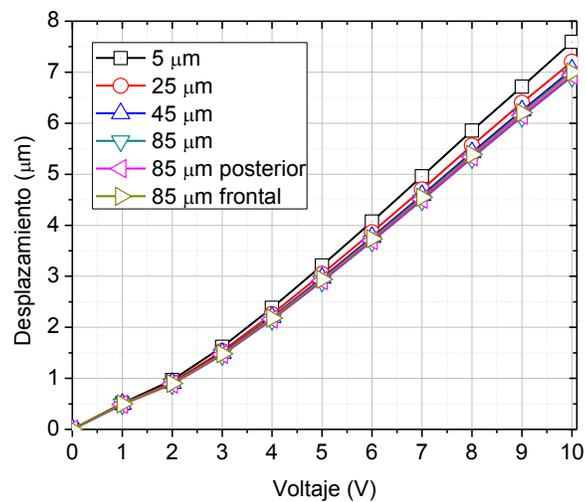


Fig. 3.22 Desplazamiento generado por los actuadores con diferente longitud del vástago.

La temperatura máxima en los actuadores se muestra en la Fig. 3.23, en donde se observa la misma relación que en la Fig. 2.13 (mientras mayor es la longitud del vástago, menor es la temperatura). Ambas figuras (2.13 y 3.23) deben observarse al mismo tiempo para entender que la distribución de temperatura varía de una a otra. Estas pequeñas variaciones son difíciles de observar en la gráfica, a excepción de la longitud de $5\mu\text{m}$.

En la Fig. 3.24 la fuerza total en las diferentes configuraciones es presentada. Al contrario de la Fig. 3.18, la fuerza no varía considerablemente por lo que se puede concluir que el actuador tipo chevron es bastante robusto con el ancho del vástago.

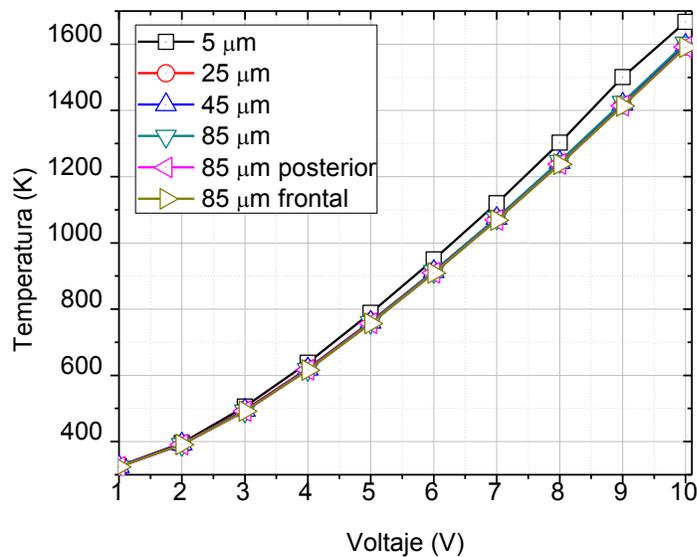


Fig. 3.23 Temperatura máxima en los actuadores con diferente longitud del vástago.

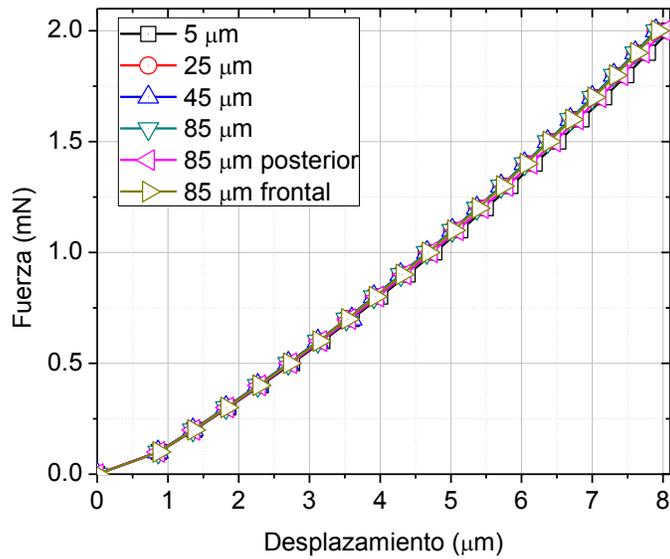


Fig. 3.24 Fuerza total vs desplazamiento generado.

3.2.3. Representación Eléctrica de un Chevron

Una vez conocida la influencia del vástago, y con los conocimientos adquiridos sobre el desempeño y funcionamiento del actuador, se tiene certeza del circuito eléctrico equivalente de la estructura del actuador, mostrado en la Fig. 3.25, mediante el cual se pueden conocer los valores de corriente o voltaje en cada sección del actuador.

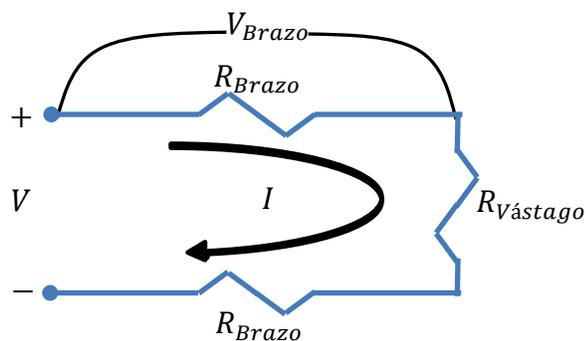


Fig. 3.25 Representación en circuito eléctrico de un actuador tipo chevron.

De acuerdo con este modelo, la corriente eléctrica que circula entre las terminales del actuador es:

$$I = \frac{V}{2 R_{Brazo} + R_{Vástago}}, \quad (3.1)$$

donde los valores de las resistencias se pueden calcular a partir de las dimensiones descritas en el patrón geométrico (layout) mediante la ecuación (2.16). El actuador funciona básicamente con la elongación de los brazos debida a una diferencia de temperaturas, y de acuerdo con esto, se observa que depende externamente del voltaje que existe en el brazo del actuador. Es por ello que en la ecuación (3.2) se presenta el voltaje en cada brazo del actuador.

$$V_{Brazo} = \frac{V R_{Brazo}}{2 R_{Brazo} + R_{Vástago}} = \frac{V \rho L_{Brazo}/A_{Brazo}}{2 \rho L_{Brazo}/A_{Brazo} + \rho L_{Vástago}/A_{Vástago}}. \quad (3.2)$$

Analizando la ecuación (3.2) se observa que el voltaje neto en el brazo del actuador dependerá de la resistencia eléctrica que presente el vástago, por lo que eléctricamente, el vástago solo influye con la caída de voltaje en su estructura. Sin embargo, la Fig. 3.25 puede representar de forma aproximada a un actuador tipo chevron sin importar su configuración (número de brazos, longitud, características del vástago, etc.) ya que la magnitud de R_{Brazo} será el paralelo de los n brazos que conformen al actuador, y $R_{Vástago}$ se determinará por las dimensiones que el diseño requiera.

3.2.4. Actuadores Fabricados

En la Fig. 3.26 se muestra una reproducción del modelo estructural simulado que reproduce el ángulo de grabado generado en el proceso de fabricación del chip PolyMEMS V-B.

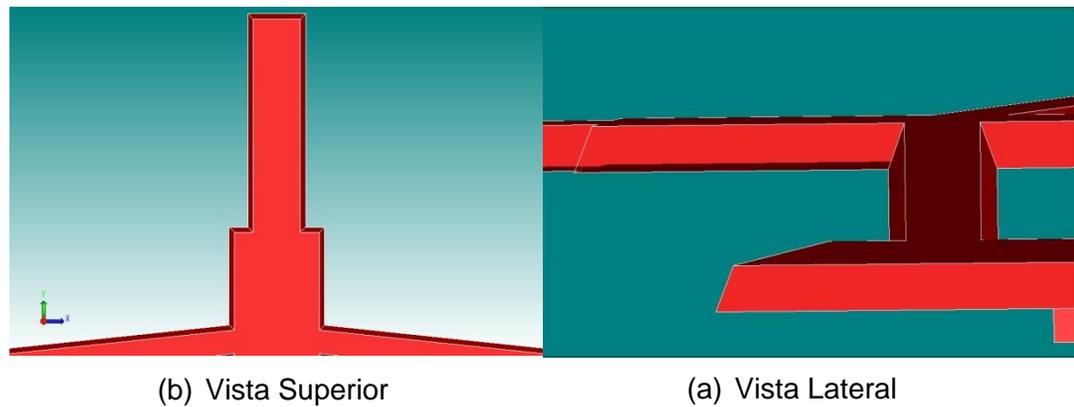


Fig. 3.26 Observación del ángulo de grabado simulando el proceso de fabricación. En la vista superior no se observa con claridad el ángulo. En la vista lateral se hace un acercamiento a uno de los brazos para observar mejor el ángulo formado.

Para encontrar el desplazamiento que se muestra en la Fig. 3.27 se utilizó un barrido de voltaje hasta 10 volts considerando sus respectivas pérdidas de temperatura (Apéndice B), y mediante un análisis electro-termo-mecánico se obtuvieron los resultados. Se observa la misma tendencia presentada en la Fig. 3.1, donde se obtienen desplazamientos mayores con ángulos iniciales menores (actuador tipo 3). El desplazamiento que generan los actuadores tipo 1 y 2 es similar.

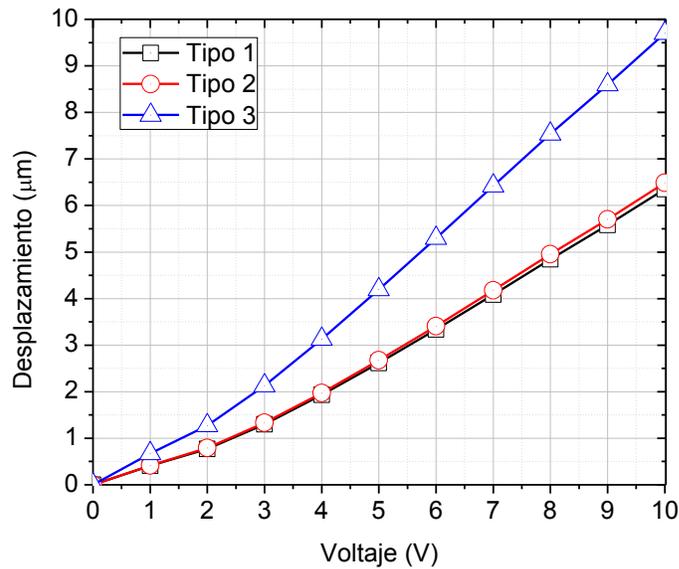


Fig. 3.27 Desplazamiento contra voltaje de los actuadores simulados.

Con la misma simulación se obtiene la temperatura máxima que existe en los actuadores a un determinado voltaje. En la Fig. 3.28 se muestra la temperatura máxima, ninguna diferencia entre los diferentes tipos de actuadores fue observada. Esto es debido a que físicamente son iguales: misma longitud, mismo espesor, mismo ancho etc. Las únicas diferencias que existen entre los actuadores son el ángulo inicial y el número de brazos; sin embargo, debe recordarse que desde el punto de vista eléctrico cada brazo del actuador representa una resistencia definida por sus dimensiones, lo que resulta en que al aplicar un voltaje determinado al actuador existirá un voltaje determinado para cada brazo que lo conforme, y por lo tanto, circulará la misma corriente por cada brazo del actuador generando el mismo calor debido al efecto Joule. Lo anterior indica que para generar el mismo calor en los brazos no importa el número de brazos que conformen al actuador, ni el ángulo inicial, siempre y cuando sean de iguales dimensiones con características similares en el vástago.

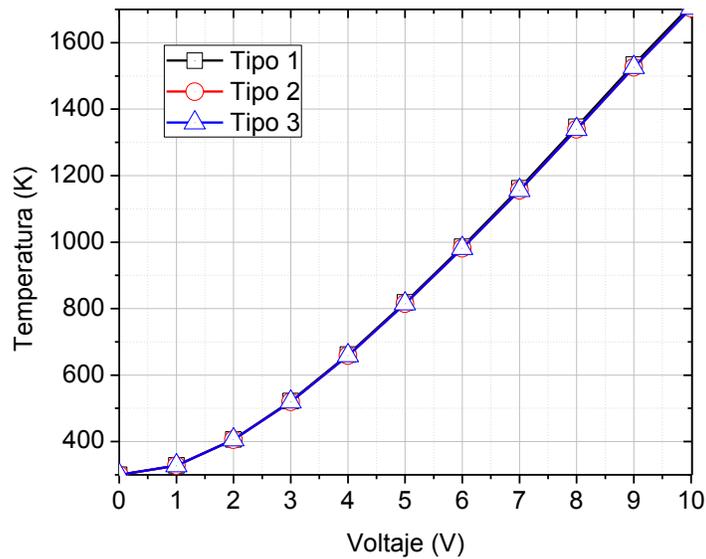


Fig. 3.28 Máxima temperatura en los actuadores simulados.

En la Fig. 3.29 se presentan los resultados obtenidos de una simulación termo-mecánica en la cual se aplica una fuerza incremental en la parte trasera del vástago para que el actuador, que se encuentra sin voltaje aplicado, se desplace dependiendo de la fuerza hasta lograr una correlación con el desplazamiento generado por la excitación.

De la Fig. 3.29 se puede observar también que se cumple lo establecido en la sección 3.2.1 donde el número de brazos es proporcional a la fuerza. Esto se verifica con los actuadores tipo 1 y 2 tomando cualquier valor de voltaje y revisando la fuerza obtenida. En todos los casos el actuador tipo 2 (16 brazos) tendrá el doble de fuerza que el actuador tipo 1 (8 brazos).

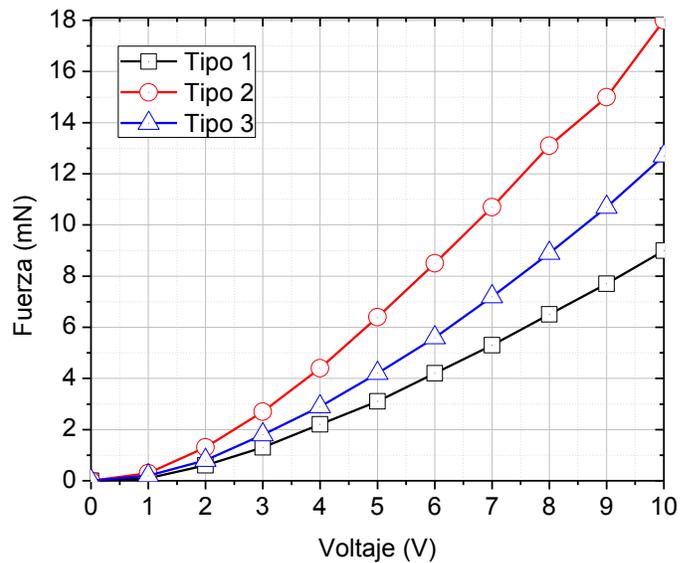


Fig. 3.29 Fuerza total de los actuadores simulados.

Se explicó en la sección 2.3.3 que la fuerza de empuje de los actuadores se obtuvo aplicando una fuerza incremental en la parte frontal del vástago cuando el actuador se encuentra energizado con un voltaje fijo. Este tipo de análisis resulta más útil cuando se realiza para un solo par de brazos, ya que de los datos resultantes se puede escalar a cualquier configuración de brazos. El tiempo de simulación requerido para realizar estas simulaciones es dependiente de la complejidad y tamaño de la estructura, por lo que hacer el análisis para un solo par de brazos es también un ahorro de tiempo. En la Fig. 3.30 se presentan las gráficas de la fuerza de empuje que generan los actuadores.

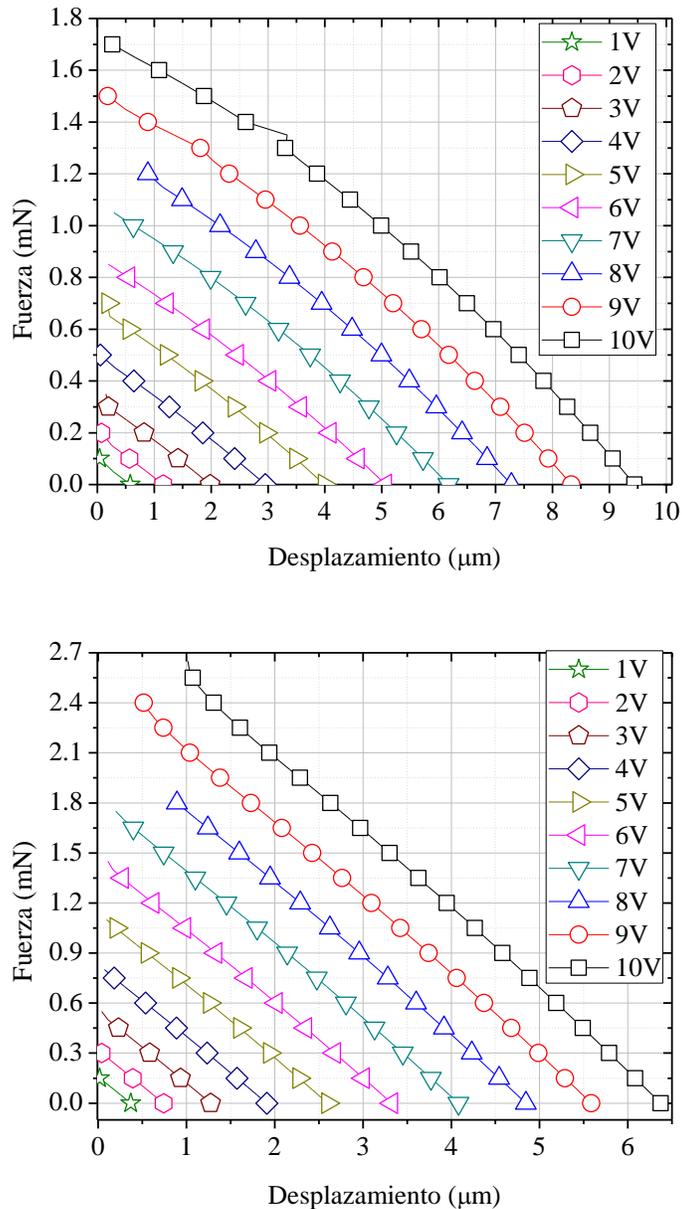


Fig. 3.30 Fuerza de empuje de un solo par de brazos chevron. Arriba: brazos con 6 grados iniciales respecto de la horizontal. Abajo: brazos con 10 grados iniciales respecto de la horizontal.

Estos resultados se pueden interpretar como sigue: si la superficie u objeto que se interponga en el desplazamiento natural del actuador se encuentra lo más próximo al actuador antes de ser energizado, la fuerza que

el chevron ejercerá sobre el objeto será mucho mayor que si el objeto se encuentra más alejado. La fuerza máxima que puede brindar el actuador es a una distancia de cero, es decir cuando el objeto está en contacto físico con la estructura del actuador antes de aplicar algún potencial entre sus terminales.

Sin embargo, en muchas ocasiones el actuador puede llegar a no generar el desplazamiento esperado, provocado por una deformación anormal en los brazos. Estos efectos no pueden ser advertidos por el simulador. En la práctica, estas situaciones pueden ser obtenidas cuando la fuerza que se opone al desplazamiento del chevron (por ejemplo: una superficie demasiado rígida o de mucho peso), se encuentra muy cerca o en contacto con la estructura del vástago antes de ser energizado, por lo que si el actuador es diseñado con un ángulo inicial muy pequeño en los brazos, el alargamiento de los brazos se verá limitado por la fuerza que se opone, generando una deformación anormal en los brazos. En la Fig. 3.30 se observan curvas que no presentan resultados de fuerza a distancias cercanas a cero, y esto se puede atribuir a la deformación anormal en los actuadores, lo cual no considera el simulador y simplemente marca error al simular bajo esas condiciones.

3.3. Resultados Experimentales

En esta sección se presentarán los resultados obtenidos al medir los actuadores fabricados. Los resultados que se obtengan servirán de comparación con los resultados de simulación y los analíticos. Para medir las estructuras y los desplazamientos se utilizó la metodología descrita en la sección 2.4.

3.3.1. Caracterización Geométrica de las Estructuras

Cuando se observa con un microscopio óptico y se enfoca la parte superior del actuador se obtiene la Fig. 3.31. Usando el filar del microscopio se midió el ancho del brazo y del vástago obteniendo valores entre 2 y 2.5 μm para el brazo, y alrededor de 16 μm para el vástago. Utilizando el mismo microscopio con magnificación de 100X, la medición de la parte inferior del actuador se realizó interpretando adecuadamente la imagen debido a la existencia de dos límites que definen el punto justo para medir. El primer límite es cuando se pasa de enfocar la superficie superior y se intenta enfocar la inferior, límite en el cual la imagen es borrosa y el perímetro de la estructura queda indefinido. El segundo límite se observa cuando se continúa enfocando y la imagen que se forma en la Fig. 3.32 se pierde por completo. Es de esa manera en la que se obtiene la Fig. 3.32 que representa el perímetro inferior del actuador.

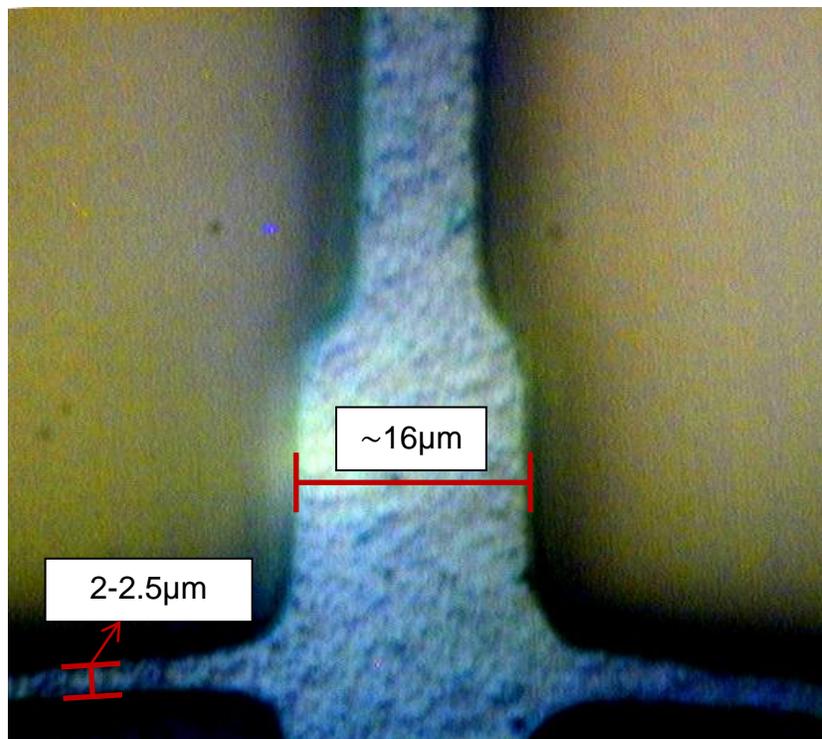


Fig. 3.31 Enfoque de la superficie superior del actuador. Se hace presente la rugosidad del material. Los datos representan un promedio de todas las estructuras.

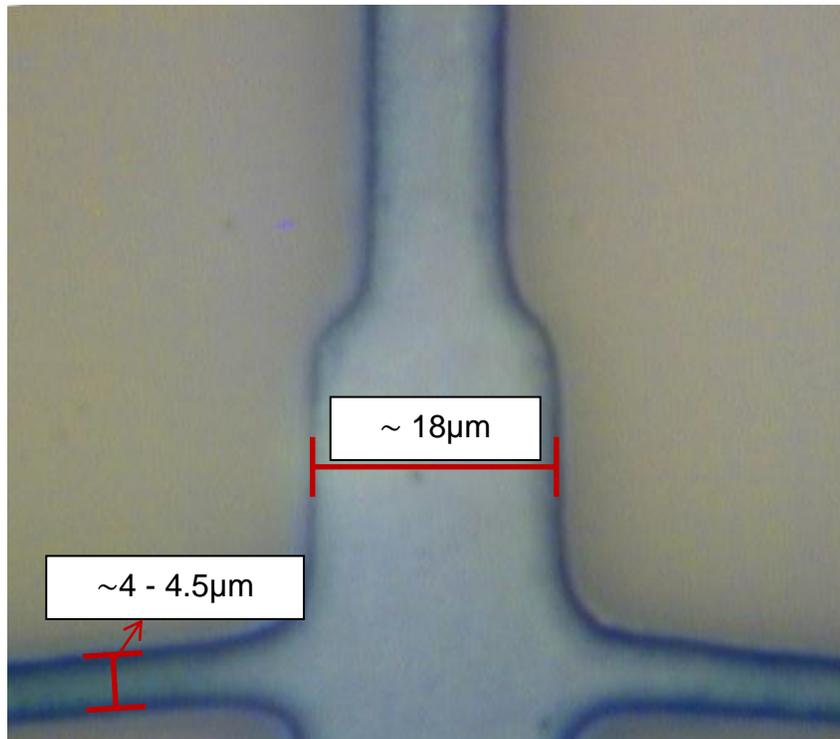


Fig. 3.32 Enfoque de la superficie inferior del actuador. El perímetro bien detallado y sin regiones borrosas asegura la medición.

En la tabla 3.2 se indican los valores calculados y las mediciones realizadas, donde se observa que existe una ligera diferencia, probablemente debida al sobre-grabado: ya sea al momento de definir las estructuras, cuando se liberan los actuadores, o una combinación de ambas.

Tabla 3.2 Comparación de dimensiones en las estructuras.

Superficie	Ancho del Brazo (μm)		Ancho del Vástago (μm)	
	Cálculo	Medición	Cálculo	Medición
Superior	2.816	2.25 ± 0.5	15.82	16 ± 0.5
Inferior	5	4.25 ± 0.5	18	18 ± 0.5

3.3.2. Mediciones Eléctricas

En la Fig. 3.33 se presentan las mediciones realizadas en uno de los dados fabricados, donde se observa que en la estructura 10 no existe continuidad eléctrica. Esto tiene dos posibilidades, que exista una rotura o separación entre los brazos del actuador y la región del contacto, o que al momento de alambrear el dado la soldadura no haya realizado contacto eléctrico. Generalmente esta última falla es la más común y se debe a que tanto la superficie del actuador como de las pistas del PCB, al estar expuestos al ambiente, se oxidan. También se puede deber a una mala configuración de la alambreadora, sin embargo, ese análisis queda fuera de los objetivos del presente trabajo. Se puede consultar información sobre los procesos y fallas de alambreado en [31].

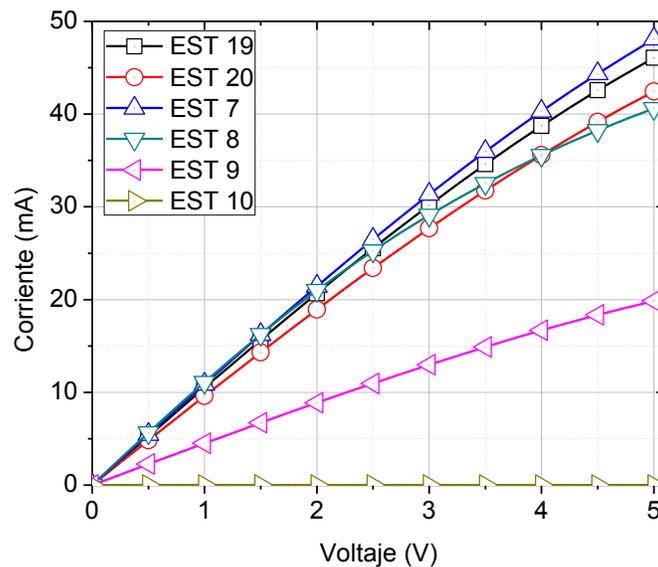


Fig. 3.33 Comportamiento eléctrico de los diferentes actuadores tipo chevron ubicados en el dado 19.

Es importante señalar que los actuadores tipo chevron presentan un cambio en su resistencia debido al calentamiento Joule, y que de forma general en cada brazo del actuador circula la misma cantidad de corriente.

Este último concepto se puede observar analizando las gráficas de las estructuras 9 (Tipo 1) y 8 (Tipo 2), las cuales tienen las mismas características con la única diferencia del número de brazos.

Este análisis servirá para las posteriores mediciones que se realicen sobre el desplazamiento que generan los chevron, ya que se conocerá de antemano cuales actuadores medir y cuáles no, lo que resultará en un ahorro de tiempo de medición.

3.3.3. Desplazamiento Medido

En la Fig. 3.34 se presentan las mediciones del desplazamiento que generan los actuadores.

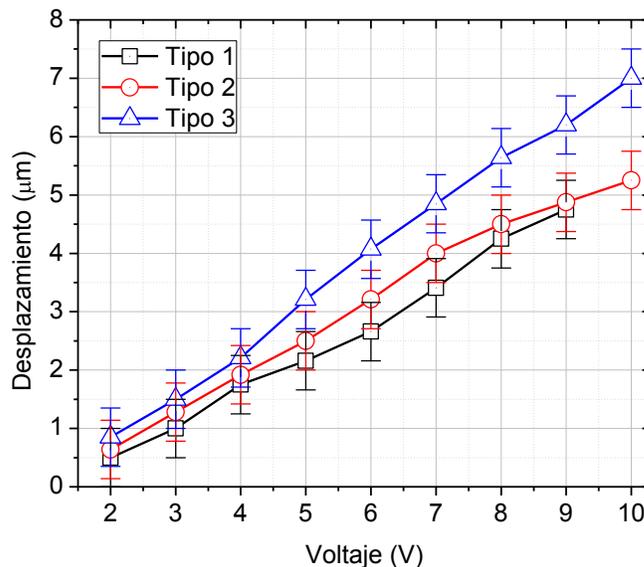


Fig. 3.34 Promedio del desplazamiento generado por los actuadores medidos indicando la incertidumbre de la medición al utilizar el objetivo de 50X.

De la Fig. 3.34 queda claro que la configuración tipo 3 genera un mayor desplazamiento debido a que cuenta con un ángulo inicial menor que las

otras dos configuraciones. También se aprecia que los actuadores tipo 1 y 2 tienen una gran similitud en el desplazamiento generado, lo que concuerda con la ecuación (2.1) para calcular el desplazamiento, donde no existe una dependencia con el número de brazos en el actuador.

3.4. Comparación y Análisis de los Resultados

En esta sección se realizará la comparación y el análisis de los resultados obtenidos en el desarrollo del presente capítulo.

3.4.1. Desplazamiento

Una vez que se han obtenido los resultados analíticos, experimentales y de simulación, que indican el comportamiento de los actuadores fabricados, se procedió a comparar y analizar los resultados. En la Fig. 3.35 se presentan todos los resultados obtenidos para el desplazamiento de los chevron.

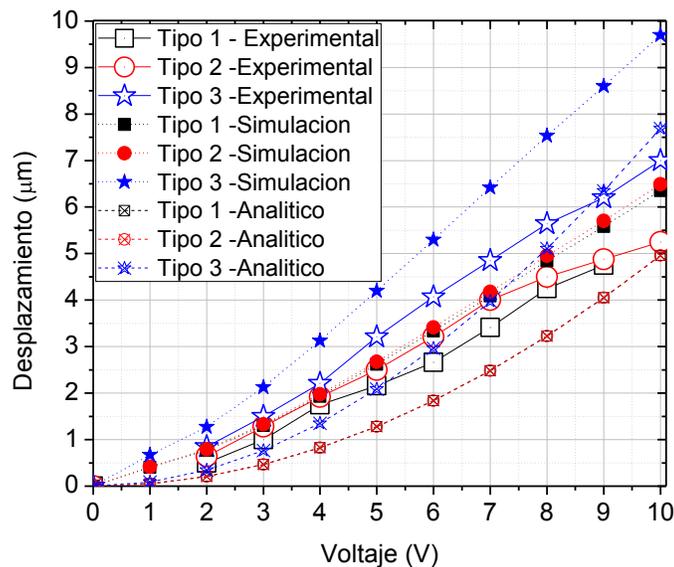


Fig. 3.35 Conjunto de resultados de desplazamiento. En líneas continuas se presentan los resultados experimentales, en líneas punteadas los de simulación, y en líneas segmentadas los resultados analíticos.

Con el fin de tener una mejor visualización de los resultados, en las figuras 3.36 a 3.38 se presentan de forma separada sus gráficas de desplazamiento para cada tipo de actuador. Se puede observar que los datos experimentales se ubican entre los resultados analíticos y de simulación. Las Fig. 3.36 y 3.37 presentan un comportamiento bastante similar, inclusive en el resultado experimental, teniendo como única diferencia el voltaje máximo que soporta la estructura de tipo 1. Esta diferencia se puede atribuir a una mayor concentración de corriente en la estructura lo que podría generar la ruptura o destrucción de la misma.

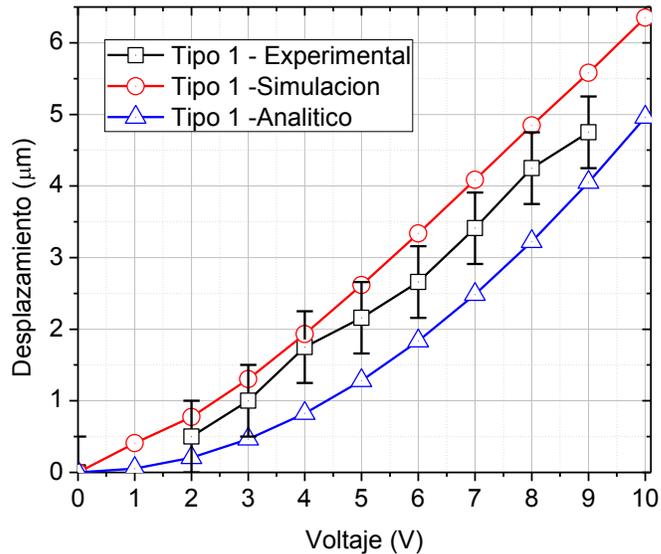


Fig. 3.36 Desplazamiento contra voltaje del actuador tipo 1.

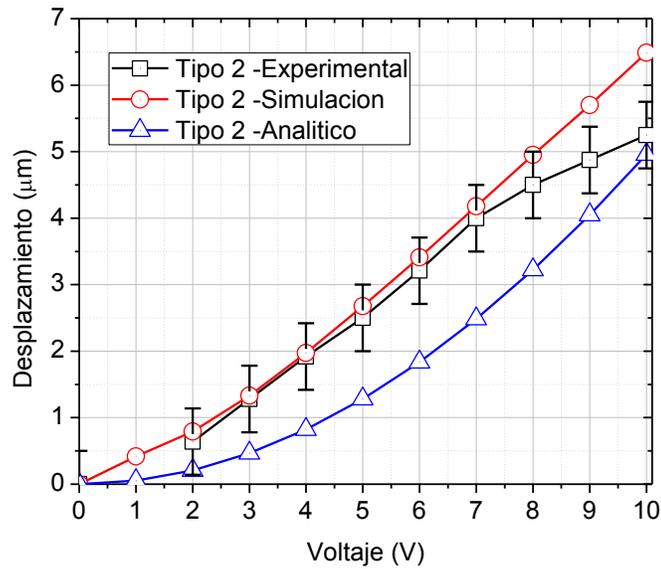


Fig. 3.37 Desplazamiento contra voltaje del actuador tipo 2.

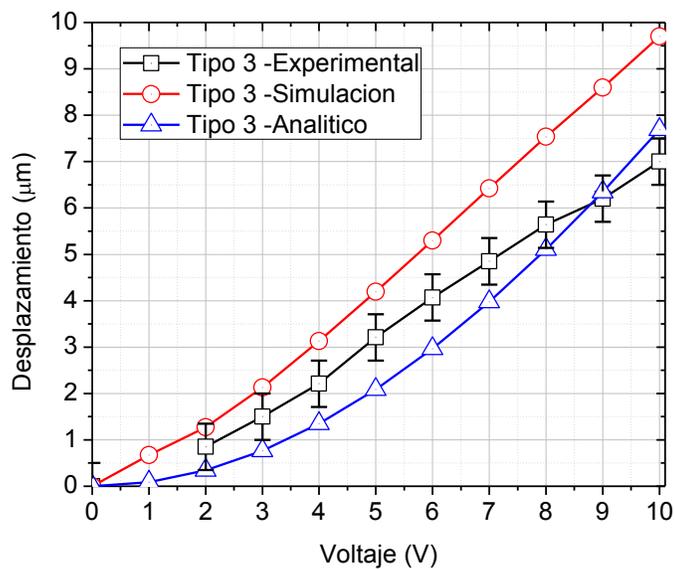


Fig. 3.38 Desplazamiento contra voltaje del actuador tipo 3.

En las figuras anteriores se observa que el desplazamiento obtenido experimentalmente presenta cierta tendencia en voltajes hasta los 7 u 8 volts aproximadamente. Después de este voltaje la tendencia del desplazamiento generado disminuye, y es más notorio en la Fig. 3.37. El haber alcanzado un

máximo en la elasticidad del material es una posible limitante que genere el comportamiento mostrado. Esto significaría que a pesar de que se aplique un potencial mayor a la estructura del actuador para que la corriente aumente y se genere una mayor cantidad de calor, el material ya no se elonga con la misma magnitud que con corrientes menores correspondientes a voltajes por debajo de los 7 u 8 volts. .

La Fig. 3.38 muestra el comportamiento del actuador tipo 3 en donde a diferencia de las figuras anteriores, el resultado experimental presenta un comportamiento conforme a lo analítico y lo simulado solamente hasta los 8 volts. Después de este voltaje el desplazamiento generado ya no aumenta con la misma proporción y el resultado a 10 volts se observa por debajo del modelo analítico. Este comportamiento es el mismo que se presenta en las Fig. 3.36 y 3.37.

3.4.2. Temperatura

En la Fig. 3.39 se muestra la comparación de los resultados analíticos y simulados para la temperatura en los actuadores. Se puede observar que para cada caso de análisis en particular, analíticos y de simulación, los valores son los mismos para todos los tipos de chevron. Existe una diferencia entre los resultados presentados en las gráficas, ya que los analíticos representan un promedio de temperatura en la estructura, y los de simulación representan la temperatura máxima en las estructuras.

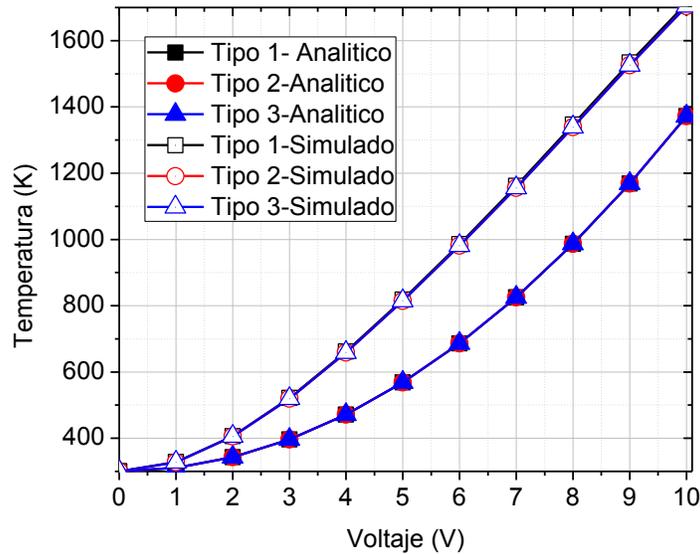


Fig. 3.39 Temperatura máxima obtenida por simulación comparada con la temperatura promedio del método analítico.

3.4.3. Fuerza

La Fig. 3.40 muestra la fuerza que existe en la estructura del actuador. Se observa que ambas curvas tienden a coincidir, lo que resulta en una buena aproximación de la fuerza en el rango utilizado. Para poder observar mejor las diferencias para cada tipo de actuador se presentan sus gráficas de forma separada en la Fig. 3.41.

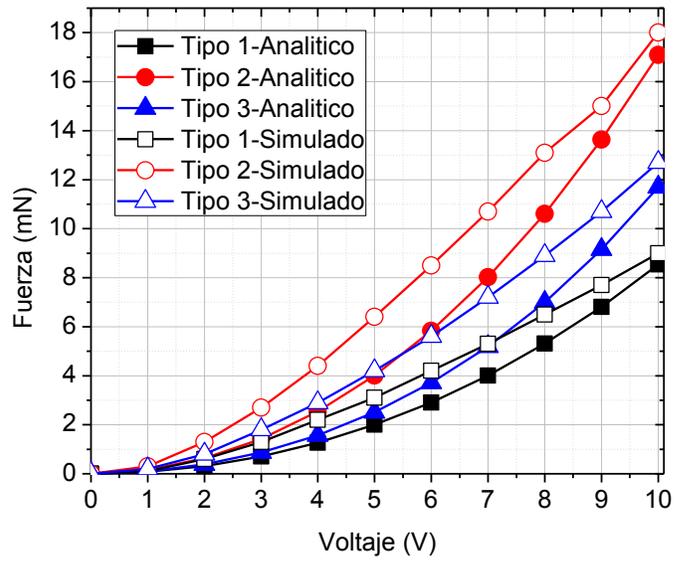


Fig. 3.40 Comparación de la fuerza existente en el actuador.

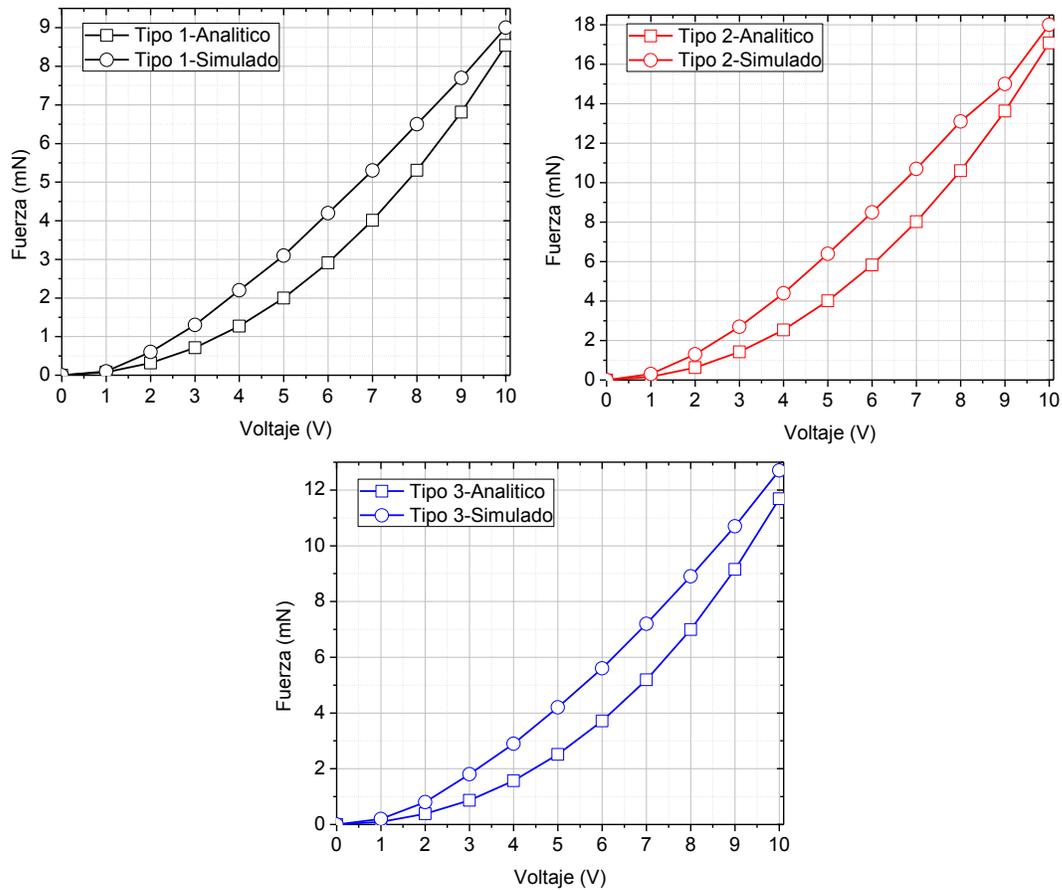


Fig. 3.41 Fuerza contra voltaje para cada tipo de actuador.

3.5. Técnica Para Medir Fuerza

Con el fin de poder medir la fuerza que ejercen los actuadores tipo chevron se realizó la investigación de las propiedades piezoresistivas del polisilicio, utilizado como material estructural. Las bases por las cuales se realizó esta sección se encuentran en el Apéndice C. En la Fig. 3.42 se muestran las diferentes barras de prueba con las cuales se realizó este análisis. Se definió un área de $30\mu\text{m}^2$ sobre la cual aplicar una fuerza de forma transversal a las barras. Esta área se utilizó ya que es la misma que presenta la punta del vástago en los actuadores fabricados del chip PolyMEMS V-B. También se aplicó una fuerza longitudinal fijando uno de los extremos de la barra y aplicando la fuerza en el otro extremo.

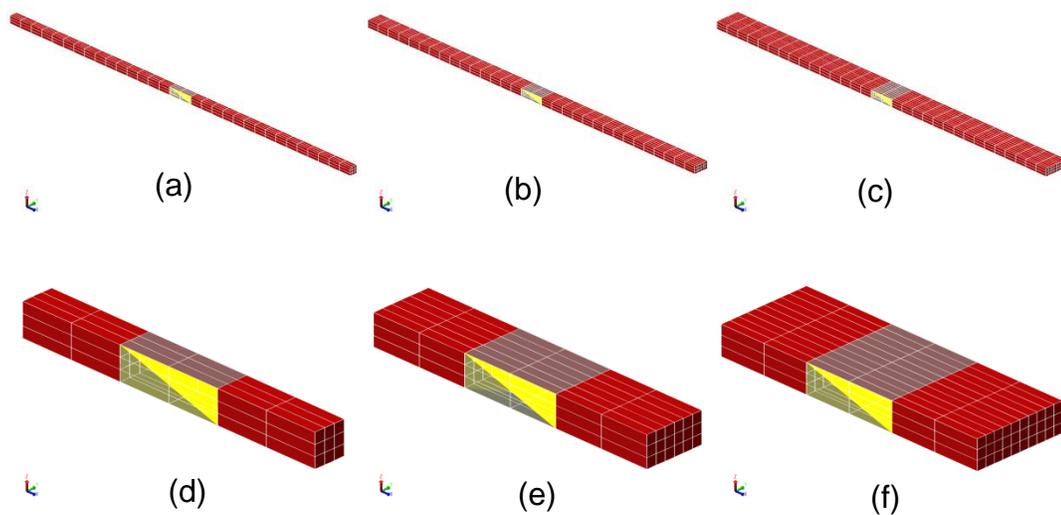


Fig. 3.42 Estructuras de prueba para conocer el efecto piezoresistivo del material. El ancho y la longitud de cada estructura son: (a) $3\mu\text{m} / 160\mu\text{m}$, (b) $6\mu\text{m} / 160\mu\text{m}$, (c) $10\mu\text{m} / 160\mu\text{m}$, (d) $3\mu\text{m} / 30\mu\text{m}$, (e) $6\mu\text{m} / 30\mu\text{m}$, (f) $10\mu\text{m} / 30\mu\text{m}$.

Cada una de estas estructuras representa por sí mismas una resistencia determinada por sus dimensiones. En la Tabla 3.3 se presentan los valores resistivos de las estructuras de la Fig. 3.42. La fuerza ejercida

sobre las estructuras fue incrementada de 0 hasta 4mN, y el porcentaje de variación de la resistencia respecto de su valor original (de la Tabla 3.3), debido al aplicar la fuerza de forma transversal, se presenta en la Tabla 3.4.

Tabla 3.3 Valores resistivos de las estructuras de la Fig. 3.42.

Estructura	Resistencia (Ω)
(a) 3 μ m de ancho y 160 μ m de longitud	177.77
(b) 6 μ m de ancho y 160 μ m de longitud	88.88
(c) 10 μ m de ancho y 160 μ m de longitud	53.33
(d) 3 μ m de ancho y 30 μ m de longitud	33.33
(e) 6 μ m de ancho y 30 μ m de longitud	16.66
(f) 10 μ m de ancho y 30 μ m de longitud	10

Tabla 3.4 Comportamiento piezoresistivo al aplicar una fuerza transversal.

Fuerza (mN)	% de variación de la resistencia					
	(a)	(b)	(c)	(d)	(e)	(f)
0.1	-2.71%	-0.21%	-0.13%	-0.18%	-0.07%	-0.20%
1	-45.01%	-13.36%	-1.21%	-8.58%	-0.72%	-0.30%
2	--	-45.65%	-4.16%	-31.92%	-2.43%	-0.60%
3	--	--	-9.00%	-75.93%	-5.25%	-1.00%
4	--	--	-15.88%	--	-9.17%	-1.70%
5	--	--	-24.11%	--	-13.70%	-2.40%

De la tabla 3.4 se puede observar que existen algunos cambios muy drásticos del valor resistivo de la estructura, y también se observa que existen estructuras en las que no se presentan todos los resultados. Esto es debido a que el valor obtenido aumenta en más de un 150%, en lugar de

mantener una misma tendencia, lo cual sugiere que la estructura sufrirá un daño permanente (una posible destrucción).

En la Tabla 3.5 se presentan los resultados de aplicar una fuerza longitudinal. Se observa una relación similar entre las estructuras con misma área de sección transversal sin importar su longitud.

Tabla 3.5 Comportamiento piezoresistivo al aplicar una fuerza longitudinal.

Fuerza (mN)	% de variación de la resistencia					
	(a)	(b)	(c)	(d)	(e)	(f)
0.1	0.10%	0.067%	0.03%	0.09%	0.06%	0.04%
1	0.76%	0.40%	0.23%	0.75%	0.42%	0.25%
2	1.41%	0.74%	0.44%	1.41%	0.72%	0.45%
3	2.07%	1.06%	0.65%	2.04%	1.08%	0.65%
4	2.72%	1.39%	0.83%	2.67%	1.38%	0.84%
5	3.30%	1.68%	1.02%	3.24%	1.68%	1.02%

Para tener una mayor referencia sobre la influencia de la fuerza en las estructuras se presenta en la Tabla 3.6 la deformación provocada en la estructura debida a la fuerza aplicada. Es notorio que la deformación es pequeña comparada con los desplazamientos generados comúnmente por un actuador tipo chevron.

Con estos datos es suficiente para realizar una primera aproximación de un indicador de fuerza. Analizando los porcentajes de variación de resistencia y la deformación que sufren las estructuras, se puede determinar que si la fuerza se aplica de forma transversal se requieren estructuras con dimensiones grandes en el ancho y pequeñas de longitud. Para el caso en el que la fuerza se aplica de forma longitudinal se observa que con un área de sección transversal menor se obtiene una mayor variación resistiva, sin

importar la longitud del material. Este comportamiento es el esperado de acuerdo a la ecuación (1.2) que se repite a continuación:

$$\sigma_m = F/A.$$

Tabla 3.6 Deformación de las estructuras cuando se ven sometidas a una fuerza externa. La dirección de la deformación es en dirección de la fuerza aplicada.

Fuerza (mN)		Desplazamiento Provocado por la Fuerza (μm)					
		(a)	(b)	(c)	(d)	(e)	(f)
Transversal	0.1	0.93	0.18	0.04	0.005	0.0019	0.00145
	1	5.14	1.96	0.52	0.059	0.016	0.00718
	2	--	3.37	0.99	0.11	0.03	0.0129
	3	--	--	1.45	0.16	0.044	0.0186
	4	--	--	1.9	--	0.058	0.0243
	5	--	--	2.3	--	0.07	0.0294
Longitudinal	0.1	0.031	0.026	0.024	0.006	0.005	0.004
	1	0.136	0.078	0.056	0.025	0.015	0.01
	2	0.24	0.131	0.087	0.045	0.025	0.016
	3	0.345	0.183	0.119	0.065	0.035	0.023
	4	0.45	0.236	0.15	0.085	0.045	0.029
	5	0.54	0.283	0.178	0.103	0.054	0.034

El esfuerzo en una estructura dependerá de la magnitud de la fuerza y del área de sección transversal en la que se aplica la carga. Este fenómeno no se ve reflejado cuando se aplica una fuerza transversal. Debido a esto se eligió utilizar el efecto piezoresistivo de forma longitudinal, ya que se pueden utilizar dimensiones pequeñas y la variación de la resistencia es entonces dependiente del ancho de la estructura, además que se observó una mejor proporción en el cambio de resistencia conforme aumentaba la fuerza.

El diseño del indicador será para una fuerza de 5mN y se utilizarán 2 estructuras de 3 μ m de ancho y 30 μ m de largo. Teniendo conciencia de la fuerza que deseamos aplicar, se diseñó un actuador tipo chevron que pudiera ejercer una fuerza de empuje de 5mN generando, al mismo tiempo, un desplazamiento mayor a los 3 μ m. Se considerará que los 3 μ m será la dimensión mínima, además que las paredes de las estructuras MEMS contarán con un ángulo de 90°, es decir, las estructuras podrán ser prismas rectangulares (sección transversal cuadrada). En la Fig. 3.43 se presenta el indicador de fuerza propuesto y el actuador tipo chevron de 10 brazos con un ángulo inicial de 4°. El actuador y el indicador, se encuentran separados inicialmente 3 μ m, para asegurarnos que el actuador pueda generar un desplazamiento.

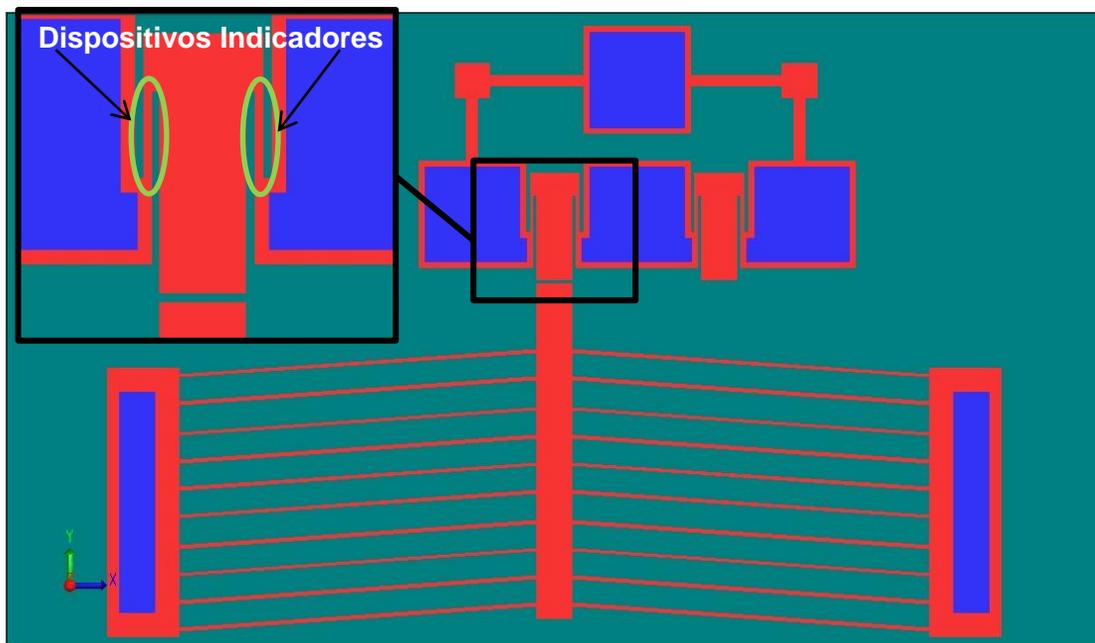


Fig. 3.43 Indicador de fuerza en puente de wheatstone, colocado a 3 μ m del actuador tipo chevron.

Utilizando la tecnología ECMOS-INAOE se diseñó un OPAMP CMOS de terminación simple con el propósito de utilizarlo como circuito amplificador de diferencia, tal y como se muestra en la Fig. 3.44. Los detalles sobre el

diseño del amplificador se encuentran dentro del Apéndice C. La ganancia de este circuito está dada por los valores de las resistencias, de acuerdo con la ecuación (3.3).

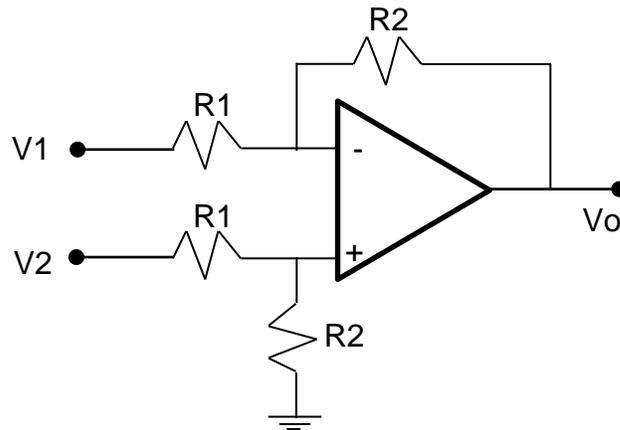


Fig. 3.44 Esquema de un amplificador de diferencia.

$$A_v = -\frac{R_2}{R_1} \quad (3.3)$$

En la Fig. 3.45 se presenta el esquema del amplificador utilizado, donde se observa que está conformado por 2 etapas de ganancia compensadas, y un buffer de salida.

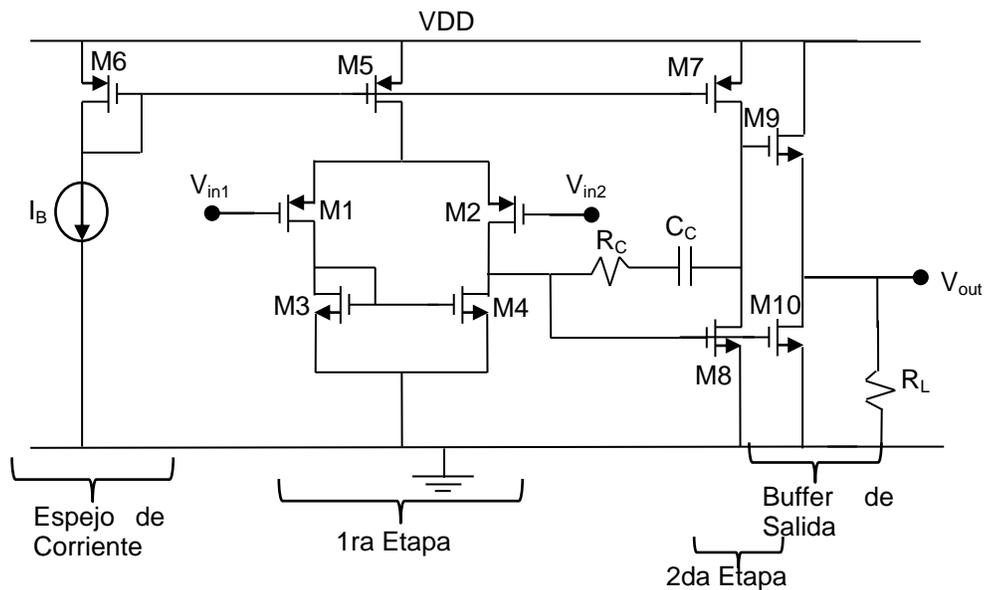


Fig. 3.45 Esquema de un OPAMP CMOS de 2 etapas con buffer.

Analizando la estructura del indicador se puede observar que idealmente se considera una resistencia de 66.66Ω (dos estructuras de 33.33Ω en serie). Al momento de que el actuador ejerza una fuerza de empuje de 5mN , en cada dispositivo indicador se ejercerá una fuerza de 2.5mN , por lo que el porcentaje de variación de la resistencia en cada indicador será de 1.65% . La resistencia total del indicador es de 66.66Ω y su valor al momento de aplicar los 5mN será de 67.75Ω . El voltaje de alimentación del puente de wheatstone se utilizó de 1 volt para que la potencia en cada elemento resistor no fuera muy elevada. Esta condición limita el voltaje de salida del puente, sine mbargo con ayuda del amplificador se pueden detectar estas variaciones. Primero se obtuvo la salida de voltaje del puente y resulto ser de un máximo de 4mV . Con esta referencia se utilizó una configuración del amplificador con un valor de $R_2=8\text{M}\Omega$ y $R_1=1\text{K}\Omega$. Al formar un puente de wheatstone con resistencias iguales de 66.66Ω , y variar una de ellas (representando el indicador de fuerza), la diferencia de voltaje

del puente de wheatstone y la salida del amplificador se presentan en la Fig. 3.46.

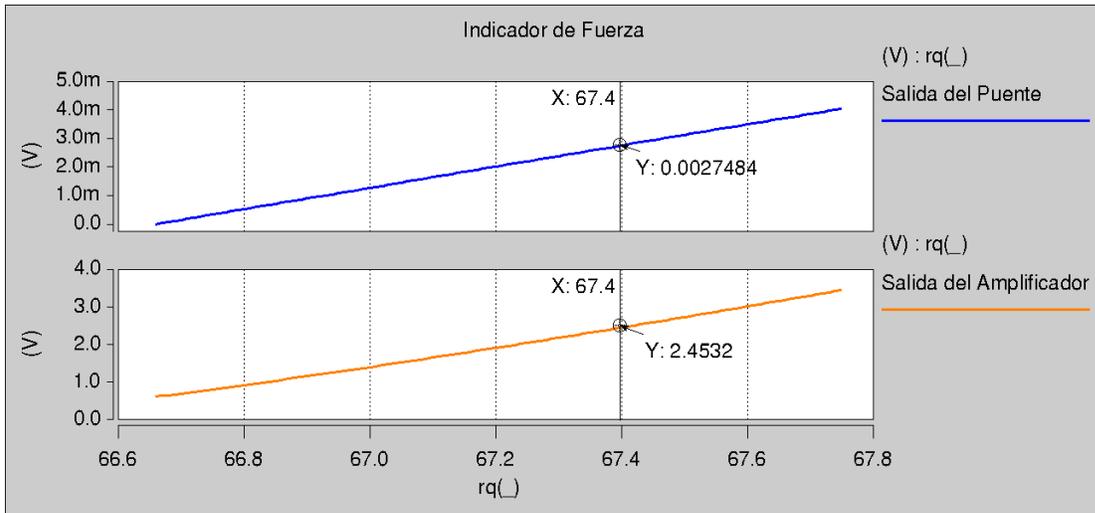


Fig. 3.46 Diferencia de voltaje de la salida del puente de wheatstone (azul). Salida del amplificador (naranja) con ganancia aproximada de 1000 veces la entrada.

Con estos resultados queda claro que se puede detectar el cambio de resistencia provocado por la fuerza de empuje de un chevron. El error generado en la ganancia esperada del amplificador se debe a que no es un amplificador ideal, sin embargo realiza la función para la que fue diseñado.

3.6. Resumen

En este capítulo se presentaron los resultados que indican el comportamiento de los actuadores mediante modelos analíticos, de simulación y experimentales. Los resultados analíticos brindaron información sobre la variación de los parámetros, y fue posible observar cómo es que varía el comportamiento del actuador cuando se varía cada uno de sus parámetros.

A partir de los análisis sobre la influencia del vástago se corroboró un circuito eléctrico base que representa la estructura eléctrica del chevron, con el cual se podrá realizar algún diseño particular en el que se considere importante las dimensiones del vástago.

El utilizar un modelo que explique cómo es que funciona un actuador tipo chevron lleva consigo ciertas idealidades. Sin embargo se realizó lo posible por incluir las propiedades de los materiales, así como la definición de las estructuras reales. Sin embargo los modelos, junto con los resultados experimentales siguen la misma tendencia, lo que nos indica que es una buena aproximación cuando se pretenda fabricar un diseño específico. Existe un comportamiento en los actuadores fabricados en donde a partir de 7 u 8 volts, la tendencia a aumentar el desplazamiento generado disminuye, y eso es algo que ninguno de los dos modelos predice.

La diferencia de magnitud en el modelo experimental respecto de la simulación se puede atribuir a diferentes propiedades de los materiales, a detalles estructurales en los actuadores, o inclusive a diferentes formas y/o magnitudes de transferencia de calor.

Respecto del indicador de fuerza, se realizó una primera aproximación en donde se detectó una fuerza ejercida de hasta 5mN, con la posibilidad de ampliar o disminuir el margen de fuerza a medir con tan solo redimensionar el indicador de fuerza. Este mismo diseño es útil para todos aquellos actuadores que generen desplazamientos de más de 3 μ m para asegurar un contacto con el indicador. Como propuesta, si se desean medir fuerzas pequeñas (del orden de μ N), se deberá realizar un análisis de piezoresistividad con diferentes geometrías que permitan incrementar la variación de la resistencia.

Capítulo 4. Conclusiones y Trabajo Futuro

Futuro

4.1. Conclusiones

En la presente tesis se presentó la caracterización de micro-actuadores térmicos tipo chevron, fabricados mediante la tecnología PolyMEMS-INAOE desarrollada en el Laboratorio de Innovación en MEMS (LI-MEMS) y de Microelectrónica del INAOE.

La caracterización ha sido realizada mediante la utilización de modelos sencillos: analíticos, de simulación y experimentales.

La caracterización de los micro-actuadores se centra en la determinación de los parámetros de desplazamiento y fuerza (principales figuras de mérito), producto de la variación térmica en los micro-actuadores como resultado de la aplicación de un voltaje determinado.

Los resultados analíticos, de simulación y experimentales concuerdan muy bien dentro de un 10% de error en los valores máximos de voltaje, con un mínimo dado por el modelo analítico y un máximo determinado por el modelo de simulación. El modelo analítico considera la distribución de temperatura de forma lineal para obtener el desplazamiento, y para la fuerza se utiliza álgebra vectorial, lo que resulta en idealidades que contribuyen al error antes mencionado. En el modelo de simulación, por su parte, la principal forma de transferencia de calor se tiene que emular, y el software no utiliza el análisis adecuado para los cálculos. La última fuente de error es sin duda las propiedades del polisilicio, de las cuales un 50% fueron obtenidas de la literatura y el resto presentan variaciones considerables (de acuerdo

con el análisis de variación de parámetros), que afectan el desempeño del actuador.

Los resultados obtenidos muestran que es necesario realizar una caracterización más a fondo que considere modelos más completos y mediciones experimentales con mejores métodos de extracción de las diferentes figuras de mérito.

Finalmente, debido a la dificultad que representa medir experimentalmente la fuerza de los actuadores chevron, se hace una propuesta en primera aproximación que utiliza un transductor piezoresistivo y un circuito electrónico, con el fin de medir a través de una corriente o voltaje la magnitud de esta fuerza. Esta propuesta permitirá simultáneamente probar la tecnología, en el sentido estricto de la palabra, de MEMS que se desarrolla en el INAOE.

4.2. Trabajo Futuro y Sugerencias

La caracterización de estructuras tipo chevron es un procedimiento que al menos, en este momento, se debe llevar a cabo junto con un modelo de simulación. Es por ello que se propone como trabajo a futuro lo siguiente:

1. Caracterizar el material estructural (polisilicio) de la tecnología PolyMEMS.
 2. Realizar una caracterización utilizando modelos más completos con el fin de obtener mejores resultados con un margen de error menor.
 3. Realizar un análisis de vibraciones a las estructuras fabricadas para pensar en aplicaciones de RF, o en aquellas en que se presenten
-

vibraciones mecánicas que pudieran ocasionar la destrucción del actuador.

4. Diseñar un amplificador que detecte señales en un rango de microvolts y que presente una salida riel a riel, para optimizar la técnica de medición de fuerza.
5. Realizar un análisis exhaustivo sobre las propiedades piezoresistivas del polisilicio, enfocado principalmente a geometrías para detectar eficientemente diferentes rangos de fuerza.

Algunas sugerencias son:

1. Desarrollar y/o adquirir un modelo de simulación adecuado que brinde una interface entre las estructuras y circuitería electrónica para realizar análisis completos de MEMS.
 2. Implementar un sistema a base de una cámara de alta definición controlada por software para lograr medir el desplazamiento de los actuadores con una mayor precisión y rapidez, ya que el método utilizado requiere de bastante tiempo para realizarse.
 3. En medida de lo posible, adquirir sistemas adecuados para la manipulación de micro-estructuras sin la necesidad de colocarlas en PCB's, energizando los actuadores mediante puntas de prueba.
 4. En lo posible procurar que los próximos diseños a caracterizar sean realizados con contactos en la periferia del chip, para evitar que los alambres crucen y dificulten la caracterización.
-

Apéndice A: Cómo Simular Actuadores de Efecto Joule en COVENTOR Ware.

El software CoventorWare es una herramienta bastante amplia con la cual podemos modelar estructuras y realizar análisis electrostáticos, electrodinámicos, térmicos, mecánicos, de fluidos etc. Los resultados se pueden analizar por medio de tablas, gráficas e inclusive con un modelo en 3D para poder observar de mejor forma los resultados. El software se puede utilizar mediante dos flujos de diseño [32], tal y como se muestra en la Fig. A.1. El flujo comienza con la información sobre el proceso de fabricación que se desee utilizar, y las propiedades de los materiales necesarios en el mismo. Posteriormente se tiene la opción de elegir que flujo de diseño es más conveniente para el propósito particular. ARCHITECT es un módulo que utiliza esquemas y bloques que conforman un nivel de sistema que se próxima a lo que es el diseño de MEMS. Por el otro lado DESIGNER [33], utiliza un flujo de diseño físico más convencional. En este trabajo se utilizó DESIGNER para realizar el modelado.

Este software cuenta con muchas ventajas cuando se piensa en diseñar un sistema micro-electro-mecánico, sin embargo deben de ser bien manipuladas para que los resultados se aproximen mejor con la realidad; para lograrlo se necesita detallar lo mejor posible el flujo de diseño y de simulación del mismo. A continuación se comenzara detallando el flujo de diseño utilizado en este trabajo.

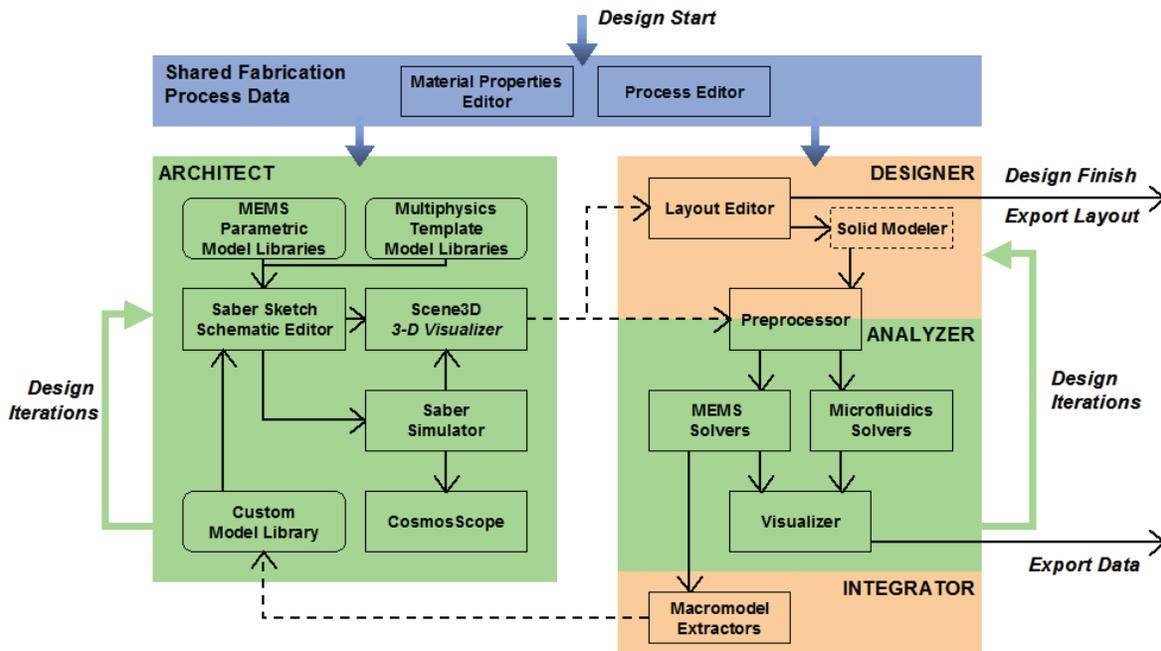


Fig. A.1 Flujo de diseño en CoventorWare.

Primero debe de especificarse un proceso de fabricación por medio de la herramienta “Editor de Procesos”, en donde se definen las capas de los materiales utilizados con sus respectivos espesores, las máscaras para definir los patrones, el tipo de resina a utilizar, el tipo de oblea etc. La forma en la que se detalla el proceso dentro del software se muestra en la Fig. A.2.

Number	Step Name	Layer Name	Material Name	Thickness	Mask Name	Photoresist	Depth	Mask Offset	Sidewall Angle
0	Substrate	Substrate	SILICON_100	600	SubstrateMask				
1	Oxido Aislante	Oxido	OXIDE	2					
2	Película hidrofóbica	Poly	POLYSILICON	0.5					
3	Material de Sacrificio	PSG	PSG	2					
4	Bases de Estructura				Ventanas	-		0	0
5	Material Estructural	Poly Dopado	POLYSILICON	3					
6	Definir Estructura				Micro_Estructura	+		0	20
7	Metalizacion	Metal	ALUMINIUM	1					
8	Definir contactos				Contacto	+		0	0
9	Delete	PSG							

Fig. A.2 Proceso de fabricación que emula al proceso PolyMEMS V-B.

Una vez definido el proceso se deben de especificar las propiedades de los materiales a utilizar. El software cuenta con una lista predefinida de materiales, sin embargo cada proceso de fabricación tiene sus diferentes características, por lo que se añadió un nuevo material al que se le nombró: Poly2 (Tabla A.1), el cual cuenta con las propiedades necesarias que se utilizaran para formar las estructuras de los actuadores.

Tabla A.1 Propiedades del polisilicio utilizadas en el simulador.

Propiedad	Tipo de dato	Poly	Unidades
Constante de elasticidad	Elastic-Iso	E=162 Poisson=0.23	GPa
Densidad	Constant-Scalar	2.23e-15	kg/ μm^3
Stress	Anlso	Sx=-10 Sy=-10 Sz=0	MPa
TCE	Constant-Scalar	2.8e-6	1/K
Conductividad térmica	Constant-Scalar	3.3e+7	pW/ μmK
Calor específico	Table-T	Tabla A.3	J/kgK
Conductividad eléctrica	Table-T	Tabla A.2	S/ μm

Cada una de estas propiedades puede ser definida con un valor constante, con una tabla de valores, o con alguna expresión matemática. Para que el simulador genere una respuesta mucho más aproximada es necesario que se le especifique, con el mayor detalle, las propiedades de los materiales que intervienen en la simulación. Se indicó mediante tablas la dependencia con la temperatura del calor específico y la conductividad eléctrica.

La resistividad se obtuvo mediante la siguiente expresión:

$$\rho(T) = \rho_0[1 + \xi(T - T_0)], \quad (\text{A.1})$$

donde ρ_0 es la resistividad a temperatura ambiente (T_0), ξ es el coeficiente de resistividad térmica (TCR), y T es la temperatura del material a la que se desea calcular la resistividad. De la ecuación A.1 conocemos ρ_0 de acuerdo con [2], dando un valor de $10 \Omega \cdot \mu\text{m}$, sin embargo de acuerdo al proceso de fabricación los valores pueden oscilar entre $4 \Omega \cdot \mu\text{m}$ y $14 \Omega \cdot \mu\text{m}$.

En [34] se ha medido el TCR mediante estructuras micro-mecánicas, en [35] se ha estudiado el efecto que tienen los diferentes tipos de dopados y sus concentraciones. Además encontramos valores entre $1.1 \times 10^{-3} \text{ K}^{-1}$ y $1.3 \times 10^{-3} \text{ K}^{-1}$ en [36, 37 y 38]. En el instituto no se ha realizado ningún tipo de caracterización del material utilizado en las micro-estructuras, sin embargo se realizó un trabajo en particular donde se obtiene el TCR para el polisilicio [39]; la diferencia con el material del proceso PolyMEMS, es la adición de dopantes y probablemente el tamaño de grano, sin embargo se considerará el valor obtenido en [39] que es de $1.18 \times 10^{-3} \text{ K}^{-1}$ para el propósito de este trabajo. Cabe mencionar que este valor se encuentra en el rango utilizado en otros estudios para materiales similares al del proceso PolyMEMS. Con estos datos se pudo conocer la dependencia con la temperatura de la resistividad y al obtener su recíproco se genera la tabla A.2, donde se muestran los datos que se ingresaron al simulador.

Tabla A.2 Dependencia con temperatura de la conductividad.

Temperatura (K)	Conductividad (S/μm)
300	0.1
400	0.089
500	0.080
600	0.073
700	0.067
800	0.062
900	0.058
1000	0.054
1500	0.041
1600	0.039

La otra propiedad de la que se especificó la dependencia con la temperatura fue el calor específico, que de acuerdo con [40] se puede aproximar con un margen de error del 5% con la siguiente expresión:

Entre 292 K y 700 K:

$$c = (1.976362 \times 10^{-6})T^3 - (3.766786 \times 10^{-3})T^2 + (2.622954)T + 2.149586 \times 10^{-2},$$

y entre 701 K y 1685 K:

$$c = -(3.377784 \times 10^{-5})T^2 - (2.388945 \times 10^{-1})T + 7.324063 \times 10^2. \tag{A.2}$$

Así con la ecuación A.2 se obtiene la tabla A.3, la cual se introdujo en los datos del material especificado en el simulador.

Tabla A.3 Dependencia con temperatura del calor específico.

Temperatura (K)	Calor específico (J/kgK)
300	713
400	785
500	832
600	849
700	866
800	901
900	920
1000	937
1500	1014
1600	1428

El siguiente paso es realizar un patrón geométrico de la estructura de interés. Este puede realizarse en el editor de patrón geométrico del software, o bien importando un archivo GDS previamente definido. En el editor del patrón geométrico debemos utilizar las máscaras previamente definidas en el proceso para especificar el material del cuál estarán conformadas. En la Fig. A.3 se muestra un ejemplo de patrón geométrico generado en COVENTOR, donde las líneas en rojo representan la estructura suspendida, en azul se dibujaron los contactos metálicos que están sobre la mascarilla que representa las ventanas que forman las anclas del material estructural al sustrato.

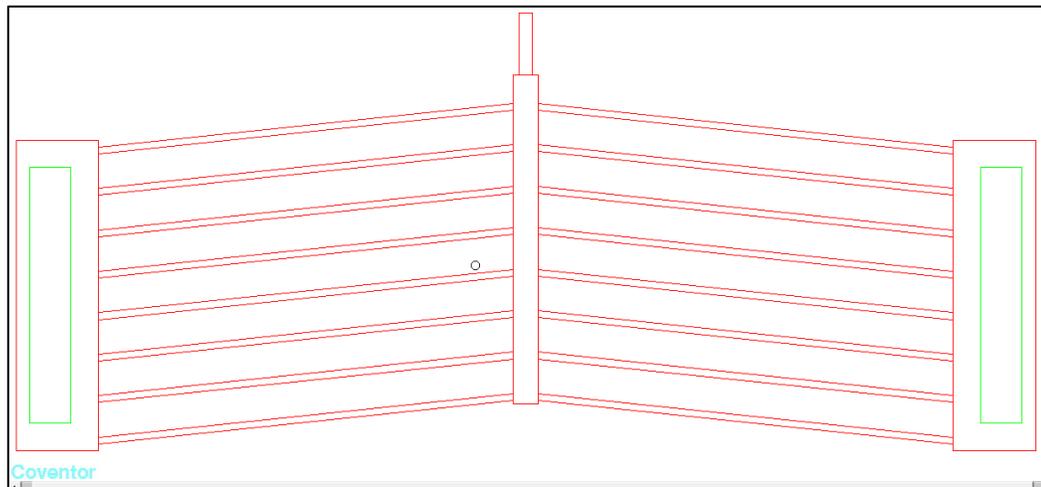


Fig. A.3 Patrón geométrico de un chevron.

El siguiente paso en el flujo de diseño es generar el modelo en 3D donde se debe definir una malla para poder realizar el análisis. Los materiales que no influyan en la simulación se pueden ocultar y solo los materiales a utilizar contarán con una malla que para este trabajo es de forma tetraedro parabólico. Este tipo de malla es adecuada para el análisis (electro-termo-mecánico), aunque lo ideal sería utilizar una malla de tipo hexaedro, sin embargo no es posible generarlo ya que este tipo de malla requiere ángulos de 90°, y los actuadores tipo chevron siempre presentan un ángulo agudo (en cada extremo de los brazos del actuador).

Cada superficie que influya en la simulación se debe nombrar para su que el software la tenga en consideración. En la Fig. A.4 se muestran las superficies y los nombres utilizados. En esta parte del flujo de diseño se puede volver a designar las propiedades de algún material y los cambios sólo serán válidos para el modelo determinado.

Posteriormente se procede a definir el tipo de análisis que se desea realizar. Para este trabajo se utilizó la herramienta MemMech y el tipo de

análisis realizado es electro-termo-mecánico, mediante el cual se obtiene la temperatura en la estructura y el desplazamiento generado. También se obtiene la fuerza de empuje pero con condiciones de frontera diferentes. La fuerza total se obtiene con un análisis termo-mecánico.

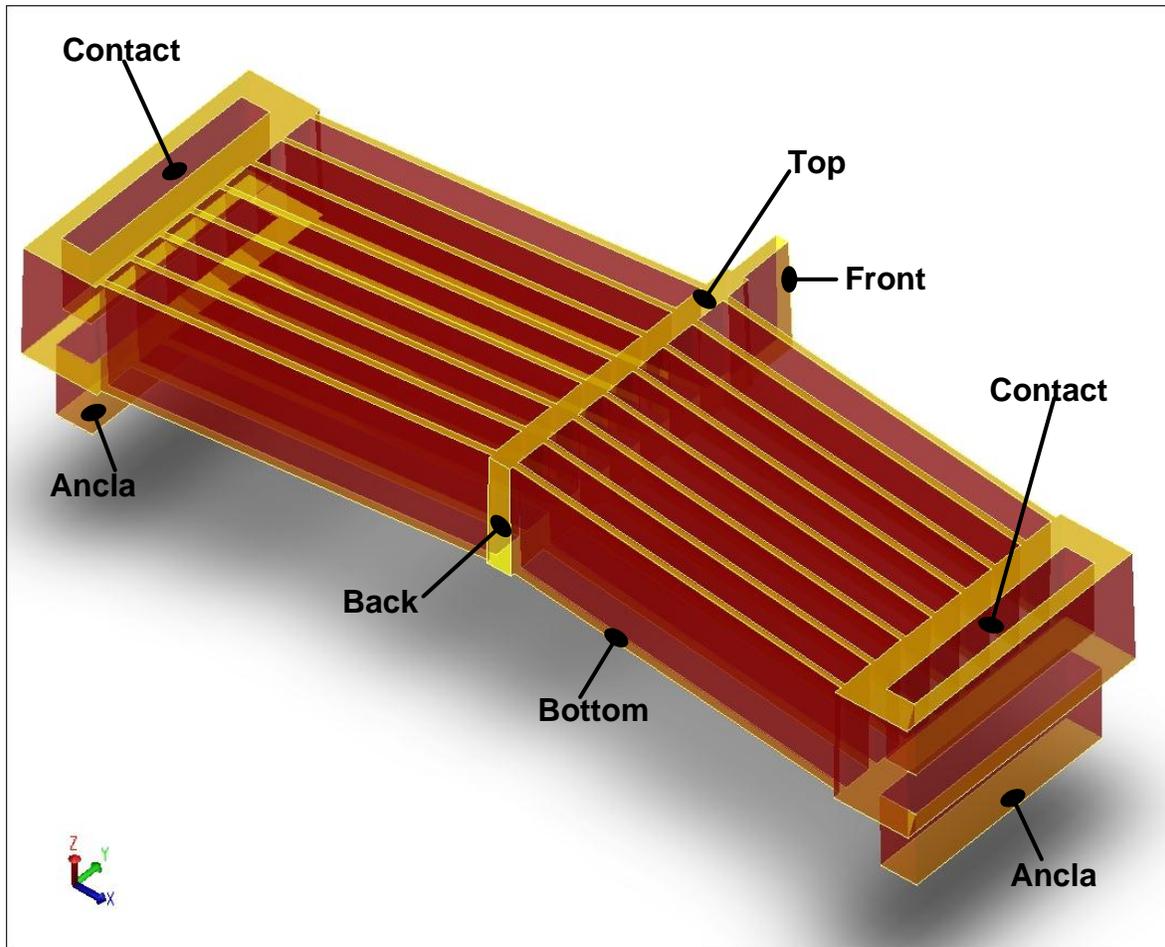


Fig. A.4 Modelo 3D de un chevron donde se muestran las superficies y sus nombres.

Se debe tener conciencia de lo que se desea simular y bajo que fenómenos funciona la estructura a simular, ya que el simulador generará un resultado con las condiciones que se le indiquen, y en ocasiones esas condiciones no son las adecuadas o las suficientes para obtener el resultado deseado. Un ejemplo de esto puede ser que no se defina algún parámetro

externo a la estructura principal, como puede ser la temperatura ambiente, por lo que existirá un error térmico ya que si no se define una temperatura de referencia, el simulador considera 0K como temperatura ambiente.

Una vez que se entiende lo que se desea simular y se ha seleccionado el tipo de análisis se deben especificar las condiciones de frontera tal y como se muestra en la Fig. A.5, donde lo enmarcado en verde es lo necesario para análisis de desplazamiento por efecto joule, y lo enmarcado con naranja es para determinar la fuerza. Después de esto se pueden añadir análisis de variación de ciertos parámetros, variar las condiciones de frontera, o algunas características del material. Todo eso depende del análisis que se desee realizar.

Para obtener el funcionamiento de un actuador de efecto Joule se deben detallar las siguientes condiciones de frontera:

- Fijar las superficies Ancla1 y Ancla2 para que el simulador entienda que esas superficies se encuentran sujetas al sustrato.
 - Indicar una temperatura de referencia (temperatura del medio ambiente), que para estructuras ancladas se indica generalmente en los contactos (pueden ser las anclas), para que el simulador entienda que en esas zonas existe un sumidero de temperatura.
 - Aplicar una diferencia de potencial entre los contactos.
 - Indicar las pérdidas de temperatura.
 - Para calcular la fuerza total se define una fuerza en la parte posterior del actuador (Back) que se va incrementando para comparar el desplazamiento obtenido con el que se genera al aplicar un potencial.
 - Dado que la fuerza no se puede aplicar en un volumen, se asegura que el desplazamiento generado sea en la dirección esperada, por lo que se fijan las superficies excepto en la dirección del movimiento.
-

Esto se debe a que al aplicar una fuerza en una superficie, para el simulador no es suficiente información y realiza cálculos donde el material puede llegar a flexionarse en dirección no deseadas. Hay que considerar hasta qué punto es válido fijar o no una superficie, y eso dependerá del tipo de actuador y de su geometría.

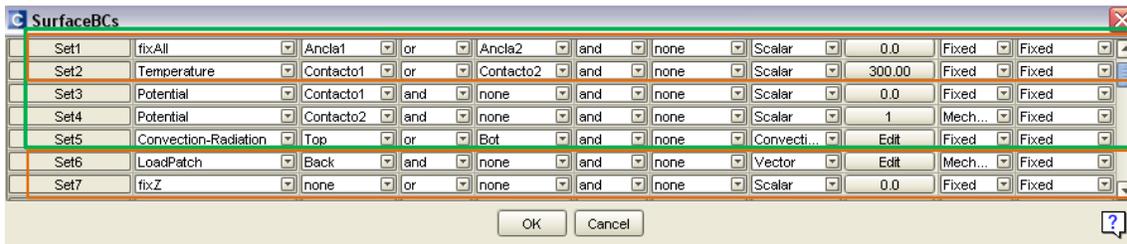


Fig. A.5 Condiciones de frontera para simular un actuador tipo chevron.

Una vez realizada la simulación se pueden observar los resultados mediante tablas o gráficas, así como visualizar el efecto del análisis en el modelo 3D. En la Fig. A.6 se muestra una tabla de datos arrojada por el simulador y en la Fig. A.7 se presenta el modelo 3D bajo los efectos del análisis.

Step	t1	Node	Displacement_Maximum	Displacement_Minimum	Node X Displacement_Maximum	Node X Displacement_Minimum	Node Y Displacement_Maximum
Step 1	1		3.528438E-01	3.491671E-35	1.09027E-02	-1.089176E-02	3.52721E-01
Step 2	2		6.240236E-01	3.481393E-35	1.843836E-02	-1.846547E-02	6.239549E-01
Step 3	3		1.022534E00	3.469141E-35	3.124871E-02	-3.122034E-02	1.022491E00
Step 4	4		1.503804E00	3.458228E-35	4.700955E-02	-4.699262E-02	1.503772E00
Step 5	5		2.037099E00	3.45271E-35	6.477791E-02	-6.470516E-02	2.037083E00
Step 6	6		2.601486E00	3.45007E-35	8.397925E-02	-8.406098E-02	2.601474E00
Step 7	7		3.187208E00	3.451252E-35	1.04593E-01	-1.047833E-01	3.187199E00
Step 8	8		3.8003E00	3.45374E-35	1.26563E-01	-1.268371E-01	3.800293E00
Step 9	9		4.413178E00	3.458547E-35	1.491049E-01	-1.493667E-01	4.413171E00
Step 10	10		5.007742E00	3.513208E-35	1.704957E-01	-1.707536E-01	5.007712E00

Fig. A.6 Datos del desplazamiento generado, obtenidos al simular un chevron.

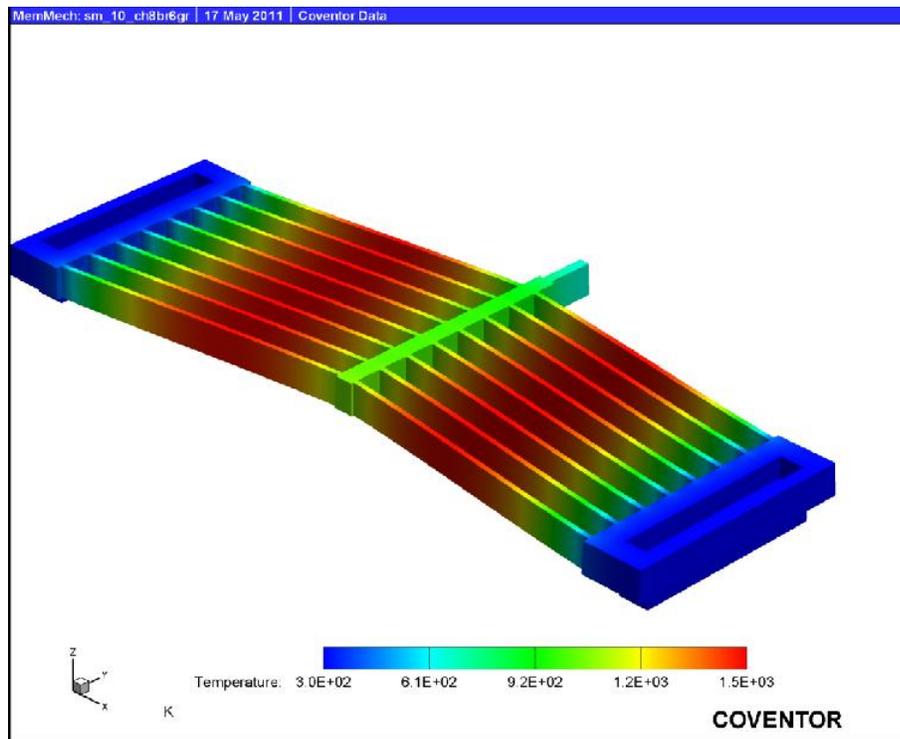


Fig. A.7 Efectos del análisis en el modelo 3D donde se observa la distribución de temperatura.

Apéndice B: Consideración de las Pérdidas de Temperatura en el Simulador

Cuando se realiza una simulación de un actuador que funciona mediante el efecto Joule se obtendrán resultados alejados de la realidad si no se consideran los parámetros adecuados para los materiales con los que se encuentre conformado dicho actuador. Sin embargo es mucho más importante considerar la transferencia de energía que existe en nuestro sistema. De la teoría, se conoce que existen tres formas de transferencia de energía, conducción, convección y radiación [41]. Si se realiza un pequeño análisis sobre el actuador se puede definir un sistema que consiste en el material del actuador (polisilicio), el sustrato, y el aire que se encuentra entre estas dos superficies, tal y como se observa en la Fig. B.1. Lo más importante para considerar en la simulación son las pérdidas que se deben a la transferencia de energía del polisilicio al sustrato por medio del aire. Esta interacción se considera principalmente por conducción de acuerdo con [8] y debido al estado cuasi-estático del aire en dimensiones micrométricas. Sin embargo para la correcta simulación se deben especificar este tipo de pérdidas.

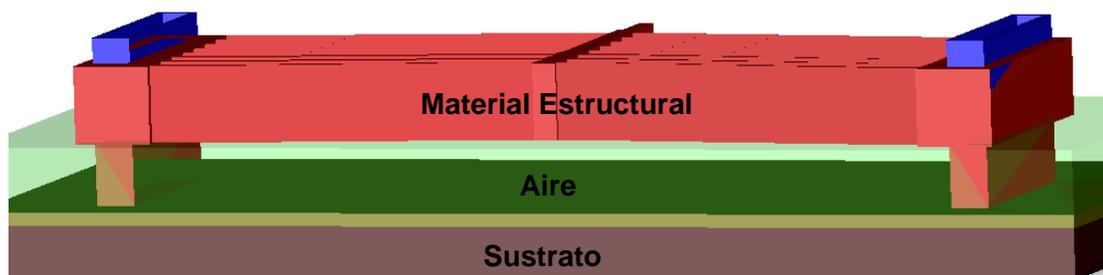


Fig. B.1 Modelo en 3D del sistema para simular un actuador tipo chevron donde se muestra un esquema más realista considerando la capa de aire entre los materiales.

Para entender qué es lo que el simulador interpreta se realizaron dos análisis del sistema:

- El primero consiste en definir una capa de aire y dejar sus características tal cual vienen en el simulador, es decir, el aire es un fluido y un dieléctrico. Estos parámetros son considerados los más aproximados a la realidad, por lo que se procedió a realizar un barrido de voltaje para observar el comportamiento del actuador. El resultado fue que el actuador llegó a generar temperaturas en extremo mayores a su punto de fusión y al mismo tiempo generar desplazamientos bastante grandes. En la Fig. B.2(a) podemos observar el modelo 3D con la distribución de temperatura, donde el sumidero de temperatura es solamente en los contactos. Esto, por supuesto, es un comportamiento alejado de la realidad, y si no se tiene conocimiento de los fenómenos presentes en la estructura se pueden pasar por alto estos comportamientos.
- El segundo análisis consistió en definir a la capa de aire como si fuese un sólido y los resultados fueron completamente diferentes. Primero se puede observar en la Fig. B.2(b) que existe una distribución de temperatura diferente y que el valor máximo de temperatura se ha reducido drásticamente. Sin embargo la estructura no generó ningún movimiento ya que al definir al aire como sólido, y estar en contacto directo con la estructura del actuador el simulador realiza sus cálculos de acuerdo con la física clásica, lo que evita el movimiento libre del material estructural.

Estos diferentes comportamientos no permiten analizar correctamente al actuador, por lo que se debe pensar en una alternativa para definir las pérdidas de temperatura en la estructura del actuador.

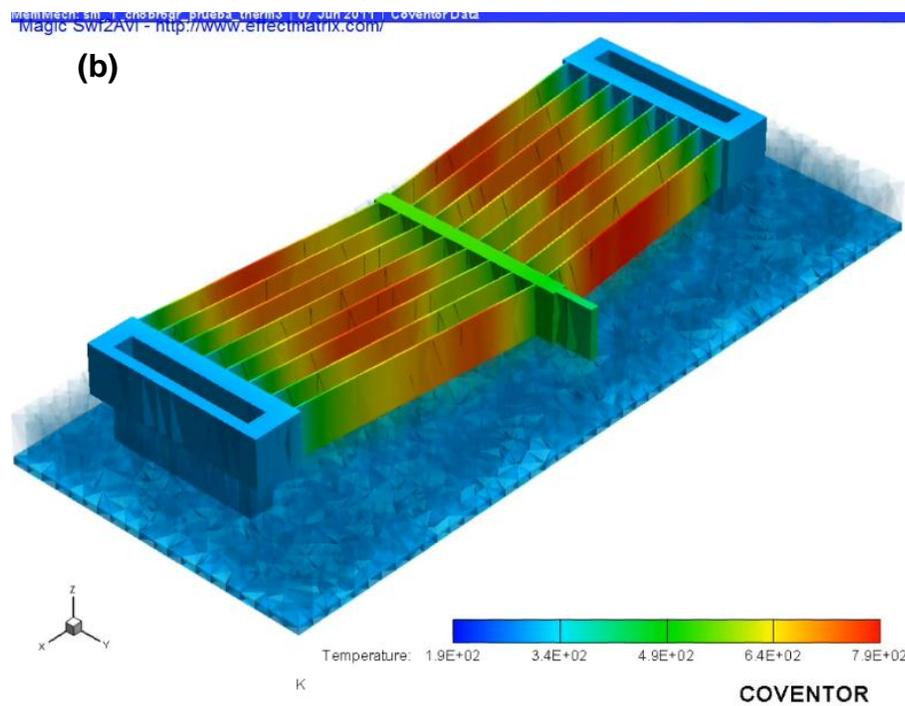
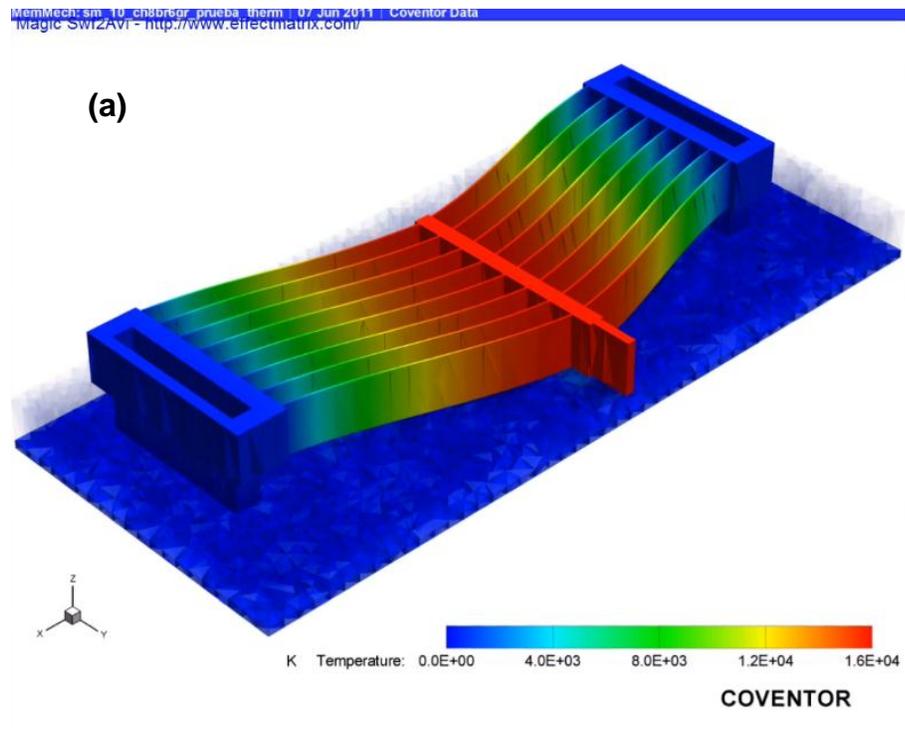


Fig. B.2 Modelo en 3D del sistema considerando al aire como: (a) un fluido, (b) un sólido.

En la Fig. B.3 se presenta la temperatura máxima en la estructura del actuador con los 2 análisis realizados, además de la gráfica de un ajuste propuesto que considera las pérdidas de temperatura. De este ajuste se hablará más adelante, y sólo se presenta en las gráficas por mera comparación.

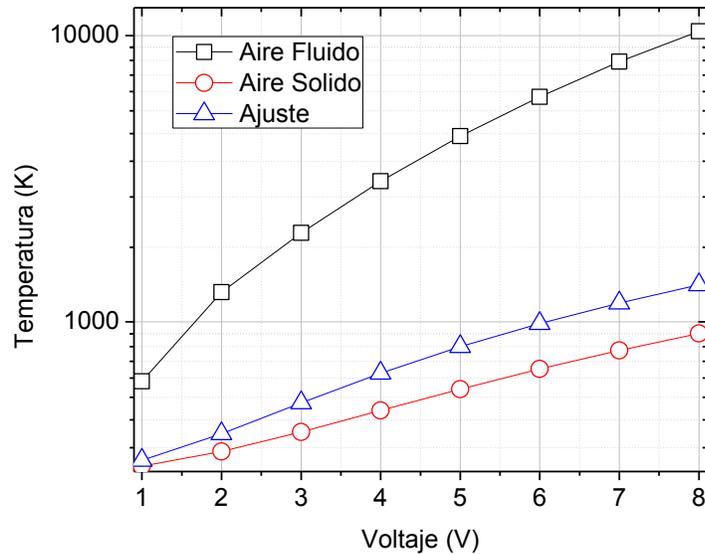


Fig. B.3 Temperatura máxima de un actuador chevron considerando diferentes formas de transferencia de calor al definir el aire como fluido, sólido y presentando una alternativa que considera las pérdidas de temperatura sin la necesidad de definir la capa de aire.

En la Fig. B.4 se presenta el desplazamiento generado respecto del voltaje aplicado en el actuador. El desplazamiento presentado del aire definido como fluido no fue considerado ya que resultaba en valores exagerados proporcionales a su temperatura. Por otro lado se aproximó el desplazamiento que se obtendría con el aire definido como sólido, tomando en cuenta la temperatura generada junto con el voltaje aplicado para realizar una aproximación del desplazamiento. También se presenta el ajuste propuesto y una curva experimental que sirva como referencia.

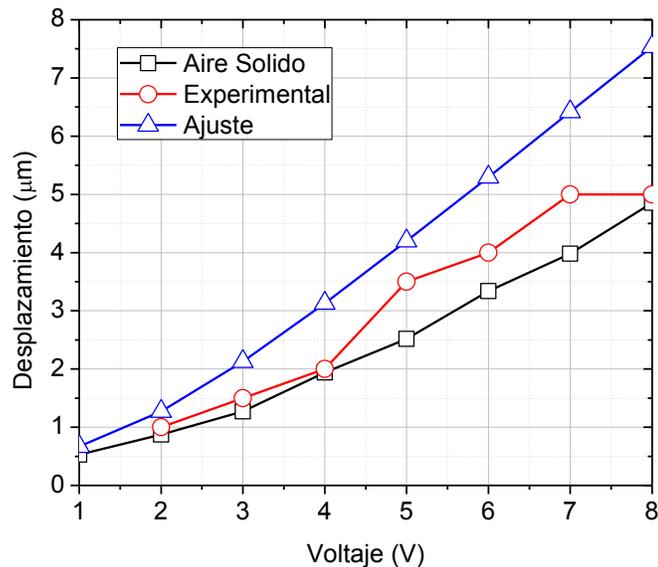


Fig. B.4 Desplazamiento generado bajo diversas consideraciones de la pérdida de temperatura.

Al observar los diferentes comportamientos del actuador cuando se define de una u otra manera la capa de aire se llegó a la conclusión de que el aire interacciona con el actuador, y que debido a que el simulador no cuenta con licencia para análisis de fluidos, no toma en cuenta esa interacción cuando la capa de aire es definida, precisamente como un fluido.

Sin embargo cuando se define como un sólido si considera la interacción y los resultados son más coherentes con lo experimental. El ajuste realizado es considerar las pérdidas que deberían ser por conducción, como pérdidas por convección con los valores de las pérdidas obtenidos de [8], en lugar de definir una capa de aire, y se observó que el comportamiento es similar. El hecho de que resulte con un menor desplazamiento cuando se utiliza una capa de aire sólido es debido a que estamos limitando a un medio que, de acuerdo a la teoría cinética de los gases [42], su volumen aumenta y su densidad disminuye cuando aumenta la temperatura; al definirlo como

sólido se alteran sus características innatas del material. Es entonces que las gráficas de temperatura y desplazamiento cuando se utiliza el aire como un sólido son menores, ya que en un sólido la conductividad térmica siempre es mayor que en un fluido, y por lo tanto la transferencia de energía es mayor.

Las pérdidas por conducción no son adecuadas para obtener un modelo de simulación aproximado a la realidad, ya que en una no se considera la interacción del aire (fluido) y en otra el actuador no puede desplazarse con libertad (sólido). Es por esto que se buscó otra manera de definir esas pérdidas para obtener un modelo que se desplace y que genere una distribución de temperatura lo más cercano a la realidad. El simulador nos permite definir únicamente pérdidas de temperatura mediante convección o radiación. Se utilizó la convección ya que es una forma de transferencia de energía similar a la conducción que se da en nuestro sistema (por medio de aire) y para poder definirla necesitamos indicar al simulador dos superficies entre las cuales existirá la convección. Para esto dado que el espesor del actuador es pequeño ($3\mu\text{m}$) comparado con la longitud del actuador ($\sim 600\mu$) consideraremos que el volumen del actuador sea una sola superficie, es decir, el actuador será considerado de dos dimensiones. Con esto podremos definir la convección entre la superficie superior e inferior del actuador, obteniendo la curva "Ajuste" en las Fig. A.3 y A.4. Podemos asegurarnos que esta es la forma correcta de emular las pérdidas por conducción ya que la distribución de temperatura generada por este ajuste (Fig. B.5) es similar al de la Fig. B.2(b). Es importante mencionar que el valor introducido de las pérdidas de temperatura se realizó de acuerdo con [8], mediante la ecuación (B.1), en donde U representa el coeficiente de transferencia de calor por conducción, k_{aire} es la conductividad térmica del aire, y ΔZ es la separación entre la estructura suspendida y el sustrato.

$$U = k_{\text{aire}} / \Delta Z. \quad (B.1)$$

Además se considera que la influencia real de las pérdidas debidas a la convección y radiación en la estructura, son despreciables.

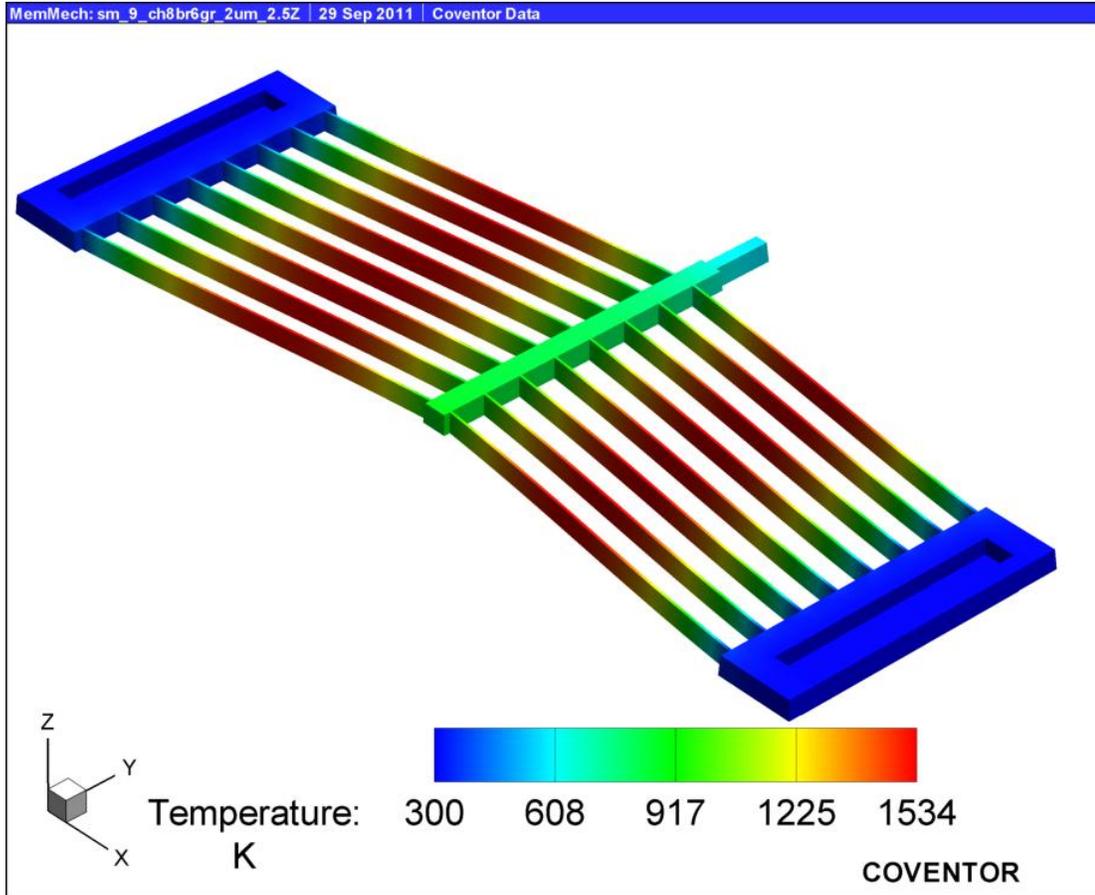


Fig. B.5 Distribución de temperatura en un chevron cuando se aproximan las pérdidas de temperatura por convección en lugar de conducción.

Apéndice C: Diseño del Indicador de Fuerza

Facilidad de Utilizar la Piezoresistividad

Para realizar una primera aproximación de un indicador de fuerza se debe considerar el proceso de fabricación que en nuestro caso es de un nivel de polisilicio y una capa de aluminio para realizar el contacto eléctrico con el exterior del chip. Teniendo en cuenta las características del proceso de fabricación, se optó por aprovechar la característica piezo-resistiva del polisilicio, pensando en el área ocupada, que en cuestiones capacitivas requerirían una mayor cantidad de área y supondría utilizar una estructura similar a la de un acelerómetro. Además de que en un circuito con resistores, es más fácil de compensar las variaciones de temperatura.

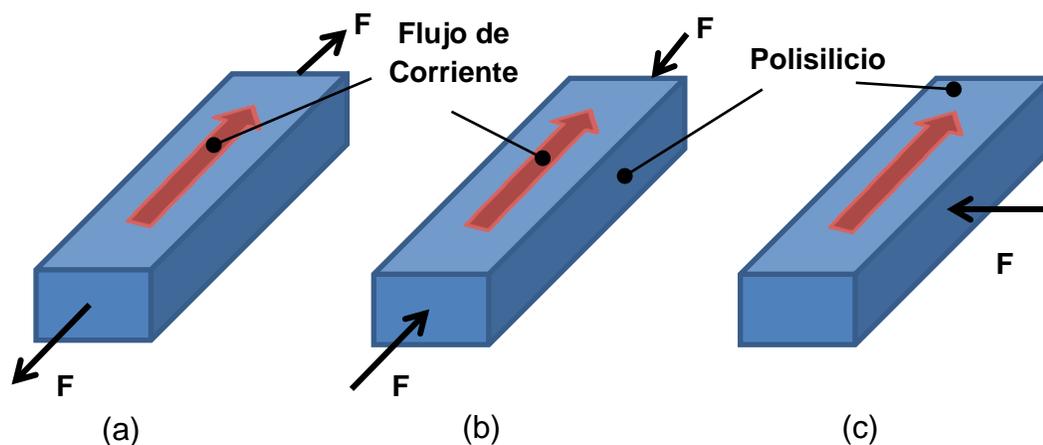


Fig. C.1 Diferentes tipos de deformación debidas a la forma en que se aplica la fuerza externa. (a) Deformación por tensión en dirección del flujo de corriente. (b) Deformación por compresión en dirección del flujo de corriente. (c) Deformación debida a una fuerza transversal al flujo de corriente.

La piezo-resistividad se define como el cambio en la resistencia que sufre un material cuando se ve sometido a una fuerza externa [17, 24]. Dependiendo de la forma cómo actúen las fuerzas externas sobre un material se pueden observar algunos tipos de deformación en la Fig. C.1.

Utilizar la característica de piezo-resistividad del polisilicio para generar una respuesta eléctrica no es más que utilizar una resistencia que varíe con una fuerza externa, la cuál puede ser incluida en algún circuito eléctrico. La manera más sencilla de interpretar las variaciones de la resistencia es aplicando un voltaje o una corriente constante, tal como se muestra en las Fig. C.2 y C.3. De primera instancia se puede determinar que aplicar corriente constante sería la forma más sencilla de medir la variación de la resistencia dado que es más fácil medir pequeñas variaciones de voltaje.

Sin embargo estos circuitos presentan un alto margen de error ya que son sensibles a las variaciones de temperatura tanto del resistor como de la fuente de alimentación. Es por ello que existen también circuitos serie o estabilizadores, también conocidos como circuitos de medio puente, los cuales presentan la ventaja de poder ajustar la linealidad del circuito y la facilidad de medición ya que se alimenta y se mide en unidades de voltaje.

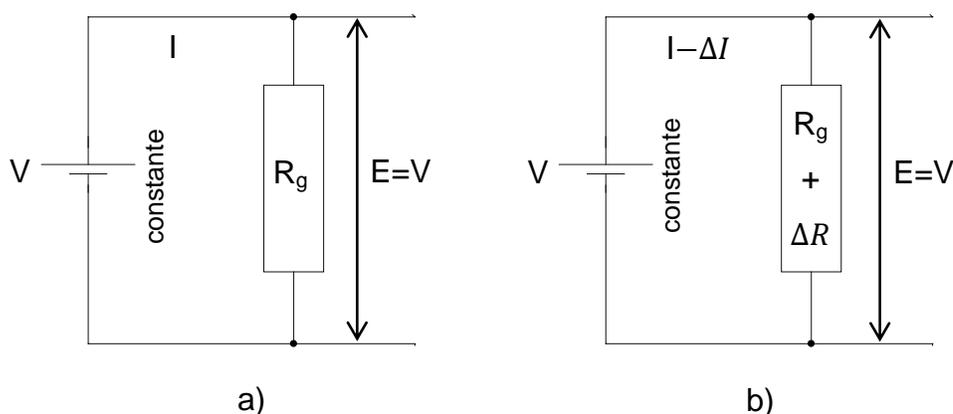


Fig.C.2 Circuito para aplicar un potencial constante y medir corriente. a) Sin fuerza aplicada, b) variación de la corriente debida a la fuerza aplicada.

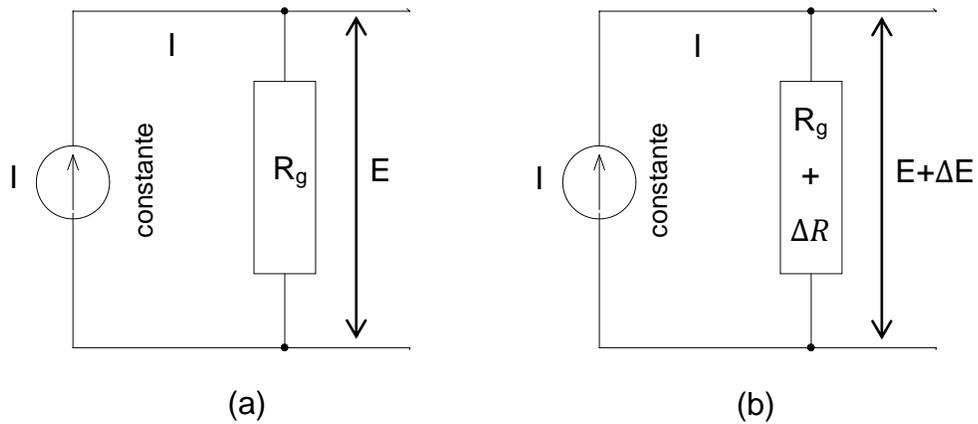


Fig. C.3 Circuito para aplicar una corriente constante y medir voltaje. (a) Circuito sin fuerza externa, (b) variación del voltaje de salida debido a la fuerza externa.

Sin embargo una limitación de los circuitos de medio puente puede ser que la magnitud de la variación del voltaje a medir es directamente proporcional al voltaje de alimentación. En la Fig.C.4 se muestra el circuito descrito. Es recomendable que la resistencia estabilizadora sea un dispositivo exactamente igual a la resistencia indicadora para eliminar las variaciones presentes en el indicador.

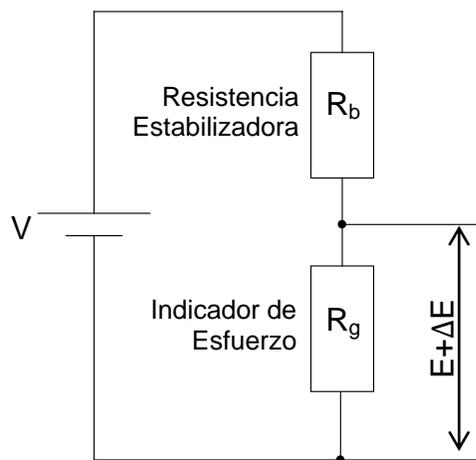


Fig. C.4 Circuito estabilizador o medio puente.

La verdadera dificultad para realizar mediciones de esfuerzo de manera estática con el circuito estabilizador es la amplia divergencia entre las magnitudes de E y ΔE . El problema radica en incrementar ΔE con respecto de E , o en reducir E a cero para poder medir directamente las variaciones ΔE . En la Fig. C.5 se presentan dos esquemas eléctricos de estas soluciones.

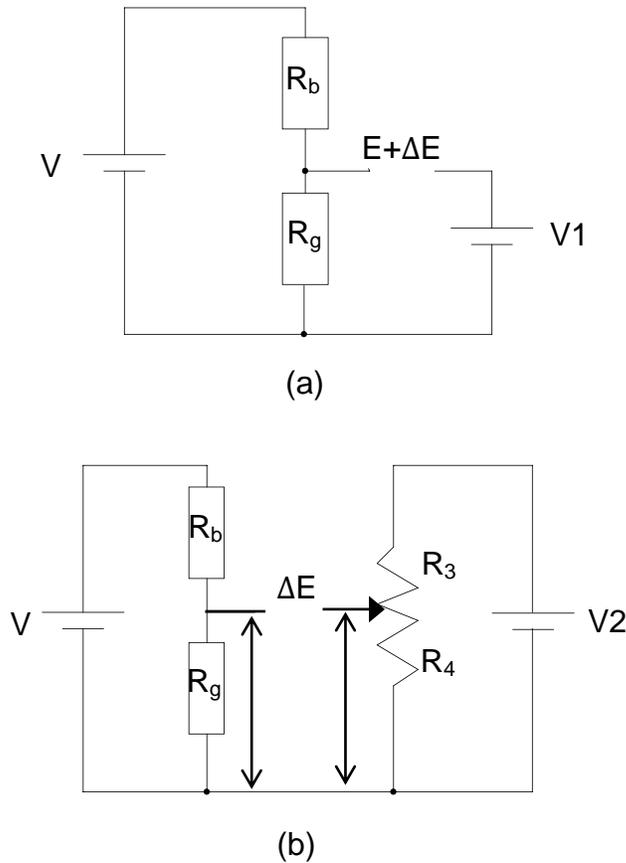


Fig. C.5 (a) E reducido respecto a ΔE en la misma magnitud que $V1$, (b) E reducido a cero mediante ajuste de potenciómetro.

Estos dos métodos de la Fig. C.5 aparentan ser de utilidad en la teoría, sin embargo hay que recordar que el acoplamiento de fuentes de alimentación puede generar variaciones en la medición de ΔE . Este problema puede resolverse utilizando una sola fuente de alimentación para generar el circuito conocido como puente de wheatstone que se muestra en la Fig. C.6.

Para realizar un análisis rápido al circuito se definirán ciertas condiciones ideales. Se considera que la fuente de alimentación es de resistencia serie igual a cero, y que el voltaje de salida será medido con un instrumento de impedancia infinita para evitar flujos de corriente.

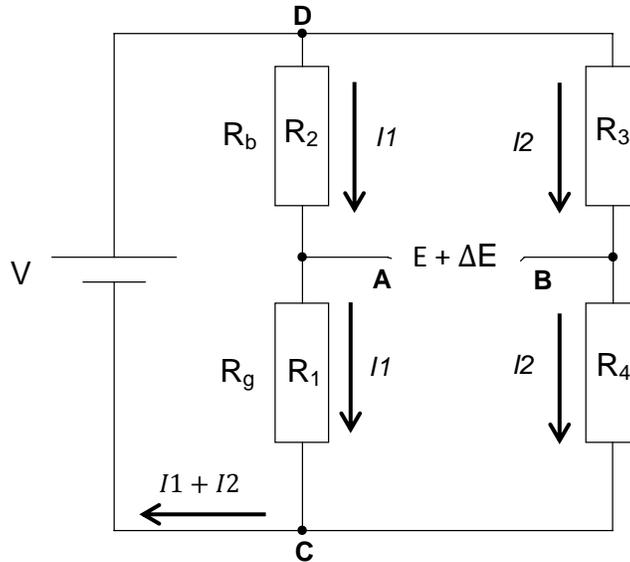


Fig. C.6 Esquema eléctrico de un puente de wheatstone indicando las corrientes existentes en cada rama del circuito.

Ahora bien, cuando las terminales A y B del puente de wheatstone se encuentran al mismo potencial se interpreta que el puente se encuentra balanceado, es decir que $E=0$. Sin embargo esta situación requiere que exista un balance entre los valores resistivos de las resistencias, por lo que generalmente existe un potencial E que representa la diferencia de potencial entre las terminales A y B, y ΔE corresponde al cambio en la salida debido al cambio en de resistencia en el indicador de esfuerzo (R_g). De acuerdo con la Fig. C.6 se definen las ecuaciones de voltaje en cada lazo:

$$V - I_1(R_1 + R_2) = 0 , \tag{C. 1}$$

$$V - I_2(R_3 + R_4) = 0 . \tag{C. 2}$$

Con las ecuaciones anteriores es fácil encontrar una expresión para las corrientes del circuito:

$$I_1 = \frac{V}{R_1 + R_2}, \quad (C.3)$$

$$I_2 = \frac{V}{R_3 + R_4}, \quad (C.4)$$

mediante las cuales se puede definir una ecuación para el voltaje de salida del circuito de puente:

$$E = E_{AC} - E_{BC} = I_1 R_1 - I_2 R_4, \quad (C.5)$$

Y realizando las sustituciones correspondientes se obtiene:

$$E = V \frac{R_1}{R_1 + R_2} - V \frac{R_4}{R_3 + R_4} = V \frac{R_1 R_3 - R_2 R_4}{(R_1 + R_2)(R_3 + R_4)}. \quad (C.6)$$

La ecuación (C.6) indica el potencial de salida existente en el circuito y será considerado como un potencial inicial. Si se considera que R_1 es el indicador de esfuerzo y se ve sometido a una fuerza externa que provoca la variación en la magnitud de su valor resistivo ($R_1 + \Delta R$), el potencial de salida se verá afectado ($E + \Delta E$), resultando en la ecuación (C.7).

$$E + \Delta E = V \frac{(R_1 + \Delta R_1)R_3 - R_2 R_4}{(R_1 + \Delta R_1 + R_2)(R_3 + R_4)}. \quad (C.7)$$

Con la ecuación anterior es fácil obtener el potencial debido a la variación de la resistencia:

$$\Delta E = V \frac{(R_1 + \Delta R_1)R_3 - R_2 R_4}{(R_1 + \Delta R_1 + R_2)(R_3 + R_4)} - V \frac{R_1 R_3 - R_2 R_4}{(R_1 + R_2)(R_3 + R_4)}. \quad (C.8)$$

La ecuación anterior será útil en el caso de que el puente de wheatstone no se encuentre equilibrado, por lo que será necesario medir el

potencial antes de que el indicador de esfuerzo varíe su resistencia para posteriormente aplicar la ecuación (C.8).

Detección-Acondicionamiento de la Señal

Un punto importante para detectar la señal proveniente del puente de wheatstone de una forma adecuada, es investigar un poco más sobre sus características nativas de su estructura. Esto servirá para que la señal a medir tenga el menor grado de error, es decir, que lo que se esté midiendo sea un voltaje debido a la fuerza aplicada al indicador de esfuerzo. Es muy conveniente que para eliminar en lo posible las variaciones debidas a cambios de temperatura, las resistencias que se encuentren en cada rama sean fabricadas de la misma forma, es decir $R_1=R_2$, y $R_3=R_4$. Con lo anterior se quiere decir que si R_1 representa al indicador de esfuerzo, R_2 deberá ser entonces otro indicador de esfuerzo cuya función será solo la de mantener un equilibrio en el puente de wheatstone, tal y como se muestra en la Fig. C.7.

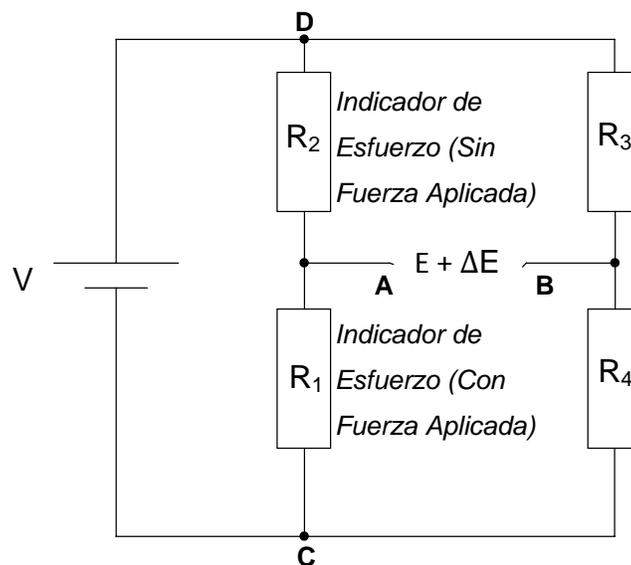


Fig. C.7 Esquema eléctrico de un puente wheatstone indicando las corrientes existentes en cada rama del circuito

Con este esquema se garantiza un equilibrio térmico que permitirá medir únicamente las variaciones debidas al indicador de esfuerzo. Sin embargo puede resultar que la salida del puente sea de mili-volts, por lo que es necesario amplificar la señal. Para ello se utilizó la tecnología ECMOS1- INAOE de circuitos integrados. Se tuvo disponible el modelo en HSPICE para los transistores, el cuál se presenta en la Tabla C.1.

Tabla C.1 Modelos de transistores para HSPICE.

```

*****
*   MODELOS PARA LOS TRANSISTORES ECMOS1- INAOE   *
*****
*MODELO PROMEDIO PMOS.
.MODEL PSS PMOS LEVEL=2 TPG=-1 XJ=2.00U UO=191.14 VTO=-1.286 LD=1.448U
+NSUB=3.160E+15 TOX=6.001E-08 UEXP=0.2190 UCRIT=6.621E+04 CGSO=8.335E-10
+CGDO=8.335E-10 GAMMA=0.5653 NSS=2.428E+10 PHI=0.6347 LAMBDA=0.0315
+RSH=98

*MODELO PROMEDIO NMOS.
.MODEL NSS NMOS LEVEL=2 TPG=+1 XJ=2.00U UO=570.86 VTO=1.453 LD=1.109U
+NSUB=3.689E+16 TOX=6.048E-08 UEXP=0.1729 UCRIT=1.390E+05 CGSO=6.333E-10
+CGDO=6.333E-10 GAMMA=1.9531 NSS=1.076E+10 PHI=0.7624 LAMBDA=0.0075
+RSH=12
*****

```

Para asegurarnos que el modelo funcione correctamente se decidió simular unos espejos de corriente simples (tanto NMOS como PMOS), con el fin de obtener los parámetros del proceso al utilizar la ecuación de corriente del transistor en saturación, ecuación (C.9).

$$I_{ds} = \frac{Kn}{2} \cdot \frac{w}{l} \cdot (V_{gs} - V_{th})^2 . \quad (C.9)$$

Para utilizar esta ecuación se definieron dimensiones y corrientes con el simple propósito de mantener a los transistores en saturación. Esto se realizó varias veces para obtener un promedio de V_{th} , y así calcular K_p y K_n .

Estos valores se encuentran dentro del modelo de simulación, sin embargo es necesario corroborarlos para que el diseño realizado respete lo que se desea hacer. En la Tabla C.2 se presentan los resultados obtenidos al iterar varias veces las dimensiones de los transistores y los de la corriente. Los valores presentados de W, L, I_{ds} y V_{gs} son para un caso particular.

Tabla C.2 Parámetros del proceso ECMOS-INAOE

Parámetros	NMOS	PMOS
I _{ds}	2 mA	-2 mA
W	100 μm	100 μm
L	20 μm	20 μm
V _{gs}	7.875 V	-10.048 V
V _{th}	1.422 V	-1.260 V
K(n,p)	19.20 μA/V ²	10.36 μA/V ²

Una vez que se conocen los parámetros del proceso, se puede comenzar con el diseño del amplificador. En la Fig. C.8 se presenta el diagrama del amplificador a utilizar, donde se observan dos etapas de ganancia y el circuito de polarización. El valor de VDD permitido para esta tecnología es de 10 volts, sin embargo también puede utilizarse una alimentación de +5 a -5 volts, o alguna otra alimentación que resulte en una diferencia de potencial de 10 volts, lo cual dependerá de la aplicación.

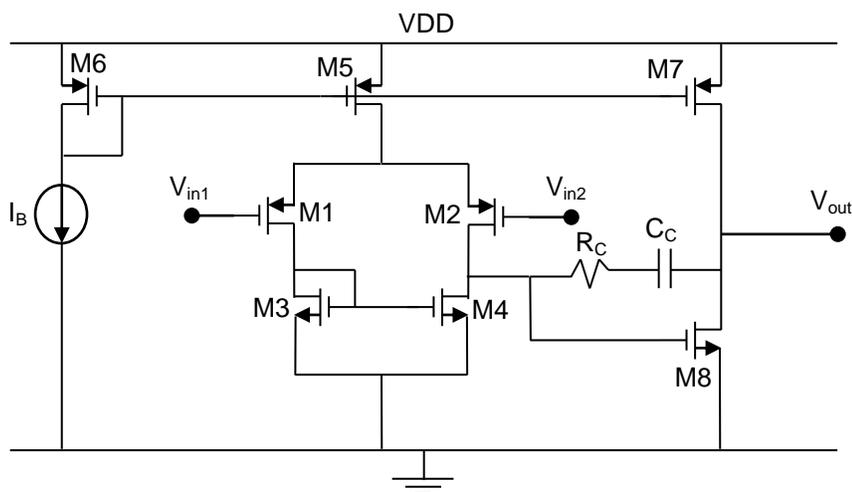


Fig. C.8 Amplificador CMOS de dos etapas compensado.

Para el diseño se utilizó un $V_{DSAT}=500\text{mV}$, y que la corriente de polarización a utilizar fuera de $20\mu\text{A}$ para no consumir mucha potencia. Se comenzó con el par diferencial considerando que la carga a manejar sería de 5pF y que manejara una frecuencia a 0 dB's de 500KHz . Se intentó realizar el diseño con frecuencias menores, ya que no es un factor importante para este propósito, sin embargo las dimensiones del transistor requeridas resultaban menores a las establecidas por la tecnología ($10\mu\text{m}$). Se obtuvieron las dimensiones del transistor M5 mediante:

$$\left(\frac{W}{L}\right)_5 = \frac{2 I_D}{K_p (V_{DSAT})^2} \cdot \quad (C.10)$$

Esas dimensiones serán las mismas para el transistor M6, por lo que la corriente que circulará por cada rama del par diferencial será de $10\mu\text{A}$. Sin embargo si se quiere ahorrar consumo de potencia se puede hacer que la relación $\frac{W}{L}$ del transistor M6 sea n veces menor que los transistores M5, consiguiendo con esto reducir en n veces la corriente de la fuente I_B . Por ejemplo, si queremos que en el par diferencial exista una corriente de $20\mu\text{A}$ con las dimensiones calculadas con (C.11), se puede hacer que M6 tenga una relación de $\frac{W}{L}=2$ y una corriente de $2.5\mu\text{A}$. Es decir que $8\frac{W}{L_5} = \frac{W}{L_6}$, lo que

garantiza obtener los valores de corriente deseados y reducir el consumo de potencia del circuito polarizador.

$$\left(\frac{W}{L}\right)_5 = n \left(\frac{W}{L}\right)_6. \quad (C.11)$$

Se determinó la transconductancia de los transistores M1 y M2 utilizando la siguiente ecuación:

$$gm = 2\pi f C, \quad (C.12)$$

en donde f representa la frecuencia de ganancia unitaria, y C representa la capacitancia de carga. Al obtener la transconductancia del par diferencial se determinan las dimensiones de los transistores de entrada mediante la ecuación (C.13).

$$\left(\frac{W}{L}\right)_{1,2} = \frac{gm^2}{2 K_p I_D}. \quad (C.13)$$

El nivel de DC máximo, que se puede aplicar en los transistores M1 y M2, para que los transistores del par diferencial se encuentren en saturación se determina por:

$$V_{DD} - 2V_{DSAT} - V_{TP}. \quad (C.14)$$

Este valor de voltaje será la referencia para el nivel de DC que debe obtenerse del puente de wheatstone.

Para calcular las dimensiones de los transistores M3 y M4 utilizamos:

$$\left(\frac{W}{L}\right)_{3,4} = \frac{2 I_D}{K_n (V_{DSAT})^2}. \quad (C.15)$$

Hasta ahora se tienen las dimensiones para el par diferencial, por lo que se prosiguió con la segunda etapa conocida como de Fuente Común. Esta etapa se diseñó para manejar una carga de 10pF, para que al momento

de fabricar y realizar una medición mediante puntas de prueba el circuito siga funcionando. La corriente que circulará por esta etapa se eligió de $20\mu\text{A}$, por lo que las dimensiones del transistor M7 serán las mismas que para M5. Para determinar las dimensiones del transistor M8 se utilizó la ecuación (C.15), con lo cual aseguramos que el transistor M7 se encuentre en saturación y que en ambos transistores circulen los $20\mu\text{A}$ deseados.

Las dimensiones calculadas de los transistores se presentan en la Tabla C.3.

Tabla C.3 Dimensiones de los transistores del amplificador de la Fig. C.8.

Transistor	W (μm)	L (μm)
M1	12	10
M2	12	10
M3	40	10
M4	40	10
M5	160	10
M6	20	10
M7	160	10
M8	80	10

Para compensar el amplificador de dos etapas se utilizó una capacitancia Miller C_c y un resistor en serie R_c . Se determinó primero un valor para el capacitor de 5pF , valor elegido para comenzar la compensación de acuerdo con [43], mientras que el valor de R_c se obtuvo mediante la ecuación (C.16) tomada de [43]. Una vez obtenidos los valores se realizaron varias iteraciones para obtener un valor menor para el capacitor y obtener el mayor margen de fase posible. De acuerdo con la literatura [43, 44, 45, 46],

un margen de fase adecuado para amplificadores de 2 etapas, es a partir de 45°.

$$R_C = \frac{1}{1.2 gm_1}. \tag{C.16}$$

El valor de R_C resultó de 27KΩ, y el de C_C se dejó en 5pF al observar que presentaba un buen margen de fase (Fig. C.9). Se observa que se obtuvo una ganancia aproximada de 62dB's con una frecuencia de ganancia unitaria de 560KHz.

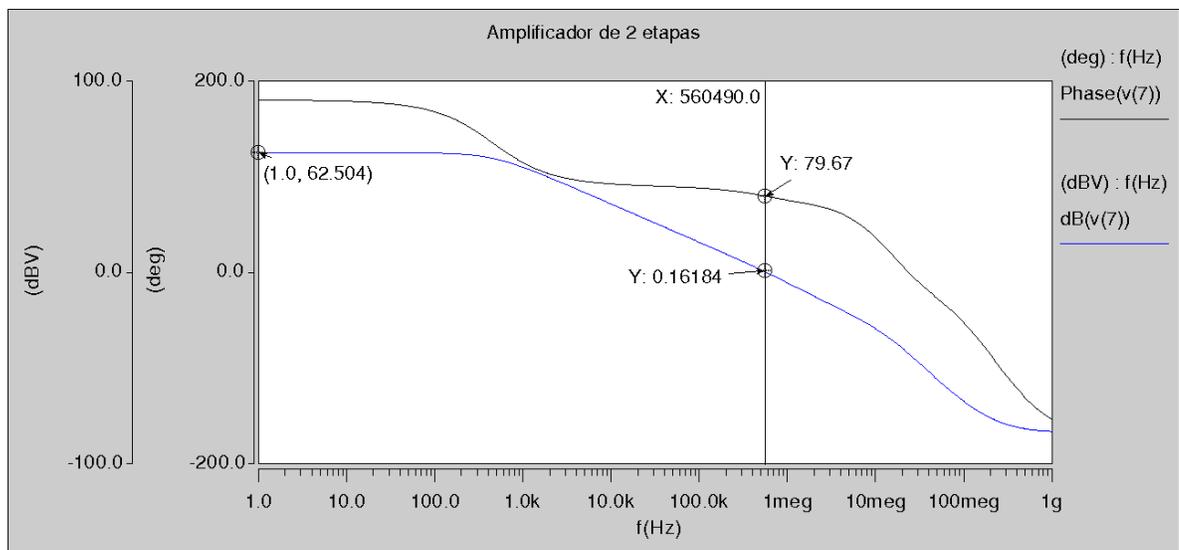


Fig. C.9 Respuesta en frecuencia del amplificador de la figura 1.

El slew rate se calcula mediante la ecuación (C.17).

$$SR = \frac{I_5}{C_C}. \tag{C.17}$$

Resultando en un slew rate de 4 V/μs.

Al observar los resultados se determinó probar tal y como se encuentra el amplificador, y se realizó una prueba utilizando el opamp como

un amplificador de diferencia, utilizando el esquema de la Fig. C.10, en donde la ganancia del amplificador se determina con la ecuación (C.18). El funcionamiento de este circuito se explica detalladamente en [47].

Si los valores de resistencia se eligen de tal forma que $R_2=R_4$ y $R_1=R_3$, la ganancia queda:

$$A_v = -\frac{R_2}{R_1}. \quad (C.18)$$

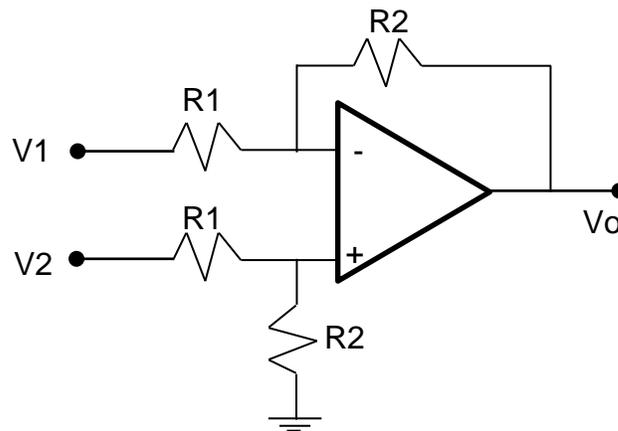


Fig. C.10 Esquema de un amplificador de diferencia.

Sin embargo para poder utilizar el amplificador de esta forma es necesario utilizar una etapa de buffer para que la resistencia de salida sea lo más baja posible. Pensando en ello se decidió utilizar un seguidor de fuente (“source follower”) descrito a fondo en [48] y presentado en la Fig. C.11. La resistencia de entrada de esta configuración es infinita a bajas frecuencias, y brinda una resistencia de salida relativamente baja. Para conocer la resistencia de salida del circuito se utiliza la ecuación (C.19).

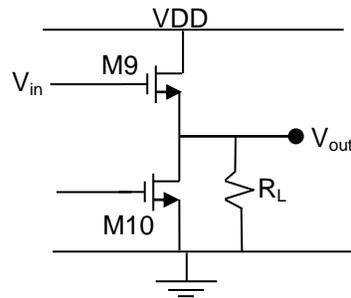


Fig. C.11 Diagrama de un seguidor de fuente tipo N.

$$R_{out} = \frac{1}{gm_9} \parallel R_L. \quad (C.19)$$

Para diseñar el buffer se debe considerar la ecuación (C.19), proponiendo un valor deseado de R_{out} y un valor mínimo de R_L para obtener la transconductancia del transistor M9. Posteriormente las dimensiones del transistor se obtienen mediante la ecuación (C.20).

$$\frac{W}{L} = \frac{gm}{K_N V_{eff}}. \quad (C.20)$$

Para demostrar que el circuito puede funcionar para el propósito planteado de medir la diferencia de voltaje generada en un puente de wheatstone, se diseñó el buffer con una resistencia de salida de $1K\Omega$, y se propuso manejar una carga de $100K\Omega$. Con estos datos las dimensiones resultantes para el buffer fueron de $\frac{W}{L} = 103$. Estas mismas dimensiones se utilizaron para el transistor M10, ya que solamente funciona como una fuente de corriente.

Ya con el circuito completo se simuló el amplificador de diferencia de la Fig. C.10, realizando configuraciones para modificar la ganancia del circuito y se obtuvieron ganancias desde $0dB$'s hasta un máximo de $40dB$'s con un margen de fase aceptable. En la Fig. C.12 se presentan los

resultados del análisis en AC del circuito diferenciador. Cabe aclarar que esta ganancia del circuito completo está determinada únicamente por los valores de las resistencias de acuerdo a la ecuación (C.18). El mínimo valor resistivo utilizado para generar la ganancia unitaria fue de 100 KΩ. Si se utilizan valores menores de resistencia se obtendrán ganancias con un error cada vez mayor. Caso contrario cuando se decide utilizar valores mayores de resistencia. Para generar la ganancia de 100 se utilizó un valor de 100 KΩ para R2, y 1 KΩ para R1.

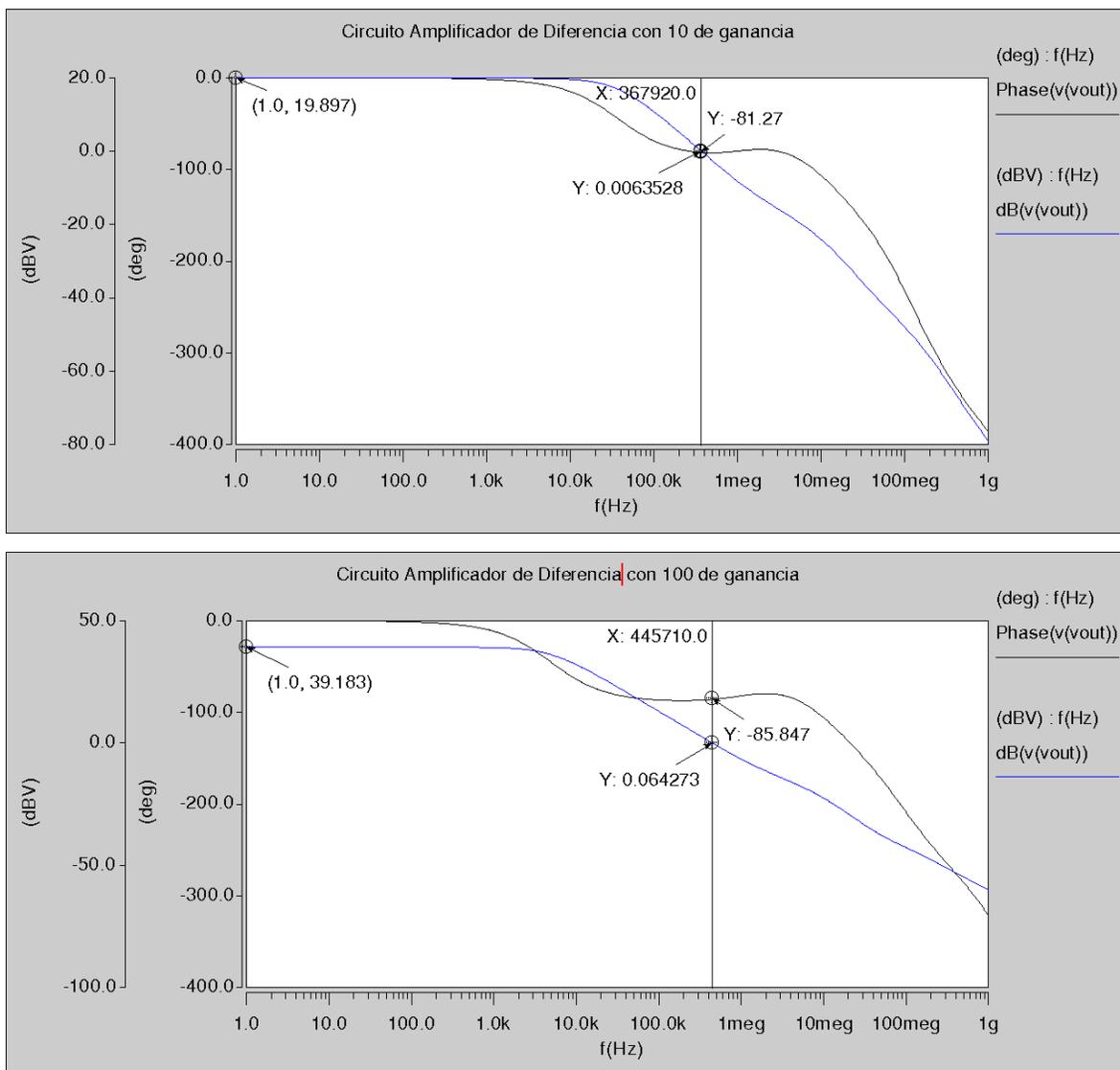


Fig. C.12 Respuesta en AC del circuito amplificador de diferencia a diferentes ganancias.

Para corroborar el funcionamiento también se realizó una simulación en HSPICE amplificando la salida de un puente de wheatstone al variar una de sus resistencias hasta en 8Ω y alimentándolo con un voltaje de 1 volt para que la potencia consumida por la resistencia no sea muy grande (alrededor de 14mW). En la Fig. C.13 se muestra el resultado transitorio al simular el circuito conectado a un puente de wheatstone variando una de sus resistencias.

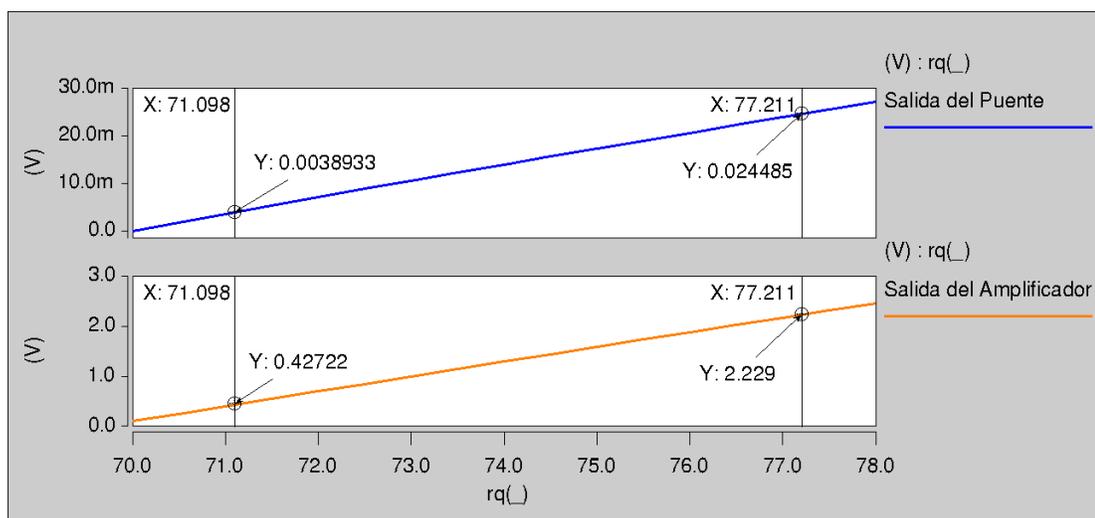


Fig. C.13 Análisis transitorio variando una resistencia de 70Ω a 78Ω . Arriba se muestra la salida del puente. Abajo la salida del amplificador con ganancia de 10.

En la Fig. C. 14 se presenta el análisis en DC del amplificador completo, en donde se observa que la señal de salida se encuentra montada en un nivel de DC de 213mV , y que el rango de entrada antes que la señal presente distorsión esta entre -64mV y 10mV . EL rango de salida se encuentra entre -4.9V y 105mV . Probablemente sea una limitante al momento de introducir la señal proveniente del puente, pero se considera válido para la aplicación, debido a que las variaciones de resistencia generan diferencias de voltaje en el puente relativamente pequeñas.

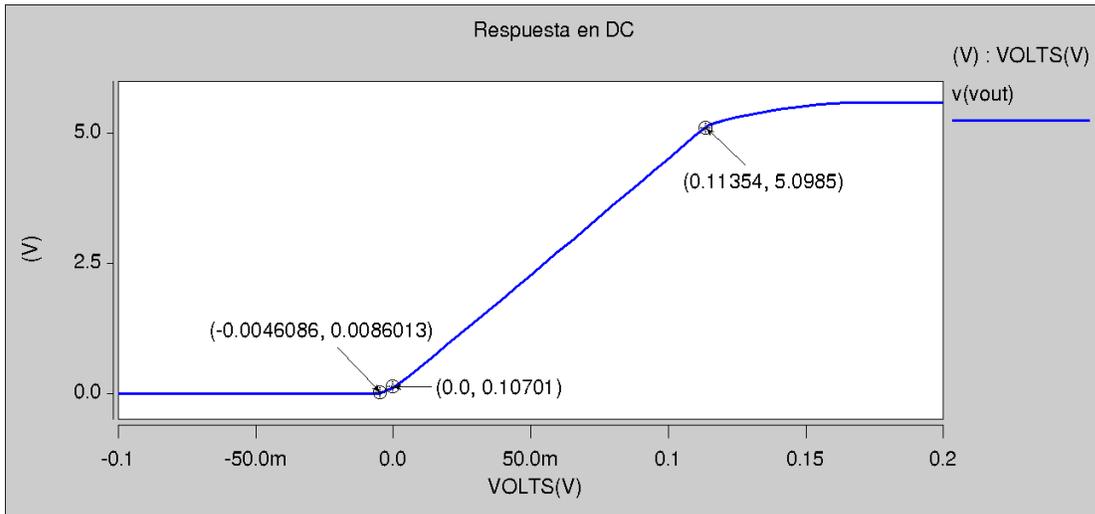


Fig. C.14 Respuesta en DC del amplificador de diferencia.

Índice de Figuras

<i>Fig. 1.1 Fotografía de un acelerómetro fabricado mediante micro-maquinado superficial de polisilicio con interface de control integrada. Fotografía tomada de [1].</i>	2
<i>Fig. 1.2 (a) Fotografía de un actuador de efecto Joule (PolyMEMS [4]). (b) Fotografía de una cremallera lineal, donde se observan dos actuadores Joule y un engrane (SUMMIT-V http://mems.sandia.gov/gallery/images.html).</i>	3
<i>Fig. 1.3 Esquema de un actuador tipo chevron de 6 brazos. Los brazos y el vástago se encuentran suspendidos.</i>	5
<i>Fig. 1.4 Viga anclada en un extremo para el cálculo de la fuerza de empuje. (a) Vista superior, (b) vista en perspectiva 3D.</i>	8
<i>Fig. 1.5 Resistencia Kelvin utilizada para medir la fuerza de un chevron. Tomado de [20].</i>	9
<i>Fig. 1.6 SEM de un indicador de fuerza tomado de [21].</i>	10
<i>Fig. 2.1 Esquema del actuador tipo chevron utilizado para el modelo analítico.</i>	16
<i>Fig. 2.2 Esquema de un chevron con ausencia del vástago y el perfil térmico que genera cuando se energiza con 5 volts.</i>	20
<i>Fig. 2.3 Esquema y perfil térmico de un chevron con vástago que presenta un área grande perpendicular al flujo de corriente.</i>	21
<i>Fig. 2.4 Esquema de una barra de polisilicio que sufre una deformación lineal (exagerada) y genera una fuerza en dirección de la deformación.</i>	23
<i>Fig. 2.5 Esquema de un chevron seccionado para aproximar la fuerza total F_T en el actuador.</i>	24
<i>Fig. 2.6 Modelo de simulación de un chevron tipo 3 con las superficies nombradas para su posterior utilización al determinar condiciones de frontera.</i>	26
<i>Fig. 2.7 Condiciones iniciales para obtener la temperatura y el desplazamiento generado.</i>	28
<i>Fig. 2.8 Condiciones iniciales para el cálculo de la fuerza total.</i>	29
<i>Fig. 2.9 Condiciones iniciales para el cálculo de la fuerza de empuje.</i>	30
<i>Fig. 2.10 Configuraciones utilizadas para analizar el comportamiento de actuadores tipo chevron en cascada.</i>	32
<i>Fig. 2.11 Esquema de un chevron utilizado para el análisis del vástago.</i>	33
<i>Fig. 2.12 Modelo 3D mostrando la distribución de temperatura de las configuraciones, en función del ancho del vástago, cuando se aplican 10 volts.</i>	35
<i>Fig. 2.13 Modelo 3D de las diferentes configuraciones variando la longitud del vástago. Los actuadores se energizaron con 10 volts y se muestra su distribución de temperatura.</i>	36

<i>Fig. 2.14 Modelo y microfotografía de los actuadores fabricados donde se observa que el modelo es una réplica de los chevrones existentes.....</i>	<i>38</i>
<i>Fig. 2.15 Microfotografía SEM del chip PolyMEMS V-B indicando los chevron fabricados.</i>	<i>39</i>
<i>Fig. 2.16 Sección transversal de los brazos del chevron (izquierda) y del vástago (derecha).</i>	<i>40</i>
<i>Fig. 2.17 Esquema utilizado para medir la definición de las estructuras.....</i>	<i>41</i>
<i>Fig. 2.18 Esquema utilizado para realizar las mediciones eléctricas.</i>	<i>42</i>
<i>Fig. 2.19 Ilustración de la forma adecuada de alambrear para realizar la medición del desplazamiento de los actuadores al microscopio.</i>	<i>43</i>
<i>Fig. 2.20 Vista general del chip montado y alambreado en placa de circuito impreso.</i>	<i>43</i>
<i>Fig. 2.21 Detalle del alambreado sobre los pads de los actuadores.....</i>	<i>44</i>
<i>Fig. 2.22 Anomalías o indicadores de posible destrucción de las estructuras. (a) Deformación anormal de los brazos. (b) Principios de incandescencia irregular; en círculos rojos se indican los brazos que no hacen contacto, uno de ellos por fractura del contacto, y los otros dos por ausencia de material de contacto.....</i>	<i>46</i>
<i>Fig. 3.1 Desplazamiento obtenido de forma analítica para los actuadores fabricados.</i>	<i>50</i>
<i>Fig. 3.2 Temperatura promedio en la estructura de los actuadores, referenciada a 300K.</i>	<i>51</i>
<i>Fig. 3.3 Fuerza analítica respecto del voltaje aplicado.</i>	<i>52</i>
<i>Fig. 3.4 Comportamiento de un chevron al variar el ángulo de grabado (respecto de la horizontal)...</i>	<i>54</i>
<i>Fig. 3.5 Comportamiento de un chevron al variar el ancho del brazo.</i>	<i>54</i>
<i>Fig. 3.6 Comportamiento de un chevron al variar la resistividad del polisilicio.....</i>	<i>55</i>
<i>Fig. 3.7 Comportamiento de un chevron al variar la conductividad térmica.....</i>	<i>55</i>
<i>Fig. 3.8 Comportamiento de un chevron al variar el coeficiente de expansión térmica.</i>	<i>56</i>
<i>Fig. 3.9 Comportamiento de un chevron al variar el módulo de Young.</i>	<i>56</i>
<i>Fig. 3.10 Comportamiento de un chevron al variar la separación que existe entre la micro-estructura y el sustrato.....</i>	<i>57</i>
<i>Fig. 3.11 Comportamiento de un chevron al variar el espesor de la micro-estructura.....</i>	<i>57</i>
<i>Fig. 3.12 Comportamiento de un chevron al variar el ángulo inicial respecto de la horizontal de los brazos del actuador.</i>	<i>58</i>
<i>Fig. 3.13 Comportamiento de un chevron al variar la longitud del brazo.</i>	<i>58</i>
<i>Fig. 3.14 Desplazamiento de los actuadores simulados en cascada de la Fig. 2.10.</i>	<i>60</i>
<i>Fig. 3.15 Temperatura máxima en las diferentes configuraciones.....</i>	<i>61</i>
<i>Fig. 3.16 Distribución de la temperatura en un solo par de brazos (izquierda) y en cinco pares de brazos (derecha).</i>	<i>61</i>
<i>Fig. 3.17 Fuerza total generada en las diferentes configuraciones.</i>	<i>62</i>

<i>Fig. 3.18 Fuerza vs número de brazos para valores de voltaje fijos.</i>	<i>62</i>
<i>Fig. 3.19 Desplazamiento generado al variar el ancho del vástago.</i>	<i>63</i>
<i>Fig. 3.20 Máxima temperatura en las configuraciones simuladas con diferente ancho del vástago. ..</i>	<i>64</i>
<i>Fig. 3.21 Fuerza total dependiendo de las dimensiones del ancho del vástago.</i>	<i>65</i>
<i>Fig. 3.22 Desplazamiento generado por los actuadores con diferente longitud del vástago.</i>	<i>65</i>
<i>Fig. 3.23 Temperatura máxima en los actuadores con diferente longitud del vástago.</i>	<i>66</i>
<i>Fig. 3.24 Fuerza total vs desplazamiento generado.</i>	<i>67</i>
<i>Fig. 3.25 Representación en circuito eléctrico de un actuador tipo chevron.</i>	<i>67</i>
<i>Fig. 3.26 Observación del ángulo de grabado simulando el proceso de fabricación. En la vista superior no se observa con claridad el ángulo. En la vista lateral se hace un acercamiento a uno de los brazos para observar mejor el ángulo formado.</i>	<i>69</i>
<i>Fig. 3.27 Desplazamiento contra voltaje de los actuadores simulados.</i>	<i>70</i>
<i>Fig. 3.28 Máxima temperatura en los actuadores simulados.</i>	<i>71</i>
<i>Fig. 3.29 Fuerza total de los actuadores simulados.</i>	<i>72</i>
<i>Fig. 3.30 Fuerza de empuje de un solo par de brazos chevron. Arriba: brazos con 6 grados iniciales respecto de la horizontal. Abajo: brazos con 10 grados iniciales respecto de la horizontal.</i>	<i>73</i>
<i>Fig. 3.31 Enfoque de la superficie superior del actuador. Se hace presente la rugosidad del material. Los datos representan un promedio de todas las estructuras.</i>	<i>75</i>
<i>Fig. 3.32 Enfoque de la superficie inferior del actuador. El perímetro bien detallado y sin regiones borrosas asegura la medición.</i>	<i>76</i>
<i>Fig. 3.33 Comportamiento eléctrico de los diferentes actuadores tipo chevron ubicados en el dado 19.</i>	<i>77</i>
<i>Fig. 3.34 Promedio del desplazamiento generado por los actuadores medidos indicando la incertidumbre de la medición al utilizar el objetivo de 50X.</i>	<i>78</i>
<i>Fig. 3.35 Conjunto de resultados de desplazamiento. En líneas continuas se presentan los resultados experimentales, en líneas punteadas los de simulación, y en líneas segmentadas los resultados analíticos.</i>	<i>79</i>
<i>Fig. 3.36 Desplazamiento contra voltaje del actuador tipo 1.</i>	<i>80</i>
<i>Fig. 3.37 Desplazamiento contra voltaje del actuador tipo 2.</i>	<i>81</i>
<i>Fig. 3.38 Desplazamiento contra voltaje del actuador tipo 3.</i>	<i>81</i>
<i>Fig. 3.39 Temperatura máxima obtenida por simulación comparada con la temperatura promedio del método analítico.</i>	<i>83</i>
<i>Fig. 3.40 Comparación de la fuerza existente en el actuador.</i>	<i>84</i>
<i>Fig. 3.41 Fuerza contra voltaje para cada tipo de actuador.</i>	<i>84</i>

Fig. 3.42 Estructuras de prueba para conocer el efecto piezoresistivo del material. El ancho y la longitud de cada estructura son: (a) $3\mu\text{m} / 160\mu\text{m}$, (b) $6\mu\text{m} / 160\mu\text{m}$, (c) $10\mu\text{m} / 160\mu\text{m}$, (d) $3\mu\text{m} / 30\mu\text{m}$, (e) $6\mu\text{m} / 30\mu\text{m}$, (f) $10\mu\text{m} / 30\mu\text{m}$.	85
Fig. 3.43 Indicador de fuerza en puente de wheatstone, colocado a $3\mu\text{m}$ del actuador tipo chevron.	89
Fig. 3.44 Esquema de un amplificador de diferencia.	90
Fig. 3.45 Esquema de un OPAMP CMOS de 2 etapas con buffer.	91
Fig. 3.46 Diferencia de voltaje de la salida del puente de wheatstone (azul). Salida del amplificador (naranja) con ganancia aproximada de 1000 veces la entrada.	92
Fig. A.1 Flujo de diseño en CoventorWare.	100
Fig. A.2 Proceso de fabricación que emula al proceso PolyMEMS V-B.	100
Fig. A.3 Patrón geométrico de un chevron.	105
Fig. A.4 Modelo 3D de un chevron donde se muestran las superficies y sus nombres.	106
Fig. A.5 Condiciones de frontera para simular un actuador tipo chevron.	108
Fig. A.6 Datos del desplazamiento generado, obtenidos al simular un chevron.	108
Fig. A.7 Efectos del análisis en el modelo 3D donde se observa la distribución de temperatura.	109
Fig. B.1 Modelo en 3D del sistema para simular un actuador tipo chevron donde se muestra un esquema más realista considerando la capa de aire entre los materiales.	111
Fig. B.2 Modelo en 3D del sistema considerando al aire como: (a) un fluido, (b) un sólido.	113
Fig. B.3 Temperatura máxima de un actuador chevron considerando diferentes formas de transferencia de calor al definir el aire como fluido, sólido y presentando una alternativa que considera las pérdidas de temperatura sin la necesidad de definir la capa de aire.	114
Fig. B.4 Desplazamiento generado bajo diversas consideraciones de la pérdida de temperatura.	115
Fig. B.5 Distribución de temperatura en un chevron cuando se aproximan las pérdidas de temperatura por convección en lugar de conducción.	117
Fig. C.1 Diferentes tipos de deformación debidas a la forma en que se aplica la fuerza externa. (a) Deformación por tensión en dirección del flujo de corriente. (b) Deformación por compresión en dirección del flujo de corriente. (c) Deformación debida a una fuerza transversal al flujo de corriente.	119
Fig.C.2 Circuito para aplicar un potencial constante y medir corriente. a) Sin fuerza aplicada, b) variación de la corriente debida a la fuerza aplicada.	120
Fig. C.3 Circuito para aplicar una corriente constante y medir voltaje. (a) Circuito sin fuerza externa, (b) variación del voltaje de salida debido a la fuerza externa.	121
Fig. C.4 Circuito estabilizador o medio puente.	121

Fig. C.5 (a) E reducido respecto a ΔE en la misma magnitud que V_1 , (b) E reducido a cero mediante ajuste de potenciómetro. 122

Fig. C.6 Esquema eléctrico de un puente de wheatstone indicando las corrientes existentes en cada rama del circuito. 123

Fig. C.7 Esquema eléctrico de un puente wheatstone indicando las corrientes existentes en cada rama del circuito..... 125

Fig. C.8 Amplificador CMOS de dos etapas compensado. 128

Fig. C.9 Respuesta en frecuencia del amplificador de la figura 1. 131

Fig. C.10 Esquema de un amplificador de diferencia..... 132

Fig. C.11 Diagrama de un seguidor de fuente tipo N. 133

Fig. C.12 Respuesta en AC del circuito amplificador de diferencia a diferentes ganancias..... 134

Fig. C.13 Análisis transitorio variando una resistencia de 70Ω a 78Ω . Arriba se muestra la salida del puente. Abajo la salida del amplificador con ganancia de 10..... 135

Fig. C.14 Respuesta en DC del amplificador de diferencia..... 136

Índice de Tablas

<i>Tabla 2.1 Dimensiones de los actuadores fabricados.</i>	<i>14</i>
<i>Tabla 2.2 Propiedades físicas del Polisilicio (material estructural de los actuadores).</i>	<i>15</i>
<i>Tabla 3.1 Información de la variación de parámetros.</i>	<i>53</i>
<i>Tabla 3.2 Comparación de dimensiones en las estructuras.</i>	<i>76</i>
<i>Tabla 3.3 Valores resistivos de las estructuras de la Fig. 3.42.</i>	<i>86</i>
<i>Tabla 3.4 Comportamiento piezoresistivo al aplicar una fuerza transversal.</i>	<i>86</i>
<i>Tabla 3.5 Comportamiento piezoresistivo al aplicar una fuerza longitudinal.</i>	<i>87</i>
<i>Tabla 3.6 Deformación de las estructuras cuando se ven sometidas a una fuerza externa. La dirección de la deformación es en dirección de la fuerza aplicada.</i>	<i>88</i>
<i>Tabla A.1 Propiedades del polisilicio utilizadas en el simulador.</i>	<i>101</i>
<i>Tabla A.2 Dependencia con temperatura de la conductividad.</i>	<i>103</i>
<i>Tabla A.3 Dependencia con temperatura del calor específico.</i>	<i>104</i>
<i>Tabla C.1 Modelos de transistores para HSPICE.</i>	<i>126</i>
<i>Tabla C.2 Parámetros del proceso ECMOS-INAOE.</i>	<i>127</i>
<i>Tabla C.3 Dimensiones de los transistores del amplificador de la Fig. C.8.</i>	<i>130</i>

Referencias

- [1] Bharat Bhushan, “Springer Handbook of Nano-technology, 2nd revised and extended edition.” Springer 2007.
- [2] Fernando Julián Quiñones Novelo, “Desarrollo y caracterización de micro-estructuras Joule con poly-silicio,” Tesis de Maestría, INAOE, Puebla, México, 2009.
- [3] José Andrés Alanís Navarro, “Desarrollo del Proceso de Fabricación PolyMEM-INAOE.” Tesis de Maestría, INAOE, Puebla, México 2008.
- [4] Daniela Díaz Alonso, “Fabricación y CARACTERIZACIÓN DE Estructuras Capacitivas para monitorear Presion,” Tesis de Maestría, INAOE, Puebla, México 2010.
- [5] Rebecca Cragun and Larry L. Howell, “Linear Thermomechanical Microactuators,” in Proc. ASME IMECE, pp. 181–88, 1999.
- [6] “Final Report: Compliant Thermo-Mechanical MEMS Actuators LDR #52553.” Michael S. Baker, Richard A. Plass, Thomas J. Headley, Jeremy A. Walraven. Sandia National Laboratories. December 2004.
- [7] John. H. Comtois, Victor M. Bright, and Mark W. Phipps. “Thermal microactuators for surface-micromachining processes.” SPIE, Vol. 2642. Pp. 10-21.
- [8] Hickey R., Sameoto D., Hubbard T. and Kujath M. “Time and frequency response of two-arm micromachined thermal actuators.” *J. Micromech. Microeng* 13 (2003) 40–46.
- [9] Rebecca Cragun. “Thermal Micoactuators for Microelectromechanical systems (MEMS).” Master’s Thesis. Brigham Young University, 1999.
-

[10] Dong Yan, Amir Khajepour and Raafat Mansour. "Design and modeling of a MEMS bidirectional vertical thermal actuator." *J. Micromech. Microeng.* 14 (2004) 841-4850.

[11] Yongjun Lai, James McDonald, Marek Kujath and Ted Hubbard. "Force, deflection and power measurements of toggled microthermal actuators." *Journal os Micromechanics and Microengineering.* 14(2004) 49-56.

[12] Robert K. Messenger. "Modeling and Control of Surface Micromachined Thermal Actuarors." Master's Thesis. Brigham Young University, 2004.

[13] Michael J. Sinclair, Kerwin Wang. "Thermal actuator improvements: tapering and folding." *Smart Sensors, Actuators, and MEMS, SPIE Vol. 5116* (2003).

[14] A. Corigliano, L. Domenella, G. Langfelder. "On-Chip Mechanical Characterization using an Electro-thermo-mechanical Actuator." *Society for Experimental Mechanics* (2010) 50:695-707.

[15] Jorge Varona, Margarita Tecpoyotl, Anas Hamoi, Jesús Escobedo, Javier Sanchez. "Polysilicon thermal microactuators for heat scavenging and power conversion." *Journal of Micro/Nanolithography, MEMS ans MOEMS*, Vol. 8, No. 2, 2009.

[16] J. K. Luo, A.J.Flewitt, S.M.Spearing, N.A.Flexk and W.I.Milne, "Modelling of Microspring Thermal Actuator." in *NSTI-Nanotech 2004*, Vol. 1 pp. 355-358, 2004.

[17] "Strain Effect in Semiconductors, Theory and Device Applications". Youngke Sun, Scott E. Thompson, Toshikazu Nishida. Springer 2010.

- [18] Beléndez T., Neipp C., Beléndez A. “Large and small deflections of a cantiliver beam.” *Eur. J. Phys.* 23 (2002) pp. 371-379.
- [19] Michael J. Sinclair. “A High Force Low Area MEMS Thermal Actuator.” *Inter Society Conference on Thermal Phenomena*, 2000.
- [20] Tyler Lane Waterfall. “Design of Piezoresistive MEMS Force and Displacement Sensors.” *Master’s Thesis*. Brigham Young University, 2006.
- [21] Jonathan W. Wittwer, Michael S. Baker, Larry L. Howell. “Simulation, measurement, and asymmetric buckling of thermal microactuators.” *Sensors and Actuators A* 128 (2006) 395-401.
- [22] “The Bonded Electrical REsistance Strain Gage”. William M. Murray, William R. Miller. 1992 Oxford University Press.
- [23] “Understanding Smart Sensors 2nd Edition”. Randy Frank. 2000 Artech House, INC.
- [24] “Principles of Electronic Materials and Devices 3rd Edition.” S.O. Kasap. McGraw-Hill Higher Education 2006.
- [25] Madou, M., 2002. “Fundamentals of Microfabrication.” CRC Press, 2Ed.
- [26] N. Maluf, K. Williams, 2004. “An introduction to Microelectromechanical Systems Engineering.” Artech House, Inc. 2Ed.
- [27] “Heat Transfer 6th Edition“. J.P. Holman. McGraw-Hill Book Co. 1986.
- [28] “Handbook of Heat Transfer 3rd Edition.” Warren M. Rohsenow, James P. Hartnett, Young I. Cho. MaGraw-Hill, 1998.
- [29] Liwei Lin, Mu Chiao. “Electrothermal responses of lineshape microstructures.” *Sensors and Actuators, A* 55 (1996) 35-41.
-

[30] John H. Comtois and Victor M. Bright. "Surface Micromachined Polysilicon Thermal Actuator Arrays and Applications." Solid-State Sensors and Actuators Workshop, 1996.

[31] "Wire Bonding in Microelectronics 3rd Edition." George Harman. McGraw-Hill, 2010.

[32] "CoventorWare 2010, Using CoventorWare". Coventor, Inc.

[33] "CoventorWare DESIGNER Version 2010, Reference, MEMS and Microsystems Design." Coventor, Inc.

[34] Jung-Hun Chae, Jae-Youl Lee, Sang-Won Kang. "Measurement of thermal expansion coefficient of poly-Si using microgauge sensors." SPIE Vol. 3242, pp. 202-211.

[35] A. A. Kovalevskii, A. V. Dolbik, and S. N. Voitekh. "Effect of Doping on the Temperature Coefficient of Resistance of Polysilicon Films." Russian Microelectronics, 2007, Vol. 36, No. 3, pp. 153-158.

[36] Matts Rydberg and Ulf Smith. "Temperature Coefficient of Resistivity in Heavily Doped Oxygen-Rich Polysilicon." Journal of The Electrochemical Society, 148 (12) G725-G733 (2001).

[37] Huang, Q.A., and Lee, N.K.S., 1999. "Analysis and Design of Polysilicon Thermal Flexure Actuator." Journal of Micromechanics and Microengineering, Vol. 9, pp.64-70.

[38] Barin Ihsan, "Thermochemical Data of Pure Substances 3rd ed.". VCH Weinheim

[39] José Luis González Vidal. "Aplicación de Estructuras Micro-Electro-Mecánicas (MEMS's) con Tecnología CMOS, para Sensores de Parámetros Físicos." Tesis de Doctorado, CINVESTAV, México 2005.

[40] Christian D. Lott. 2001. "Electrothermomechanical modeling of a surface-micromachined linear displacement microactuator." MS Thesis, Brigham Young University.

[41] Incropera, De Witt, Bergman, Lavine. "*Fundamentals of heat and mass transfer*". 6th Ed. John Wiley and Sons.

[42] W.Kauzmann. "*Teoría cinética de los gases, Propiedades térmicas de la materia Vol. 1*". Editorial Reverté, S. A.

[43] "Analog Integrated Circuit Design." David Johns, Ken Martin. John Wiley & Sons, Inc.

[44] "Analysis and Design of Analog Integrated Circuits, 4th Edition." Gray, Hurst, Lewis, Meyer. John Wiley & Sons, Inc. 2001.

[45] "CMOS Analog Circuit Design." Phillip E. Allen and Douglas R. Holberg. New York: Oxford University Press, 2002.

[46] "Design procedure for two-stages CMOS opamp with optimum balancing of speed, power and noise." Uday Bhanu Singh Chandrawat & D. K. Mishra. International Journal of Electronics, Vol. 96, Issue 11, 2009.

[47] "Circuitos Microelectrónicos, 5 Edición." Adel S. Sedra. McGraw-Hill

[48] "Fundamentals of Microelectronics, 1st Edition." Behzad Razavi. John Wiley & Sons, Inc. 2008.
