

**UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DEL ESTADO DE MORELOS**

INSTITUTO DE INVESTIGACIÓN EN CIENCIAS BÁSICAS Y APLICADAS

CENTRO DE INVESTIGACIÓN EN INGENIERÍA Y CIENCIAS APLICADAS

**“Diseño de un actuador V asimétrico”**

**T E S I S**

para obtener el grado de:

Licenciado en Tecnología con Área Terminal en Física Aplicada

**Presenta**

**Josahandy Sarabia Vergara**

**Director de tesis**

Dra. Margarita Tecpoyotl Torres

## RESUMEN

---

---

Este presente trabajo se enfoca en la propuesta de diseño de un nuevo actuador asimétrico basado en la modificación de un chevrón convencional y el modelado matemático de las ecuaciones de fuerza y desplazamiento del chevrón asimétrico.

Mediante procesos de parametrización fue posible determinar las dimensiones óptimas del actuador asimétrico, para lograr el mayor valor de fuerza, conservando el tamaño compacto del actuador chevrón del que se partió. Considera al caso de un solo par de brazos. La propuesta de la geometría del actuador asimétrico es novedosa, ya que, en un área compacta similar al del chevrón simétrico, genera un 87.53% de incremento en la fuerza de reacción, en comparación con el actuador simétrico y un aumento de desplazamiento de 10.12%

Con base al modelado matemático para el cálculo de la fuerza y del desplazamiento de un chevrón simétrico, se realizó el modelado matemático del actuador asimétrico. El énfasis se encuentra en la ecuación que modela la fuerza, cuyos resultados al ser comparados con los resultados numéricos obtenidos de la simulación en ANSYS Workbench, se encuentran muy cercanos, con un margen de error menor al 23%. Adicionalmente, en el caso del modelado del desplazamiento, debido a su complejidad, se presenta una primera aproximación, en la cual se encuentran errores menores a 47%. Cabe señalar que, en (Kaajakari, 2009), se presentan errores incluso mayores, cuando se lleva a cabo el modelado de nuevos dispositivos en los cuales el establecimiento de las condiciones de frontera puede ser aún mejorado. Por lo que, se considera que la ecuación obtenida para el desplazamiento es un punto de partida para trabajos futuros, donde, además, el efecto del torque sea considerado. Las asimetrías presentes hacen que se incremente la complejidad del análisis.

## ABSTRACT

---

---

This work focuses on the design proposal of a new asymmetric actuator based on the modification of a conventional chevron and the mathematical modeling of the force and displacement equations of the asymmetric chevron.

Through parameterization processes it was possible to determine the optimum dimensions of the asymmetric actuator, to achieve the highest force value, keeping the compact size of the chevron actuator from which, it started. Consider the case of a single pair of arms. The proposed geometry of the asymmetric actuator is novel, and that, in a compact area like the symmetric chevron, generates an 87.53% increase in reaction force, compared to the symmetric actuator and an increase in displacement of 10.12%.

Based on the mathematical modeling for the calculation of the force and displacement of a symmetrical chevron, the mathematical modeling of the asymmetrical actuator was performed. The emphasis is on the equation that models the force, whose results when compared with the numerical results obtained from the simulation in ANSYS Workbench, are very close, with a margin of error of less than 23%. Additionally, in the case of the displacement modeling, due to its complexity, a first approximation is presented, in which errors of less than 47% are found. It should be noted that, in (Kaajakari, 2009), even greater errors are presented when modeling new devices in which the establishment of the boundary conditions can still be improved. Therefore, it is considered that the equation obtained for the displacement is a starting point for future work, where, in addition, the effect of torque is considered. The asymmetries of the device increase the complexity of the analysis.

## **AGRADECIMIENTOS**

---

---

Agradezco a mi directora de tesis y maestra en varias asignaturas de licenciatura, la Dra. Margarita Tecpoyotl, por el haberme permitido formar parte de su equipo de trabajo y el compartirme sus conocimientos en el área en el que se desempeña y que tanto le apasiona.

A la Lic. Sahiril Fernanda Rodríguez Fuentes, por el apoyo en ANSYS Workbench.

Al Dr. Pedro Vargas Chablé por la revisión y comentarios sobre el modelado realizado.

A CONACyT, por el apoyo de beca de tesis de licenciatura con número de registro 31203, obtenido como parte del proyecto de Ciencia Básica "Diseño, análisis e implementación de novedosos dispositivos MEMS inerciales y electro-térmicos".

"Proyecto Apoyado por el Fondo Sectorial de Investigación para la Educación", con número de referencia A1-S-33433.

## DEDICATORIA

---

---

A mi *Canis Majoris*, quien es la persona que admiro y amo,  
que me ha dado su cariño, comprensión y sabiduría,  
y me ha acompañado en mi camino de la vida...

# CONTENIDO

---

---

RESUMEN .....	I
ABSTRACT .....	II
AGRADECIMIENTOS .....	III
DEDICATORIA.....	IV
ÍNDICE DE FIGURAS .....	VIII
ÍNDICE DE TABLAS.....	XI
CAPÍTULO 1.- INTRODUCCIÓN .....	1
1.1    Introducción.....	1
1.2    Antecedentes .....	1
1.3    Objetivo General .....	3
1.3.1    Objetivos Particulares .....	3
1.4    Justificación.....	4
1.5    Limitaciones .....	4
1.6    Software y equipo.....	5
1.7    Organización de la Tesis.....	5
2.    CAPÍTULO 2.- MARCO TEÓRICO .....	6
2.1    Sistemas Microelectromecánicos .....	6
2.2    Microactuador.....	8
2.3    Actuación Electrotérmica.....	8
2.3.1    Efecto Joule .....	9
2.3.2    Expansión térmica de los materiales .....	9
2.4    Microactuador Electrotérmico: Chevrón .....	11
2.4.1    Descripción de la estructura del Actuador Chevrón V .....	11
2.4.2    Funcionamiento del Microactuador Chevrón V .....	12
2.5    Ecuaciones para análisis matemático del Microactuador chevrón forma V	13
2.6    Análisis, Diseño y Simulación.....	15
2.7    Mecánica de estructuras. ....	17
2.7.1    Ley de Hook.....	17
2.7.2    Deformación axial .....	17

2.7.3	Esfuerzo Axial.....	18
2.7.4	Deformación Unitaria .....	19
3.	CAPÍTULO 3.- METODOLOGÍA.....	22
3.1	Metodología: General.....	22
3.2	Metodología: desarrollo de las ecuaciones .....	23
3.3	Metodología: Simulación y Parametrización del Chevrón Simétrico .....	24
3.4	Metodología: Simulación y Parametrización del Chevrón Asimétrico.....	25
4.	CAPÍTULO 4.- MODELADO MATEMÁTICO DEL MICROACTUADOR CHEVRÓN SIMÉTRICO Y DEL ACTUADOR ASIMÉTRICO .....	27
4.1	Fuerza de reacción.....	27
4.1.1	Fuerza de reacción: Actuador Simétrico.....	28
4.1.2	Fuerza de reacción: Actuador Asimétrico .....	30
4.2	Desplazamiento de salida .....	31
4.2.1	Desplazamiento de salida: Actuador Simétrico.....	31
4.2.2	Desplazamiento de salida: Actuador Asimétrico.....	39
5.	CAPÍTULO 5.- SIMULACIÓN BASADA EN LA PARAMETRIZACIÓN DEL CHEVRÓN SIMETRICO.....	45
5.1	Material estructural del actuador .....	45
5.2	Software .....	46
5.3	Resultados de simulación del microactuador chevrón .....	46
5.3.1	Diseño y Simulación .....	47
5.3.2	Parametrización.....	55
5.3.3	Comparación y elección de nuevas dimensiones de diseño .....	60
6.	CAPÍTULO 6.- SIMULACIÓN BASADA EN LA PARAMETRIZACIÓN DEL ACTUADOR ASIMÉTRICO .....	65
6.1	Parametrización: Brazo 1 .....	66
6.1.1	Parametrización.....	67
6.1.2	Comparación de datos analíticos y numéricos .....	69
6.2	Parametrización: Brazo 2 .....	72
6.2.1	Parametrización.....	72
6.2.2	Comparación de resultados analíticos y simulados .....	74
6.3	Parametrización del largo de los brazos .....	77
6.3.1	Parametrización del largo de brazo con $w_1= 5 \mu\text{m}$ y $w_2=15 \mu\text{m}$ .....	77

6.3.2	Características del del primer chevrón asimétrico ( $w_2= 15 \mu\text{m}$ ).....	79
6.3.3	Parametrización del largo de brazo con $w_1= 5 \mu\text{m}$ y $w_2=20 \mu\text{m}$ .....	83
6.3.4	Características del del segundo chevrón asimétrico ( $w_2= 20 \mu\text{m}$ ) .....	85
6.3.5	Parametrización del largo de brazo con $w_1= 5 \mu\text{m}$ y $w_2=25 \mu\text{m}$ .....	88
6.3.6	Características del del tercer chevrón asimétrico ( $w_2= 25 \mu\text{m}$ ) .....	90
6.4	Comparación de los tres chevrones .....	94
6.5	Comparación de desempeño de un actuador simétrico y asimétrico. ....	95
7.	CAPÍTULO 7.- CONCLUSIONES .....	97
7.1	Conclusión.....	97
7.2	Trabajo Futuro.....	98
	BIBLIOGRAFÍA .....	100
	ANEXO A .....	104



## ÍNDICE DE FIGURAS

---

---

FIGURA 2.1 DIAGRAMA DE LA EXPANSIÓN TÉRMICA DE UNA VARILLA.....	10
FIGURA 2.2 DIAGRAMA DE UN MICROACTUADOR ELECTROTÉRMICO CHEVRÓN FORMA V.	12
FIGURA 2.3 REPRESENTACIÓN DE UN CHEVRÓN CON UNA FUENTE DE VOLTAJE CONECTADO A LAS ANCLAS. ....	13
FIGURA 2.9 REPRESENTACION GRÁFICA DE LA LEY DE HOOKE. ....	17
FIGURA 2.10 REPRESENTACION DE LA DEFORMACIÓN QUE EXPERIMENTA UNA BARRA AL APLICARLE UNA FUERZA. ....	19
FIGURA 2.11 DIAGRAMA DE ESFUERZO-DEFORMACIÓN UNITARIA. (W. FITZGERALD, 1996) .....	21
FIGURA 3.1 DIAGRAMA DE LA METODOLOGÍA GENERAL DE TESIS.....	22
FIGURA 3.2 DIAGRAMA DEL PROCESO PARA EL DESARROLLO DE LAS ECUACIONES DE AMBOS ACTUADORES. ....	24
FIGURA 3.3 MAPA DE LA METODOLOGÍA PARA LA DISEÑO, SIMULACIÓN Y PARAMETRIZACIÓN DEL CHEVRÓN SIMÉTRICO. ....	24
FIGURA 3.4 DIAGRAMA DE LA METODOLOGÍA DE LA SIMULACIÓN Y PARAMETRIZACIÓN DEL CHEVRÓN ASIMÉTRICO. ....	25
FIGURA 4.1 DIAGRAMA DEL MICROACTUADOR CHEVRÓN SIMÉTRICO SUS RESPECTIVOS PARÁMETROS GEOMÉTRICOS. ....	27
FIGURA 4.2 DIAGRAMA DE LA VISTA LATERAL DEL BRAZO DE UN CHEVRÓN, CON LOS PARÁMETROS QUE LO DESCRIBEN. ....	27
FIGURA 4.3 REPRESENTACIÓN DE LA FUERZA GENERADA POR LA EXPANSIÓN TÉRMICA, CHEVRÓN SIMÉTRICO. ....	30
FIGURA 4.4 REPRESENTACIÓN DE LA FUERZA GENERADA POR LA EXPANSIÓN TÉRMICA, CHEVRÓN ASIMÉTRICO. ....	31
FIGURA 4.5 DIAGRAMA DE LA REPRESENTACIÓN DEL DESPLAZAMIENTO QUE GENERA UN CHEVRÓN AL APLICAR UN VOLTAJE.....	32
FIGURA 4.6 GRADOS DE LIBERTAD DEL CHEVRÓN SIMÉTRICO. ....	33
FIGURA 4.7 GRADOS DE LIBERTAD DE UNO DE LOS BRAZOS DEL CHEVRÓN.....	34
FIGURA 4.8 DIAGRAMA PARA EL CAMBIO DE TÉRMINOS LOCALES A GLOBALES PARA $U_{Lx}$ . .	34
FIGURA 4.9 DIAGRAMA PARA EL CAMBIO DE TÉRMINOS DE DESPLAZAMIENTOS LOCALES A GLOBALES.....	35
FIGURA 4.10 DIAGRAMA PARA EL CAMBIO DE TÉRMINOS DE FUERZA LOCALES A GLOBALES. .....	36
FIGURA 4.11 GRADOS DE LIBERTAD DEL CHEVRÓN ASIMÉTRICO.....	39
FIGURA 4.12 GRADOS DE LIBERTAD DEL BRAZO 1 DEL ACTUADOR ASIMÉTRICO.....	39
FIGURA 4.13 GRADOS DE LIBERTAD DEL BRAZO 2 DEL ACTUADOR ASIMÉTRICO. ....	41
FIGURA 5.11 DIAGRAMA DEL CHEVRÓN, CON LA DISTRIBUCIÓN DE LOS PARÁMETROS Y LAS MEDIDAS BASE. ....	47

FIGURA 5.2 DISEÑO DEL CHEVRÓN SIMÉTRICO EN ANSYS-->GEOMETRY .....	47
FIGURA 5.3 GRÁFICA VOLTAJE VS FUERZA.....	48
FIGURA 5.4 GRÁFICA VOLTAJE VS DESPLAZAMIENTO .....	49
FIGURA 5.5 GRÁFICA DE VOLTAJE VS ESFUERZO .....	49
FIGURA 5.6 GRÁFICA VOLTAJE VS TEMPERATURA.....	50
FIGURA 5.7DESPLAZAMIENTO GENERADO CON 2.8V.....	51
FIGURA 5.8 FUERZA EN EL EJE Y AL APLICAR 2.8V.....	51
FIGURA 5.9 ESFUERZO GENERADO CON 2.8V.....	52
FIGURA 5.10 DISTRIBUCIÓN DE TEMPERATURA CON UN VOLTAJE DE 2.8V.....	52
FIGURA 5.11 GRÁFICA COMPARATIVA DEL DESPLAZAMIENTO ANALÍTICO Y NUMÉRICO. ....	54
FIGURA 5.12 GRÁFICA COMPARATIVA DE LA FUERZA OBTENIDA DE FORMA ANALÍTICA Y NUMÉRICA.....	54
FIGURA 5.13 GRÁFICA DE ANCHO DE BRAZOS VS DESPLAZAMIENTO.....	56
FIGURA 5.14 GRÁFICA DE ANCHO DE BRAZOS VS FUERZA.....	56
FIGURA 5.15GRÁFICA DE ANCHO DE BRAZOS VS ESFUERZO.....	57
FIGURA 5.16 GRÁFICA DE ANCHO DE BRAZOS VS FUERZA ANALÍTICA Y NUMÉRICA. ....	59
FIGURA 5.17 GRÁFICA DE ANCHO DE BRAZOS VS DESPLAZAMIENTO ANALÍTICO Y NUMÉRICO.....	59
FIGURA 5.18 DISEÑO DEL ACTUADOR CHEVRÓN CON UN ANCHO DE BRAZOS DE 10 $\mu$ m. ...	61
FIGURA 5.19 DESPLAZAMIENTO DEL CHEVRÓN CON UN ANCHO DE BRAZOS DE 10 $\mu$ m. ....	62
FIGURA 5.20 FUERZA DEL CHEVRÓN CON UN ANCHO DE BRAZOS DE 10 $\mu$ m.....	62
FIGURA 5.21DISTRIBUCION DE TEMPERATURA CON UN ANCHO DE BRAZOS DE 10 $\mu$ m.....	63
FIGURA 5.22ESFUERZO DEL CHEVRÓN CON UN ANCHO DE BRAZOS DE 10 $\mu$ m.....	63
FIGURA 6.1 ELEMENTO QUE CONFORMA AL CHEVRÓN ASIMÉTRICO CON SU RESPECTIVO NOMBRE.....	66
FIGURA 6.2 GRÁFICA DE ANCHO DE BRAZO 1 VS FUERZA.....	68
FIGURA 6.3 GRÁFICA DE ANCHO DE BRAZO VS DESPLAZAMIENTO. ....	68
FIGURA 6.4 GRÁFICA DE ANCHO DE BRAZO 1 VS ESFUERZO. ....	69
FIGURA 6.5 GRÁFICA DE ANCHO DE BRAZO 1 VS DESPLAZAMIENTO. ....	71
FIGURA 6.6 GRÁFICA DE ANCHO DE BRAZO 1 VS FUERZA.....	71
FIGURA 6.7 GRÁFICA DE ANCHO DE BRAZO 2 VS DESPLAZAMIENTO. ....	73
FIGURA 6.8GRÁFICA DE ANCHO DE BRAZO 2 VS FUERZA.....	73
FIGURA 6.9 GRÁFICA DE ANCHO DE BRAZO 2 VS ESFUERZO. ....	74
FIGURA 6.10 GRÁFICA COMPARATIVA DE VALORES ANALÍTICOS Y NUMÉRICOS, ANCHO BRAZO 2 VS DESPLAZAMIENTO. ....	76
FIGURA 6.11 GRÁFICA COMPARATIVA DE VALORES ANALÍTICOS Y NUMÉRICOS, ANCHO BRAZO 2 VS FUERZA.....	76
FIGURA 6.12 DISEÑO DEL CHEVRÓN ASIMÉTRICO CON W1=5 $\mu$ m Y W2=15 $\mu$ m Y L <sub>1</sub> = 500 $\mu$ m Y UN L <sub>2</sub> = 700 $\mu$ m.....	80
FIGURA 6.13 DESPLAZAMIENTO DEL CHEVRÓN ASIMÉTRICO L <sub>1</sub> = 500 $\mu$ m Y UN L <sub>2</sub> = 700 $\mu$ m	81
FIGURA 6.14 FUERZA DEL CHEVRÓN ASIMÉTRICO L <sub>1</sub> = 500 $\mu$ m Y UN L <sub>2</sub> = 700 $\mu$ m .....	81

FIGURA 6.15 ESFUERZO DEL CHEVRÓN ASIMÉTRICO $L_1= 500\mu\text{M}$ Y UN $L_2= 700\mu\text{M}$ .....	82
FIGURA 6.16 DISTRIBUCIÓN DE TEMPERATURA DEL CHEVRÓN ASIMÉTRICO $L_1= 500\mu\text{M}$ Y UN $L_2= 700\mu\text{M}$ .....	82
FIGURA 6.17 DISEÑO DEL CHEVRÓN ASIMÉTRICO CON $L_1= 500$ Y $L_2=700 \mu\text{M}$ , $w_1= 5 \mu\text{M}$ Y $w_2=20 \mu\text{M}$ . ....	86
FIGURA 6.18 DESPLAZAMIENTO DEL CHEVRÓN ASIMÉTRICO CON $L_1= 500 \mu\text{M}$ Y $L_2=700 \mu\text{M}$ , $w_1= 5 \mu\text{M}$ Y $w_2=20 \mu\text{M}$ .....	86
FIGURA 6.19 FUERZA DEL CHEVRÓN ASIMÉTRICO CON $L_1= 500 \mu\text{M}$ Y $L_2=700 \mu\text{M}$ , $w_1= 5 \mu\text{M}$ Y $w_2=20 \mu\text{M}$ . ....	87
FIGURA 6.20 ESFUERZO DEL CHEVRÓN ASIMÉTRICO CON $L_1= 500 \mu\text{M}$ Y $L_2=700 \mu\text{M}$ , $w_1= 5 \mu\text{M}$ Y $w_2=20 \mu\text{M}$ . ....	87
FIGURA 6.21 DISTRIBUCION DE TEMPERATURA DEL CHEVRÓN ASIMÉTRICO CON $L_1= 500 \mu\text{M}$ Y $L_2=700 \mu\text{M}$ , $w_1= 5 \mu\text{M}$ Y $w_2=20 \mu\text{M}$ .....	88
FIGURA 6.22 DISEÑO DEL CHEVRÓN ASIMÉTRICO CON $w_1=5\mu\text{M}$ Y $w_2=25 \mu\text{M}$ . ....	91
FIGURA 6.23 DESPLAZAMIENTO DEL CHEVRÓN ASIMÉTRICO CON $w_1=5\mu\text{M}$ Y $w_2=25 \mu\text{M}$ ..	92
FIGURA 6.24 FUERZA DEL CHEVRÓN ASIMÉTRICO CON $w_1=5\mu\text{M}$ Y $w_2=25 \mu\text{M}$ . ....	92
FIGURA 6.25 ESFUERZO DEL CHEVRÓN ASIMÉTRICO CON $w_1=5\mu\text{M}$ Y $w_2=25 \mu\text{M}$ . ....	93
FIGURA 6.26 DISTRIBUCIÓN DE TEMPERATURA DEL CHEVRÓN ASIMÉTRICO CON $w_1=5\mu\text{M}$ Y $w_2=25 \mu\text{M}$ . ....	93

## ÍNDICE DE TABLAS

---

---

TABLA 5.1 PROPIEDADES DEL SILICIO (MOUNIKA REDDY & SUNIL KUMAR, 2013) (GHATKESAR, Y OTROS, 2007) .....	45
TABLA 5.2 PARÁMETROS PARA EL DISEÑO DEL CHEVRÓN .....	46
TABLA 5.3 RESULTADOS NUMÉRICOS DE DESPLAZAMIENTO, FUERZA, ESFUERZO Y TEMPERATURA AL VARIAR LA TEMPERATURA. ....	48
TABLA 5.4 COMPARACIÓN DE RESULTADOS DE DESPLAZAMIENTO OBTENIDO DE FORMA ANALÍTICA Y NUMÉRICA, Y SU PORCENTAJE DE ERROR. ....	53
TABLA 5.5 COMPARACIÓN DE RESULTADOS DE LA FUERZA OBTENIDA DE FORMA ANALÍTICA Y NUMÉRICA, Y SU PORCENTAJE DE ERROR.....	53
TABLA 5.6 RESULTADOS DE LA PARAMETRIZACIÓN DEL ANCHO DEL PAR DE BRAZOS DE CHEVRÓN SIMÉTRICO. ....	55
TABLA 5.7 RESULTADOS DE LA COMPARACIÓN DE DATOS ANALÍTICOS Y NUMÉRICOS DEL DESPLAZAMIENTO, CON SU PORCENTAJE DE ERROR. ....	57
TABLA 5.8 RESULTADOS DE LA COMPARACIÓN DE DATOS ANALÍTICOS Y NUMÉRICOS DE LA FUERZA, CON SU PORCENTAJE DE ERROR .....	58
TABLA 5.9 NUEVAS DIMENSIONES PARA EL CHEVRÓN SIMÉTRICO Y VOLTAJE APLICADO... 60	
TABLA 5.10 COMPARACIÓN DE DESPLAZAMIENTO, FUERZA Y ESFUERZO DEL CHEVRÓN DE LAS DIMENSIONES USADAS COMO BASE Y LAS DIMENSIONES DEL CHEVRÓN SELECCIONADO. ....	60
TABLA 6.1 DIMENSIONES BASE PARA EL DISEÑO DEL CHEVRÓN ASIMÉTRICO .....	65
TABLA 6.2 RESULTADOS NUMÉRICOS DE LA PARAMETRIZACIÓN DEL BRAZO 1 DEL CHEVRÓN ASIMÉTRICO. ....	67
TABLA 6.3 COMPARACIÓN DE DATOS ANALÍTICOS Y NUMÉRICOS DEL DESPLAZAMIENTO. . 70	
TABLA 6.4 COMPARACIÓN DE DATOS ANALÍTICOS Y NUMÉRICOS DE LA FUERZA. ....	70
TABLA 6.5 RESULTADOS NUMÉRICOS DE LA PARAMETRIZACIÓN DEL ANCHO DEL BRAZO 272	
TABLA 6.6 COMPARACIÓN DE DATOS NUMÉRICOS Y ANALÍTICOS DEL DESPLAZAMIENTO DEL CHEVRÓN ASIMÉTRICO. ....	75
TABLA 6.7 COMPARACIÓN DE DATOS NUMÉRICOS Y ANALÍTICOS DE LA FUERZA DEL CHEVRÓN ASIMÉTRICO. ....	75
TABLA 6.8 DIMENSIONES CON MEJOR DESEMPEÑO.....	77
TABLA 6.9 VALORES DE LA PARAMETRIZACIÓN DEL LARGO DE LOS BRAZOS CON UN $w_1=5\mu\text{M}$ Y $w_2=15\mu\text{M}$ .....	78
TABLA 6.10 COMPARACIÓN DE VALORES ANALÍTICOS Y NUMÉRICOS DEL DESPLAZAMIENTO CON $w_1=5\mu\text{M}$ Y $w_2=15\mu\text{M}$ . ....	78
TABLA 6.11 DIMENSIONES DEL CHEVRÓN ASIMÉTRICO. ....	80
TABLA 6.12 RESULTADOS DE LA PARAMETRIZACIÓN DEL LARGO DE LOS BRAZOS CON $w_1=$ $5\mu\text{M}$ Y $w_2=15\mu\text{M}$ .....	83

TABLA 6.13	COMPARACION DE RESULTADOS ANALÍTICOS Y NUMÉRICOS DEL DESPLAZAMIENTO CON $w_1=5\ \mu\text{M}$ Y $w_2=20\ \mu\text{M}$ .....	84
TABLA 6.14	COMPARACIÓN DE RESULTADOS ANALÍTICOS Y NUMÉRICOS DE LA FUERZA CON $w_1=5\ \mu\text{M}$ Y $w_2=20\ \mu\text{M}$ .....	84
TABLA 6.15	DIMENSIONES DEL SEGUNDO CHEVRÓN ASIMÉTRICO, Y $V$ APLICADO.....	85
TABLA 6.16	RESULTADOS DE LA PARAMETRIZACIÓN DEL LARGO DE LOS BRAZOS CON $w_1=5\ \mu\text{M}$ Y $w_2=25\ \mu\text{M}$ .....	88
TABLA 6.17	COMPARACIÓN DE RESULTADOS ANALÍTICOS Y NUMÉRICOS DEL DESPLAZAMIENTO CON $w_1=5\ \mu\text{M}$ Y $w_2=25\ \mu\text{M}$ .....	89
TABLA 6.18	COMPARACION DE RESULTADOS ANALÍTICOS Y NUMÉRICOS DE LA FUERZA CON $w_1=5\ \mu\text{M}$ Y $w_2=25\ \mu\text{M}$ .....	90
TABLA 6.19	DIMENSIONES DEL TERCER CHEVRÓN ASIMÉTRICO. ....	90
TABLA 6.20	COMPARACIÓN DE LOS TRES CHEVRONES CON MEJOR DESEMPEÑO.....	94
TABLA 6.21	DIMENSIONES DE LA PROPUESTA DE UN NUEVO DISEÑO ACTUADOR ASIMÉTRICO. ....	95
TABLA 6.22	COMPARACIÓN DE RESULTADOS DEL CHEVRÓN SIMÉTRICO Y ASIMÉTRICO....	95



# **CAPÍTULO 1.- INTRODUCCIÓN**

En este capítulo se presentan los Antecedentes del trabajo de investigación, así como los Objetivos Generales y Particulares, la Justificación y Organización de la Tesis.

# **CAPÍTULO 1.- INTRODUCCIÓN**

---

## **1.1 Introducción**

Los Sistemas Microelectromecánicos (MEMS, por sus siglas en inglés), también llamados Micromáquinas, se originaron a partir de la tecnología de los circuitos integrados (CI), y han ganado una alta popularidad en los últimos años. Los micromecanismos y microactuadores que forman parte de los MEMS, están compuestos por dispositivos mecánicos y electrónicos miniaturizados (Fujita, 1998).

El microactuador chevrón es el dispositivo más usado dentro de los MEMS (Potekhina & Wang, 2019). Éste es un actuador electrotérmico que, a partir de un estímulo de corriente eléctrica genera desplazamiento y una fuerza en su salida (flecha) (Tecpoyotl Torres, Vargas Chable, Cabello Ruíz, & Flores González, 2019), Estos dispositivos se aplican ampliamente en las áreas automotriz, médica y electrónica, entre otras.

Una de las áreas de investigación de los MEMS, es el diseño del actuador chevrón, con el fin de encontrar los parámetros más adecuados que caracterizan su desempeño, además, de lograr reducción de costos en los procesos diseño y fabricación (Tecpoyotl T., Rodriguez F., Koshevaya, & Vargas, 2020).

## **1.2 Antecedentes**

En el microactuador chevrón se genera grandes fuerzas de salida con limitantes de desplazamiento relativamente pequeños (de 10 a 20  $\mu\text{m}$ ), en comparación de otro tipo de microactuadores, que ofrecen grandes fuerzas como consecuencia de un gran desplazamiento (Báez Álvarez, 2011). La respuesta, del actuador chevrón simétrico depende de sus parámetros de diseño y el material en el que se implementa. La geometría de sus elementos es importante, especialmente, el largo, el ancho y el ángulo de inclinación de los brazos.

Para acelerar el proceso de diseño, es posible apoyarse en simulaciones. El uso de software permite obtener el análisis de desempeño, de manera más rápida y sencilla (Tecpoyotl T., Rodriguez F., Koshevaya, & Vargas, 2020). Una de las herramientas más utilizadas para el diseño de MEMS es CoventorWare y ANSYS Inc, el cual se utilizará para el desarrollo de este trabajo.

La parametrización es una herramienta que nos permite determinar las dimensiones más apropiadas, para mejorar el desempeño de los actuadores. Debido a que la bibliografía revisada establece un rango de ángulos de inclinación sugeridos, es posible investigar que sucede con el ancho y el largo de los brazos, determinando una combinación adecuada, generándose un actuador de brazos asimétricos.

En nuestro caso, el análisis de desempeño del actuador chevrón y del actuador propuesto en esta tesis se llevan a cabo mediante simulaciones, cuyos resultados se comparan con los resultados analíticos para validar las expresiones desarrolladas.

### **1.3 Pregunta de investigación**

- ¿Qué pasa si se implementa una asimetría en los brazos del actuador chevrón?
- ¿Cuál es el efecto en el desempeño del actuador si las anchuras de los brazos no son iguales?
- ¿Cuál es el efecto en el desempeño del actuador si las longitudes de los brazos no son iguales?
- ¿Cuál es el efecto en el desempeño del actuador si las anchuras y las longitudes de los brazos no son iguales?

### **1.4 Hipótesis**



Si el actuador tiene un par de brazos con diferente largo y ancho, de tal forma que el diseño del chevrón sea asimétrico, se obtendrá una fuerza de reacción mayor que en el caso de la obtenida con el actuador simétrico.

## **1.5 Objetivo General**

Diseñar un actuador asimétrico, con base al actuador chevrón convencional, de tal forma que, la longitud y el grosor de sus brazos proporcionen una mayor fuerza y desarrollar el modelado matemático de la fuerza de salida para el actuador asimétrico.

### 1.5.1 Objetivos Particulares

1. Analizar el funcionamiento del actuador chevrón convencional.
2. Realizar simulaciones de desplazamiento, fuerza y esfuerzo.
3. Realizar simulaciones mediante parametrizaciones.
4. Diseñar actuador en forma de V asimétrico.
5. Realizar simulaciones de desplazamiento, fuerza y esfuerzo.
6. Realizar simulaciones mediante parametrizaciones.
7. Seleccionar la geometría que proporcione mayor fuerza.
8. Modelar la fuerza de reacción del actuador asimétrico.
9. Proponer una primera aproximación para el cálculo del desplazamiento.

## **1.6 Justificación**

En el área de MEMS, se lleva a cabo una continua mejora de los dispositivos existentes, creándose también nuevas estructuras.

Los actuadores chevrón han sido ampliamente estudiados, generándose variaciones en su geometría, por ejemplo, en la forma de sus brazos y su distribución (Tecpoyotl-Torres, Cabello-Ruiz, & Vera-Dimas, 2015) (Wittwer, Baker, & Howell, 2006)

El propósito de este estudio es, con base en el diseño de un actuador chevrón convencional, a partir del análisis paramétrico de las dimensiones y anchuras de sus brazos, generar un actuador asimétrico, con una mayor fuerza de salida.

## **1.7 Limitaciones**

La mayoría del presente trabajo se desarrolló en un entorno atípico, debido a la pandemia por COVID-19, ya que en su momento no se podía asistir de manera presencial al centro de estudios. De manera similar hubo un retraso en el desarrollo de la tesis debido a que, la autora del trabajo también enfermó de COVID-19.

Por otro lado, con relación a la disponibilidad del software especializado, debe mencionarse que, uno de los softwares más usados para la simulación de MEMS es CoventorWare. Sin embargo, no se cuenta con esta licencia debido a situaciones fuera de nuestro alcance.

Otra limitante en este trabajo es que no es posible acceder a todas las referencias bibliográficas a texto completo.

## 1.8 Software y equipo

En la UAEM se cuenta con la licencia del software ANSYS, el cual es una herramienta ampliamente usada para la simulación de los MEMS. También se cuenta con equipos de cómputo que nos permite llevar a cabo las simulaciones necesarias.

Dentro del equipo de trabajo del laboratorio de Electrónica y Dispositivos para Sistemas de Comunicación, se cuenta, además, con tesis y artículos relacionado con los MEMS.

Puede decirse que, se cuenta con *Know-How*, generado por el grupo de trabajo.

## 1.9 Organización de la Tesis

Esta tesis se divide en 7 capítulos, los cuales se describen a continuación.

- Capítulo 1. Se presenta introducción y antecedentes de los MEMS, los objetivos a lograr, justificación y limitaciones de este presente trabajo.
- Capítulo 2. El capítulo 2 se presenta una breve historia de los MEMS y su evolución, así como el impacto que han tenido. Se presenta al microactuador chevrón, su forma de actuación y sus características. Así como temas de transferencia de calor y mecánica de materiales.
- Capítulo 3. Se presenta la metodología general y las metodologías particulares que se siguieron para el desarrollo del presente trabajo
- Capítulo 4. En este capítulo se muestra el desarrollo de las ecuaciones de desplazamiento y de fuerza del chevrón simétrico. También se muestra el desarrollo para las ecuaciones de desplazamiento y de fuerza del chevrón asimétrico, propuestas por el autor de esta tesis.

- Capítulo 5. En este capítulo se presentan el diseño, simulación y parametrización del chevrón simétrico, también se presenta la comparación entre los resultados numéricos y analíticos.
- Capítulo 6. Se presentan las simulaciones y parametrización del chevrón asimétrico, además, se presenta la comparación entre los resultados numéricos y analíticos, y la propuesta de diseño del nuevo actuador.
- Capítulo 7. En este capítulo se presenta las conclusiones de este presente trabajo y se menciona el trabajo futuro generado.

## **CAPÍTULO 2.- MARCO TEÓRICO**

En el este capítulo, se presenta información general de los MEMS, se presenta al microactuador chevrón V, su modelado y los principios físicos de funcionamiento. Entre los conceptos básicos requeridos como base para este análisis, se presentan conceptos básicos de mecánica de materiales.

## **CAPÍTULO 2.- MARCO TEÓRICO**

---

### **2.1 Sistemas Microelectromecánicos**

Los Sistemas Microelectromecánicos (MEMS), también llamados micromáquinas, se originan a partir de la tecnología de fabricación de los circuitos integrados (CI). Los MEMS son microdispositivos conformados por componentes microelectrónicos y micromecánicos, funcionan como sensores o actuadores, y tienen dimensiones entre  $1\mu\text{m}$  a  $100\mu\text{m}$ .

En el desarrollo de los MEMS, sensores, actuadores y funciones de control se fabrican en silicio utilizando micromecanizado y procesamiento CI (Bustillo, Howe, & Muller, 1998).

En las (Maluf & Williams, 2002), (Anónimo), (Mishra, Dubey, Mishra, & Khan, 2019) se encuentra una breve historia de los MEMS incluyendo los orígenes de CI, debido a su amplia relación. Resaltan los siguientes hitos:

En 1947, se crea transistor de punto de contacto, por Bardeen y Brattain, utilizando germanio, demostrando que los transistores se podían fabricar con materiales semiconductores.

En 1958, Jack Kilby fabricó el primer circuito integrado (CI) utilizando Germanio.

En 1960, empezó el desarrollo de sensores de presión en las obleas de silicio por grabado. Este proceso de fabricación dio apertura a la creación de diversos diseños de MEMS.

En 1964, Harvey Nathanson fabricó el primer lote de dispositivos MEMS, llamado Transistor de Puerta Resonante (RGT), siendo la primera demostración de un microactuador.

En 1980, en el Centro de Investigación Nuclear de Karlsruhe se desarrolló el proceso de fabricación LIGA, que hoy en día es un proceso muy utilizado en la creación de los MEMS.

En 1982, Kurt Petersen publicó un artículo titulado “El silicio como material mecánico” en el Instituto de Ingenieros Eléctricos y Electrónicos (IEEE), donde proporcionó información de las propiedades y manipulación del Silicio.

A partir de esa década, hubo grandes avances en el desarrollo de los MEMS, como el Microscopio de Fuerza Atómica (AFM), desarrollado en el International Business Machines Corporation (IBM) en 1986.

En 1993, la empresa Analog Devices fabricó en masa acelerómetros micromecanizados muy pequeños y baratos, por lo que, tuvieron una alta demanda en diversas industrias.

En 1995, los microsensores y microactuadores empezaron a ser aplicados en el área de la medicina, a estos dispositivos se les llamo BioMEMS.

Desde hace aproximadamente cuatro décadas, los investigadores han logrado y aportado grandes avances, a tecnologías que usan estos dispositivos. Las continuas mejoras en dispositivos existentes y la creación de otros, así como los avances implementados en los procesos de fabricación han hecho que, actualmente los MEMS ocupen un lugar preponderante en el mercado, debido, además, a su amplio impacto en la vida diaria (Kumar M., Dubey, Mishra, & Khan, 2019).

A continuación, se mencionan aplicaciones de algunos dispositivos MEMS.

Los acelerómetros, que detectan fuerzas de aceleración, son ampliamente usados en:

- Automóviles
- Celulares
- Videojuegos
- Aplicaciones médicas
- Aplicaciones de seguridad
- Aplicaciones de sensado

Los BioMEMS, que han sido aplicados en el sector de la medicina, con el fin de obtener información del cuerpo humano, como la presión sanguínea o la glucosa, o poder realizar una micro operación. (Maluf & Williams, 2002)

## **2.2 Microactuador**

Los MEMS se pueden clasificar en diversas categorías, los microactuadores constituyen una de ellas. El microactuador, opera de la misma manera que un actuador, este dispositivo transforma una forma de energía (eléctrica, mecánica, térmica, entre otras) en movimiento (desplazamiento) o una fuerza y hacer “actuar” a otro dispositivo (Márquez & Cárdenas, 2006).

Los microactuadores han tenido un gran impacto, por lo que, se ha estudiado más a fondo, ya que es un dispositivo que, con sus dimensiones micrométricas ha permitido hacer trabajos donde el hombre no puede alcanzar (Báez Álvarez, 2011).

Hay una gran variedad de microactuadores con su respectivo método de actuación, pero solo los siguientes microactuadores han sido los más estudiados y utilizados en los MEMS (Potekhina & Wang, 2019):

- Microactuador Electrotérmico
- Microactuador Electrostático
- Microactuador Piezoeléctrico
- Microactuador Electromagnético
- Microactuador de aleación con memoria de forma (SMA).

## **2.3 Actuación Electrotérmica**

Hay diversos métodos de actuación que ocupan los microactuadores, uno de los más utilizados dentro de los MEMS es el método de la actuación electrotérmica.



Esta actuación se basa en el efecto Joule y en el principio de expansión térmica de los materiales.

### 2.3.1 Efecto Joule

El Efecto Joule o Ley de Joule, consiste en aplicar una diferencia de potencial sobre un conductor (material), la corriente eléctrica (flujo de electrones) empezará a circular por el conductor, debido a ella, se generan choques entre los átomos del material, provocando la liberación de calor (energía), siempre y cuando la temperatura que rodea al material sea inferior a la de ese material; también provoca un aumento de temperatura y de volumen del material. A esto se le conoce como Efecto Joule (Quiñones N., 2009) (Rivera, 2015).

El Efecto Joule está definida por la Ecuación 2.1

$$E = Q = I^2 R \cdot t \quad (2.1)$$

donde:

E=Q= Energía Calorífica [W·s]

I= Intensidad de Corriente [A]

R= Resistencia eléctrica del conductor [ $\Omega$ ]

t= Tiempo [s]

### 2.3.2 Expansión térmica de los materiales

La expansión o dilatación térmica de los materiales, también conocida como deformación térmica, es un fenómeno en el que el material aumenta su volumen, debido al movimiento de las partículas en el material, provocando el aumento de

temperatura (un mayor movimiento implica una mayor temperatura). Por lo que, el material tiende a aumentar su volumen.

Hay tres tipos de expansión térmica: Lineal o longitudinal, mostrada en la Figura 2.1, de superficie y volumétrica. En este caso nos enfocaremos en la lineal, debido a que se asume que las dimensiones en este eje son mayores a los restantes (Nave, s.f.).

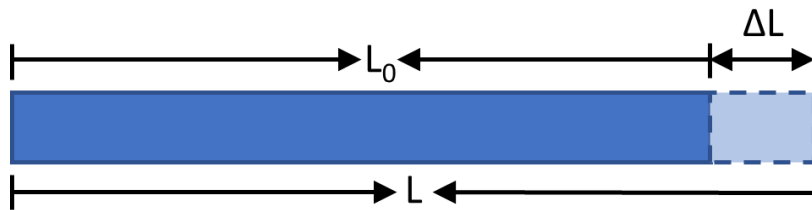


Figura 2.1 Diagrama de la expansión térmica de una varilla.

La expansión térmica lineal está definida por la ecuación siguiente:

$$\Delta L = L_0 \Delta T \alpha = L - L_0 \quad (2.2)$$

Para obtener la longitud total de la varilla se puede usar la ecuación (2.3), que es la más común para determina expansión lineal de un una varilla, alambres o barras, etc.

$$L = L_0(1 + \alpha \Delta T) \quad (2.3)$$

Donde:

$\alpha$ = Es el coeficiente de expansión térmica lineal del material [ $^{\circ}\text{C}^{-1}$  o  $^{\circ}\text{K}^{-1}$ ]

$L_0$ = Longitud inicial del material [m]

$L$ = Longitud final del material [m]

$\Delta T$ = Cambio de temperatura [ $^{\circ}\text{C}$  o  $^{\circ}\text{K}$ ]

$\Delta L$ = Cambio de la longitud del material [m]

## 2.4 Microactuador Electrotérmico: Chevrón

El Microactuador chevrón, también conocido como Actuador térmico con brazos-V, Actuador electrotérmico en forma de V o Actuador de viga flexionada, es uno de los dispositivos más analizados, diseñados y usados dentro de los dispositivos MEMS. (Tecpoyotl T., Rodriguez F., Koshevaya, & Vargas, 2020)

En comparación con otros microactuadores, su actuación electrotérmica, basado en el efecto Joule y la expansión térmica, ofrece un mayor desplazamiento y altas fuerzas de salida, con un rango de voltaje bajo y un bajo costo de fabricación (Potekhina & Wang, 2019).

### 2.4.1 Descripción de la estructura del Actuador Chevrón V

Se le conoce como actuador chevrón en forma de V, porque su diseño es similar a la V. Su arreglo consiste en un par de brazos (también llamados barras), o más pares, los cuales están unidos a unas anclas o pilares en uno de sus extremos, con un ángulo de inclinación ( $\theta$ ), el cual se forma entre el brazo y la perpendicular del ancla, mientras que sus otros extremos están unidos a una flecha o vástago en el centro, Figura 2.2, (Báez Álvarez, 2011) (Tecpoyotl Torres, Vargas Chable, Cabello Ruíz, & Flores González, 2019).

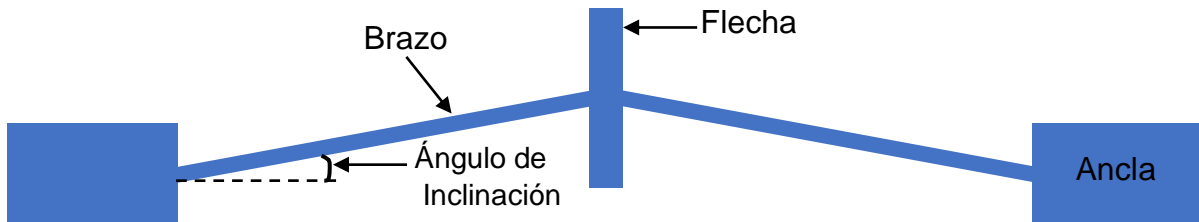


Figura 2.2 Diagrama de un Microactuador electro térmico Chevrón forma V.

#### 2.4.2 Funcionamiento del Microactuador Chevrón V

El funcionamiento del microactuador chevrón, se describe como sigue:

Al aplicar una diferencia de potencial en las anclas (ver Figura 2.3), se genera una corriente eléctrica que fluye en el chevrón, lo cual producirá un calentamiento en el microactuador (Efecto Joule). Este calentamiento provoca una deformación en los brazos (Expansión Térmica), que generará un desplazamiento lineal en la flecha y una fuerza de reacción en la misma.

El desplazamiento y la fuerza de salida dependen de 5 factores importantes:

1. Longitud de los brazos: Mayores longitudes generan un desplazamiento mayor.
2. Número de brazos. Un mayor número de pares de brazos implica un incremento en la fuerza. Se sugiere usar 8 pares de brazos.
3. Ángulo de inclinación. Este ángulo influye tanto en el valor del desplazamiento, como en la fuerza.
4. Grosor del dispositivo. A mayor grosor, se genera una mayor fuerza.
5. Incremento de la temperatura. Favorece ambos parámetros.

(Zhang, Cai, Zhao, & Hu, 2021) (Tecpoyotl Torres, Vargas Chable, Cabello Ruíz, & Flores González, 2019).

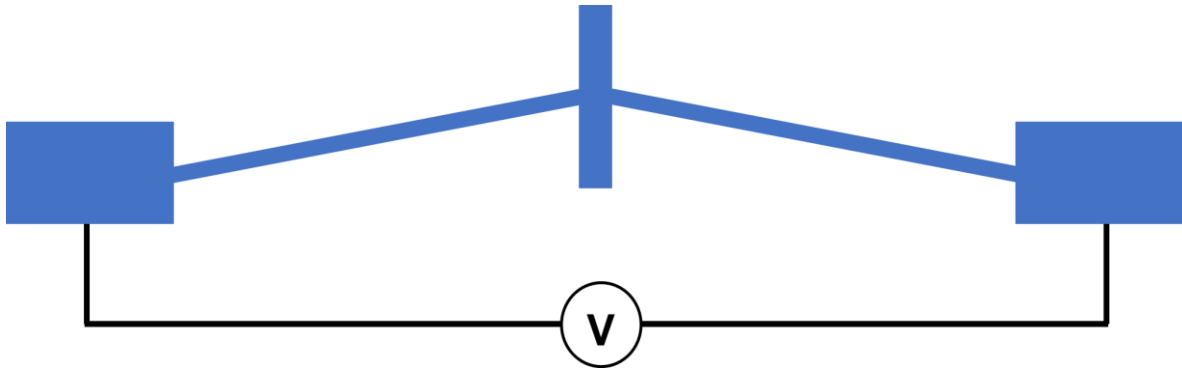


Figura 2.3 Representación de un chevrón con una fuente de voltaje conectado a las anclas.

## 2.5 Ecuaciones para análisis matemático del Microactuador chevrón forma V

Las ecuaciones 2.4 - 2.7 describen el desempeño del microactuador electrotérmico chevrón. Entre los parámetros de diseño comúnmente analizados se encuentran el desplazamiento y la fuerza.

La ecuación que describe la fuerza que ejerce el chevrón en el eje Y está dada por la ecuación 2.4 (Zhu, Corigliano, & Espinosa, 2006)

$$F_y = N \alpha E A \Delta T \text{sen}\theta \quad (2.4)$$

donde

N= número de brazos del actuador chevrón

$\alpha$ = coeficiente de expansión térmica del material [1/K]

A= área de la sección transversal del brazo [m<sup>2</sup>]

$\Delta T$ = diferencia de temperatura del chevrón [K]

$\theta$ = ángulo de inclinación del brazo [°]

Para calcular el desplazamiento en la flecha del actuador chevrón, puede utilizarse la ecuación 2.5, que considera el número de brazos del microactuador y la fuerza aplicada (Chiorean, Dudescu, Pustan , & Hardau, 2014)

$$U_y = \frac{F_y}{N \left( S^2 \frac{EA}{L} + C^2 \frac{12EI}{L^3} \right)} \quad (2.5)$$

La ecuación 2.6 permite calcular el desplazamiento en función de la temperatura (Zhu, Corigliano, & Espinosa, 2006).

$$U_y = \alpha \Delta T L \frac{S}{\left( S^2 + C^2 \frac{12I}{AL^2} \right)} \quad (2.6)$$

donde:

$F_y$ = fuerza que ejerce el chevrón [N]

N: número de brazos del chevrón

$\alpha$ = coeficiente de expansión térmica del material [1/K]

A= área de la sección transversal del brazo [m<sup>2</sup>]

$\Delta T$ = diferencia de temperatura del chevrón [K]

L: longitud del brazo [m]

E: módulo de Young del material

C: coseno del ángulo de inclinación [°]

S: seno del ángulo de inclinación [°]

$I$  es el momento de inercia [m<sup>4</sup>] para el chevrón con ancho de brazo ( $w$ ) y un grosor ( $t$ ), está descrito por la ecuación 2.7 (Shivhare, Uma, & Mangalanathan, 2015).

$$I = \frac{wt^3}{12} \quad (2.7)$$

La rigidez [N/m] del chevrón se puede expresar por la ecuación 2.8, equivalente a la ecuación 2.9 (Tecpoyotl Torres, Vargas Chable, Cabello Ruíz, & Flores González, 2019)

$$k_{CH} = \frac{F_y}{U_y} \quad (2.8)$$

$$k_{CH} = N \left( S^2 \frac{Ewt}{L} + C^2 \frac{Ew^3t}{L^3} \right) \quad (2.9)$$

## 2.6 Análisis, Diseño y Simulación

Como se ha mencionado, los microactuadores chevrón son ampliamente utilizados, lo que conlleva a la búsqueda de la mejora de su desempeño. Su modelado ha sido analizado, apoyándose también en diversas herramientas de software, requiriéndose conocimientos en diversas áreas de la ciencia y la ingeniería.

Para realizar el análisis del chevrón debe tenerse conocimiento de algunos temas relacionados con la electrónica, la termodinámica y la mecánica estructural, ya que estos temas se aplican al diseño del actuador chevrón para, comprender su desempeño y la influencia de la geometría (Zhao , Zhou, Meng , Li, & Huang, 2021) (Hasan Ziko & Koel, 2018) (Cohen & Ya'akovitz, 2018).

Los parámetros básicos que se deben tener en cuenta son:

- Desplazamiento
- Fuerza de reacción en la flecha
- Temperatura

Para la elección de un microactuador chevrón es indispensable tener más de un diseño, ya sea con diferente ángulo de inclinación, diferentes largos de brazo, diferente ancho de brazo, etc., con el fin de hacer unen comparación entre estos y elegir aquel con un buen desempeño, con base a lo que uno requiera (Báez Álvarez, 2011).

La caracterización de prototipos se lleva a cabo con técnicas experimentales, cuyos costos se suman a los altos costos de fabricación. Por lo tanto, las simulaciones constituyen un método eficaz, para obtener información de manera más rápida y sencilla sobre el desempeño y parámetros de los microactuadores (Báez Álvarez, 2011). A partir de las simulaciones es posible determinar prototipos factibles para su fabricación, reduciendo la incertidumbre sobre la efectividad de los prototipos fabricados. Entre los softwares más usados para este fin se encuentran ANSYS y COMSOL Multiphysics (FEMLAB), los cuales analizan el comportamiento de un dispositivo bajo un entorno real, usando Elemento Finito (Software, 2022).

Algunas de las referencias en las que se realiza el análisis y la simulación de chevrones, realizándose la comparación de los datos teóricos y los numéricos obtenidos, son (Hasan Ziko & Koel, 2018) (Tecpoyotl T., Rodriguez F., Koshevaya, & Vargas, 2020) (Tecpoyotl Torres, Vargas Chable, Cabello Ruíz, & Flores González, 2019) (Zhang, Cai, Zhao, & Hu, 2021).



## 2.7 Mecánica de estructuras.

### 2.7.1 Ley de Hook

La ley de Hooke, dada por la ecuación (2.10), establece la fuerza aplicada a un resorte, es directamente proporcional a una constante  $k$  multiplicado por el desplazamiento (deformación) que sufrió el resorte, Figura 2.9, siempre y cuando su deformación no sea permanente.

Al dejar de aplicar una fuerza, el resorte tiende a recuperar su forma original, a esto se le conoce como elasticidad.

$$F = k \Delta L \quad (2.10)$$

donde:

$F$  = fuerza aplicada[N]

$K$  = constante de rigidez del material [N/m]

$\Delta L$  = diferencia de longitudes [m]

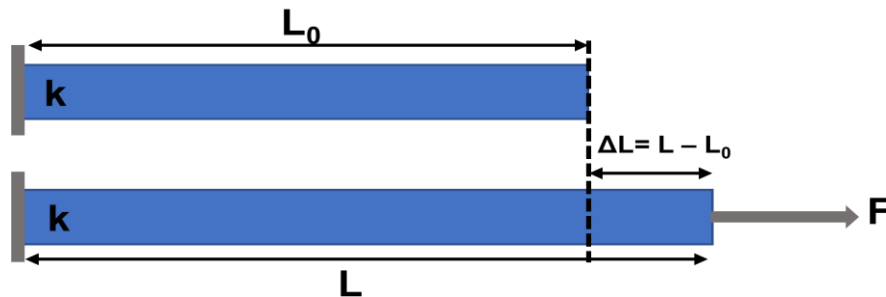


Figura 2.4 Representación Gráfica de la Ley de Hooke.

### 2.7.2 Deformación axial

Al aplicar una fuerza sobre un material, tiende a comprimirse o alargarse, dependiendo en la dirección que se aplica la fuerza, a esta compresión o

alargamiento se le llama deformación axial por carga axial, representado por la ecuación que se desarrollará más adelante.

### 2.7.3 Esfuerzo Axial

La fuerza que se aplica es sobre el área transversal de una barra, como se observa en la Figura 2.10, se le llama esfuerzo axial ( $\sigma$ ) o esfuerzo normal, la cual se representa como lo indica la ecuación (2.11) o la ecuación (2.12) (Callister, 2017).

$$\sigma = E\varepsilon \quad (2.11)$$

$$\sigma = \frac{F}{A_c} \quad (2.12)$$

Donde:

$\sigma$ = Esfuerzo [N/m<sup>2</sup>]

E= Modulo Young del material [N/m<sup>2</sup>]

$\varepsilon$ = Deformación axial unitaria

F= Fuerza aplicada [N]

A<sub>c</sub>= Área de la sección transversal [m<sup>2</sup>]

### 2.7.4 Deformación Unitaria

La deformación unitaria es el grado de compresión o alargamiento que experimenta la barra a la que se le aplica un esfuerzo, se representa por la ecuación (2.14), la cual es una cantidad adimensional (W. Fitzgerald, 1996).

$$\varepsilon = \frac{\delta}{L} \quad (2.13)$$

Donde:

$\delta, \Delta L$ = Deformación [m]

$L$ = Longitud inicial [m]

Igualando las ecuaciones (2.11) y (2.12), y la deformación unitaria dada por la ecuación (2.14), se obtiene a la ecuación (2.15).

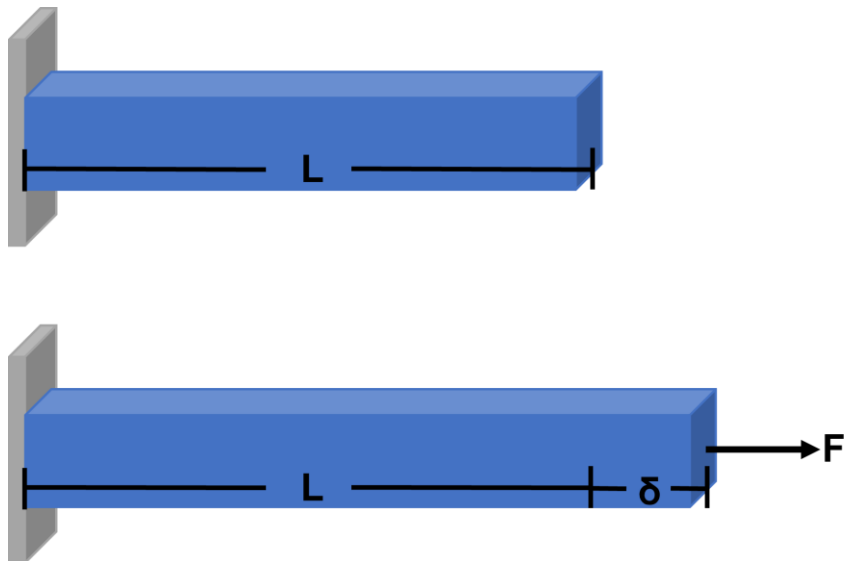


Figura 2.5 Representación de la deformación que experimenta una barra al aplicarle una fuerza.

$$\frac{F}{A_c} = E \frac{\delta}{L} \quad (2.14)$$

De la ecuación (2.14) se despeja la deformación total, obteniéndose la ecuación (2.15):

$$\delta = \frac{FL}{EA_c} \quad (2.15)$$

De acuerdo con (Callister, 2017), hay dos tipos de deformación:

- Deformación elástica: Al aplicar un esfuerzo el material sufrirá una deformación, al dejar de aplicar el esfuerzo, el material tiende a volver a su forma original. Su deformación no es permanente.
- Deformación plástica: Igual manera que el caso anterior, pero el esfuerzo que se aplica es muy grande, generando que cuando el esfuerzo deja de ser aplicado el material ya no vuelve a su forma original. Su deformación es permanente.

Existe una relación entre el esfuerzo y la deformación, que se aplica y sufre un material, son directamente proporcionales, como se observa en la Figura 2.11





## **CAPÍTULO 3.- METODOLOGÍA**

En este capítulo se presenta la metodología general y particulares que se siguieron en el desarrollo del presente trabajo.

## CAPÍTULO 3.- METODOLOGÍA

---

### 3.1 Metodología: General

A continuación, se presentará la metodología general que se siguió para el desarrollo del presente trabajo.

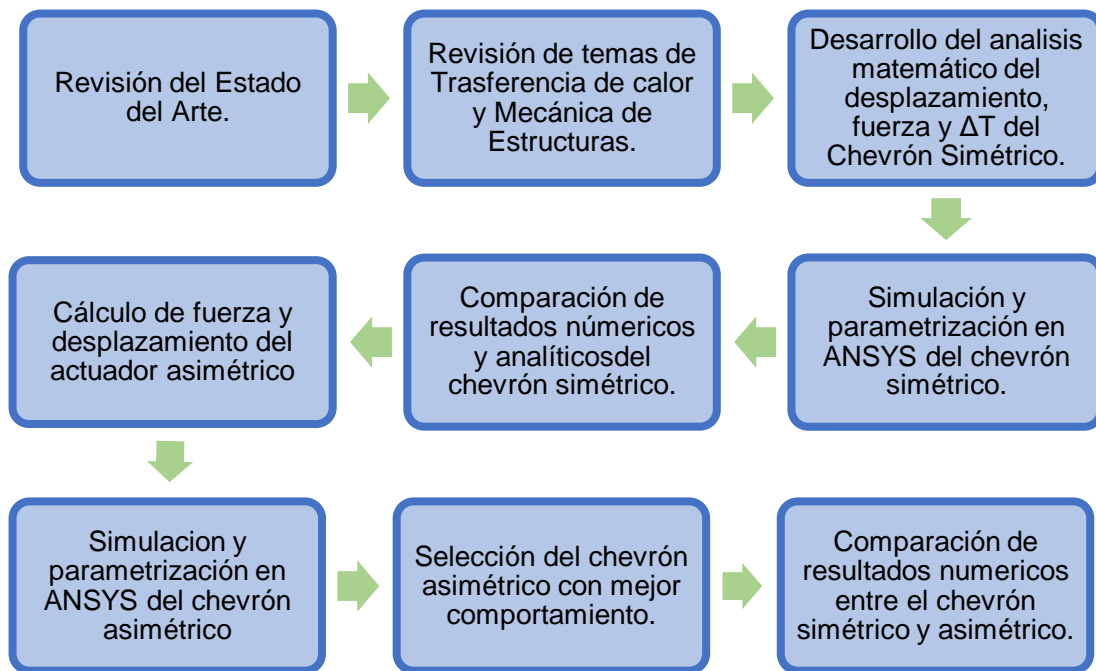


Figura 3.1 Diagrama de la Metodología General de tesis.

En la Figura 3.1 se muestra la metodología general, como guía, que se siguió para la realización del presente trabajo. Se empezó por un estudio del estado del arte, para entender el funcionamiento y bajo que fenómenos opera, al igual que la revisión de algunos temas de transferencia de calor y mecánica de estructuras. Que posterior a ello, y con la información recopilada, se realizó el desarrollo del análisis matemático de fuerza, desplazamiento o deformación total y la distribución de temperatura.

Una vez hecho el desarrollo del análisis matemático, se procede con el diseño y parametrización de los anchos de los brazos, para encontrar una geometría adecuada. Se procedió a realizar una comparación entre los resultados analíticos y numéricos.

Debido al desarrollo matemático que se realizó, se considera que tanto la fuerza, como el desplazamiento y la diferencia de temperatura son dependientes de la geometría del chevrón. Se realizaron diseños, y parametrizaciones para determinar el diseño asimétrico del actuador basado en un chevrón modificado en el que se generó la mayor fuerza.

Se realizó un proceso similar al caso del actuador asimétrico, desde el modelo de dos de sus parámetros básicos hasta realizar las parametrizaciones correspondientes.

Como proceso final, se hizo una comparación entre el chevrón simétrico y el chevrón asimétrico, que se determinaron anteriormente, con base en su desempeño.

### **3.2 Metodología: desarrollo de las ecuaciones**

La Figura 3.2 muestra el proceso que se siguió para el desarrollo de las ecuaciones que modelan el comportamiento del actuador, teniendo como apoyo algunas bibliografías que hacen dicho desarrollo, con el propósito de replicar de manera completa este análisis, y observar que parámetros influyen en el cálculo matemático de fuerza, desplazamiento y diferencia de temperatura.

Se obtendrá una expresión matemática para el cálculo de fuerza de un chevrón asimétrico, y se planteará una expresión preliminar para el cálculo del desplazamiento.



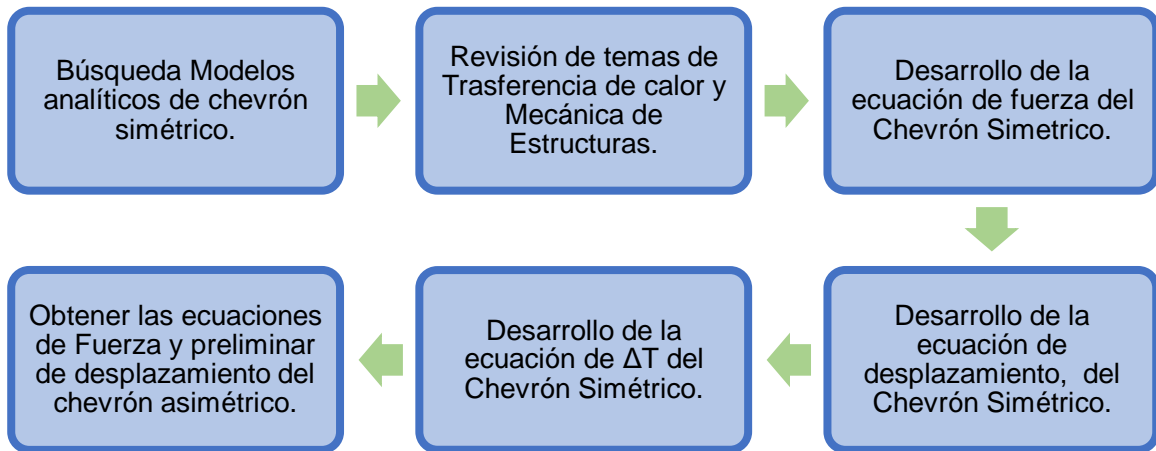


Figura 3.2 Diagrama del proceso para el desarrollo de las ecuaciones de ambos actuadores.

### 3.3 Metodología: Simulación y Parametrización del Chevrón Simétrico

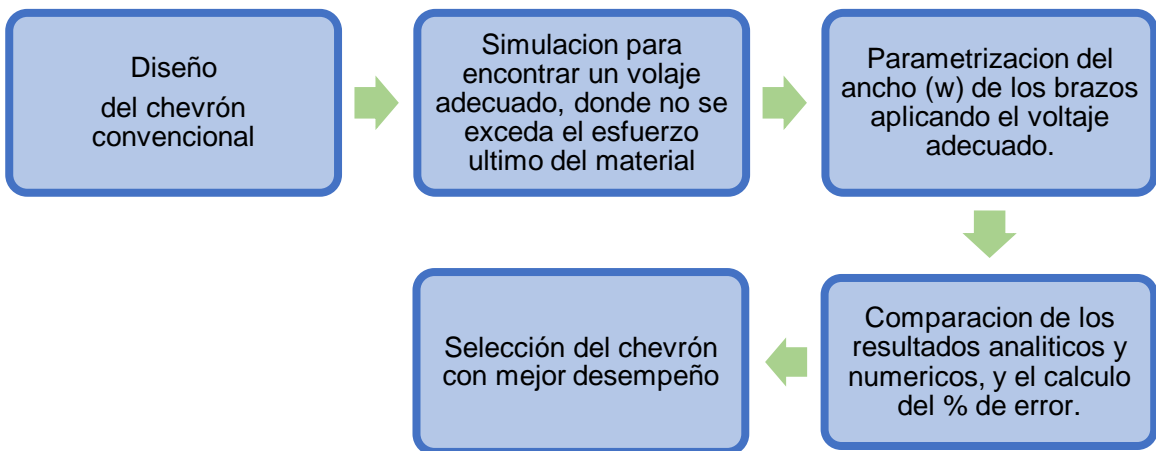


Figura 3.3 Mapa de la metodología para la diseño, simulación y parametrización del chevrón simétrico.

En la Figura 3.3 se observa la metodología que se siguió para la simulación y parametrización del chevrón simétrico.

Primeramente, se hace un diseño del chevrón simétrico en ANSYS Workbench y encontrar cual es el voltaje adecuado, sin que sobrepasé el esfuerzo último del material, para evitar una ruptura en el chevrón.

Una vez encontrado el voltaje adecuado, se procede a la parametrización del ancho de los pares de brazos, con el fin de encontrar un chevrón con un buen desempeño en fuerza.

De los resultados obtenidos, se hará una comparación de los resultados numéricos con los resultados analíticos, los cuales se obtienen usando las ecuaciones anteriormente mencionadas en el Capítulo 2 y Capítulo 4, y se calcula su porcentaje de error.

### 3.4 Metodología: Simulación y Parametrización del Chevrón Asimétrico

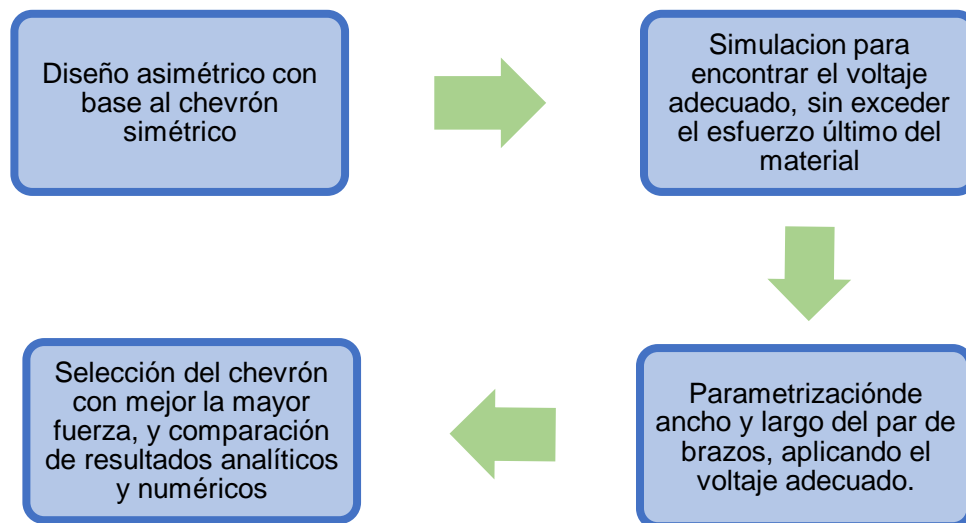



Figura 3.4 Diagrama de la Metodología de la simulación y parametrización del chevrón asimétrico.

La Figura 3.4 se presenta la metodología para la simulación y diseño del chevrón asimétrico.

Para el diseño de este chevrón, tanto el ancho como el largo del par de brazos deben ser de diferentes medidas, para cumplir con la asimetría planteada, con el propósito de determinar un diseño que ofrezca un desempeño adecuado con respecto a la fuerza.

La parametrización del brazo se lleva a cabo en el largo y ancho de los brazos. De los resultados de las simulaciones, se elegirán las dimensiones del actuador asimétrico que permitan obtener la mayor fuerza, para posteriormente comparar los resultados numéricos con los analíticos y calcular el porcentaje de error.



## **CAPÍTULO 4.- MODELO MATEMÁTICO DEL CHEVRÓN SIMÉTRICO Y DEL ACTUADOR ASIMÉTRICO.**

En este capítulo se presenta el desarrollo de las ecuaciones de desplazamiento y fuerza del chevrón simétrico y asimétrico.

## CAPÍTULO 4.- MODELADO MATEMÁTICO DEL MICROACTUADOR CHEVRÓN SIMÉTRICO Y DEL ACTUADOR ASIMÉTRICO

---

En este capítulo se presenta, en primera instancia el modelado de la fuerza del microactuador chevrón, y posteriormente, del actuador asimétrico.

Después, se presentan los modelos para el cálculo del desplazamiento en ambos actuadores.

### 4.1 Fuerza de reacción

En la Figura 4.1 se muestra un típico microactuador chevrón simétrico V, al que corresponde el análisis matemático presentado en este capítulo. La Figura 4.2 muestra la vista frontal del chevrón.

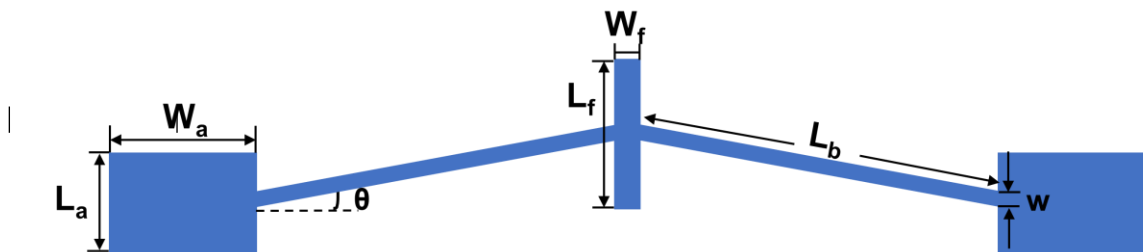


Figura 4.1 Diagrama del Microactuador Chevrón Simétrico sus respectivos parámetros geométricos.

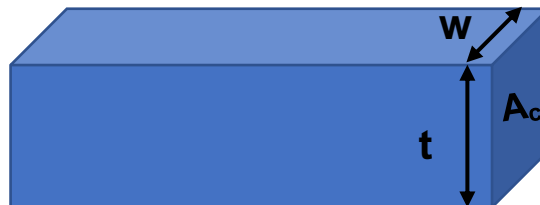


Figura 4.2 Diagrama de la vista lateral del brazo de un chevrón, con los parámetros que lo describen.

$W_a$  y  $L_a$  son el ancho y el largo del ancla, respectivamente.  $W_f$  y  $L_f$  son el ancho y largo de la flecha,  $L_b$  es el largo del par de brazos,  $w$  es el ancho de ambos pares de brazos,  $\theta$  es el ángulo de inclinación de los brazos y  $t$  es el espesor o grosor de la estructura.

Para este análisis matemático se tiene que tomar en cuenta ciertas suposiciones generales:

- Se conoce la temperatura promedio del dispositivo.
- La temperatura no afecta el desempeño de la flecha (esto es, no sufre deformación).
- Los brazos sufren pequeñas deformaciones y generan pequeños desplazamientos.

(Zhu, Corigliano, & Espinosa, 2006)

#### 4.1.1 Fuerza de reacción: Actuador Simétrico

Al aplicar una corriente eléctrica en el chevrón, se genera un aumento de temperatura, provocando una deformación lineal en los brazos del chevrón (Enikov, Kedar, & Lazarov, 2005). La deformación lineal está definida por (4.1).

$$\Delta L = L_0 \Delta T \alpha \quad (4.1)$$

donde:

$L_0$  = Largo inicial del brazo [m]

$\alpha$  = coeficiente de expansión térmica del material [1/K]

$\Delta T$  = Diferencia de temperatura del chevrón [°K]

La deformación de los brazos provoca la fuerza que se presenta en la flecha. La fuerza en cada brazo ( $F_b$ ) se calcula con base en la expansión térmica de los brazos del chevrón, ecuación (4.2) (Nguyen, Hoang, & Pham, 2020).

$$F_b = A_c E \frac{\Delta L}{L_0} \quad (4.2)$$

Sustituyendo a  $\Delta L$ , ecuación (4.1), la ecuación (4.2) queda como:

$$F_b = E A_c \Delta T \alpha \quad (4.3)$$

donde:

$F$  = Fuerza [N]

$E$  = Modulo Young del material [N/m<sup>2</sup>]

$A_c$  = Área de la sección transversal [m<sup>2</sup>]

$\alpha$  = coeficiente de expansión térmica del material [1/K]

$\Delta T$  = diferencia de temperatura del chevrón [°K]

La ecuación (4.3) permite calcular a la fuerza que genera cada brazo del actuador simétrico, con base en la expansión térmica.

La fuerza total ( $F_T$ ) que actúa sobre la flecha en la dirección del eje Y (Figura 4.3), generada por la expansión térmica de 2 brazos, se calcula sumando la fuerza de cada brazo (Nguyen, Hoang, & Pham, 2020):

$$F_T = F_{b1} + F_{b2} = E A_{c1} \Delta T \alpha + E A_{c2} \Delta T \alpha \quad (4.4)$$

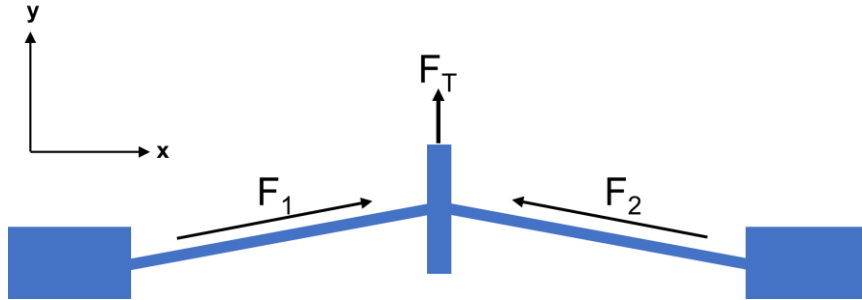


Figura 4.3 Representación de la Fuerza generada por la expansión térmica, chevrón simétrico.

Debido a la simetría del área transversal de los brazos del chevrón, la ecuación (4.4) es igual a:

$$F_T = 2NEA_c\Delta T\alpha \sin\theta \quad (4.5)$$

La fuerza total del chevrón simétrico está dada por la ecuación (4.5), incluyendo N, el número par de brazos.

#### 4.1.2 Fuerza de reacción: Actuador Asimétrico

Para el desarrollo de la ecuación de la fuerza del chevrón asimétrico, partimos de la Ecuación (4.4)

$$F_T = F_1 + F_2 = EA_{c1}\Delta T\alpha + EA_{c2}\Delta T\alpha \quad (4.6)$$

Dado que las áreas transversales de los brazos del actuador no son iguales, como se observa en la Figura 4.4.



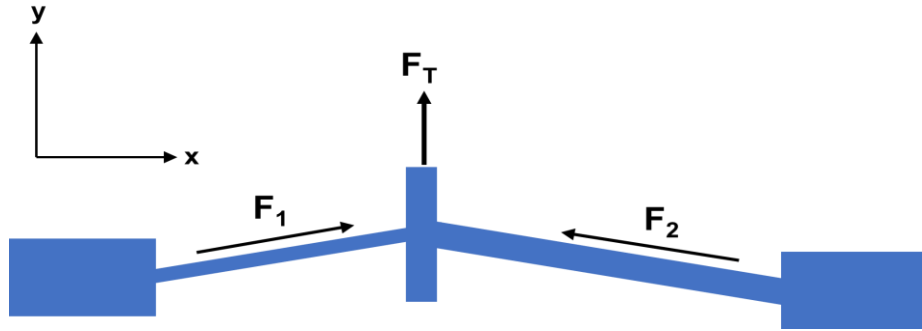


Figura 4.4 Representación de la Fuerza generada por la expansión térmica, chevrón asimétrico.

Asumiendo que, el chevrón se fabrica en un solo material, la ecuación de la fuerza total para el chevrón asimétrico es:

$$F_T = E\Delta T\alpha(A_{c1} + A_{c2})\sin\theta \quad (4.7)$$

Donde:

$E$  = Módulo Young del material [N/m<sup>2</sup>]

$A_{c1}$  = Área de la sección transversal [m<sup>2</sup>]

$A_{c2}$  = Área de la sección transversal [m<sup>2</sup>]

$\alpha$  = Coeficiente de expansión térmica del material [1/K]

$\Delta T$  = Diferencia de temperatura del chevrón [°K]

## 4.2 Desplazamiento de salida

### 4.2.1 Desplazamiento de salida: Actuador Simétrico

El desplazamiento o deformación de los brazos del chevrón se debe al efecto Joule, creando una deformación por flexión (Li, Zhou , Yi, Wang, & Adnan, 2019) (Varona, Tecpoyotl, & Hamoui, 2009).

La Figura 4.5 muestra una representación de la deformación de los brazos y, el desplazamiento resultante en la flecha.

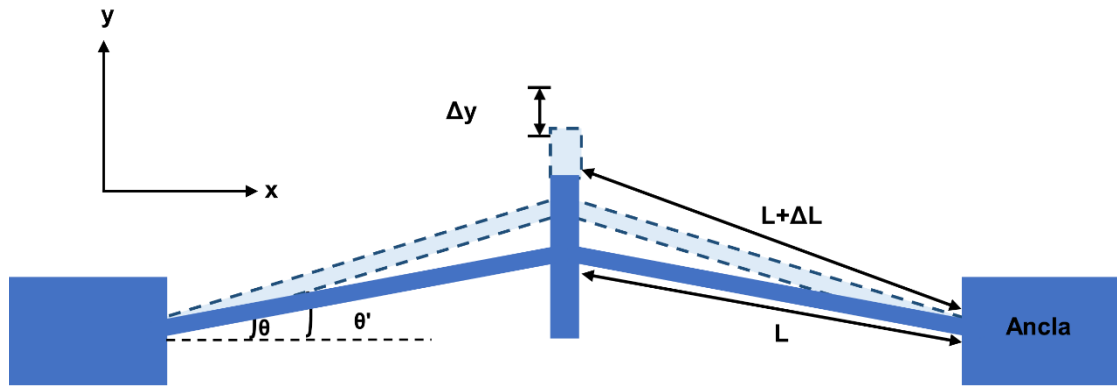


Figura 4.5 Diagrama de la representación del desplazamiento que genera un chevrón al aplicar un voltaje.

Para realizar el desarrollo analítico del desplazamiento se consideran las siguientes suposiciones.

- La única dirección de deformación es sobre el eje Y (Báez Álvarez, 2011) (Zhao , Zhou, Meng , Li, & Huang, 2021) (Andò, Baglio, Savalli, & Trigona, 2011), como se observa en la Figura 4.5.
- Las anclas del chevrón están fijas, por lo que no hay rotaciones (Chiorean, Dudescu, Pustan , & Hardau, 2014).
- Se ignora la deformación por cortante y tracción (Andò, Baglio, Savalli, & Trigona, 2011) (Cohen & Ya'akobovitz, 2018).

En (Zhu, Corigliano, & Espinosa, 2006) se presenta una expresión matemática para el desplazamiento usa el Método de Rigidez, también conocida como método de desplazamiento en pórticos.

La Ecuación del método de matriz de rigidez en marcos se basa en la ecuación (4.8) (Cabrales, 2016):

$$[K]\{U\} = \{F\} + \{R\} \quad (4.8)$$

Donde  $[K]$  es la matriz de rigidez del marco, que es multiplicado por un vector de desplazamientos  $\{U\}$ , igualado a la suma de un vector de fuerzas  $\{F\}$  y una matriz de reacciones  $\{R\}$ .

La matriz de rigidez del marco es (Cabrales, 2016):

$$K = \begin{bmatrix} 1 & 2 & 3 & 4 & 5 & 6 \\ EA/L & 0 & 0 & -EA/L & 0 & 0 \\ 0 & 12EI/L^3 & 6EI/L^2 & 0 & -12EI/L^3 & 6EI/L^2 \\ 0 & 6EI/L^2 & 4EI/L & 0 & -6EI/L^2 & 2EI/L \\ -EA/L & 0 & 0 & EA/L & 0 & 0 \\ 0 & -12EI/L^3 & -6EI/L^2 & 0 & 12EI/L^3 & -6EI/L^2 \\ 0 & 6EI/L^2 & 2EI/L & 0 & -6EI/L^2 & 4EI/L \end{bmatrix} \quad (4.9)$$

Para el desarrollo de la ecuación del desplazamiento, se necesita contar los grados de libertad en los nodos del chevrón, esto se observa en la Figura 4.6. Cada grado de libertad tiene una posición dentro de la matriz de rigidez.

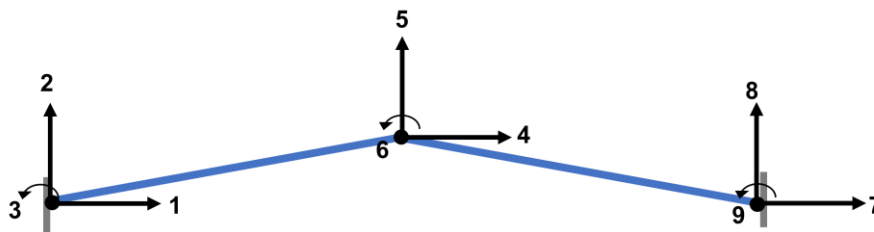


Figura 4.6 Grados de libertad del chevrón simétrico.

Dado que el chevrón es simétrico, se puede hacer solo el análisis en uno de sus brazos, Figura 4.7.

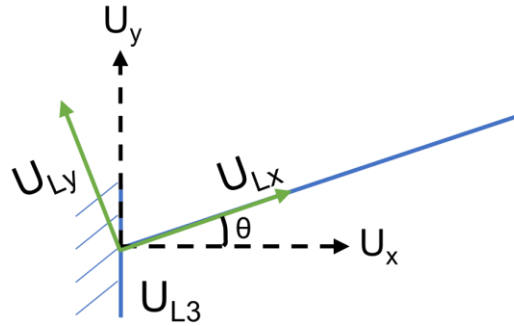


Figura 4.7 Grados de libertad de uno de los brazos del chevrón.

donde  $U_{Lx}$ ,  $U_{Ly}$  y  $U_{L3}$  son los llamados desplazamientos locales,  $U_x$  y  $U_y$  son desplazamientos globales. Debido a que solo hay tres grados de libertad, la matriz de rigidez se reduce, como se muestra en ecuación (4.10), al ser substituida en la ecuación (4.8):

$$\begin{bmatrix} EA/L & 0 & 0 \\ 0 & 12EI/L^3 & 6EI/L^2 \\ 0 & 6EI/L^2 & 4EI/L \end{bmatrix} \begin{bmatrix} U_{Lx} \\ U_{Ly} \\ U_{L3} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} F_{Lx} \\ F_{Ly} \\ F_{L3} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} R_{Lx} \\ R_{Ly} \\ R_{L3} \end{bmatrix} \quad (4.10)$$

El siguiente paso es transformar los desplazamientos locales a desplazamientos globales, para ello, se utilizan identidades trigonométricas y  $U_{Lx}$  en términos de  $U_x$  y  $U_y$ , como se observa en la Figura 4.8.

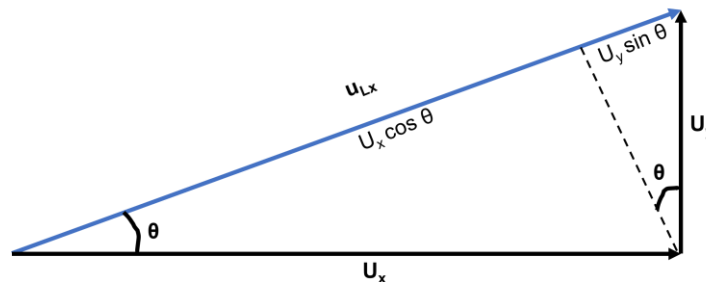


Figura 4.8 Diagrama para el cambio de términos locales a globales para  $U_{Lx}$ .

Para la transformación de  $U_{Ly}$  a  $U_y$  se cambia de posición el vector  $U_x$ , Figura 4.9.

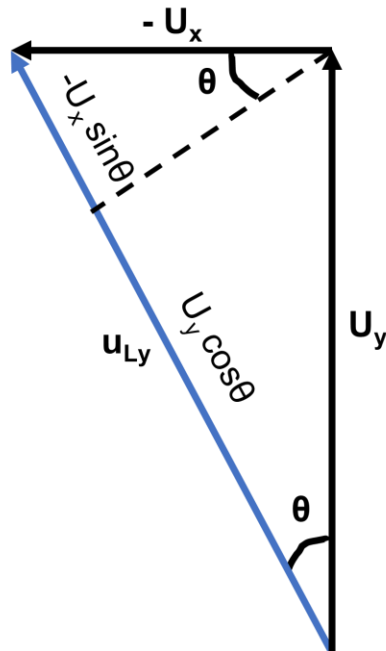


Figura 4.9 Diagrama para el cambio de términos de desplazamientos locales a globales.

Para el desplazamiento, las reacciones (R) no necesitan transformación. Entonces el cambio de desplazamientos locales a globales queda como:

$$U_{xL} = U_x \cos\theta + U_y \sin\theta$$

$$U_{yL} = -U_x \sin\theta + U_y \cos\theta \quad (4.11)$$

$$U_{3L} = U_3$$

Todo el sistema mostrado en la ecuación (4.11) se puede describir de manera matricial:

$$\begin{bmatrix} U_{Lx} \\ U_{Ly} \\ U_{L3} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} c & s & 0 \\ -s & c & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} U_x \\ U_y \\ U_3 \end{bmatrix} \quad (4.12)$$

Donde  $c=\cos\theta$  y  $s=\sin\theta$ . Sustituyendo a la ecuación (4.12) en la ecuación (4.10):

$$\begin{bmatrix} 1 & 2 & 3 \\ EA/L & 0 & 0 \\ 0 & 12EI/L^3 & 6EI/L^2 \\ 0 & 6EI/L^2 & 4EI/L \end{bmatrix} \begin{bmatrix} c & s & 0 \\ -s & c & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} U_x \\ U_y \\ U_3 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} F_{Lx} \\ F_{Ly} \\ F_{L3} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} R_{Lx} \\ R_{Ly} \\ R_{L3} \end{bmatrix} \quad (4.13)$$

$F_x$  se obtiene a partir de una expresión en función de las fuerzas locales, siguiendo el diagrama de la Figura 4.10, se obtiene la ecuación (4.14). Para las fuerzas de las reacciones (R) no se necesita transformación, tales reacciones son momentos.

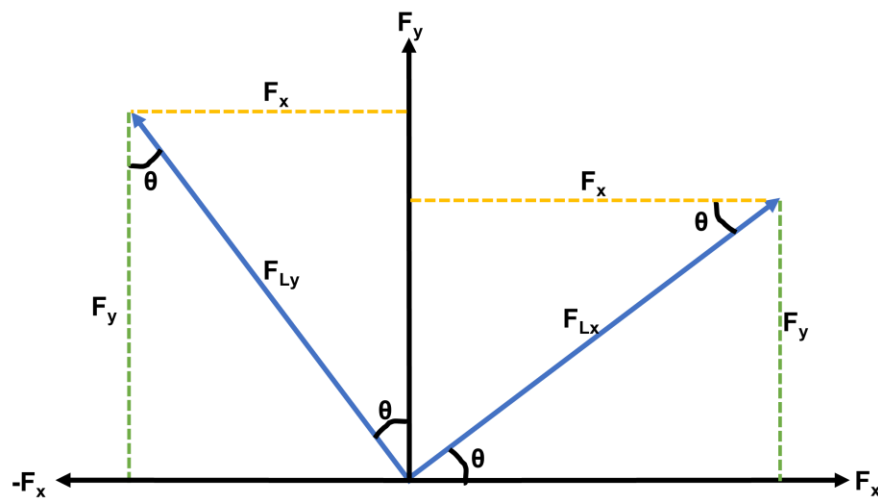


Figura 4.10 Diagrama para el cambio de términos de fuerza locales a globales.

$$\begin{aligned} F_x &= F_{Lx} \cos\theta - F_{Ly} \sin\theta \\ F_y &= F_{Lx} \sin\theta + F_{Ly} \cos\theta \\ M_{L3} &= M_3 \end{aligned} \quad (4.14)$$

Todo el sistema de ecuaciones (4.16) se puede describir de manera matricial:

$$\begin{bmatrix} F_x \\ F_y \\ M_3 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} c & -s & 0 \\ s & c & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} F_{Lx} \\ F_{Ly} \\ M_{L3} \end{bmatrix} \quad (4.15)$$

Sustituyendo la ecuación (4.15) en la ecuación (4.13), se obtiene:

$$\begin{bmatrix} F_x \\ F_y \\ M_3 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} R_x \\ R_y \\ R_3 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} c & -s & 0 \\ s & c & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & 2 & 3 \\ EA/L & 0 & 0 \\ 0 & 12EI/L^3 & 6EI/L^2 \\ 0 & 6EI/L^2 & 4EI/L \end{bmatrix} \begin{bmatrix} c & s & 0 \\ -s & c & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} U_x \\ U_y \\ U_3 \end{bmatrix} \quad (4.16)$$

Se realiza la multiplicación de matrices indicada y se obtiene:

$$\begin{bmatrix} F_x \\ F_y \\ M_3 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} R_x \\ R_y \\ R_3 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} (EA^2/L) + (12EIs^2/L^3) & (EAsc/L) - (12Eisc/L^3) & -6EIs/L^2 \\ (EAsc/L) - (12Eisc/L^3) & (EAs^2/L) + (12Eic^2/L^3) & 6EI/L^2 \\ -6EIs/L^2 & 6EI/L^2 & 4EI/L \end{bmatrix} \begin{bmatrix} U_x \\ U_y \\ U_3 \end{bmatrix} \quad (4.17)$$

donde:

E= Módulo Young del material [N/m<sup>2</sup>]

A<sub>c</sub>= Área de la sección transversal del brazo [m<sup>2</sup>]

L= Largo del brazo [m]

I= Momento de inercia [m<sup>4</sup>]

Aplicando las condiciones, que se mencionaron en las suposiciones mencionadas.

U<sub>x</sub>=0 ya que no hay desplazamiento en el eje X, U<sub>y</sub>≠0 puesto que hay desplazamiento en el eje Y, mientras que R<sub>y</sub>=0, R<sub>x</sub>≠0, M<sub>3</sub>=0 (Zhu, Corigliano, & Espinosa, 2006).

Entonces la ecuación (4.17) se transforma como:

$$\begin{bmatrix} F_x \\ F_y \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} R_x \\ 0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} (EA^2/L) + (12EIs^2/L^3) & (EAsc/L) - (12Eisc/L^3) \\ (EAsc/L) - (12Eisc/L^3) & (EAs^2/L) + (12Eic^2/L^3) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 0 \\ U_y \end{bmatrix} \quad (4.18)$$

Realizando la multiplicación de la matriz de rigidez por la matriz de desplazamiento, la ecuación (4.18) queda como:

$$\begin{bmatrix} F_x \\ F_y \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} R_x \\ 0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \left( \frac{EA_s c}{L} - \frac{12EI_s c^2}{L^3} \right) U_y \\ \left( \frac{EA_s^2}{L} + \frac{12EI_s c^2}{L^3} \right) U_y \end{bmatrix} \quad (4.19)$$

Dado que nuestro objetivo de interés es solo sobre el grado de libertad  $U_y$  de (4.19) se obtiene la ecuación del desplazamiento del en el eje Y.

$$F_y = \left( \frac{EA_s^2}{L} + \frac{12EI_s c^2}{L^3} \right) (U_y) \quad (4.20)$$

Despejando  $U_y$ , y considerando a  $F_y = E A_c \Delta T \alpha \sin \theta$ , se obtiene:

$$U_y = \frac{E A_c \Delta T \alpha \sin \theta}{\left( s^2 \left( \frac{E A_c}{L} \right) + c^2 \left( \frac{EI}{L^3} \right) \right)} \quad (4.21)$$

Simplificando a la ecuación (4.21), se obtiene (Zhu, Corigliano, & Espinosa, 2006):

$$U_y = \frac{\Delta T \alpha L \sin \theta}{\left( s^2 + c^2 \left( \frac{12I}{A_c L^2} \right) \right)} \quad (4.22)$$

El desplazamiento en el eje Y puede calcularse con la ecuación (4.22), en función de la expansión térmica de los brazos.



#### 4.2.2 Desplazamiento de salida: Actuador Asimétrico

Para el desarrollo de la ecuación del chevrón asimétrico se usará el mismo método con el que se utilizó en la obtención de la ecuación de desplazamiento del chevrón simétrico. Los grados de libertad se muestran en la Figura 4.11.

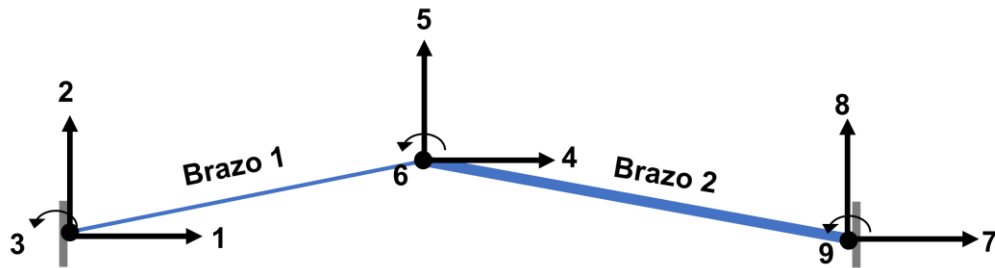


Figura 4.11 Grados de libertad del chevrón asimétrico.

Observamos en la Figura 4.11, que el actuador asimétrico tiene los mismos grados de libertad que el simétrico. En este caso se deben analizar todos los grados de libertad, ya que la estructura no es simétrica.

Cada brazo tiene 6 grados de libertad, entonces la matriz del brazo 1 y 2 será de  $6 \times 6$ .

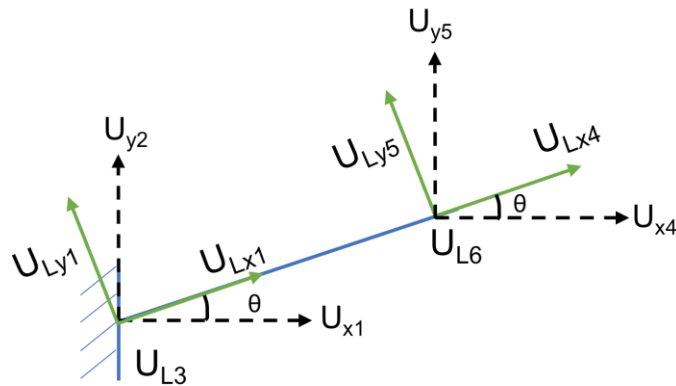


Figura 4.12 Grados de libertad del brazo 1 del actuador asimétrico.

En la Figura 4.12 observamos los grados de libertad que forman parte del brazo 1. Siguiendo los mismos pasos para el chevrón simétrico, primero se hace el cambio de los desplazamientos locales a desplazamiento globales

$$\begin{aligned}
U_{xL1} &= U_x \cos\theta + U_y \sin\theta \\
U_{yL2} &= -U_x \sin\theta + U_y \cos\theta \\
U_{3L} &= U_3 \\
U_{xL4} &= U_x \cos\theta + U_y \sin\theta \\
U_{yL5} &= -U_x \sin\theta + U_y \cos\theta \\
U_{6L} &= U_6
\end{aligned} \tag{4.23}$$

El sistema mostrado en la ecuación (4.23) se puede describir de manera matricial como:

$$\begin{bmatrix} U_{Lx1} \\ U_{Ly2} \\ U_{L3} \\ U_{Lx4} \\ U_{Ly5} \\ U_{L6} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} c & s & 0 & 0 & 0 & 0 \\ -s & c & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & c & s & 0 \\ 0 & 0 & 0 & -s & c & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} U_{x1} \\ U_{y2} \\ U_3 \\ U_{x4} \\ U_{y5} \\ U_6 \end{bmatrix} \tag{4.24}$$

Con base en la Figura 4.10, se obtendrán las fuerzas globales en términos de las fuerzas locales:

$$\begin{aligned}
F_{x1} &= F_{Lx1} \cos\theta - F_{Ly2} \sin\theta \\
F_{y2} &= F_{Lx1} \sin\theta + F_{Ly2} \cos\theta \\
M_{L3} &= M_3 \\
F_{x4} &= F_{Lx4} \cos\theta - F_{Ly5} \sin\theta \\
F_{y5} &= F_{Lx4} \sin\theta + F_{Ly5} \cos\theta \\
M_{L6} &= M_3
\end{aligned} \tag{4.25}$$

La ecuación (4.25) puede reescribirse de forma matricial:

$$\begin{bmatrix} F_{x1} \\ F_{y2} \\ M_3 \\ F_{x4} \\ F_{y1} \\ M_3 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} c & -s & 0 & 0 & 0 & 0 \\ s & c & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & c & -s & 0 \\ 0 & 0 & 0 & s & c & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} F_{Lx1} \\ F_{Ly2} \\ M_{L3} \\ F_{Lx4} \\ F_{Ly5} \\ M_{L6} \end{bmatrix} \quad (4.26)$$

Las Ecuaciones (4.24) y (4.26) se sustituyen en (4.8), de acuerdo con el procedimiento que se siguió en el chevrón simétrico. Realizando la multiplicación de las matrices, la ecuación (4.8) es ahora:

$$\begin{bmatrix} F_{x1} \\ F_{y2} \\ M_3 \\ F_{x4} \\ F_{y5} \\ M_6 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} R_1 \\ R_2 \\ R_3 \\ R_4 \\ R_5 \\ R_6 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 2 & 3 & 4 & 5 & 6 \\ (c^2M + s^2N) & cs(M - N) & -sm & (-c^2M - s^2N) & cs(-M + N) & -sm \\ cs(M - N) & (s^2M + c^2N) & cm & cs(-M + N) & (-s^2M - c^2N) & cm \\ -sm & c^2m & n & sm & -cm & r \\ (-c^2M - s^2N) & cs(-M + N) & sm & (c^2M + s^2N) & cs(M - N) & sm \\ cs(-M + N) & (-s^2M - c^2N) & -cm & cs(M - N) & (s^2M + c^2N) & -cm \\ -sm & sm & r & sm & -cm & n \end{bmatrix} \begin{bmatrix} U_{x1} \\ U_{y2} \\ U_3 \\ U_{x4} \\ U_{y5} \\ U_6 \end{bmatrix} \quad (4.27)$$

donde los elementos de la matriz de rigidez son  $c = \cos \theta$  y  $s = \sin \theta$ , con  $\theta$  en grados,  $M = (EA_c/L)$ ,  $N = (12EI/L^3)$ ,  $m = (6E/L^2)$ ,  $n = (4EI/L)$  y  $r = (2EI/L)$ .

El análisis del brazo 2 es similar al realizado para el brazo 1. Partimos de los grados de libertad a considerar (Figura 4.13).

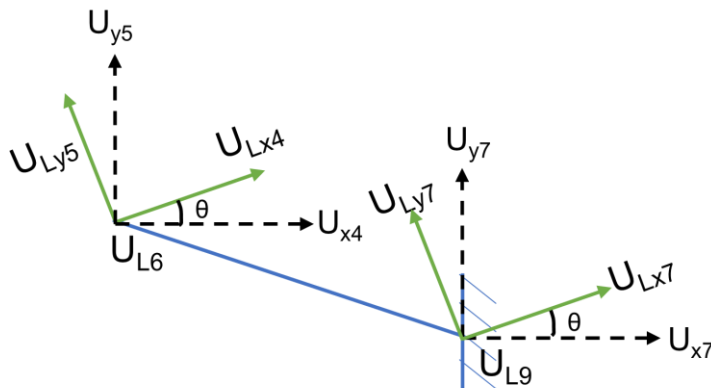


Figura 4.13 Grados de libertad del brazo 2 del actuador asimétrico.

Para cambiar los desplazamientos y las fuerzas locales a globales se hace el mismo desarrollo que se realizó en el brazo 1. La ecuación que utilizamos es la ecuación (4.28). obtenida de la ecuación (4.8):

$$\begin{bmatrix} F_{x4} \\ F_{y5} \\ M_6 \\ F_{x7} \\ F_{y8} \\ M_9 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} R_4 \\ R_5 \\ R_6 \\ R_7 \\ R_8 \\ R_9 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 4 & 5 & 6 & 7 & 8 & 9 \\ (c^2M + s^2N) & cs(M - N) & -sm & (-c^2M - s^2N) & cs(-M + N) & -sm \\ cs(M - N) & (s^2M + c^2N) & cm & cs(-M + N) & (-s^2M - c^2N) & cm \\ -sm & c^2m & n & sm & -cm & r \\ (-c^2M - s^2N) & cs(-M + N) & sm & (c^2M + s^2N) & cs(M - N) & sm \\ cs(-M + N) & (-s^2M - c^2N) & -cm & cs(M - N) & (s^2M + c^2N) & -cm \\ -sm & sm & r & sm & -cm & n \end{bmatrix} \begin{bmatrix} U_{x4} \\ U_{y5} \\ U_6 \\ U_{x7} \\ U_{y8} \\ U_9 \end{bmatrix} \quad (4.28)$$

Se suman las dos matrices de rigidez de cada brazo, ecuaciones (4.27) y (4.28), para formar la matriz de rigidez de toda la estructura (Cabrales, 2016). Ambos brazos comparten los grados de libertad 4,5,6, por lo que se sumaran dos veces, la suma de estas dos matrices se da por la ecuación (4.29) (NOTA: La página correspondiente se presenta en formato horizontal por claridad).

Se aplican las suposiciones y las condiciones del chevrón simétrico,  $U_x=0$ , no hay desplazamiento en el eje X,  $U_y \neq 0$ , sí hay desplazamiento en el eje Y,  $R_y = 0$ ,  $R_x \neq 0$  (Zhu, Corigliano, & Espinosa, 2006),  $M_3=0$ , no hay reacciones ni momentos.

El único desplazamiento que se generará es sobre el grado de libertad 5 o Y, dado que 2 y 8 estas empotrados a las anclas, la matriz de desplazamiento se da por la ecuación (4.30).

$$\begin{bmatrix} F_{x1} \\ F_{y2} \\ M_3 \\ (F_{x4})_1 + (F_{x4})_2 \\ (F_{y5})_1 + (F_{y5})_2 \\ (M_6)_1 + (M_6)_2 \\ F_{x7} \\ F_{y8} \\ M_9 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} R_1 \\ R_2 \\ R_3 \\ (R_4)_1 + (R_4)_2 \\ (R_5)_1 + (R_5)_2 \\ (R_6)_1 + (R_6)_1 \\ R_7 \\ R_8 \\ R_9 \end{bmatrix} =$$

$$\begin{bmatrix} 1 & 2 & 3 & 4 & 5 & 6 & 7 & 8 & 9 \\ (c^2M + s^2N) & cs(M - N) & -sm & (-c^2M - s^2N) & cs(-M + N) & -sm & 0 & 0 & 0 \\ cs(M - N) & (s^2M - c^2N) & cm & cs(-M + N) & (s^2M - c^2N) & cm & 0 & 0 & 0 \\ -s^2m & c^2m & n & sm & c^2m & r & 0 & 0 & 0 \\ (-c^2M - s^2N) & cs(-M + N) & sm & (c^2M + s^2N)_1 + (c^2M + s^2N)_2 & [cs(M - N)]_1 + (cs(M - N))_2 & (sm)_1 + (-sm)_2 & (-c^2M - s^2N) & cs(-M + N) & -sm \\ cs(-M + N) & (-s^2M - c^2N) & -cm & [cs(M - N)]_1 + [cs(M - N)]_2 & (s^2M + c^2N)_1 + (s^2M - c^2N)_2 & (-cm)_1 + (cm)_2 & cs(-M + N) & (s^2M - c^2N) & cm \\ -sm & sm & r & (sm)_1 + (-s^2m)_2 & (-cm)_1 + (c^2m)_2 & n_1 + (n)_2 & sm & c^2m & r \\ 0 & 0 & 0 & (-c^2M - s^2N)_2 & (cs(-M + N))_2 & (sm)_2 & (c^2M + s^2N) & cs(M - N) & sm \\ 0 & 0 & 0 & (cs(-M + N))_2 & (-s^2M - c^2N)_2 & (-cm)_2 & cs(M - N) & (s^2M + c^2N) & -cm \\ 0 & 0 & 0 & (-sm)_2 & (sm)_2 & (r)_2 & sm & -cm & n \end{bmatrix} \quad (4.29)$$

$$\begin{bmatrix} U_{x1} \\ U_{y2} \\ U_3 \\ (U_{x4})_1 + (U_{x4})_2 \\ (U_5)_1 + (U_5)_1 \\ (U_6)_1 + (U_6)_2 \\ U_{x7} \\ U_{y8} \\ U_9 \end{bmatrix}$$

$$\begin{bmatrix} F_{x1} \\ F_{y2} \\ M_3 \\ (F_{x4})_1 + (F_{x4})_2 \\ (F_{y5})_1 + (F_{y5})_2 \\ (M_6)_1 + (M_6)_2 \\ F_{x7} \\ F_{y8} \\ M_9 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} R_1 \\ 0 \\ R_3 \\ (R_4)_1 + (R_4)_2 \\ 0 \\ (R_6)_1 + (R_6)_1 \\ R_7 \\ 0 \\ R_9 \end{bmatrix} =$$

$$\begin{bmatrix} 1 & 2 & 3 & 4 & 5 & 6 & 7 & 8 & 9 \\ (c^2M + s^2N) & cs(M - N) & -sm & (-c^2M - s^2N) & cs(-M + N) & -sm & 0 & 0 & 0 \\ cs(M - N) & (s^2M - c^2N) & cm & cs(-M + N) & (s^2M - c^2N) & cm & 0 & 0 & 0 \\ -s^2m & c^2m & n & sm & c^2m & r & 0 & 0 & 0 \\ (-c^2M - s^2N) & cs(-M + N) & sm & (c^2M + s^2N)_1 + (c^2M + s^2N)_2 & [cs(M - N)]_1 + [cs(M - N)]_2 & (sm)_1 + (-sm)_2 & (-c^2M - s^2N) & cs(-M + N) & -sm \\ cs(-M + N) & (-s^2M - c^2N) & -cm & [cs(M - N)]_1 + [cs(M - N)]_2 & (s^2M + c^2N)_1 + (s^2M - c^2N)_2 & (-cm)_1 + (cm)_2 & cs(-M + N) & (s^2M - c^2N) & cm \\ -sm & sm & r & (sm)_1 + (-s^2m)_2 & (-cm)_1 + (c^2m)_2 & n_1 + (n)_2 & sm & c^2m & r \\ 0 & 0 & 0 & (-c^2M - s^2N)_2 & (cs(-M + N))_2 & (sm)_2 & (c^2M + s^2N) & cs(M - N) & sm \\ 0 & 0 & 0 & (cs(-M + N))_2 & (-s^2M - c^2N)_2 & (-cm)_2 & cs(M - N) & (s^2M + c^2N) & -cm \\ 0 & 0 & 0 & (-sm)_2 & (sm)_2 & (r)_2 & sm & -cm & n \end{bmatrix} \quad (4.30)$$

$$\begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ U_5 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix}$$

Se realizó la multiplicación de la matriz de rigidez y el vector de desplazamientos:

$$\begin{bmatrix} F_{x1} \\ F_{y2} \\ M_3 \\ (F_{x4})_1 + (F_{x4})_2 \\ (F_{y5})_1 + (F_{y5})_2 \\ (M_6)_1 + (M_6)_2 \\ F_{x7} \\ F_{y8} \\ M_9 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} R_1 \\ 0 \\ R_3 \\ (R_4)_1 + (R_4)_2 \\ 0 \\ (R_6)_1 + (R_6)_1 \\ R_7 \\ 0 \\ R_9 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} (cs(-M + N))U_5 \\ (s^2M - c^2N)U_5 \\ (c^2m)U_5 \\ ([cs(M - N)]_1 + (cs(M - N))_2)U_5 \\ ((s^2M + c^2N)_1 + (s^2M - c^2N)_2)U_5 \\ ((-cm)_1 + (c^2m)_2)U_5 \\ (cs(-M + N))_2U_5 \\ (-s^2M - c^2N)_2U_5 \\ (sm)_2U_5 \end{bmatrix} \quad (4.31)$$

En la ecuación (4.31) solo se requiere el desplazamiento del quinto grado de libertad, entonces

$$[(F_{y5})_1 + (F_{y5})_2] = ((s^2M + c^2N)_1 + (s^2M - c^2N)_2)U_5 \quad (4.32)$$

En la ecuación (4.32) se despeja a  $U_5$ :

$$U_5 = \frac{[(F_{y5})_1 + (F_{y5})_2]}{((s^2M + c^2N)_1 + (s^2M - c^2N)_2)} \quad (4.33)$$

La suma de  $(F_{y5})_1 + (F_{y5})_2$  es semejante a la ecuación (4.7). Sustituyendo los valores de M y N en (4.33):

$$U_5 = \frac{[E\Delta T\alpha(A_{c1} + A_{c2})]}{\left(s^2\left(\frac{EA}{L}\right) + c^2\left(\frac{12EI}{L^3}\right)\right)_1 + \left(s^2\left(\frac{EA}{L}\right) + c^2\left(\frac{12EI}{L^3}\right)\right)_2} \quad (4.34)$$

En el denominador, los subíndices externos a ambos sumandos, se refieren a los elementos del brazo 1 y brazo 2, respectivamente.

Simplificando a la ecuación (4.34), la Ecuación del desplazamiento para el actuador asimétrico es ahora:

$$U_T = \frac{\alpha \Delta T \sin\theta (A_1 + A_2)}{\left[ s^2 \left( \frac{A_1}{L_1} + \frac{A_2}{L_2} \right) + 12c^2 \left( \frac{I_1}{L_1^3} + \frac{I_2}{L_2^3} \right) \right]} \quad (4.35)$$

donde

$A_{c1}$  = Área de la sección transversal del brazo 1 [m<sup>2</sup>]

$A_{c2}$  = Área de la sección transversal del brazo 2 [m<sup>2</sup>]

$\alpha$  = Coeficiente de expansión térmica del material [1/K]

$\Delta T$  = Diferencia de temperatura del chevrón [°K]

$L_1$  = Largo del brazo 1 [m]


$L_2$  = Largo del brazo 2 [m]

$I_1$  = Momento de inercia del brazo 1 [m<sup>4</sup>]

$I_2$  = Momento de inercia del brazo 2 [m<sup>4</sup>]

Como conclusión podemos decir que, se han obtenido las ecuaciones para calcular la fuerza en ambos actuadores, y que, en el caso de las ecuaciones para el desplazamiento, para el actuador asimétrico posiblemente se requieran ajustes, provenientes de un análisis complementario, considerando al torque producido ante las diferencias en las áreas de los brazos. En el Anexo A, se presentan las imágenes que representan al torque generado al aplicar una diferencia de potencial de 2.8 V a esta estructura.





## **CAPÍTULO 5.- SIMULACIÓN BASADA EN LA PARAMETRIZACIÓN DEL CHEVRÓN SIMETRICO.**

En este Capítulo 5 se presenta, la simulación y parametrización del chevrón simétrico con sus respectivos resultados numéricos, al igual que la comparación de los resultados analíticos y numéricos.

## CAPÍTULO 5.- SIMULACIÓN BASADA EN LA PARAMETRIZACIÓN DEL CHEVRÓN SIMETRICO

---

### 5.1 Material estructural del actuador

Para realizar el análisis matemático se necesita los datos del material con el que es fabricado el microactuador chevrón V, ya que, este es uno de los factores de los que depende del comportamiento del microactuador chevrón o de cualquier dispositivo (Callister, 2017).

Uno de los materiales más comunes en la fabricación de MEMS es el silicio, debido a su abundancia en la Tierra, así como a los costos y a que, la tecnología que se basa en este material es madura, tal como sucede en la fabricación de circuitos integrados (Tecpoyotl, Vargas, & Cabello, 2015) (Hasan Ziko & Koel, 2018) (Vargas Chable, Tecpoyotl Torres, & Cabello Ruíz, 2015) (Sciberras, y otros, 2021) (Phan, Nguyen, Nguyen, & Chu, 2015).

El silicio es el material que utilizaremos, sus propiedades se mencionan en la Tabla 5.1.

Tabla 5.1 Propiedades del silicio (Mounika Reddy & Sunil Kumar, 2013) (Ghatkesar, y otros, 2007)

PROPIEDADES DE SILICIO	VALORES
Densidad, $\rho$ [kg/m <sup>3</sup> ]	2329
Coefficiente de expansión térmica, $\alpha$ [1/°C]	2.568x10 <sup>-6</sup>
Módulo de Young, E [Pa]	130.1x10 <sup>9</sup>
Razón de Poisson, $\nu$	0.33
Conductividad Térmica, $\kappa$ [W/(m°C)]	148
Punto de fusión [°C]	1250410
Esfuerzo Último, $\sigma_{\max}$ [Pa]	250x10 <sup>-6</sup>

## 5.2 Software

En el capítulo 2 se mencionó los dos de las herramientas de software más usados para la simulación de chevrones, COMSOL Multiphysics y ANSYS, Inc., los cuales analizan el comportamiento de un dispositivo bajo un entorno real, usando Elemento Finito (Software, 2022).

Para la realización del presente trabajo, se utilizó el software ANSYS Workbench.

## 5.3 Resultados de simulación del microactuador chevrón

Para el diseño y simulación del Microactuador chevrón termoeléctrico simétrico, se proponen las siguientes dimensiones, como base de diseño, las cuales se presentan en la Tabla 5.2, que también se observan en la Figura 5.1.

Tabla 5.2 Parámetros para el diseño del chevrón

Parámetros	Valores
Ancho de Ancla, $W_a$ [ $\mu\text{m}$ ]	100
Largo de Ancla, $L_a$ [ $\mu\text{m}$ ]	200
Ancho de flecha, $W_f$ [ $\mu\text{m}$ ]	60
Largo de flecha, $L_f$ [ $\mu\text{m}$ ]	150
Largo de Brazo, $L_b$ [ $\mu\text{m}$ ]	600
Ancho de Brazo, $w$ [ $\mu\text{m}$ ]	5
Angulo de inclinación, $\theta$ [ $^\circ$ ]	1
Grosor, $t$ [ $\mu\text{m}$ ]	70

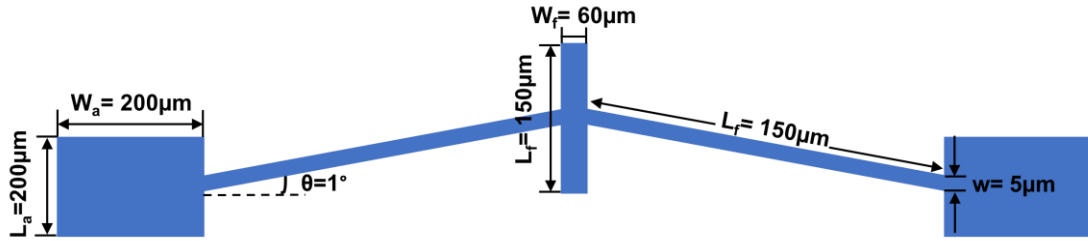


Figura 5.11 Diagrama del chevrón, con la distribución de los parámetros y las medidas base.

### 5.3.1 Diseño y Simulación

Se comenzará con el diseño en ANSYS Workbench  $\rightarrow$  Geometry, usando las dimensiones de la Tabla 5.2. El resultado del diseño se observa en la Figura 5.2.

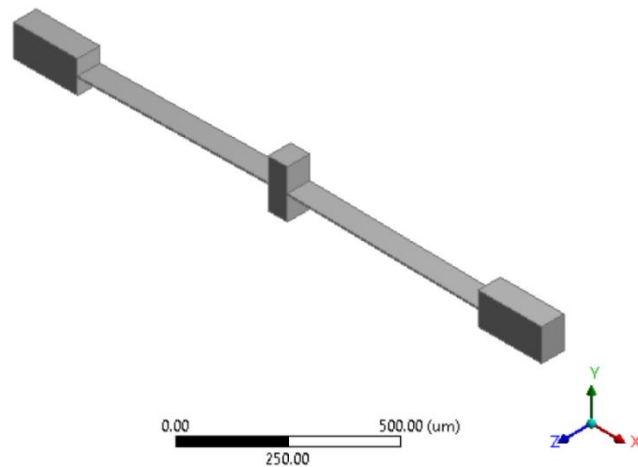


Figura 5.2 Diseño del Chevrón Simétrico en ANSYS  $\rightarrow$  Geometry

Una vez finalizado el diseño, se añade un *Thermal-Electric* y dos *Static-Structural*, en el área de en ANSYS Workbench, que sirven para obtener el desplazamiento, fuerza, temperatura máxima y esfuerzo, considerando a las condiciones de frontera.

Como siguiente paso, se hizo una variación de voltaje para determinar al voltaje a aplicar, con el cual, no se sobrepase el esfuerzo máximo del silicio. Los resultados

se muestran en la Tabla 5.3. En las Figuras 5.3-5.6 se observan gráficas del esfuerzo, al incrementar el voltaje aplicado.

Tabla 5.3 Resultados Numéricos de desplazamiento, fuerza, esfuerzo y temperatura al variar la temperatura.

Voltaje [V]	Desplazamiento [ $\mu\text{m}$ ]	Fuerza [ $\mu\text{N}$ ]	Esfuerzo [MPa]	Temperatura [ $^{\circ}\text{C}$ ]
1	2.8069	159.94	53.51	44.52
2	6.2292	355.06	134.73	112.09
2.5	8.7960	501.27	195.64	162.77
2.6	9.3777	534.42	209.45	174.25
2.7	9.9823	568.88	223.79	186.19
2.8	10.611	604.63	238.68	198.58
2.9	11.260	641.69	254.11	211.41

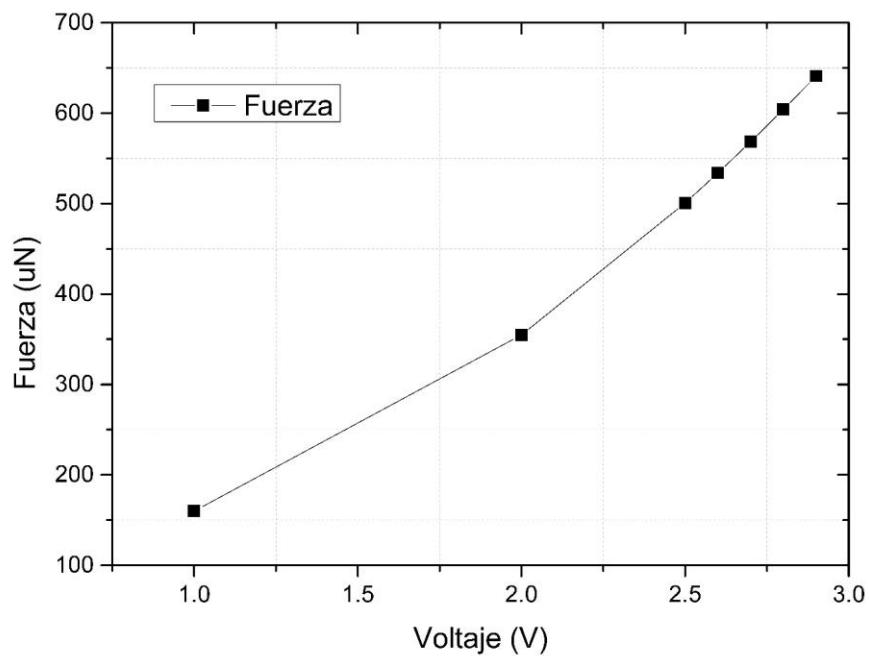


Figura 5.3 Gráfica Voltaje vs Fuerza

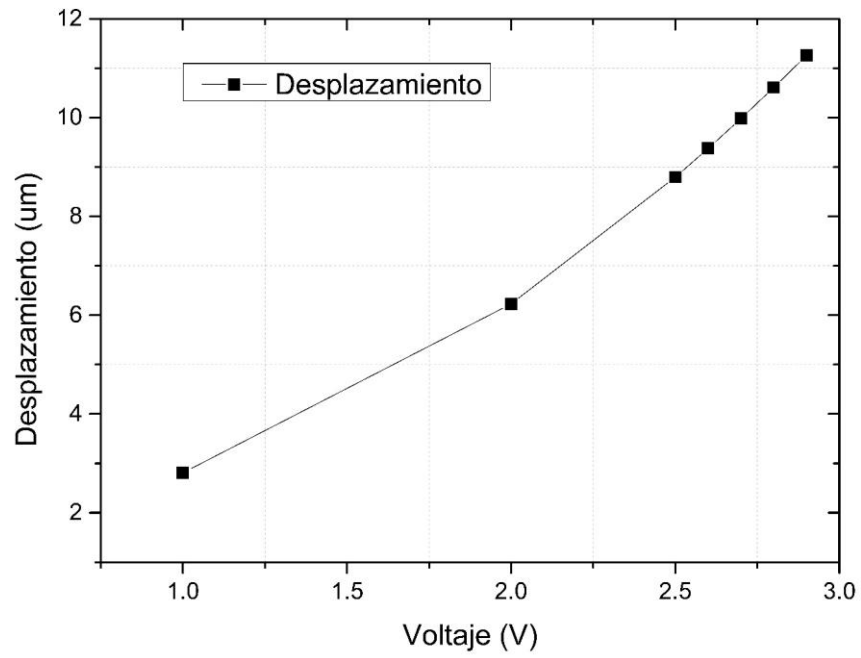


Figura 5.5 Gráfica Voltaje vs Desplazamiento

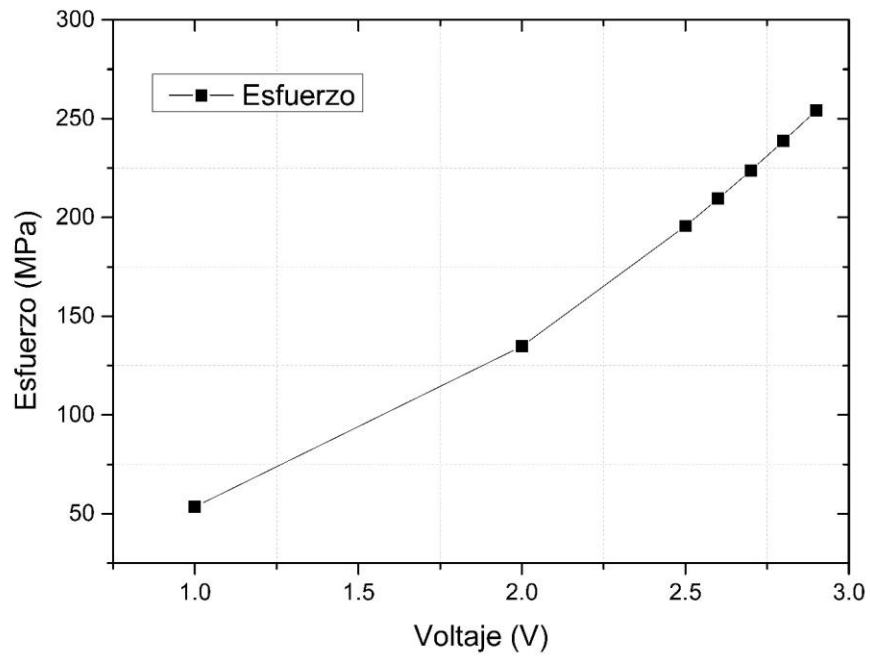


Figura 5.4 Gráfica de voltaje vs esfuerzo

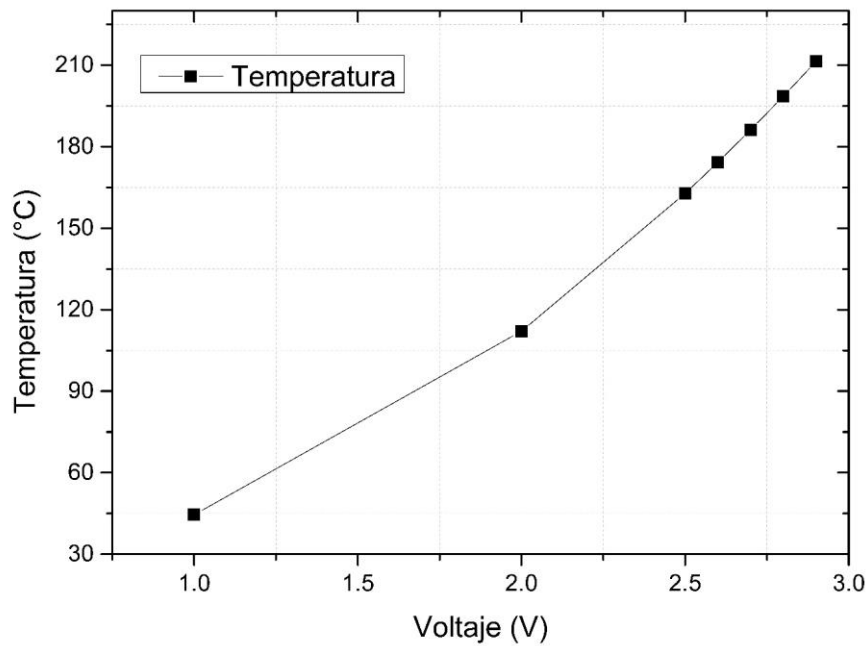


Figura 5.6 Gráfica Voltaje vs Temperatura

Observamos que, a medida que aumenta el voltaje, tanto el desplazamiento, como la fuerza, el esfuerzo y la temperatura aumentan, esto debido al efecto Joule, y a las características del material.

El voltaje seleccionado es de 2.8V, pues genera una temperatura máxima de 198°C. Además, no se supera el esfuerzo último del silicio, y se tiene una respuesta adecuada en fuerza y desplazamiento.

En las Figuras 5.7– 5.10 se observa la temperatura, fuerza, desplazamiento y esfuerzo del chevrón, obtenidos al aplicar 2.8 V. Los valores puntuales se presentan en la Tabla 5.4, en la columna de valores numéricos.

C: Static Structural  
Total Deformation  
Type: Total Deformation  
Unit: m  
Time: 1

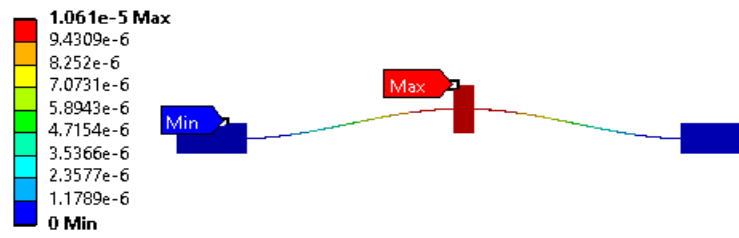


Figura 5.7 Desplazamiento generado con 2.8V.

D: Static Structural  
Force Reaction

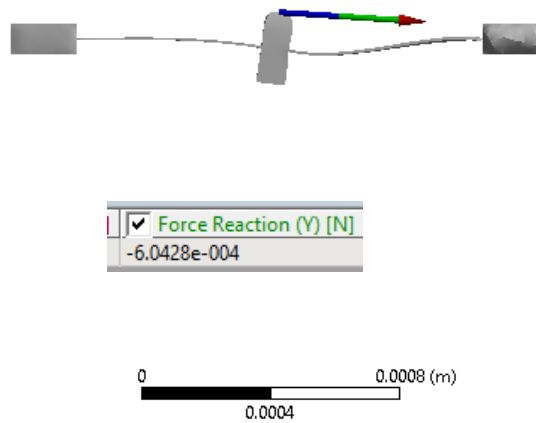


Figura 5.8 Fuerza en el eje Y al aplicar 2.8V



**C: Static Structural**

Equivalent Stress  
Type: Equivalent (von-Mises) Stress  
Unit: Pa  
Time: 1

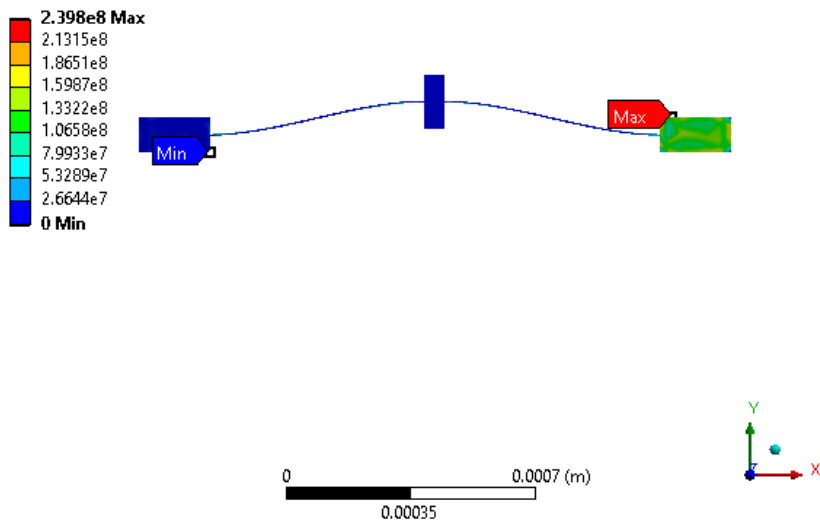


Figura 5.9 Esfuerzo generado con 2.8V.

**B: Thermal-Electric**

Temperature  
Type: Temperature  
Unit: °C  
Time: 1

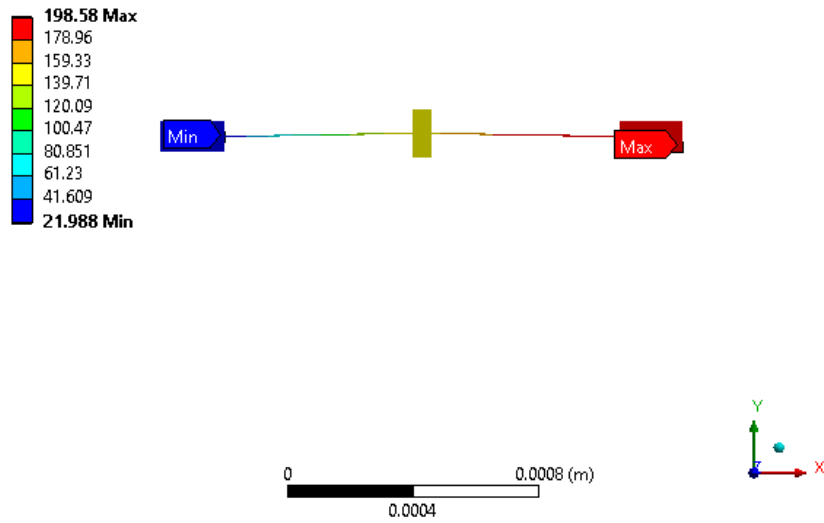


Figura 5.10 Distribución de temperatura con un voltaje de 2.8V.

Posterior a ello, usando las Ecuaciones (2.4) y (2.6), se calculan la fuerza y el desplazamiento analíticos, para obtener el porcentaje de error entre los valores analíticos y numéricos, los resultados se muestran en las Tablas 5.4 y 5.5 y en la Figuras 5.11 y 5.12.

Tabla 5.4 Comparación de resultados de desplazamiento obtenido de forma analítica y numérica, y su porcentaje de error.

<b>Desplazamiento Analítico [μm]</b>	<b>Desplazamiento Numérico [μm]</b>	<b>Porcentaje de error [%]</b>
1.6515	2.8069	41.22
6.4773	6.2292	3.98
10.121	8.7960	15.06
10.947	9.3777	16.72
11.805	9.9823	18.25
12.696	10.611	19.62
13.618	11.260	20.94

Tabla 5.5 Comparación de resultados de la fuerza obtenida de forma analítica y numérica, y su porcentaje de error

<b>Fuerza Analítica [μN]</b>	<b>Fuerza Numérica [μm]</b>	<b>Porcentaje de error [%]</b>
93.753	159.94	41.37
367.71	355.06	3.56
574.56	501.27	14.72
621.42	534.42	16.72
670.15	568.88	17.91
720.72	604.63	19.24
773.09	641.69	20.58

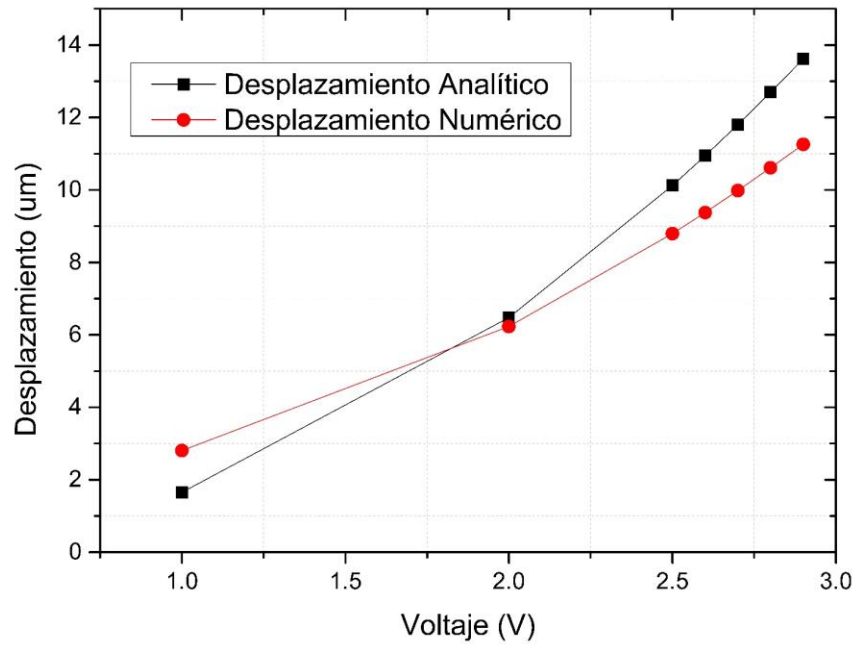


Figura 5.11 Gráfica comparativa del desplazamiento analítico y numérico.

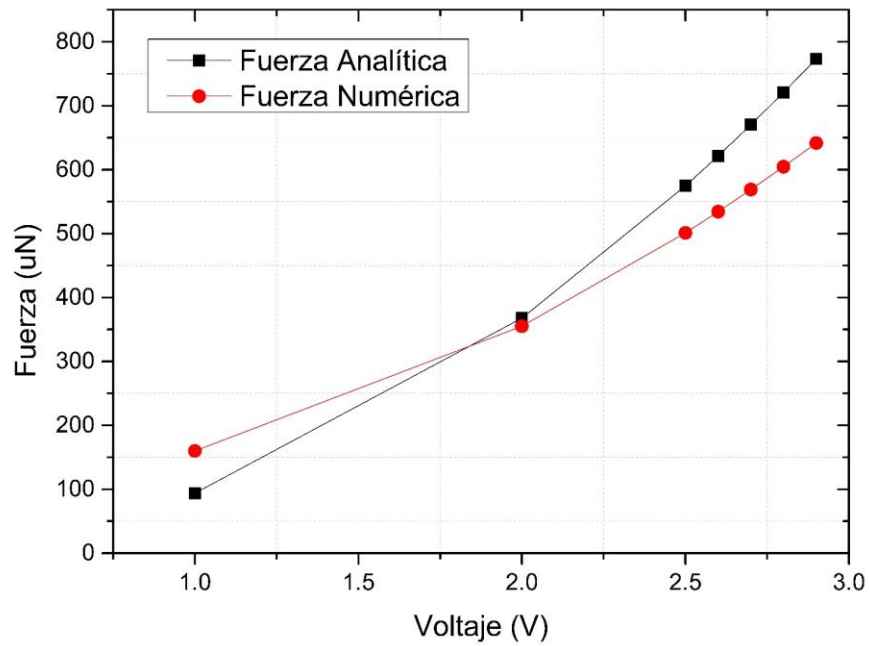


Figura 5.12 Gráfica comparativa de la fuerza obtenida de forma analítica y numérica.

### 5.3.2 Parametrización

Con base en los resultados anteriores, al aplicar 2.8 V al actuador chevrón simétrico, se observa que, su desempeño es adecuado en desplazamiento, fuerza y esfuerzo, este último sin superar al esfuerzo último del silicio.

Se realizará la parametrización del ancho del brazo ( $w$ ), para observar que tanto afecta en el desempeño de la fuerza y el desplazamiento, La parametrización se realiza en pasos de 5  $\mu\text{m}$ , desde 5  $\mu\text{m}$  hasta 45  $\mu\text{m}$ . Los resultados numéricos se muestran en la Tabla 5.6.

Tabla 5.6 Resultados de la parametrización del ancho del par de brazos de chevrón simétrico.

Ancho del par de brazos [ $\mu\text{m}$ ]	Desplazamiento [ $\mu\text{m}$ ]	Fuerza [ $\mu\text{N}$ ]	Esfuerzo Máximo [MPa]
5	10.613	604.41	238.62
10	6.7742	1201	214.25
15	4.2491	1797.9	225.66
20	2.8118	2398.9	204.89
25	1.9884	3018.6	236.95
30	1.4696	3638.2	254.17
35	1.1387	4260.1	246.35
40	0.9002	4911.8	255.99
45	0.7345	5565	262.76

Las Figuras 5.13-5.15 muestran las gráficas del comportamiento del desplazamiento, fuerza y esfuerzo al ir incrementando en ancho del par de brazos.

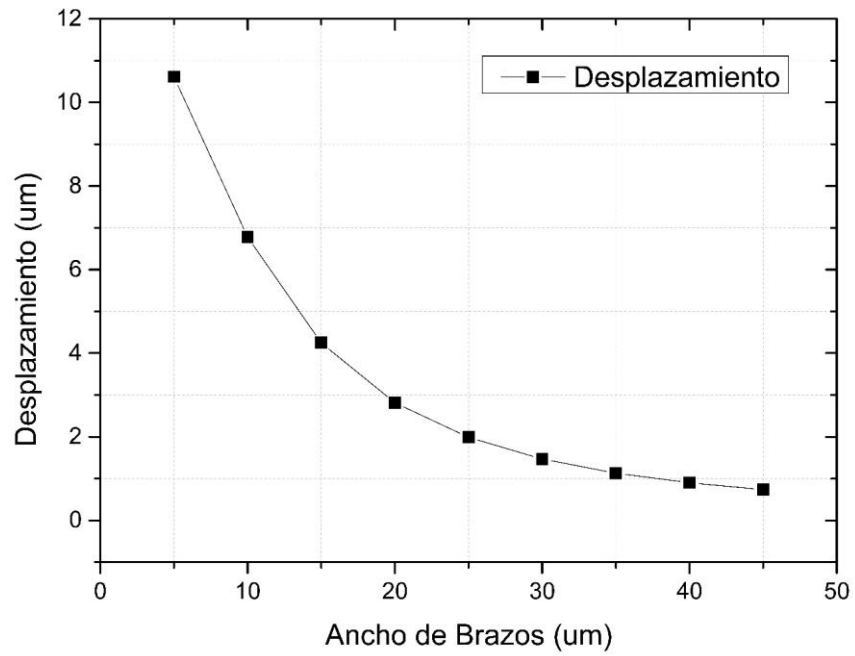


Figura 5.13 Gráfica de Ancho de brazos vs Desplazamiento.

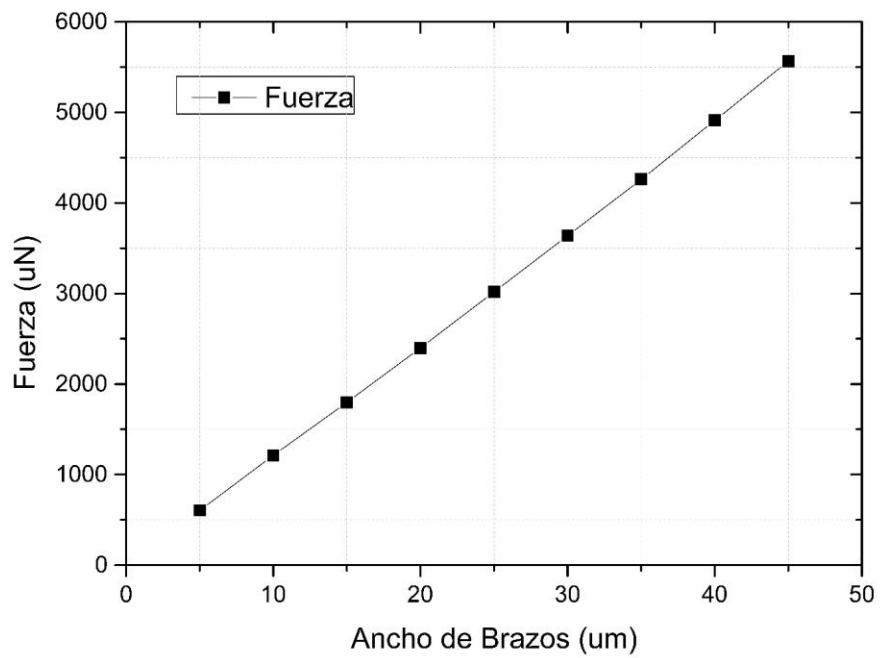


Figura 5.14 Gráfica de Ancho de brazos vs Fuerza.

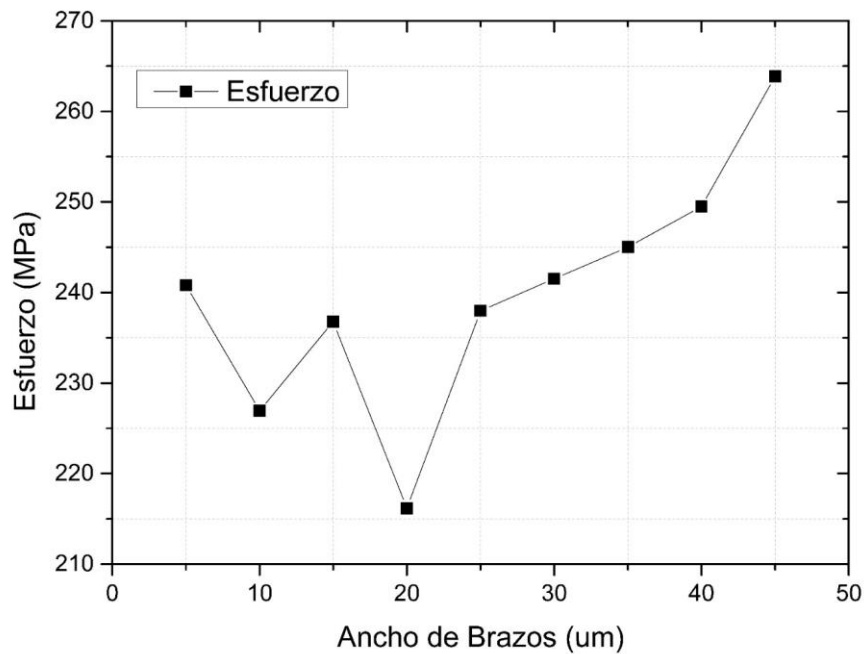


Figura 5.15 Gráfica de Ancho de brazos vs Esfuerzo.

Se hace la comparación de resultados analíticos y numéricos, para obtener su porcentaje de error. Los resultados se muestran en las Tablas 5.7 y 5.8, y en las Figuras 5.16 y 5.17 muestran los gráficos de la comparación entre ambos resultados.

Tabla 5.7 Resultados de la comparación de datos analíticos y numéricos del desplazamiento, con su porcentaje de error.

Ancho del par de brazos [μm]	Desplazamiento Analítico [μm]	Desplazamiento Numérico [μm]	Porcentaje de error [%]
5	12.696	10.613	19.63
10	8.1548	6.7742	20.30
15	5.1091	4.2491	20.23
20	3.3549	2.8118	19.31

25	2.3274	1.9884	17.05
30	1.6935	1.4696	15.23
35	1.2811	1.1287	13.50
40	1.000	0.8997	11.16
45	0.8010	0.7345	9.056

Tabla 5.8 Resultados de la comparación de datos analíticos y numéricos de la fuerza, con su porcentaje de error

Ancho del par de brazos [μm]	Fuerza Analítica [μm]	Fuerza Numérica [μN]	Porcentaje de error [%]
5	720.72	604.41	19.24
10	1441.40	1201	18.83
15	2162.20	1797.9	20.23
20	2882.90	2398.9	20.17
25	3603.60	3018.6	19.38
30	4324.30	3638.2	18.85
35	5045	4260.1	18.42
40	5765.8	4911.8	17.38
45	6486.5	5565	16.55

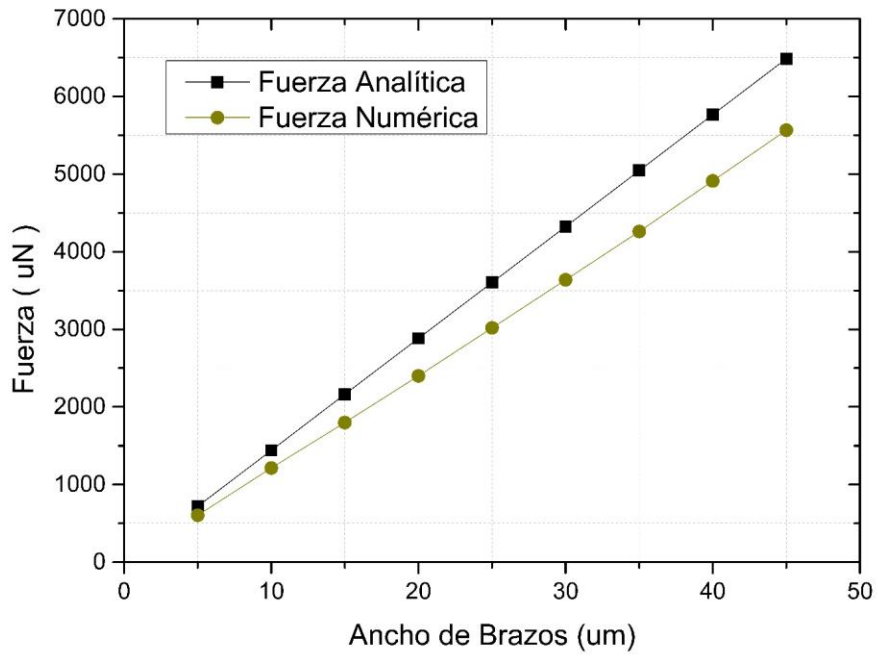


Figura 5.16 Gráfica de Ancho de Brazos vs Fuerza Analítica y Numérica.

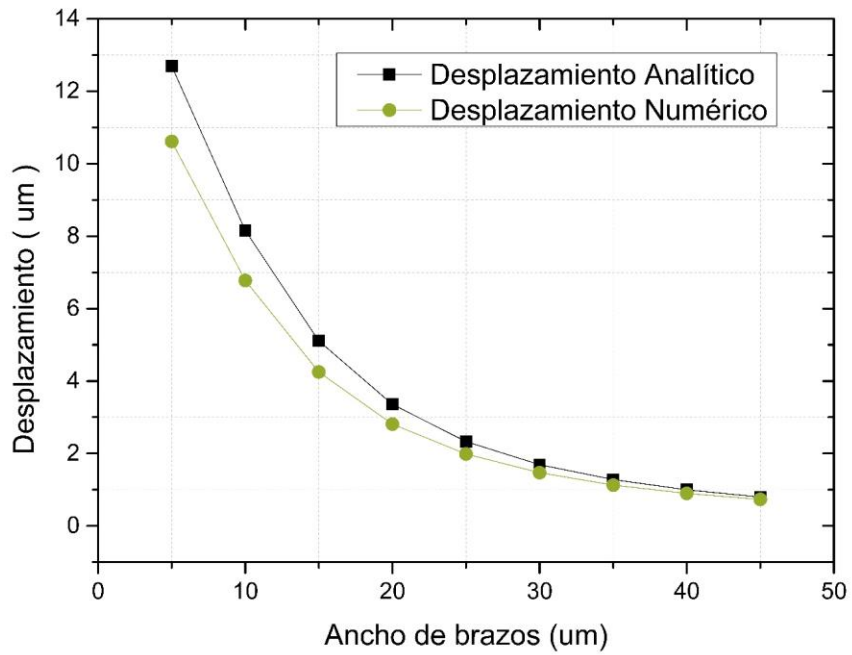


Figura 5.17 Gráfica de Ancho de Brazos vs Desplazamiento Analítico y Numérico.



### 5.3.3 Comparación y elección de nuevas dimensiones de diseño

Con la información obtenida de las simulación y análisis numérico, para este capítulo se propone las nuevas dimensiones para el actuador simétrico, Tabla 5.9.

Tabla 5.9 Nuevas dimensiones para el chevrón simétrico y voltaje aplicado.

Parámetros	Valores
Ancho de Ancla, $W_a$ [ $\mu\text{m}$ ]	100
Largo de Ancla, $L_a$ [ $\mu\text{m}$ ]	200
Ancho de flecha, $W_f$ [ $\mu\text{m}$ ]	60
Largo de flecha, $L_f$ [ $\mu\text{m}$ ]	150
Largo de Brazo, $L_b$ [ $\mu\text{m}$ ]	600
Ancho de Brazo, $w$ [ $\mu\text{m}$ ]	10
Angulo de inclinación, $\theta$ [ $^\circ$ ]	1
Grosor, $t$ [ $\mu\text{m}$ ]	70
Voltaje, $V$ [volts]	2.8

Se eligen estas dimensiones debido a que se tiene una mejor respuesta en fuerza de salida, desplazamiento y no se sobrepasa el esfuerzo último del silicio, en comparación, Tabla 10, con las dimensiones del actuador utilizado como base.

Tabla 5.10 Comparación de desplazamiento, fuerza y esfuerzo del chevrón de las dimensiones usadas como base y las dimensiones del chevrón seleccionado.

Ancho del par de brazos [ $\mu\text{m}$ ]	Desplazamiento [ $\mu\text{m}$ ]	Fuerza [ $\mu\text{N}$ ]	Esfuerzo Máximo [MPa]
5	10.613	604.41	240.82
10	6.774	1201	214.25

En la Tabla 5.10, se hace la comparación del desempeño del chevrón, con las dimensiones iniciales y las dimensiones finales. Aunque el desplazamiento disminuye un 36.17% se tiene un aumento en la fuerza del 98.70%, y una disminución en el esfuerzo del 10.82%, cuando el ancho de los brazos es de 10  $\mu\text{m}$ .

Se busca una relación equilibrada entre desplazamiento, fuerza y esfuerzo, por lo tanto, las dimensiones presentadas en la Tabla 5.9 mantienen esta relación. En las Figuras 5.18-5.22 se observa el diseño y simulación del chevrón con las dimensiones propuestas en la Tabla 5.9.

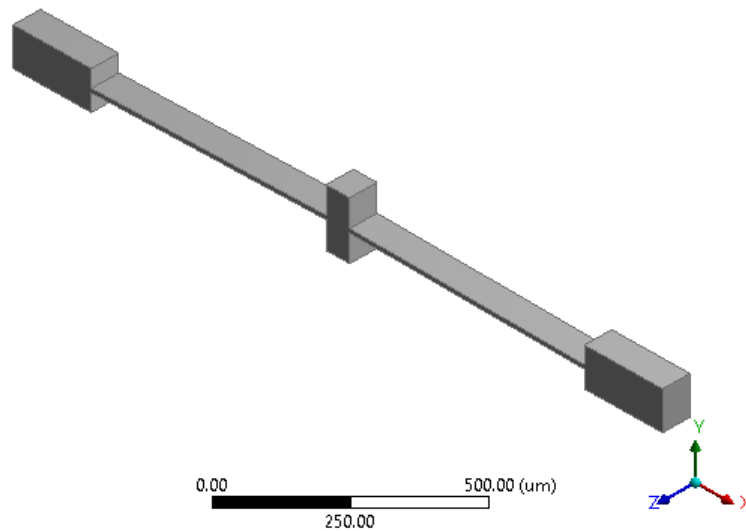


Figura 5.18 Diseño del actuador chevrón con un ancho de brazos de 10  $\mu\text{m}$ .

**C: Static Structural**  
Total Deformation  
Type: Total Deformation  
Unit: m  
Time: 1

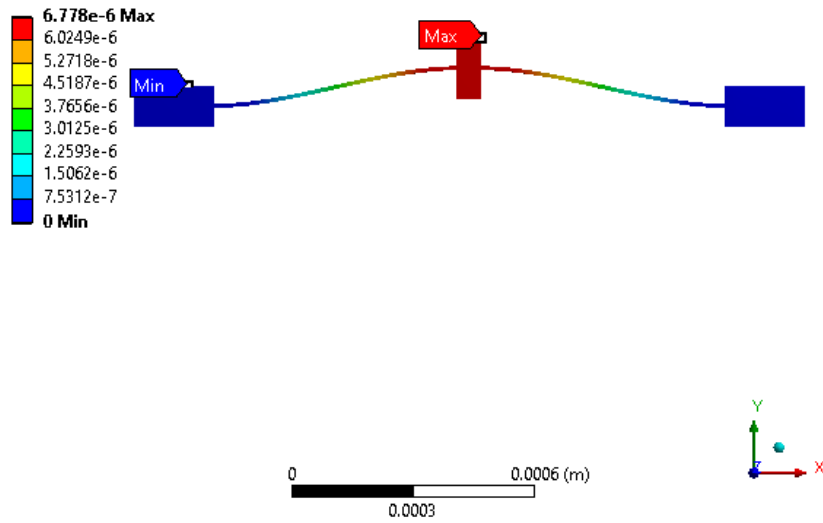


Figura 5.19 Desplazamiento del chevrón con un ancho de brazos de 10  $\mu\text{m}$ .

**D: Static Structural**  
Force Reaction

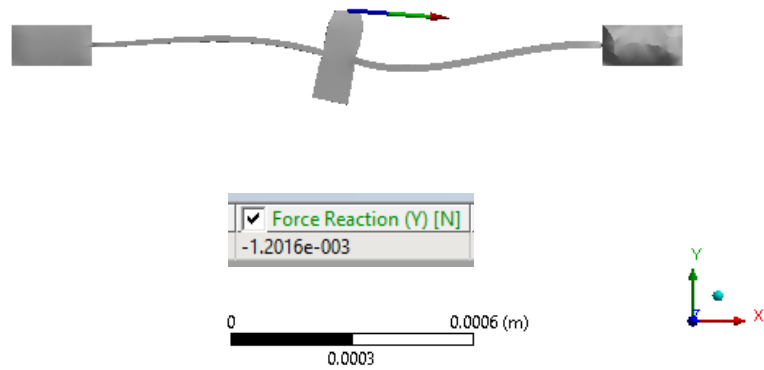


Figura 5.20 Fuerza del chevrón con un ancho de brazos de 10  $\mu\text{m}$ .

**B: Thermal-Electric**  
 Temperature  
 Type: Temperature  
 Unit: °C  
 Time: 1

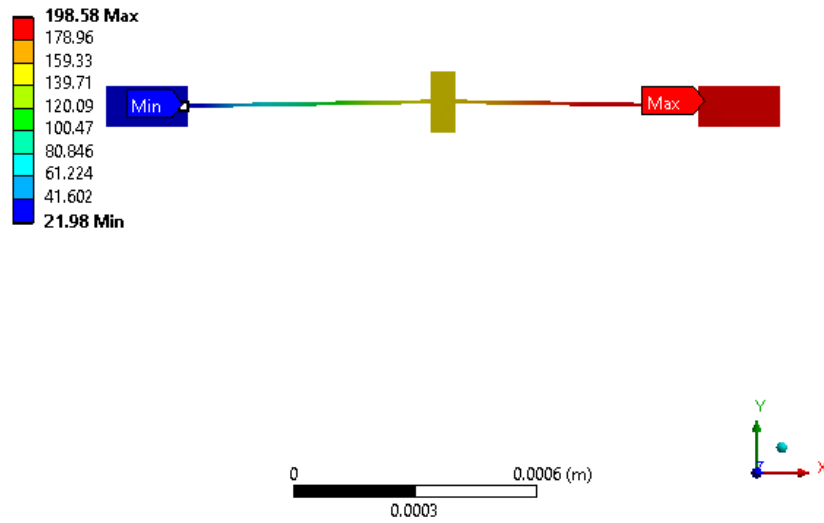


Figura 5.21 Distribución de temperatura con un ancho de brazos de 10  $\mu\text{m}$ .

**C: Static Structural**  
 Equivalent Stress  
 Type: Equivalent (von-Mises) Stress  
 Unit: Pa  
 Time: 1

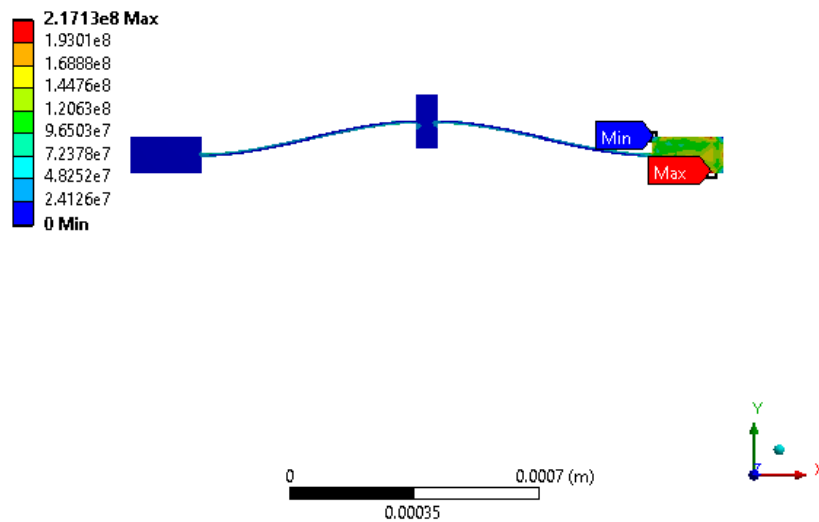
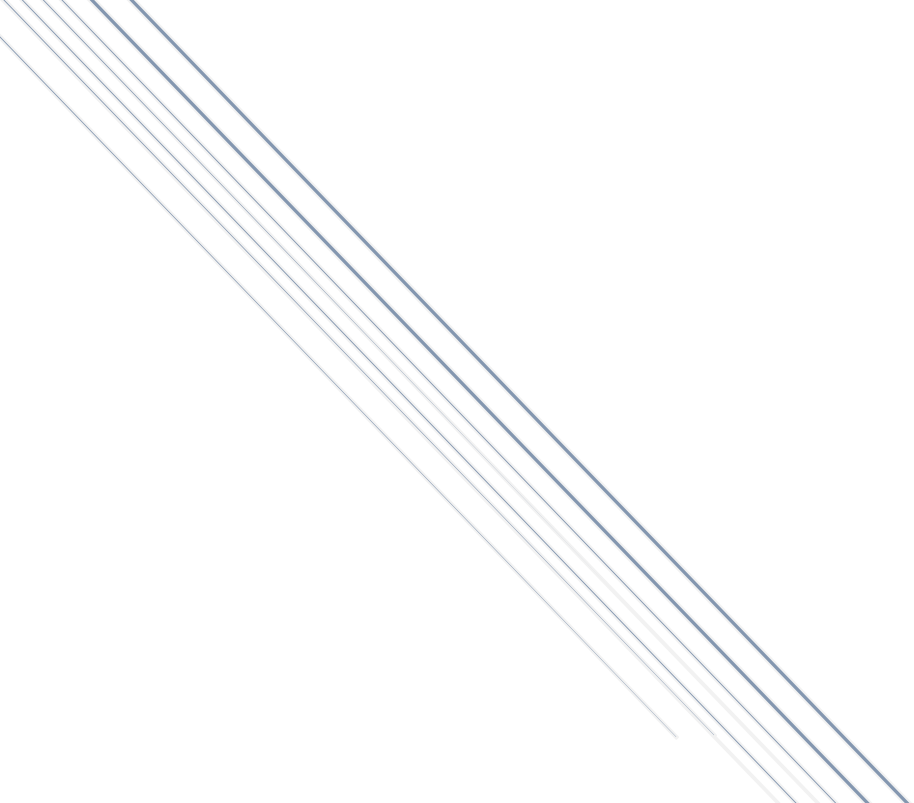


Figura 5.22 Esfuerzo del chevrón con un ancho de brazos de 10  $\mu\text{m}$ .

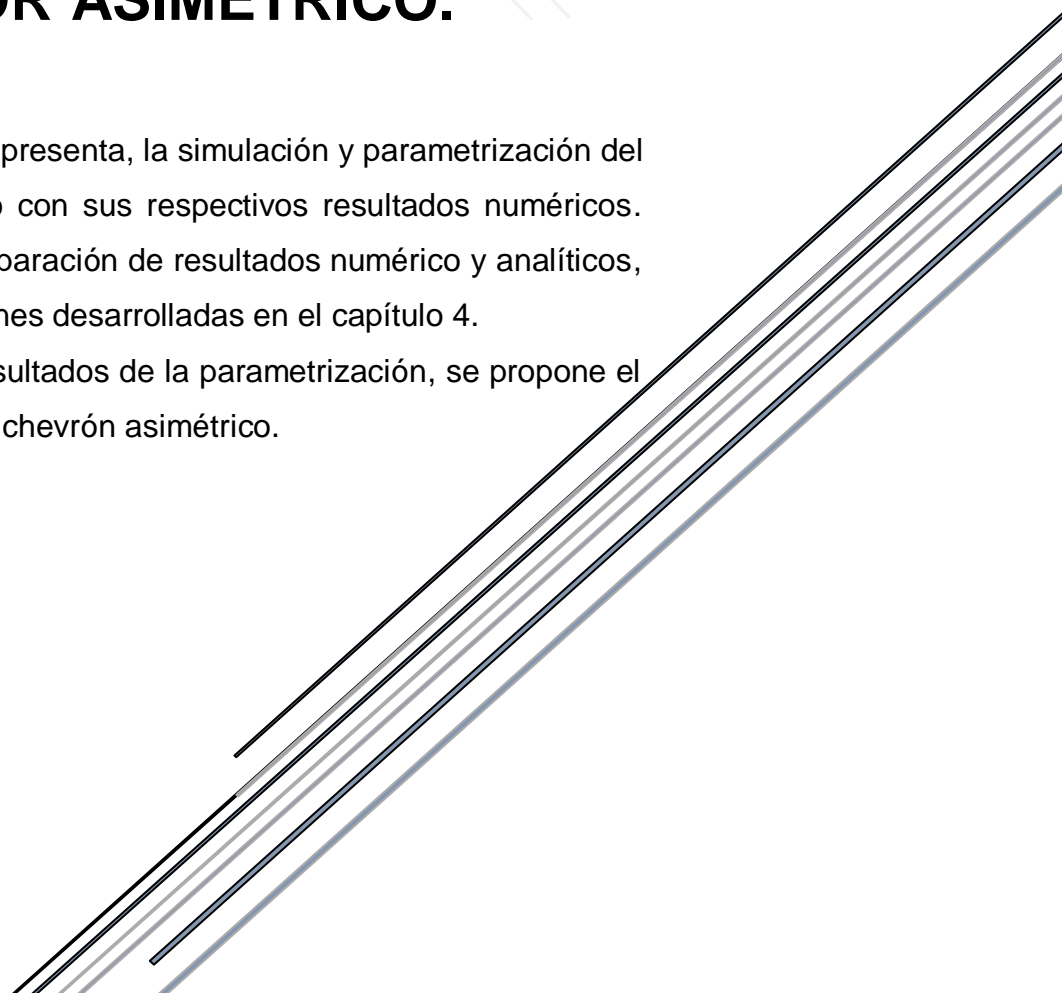


## **CAPÍTULO 6.- SIMULACIÓN BASADA EN LA PARAMETRIZACIÓN DEL ACTUADOR ASIMÉTRICO.**

En este capítulo se presenta, la simulación y parametrización del actuador asimétrico con sus respectivos resultados numéricos.

Se presenta la comparación de resultados numérico y analíticos, usando las ecuaciones desarrolladas en el capítulo 4.

Con base en los resultados de la parametrización, se propone el ajuste al diseño del chevrón asimétrico.



## CAPÍTULO 6.- SIMULACIÓN BASADA EN LA PARAMETRIZACIÓN DEL ACTUADOR ASIMÉTRICO

---

En el capítulo 5 se observó que, algunos de los factores que influyen en el desempeño del chevrón son el área de la sección transversal de los brazos y el largo de los brazos.

En este capítulo se asignan nuevos nombres a cada elemento que conforma al chevrón, Figura 6.1, con el fin de saber sobre qué elemento se realizará la parametrización.

Para la simulación y parametrización se retoman las dimensiones base del chevrón simétrico, Tabla 6.1, y con base a los resultados obtenidos, se aplica un voltaje de 2.8 V.

Tabla 6.1 Dimensiones base para el diseño del chevrón asimétrico

Parámetros	Valores
Ancho de Ancla, $W_a$ [ $\mu\text{m}$ ]	100
Largo de Ancla, $L_a$ [ $\mu\text{m}$ ]	200
Ancho de flecha, $W_f$ [ $\mu\text{m}$ ]	60
Largo de flecha, $L_F$ [ $\mu\text{m}$ ]	150
Largo de Brazo, $L_{b1}$ [ $\mu\text{m}$ ]	600
Largo de Brazo, $L_{b2}$ [ $\mu\text{m}$ ]	600
Ancho de Brazo, $w_1$ [ $\mu\text{m}$ ]	5
Ancho de Brazo, $w_2$ [ $\mu\text{m}$ ]	5
Ángulo de inclinación, $\theta_1$ [°]	1
Ángulo de inclinación, $\theta_2$ [°]	1
Grosor, $t$ [ $\mu\text{m}$ ]	70

Voltaje, V [volts]	2.8
--------------------	-----

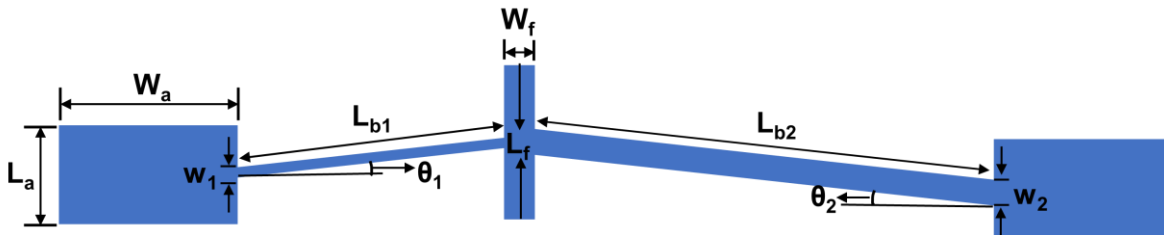


Figura 6.1 Elemento que conforma al chevrón asimétrico con su respectivo nombre.

Para este capítulo se asignan nuevos nombres a cada elemento que conforma al chevrón, Figura 6.1, con el fin de saber a qué elemento se le está realizando la parametrización.

$L_{b1}$  = largo del brazo 1 (brazo derecho)

$w_1$  = ancho del brazo 1

$\theta_1$  = ángulo de inclinación del brazo 1

$L_{b2}$  = largo del brazo 2 (brazo izquierdo)

$w_2$  = ancho del brazo 2

$\theta_2$  = ángulo de inclinación del brazo 2

## 6.1 Parametrización: Brazo 1

Para realizar la parametrización del actuador asimétrico, primero se parametrizará el ancho y largo de los brazos, para encontrar en que dimensiones se tiene una respuesta aceptable en fuerza y desplazamiento, manteniendo siempre una asimetría. Para comparar los resultados numéricos del chevrón simétrico y el asimétrico y obtener información de que tanto afecta la asimetría en el desempeño del chevrón.

### 6.1.1 Parametrización

Para la parametrización del brazo 1, el largo de los brazos será constante (600  $\mu\text{m}$ ), el ancho del brazo 2 será constante (45  $\mu\text{m}$ ), mientras que el ancho del brazo 1 ira aumentando gradualmente, en pasos de 5  $\mu\text{m}$ , desde 5  $\mu\text{m}$  hasta 40  $\mu\text{m}$ , para mantener la asimetría. Los resultados numéricos se muestran en la Tabla 6.2. En las Figuras 6.2-6.4 se observan las gráficas del comportamiento de desplazamiento, fuerza y esfuerzo al ir aumentando el ancho del brazo 1.

Tabla 6.2 Resultados numéricos de la parametrización del brazo 1 del chevrón asimétrico.

<b>Ancho brazo 1 [<math>\mu\text{m}</math>]</b>	<b>Desplazamiento [<math>\mu\text{m}</math>]</b>	<b>Fuerza [<math>\mu\text{N}</math>]</b>	<b>Esfuerzo Máximo [MPa]</b>
5	1.6818	5180.2	242.72
10	2.4090	5388.4	261.02
15	2.3781	5575.1	263.51
20	1.9674	5626.2	263.27
25	1.5425	5660.0	263.33
30	1.2124	5656.1	263.73
35	0.9924	5658.1	263.85
40	0.8384	5591.0	263.48



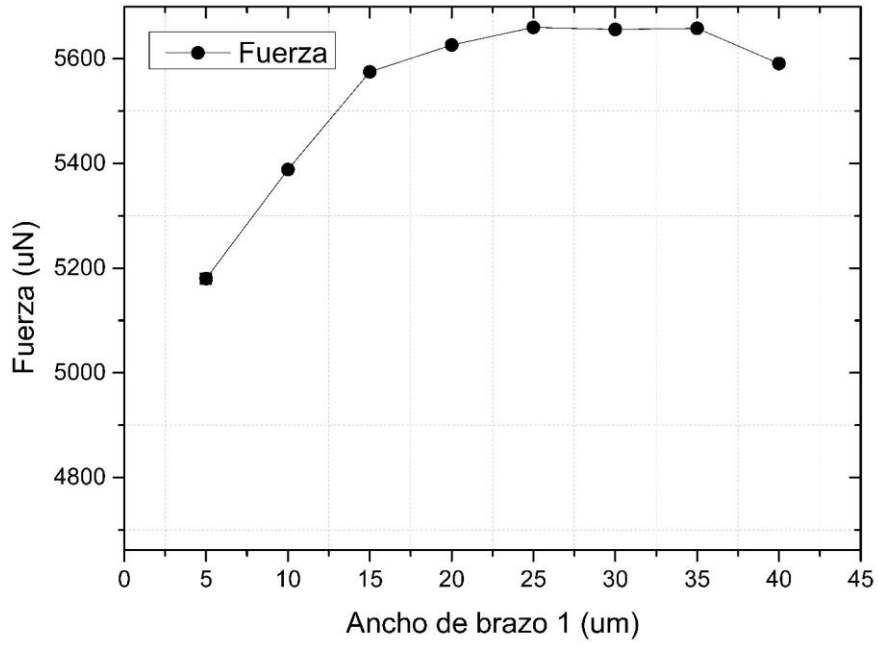


Figura 6.2 Gráfica de ancho de brazo 1 vs fuerza.

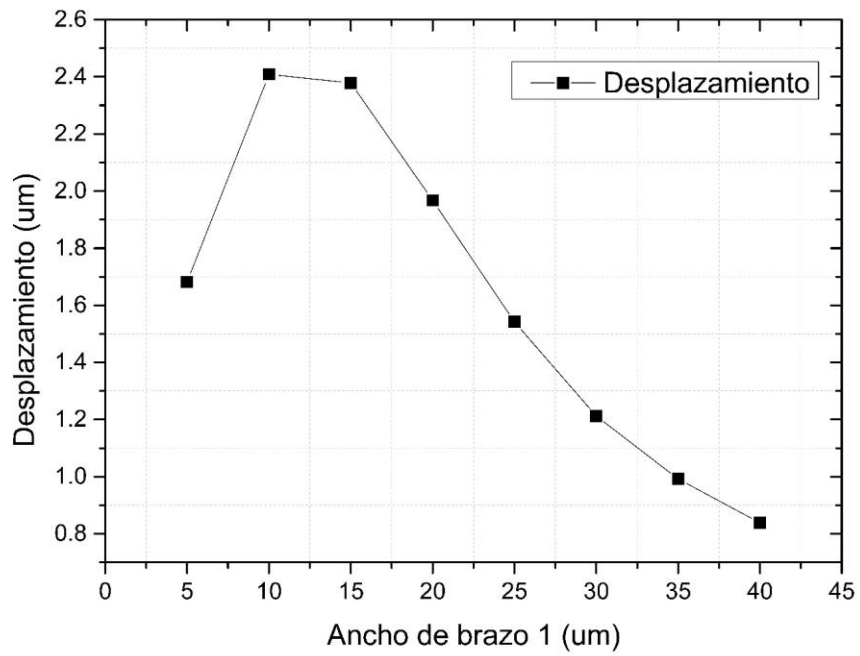


Figura 6.3 Gráfica de ancho de brazo 1 vs desplazamiento.

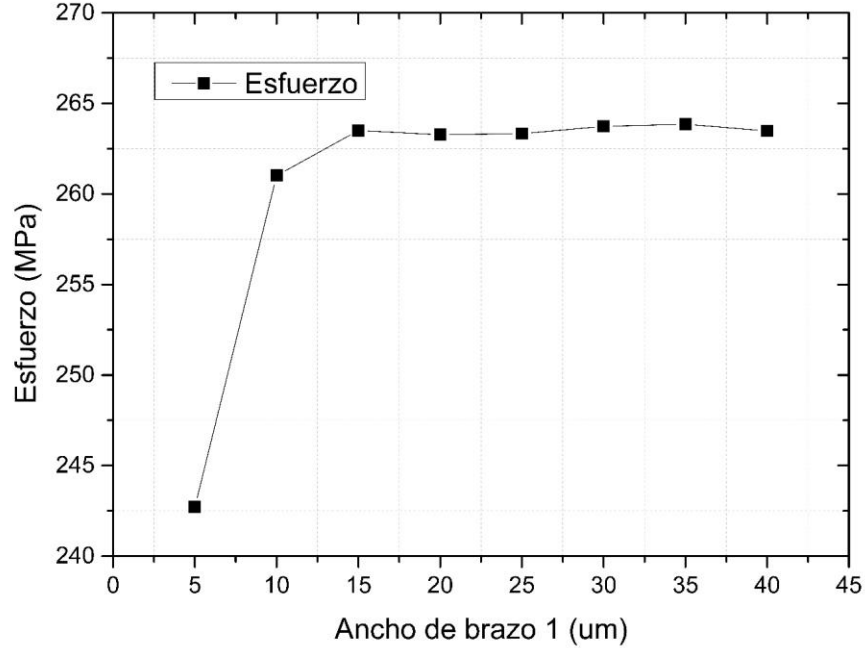


Figura 6.4 Gráfica de ancho de brazo 1 vs esfuerzo.

Con los datos numéricos y las gráficas, observamos que, a medida que el ancho del brazo va aumentando, el desplazamiento disminuye gradualmente, mientras que la fuerza y el esfuerzo aumentan, dado que el esfuerzo aumentado supera el esfuerzo último del silicio, excepto cuando  $w_1=5 \mu\text{m}$  y  $w_2=45 \mu\text{m}$ .

### 6.1.2 Comparación de datos analíticos y numéricos

Para calcular el desplazamiento y la fuerza analíticos, se usaron las Ecuación (4.7) y (4.35) para el chevrón asimétrico. Las Tablas 6.3 y 6.4 muestran la comparación de los valores numérico y analíticos, de desplazamiento y fuerza. En la Figura 6.5 se observa la comparación de los valores analíticos y numéricos del desplazamiento de forma gráfica, mientras que la Figura 6.6 presenta los valores de fuerza.

Tabla 6.3 Comparación de datos analíticos y numéricos del desplazamiento.

Ancho brazo 1 [ $\mu\text{m}$ ]	Desplazamiento Analítico [ $\mu\text{m}$ ]	Desplazamiento Numérico [ $\mu\text{m}$ ]	Porcentaje de error [%]
5	0.9947	1.6818	35.88
10	1.2783	2.4090	46.93
15	1.1423	2.1781	47.55
20	1.1772	1.9674	40.16
25	1.1772	1.5425	23.67
30	1.1423	1.2124	5.779
35	1.0783	0.9924	8.6580
40	0.9947	0.8384	18.644

Tabla 6.4 Comparación de datos analíticos y numéricos de la fuerza.

Ancho brazo 1 [ $\mu\text{m}$ ]	Fuerza Analítica [ $\mu\text{N}$ ]	Fuerza Numérica [ $\mu\text{N}$ ]	Porcentaje de error [%]
5	4052.6	5180.2	21.76
10	4457.8	5388.4	17.26
15	4863.1	5575.1	12.76
20	5268.3	5626.2	6.359
25	5673.6	5660.0	0.2413
30	6078.9	5656.1	7.475
35	6484.1	5658.1	14.60
40	6889.4	5591.0	23.22

Observamos que el porcentaje de error más alto que se obtuvo para el desplazamiento de 47.55%. y para la fuerza es de 23.22%.

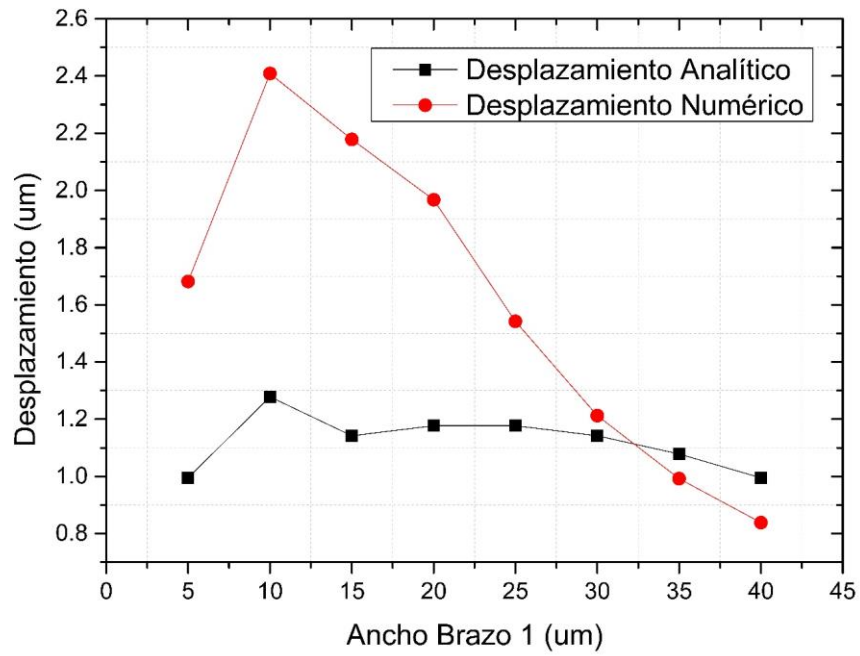


Figura 6.5 Gráfica de ancho de brazo 1 vs desplazamiento.

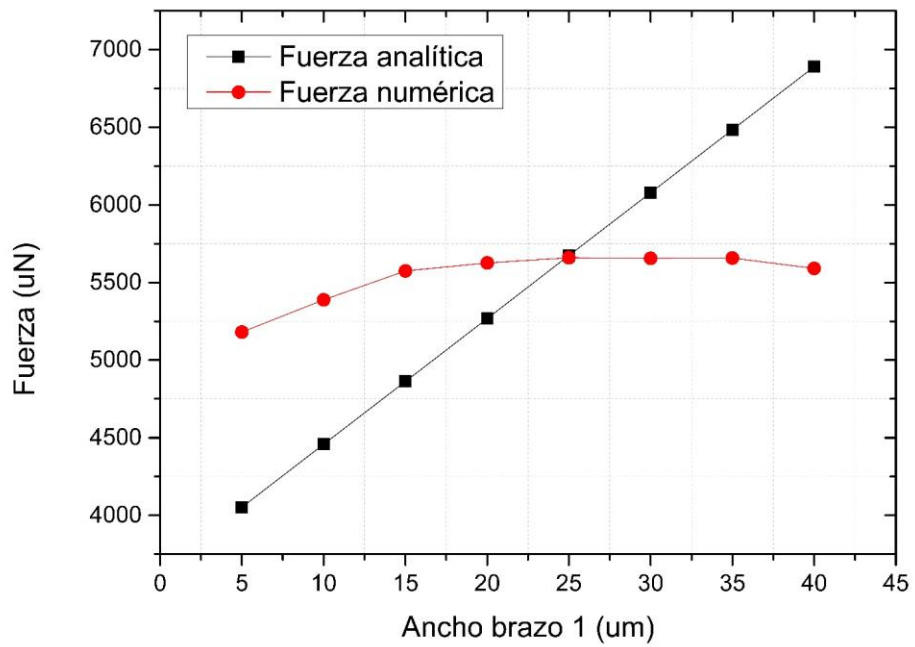


Figura 6.6 Gráfica de ancho de brazo 1 vs fuerza.

En la Figura 6.5 observamos que hay una gran diferencia entre los valores analíticos y numérico del desplazamiento, pero se tiene un comportamiento similar, mientras que el ancho del brazo va aumentando el desplazamiento tiende a disminuir

Para la Figura 6.6 se muestra los valores analíticos y numéricos de la fuerza. Observamos que valores, no coinciden, pero de igual manera se tiene un comportamiento similar, mientras que el ancho de los brazos aumente lo hará la fuerza.

## 6.2 Parametrización: Brazo 2

Para realizar la parametrización del brazo 2 se seguirán los pasos anteriores

### 6.2.1 Parametrización

Para la parametrización del brazo 2, el largo de los brazos (600  $\mu\text{m}$ ) es constante, el ancho de brazo 1 será constante (5  $\mu\text{m}$ ), mientras que el brazo 2 ira aumentando gradualmente, igualmente en pasos de 5  $\mu\text{m}$ , desde 5  $\mu\text{m}$  hasta 45  $\mu\text{m}$ , Los resultados numéricos se muestran en la Tabla 6.3 y en las Figuras 6.7 – 6.9.

Tabla 6.5 Resultados numéricos de la parametrización del ancho del brazo 2

Ancho brazo 2 [ $\mu\text{m}$ ]	Desplazamiento [ $\mu\text{m}$ ]	Fuerza [ $\mu\text{N}$ ]	Esfuerzo Máximo [MPa]
10	11.354	1039.0	228.24
15	10.060	1434.4	224.77
20	7.8615	1832.4	230.03
25	5.7814	2277.7	230.13
30	4.1607	2805.6	241.46
35	3.0128	3431.2	244.48
40	2.2382	4221.6	241.86
45	1.6818	5180.2	242.72

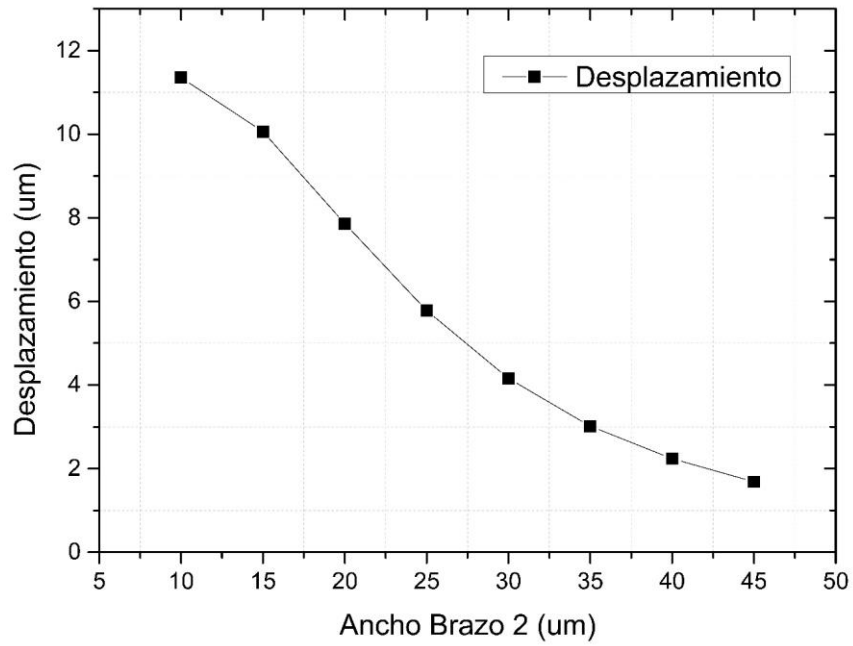


Figura 6.7 Gráfica de ancho de brazo 2 vs desplazamiento.

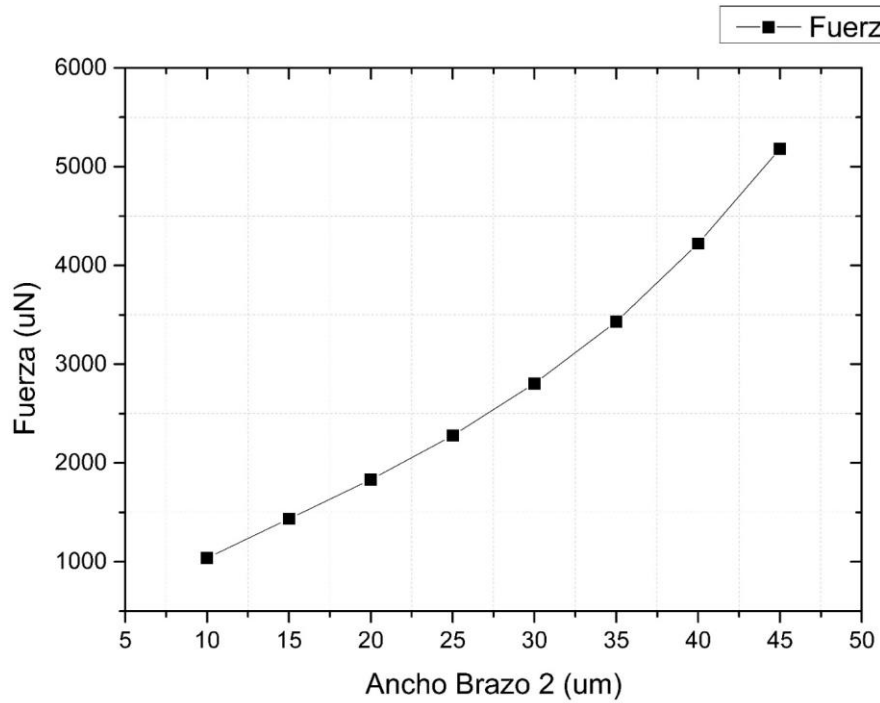


Figura 6.8 Gráfica de ancho de brazo 2 vs fuerza.

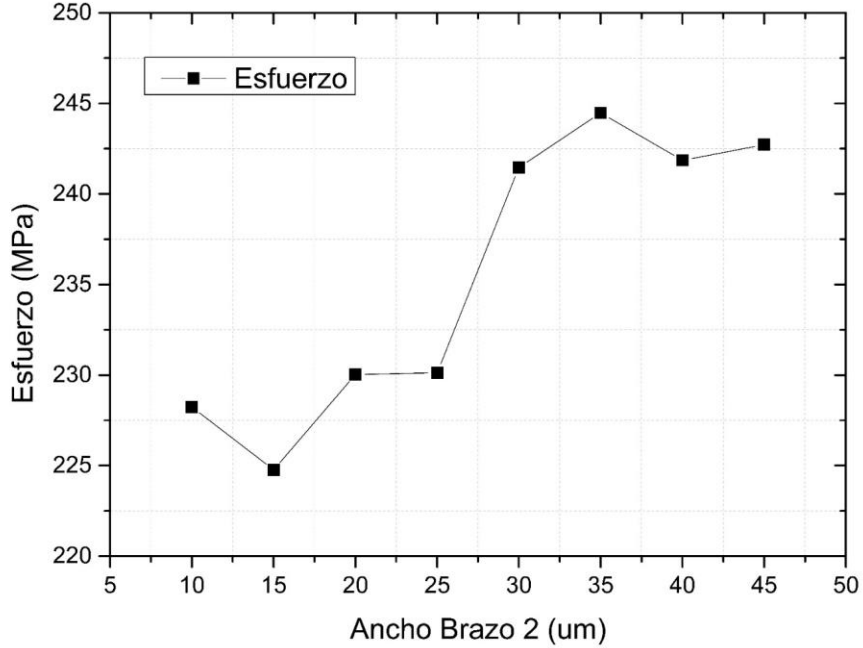


Figura 6.9 Gráfica de ancho de brazo 2 vs esfuerzo.

Con los resultados obtenidos observamos que, igual que la parametrización del brazo 1, al ir aumentando el ancho del brazo 2, hay un aumento de fuerza y esfuerzo, mientras que, el desplazamiento tiende a disminuir.

### 6.2.2 Comparación de resultados analíticos y simulados

Para obtener los datos analíticos de la fuerza se utilizó la Ecuación (4.7) y para el desplazamiento se utiliza la Ecuación (4.35). Las comparaciones se encuentran en las Tablas 6.6 y 6.7, y las Figuras 6.10-6.11 muestran las gráficas de las comparaciones.

Tabla 6.6 Comparación de datos numéricos y analíticos del desplazamiento del chevrón asimétrico.

Ancho brazo 2 [ $\mu\text{m}$ ]	Desplazamiento Analítico [ $\mu\text{m}$ ]	Desplazamiento Numérico [ $\mu\text{m}$ ]	Porcentaje de error [%]
10	10.420	11.354	8.22
15	6.759	10.060	32.80
20	4.422	7.8615	43.54
25	3.032	5.7814	47.55
30	2.175	4.1607	47.71
35	1.624	3.0128	46.08
40	1.253	2.2382	43.97

Tabla 6.7 Comparación de datos numéricos y analíticos de la fuerza del chevrón asimétrico.

Ancho brazo 2 [ $\mu\text{m}$ ]	Fuerza Analítica [ $\mu\text{m}$ ]	Fuerza Numérica [ $\mu\text{m}$ ]	Porcentaje de error [%]
10	1215.0	1039.0	17.01
15	1621.0	1434.4	13.01
20	2026.3	1832.4	10.58
25	2431.5	2277.7	6.75
30	2836.8	2805.6	1.13
35	3242.0	3431.2	5.51
40	3647.3	4221.6	13.60
45	4052.6	5180.2	21.76



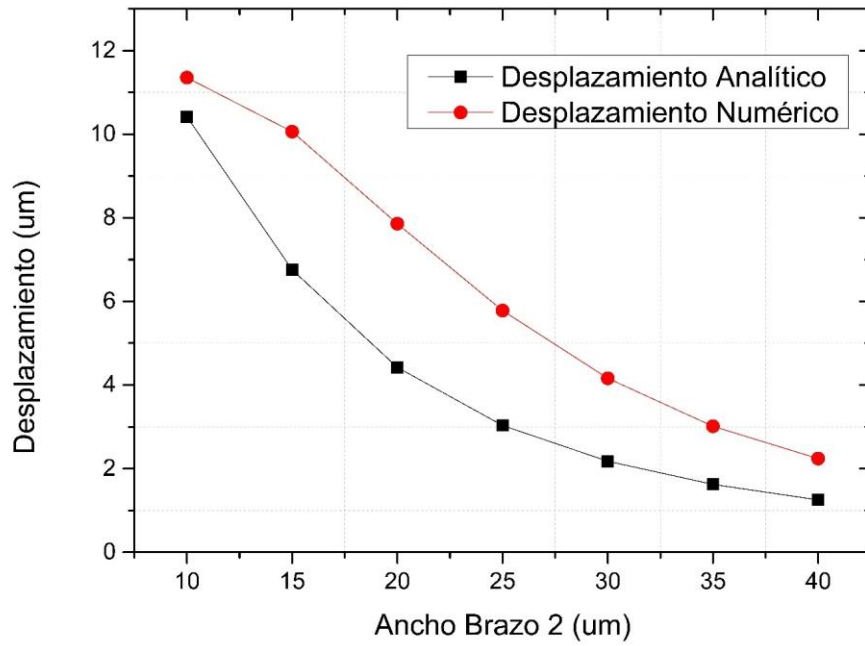


Figura 6.10 Gráfica comparativa de valores analíticos y numéricos, ancho brazo 2 vs desplazamiento.

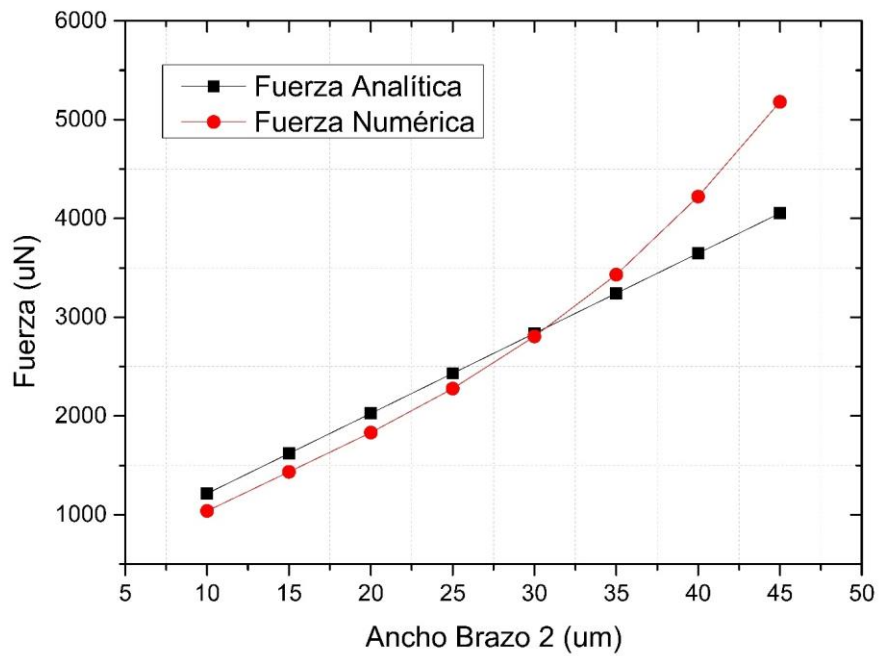


Figura 6.11 Gráfica comparativa de valores analíticos y numéricos, ancho brazo 2 vs fuerza.

Observamos que el porcentaje de error más alto que se obtuvo para el desplazamiento de 47.71%. y para la fuerza es de 21.76%. Mientras que en las Figuras 6.10 y 6.11 observamos a las gráficas de los resultados numéricos y analítico del desplazamiento y la fuerza. Para el desplazamiento, Figura 6.10, un comportamiento similar entre los resultados numéricos y analítico, pero con un desfase alto en comparación con la Figura 5.17, mientras que, para la gráfica de la fuerza, Figura 6.11, los datos analíticos y numéricos tiene un mismo comportamiento, sin ningún desfase significativo.

En la Tabla 6.8 se muestran los valores de las dimensiones de ancho de brazo, donde el chevrón tiene mejor desempeño, con base a ello se realizará la parametrización del largo de los brazos, en cada uno de los tres casos (10, 15 y 25  $\mu\text{m}$ )

Tabla 6.8 Dimensiones con mejor desempeño.

Ancho brazo 2 [ $\mu\text{m}$ ]	Desplazamiento [ $\mu\text{m}$ ]	Fuerza [ $\mu\text{N}$ ]	Esfuerzo Máximo [MPa]
15	10.060	1434.4	224.77
20	7.8615	1832.4	230.03
25	5.7814	2277.7	230.13

### 6.3 Parametrización del largo de los brazos

#### 6.3.1 Parametrización del largo de brazo con $w_1=5\ \mu\text{m}$ y $w_2=15\ \mu\text{m}$

Para esta parametrización los anchos de brazo serán constantes,  $w_1=5$  y  $w_2=15$ , mientras que el largo los brazos irán variando en pasos de  $50\ \mu\text{m}$  en  $50\ \mu\text{m}$ , siempre

y cuando la suma de los dos brazos debe tener un valor de 1200  $\mu\text{m}$ , como se muestra en la Tabla 6.9.

Tabla 6.9 Valores de la parametrización del largo de los brazos con un  $w_1=5\mu\text{m}$  y  $w_2=15\mu\text{m}$ .

Largo de brazos [ $\mu\text{m}$ ]		Desplazamiento [ $\mu\text{m}$ ]	Fuerza [ $\mu\text{N}$ ]	Esfuerzo Máximo [MPa]
$L_1$	$L_2$			
300	900	8.448	1393.2	239.16
350	850	9.461	1404.8	230.82
400	800	10.109	1414	232.68
450	750	10.455	1420.7	230.72
500	700	10.550	1426.2	207.73
550	650	10.415	1429	233.33
600	600	10.060	1434.4	224.77

En la Tabla 6.9 observamos que a medida que varía el largo de los brazos hay un cambio en el desplazamiento, pero no hay un cambio significativo en la fuerza.

En las Tablas 6.10 y 6.11 se hace la comparación de resultados analíticos, usando las ecuaciones (4.7) y (4.35) para la fuerza y desplazamiento respectivamente. y numéricos (Tabla 6.9) del desplazamiento.

Tabla 6.10 Comparación de valores analíticos y numéricos del desplazamiento con  $w_1=5\mu\text{m}$  y  $w_2=15\mu\text{m}$ .

Largo de brazos [ $\mu\text{m}$ ]		Desplazamiento Analítico [ $\mu\text{m}$ ]	Desplazamiento Numérico [ $\mu\text{m}$ ]	Porcentaje de error [%]
$L_1$	$L_2$			

300	900	9.1777	8.448	8.63
350	850	9.8229	9.461	3.82
400	800	9.8632	10.109	2.43
450	750	9.4527	10.455	9.58
500	700	8.7283	10.550	17.26
550	650	7.8011	10.415	25.09.
600	600	6.7599	10.060	32.80

Largo de brazos [ $\mu\text{m}$ ]		Fuerza Analítica [ $\mu\text{N}$ ]	Fuerza Numérica [ $\mu\text{N}$ ]	Porcentaje de error [%]
L <sub>1</sub>	L <sub>2</sub>			
300	900	1621.04	1393.2	16.35
350	850	1621.04	1404.8	15.39
400	800	1621.04	1414	14.64
450	750	1621.04	1420.7	14.10
500	700	1621.04	1426.2	13.67
550	650	1621.04	1429	13.43
600	600	1621.04	1434.4	13.04

Observamos que el porcentaje de error más alto en desplazamiento es del 32.80% y para la fuerza del 16.35%.

### 6.3.2 Características del del primer chevrón asimétrico ( $w_2= 15 \mu\text{m}$ ).

En las Figuras 6.12 - 6.16 observamos el diseño, el desplazamiento, la fuerza, el esfuerzo y la distribución de temperatura del chevrón asimétrico con las dimensiones de la Tabla 6.11, donde se obtuvo un desempeño satisfactorio.

Tabla 6.11 Dimensiones del chevrón asimétrico.

Parámetros	Valores
Ancho de Ancla, $W_a$ [ $\mu\text{m}$ ]	100
Largo de Ancla, $L_a$ [ $\mu\text{m}$ ]	200
Ancho de flecha, $W_f$ [ $\mu\text{m}$ ]	60
Largo de flecha, $L_F$ [ $\mu\text{m}$ ]	150
Largo de Brazo, $L_{b1}$ [ $\mu\text{m}$ ]	500
Largo de Brazo, $L_{b2}$ [ $\mu\text{m}$ ]	700
Ancho de Brazo, $w_1$ [ $\mu\text{m}$ ]	5
Ancho de Brazo, $w_2$ [ $\mu\text{m}$ ]	15
Ángulo de inclinación, $\theta_1, \theta_2$ [ $^\circ$ ]	1
Grosor, $t$ [ $\mu\text{m}$ ]	70
Voltaje, $V$ [volts]	2.8

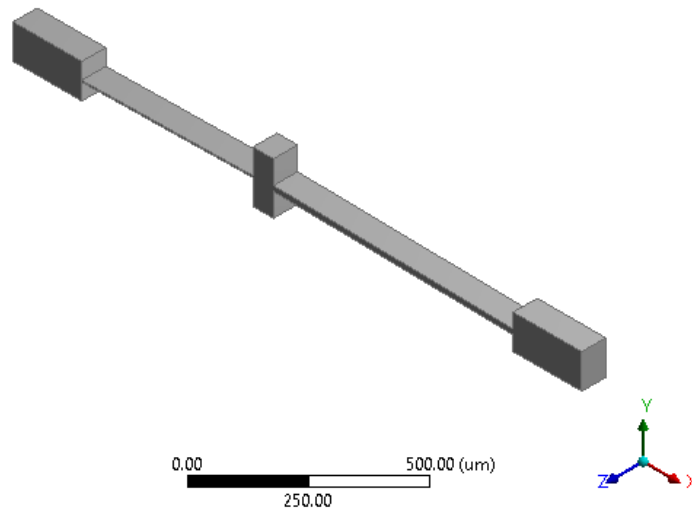


Figura 6.12 Diseño del chevrón asimétrico con  $w_1=5\mu\text{m}$  y  $w_2=15\mu\text{m}$  y  $L_1= 500\mu\text{m}$  y un  $L_2= 700\mu\text{m}$

C: Static Structural  
Total Deformation  
Type: Total Deformation  
Unit: m  
Time: 1

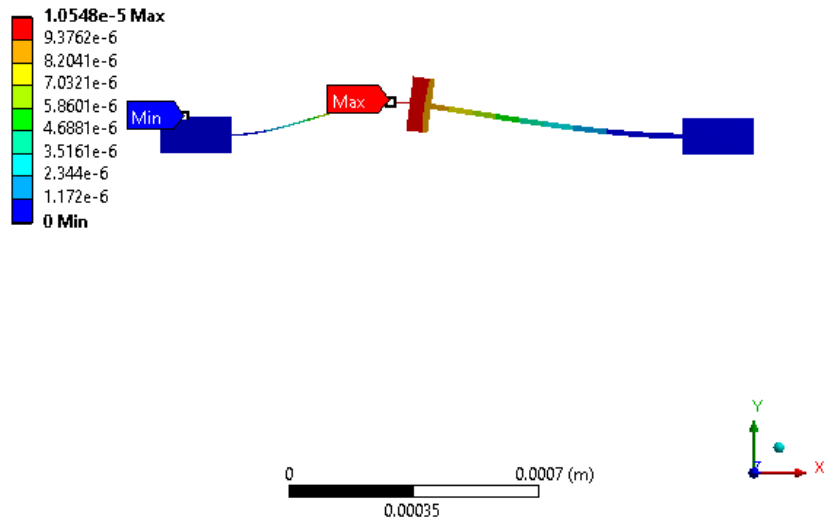


Figura 6.13 Desplazamiento del chevrón asimétrico  $L_1= 500 \mu\text{m}$  y un  $L_2= 700 \mu\text{m}$ .

D: Static Structural  
Force Reaction

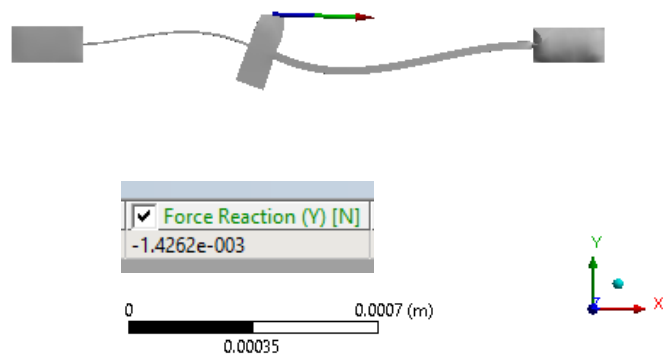


Figura 6.14 Fuerza del chevrón asimétrico  $L_1= 500 \mu\text{m}$  y un  $L_2= 700 \mu\text{m}$

**C: Static Structural**  
 Total Deformation  
 Type: Total Deformation  
 Unit: m  
 Time: 1

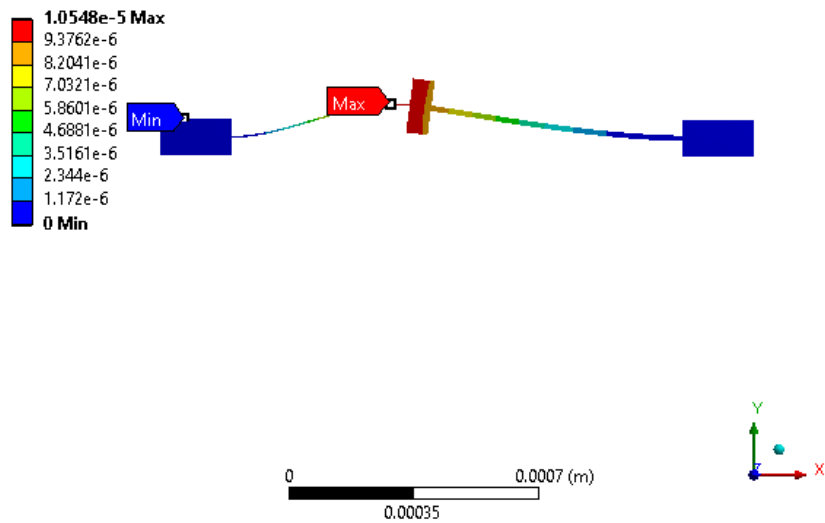


Figura 6.15 Esfuerzo del chevrón asimétrico  $L_1= 500\mu\text{m}$  y un  $L_2= 700\mu\text{m}$

**B: Thermal-Electric**  
 Temperature  
 Type: Temperature  
 Unit: °C  
 Time: 1

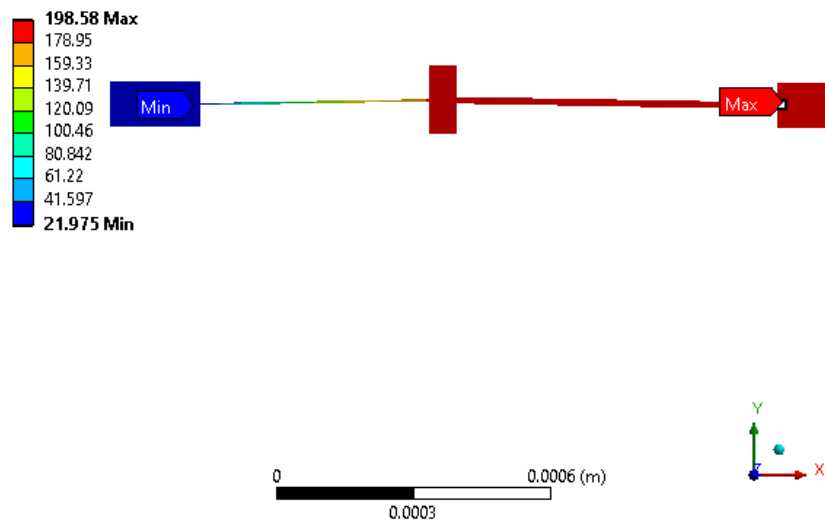


Figura 6.16 Distribución de temperatura del chevrón asimétrico  $L_1= 500\ \mu\text{m}$  y un  $L_2=700\ \mu\text{m}$ .

### 6.3.3 Parametrización del largo de brazo con $w_1=5\ \mu\text{m}$ y $w_2=20\ \mu\text{m}$

Para esta parametrización se seguirá los pasos de la sección 6.3.1, donde los anchos de brazo serán constantes,  $w_1=5\ \mu\text{m}$  y  $w_2=20\ \mu\text{m}$ , mientras que el largo los brazos irán variando

Tabla 6.12 Resultados de la parametrización del largo de los brazos con  $w_1=5\ \mu\text{m}$  y  $w_2=20\ \mu\text{m}$

Largo de brazos [ $\mu\text{m}$ ]		Desplazamiento [ $\mu\text{m}$ ]	Fuerza [ $\mu\text{N}$ ]	Esfuerzo Máximo [MPa]
$L_1$	$L_2$			
300	900	8.5992	1811.6	266.28
350	850	9.2954	1816.9	249.20
400	800	9.571	1815.5	222.24
450	750	9.4966	1819.2	229.60
500	700	9.1638	1820.4	228.31
550	650	8.5989	1823.1	222.23

En la Tabla 6.12 observamos el mismo caso que en la Tabla 6.9, a medida que varía el largo de los brazos hay un cambio en el desplazamiento, pero no hay un cambio en la fuerza.

En las Tablas 6.13 y 6.12 se hace la comparación de los datos numéricos, Tabla (6.12) y analíticos, usando las Ecuaciones (4.7) y (4.35), del desplazamiento y la fuerza con su respectivo porcentaje de error.



Tabla 6.13 Comparación de resultados analíticos y numéricos del desplazamiento con  $w_1=5\ \mu\text{m}$  y  $w_2=20\ \mu\text{m}$

Largo de brazos [ $\mu\text{m}$ ]		Desplazamiento Analítico [ $\mu\text{m}$ ]	Desplazamiento Numérico [ $\mu\text{m}$ ]	Porcentaje de error [%]
$L_1$	$L_2$			
300	900	8.1137	8.5992	5.64
350	850	8.1103	9.2954	12.74
400	800	7.6797	9.571	19.76
450	750	6.9945	9.4966	23.34
500	700	6.1742	9.1638	32.62
550	650	5.2999	8.5989	38.36
600	600	4.4272	7.8386	43.51

Tabla 6.14 Comparación de resultados analíticos y numéricos de la fuerza con  $w_1=5\ \mu\text{m}$  y  $w_2=20\ \mu\text{m}$

Largo de brazos [ $\mu\text{m}$ ]		Fuerza Analítica [ $\mu\text{N}$ ]	Fuerza Numérica [ $\mu\text{N}$ ]	Porcentaje de error [%]
$L_1$	$L_2$			
300	900	2026.30	1811.6	11.85
350	850	2026.30	1816.9	11.52
400	800	2026.30	1815.5	11.61
450	750	2026.30	1819.2	11.28
500	700	2026.30	1820.4	11.31
550	650	2026.30	1823.1	11.14
600	600	2026.30	1832.4	10.58

El porcentaje de error más alto obtenido para el desplazamiento es de 43.51% y para la fuerza un error de 11.85%

### 6.3.4 Características del del segundo chevrón asimétrico ( $w_2= 20 \mu\text{m}$ )

En la Tabla 6.15 se presentan los valores del segundo chevrón asimétrico con mejor respuesta de desempeño, con  $w_1= 5 \mu\text{m}$  y  $w_2=20 \mu\text{m}$ .

Tabla 6.15 Dimensiones del segundo chevrón asimétrico, y V aplicado.

Parámetros	Valores
Ancho de Ancla, $W_a$ [ $\mu\text{m}$ ]	100
Largo de Ancla, $L_a$ [ $\mu\text{m}$ ]	200
Ancho de flecha, $W_f$ [ $\mu\text{m}$ ]	60
Largo de flecha, $L_F$ [ $\mu\text{m}$ ]	150
Largo de Brazo, $L_{b1}$ [ $\mu\text{m}$ ]	500
Largo de Brazo, $L_{b2}$ [ $\mu\text{m}$ ]	700
Ancho de Brazo, $w_1$ [ $\mu\text{m}$ ]	5
Ancho de Brazo, $w_2$ [ $\mu\text{m}$ ]	20
Ángulo de inclinación, $\theta_1, \theta_2$ [ $^\circ$ ]	1
Grosor, $t$ [ $\mu\text{m}$ ]	70
Voltaje, $V$ [volts]	2.8

En las Figuras 6.17 - 6.21 observamos el diseño, el desplazamiento, la fuerza, el esfuerzo y la distribución de temperatura del segundo chevrón en donde se obtuvo un desempeño aceptable.

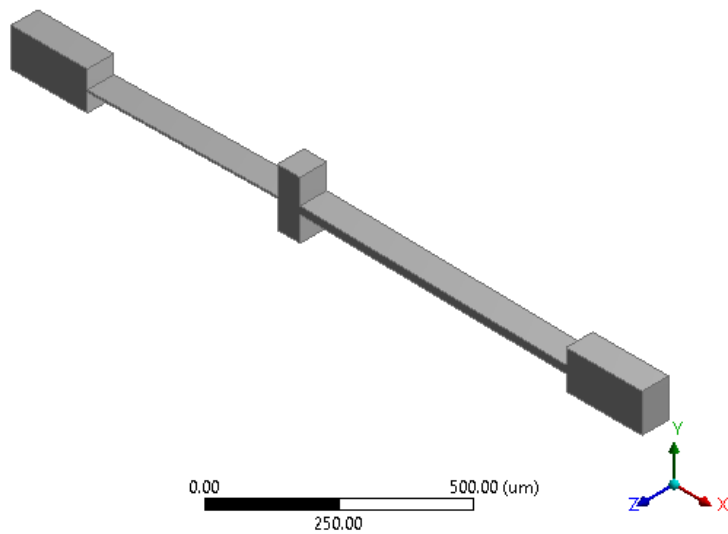


Figura 6.17 Diseño del chevrón asimétrico con  $L_1= 500$  y  $L_2=700 \mu\text{m}$ ,  $w_1= 5 \mu\text{m}$  y  $w_2=20 \mu\text{m}$ .

**C: Static Structural**  
 Total Deformation  
 Type: Total Deformation  
 Unit: m  
 Time: 1

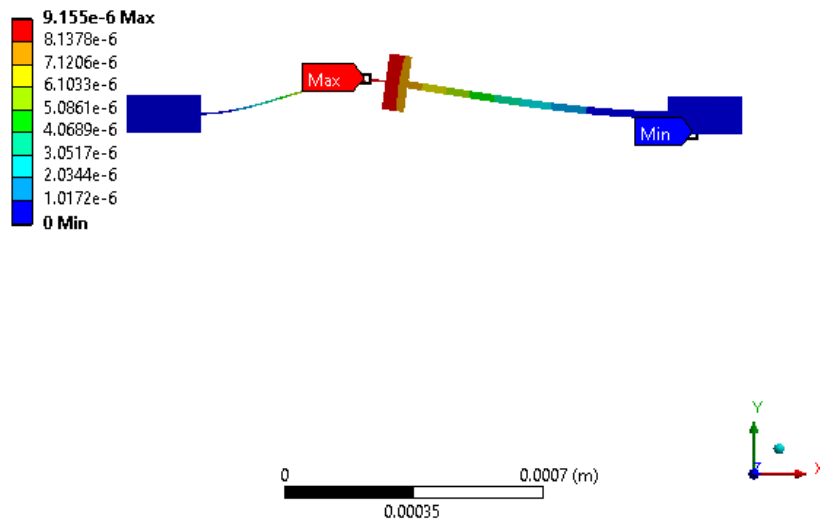


Figura 6.18 Desplazamiento del chevrón asimétrico con  $L_1= 500 \mu\text{m}$  y  $L_2=700 \mu\text{m}$ ,  $w_1= 5 \mu\text{m}$  y  $w_2=20 \mu\text{m}$ .

**D: Static Structural**  
Force Reaction

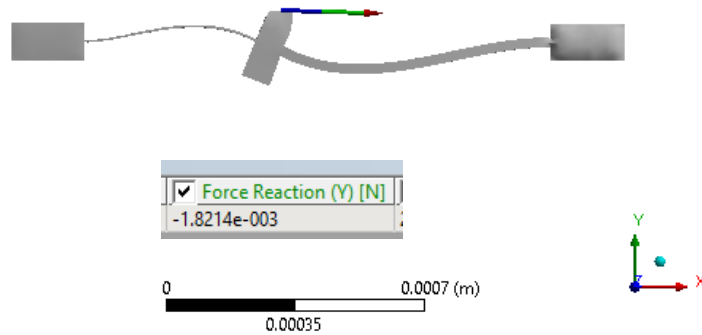


Figura 6.19 Fuerza del chevrón asimétrico con  $L_1=500\ \mu\text{m}$  y  $L_2=700\ \mu\text{m}$ ,  $w_1=5\ \mu\text{m}$  y  $w_2=20\ \mu\text{m}$ .

**C: Static Structural**

Equivalent Stress  
Type: Equivalent (von-Mises) Stress  
Unit: Pa  
Time: 1

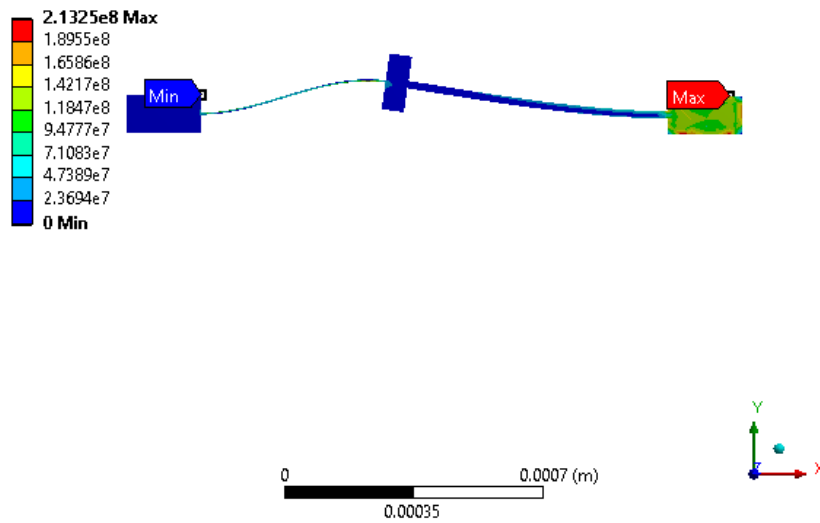


Figura 6.20 Esfuerzo del chevrón asimétrico con  $L_1=500\ \mu\text{m}$  y  $L_2=700\ \mu\text{m}$ ,  $w_1=5\ \mu\text{m}$  y  $w_2=20\ \mu\text{m}$ .

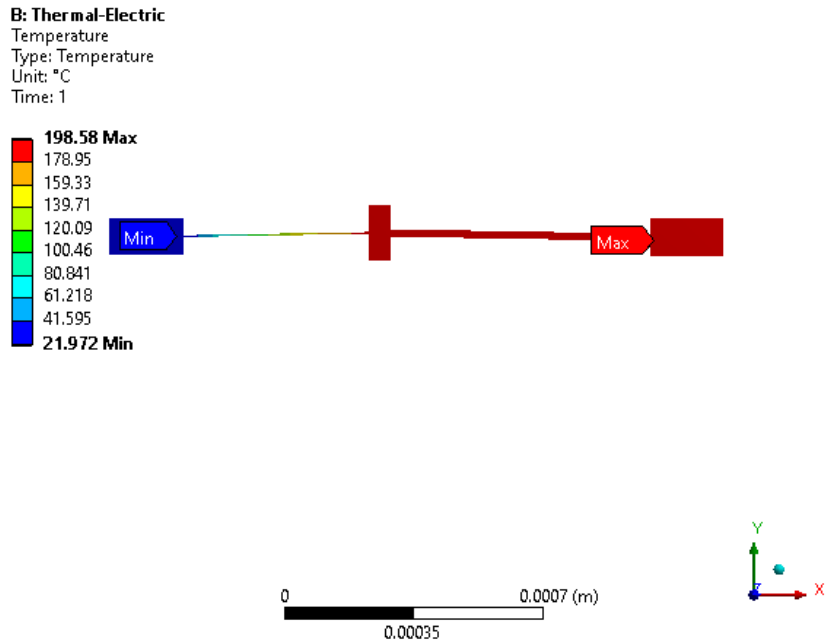


Figura 6.21 Distribución de temperatura del chevrón asimétrico con  $L_1=500 \mu\text{m}$  y  $L_2=700 \mu\text{m}$ ,  $w_1=5 \mu\text{m}$  y  $w_2=20 \mu\text{m}$ .

### 6.3.5 Parametrización del largo de brazo con $w_1=5 \mu\text{m}$ y $w_2=25 \mu\text{m}$

Para esta parametrización se seguirá los mismos pasos de las secciones 6.3.1 y 6.3.3, donde los anchos de brazo serán constantes,  $w_1=5 \mu\text{m}$  y  $w_2=25 \mu\text{m}$

Tabla 6.16 Resultados de la parametrización del largo de los brazos con  $w_1=5 \mu\text{m}$  y  $w_2=25 \mu\text{m}$

Largo de brazos [ $\mu\text{m}$ ]		Desplazamiento [ $\mu\text{m}$ ]	Fuerza Max [ $\mu\text{N}$ ]	Esfuerzo Máximo [MPa]
$L_1$	$L_2$			
300	900	8.3085	2238.2	276.45
350	850	8.6270	2242	229.89
400	800	8.5187	2242.8	206.35
450	750	8.0966	2243	225.25

500	700	7.460	2252.3	229.02
550	650	6.6636	2262.7	237

En la Tabla 6.16, se observa nuevamente el caso en donde al ir variado el largo de los brazos hay una variación de valores en desplazamiento, mientras que, tanto el esfuerzo y la fuerza no varían significativamente.

En las Tablas 6.17 y 6.18 se hacen las comparaciones de los valores numérico (Tabla 6.16) y valores analíticos (usando las Ecuaciones (4.7) y (4.35) del desplazamiento y la fuerza.

Tabla 6.17 Comparación de resultados analíticos y numéricos del desplazamiento con  $w_1=5\ \mu\text{m}$  y  $w_2=25\ \mu\text{m}$

Largo de brazos [ $\mu\text{m}$ ]		Desplazamiento Analítico [ $\mu\text{m}$ ]	Desplazamiento Numérico [ $\mu\text{m}$ ]	Porcentaje de error [%]
$L_1$	$L_2$			
300	900	6.7489	8.3085	18.77
350	850	6.4140	8.6270	25.65
400	800	5.8359	8.5187	31.49
450	750	5.1450	8.0966	36.45
500	700	4.4119	7.460	40.79
550	650	3.7053	6.6636	44.39
600	600	3.0321	5.7811	47.55

Tabla 6.18 Comparación de resultados analíticos y numéricos de la fuerza con  $w_1= 5 \mu\text{m}$  y  $w_2=25 \mu\text{m}$ .

Largo de brazos [ $\mu\text{m}$ ]		Fuerza Analítica [ $\mu\text{N}$ ]	Fuerza Numérica [ $\mu\text{N}$ ]	Porcentaje de error [%]
$L_1$	$L_2$			
300	900	2431.56	2238.2	8.63
350	850	2431.56	2242	8.45
400	800	2431.56	2242.8	8.41
450	750	2431.56	2243	8.40
500	700	2431.56	2252.3	7.95
550	650	2431.56	2262.7	7.46
600	600	2431.56	2280.3	6.63

El porcentaje de error más alto para el desplazamiento es de 47.55% mientras que para la fuerza es de 8.63%.

### 6.3.6 Características del del tercer chevrón asimétrico ( $w_2= 25 \mu\text{m}$ )

En la Tabla 6.19 se presentan los valores del tercer chevrón asimétrico con mejor respuesta de desempeño, con  $w_1= 5 \mu\text{m}$  y  $w_2=25 \mu\text{m}$ .

Tabla 6.19 Dimensiones del tercer chevrón asimétrico.

Parámetros	Valores
Ancho de Ancla, $W_a$ [ $\mu\text{m}$ ]	100
Largo de Ancla, $L_a$ [ $\mu\text{m}$ ]	200
Ancho de flecha, $W_f$ [ $\mu\text{m}$ ]	60
Largo de flecha, $L_F$ [ $\mu\text{m}$ ]	150
Largo de Brazo, $L_{b1}$ [ $\mu\text{m}$ ]	500

Largo de Brazo, $L_{b2}$ [ $\mu\text{m}$ ]	700
Ancho de Brazo, $w_1$ [ $\mu\text{m}$ ]	5
Ancho de Brazo, $w_2$ [ $\mu\text{m}$ ]	25
Ángulo de inclinación, $\theta_1, \theta_2$ [ $^\circ$ ]	1
Grosor, $t$ [ $\mu\text{m}$ ]	70
Voltaje, $V$ [volts]	2.8

En las Figuras 6.22 - 6.26 observamos el diseño, el desplazamiento, la fuerza, el esfuerzo y la distribución de temperatura del segundo chevrón en donde se obtuvo un desempeño adecuado.

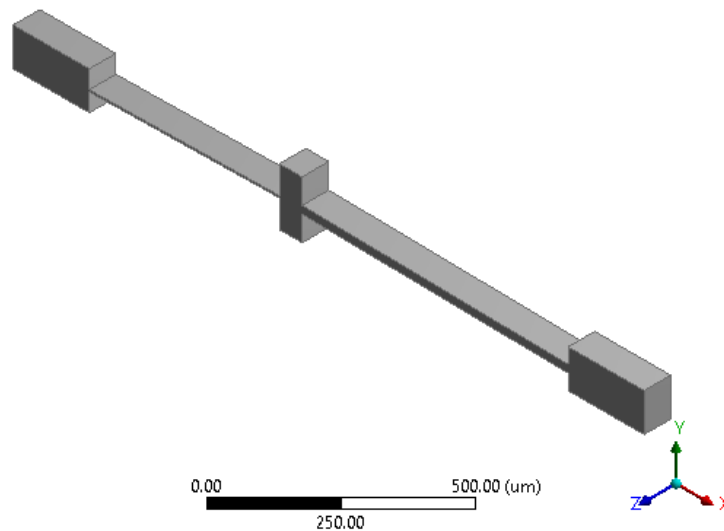


Figura 6.22 Diseño del chevrón asimétrico con  $w_1=5 \mu\text{m}$  y  $w_2=25 \mu\text{m}$ .



C: Static Structural  
Total Deformation  
Type: Total Deformation  
Unit: m  
Time: 1

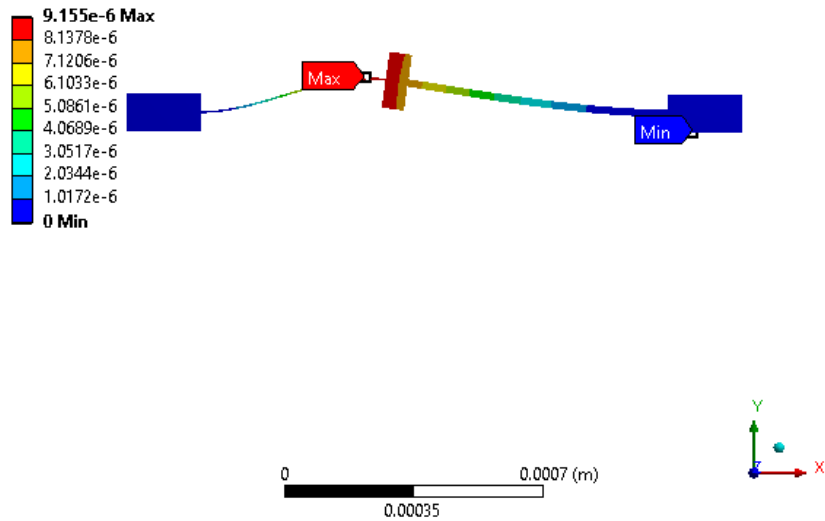


Figura 6.23 Desplazamiento del chevrón asimétrico con  $w_1=5 \mu\text{m}$  y  $w_2=25 \mu\text{m}$ .

D: Static Structural  
Force Reaction

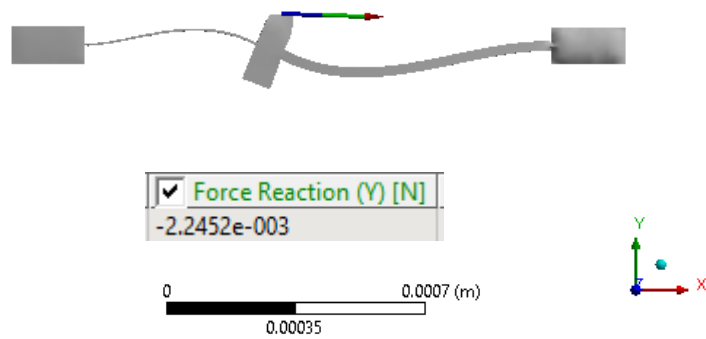


Figura 6.24 Fuerza del chevrón asimétrico con  $w_1=5 \mu\text{m}$  y  $w_2=25 \mu\text{m}$ .

**C: Static Structural**  
 Equivalent Stress  
 Type: Equivalent (von-Mises) Stress  
 Unit: Pa  
 Time: 1

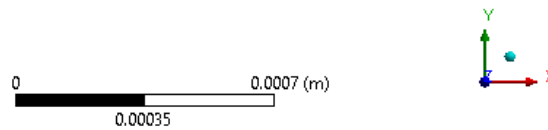
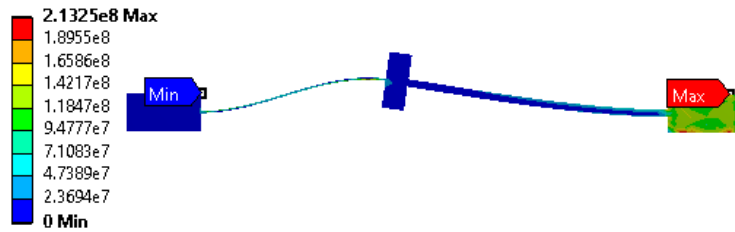


Figura 6.25 Esfuerzo del chevrón asimétrico con  $w_1=5 \mu\text{m}$  y  $w_2=25 \mu\text{m}$ .

**B: Thermal-Electric**  
 Temperature  
 Type: Temperature  
 Unit: °C  
 Time: 1

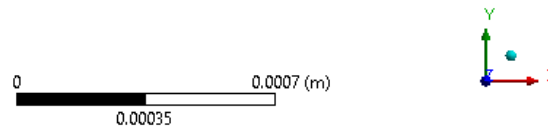
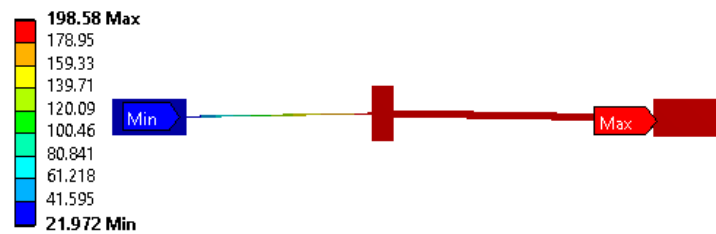


Figura 6.26 Distribución de temperatura del chevrón asimétrico con  $w_1=5 \mu\text{m}$  y  $w_2=25 \mu\text{m}$ .

## 6.4 Comparación de los tres chevrones

Se hará la comparación de los tres chevrones asimétricos, anteriormente seleccionados, con mejor desempeño de fuerza y desplazamiento.

Tabla 6.20 Comparación de los tres chevrones con mejor desempeño.

Ancho de brazos [ $\mu\text{m}$ ]		Largo de brazos [ $\mu\text{m}$ ]		Desplazamiento [ $\mu\text{m}$ ]	Fuerza [ $\mu\text{N}$ ]	Esfuerzo [MPa]
$w_1$	$w_2$	$L_1$	$L_2$			
5	15	500	700	10.550	1426.2	207.73
5	20	500	700	9.1638	1820.4	228.31
5	25	500	700	7.460	2252.3	229.02

Podemos observar en la Tabla 6.20, la comparación de los tres chevrones asimétricos que se seleccionaron debido a su desempeño en fuerza de salida, desplazamiento y esfuerzo. Se observa que, los valores del largo de los brazos son los mismos con  $L_1=500 \mu\text{m}$  y  $L_2=700 \mu\text{m}$  y un  $w_1=5 \mu\text{m}$ . Al ir aumentando el ancho  $w_2$  aumenta la fuerza de salida y disminuye el desplazamiento, pero debido a que se busca una buena respuesta de salida y mantener una compensación entre la fuerza y salida, se elige como propuesta de un nuevo diseño de actuador asimétrico las dimensiones mencionadas en la Tabla 6.21, con silicio aplicando un voltaje de 2.8 V se obtiene una fuerza de salida de 2252.3  $\mu\text{N}$ , un desplazamiento de 7.460  $\mu\text{m}$  y un esfuerzo de 229.02 MPa, que no supera el esfuerzo último del silicio.

Tabla 6.21 Dimensiones de la propuesta de un nuevo diseño actuador asimétrico.

Parámetros	Valores
Ancho de Ancla, $W_a$ [ $\mu\text{m}$ ]	100
Largo de Ancla, $L_a$ [ $\mu\text{m}$ ]	200
Ancho de flecha, $W_f$ [ $\mu\text{m}$ ]	60
Largo de flecha, $L_F$ [ $\mu\text{m}$ ]	150
Largo de Brazo, $L_{b1}$ [ $\mu\text{m}$ ]	500
Largo de Brazo, $L_{b2}$ [ $\mu\text{m}$ ]	700
Ancho de Brazo, $w_1$ [ $\mu\text{m}$ ]	5
Ancho de Brazo, $w_2$ [ $\mu\text{m}$ ]	25
Ángulo de inclinación, $\theta_1, \theta_2$ [ $^\circ$ ]	1
Grosor, $t$ [ $\mu\text{m}$ ]	70
Voltaje, $V$ [volts]	2.8

## 6.5 Comparación de desempeño de un actuador simétrico y asimétrico.

Tabla 6.22 Comparación de resultados del chevrón simétrico y asimétrico.

Ancho de brazos [ $\mu\text{m}$ ]		Largo de brazos [ $\mu\text{m}$ ]		Desplazamiento [ $\mu\text{m}$ ]	Fuerza [ $\mu\text{N}$ ]	Esfuerzo [MPa]
$w_1$	$w_2$	$L_1$	$L_2$			
5	5	600	600	6.774	1201	232.63
5	25	500	700	7.460	2252.3	229.02

En la Tabla 6.22 se hace la comparación del chevrón simétrico que fue seleccionado en el capítulo 5 con mejor desempeño y el chevrón asimétrico que fue seleccionado

con mejor desempeño. Hay un aumento del 87.53% de fuerza y 10.12% de desplazamiento por parte del chevrón asimétrico.



## **CAPÍTULO 7.- CONCLUSIONES.**

En este capítulo se presentan las conclusiones obtenidas, así como propuesta de trabajos futuros.

## **CAPÍTULO 7.- CONCLUSIONES**

---

### **7.1 Conclusión**

Al finalizar este trabajo, se puede afirmar que se cumplió con el objetivo planteado al principio de este trabajo, el cual fue la propuesta de un nuevo actuador asimétrico, para lograr el mayor valor de fuerza de salida, conservando el tamaño compacto del actuador simétrico, considerando solamente el caso de un solo par de brazos, y el desarrollo del modelo matemático para el desplazamiento y fuerza del chevrón asimétrico.

La geometría del actuador asimétrico novedoso genera un 87.53% de incremento de fuerza de salida y un aumento de 10.12% de desplazamiento (Tabla 6.21), comparado con el actuador chevrón simétrico. La asimetría en los actuadores fue propuesta para el mejoramiento del desempeño del dispositivo, considerando a la fuerza de salida.

Con base en el desarrollo del modelado matemático de fuerza y desplazamiento, del chevrón simétrico se realizó el modelo matemático para obtener las ecuaciones de fuerza y desplazamiento para el chevrón asimétrico, ecuaciones (4.7) y (4.35), con un margen de error menor al 23% para la fuerza y 47% para el desplazamiento, entre los resultados analíticos y numéricos correspondientes. En (Kaajakari, 2009), se muestran comparaciones en las que se muestran errores de hasta un 41%, cuando se consideran condiciones de frontera realistas. A partir de las cuales, pueden sugerirse adaptaciones en las geometrías, con la finalidad de disminuir los porcentajes de error.

La simulación FEM es muy útil en la simulación de sistemas físicos tridimensionales, para las cuales se desarrollan nuevas aproximaciones teóricas, tal es el caso de dispositivos como voladizos, vigas, muelles, bobinas y acelerómetros, entre otros.

## 7.2 Trabajo Futuro

Como se mencionó, en (Kaajakari, 2009), se muestran comparaciones en las que se muestran errores de hasta un 41%. A partir de las cuales, pueden sugerirse adaptaciones en las geometrías, con la finalidad de disminuir los porcentajes de error. Por lo que, se considera que la ecuación obtenida para el desplazamiento es un punto de partida para trabajos futuros, donde, el efecto de torque sea considerado, esto debido a que los brazos ya no son simétricos y no sufren la misma expansión térmica, ejerciendo diferentes fuerzas.

Como resultado de las simulaciones realizadas para el chevrón asimétrico se observó que hay un momento en la flecha del actuador (este momento se observa en las Figuras del Anexo A), lo cual afecta al resultado analítico del desplazamiento. Se observó también que, al realizar la comparación de resultados analíticos y numéricos, el porcentaje error aumentaba mientras uno del ancho de los brazos del chevrón iba aumentando, y que, si el ancho del brazo disminuía el porcentaje de error disminuía consecuentemente.



## BIBLIOGRAFÍA

---

- Andò, B., Baglio, S., Savalli, N., & Trigona, C. (2011). Cascaded "Triple-Bent-Beam" MEMS Sensor for Contactless Temperature Measurements in Nonaccessible Environments. *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*, 60(4), 1348-1357. doi:10.1109/TIM.2010.2101310
- Anónimo. (s.f.). Tecnología MEMS. 3-12. Obtenido de <https://xdoc.mx/preview/e-tecnologia-mems-603099afa33fd>
- Báez Álvarez, C. R. (2011). Caracterización de microactuadores tipo chevrón fabricados con la tecnología PolyMEMS-INAOE. (Tesis de Mestría). Instituto Nacional de Astrofísica, Óptica y Electrónica, Puebla.
- Bustillo, J., Howe, R., & Muller, R. (1998). Surface Micromachining for Microelectromechanical Systems. *IEEE*, 86(8), 1552-1574. doi: 10.1109/5.704260
- Cabrera, B. D. (2016). *Análisis de estructuras: Método de la rigidez*. Colombia: Independiente.
- Callister, W. (2017). *Introducción a la ciencia e ingeniería de los materiales*. Barcelona, España: Reverté, S.A.
- Çengel, Y., & Ghajar, A. (2011). *Trasferencia de calor y masa* (Cuarta ed.). The McGraw-Hill Companies, Inc.
- Chiorean, R., Dudescu, M., Pustan, M., & Hardau, M. (2014). Analytical and numerical study on the maximum force developed by a V-beam thermal actuator. *ELSEVIER*, 359-363. doi:doi: 10.1016/j.protcy.2013.12.499
- Cohen, Y., & Ya'akovovitz, A. (2018). Comparative Study on Modeling Approaches of V-Shaped MEMS Temperature Sensors. *IEEE*, 1-10. doi:10.1109/TIM.2018.2879144
- Enikov, E., Kedar, S., & Lazarov, K. (2005). Analytical Model for Analysis and Design of V-Shaped Thermal Microactuators. *Journal of Microelectromechanical Systems*, 14(4), 788-798. doi:10.1109/JMEMS.2005.845449
- Fujita, H. (1998). Microactuators and Micromachines. *Proceeding of the IEEE*, 86(8).
- Ghatkesar, M., Barwich, V., Braun, T., Ramseyer, J.-P., Gerber, C., Hegner, M., . . . Despont, M. (2007). Higher modes of vibration increase mass sensitivity in nanomechanical microcantilevers. *Nanotechnology*, 1-8.
- Hasan Ziko, M., & Koel, A. (2018). Theoretical and Numerical Investigations on a Silicon-based MEMS Chevron type thermal actuator. *IEEE*. doi:DOI: 10.1109/NANO.2018.8626366

- Hickey, R., Kujath, M., & Hubbard, T. (s.f.). Heat transfer analysis and optimization of two-beam microelectromechanical thermal actuators. *Journal of Vacuum Science & Technology A*, 971-974. doi: <https://doi.org/10.1116/1.1468654>
- Holman, J. (2009). *Heat Transfer* (10 ed.). New York: McGraw-Hill.
- Kaajakari, V. (2009). *Practical MEMS*. Las Vegas, NV, USA, ISBN 978-0-9822991-0-4.: Small Gear Publishing.
- Kumar M., M., Dubey, V., Mishra, P. M., & Khan, I. (2019). MEMS Technology: A Review. *Journal of Engineering Research and Reports*, 1-24. doi:10.9734/JERR/2019/v4i116891
- Lai, Y., McDonald, J., Kujath, M., & Hubbard, T. (2004). Force, deflection and power measurements of toggled microthermal actuators. *Journal Of Micromechanics and Microengineering*, 49-56. doi:10.1088/0960-1317/14/1/307
- Leskow, E. (16 de Julio de 2021). *Transferencia de Calor*. Obtenido de Concepto: <https://concepto.de/transferencia-de-calor/>
- Li, M., Zhou , Z., Yi, L., Wang, X., & Adnan, S. (2019). Design of a test structure based on chevron-shaped thermal actuator for in-situ measurement of the fracture strength of MEMS thin films. *Nanotechnology and Precision Engineering*, 163-168. doi:doi.org/10.1016/j.npe.2019.10.004
- Maluf, N., & Williams, K. (2002). *An Introduction to MEMS (Micro-Electromechanical Systems)*. PRIME Faraday Partnership.
- Márquez, D., & Cárdenas, O. (2006). Estado del arte de los sistemas microelectromecánicos. *Ciencia e Ingeniería*, 27(3).
- Mishra, M., Dubey, V., Mishra, P., & Khan, I. (2019). MEMS Technology: A Review. *Journal of Engineering Research and Reports*(JERR.46001), 1-24. doi:10.9734/JERR/2019/v4i116891
- Mounika Reddy, V., & Sunil Kumar, G. (2013). Design And Analysis of Microcantilevers With Various Shapes Using COMSOL Multiphysics Software. *International Journal of Emerging Technology and Advanced Engineering*, 3, 2250-2459.
- Nave, O. (s.f.). *Dilatación Térmica*. Recuperado el 20 de Enero de 2022, de hyperphysics: hyperphysics
- Nguyen, D., Hoang, K., & Pham, P. (2020). Larger displacement of silicon electrothermal V-shaped actuator using surface sputtering process. *Microsystem Technologies*, 1-7. doi:10.1007/s00542-020-04985-5
- Phan, H., Nguyen, M., Nguyen, N., & Chu, D. (2015). Analytical modeling of a silicon-polymer electrothermal microactuator. *Microsystem Technologies*. doi:DOI 10.1007/s00542-015-2700-7
- Potekhina, A., & Wang, C. (21 de Septiembre de 2019). Review of Electrothermal Actuators and Applications. doi:10.3390/act8040069

- Quiñones N., F. J. (2009). Desarrollo y caracterización de microestructuras Joule con poly-silicio. (*Tesis de Maestría*). Instituto Nacional de Astrofísica, Óptica y Electrónica, Puebla.
- Rivera, N. (25 de Mayo de 2015). *¿Qué es el efecto Joule y por qué se ha convertido en algo trascendental para nuestras vidas?* Obtenido de hipertextual: <https://hipertextual.com/2015/05/efecto-joule>
- Sciberras, T., Demicoli, M., Grech, I., Mallia, B., Mollicone, P., & Sammut, N. (2021). Coupled Finite Element-Finite Volume Multi-Physics Analysis of MEMS Electrothermal Actuators. *Micromachines*, 1-22. doi:<https://doi.org/10.3390/mi13010008>
- Shivhare, P., Uma, G., & Mangalanathan, U. (2015). Design enhancement of a chevron electrothermally actuated microgripper for improved gripping performance. *Microsyst Technol.* doi:DOI 10.1007/s00542-015-2561-0
- Software, N. N.-P. (2022). ANSYS. Obtenido de NSY: <https://www.nysplm.com/ansys/>
- Suen, M., Hsieh, J. C., Liu, K. C., & W. Lin, D. (2011). Optimal Design of the Electrothermal V-Beam Microactuator Based on GA for Stress Concentration Analysis. *International Multiconference of Engineers and Computer Scientists*.
- Tecpoyotl T., M., Rodríguez F., S. F., Koshevaya, S., & Vargas, C. P. (2020). Análisis paramétrico de los elementos del actuador chevrón. (ECORFAN-Mexico, Ed.) *Handbook T-V CIERMMI Mujeres en la Ciencia Ingeniería*, 117-140. doi:10.35429/H.2020.5.117.140
- Tecpoyotl Torres, M., Vargas Chable, P., Cabello Ruíz, R., & Flores González, M. (2019). Actuadores chevron MEM con reguladores de movimiento. *Programación Matemática y Software*, 58-65.
- Tecpoyotl, M., Vargas, P., & Cabello, R. (2015). Dynamic Analysis of a Microgripper and Its Components. *British Journal of Applied Science & Technology*, 360-372.
- Tecpoyotl-Torres, M., Cabello-Ruiz, R., & Vera-Dimas, J. G. (2015). Design and simulation of an optimized electrothermal microactuator with Z-shaped beams. *Acta Universitaria*, 25(3). doi:10.15174/au.2015.774
- Thangavel, A., Rengaswamy, R., Sukumar, P., & Sekar, R. (2018). Modelling of Chevron electrothermal actuator and its performance analysis. *Microsystem Technologies*. doi:<https://doi.org/10.1007/s00542-018-3791-8>
- Unamuno, A., Blue, R., & Uttamchandani, D. (2013). Modeling and Characterization of a Vernier Latching MEMS Variable Optical Attenuator. *Journal of Microelectromechanical Systems* . doi: 10.1109/JMEMS.2013.2262593
- Vargas Chable, P., Tecpoyotl Torres, M., & Cabello Ruíz, R. (2015). Structural optimization of an electrothermal chevron V-shape microactuator device. *ICMEAE*, 262-267.

- Varona, J., Tecpoyotl, M., & Hamoui, A. A. (2009). Design of MEMS vertical–horizontal chevron thermal actuators. *Sensors and Actuators A: Physical*, 127-130. doi:10.1016/j.sna.2009.04.027
- W. Fitzgerald, R. (1996). *Mecánica de Materiales*. México: Alfaomega.
- Wittwer, J., Baker, M., & Howell, L. (2006). Simulation, measurement, and asymmetric buckling of thermal microactuators. *Sensors and Actuators*, 128, 395-401. doi:10.1016/j.sna.2006.02.014
- Zhang, D., Cai, A., Zhao, Y., & Hu, T. (2021). Macro Modeling of V-Shaped Electro-Thermal MEMS Actuator with Human Error Factor. *Micromachines*(12). doi: <https://doi.org/10.3390/mi12060622>
- Zhao , L.-F., Zhou, Z.-F., Meng , M.-Z., Li, M.-J., & Huang, Q.-A. (2021). An efficient electro-thermo-mechanical model for the analysis of V-shaped thermal actuator connected with driven structures. *International Journal of Numerical Modelling-electronic Networks Devices and Fields*, 1-14. doi:<https://doi.org/10.1002/jnm.2843>
- Zhu, Y., Corigliano, A., & Espinosa, H. (5 de January de 2006). A thermal actuator for nanoscale in situ microscopy testing: design and characterization. *JOURNAL OF MICROMECHANICS AND MICROENGINEERING*, 242-253. doi:doi:10.1088/0960-1317/16/2/008



## **ANEXO A**

Se presentan las figuras obtenidas de la parametrización del desplazamiento del actuador asimétrico, donde se aprecia el torque ejercido en la flecha.

# ANEXO A

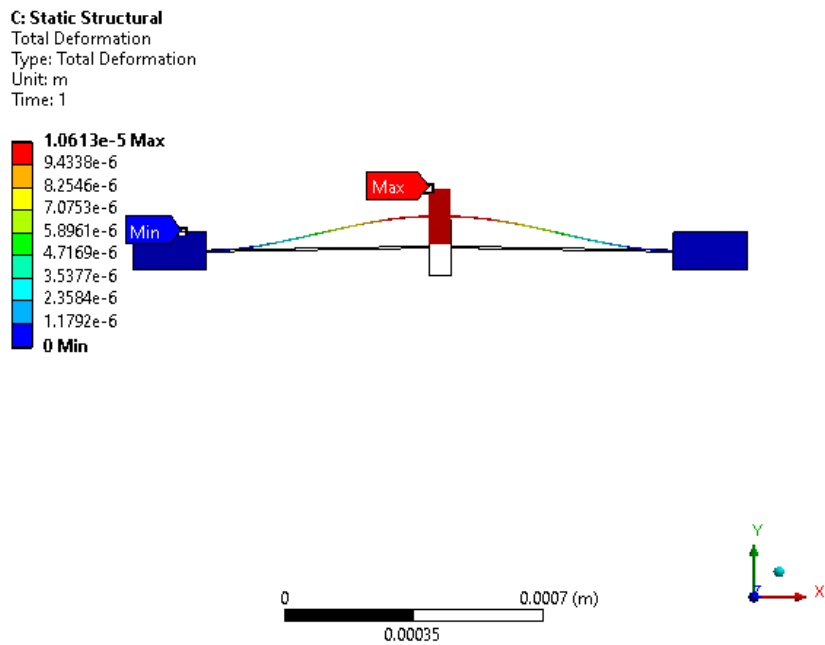


Figura A 1. Desplazamiento del chevrón simétrico con  $L_1=600 \mu\text{m}$  y  $L_2=600 \mu\text{m}$ ,  $w_1=5 \mu\text{m}$  y  $w_2=5 \mu\text{m}$ .

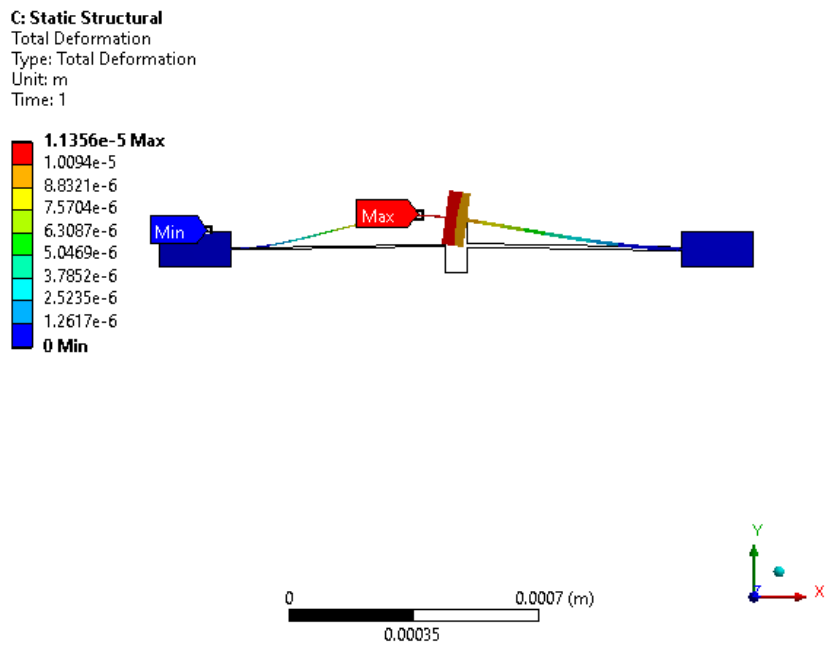


Figura A 2. Desplazamiento del chevrón asimétrico con  $L_1=600 \mu\text{m}$  y  $L_2=600 \mu\text{m}$ ,  $w_1=5 \mu\text{m}$  y  $w_2=15 \mu\text{m}$ .

C: Static Structural  
Total Deformation  
Type: Total Deformation  
Unit: m  
Time: 1

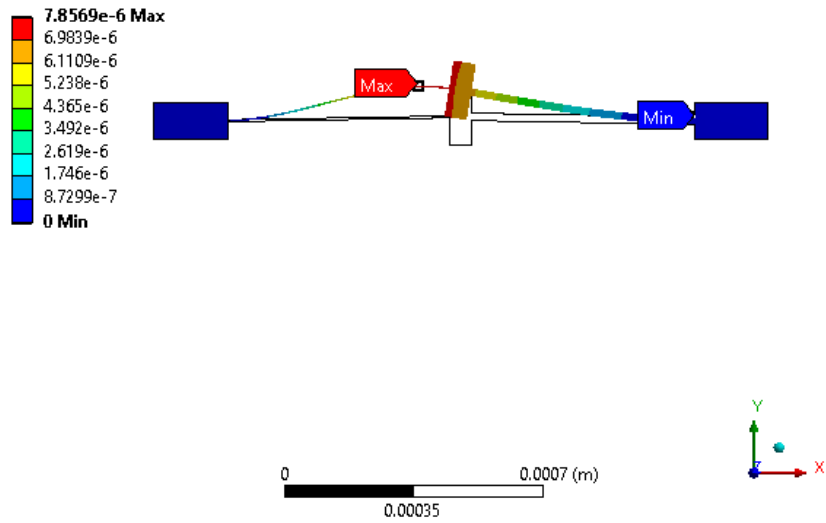


Figura A 3. Desplazamiento del chevrón asimétrico con  $L_1=600 \mu\text{m}$  y  $L_2=600 \mu\text{m}$ ,  $w_1=5 \mu\text{m}$  y  $w_2=20 \mu\text{m}$ .

C: Static Structural  
Total Deformation  
Type: Total Deformation  
Unit: m  
Time: 1

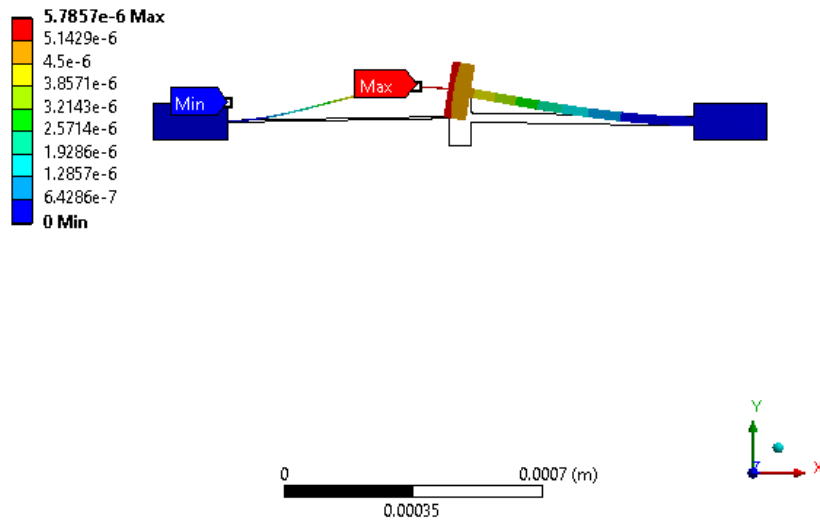


Figura A 4. Desplazamiento del chevrón asimétrico con  $L_1=600 \mu\text{m}$  y  $L_2=600 \mu\text{m}$ ,  $w_1=5 \mu\text{m}$  y  $w_2=25 \mu\text{m}$

C: Static Structural  
Total Deformation  
Type: Total Deformation  
Unit: m  
Time: 1

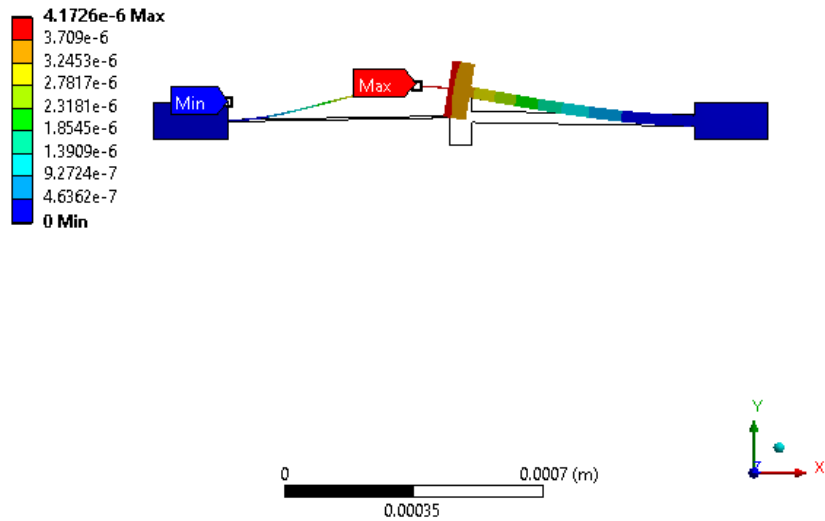


Figura A 5. Desplazamiento del chevrón asimétrico con  $L_1=60 \mu\text{m}$  y  $L_2=600 \mu\text{m}$ ,  $w_1=5 \mu\text{m}$  y  $w_2=30 \mu\text{m}$

C: Static Structural  
Total Deformation  
Type: Total Deformation  
Unit: m  
Time: 1

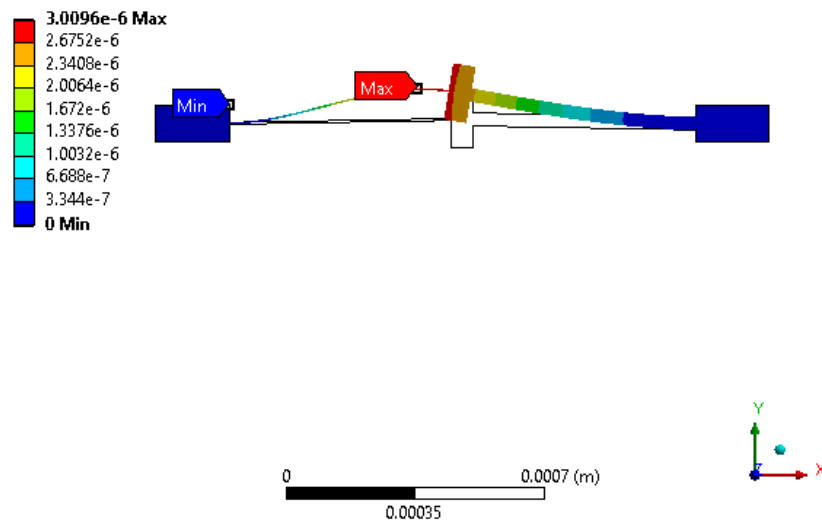


Figura A 6. Desplazamiento del chevrón asimétrico con  $L_1=600 \mu\text{m}$  y  $L_2=600 \mu\text{m}$ ,  $w_1=5 \mu\text{m}$  y  $w_2=35 \mu\text{m}$



C: Static Structural  
Total Deformation  
Type: Total Deformation  
Unit: m  
Time: 1

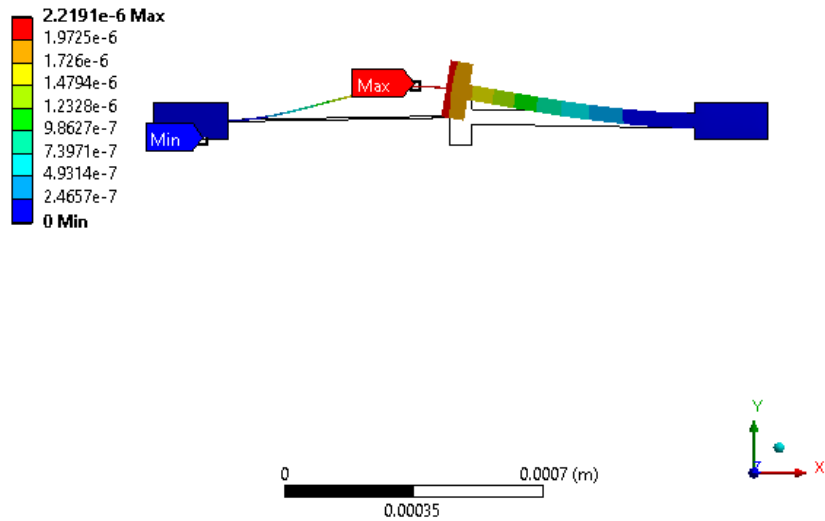


Figura A 7. Desplazamiento del chevrón asimétrico con  $L_1=600 \mu\text{m}$  y  $L_2=600 \mu\text{m}$ ,  $w_1=5 \mu\text{m}$  y  $w_2=40 \mu\text{m}$

C: Static Structural  
Total Deformation  
Type: Total Deformation  
Unit: m  
Time: 1

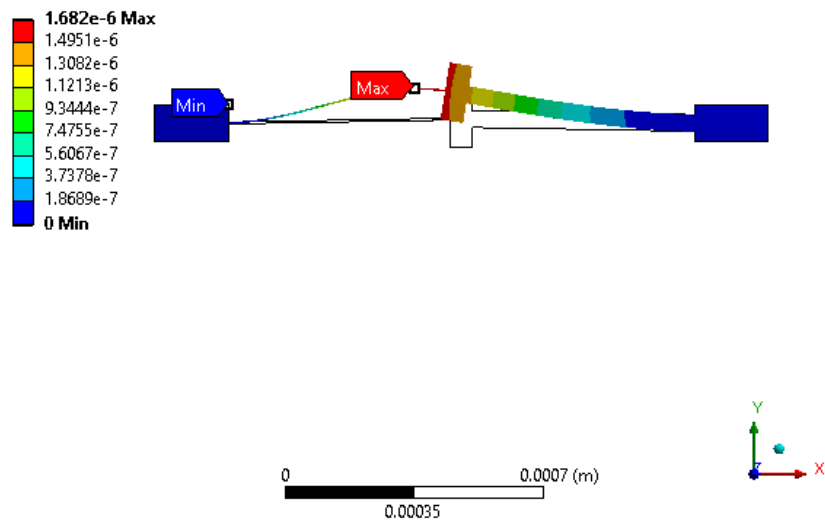


Figura A 8. Desplazamiento del chevrón asimétrico con  $L_1=600 \mu\text{m}$  y  $L_2=600 \mu\text{m}$ ,  $w_1=5 \mu\text{m}$  y  $w_2=45 \mu\text{m}$



UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DEL  
ESTADO DE MORELOS



## INSTITUTO DE INVESTIGACIÓN EN CIENCIAS BÁSICAS Y APLICADAS

Control Escolar de Licenciatura



### VOTOS DE APROBATORIOS

Secretaria ejecutiva del Instituto de Investigación en Ciencias Básicas Aplicadas de la Universidad Autónoma del Estado de Morelos.  
P r e s e n t e .

Por medio de la presente le informamos que después de revisar la versión escrita de la tesis que realizó la C. **JOSAHANDY SARABIA VERGARA** con número de matrícula **20164004582** cuyo título es:

**“Diseño de un actuador V asimétrico”.**

Consideramos que **SI** reúne los méritos que son necesarios para continuar los trámites para obtener el título de **Licenciado en Tecnología con Área Terminal en Física Aplicada**.

Cuernavaca, Mor a 06 de abril de 2022

Atentamente  
Por una universidad culta

Se adiciona página con la e-firma UAEM de los siguientes:

**MTRO. JORGE ARTURO SANDOVAL ESPINO**  
**DR. JOSÉ ANTONIO MARBÁN SALGADO**  
**DRA. MARGARITA TECPOYOTL TORRES**  
**DR. PEDRO VARGAS CHABLÉ**  
**DR. RAMÓN CABELLO RUIZ**

**PRESIDENTE**  
**SECRETARIO**  
**VOCAL**  
**PRIMER SUPLENTE**  
**SEGUNDO SUPLENTE**



UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DEL  
ESTADO DE MORELOS

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

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

### Sello electrónico

**PEDRO VARGAS CHABLE | Fecha:2022-04-07 11:57:42 | Firmante**

cen84pwAJZ7CqxJNcuOd8r17HXyNC0XydpI8IVGEPtM+wg8pkCfUvPQi9CUYBtPKuguRuX5Ph+JQ8Kk5Mu9G/lI2cmvqj3+y/3gb/5SFFOvKIkJpoZUzD1bB/9ovReny+ZcnOk2H  
O2Or6LlId4PqX5UmNHjvbtExt2qbNvtaFKuQYxOYrwbBvg/tHkUJTV5SZUQ2I94JT9DE6I6pZP4J7a1HEOCaI49M09zTsEKsX0W1H+JZ9aBecNfhAdi4A5bPHjj/96quUQk0tDh+jd  
YyFc0VIALGafzcQ4Ssqml/ysu89Qcg+9pDd4hetaO7X3BXuJCJD96SgizcYBOYQ6D6w==

**RAMON CABELLO RUIZ | Fecha:2022-04-08 18:10:00 | Firmante**

JXc4k01IT6L4usUfpt8s8sQU4wf/eccU9UqDiB1kXzVCVTMn1SDZl54GdZ5PC8GuKNISJxHnkzP0EKDI5MIPqQW28I81aUG/JqAYC/dukqvbDuAl4jW9Oodq9g+pjCqhgas14Z5jjO8q  
yq+jY6tiDK/iP2PNlv8kGx9YNCFnXz3LrszapqMR4+a8Kna74KbuSpgXMC0euy1dl/pnkqcc00tbKbd82jfkX7F3YqQhvMk9qDfY5PrhydlGDasjTs6zpWblJ6is1d7tJWX9Ua1TVCo8  
J4FsfzbZs+61ZsIFzAx83ekHp580C6rSTbm7VLn+3gzdG95Y8m3xE1yCvH5XVQ==

**JORGE ARTURO SANDOVAL ESPINO | Fecha:2022-04-14 13:10:09 | Firmante**

F18e8eOFF7qdu1n0vBV19kHyA/n9nktD2NgwU4fhMP2f9F3z5Q8NWtX1y/m7/I8wtEy8Nwq+sS7AI31cXFKlmcSSd101glCmD4ukHPlulvAxbPluiT9xD2vANZLHf27JQKPUXZE6ac/  
8GiaUg3rdlNNRYMNP7VmcZxSjNqcmolfZZNh1c8I4aj2mpZUO+SmrQqyGrp5aecsczIFG2lv5ycLcEniKHLpMhAo6SnixQU9TxeI+DrPHXD3tMTsciCLVm0kqTxKWWGfb46ojj  
vzfYgji68Kf6jlyIROpUD8pbysnpBLrtsy0+ZR9E7KBIYZVIK1/3TrY7De/Y21W7Aw==

**MARGARITA TECPOYOTL TORRES | Fecha:2022-04-19 15:45:48 | Firmante**

dCdWcu6A0EN9DLq4/3asbNYVycbPs4i5FXQlar5lcoBRANpqlKQrljbXjT+APOd0knArFNer/K3rF3I6GrEg4/pGkyQGCGkTw+zpmswjME3sCvFIOZ1yS9VILv7IUggqndB7qvjG2  
2Rl9mqL/q1iSWgshDHApl5jpi/HfhN5OWiCrRO/9e+ZXA6hoFhLSTNFw5mcrNK6Ap+eco6LZOI6yVeOdortMeYExzmfAjrra3EzA+PioCpOXzkumoiNZPBSDNacXO7ED1c5GV/Mbf  
BOE2UzuK42vrTDVJTl4NCXSSOcmTMk096A33RyPKAsTIE3FGEXM9m2fLLHdlu6w==

**JOSE ANTONIO MARBAN SALGADO | Fecha:2022-04-23 14:02:13 | Firmante**

QCZFR0XK44+FAiSu3/+k8hr9zz3ubg5dvptcSFxXgWsfOXdfVeB7UzASrevOITj6Rxt7X1WdvVehHVVEfx62Qd9flu18wmzJFCtkxHYIKJUKqt+7mgHcx/wdrBqf8y8jeCu5/RR/3ZWE  
sS2oV6NMai7SloPyNWH5HdkJZz0I9R4YSBAaZzHhVTT/70wbHH3Gn6I2rE9WmFKW4kUg0EieNSSjM4jou+3Y34eL1QgXO+99w5B3v9gVpQL5TU/2r6bUfVdjcd6rJkNXP4b6N  
BQCuB8D8+Q8p6RHBMVwHbDbc07iFJCh6O3gVsMVULg9r0oTn1v+PcXWHNbbVT5COGEw==

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



fsa5ujGNn

<https://efirma.uaem.mx/noRepudio/SnEJFWcKhjrSdfWAf0FD6x8BCOIR3L7N>

