

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DEL ESTADO DE MORELOS

INSTITUTO DE INVESTIGACIÓN EN CIENCIAS BÁSICAS Y APLICADAS

CENTRO DE INVESTIGACIÓN EN INGENIERÍA Y CIENCIAS APLICADAS

"DISEÑO E IMPLEMENTACIÓN DE UNA MICROPINZA  
MEM CON MECANISMOS FLEXIBLES"

TESIS PROFESIONAL PARA OBTENER EL GRADO DE:  
DOCTORADO EN INGENIERÍA Y CIENCIAS  
APLICADAS

PRESENTA: MICA.  
JOSUÉ OSVALDO SANDOVAL REYES

DIRECTOR: DRA. MARGARITA TECPOYOTL TORRES

CO-DIRECTOR: DR. JOSÉ MIRELES JR. GARCÍA

CUERNAVACA, MORELOS

NOVIEMBRE DE 2023

# Resumen

El trabajo realizado en esta tesis se centra en el diseño de una micropinza electrotérmica normalmente cerrada, con una apertura inicial de 25  $\mu\text{m}$ , impulsada por un actuador chevrón, utilizando como brazos de la micropinza a arreglos de pantógrafos modificados, que incluyen, cada uno, 6 bisagras en su estructura, lo que aumenta su flexibilidad, contribuyendo a la amplificación de desplazamiento. Se incluyen además 4 arcos flexibles entre los brazos, que sirven también para favorecer la transmisión de desplazamiento, reduciendo pérdidas. Se utiliza un ancla en la parte central de los brazos para minimizar el movimiento residual de los brazos en el eje Z. Se consideró su fabricación, sobre oblea de Silicio sobre Aislante (SOI, por sus siglas en inglés).

Se emplea una fuente de alimentación de 1 V, que genera una temperatura máxima de 92  $^{\circ}\text{C}$  en el ancla del actuador chevrón, y una temperatura en las puntas de la micropinza de 75  $^{\circ}\text{C}$ , lo que permite manipular microalambres, microestructuras elaboradas en silicio, entre otros semiconductores, así como metales, cuyo punto de fusión sea mayor. El desplazamiento total entre las mandíbulas aplicando el voltaje máximo de 1 V, es de 11.2  $\mu\text{m}$ , con una fuerza de 439  $\mu\text{N}$ , lo que permite manipular objetos desde 25  $\mu\text{m}$  hasta 36.2  $\mu\text{m}$  de diámetro, con un peso no mayor a 44.7 mg. Cabe señalar que, el esfuerzo mayor obtenido es de 465 MPa, el cual es menor al esfuerzo último silicio (7GPa).

En el proceso de diseño, con el propósito de optimizar al microactuador chevrón utilizado, se realizaron parametrizaciones considerando a algunos de sus elementos principales: grosor de la estructura, ángulo de inclinación, ancho y largo de brazo. Para realizar las parametrizaciones, se utilizó la herramienta de software ANSYS<sup>TM</sup> Workbench. Los resultados de las simulaciones fueron comparados con los resultados analíticos. Cabe señalar que, el actuador chevrón ha sido

ampliamente analizado, por lo que cuenta con modelos matemáticos ampliamente establecidos.

Cabe señalar que, el tamaño de la pinza es compacto ( $1065\ \mu\text{m} \times 780\ \mu\text{m} \times 70\ \mu\text{m}$ ) y relativamente menor, con relación a las micropinzas de silicio con las que fue comparada, como puede observarse en el capítulo 4. Donde, puede apreciarse que se supera a las dos con las que fue comparada en desplazamiento.

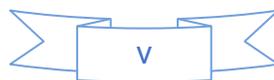
Adicionalmente, como una aplicación del modelo mejorado propuesto en este trabajo, se realizó el arreglo de dos micropinzas encontradas frontalmente, con la adecuación de puntas correspondientes, lo que ha hecho que sea posible sujetar objetos con diámetros entre  $50\ \mu\text{m}$  y  $62.54\ \mu\text{m}$ , con pesos máximos de  $71.5\ \text{mg}$ . Debe señalarse que, se ha reducido notablemente (30%) el esfuerzo, comparando con el caso de la micropinza individual, siendo ahora de  $358\ \text{MPa}$ .

Con relación a la microfabricación, se realizaron las máscaras correspondientes en el proceso SOI, y se realizaron las adecuaciones necesarias al proceso, ya que, debido a las restricciones y consecuencias de la pandemia por COVID-19, se dañaron equipo prioritarios de la Universidad Autónoma del Ciudad Juárez, UACJ, por lo que, el proceso se realizó en Centro de Ingeniería y Desarrollo Industrial, CIDESI, donde en general, se fabrican circuitos integrados, y ahora Sistemas Micro Electro Mecánicos, MEMS, con profundidades de grabado menores a las requeridas, lográndose ahora grabar hasta  $250\ \mu\text{m}$  de profundidad. Cabe señalar que el proceso de fabricación ha sido concluido. La liberación y pruebas no fue parte del alcance de este trabajo. En el anexo A se observa a la pinza escalada e implementada en aluminio, donde pudo validarse su desempeño.

Sobre la geometría de los brazos de la micropinza, se debe recalcar que se mejoró notablemente la respuesta y el modelado de un diseño básico previamente mostrado en polisilicio (Colin, 2020). Una mejora realizada para disminuir el esfuerzo en la base del pantógrafo, y la validación en escala

meso, con Aluminio como material estructural, se llevó a cabo en (Medina-Cruz, 2022)

A lo largo de este trabajo, se realizaron varias versiones para aplicaciones específicas, una de las cuales se vio reflejada en la solicitud de patente (Tecpoyotl Torres et al., 2021), la cual fue escalada y validada experimentalmente utilizando impresión 3D, con ácido poliláctico, PLA.



# Abstract

This thesis focuses on the design of a normally closed electrothermal microgripper, with an initial opening of 25  $\mu\text{m}$ , driven by a chevron actuator, using modified pantograph arrangements as arms, with 6 hinges in their structure, which increases the flexibility, contributing to the amplification of the linear displacement. 4 flexible arches are also included between the arms, which also serve to favor displacement transmission, and reducing losses. An anchor is used in the central part of the arms to minimize their residual movement in the Z-axis. Its fabrication was considered, using a Silicon on Insulator (SOI) wafer.

A 1 V power supply is used, which generates a maximum temperature of 92  $^{\circ}\text{C}$  at the anchor of the chevron actuator, and a temperature at the tips of the microgripper of 75  $^{\circ}\text{C}$ , which allows the manipulation of microwires, microstructures made of silicon, among other semiconductors, as well as metals, whose melting point is higher. The total displacement between the jaws applying the maximum voltage of 1 V is 11.2  $\mu\text{m}$ , with a force of 439  $\mu\text{N}$ , which allows clamping objects from 25  $\mu\text{m}$  to 36.2  $\mu\text{m}$  in diameter, weighing no more than 44.7 mg. It should be noted that the largest stress obtained is 465 MPa, which is lower than the ultimate silicon stress (7GPa).

In the design process, with the purpose of optimizing the chevron microactuator used, parameterizations were made considering some of its main elements: thickness of the structure, angle of inclination, width, and length of the arm. To perform the parameterizations, the ANSYSTM Workbench<sup>TM</sup> software tool was used. The results of the simulations were compared with the analytical results. It should be noted that the chevron actuator has been extensively analyzed, so its mathematical models are well-known.

It should be noted that the size of the microgripper is compact ( $1065\ \mu\text{m} \times 780\ \mu\text{m} \times 70\ \mu\text{m}$ ) and relatively smaller, in relation to the silicon microgrippers with which it was compared. In addition, it has shown a larger displacement.

Additionally, as an application of the improved model proposed in this work, the arrangement of two frontally arranged microgrippers was carried out, with the adaptation of the corresponding tips, which has made it possible to hold objects with diameters between  $50\ \mu\text{m}$  and  $62.54\ \mu\text{m}$ , with maximum weights of  $71.5\ \text{mg}$ . It should be noted that the stress has been significantly reduced (30%), compared to the case of the individual microgripper, now being  $358\ \text{MPa}$ .

In relation to microfabrication, the corresponding photolithographic masks were made considering the SOI process. The necessary adjustments to the process were made, since, due to the restrictions and consequences of the COVID-19 pandemic, priority equipment of the Universidad Autónoma de Ciudad Juárez, UACJ, was damaged therefore, the process was carried out at the Centro de Ingeniería y Desarrollo Industrial, CIDESI, where integrated circuits are generally fabricated, and now Micro Electromechanical Systems, MEMS, with engraving depths less than those required. Now, after several tests, at this Center it is possible to engrave until  $250\ \mu\text{m}$ . It should be noted that the fabrication process has been recently completed. Release and testing were not part of the scope of this work. Annex A shows the microgripper scaled and implemented in aluminum, where its performance could be validated.

Regarding the arms of the microgripper, it should be emphasized that the response of a microgripper with a basic design previously designed in polysilicon (Colin, 2020) was significantly improved and modeled. An improvement made to decrease the stress at the base of the pantograph geometry, and the validation of its meso-scale scaling, with Aluminum as structural material, was carried out in (Medina Cruz, 2022).

Throughout this work, several versions of the microgripper were made for specific applications. A patent application (Tecpoyotl et al, 2021), was registered for one of them. The corresponding microgripper was scaled and experimentally validated using 3D printing, with polylactic acid, PLA.

# Agradecimientos

A través de estas líneas quiero agradecer:

Al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (CONACyT), por el apoyo que nos brindó por el Proyecto de Ciencia Básica, Número de referencia "A1-S-33433". "Proyecto Apoyado por el Fondo Sectorial de Investigación para la Educación".

Al Centro de Investigación en Ingeniería y Ciencias Aplicadas (CIICAp) de la Universidad Autónoma del Estado de Morelos (UAEM) y al Centro de Investigación y Desarrollo Industrial (CIDESI), por ser instituciones que con su apoyo y patrocinio hicieron posible este trabajo de investigación.

A mis tutores:

A la Dra. Margarita Tecpoyotl Torres, por su conocimiento, orientación y amplio soporte durante el desarrollo de esta tesis.

Al Dr. José Mireles Jr. García por su conocimiento y apoyo en análisis eléctrico y los principios de fabricación.

Al Dr. José Alfredo Rodríguez Ramírez por su conocimiento y apoyo en el análisis mecánico del dispositivo.

Al Dr. Jesús Javier Alcantar Peña por su conocimiento y orientación en el proceso de micromaquinado en el Laboratorio de Microtecnologías del CIDESI.

Al Mtro. Juan Ponce Hernández por su apoyo en el manejo de los procesos de microfabricación del dispositivo en el laboratorio del CIDESI.

Gracias a ustedes por todo su apoyo, gracias y mi eterna admiración.

A mis compañeros y amigos del “Laboratorio de Diseño de Dispositivo y Sistemas Electrónicos” que me brindaron su apoyo, al Dr. Pedro Vargas Chablé, al Mtro. Carlos Andrés Ferrara Bello, a la Ing. Sahiril Fernanda Rodríguez Fuentes y al Ing. Juan Gerardo Flores Castro.



## Dedicatoria

*A mi Dios y familia, gracias por su apoyo.*

# Índice General

Resumen .....	iii
Abstract .....	vi
Agradecimientos.....	ix
Dedicatoria .....	xi
Índice General .....	xii
Índice de Tablas .....	xvii
Índice de Figuras.....	xix
<b>Capítulo 1. Introducción .....</b>	<b>1</b>
1.1. Antecedentes .....	2
1.2. Pregunta de investigación .....	3
1.3. Hipótesis.....	3
1.4. Objetivos .....	3
1.4.1. Objetivo general.....	3
1.4.2. Objetivos específicos .....	4
1.5. Justificación.....	4
1.6. Alcances.....	5
1.7. Limitaciones .....	5
1.8. Descripción de capítulos .....	6
<b>Capítulo 2. Marco Teórico.....</b>	<b>8</b>
2.1. Historia de los MEMS .....	10
2.2. Micropinza .....	14
2.3. Punta de la pinza.....	19
2.4. Microactuador viga en voladizo .....	20
2.4.1. Análisis mecánico .....	21
2.4.2. Análisis térmico.....	24
2.4.3. Análisis modal.....	26

2.5. Modelado del microactuador Chevrón.....	27
2.5.1. Análisis térmico.....	28
2.5.2. Análisis eléctrico .....	30
2.6. Modelado del pantógrafo.....	34
2.7. Tecnología de fabricación .....	39
2.8. Silicio.....	43
<b>Capítulo 3. Metodología.....</b>	<b>45</b>
3.1. Introducción.....	46
3.2 Metodología.....	46
3.2.1 Idea.....	47
3.2.2 Investigación del estado del arte .....	47
3.2.3. Especificaciones de diseño.....	48
3.2.4. Diseño preliminar.....	49
3.2.5. Diseño validado .....	50
3.2.6. Fabricación .....	50
3.2.7. Pruebas .....	51
<b>Capítulo 4. Diseño y simulación .....</b>	<b>53</b>
4.1. Diseño de la viga en voladizo.....	54
4.1.1. Viga.....	54
4.1.2. Parametrización.....	57
4.1.3. Análisis modal.....	59
4.1.4. Corrección en el diseño .....	60
4.2. Diseño del actuador chevrón.....	63
4.2.1. Parametrización del chevrón .....	65
4.2.2. Análisis eléctrico .....	75
4.2.3. Corrección en el diseño .....	79
4.3. Pantógrafo.....	82

4.4. Micropinza .....	85
4.4.1. Micropinza modelo base .....	86
4.4.2. Micropinza modelo 1 .....	88
4.4.3 Micropinza modelo 2.....	89
4.4.4. Micropinza modelo 3. Modelo final.....	91
4.5. Implementación del diseño final de la micropinza con polisilicio .....	93
4.6. Comparación de la micropinza modelo 3. Modelo final .....	94
4.7. Modelo adicional. Arreglo de dos micropinzas encontradas frontalmente .....	96
<b>Capítulo 5. Microfabricación .....</b>	<b>98</b>
5.1. CIDESI .....	99
5.1.1. Misión .....	100
5.1.2. Visión .....	100
5.2. Departamento de Microtecnologías.....	100
5.3. Oblea de silicio .....	100
5.3.1. Características de la oblea SOI .....	101
5.3.2. Niveles de la oblea SOI .....	101
5.4. Máscaras para microfabricación.....	102
5.4.1. Máscara 1 (Dispositivo o Device) .....	103
5.4.2. Máscara 2 (Metal BIAS).....	103
5.4.3. Máscara 3 (Metal de contacto) .....	105
5.4.4. Máscara 4 (Pozo o Back hole).....	105
5.4.3. Niveles de la microfabricación .....	106
5.5. Reglas de diseño.....	107
5.5.1. Grosor mínimo .....	108
5.5.2. Espacio entre estructuras .....	108
5.5.3. Diámetro o radio .....	109

5.5.4. Anclas mecánicas .....	109
5.5.5 Anclas de alimentación.....	110
5.5.6. Aislante .....	112
5.5.7. Movimiento .....	112
5.5.8. Relleno.....	114
5.5.9. Regla para medir .....	114
5.5.10. Dado .....	115
5.5.7. Movimiento .....	115
5.5.11. Marco de separación .....	116
5.6. Software de apoyo .....	117
5.6.1. K-Layout .....	117
5.7. Microfabricación (proceso).....	118
5.7.1. Metalización.....	118
5.7.2. Resina.....	123
5.7.3. Grabado.....	125
5.7.4. Traspaso de grabado de máscara a oblea .....	126
5.7.5. Revelado de la resina .....	126
5.7.6. Ataque químico.....	127
5.7.7. Grabado profundo de iones reactivos.....	128
5.7.8. Retiro de las capas enmascarantes.....	133
5.7.9. Metalización de la capa Metal BIAS.....	134
5.7.10. Metalización de la capa Metal contactos .....	134
5.8. Prototipos.....	135
<b>Capítulo 6. Conclusiones y trabajo futuro .....</b>	<b>137</b>
6.1. Conclusiones.....	138
6.2. Trabajo futuro .....	140
<b>Bibliografía .....</b>	<b>141</b>

Anexo A. Simulación viga en voladizo.....	147
Anexo B. Simulación chevrón.....	155
Anexo C. Simulación pantógrafo .....	161
Anexo D. Pruebas electrotérmicas de la micropinza escalada y fabricada en aluminio .....	167
Anexo E. Estancias realizadas .....	174
Anexo F. Propiedad intelectual.....	182
Anexo G. Artículos indexados .....	188
Anexo H. Capítulo de libro .....	190
Anexo I. Artículos en congreso.....	191
Anexo J. Asistencia a congresos.....	193
Anexo K. Conferencias, cursos cortos y talleres impartidos.....	194
Anexo L. Asistencia a conferencias.....	205

# Índice de Tablas

Tabla 2.1. Tipos de sensores (Bogue, 2013). .....	9
Tabla 2.2. Tipos de actuadores (Fujita, 1998; Judy, 2001). .....	10
Tabla 2.3. Historia de los MEMS en algunas áreas de investigación (Fujita, 1998; Judy, 2001; Southwest Center for Microsystems Education, 2017). ...	11
Tabla 2.4. Tabla de micropinzas actuadas por un actuador chevrón.....	15
Tabla 2.5. Tabla con imágenes de las micropinzas actuadas por un actuador chevrón. ....	17
Tabla 2.6. Parámetros eléctricos y mecánicos del silicio. ....	44
Tabla 4.1.- Medidas de la viga en voladizo.....	54
Tabla 4.2 Comparación de desplazamiento analítico y simulado. ....	56
Tabla 4.3.Comparación de fuerza analítica y simulada. ....	57
Tabla 4.4. Comparación de la frecuencia. ....	59
Tabla 4.5. Medidas finales de la viga en voladizo.....	60
Tabla 4.6. Resultado del desplazamiento de la viga en voladizo.....	61
Tabla 4.7. Resultado de la fuerza en la viga en voladizo.....	62
Tabla 4.8. Resultado de la frecuencia modal de la viga en voladizo.....	63
Tabla 4.9. Medidas del chevrón.....	64
Tabla 4.10. Resultados del chevrón de 2 brazos.....	74
Tabla 4.11. Resultados del chevrón de 4 brazos.....	74
Tabla 4.12. Resultados del chevrón de 8 brazos.....	74
Tabla 4.13. Resultados del chevrón de 16 brazos.....	75
Tabla 4.14. Medidas finales del chevrón.....	79
Tabla 4.15. Resultado del desplazamiento del chevrón.....	81
Tabla 4.16. Resultados de la fuerza del chevrón.....	81
Tabla 4.17. Medidas del pantógrafo.....	83
Tabla 4.18. Comparación del esfuerzo de flexión.....	84
Tabla 4.19. Primeros modelos de micropinza.....	85

Tabla 4.20. Resultados de la simulación de la micropinza modelo base. ....	88
Tabla 4.21. Resultados de la simulación de la micropinza modelo 1.....	89
Tabla 4.22. Resultados de la simulación de la micropinza modelo 2.....	90
Tabla 4.23. Resultados de la simulación de la micropinza modelo 3.....	91
Tabla 4.24. Tabla de comparación de las micropinza modelo 1, 2 y 3. ....	92
Tabla 4.25. Comparación entre materiales .....	94
Tabla 4.26. Tabla de comparación de resultados .....	95
Tabla 4.27. Tabla de comparación del arreglo de micropinzas con la pinza individual.....	97
Tabla 5.1. Niveles de la oblea SOI.....	101
Tabla 5.2. Niveles de la oblea SOI micro maquinada. ....	107
Tabla 5.3. Ácidos que componen al atacante (Sigma-Aldrich, 2021).....	127
Tabla 5.4. Datos de la mezcla de gases de Pasivación.....	130
Tabla 5.5. Datos de la mezcla de gases de Depasivación.....	131
Tabla 5.6. Datos de la mezcla de gases de Ataque.....	131

# Índice de Figuras

Figura 2.1. Figura de microviga en voladizo. ....	20
Figura 2.2. Viga en voladizo en expansión debido a una fuerza.....	21
Figura 2.3. Expansión térmica de la viga en voladizo debido a un incremento en la temperatura.....	25
Figura 2.4. Elementos del actuador chevrón. ....	28
Figura 2.5. Chevrón en expansión debido a un cambio de temperatura.....	28
Figura 2.6. Microactuador Chevrón.....	31
Figura 2.7. Diagrama eléctrico del chevrón (Cervantes Lozano, 2006). ....	32
Figura 2.8. Diagrama eléctrico simplificado (Cervantes Lozano, 2006). ....	32
Figura 2.9. Geometría del pantógrafo (Patil et al., 2018). ....	35
Figura 2.10. Diagrama de la bisagra de flexión (Yong et al., 2008). ....	36
Figura 2.11. Diagrama de los vectores en el pantógrafo. Adaptado de (Patil et al., 2018). ....	37
Figura 2.12. Oblea SOI. Adaptación de (Universidad Autónoma de Ciudad Juárez, 2016). ....	40
Figura 2.13. Alineación de fotolitografía. Adaptación de (Universidad Autónoma de Ciudad Juárez, 2016). ....	40
Figura 2.14. Maquinado en la oblea de estructura. Adaptación de (Universidad Autónoma de Ciudad Juárez, 2016). ....	40
Figura 2.15. Alineación de fotolitografía. Adaptación de (Universidad Autónoma de Ciudad Juárez, 2016). ....	41
Figura 2.16. Depósito de metal. Adaptación de (Universidad Autónoma de Ciudad Juárez, 2016). ....	41
Figura 2.17. Colocación de la capa de protección. Adaptación de (Universidad Autónoma de Ciudad Juárez, 2016). ....	42
Figura 2.18. Alineación de la litografía inferior. Adaptación de (Universidad Autónoma de Ciudad Juárez, 2016). ....	42

Figura 2.19. Maquinado de liberación del dispositivo. Adaptación de (Universidad Autónoma de Ciudad Juárez, 2016). .....	43
Figura 2.20. Maquinado de liberación del dispositivo. Adaptación de (Universidad Autónoma de Ciudad Juárez, 2016). .....	43
Figura 3.1. Metodología de la tesis. ....	47
Figura 3.2. Proceso de la idea. ....	47
Figura 3.3. Proceso de Investigación del estado del arte. ....	48
Figura 3.4. Proceso de Especificaciones de diseño.....	49
Figura 3.5. Proceso de Diseño preliminar.....	50
Figura 3.6. Proceso de Diseño validado. ....	50
Figura 3.7. Proceso de Fabricación. ....	51
Figura 3.8. Proceso de Pruebas. ....	52
Figura 4.1. Viga en voladizo. ....	55
Figura 4.2. Distribución de temperatura en la viga en voladizo. ....	56
Figura 4.3. Desplazamiento en la viga.....	56
Figura 4.4. Fuerza de reacción en la viga.....	57
Figura 4.5. Parametrización de desplazamiento con respecto a la temperatura.....	58
Figura 4.6. Parametrización de la fuerza con respecto a la temperatura.....	59
Figura 4.7. Primera frecuencia modal de la viga en voladizo.....	60
Figura 4.8. Distribución de temperatura en la viga en voladizo. ....	61
Figura 4.9. Distribución del desplazamiento en la viga en voladizo. ....	62
Figura 4.10. Distribución de la fuerza en la viga en voladizo. ....	62
Figura 4.11. Primera forma modal de la viga en voladizo. ....	63
Figura 4.12. Diagrama del chevrón. Fuente: elaboración propia. ....	65
Figura 4.13. Parametrización del desplazamiento con respecto al ángulo. ...	66

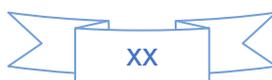


Figura 4.14. Parametrización de la fuerza con respecto al ángulo. Fuente: elaboración propia. ....	67
Figura 4.15. Parametrización del desplazamiento con respecto al grosor del dispositivo. ....	68
Figura 4.16. Parametrización de la fuerza con respecto al grosor del dispositivo. ....	68
Figura 4.17. Parametrización del desplazamiento con respecto al ancho de la viga. ....	69
Figura 4.18. Parametrización de la fuerza con respecto al ancho de la viga. ....	70
Figura 4.19. Parametrización del desplazamiento con respecto al largo de la viga. ....	71
Figura 4.20. Parametrización de la fuerza con respecto al largo de la viga. ....	71
Figura 4.21. Parametrización del desplazamiento con respecto al gradiente de temperatura. ....	72
Figura 4.22. Parametrización de la fuerza con respecto al gradiente de temperatura. ....	73
Figura 4.23. Parametrización de la resistencia en un brazo del chevrón. ....	76
Figura 4.24. Parametrización de la resistencia total del chevrón. ....	77
Figura 4.25. Parametrización del consumo eléctrico del chevrón. ....	78
Figura 4.26. Parametrización del calor generado en el chevrón. ....	79
Figura 4.27. Distribución de la temperatura en el chevron. ....	80
Figura 4.28. Resultado del desplazamiento. ....	81
Figura 4.29. Resultado de la fuerza. ....	82
Figura 4.30. Diagrama del pantógrafo. Fuente: Elaboración propia. ....	83
Figura 4.31. Distribución del esfuerzo en el pantógrafo. ....	84
Figura 4.32. Dimensiones de la micropinza preliminar. ....	87
Figura 4.33. Desplazamiento entre las mandíbulas de la micropinza modelo base. ....	87
Figura 4.34. Desplazamiento entre las mandíbulas de la micropinza modelo 1. ....	89

Figura 4.35. Desplazamiento en la micropinza. En el recuadro rojo se muestra la modificación al modelo 2.....	90
Figura 4.36. Desplazamiento en la micropinza. En el recuadro rojo se muestra la modificación al modelo 3.....	91
Figura 4.37. Arreglo de dos micropinzas. ....	97
Figura 5.1. Logo del CIDESI <a href="https://www.cidesi.com/site/">https://www.cidesi.com/site/</a> .....	99
Figura 5.2. Oblea SOI.....	101
Figura 5.3. Máscara 1 estructura del dispositivo.....	104
Figura 5.4. Máscara 2 Metal BIAS. ....	104
Figura 5.5. Máscara 2 Metal de contacto.....	105
Figura 5.6. Máscara 4 Espacios en la oblea de soporte. ....	106
Figura 5.7. Niveles de fabricación.....	106
Figura 5.8. Ejemplo del grosor mínimo. Adaptación de (Universidad Autónoma de Ciudad Juárez, 2016). ....	108
Figura 5.9. Ejemplo del espacio mínimo entre estructura. Adaptación de (Universidad Autónoma de Ciudad Juárez, 2016). ....	109
Figura 5.10. Ejemplo de un radio en la estructura. Adaptación de (Universidad Autónoma de Ciudad Juárez, 2016). ....	109
Figura 5.11. Ejemplo del ancla. Adaptación de (Universidad Autónoma de Ciudad Juárez, 2016).....	110
Figura 5.12. Ejemplo de anclas eléctricas del nivel 1 y 2. Adaptación de (Universidad Autónoma de Ciudad Juárez, 2016). ....	111
Figura 5.13. Ejemplo de anclas eléctricas del nivel 1 y 3. Adaptación de (Universidad Autónoma de Ciudad Juárez, 2016). ....	112
Figura 5.14. Forma de aislar. Adaptación de (Universidad Autónoma de Ciudad Juárez, 2016).....	113
Figura 5.15. Espacio para un trabajo libre. Adaptación de (Universidad Autónoma de Ciudad Juárez, 2016). ....	113

Figura 5.16. Relleno en los dispositivos. Adaptación de (Universidad Autónoma de Ciudad Juárez, 2016).	114
Figura 5.17. Reglas de medición. Adaptación de (Universidad Autónoma de Ciudad Juárez, 2016).	115
Figura 5.18. Dado. Adaptación de (Universidad Autónoma de Ciudad Juárez, 2016).	116
Figura 5.19. Marco de separación. Adaptación de (Universidad Autónoma de Ciudad Juárez, 2016).	117
Figura 5.20. Interfaz de K-Layout.	118
Figura 5.21. EBE en el cuarto limpio. Propiedad del Laboratorio de Microtecnologías de CIDESI.	119
Figura 5.22. Cámara de vacío del EBE. Propiedad del Laboratorio de Microtecnologías de CIDESI.	122
Figura 5.23. Oblea de silicio SOI.	123
Figura 5.24. Oblea en la centrifuga. Propiedad del Laboratorio de Microtecnologías de CIDESI.	124
Figura 5. 25 Oblea en la centrifuga con la resina. Propiedad del Laboratorio de Microtecnologías de CIDESI.	124
Figura 5.26. Oblea en la plancha. Propiedad del Laboratorio de Microtecnologías de CIDESI.	125
Figura 5.27. Máscara 4 (Pozo). Propiedad del Laboratorio de Microtecnologías de CIDESI.	125
Figura 5.28. Oblea después del revelado de la resina.	126
Figura 5.29. Botella de atacante. Propiedad del Laboratorio de Microtecnologías de CIDESI.	127
Figura 5.30. Traje para la manipulación de ácidos. Propiedad del Laboratorio de Microtecnologías de CIDESI.	128
Figura 5.31. Oblea con ataque al aluminio.	129
Figura 5.32. Equipo DRIE. Propiedad del Laboratorio de Microtecnologías de CIDESI.	129

Figura 5.33. Muestra en el brazo antes de entrar a la cámara de vacío. .... 132

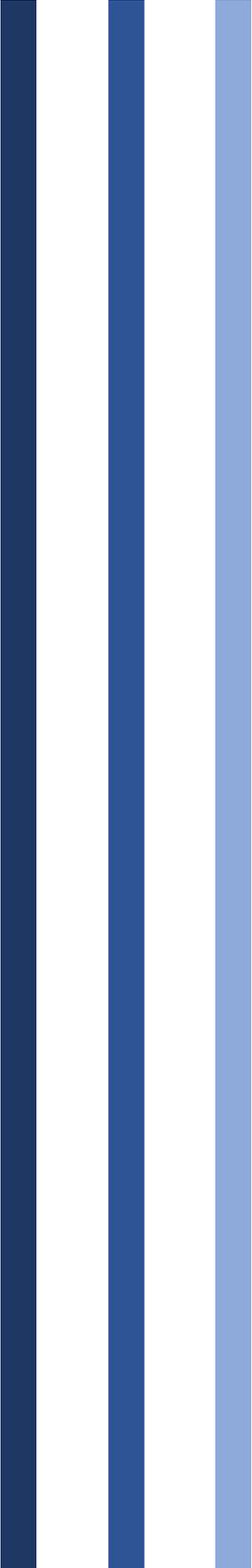
Figura 5.34. Oblea en la cámara de vacío del DRIE en el proceso de grabado..... 133

Figura 5.35. Micropinzas después del proceso DRIE. .... 133

Figura 5.36. Micropinza modelo 3..... 135

Figura 5.37. Brazo de la micropinza. .... 136

Figura 5.38. Micro actuador chevrón. .... 136



# ***Capítulo 1.***

## ***Introducción***

Este trabajo de investigación se enfoca en el diseño de una novedosa micropinza electrotérmica impulsada por un actuador chevrón, se utilizan dos amplificadores en forma de pantógrafos modificados en los brazos.

# Capítulo 1. Introducción

Los sistemas microelectromecánicos (MEMS por sus siglas en inglés), son sistemas en miniatura presentes en nuestra vida cotidiana (Southwest Center for Microsystems Education, 2017), son dispositivos que tienen un tamaño menor de 1mm hasta 1 $\mu$ m. Los MEMS son una tecnología desarrollada a partir de la industria de circuitos integrados (IC). Para crear sensores y actuadores en miniatura. Originalmente estos se utilizaron procesos y materiales semiconductores para construir sistemas eléctricos y mecánicos, pero ahora se han expandido para incluir biológicos, ópticos, fluídicos, magnéticos y otros sistemas (Rebello, 2004). El término MEMS se originó en Estados Unidos y en Europa se les conoce como Tecnologías de Microsistemas (MST por sus siglas en inglés). En Japón y Asia los MEMS son llamados micromáquinas, las cuales se componen de dispositivos mecánicos con dispositivos eléctricos (Fujita, 1998; Rebello, 2004).

## 1.1. Antecedentes

Los MEMS surgen a partir de la tecnología de los circuitos integrados, esta tecnología se fue desarrollando a través de los años, el primer desarrollo de esta tecnología surge en 1948 con la invención del transistor de germanio teniendo un tamaño aproximado de 10 cm, posteriormente se comercializa el transistor tiene un tamaño menor a 2 cm. Para el año de 1958 se desarrolla el primer circuito integrado en los laboratorios de Texas Instruments. En 1959 Richard Feynman da una conferencia titulada “Hay mucho espacio en el fondo”, en la que describe la enorme cantidad de espacio disponible en la microescala. En 1965 se propone de manera empírica la Ley de Moore en la cual se dice que cada dos años se duplicara el número de transistores los circuitos integrados, haciendo que la miniaturización sea una realidad con

chips más complejos y a su vez se empiecen a desarrollar nuevas tecnologías, haciendo que en las décadas siguientes el desarrollo de esta tecnología siga avanzando y a su vez la miniaturización cada vez sea mayor.

## **1.2. Pregunta de investigación**

***¿Es posible implementar un amplificador de desplazamiento, utilizado en otras aplicaciones en microescala, como brazo de una micropinza?***

Para la elaboración de la hipótesis, se consideraron como base a los trabajos relacionados al desarrollo de micropinzas, realizados en el grupo de investigación, y sus resultados obtenidos al realizar diferentes dispositivos MEM.

## **1.3. Hipótesis**

***Una micropinza que utiliza dos arreglos flexibles con forma de pantógrafo modificado como brazos, genera un amplio desplazamiento, debido al uso de estos dispositivos amplificadores.***

## **1.4. Objetivos**

Los objetivos que se tienen contemplados para esta tesis son los siguientes:

### **1.4.1. Objetivo general**

Optimizar y fabricar a una micropinza MEM con mecanismos flexibles, basada en amplificadores con forma de pantógrafo.

## 1.4.2. Objetivos específicos

- ❖ Definir la magnitud de los parámetros de desempeño básicos.
- ❖ Realizar el modelado de los parámetros seleccionados.
- ❖ Calcular de manera teórica y mediante simulación, el desplazamiento y la fuerza que la pinza proporciona.
- ❖ Reducir el movimiento residual en el eje Z.
- ❖ Implementar diferentes materiales, con la intención de mejorar el desempeño del dispositivo, y de acuerdo con los requerimientos de fabricación.
- ❖ Realizar la fabricación, y en caso de contar con equipo e infraestructura adecuados, llevar a cabo las pruebas correspondientes.

## 1.5. Justificación

La necesidad de manipulación de microobjetos es creciente en la industria, e incluso en la educación, ya que el desarrollo de prototipos o actividades de micromanipulación, microensamblaje, o microsoldadura, entre otras, donde se utilizan partes diminutas y, posiblemente frágiles, requieren de un manejo adecuado. Las micropinzas son una respuesta a esta necesidad, de acuerdo con las necesidades específicas de los elementos de sujeción. En esta tesis, el enfoque es sobre la sujeción de microalambres con dimensiones máximas de 45  $\mu\text{m}$ .

A partir del análisis y los resultados obtenidos en el grupo de trabajo en el área de micropinzas, se plantea el diseño, simulación e implementación de una micropinza utilizando la geometría basada en secciones de un pantógrafo modificado, para crear un amplificador de desplazamiento y que, a su vez funcionen como brazos de la micropinza.

## 1.6. Alcances

Se tiene planeado desarrollar una micropinza, basada en la geometría de un pantógrafo, con prestaciones similares a otras existentes basadas en geometrías más complejas, reduciendo la cantidad de material utilizado y sus dimensiones.

Con el conocimiento de las características de operación de los dispositivos, así como de los parámetros mecánicos y eléctricos de los materiales y el conocimiento de las ecuaciones fundamentales de operación de los microactuadores básicos, procedemos a diseñar, analizar e implementar nuevas micropinzas.

La microfabricación es la forma en la que llevará a cabo la implementación mencionada. Debido a las limitaciones de ingreso a cuarto limpio, impuestas por la pandemia de COVID-19, se llevó a cabo la implementación en escala macro, para observar el desempeño de los prototipos utilizando aluminio.

## 1.7. Limitaciones

- ❖ La fabricación de un dispositivo en la escala micrométrica requiere un costo muy grande, así como del acceso a infraestructura altamente especializada, disponible en Centros de Investigación, como Centro de Investigación en Desarrollo Industrial (CIDESI) Querétaro y Centro Investigación en Ciencia y Tecnología Aplicada de la Universidad Autónoma de Ciudad Juárez (CICTA - UACJ), con quienes, gracias al Proyecto de Ciencia Básica, Número de referencia "A1-S-33433". "Proyecto Apoyado por el Fondo Sectorial de Investigación para la Educación", se establecieron convenios de colaboración, que hicieron posible la

capacitación en el desarrollo de los procesos requeridos para la microfabricación.

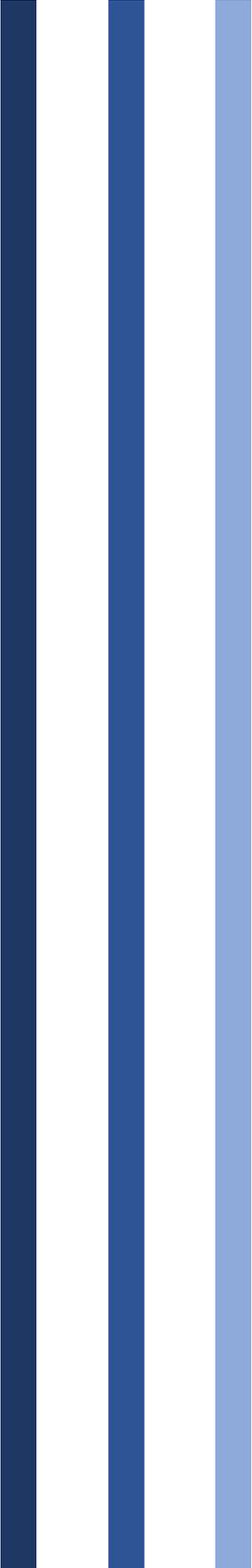
- ❖ La pandemia del SARS COV-2 retrasó el inicio de la estancia de fabricación del dispositivo y, por lo tanto, de este trabajo. Una gran parte de las actividades se llevó a distancia, pues fue absolutamente necesario evitar.
- ❖ Por otro lado, los equipos se vieron afectados, debido al cierre generalizado de laboratorios, ante la falta de uso y mantenimiento, así como de las condiciones de humedad ante este hecho. Por lo que, en particular, equipos como grabadoras de patrones, de grabado profundo de iones reactivos (DRIE), fueron más afectados, de tal forma que las fallas no sólo fueron mecánicas, en el caso del DRIE se requirió del ajuste de las recetas de gases aplicadas, que ha requerido de esfuerzo y dedicación por largos periodos de tiempo.

## 1.8. Descripción de capítulos

Esta tesis se divide en 7 capítulos, con la siguiente distribución:

- ❖ **Capítulo 1.** Se presenta la introducción del tema, partiendo de la pregunta de investigación e hipótesis, los objetivos generales y particulares, justificación y limitaciones de este trabajo.
- ❖ **Capítulo 2.** Se presenta el análisis matemático de la micropinza, se analizan cada uno de sus componentes empezando por la viga en voladizo, seguido por el chevrón, el pantógrafo y finalmente, de la micropinza en su conjunto. También se presenta una recopilación de las pinzas impulsadas por chevrón, seguido por la tecnología de fabricación y el material que se empleará en su microfabricación.

- ❖ **Capítulo 3.** Se muestra la metodología de esta tesis.
- ❖ **Capítulo 4.** Se realizan el análisis matemático y numérico por medio del análisis de Método de Elemento Finito de cada uno de los componentes que conforman a la pinza.
- ❖ **Capítulo 5.** Se describe el proceso de microfabricación para MEMS. Se explican cada uno de los pasos que se llevan a cabo en CIDESI Querétaro.
- ❖ **Capítulo 6.** Se presentan y se analizan los resultados experimentales de la pinza.
- ❖ **Capítulo 7.** Se muestran las conclusiones y se plantea trabajo futuro.



# **Capítulo 2. Marco Teórico**

En este capítulo, se presentan las bases teóricas para modelar a la micropinza y a sus elementos. Entre los elementos básicos se encuentran el actuador chevrón y los arreglos de brazos flexibles. El actuador chevrón se conforma de un arreglo de brazos flexibles, cada uno de ellos es una viga en voladizo, con uno de sus extremos fijo y el otro guiado, de tal forma que, se comporta como un resorte al deformarse térmicamente. Por lo cual, se inicia el análisis con el actuador viga en voladizo, seguido por el análisis del actuador chevrón y pantógrafo.

## Capítulo 2. Marco teórico

Los MEMS son una tecnología en la que se desarrollan una gran cantidad de sensores y actuadores. Cada uno de estos dispositivos son utilizados para medir variables físicas, químicas, biológicas y ambientales, el uso de los MEMS depende de la variable a medir y las condiciones donde se empleará, En la Tabla 2.1 se muestran algunos de los tipos de sensores y las variables que pueden medir.

Tabla 2.1. Tipos de sensores (Bogue, 2013).

Sensor	Variable por medir
Acelerómetro	Aceleración, vibración y choque
Giroscopio	Posición y rotación
Inclinómetro	Inclinación y ángulo
Micrófono	Sonido
Microbolómetro	Radiación infrarroja
Galga extensiométrica	Esfuerzo
Piezoresistor	Presión
Sensor de presión capacitivo	Presión
Magnetómetro	Intensidad magnética
Sensor químico	Tipos de reacciones químicas, entre otras variables

Los actuadores son otro tipo de MEMS que interactúan con objetos o variables, pero a su vez necesitan de los sensores ya que, necesitan una señal para realizar su trabajo. Esto dependerá de la aplicación para la que serán empleados. En la Tabla 2.2 se muestran algunos de los tipos de

actuadores, su forma de actuación y las variables con las que pueden interactuar.

*Tabla 2.2. Tipos de actuadores (Fujita, 1998; Judy, 2001).*

Actuador	Interacción física
Viga en voladizo	Interruptor
Chevrón	Interruptor, desplazamiento de objetos
Microespejo	Reflexión de luz
Microbomba	Movimiento de fluido
Microválvula	Limitación de flujo

En la actualidad los MEMS son utilizados en gran parte de los sistemas que usamos en la vida diaria, los sectores donde se emplean son: automóviles, tecnología aeroespacial, aplicaciones biomédicas, impresoras de inyección de tinta, comunicaciones inalámbricas, óptica, robótica, ingeniería médica, sector petroquímico, sector militar, cuidados de la salud y sistemas de análisis químicos (Bogue, 2013; Fujita, 1998; Southwest Center for Microsystems Education, 2017; Wei & Xu, 2015). Las principales ventajas de esta tecnología son: dimensión micrométrica, bajo consumo de energía, ligereza, alto rendimiento, fácil producción en masa, fácil integración en chips y fácil control (Bogue, 2013; Judy, 2001; Wei & Xu, 2015).

## 2.1. Historia de los MEMS

A través de los años los MEMS han tenido muchos avances tecnológicos, en la Tabla 2.3 se presentan los avances de esta tecnología.

Tabla 2.3. Historia de los MEMS en algunas áreas de investigación (Fujita, 1998; Judy, 2001; Southwest Center for Microsystems Education, 2017).

Año	Área de desarrollo	Avance tecnológico
1948	Electrónica	Invencción del transistor de germanio en los laboratorios Bell. (William Shockley).
1954	Material	Efecto piezoresistivo en germanio y silicio (C.S. Smith).
1958	Electrónica	Primer circuito integrado (IC) (J.S. Kilby 1958 / Robert Noyce 1959).
1959	Sensor	Primer sensor de presión de silicio demostrado (Kulite).
1967	Técnica de trabajo	Grabado anisotrópico de silicio profundo (H.A. Waggener et al.).
1968	Electrónica	Patente del transistor de compuerta resonante (Proceso de microfabricación de superficie) (H. Nathanson et al.).
1970	Material	Obleas de silicio grabadas a granel son utilizadas como sensores de presión (Proceso de microfabricación a granel).
1971	Electrónica	Se inventa el microprocesador.
1979	Equipo desarrollado	Hewlett Packard (HP) desarrolla la boquilla de inyección de tinta micro mecanizada.
1982	Electrónica	El proceso LIGA es un proceso utilizado para la fabricación de microsistemas (Centro de Investigación Nuclear de Karlsruhe, Alemania).
	Equipo medico	Transductor de presión arterial desechable (Honeywell).
	Material	“El silicio como material estructural”, K. Petersen.
1983	Publicación	“Máquinaria infinitesimal” (R. Feynman).
	Sensor	Sensor de presión integrado (Honeywell).
1985	Material	La “Buckyball” es descubierta.
	Sensor	Se desarrolla el sensor de choque (Bolsa de aire).
1986	Equipo desarrollado	Se inventa el microscopio de fuerza atómica.

	Material	Unión de obleas de silicio (M. Shimbo).
1987	Material	Se implementa el polisilicio
		Se implementa la Deposición de vapores químicos de tungsteno (CVD tungsteno).
	Micro maquinado	Se desarrolla el micro engrane y turbina
	Pruebas	Prueba de contacto
		Metodología de pruebas de materiales.
	Sensor	Servo con acelerómetro con retroalimentación.
Interruptor de presión y aceleración.		
1988	Mecánica	Motores de accionamiento lateral electrostático rotativo (Fan, Tai, Muller).
	Sensor	Sensores de presión fabricados por lotes mediante unión de obleas (Nova Sensor).
1989	Material	Se implementa el Óxido de Zinc (ZnO).
	Pruebas	Prueba de deflexión de carga de membrana.
		Ensayo de tenacidad a la fractura.
1990	Material	Se implementa el Arseniuro de Galio (GaAs).
		Se implementa el Nitruro de Titanio con aleación con memoria de forma (TiNi, SMA).
	Prueba	Dispositivo de pruebas de fricción.
	Sensor	Sensor de túnel de electrones.
	Técnica de trabajo	Micro mecanizado por descarga eléctrica (EDM).
1991	Electrónica	Propuesta de MEMS integrado.
	Material	Se desarrollan los nanotubos de carbón.
		Se implementa la película de carbono como diamante.
		Se implementa el Titanato zirconato de plomo (PZT).
	Micro maquinado	Se implementa la bisagra de polisilicio (Pister, Judy, Burgett, Fearing).
Se desarrolla la litografía en superficies 3D.		
1992	Electrónica	Unión para sensor integrado.

		Modulador de luz de rejilla (Solgaard, Sandejas, Bloom).
	Micro maquinado	Se implementa el HARMS (High Aspect Ratio MEMS). Se desarrolla la unión de obleas a baja temperatura.
	Técnica de trabajo	Microfabricación a granel
1993	Electrónica	Pantalla de espejo digital (Texas Instruments)
		Primer acelerómetro microfabricación de superficie en producción de alto volumen (Dispositivos analógicos).
		Se desarrolla la batería recargable de película delgada
	Micro maquinado	Se desarrolla la estérolitografía.
	Sensor	Se desarrolla el giroscopio.
	Técnica de trabajo	El Microelectronics Center of North Carolina (MCNC) crea los Procesos MEMS Multiusuario (M $\mu$ MPs o Multi-User MEMS Processes).
1994	Electrónica	Arreglo de celdas solares.
		Integración de actuadores y circuitos.
	Equipo de trabajo	Se patenta el proceso de Bosch para grabado profundo de iones profundo
	Material	Se implementa la película de fluorocarbono.
		Se implementa la película magnetostrictiva.
Sensor	Servo con acelerómetro multiejes	
1995	Micro maquinado	Se implementa la estructura de bisagra activa.
1996	Electrónica	Controlador de motores ASIC.
		Emisor de campo con transistor de película delgada.
	Material	Richard Smalley desarrolla la técnica para producir nanotubos de carbono de diámetro uniforme.
		Se implementa la película de imán permanente.
	Micro maquinado	Se desarrolla el proceso multicapa de polisilicio.
1997	Electrónica	Sensor de circuito integrado adelgazado.

		Bobina integrada para fuente de alimentación inductiva.
	Micro maquinado	MEMS flexibles.
1999	Electrónica	Conmutador de red óptica (Lucent).
2000	Nuevas tecnologías	Auge de MEMS ópticos.
		Incrementan los BioMEMS
		El número de dispositivo y aplicaciones MEMS incrementa continuamente.
		Las aplicaciones y la tecnología NEMS incrementa.

## 2.2. Micropinza

Las micropinzas surgen como una necesidad actual para manipular objetos de bajas dimensiones, con la miniaturización de muchos de los elementos tecnológicos. Una micropinza se puede definir como un dispositivo microscópico usado para manipular objetos de microescala de forma segura (T. Leondes, 2006). Las micropinzas han abierto la oportunidad de desarrollar la manipulación y el transporte de microobjetos con alta precisión y confiabilidad en aplicaciones como microensamblajes, microrrobótica, biología, medicina y microóptica (Verotti et al., 2017). De acuerdo con su principio de funcionamiento, los actuadores para pinzas microelectromecánicas (MEM) se pueden clasificar en: electrostático, electrotérmico, piezoeléctrico y aleación de memoria de forma (Solano & Wood, 2007). En la Tabla 2.4 se presenta un resumen de las micropinzas actuadas por chevrón que se encontraron en la literatura, y en la Tabla 2.5 se muestra una imagen de cada una de las pinzas presentadas en la tabla anterior.

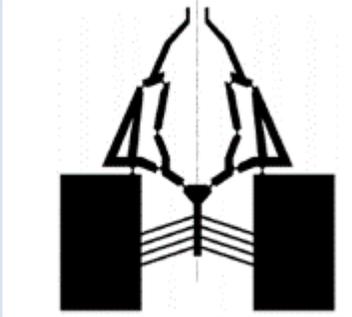
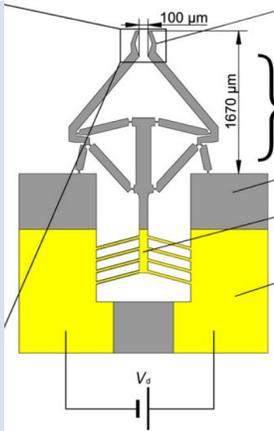
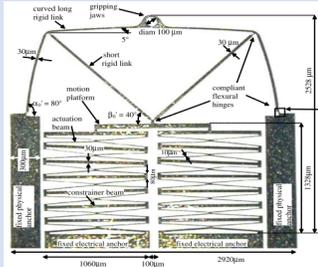
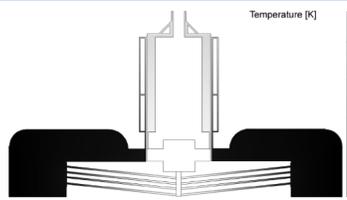
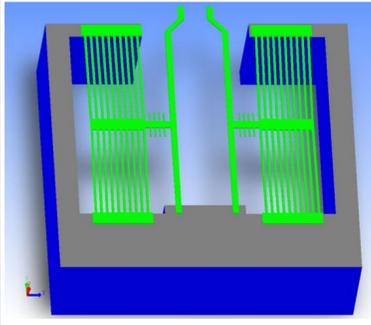
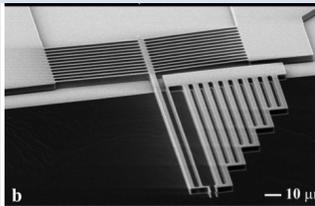
Tabla 2.4. Tabla de micropinzas actuadas por un actuador chevrón.

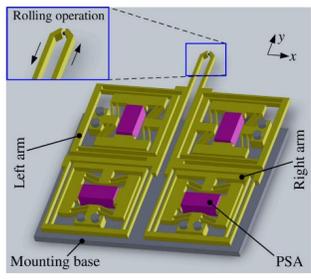
No	Nombre	Desplazamiento ( $\mu\text{m}$ )	Fuerza ( $\mu\text{N}$ )	Dimensiones ( $\mu\text{m}$ )	Material	Alimentación	Referencia
1	Micropinza impulsada por un actuador chevrón.	107.5	-	2900 x 3500 x 45	SU8 / Cobre	76.3 mV	(Chuet al., 2011)
2	Micropinza impulsada por un actuador chevrón.	71.5	242	1670 (altura)	SU8 / Cobre	195 mV	(Zhang et al., 2013)
3	Micropinza impulsada por un chevrón en el centro.	94.9	-	2528 x 2920	Níquel	160 mA	(Zeman et al., 2006)
4	Micropinza impulsada por un chevrón invertido.	20	-	-	Silicio	<10 V	(Fraser et al., 2006)
5	Micropinza impulsada por dos chevrones laterales	19.2	17000	1800 x 1000 x 10	Polisilicio	1.2 V	(Shivhare et al., 2016)
6	Micropinza impulsada por un chevrón (un brazo)	-	25	-	Silicio	20 V	(Carlson et al., 2007)
7	Micropinza con chevrones actuados por	479.5	-	-	Aluminio 6061	Actuador piezoel	(Xu, 2012)

	medio de actuador piezoeléctrico					éctrico	
8	Micropinza impulsada con dos chevrones con sensor capacitivo integrado	79	-	-	Níquel	0.7 V	(Ali et al., 2011)
9	Micropinza impulsada por un chevrón lateral con sensor de fuerza	67	38.5 nN	6000 x 5000	Silicio	10 V	(Kim et al., 2008)
10	Micropinza impulsada por un chevrón invertido	50	100	-	SU8	Actuador piezoeléctrico	(Panepucci & Martinez, 2008)
11	Micropinza impulsada por dos chevrones	276	10,000	13500 x 60000 x 5000	Aleación de aluminio 7075	Actuador piezoeléctrico	(Xu, 2013)
12	Micropinza electrostática impulsada por un chevrón invertido	12	-	-	Silicio	36 V	(Demaghsi et al., 2014a)
13	Micropinza	1.14	12.9	400 x	Níquel	1.4 V	(Dem

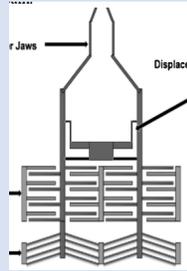
	impulsada por un chevrón invertido			800			aghsi et al., 2014b )
--	------------------------------------	--	--	-----	--	--	-----------------------

Tabla 2.5. Tabla con imágenes de las micropinzas actuadas por un actuador chevrón.

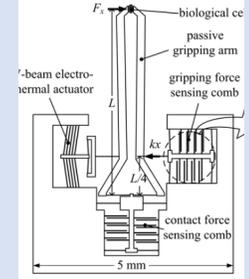
1. (Chu et al., 2011)	2. (Zhang et al., 2013)	3. (Zeman et al., 2006)
		
4. (Fraser et al., 2006)	5. (Shivhare et al., 2016)	6. (Carlson et al., 2007)
		
7. (Xu, 2012)	8. (Ali et al., 2011)	9. (Kim et al., 2008)



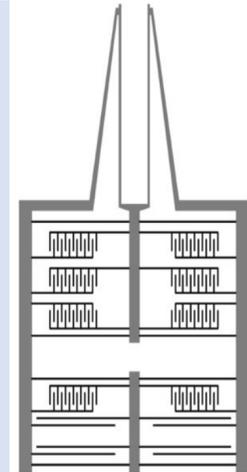
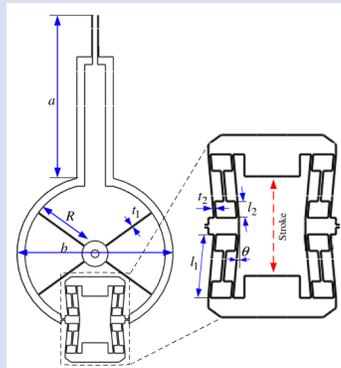
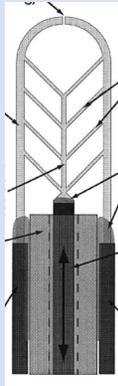
10. (Panepucci & Martinez, 2008)



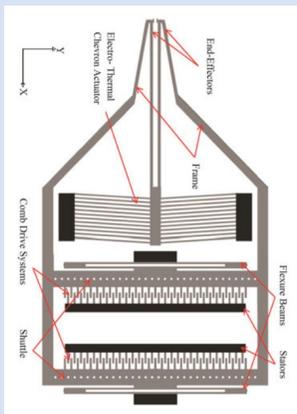
11. (Xu, 2013)



12. (Demaghsi et al., 2014<sup>a</sup>)



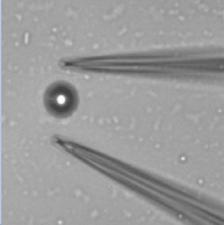
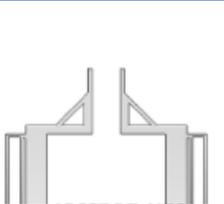
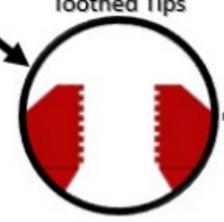
13. (Demaghsi et al., 2014b)

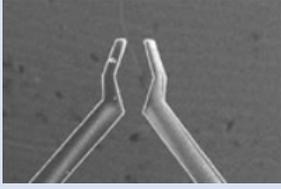


## 2.3. Punta de la pinza

La geometría de las puntas de unas micropinza se diseña dependiendo del tipo de micro objeto a manipular. La manipulación puede ser de objetos con forma regular o irregular, de diferentes tamaños incluso de diferentes texturas en su superficie. Para microestructuras o partículas finas se usa una punta fina, para la manipulación de muestras circulares como una célula se utiliza una punta cóncava o plana y para un conjunto de objetos, a una punta dentada. La forma de las puntas de la pinza se muestra en la Tabla 2.6 se presenta un resumen de las puntas.

Tabla 2.1. Tipos de puntas de las micropinzas.

Tipo de punta	Diagrama	Descripción	Referencia
Punta fina		Para manipulación de microestructuras	(Lofroth & Avci, 2019)
Punta plana		Para sujeción de formas circulares	(Fraser et al., 2006)
Punta dentada		Para sujeción de objetos regulares e irregulares	(Lofroth & Avci, 2019)

Punta cóncava		Para sujeción de formas circulares.	(Zhang et al., 2013)
------------------	---	--	-------------------------

## 2.4. Microactuador viga en voladizo

La microviga en voladizo es una de las estructuras más usadas en los MEMS, y se define como un brazo en voladizo con un solo soporte en un extremo como se muestra en la Figura 2.1. A menudo, se le conoce como un brazo "libre-fijo" (Bindu et al., 2014). Una viga en voladizo está conformada por un brazo de una longitud, así como un ancho y un grosor específico. En esta tesis, para realizar el análisis matemático de la viga en voladizo, se considera el modelo analítico presentado en (Kaajakari, 2009).

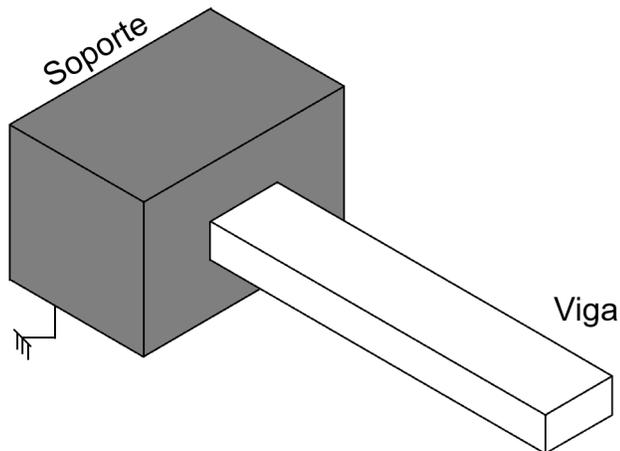


Figura 2.1. Figura de microviga en voladizo.

## 2.4.1. Análisis mecánico

Con base en (Kaajakari, 2009), se desarrolla el modelo que se presenta a continuación. Se incluyen las fuentes complementarias (Egor, 2000; Hibbeler, 2011; M. Gere, 2017; P. Beer et al., 2010).

La ley de Hooke nos proporciona relación entre la fuerza aplicada y el desplazamiento, ésta se ve reflejada en los resortes. Los resortes complejos se pueden descomponer en conexiones en serie o paralelo. La capacidad de simplificar resortes complejos en conexiones simples puede simplificar el análisis de esfuerzos. Una viga en voladizo se puede interpretar como un resorte, y satisfacer la relación entre el desplazamiento del resorte  $x$  [m] y la fuerza  $F$  [N], donde la constante de proporcionalidad está dada por  $k$ , la constante de rigidez [N/m].

$$F = -kx \quad (2.1)$$

En la Figura 2.2, se muestra la fuerza aplicada en el eje X.

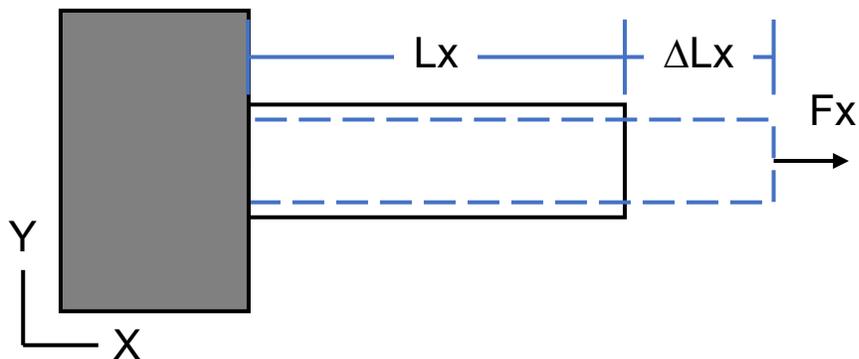


Figura 2.2. Viga en voladizo en expansión debido a una fuerza.

La fuerza  $F$  actúa perpendicular al área de sección transversal  $A$ . El esfuerzo mecánico se define como fuerza sobre unidad de área:

$$T = \frac{F}{A} \quad (2.2)$$

Donde  $F$  es la fuerza [N] y  $A$  es el área de sección transversal [m<sup>2</sup>]. Además de la magnitud, el esfuerzo depende de la dirección de la fuerza aplicada, como se indica en la siguiente expresión, de manera alternativa a la ecuación (2.2):

$$T_{xx} = \frac{F_x}{A_x} \quad (2.3)$$

Los subíndices  $x$  indican el área y la fuerza normales en la dirección  $X$ . Una fuerza de empuje sobre la viga en voladizo es positiva y genera un esfuerzo de tensión. Una fuerza que comprime la viga en voladizo es negativa y genera un esfuerzo de compresión.

Cuando el esfuerzo normal  $T_{xx}$  actúa en el extremo de la viga en voladizo, la longitud cambia por la cantidad  $\Delta L$  debido a la deformación elástica. La deformación longitudinal se define como el cambio relativo a la longitud:

$$S_{xx} = \frac{\Delta L_x}{L_x} \quad (2.4)$$

Donde  $L_x$  es la longitud inicial. Nuevamente, los subíndices indican la dirección del alargamiento en la dirección  $X$ .

Una viga en voladizo es una varilla en expansión, cuya constante de resorte se obtiene a partir de la siguiente relación:

$$T = ES \quad (2.5)$$

donde  $T$  es esfuerzo [ $\text{N}/\text{m}^2$ ],  $E$  es el Módulo de Young [ $\text{Pa}$ ] y  $S$  es la deformación [ $\text{m}$ ]. Reescribimos a la ecuación (2.5) como:

$$T = \frac{F}{A} \quad (2.6)$$

donde  $F$  es la fuerza de actuación sobre la viga en voladizo [ $\text{N}$ ],  $A$  es el área sobre la sección transversal [ $\text{m}^2$ ]. A partir de las ecuaciones (2.5) y (2.6) puede obtenerse a  $S$ , la deformación:

$$S = \frac{\Delta L}{L} \quad (2.7)$$

donde  $L$  es la longitud de la viga en reposo [ $\text{m}$ ] y  $\Delta L$  es el cambio de longitud debido a la fuerza externa [ $\text{m}$ ]. Combinando las expresiones anteriores, se obtiene:

$$F = \frac{EA}{L} \Delta L \equiv k_e \Delta L \quad (2.8)$$

la constante de resorte para una viga en expansión, finalmente, puede calcularse a partir de:

$$k_e = \frac{EA}{L} \quad (2.9)$$

El esfuerzo máximo es localizado en la unión del soporte y el brazo. Se puede obtener a partir de:

$$T_{MAX} = \frac{FLt}{2I} = \frac{3Et}{2L^2} x \quad (2.10)$$

donde  $I$  es el momento de inercia [ $m^4$ ], que puede obtenerse como:

$$I = \frac{wt^3}{12} \quad (2.11)$$

donde  $w$  es el ancho [ $m$ ] y  $t$  es el grosor de la vida [ $m$ ].

## 2.4.2. Análisis térmico

El principio de la actuación térmica de una microviga en voladizo se basa en el calentamiento de la viga. Debido al Efecto de Joule se obtiene la expansión térmica de la microviga como se muestra en la Figura 2.3.

La deformación térmica debida al gradiente de temperatura  $\Delta T$  [ $^{\circ}C$ ], puede calcularse como:

$$S_{XX} = \alpha \Delta T \quad (2.12)$$

donde  $\alpha$  es el coeficiente de expansión térmica [ $1/K$ ]. Si no se permite que el material se expanda, la deformación total debe ser cero.

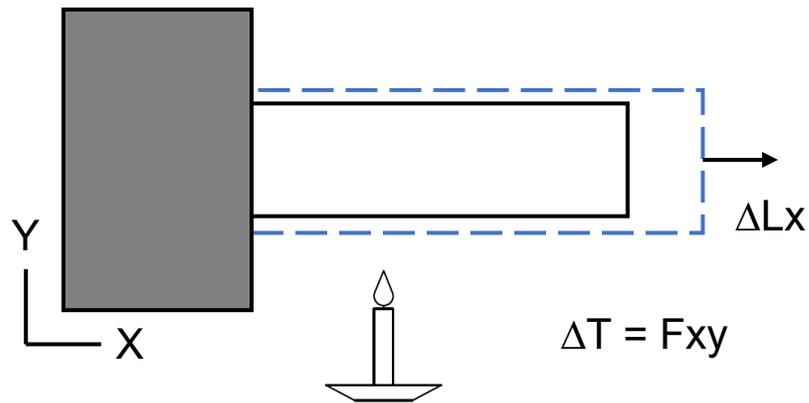


Figura 2.3. Expansión térmica de la viga en voladizo debido a un incremento en la temperatura.

Agregando el esfuerzo térmico y la tensión inducida por el esfuerzo tenemos:

$$S_{XX} = \alpha\Delta T + \frac{T_{XX}}{E} = 0 \quad (2.13)$$

A partir de la ecuación (2.13) se puede expresar el Esfuerzo de la siguiente manera:

$$T_{XX} = -E\alpha\Delta T \quad (2.14)$$

el esfuerzo negativo indica que la barra está siendo comprimida en el extremo libre. La fuerza reactiva que actúa en el extremo libre, sustituyendo a la ecuación (2.14), se obtiene como:

$$F = AT_{XX} = EA\alpha\Delta T \quad (2.15)$$

A partir de las ecuaciones (2.7) y (2.12) puede obtenerse la magnitud en el incremento de la longitud:

$$\Delta L = SL = \alpha \Delta TL \quad (2.16)$$

En esta sección se realizó el análisis térmico del microactuador viga en voladizo donde obtuvimos las ecuaciones que caracterizan el Esfuerzo (ecuación (2.14)), Fuerza (ecuación (2.15)) y Deformación (ecuación (2.16)) presentes en el actuador cuando es sometido a un incremento de temperatura. Estas ecuaciones serán útiles en el desarrollo de este trabajo.

### **2.4.3. Análisis modal**

El análisis modal se ha convertido en una tecnología importante en la búsqueda para determinar, mejorar y optimizar las características dinámicas de estructuras de ingeniería. No sólo se ha reconocido la importancia de esta herramienta en ingeniería mecánica y aeronáutica, también en las áreas construcción civil, biomédica, estructuras espaciales, instrumentos acústicos, transporte y plantas nucleares (He & Fu, 2001). El análisis modal es el proceso de determinar las características dinámicas de un sistema en formas de frecuencias naturales(He & Fu, 2001).

El análisis modal se basa en la respuesta de vibraciones de un sistema y son llamadas modos naturales de vibración, estas están determinadas por propiedades físicas como la masa, Módulo de Young y características del diseño. Se encuentra en la literatura a la expresión mostrada (ecuación (2.17)) para calcular las frecuencias de las formas de vibración de una viga en voladizo (Pilkey, 2005), (Mekalke & Sutar, 2016; Mia et al., 2017; Mustafa et al., 2016; Noolvi & Nagaraj, 2020).

$$f_i(\text{Hz}) = \frac{\lambda_i^2}{2\pi L^2} \left( \frac{EI}{\rho} \right)^{1/2} \quad (2.17)$$

donde  $L$  es el largo de la viga [m],  $E$  es el módulo de Young [Pa],  $I$  es el momento de inercia [m<sup>4</sup>] (ecuación (2.11)),  $\rho$  es la masa de la viga.  $\lambda$  se calcula a partir de la ecuación 2.18 (Pilkey, 2005):

$$\lambda_i = (2i - 1)\pi/2 \quad (2.18)$$

donde  $i$  indica el número de la forma modal.

## 2.5. Modelado del microactuador Chevrón

El chevrón es un actuador electro térmico ampliamente utilizado. El actuador chevrón tiene forma de V, por lo que también se le denomina actuador en forma de V. La actuación se basa en la expansión térmica de la estructura, produciendo un desplazamiento en una sola dirección (Potekhina & Wang, 2019) este desplazamiento se puede obtener por medio de un cambio de temperatura o por la aplicación de un potencial eléctrico. Estos dispositivos están integrados por un par de anclas, una flecha central, un arreglo de  $N$  pares de brazos unidos a las anclas, con  $n$  no mayor a 8, con un ángulo de inclinación en la unión, como se puede observar en la Figura 2.4.

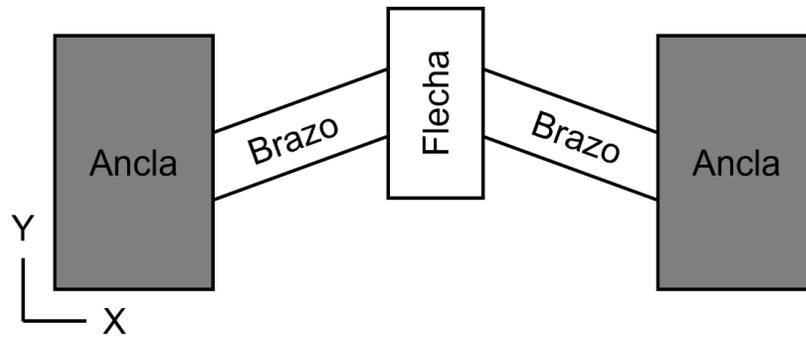


Figura 2.4. Elementos del actuador chevrón.

### 2.5.1. Análisis térmico

El chevrón es un actuador térmico en el cual se le aplica una temperatura mayor a una de sus anclas y en la otra ancla una temperatura menor para crear un gradiente de temperatura por medio del cual se obtiene el Efecto Joule y se expande la estructura, como se muestra en la Figura 2.5.

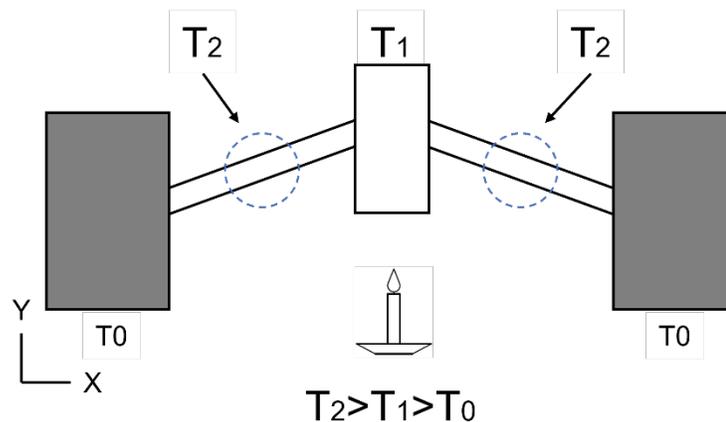


Figura 2.5. Chevrón en expansión debido a un cambio de temperatura.

Para el análisis térmico del actuador chevrón se tomó la ecuación de la fuerza propuesta por (Espinosa et al., 2007):

$$F_y = N\alpha EA\Delta T \text{sen}\theta \quad (2.19)$$

donde  $N$  es el número de par de brazos del chevrón [adimensional],  $\alpha$  es el coeficiente de expansión térmica [1/K],  $E$  es el módulo de Young [Pa],  $A$  es la sección de área transversal de la viga [m<sup>2</sup>],  $\theta$  es el ángulo de inclinación de los brazos del chevrón [°] y donde  $\Delta T$  es el gradiente de temperatura [°C] esta dado por.

$$\Delta T = \frac{(T_2 - T_1) + (T_2 - T_0)}{2} \quad (2.20)$$

El desplazamiento de la flecha se obtiene a partir de la siguiente ecuación propuesta por (Vargas-Chable et al., 2015).

$$U_y = \frac{F_y}{N \left( \text{sen}^2 \frac{EA}{L} + \text{cos}^2 \frac{12EI}{L^3} \right)} \quad (2.21)$$

donde  $F_y$  es la fuerza en la flecha en dirección “y” (ecuación 2.19).

En (Zhu et al., 2006) se encuentra la ecuación, con la cual se puede obtener el desplazamiento. En la ecuación (2.22) se emplea un gradiente de temperatura para obtener el desplazamiento:

$$U^{\Delta T} \equiv U_y^A = \alpha\Delta TL \frac{\text{sen}}{\left( \text{sen}^2 + \text{cos}^2 \frac{12I}{AL^2} \right)} = \alpha\Delta TL \frac{\text{sen}}{\left( \text{sen}^2 + \frac{\text{cos}^2}{\psi} \right)} \quad (2.22)$$

donde  $\psi$  es un parámetro adimensional y está dado por la ecuación (2.23):

$$\psi = \frac{AL^2}{12I} \quad (2.23)$$

El desplazamiento a partir de una fuerza se obtiene de (Zhu et al., 2006) en la ecuación (2.23). El desplazamiento se obtiene a partir de una fuerza aplicada en la flecha del chevrón:

$$U^F \equiv U_y^A = F \frac{1}{2(\text{sen}^2 \frac{EA}{L} + \text{cos}^2 \frac{12EI}{L^3})} = \frac{FL}{EA} \frac{1}{2(\text{sen}^2 + \frac{\text{cos}^2}{\psi})} \quad (2.194)$$

La relación  $K_{tb}$  representa la rigidez de la viga y está dado por la siguiente ecuación (Zhu et al., 2006):

$$K_{tb} \equiv \frac{F}{U_y} = 2(\text{sen}^2 + \frac{\text{cos}^2}{\psi}) \frac{EA}{L} \quad (2.205)$$

En esta sección se realizó el análisis del microactuador chevrón, donde obtienen las ecuaciones que caracterizan a la fuerza (ecuación (2.19)) y desplazamiento (ecuaciones (2.21), (2.22) y (2.24)) presentes en el actuador. Estas ecuaciones serán útiles en el desarrollo de este trabajo.

## 2.5.2. Análisis eléctrico

Una parte del análisis de los microsistemas se centra en su comportamiento eléctrico. El actuador chevrón puede alimentarse por un voltaje o un potencial eléctrico, combinado esto con el coeficiente de la expansión térmica y el Efecto de Joule, se genera una deformación o desplazamiento y una fuerza direccional sobre un eje “Y” ( $U_y$  y  $F_y$  respectivamente), como se

muestra en la Figura 2.6. A partir de este efecto, se generan magnitudes físicas como la potencia, corriente eléctrica y gradiente de temperatura. Para evaluar el comportamiento eléctrico del dispositivo, es importante conocer las propiedades eléctricas del material para su fabricación.

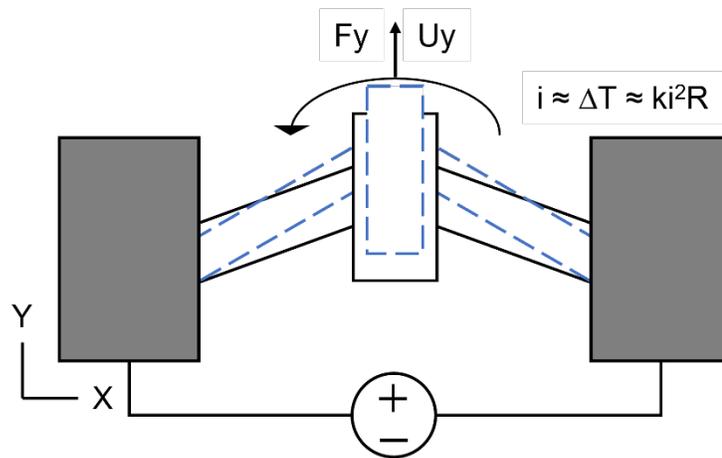


Figura 2.6. Microactuador Chevrón.

Un chevrón se puede interpretar como dos resistencias en serie y estas a su vez son un arreglo de 8 resistencias en paralelo, como se muestra en la Figura 2.7.

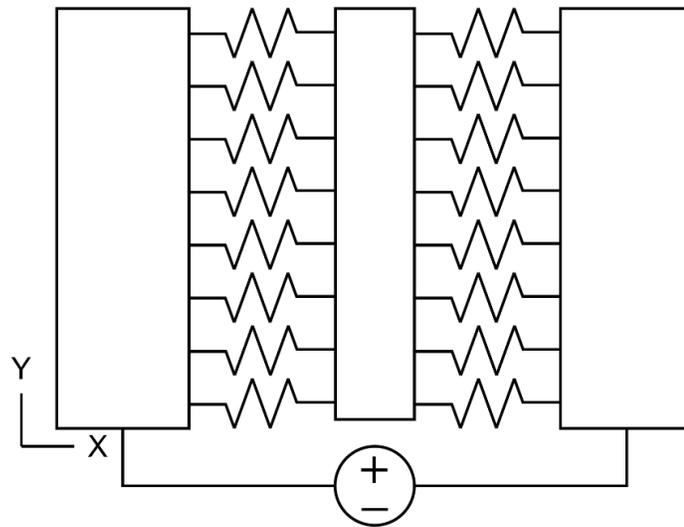


Figura 2.7. Diagrama eléctrico del chevrón (Cervantes Lozano, 2006).

Por lo tanto, el diagrama puede simplificarse como un arreglo de dos resistencias en paralelo como se muestra en la Figura 2.8.

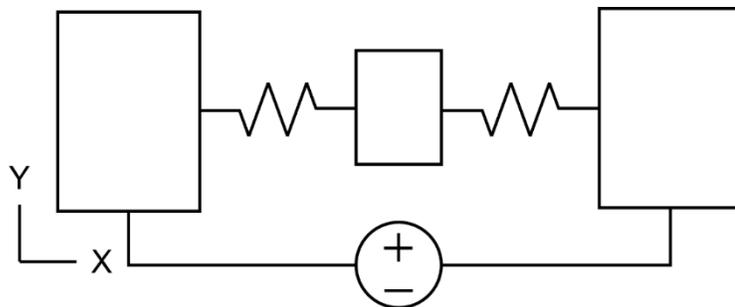


Figura 2.8. Diagrama eléctrico simplificado (Cervantes Lozano, 2006).

En la ecuación (2.26) se expresa la Ley de Ohm:

$$V = IR \quad (2.216)$$

donde  $I$  es la corriente [A] y  $R$  la resistencia [Ohm]. Para realizar el cálculo de la potencia disipada se hace uso de la ecuación (2.27):

$$P = VI \quad (2.227)$$

donde  $P$  es la potencia [W]. La resistencia de una viga o brazo se calcula como (A. Serway & Jewett Jr., 2009):

$$R_b = \frac{\rho L}{wt} \quad (2.238)$$

donde  $\rho$  es la resistividad del material [Ohm\*m],  $L$ ,  $w$  y  $t$  son longitud [m], ancho [m] y grosor [m] de la viga, respectivamente. Para calcular la resistencia en la mitad del chevrón  $R_m$ , partimos del arreglo de resistencias en paralelo (Cervantes Lozano, 2006):

$$R_m = \frac{1}{\frac{n}{R_b}} = \frac{R_b}{n} = \frac{\frac{\rho L}{wt}}{n} = \frac{\rho L}{wtn} \quad (2.29)$$

donde  $n$  es la mitad de número par de brazos de chevrón [adimensional] y  $R_b$  es la resistencia en un brazo del chevrón [Ohm] (ecuación (2.28)). La resistencia total en el chevrón se obtiene a partir de la ecuación (2.30):

$$R_t = 2R_h \quad (2.30)$$

Por último, para obtener la corriente que circula en el chevrón se despeja la corriente en la ecuación (2.25), donde también se sustituye  $R_t$  de la ecuación (2.30):

$$I = \frac{V}{R_t} = \frac{V}{2R_m} = \frac{V}{2 \frac{\rho L}{wt_n}} = \frac{Vwt_n}{2\rho L} \quad (2.31)$$

En esta sección se realizó el análisis eléctrico, del microactuador chevrón donde obtienen las ecuaciones que caracterizan la resistencia eléctrica (ecuación (2.29)) y la corriente (ecuación (2.30)). Estas ecuaciones serán útiles en el desarrollo de este trabajo.

## 2.6. Modelado del pantógrafo

El pantógrafo es un arreglo mecánico basado en la geometría de un paralelogramo, es un instrumento que se utiliza en dibujo para reproducir una figura geométrica es una escala mayor o menor a la figura original (Patil et al., 2018). Un pantógrafo tradicional consta de varios enlaces rígidos conectados entre sí por un perno. Dicho mecanismo es difícil de construir en micro escala debido a las limitaciones debido a los métodos de fabricación, la fricción y los desafíos de ensamblaje (Nielson & Howell, 2001). Los artículos que se encontraron presentan geometrías de pantógrafo como se muestra en la Figura 2.9. No son directamente aplicadas a micropinzas, en este caso se realiza una adaptación para este uso.

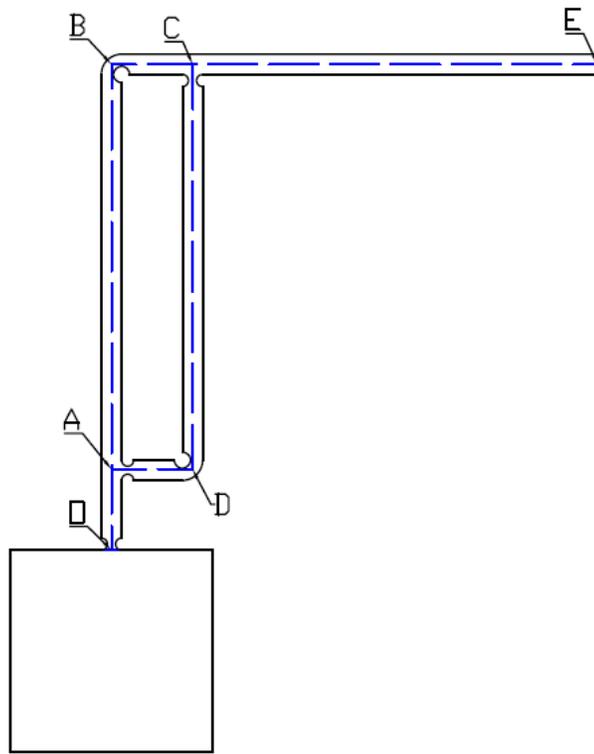


Figura 2.9. Geometría del pantógrafo (Patil et al., 2018).

En la Figura 2.9, O es el punto fijo del pantógrafo, D es la entrada del desplazamiento o fuerza aplicada al pantógrafo y E es la salida del desplazamiento, donde se obtiene una amplificación. Para calcular el factor de amplificación  $R$  de un pantógrafo se aplica la ecuación (2.32).

$$R = \frac{OE}{OD} = \frac{OB}{OA} = \frac{BE}{AD} \quad (2.32)$$

Las bisagras de flexión circular son ampliamente usadas en giroscopios, acelerómetros, balanzas y enlaces multiplicadores como se muestra en la Figura 2.10. La micromanipulación en la microfabricación, montaje de microsistemas y manipulación de células, ha surgido como un avance en la tecnología, lo que incrementa el uso de la bisagra de flexión, para aumentar

la precisión de los objetos a manipular siendo los movimientos menores a  $100\mu\text{m}$  (Yong et al., 2008).

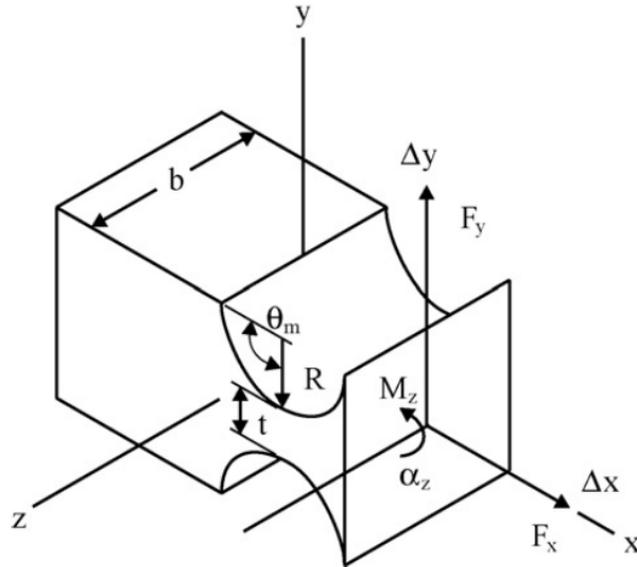


Figura 2.10. Diagrama de la bisagra de flexión (Yong et al., 2008).

En el diseño de la bisagra de flexión se tiene una relación  $t/R$ , donde  $t$  es el ancho de la bisagra y  $R$  su radio. Las bisagras se clasifican en 3 categorías: delgada, intermedia y gruesa. La relación en las bisagras delgadas es:  $t/R \leq 0.007$ , en las intermedias es:  $0.07 < t/R \leq 0.2$ , y en las gruesas es:  $0.2 < t/R \leq 0.6$  (Yong et al., 2008).

La rigidez de la bisagra de flexión determina la deformación elástica del mecanismo y puede calcularse a partir de ecuación (2.33) (Patil et al., 2018).

$$K = \frac{2Ebt^{2.5}}{9\pi R^{0.5}} \quad (2.33)$$

donde  $E$  es el módulo de Young [Pa],  $b$  es el grosor [m],  $t$  es la distancia entre los radios [m] y  $R$  es el radio las perforaciones en la bisagra [m].

El análisis se inicia a partir del momento de flexión en la sección transversal de la bisagra circular que es igual al producto cruz del vector  $r$  y el vector  $F$ . Donde los vectores  $r$  y  $F$  son componentes en dirección perpendicular como se muestra en la Figura 2.11.

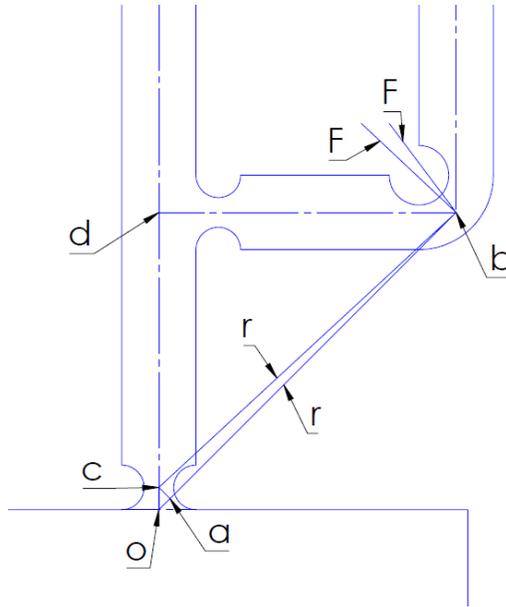


Figura 2.11. Diagrama de los vectores en el pantógrafo. Adaptado de (Patil et al., 2018).

A partir del Teorema de Pitágoras, se obtiene la distancia  $ob$ :

$$ob = \sqrt{od^2 + bd^2} \quad (2.34)$$

Al seguir aplicando el Teorema de Pitágoras se puede obtener la distancia  $ab$ :

$$ab = ob - (oc * \cos 45) \quad (2.35)$$

Se sigue empleando el Teorema de Pitágoras para obtener la distancia  $bc$ :

$$\bar{r} = bc = \sqrt{ab^2 + ac^2} \quad (2.36)$$

Para obtener el  $\cos \theta$  se aplica su definición:

$$\cos \theta = \frac{ab}{bc} \quad (2.37)$$

Se sustituyen las ecuaciones (2.35) y (2.36) para obtener el Momento de flexión del pantógrafo en la ecuación (2.38) (Patil et al., 2018):

$$M_z = \bar{r} * \bar{F} = \bar{r} * F \cos \theta \quad (2.38)$$

Donde  $\bar{r}$  es la distancia [m] y  $F$  es la fuerza [N] aplicada a la entrada del pantógrafo. Para calcular el Esfuerzo de flexión se emplea la ecuación (2.39), (Patil et al., 2018):

$$\sigma_b = \frac{K_t * M_z * \left(\frac{t}{2}\right)}{I} \quad (2.249)$$

donde  $K_t$  es el Factor de concentración de esfuerzo [Pa]. Para calcular el Factor de concentración de esfuerzo se emplea la siguiente ecuación (D. Pilkey et al., 2012):

$$K_t = 3.065 - 6.637 \left(\frac{2 * R}{w}\right) + 8.229 \left(\frac{2 * R}{w}\right)^2 - 3.636 \left(\frac{2 * R}{w}\right)^3 \quad (2.40)$$

donde  $R$  es el radio de la bisagra [m] y  $w$  es el ancho de la viga [m].

En esta sección se realizó el análisis mecánico del pantógrafo donde obtienen las ecuaciones que lo caracterizan. El Momento de flexión (ecuación (2.38)), Factor de concentración de esfuerzo (ecuaciones (2.40)) y el Esfuerzo de flexión (ecuación (2.39)). Estas ecuaciones serán útiles en el desarrollo de este trabajo.

## 2.7. Tecnología de fabricación

El proceso de fabricación de silicio sobre aislante (SOI por sus siglas en inglés) se llevó a cabo en colaboración con el Dr. José Mireles Jr. García del Centro Investigación en Ciencia y Tecnología Aplicada de la Universidad Autónoma de Ciudad Juárez (CICTA - UACJ) y el Dr. Jesús Javier Alcantar Peña del Centro de Ingeniería y Desarrollo Industrial (CIDESI). Para la fabricación del dispositivo se adquirieron obleas SOI (ULTRASIL Corp), con una estructura cristalina (1,0,0). La oblea SOI se compone de niveles que son, nivel estructural de  $70\mu\text{m}$ , nivel de óxido de silicio de  $2\mu\text{m}$  y nivel de soporte de  $350\mu\text{m}$ , con una resistividad que tiene una variación de  $0.001$  a  $0.005 \Omega\cdot\text{cm}$ . A continuación, se explica el proceso de fabricación (Universidad Autónoma de Ciudad Juárez, 2016).

En la Figura 2.12 se muestra una sección de corte transversal de la oblea de silicio SOI, donde se presenta los componentes: (101) oblea de estructura, (102) óxido de silicio y (103) la oblea de soporte.

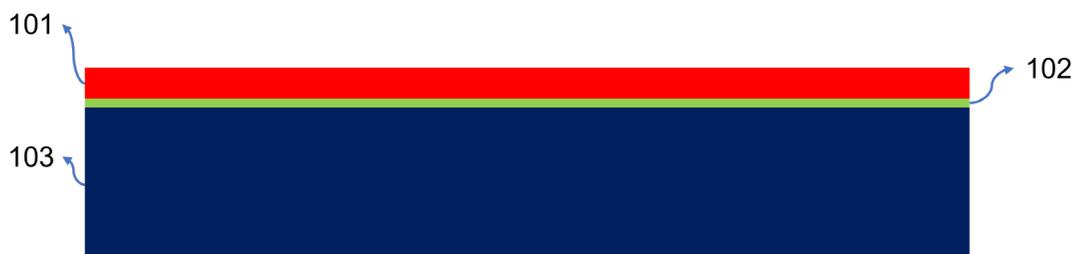


Figura 2.12. Oblea SOI. Adaptación de (Universidad Autónoma de Ciudad Juárez, 2016).

En la Figura 2.13 se muestra una sección de corte transversal de la oblea SOI, donde se muestra la alineación de la litografía (201) sobre el elemento (101), la alineación cuanta con un error permisible de +/- 1µm.

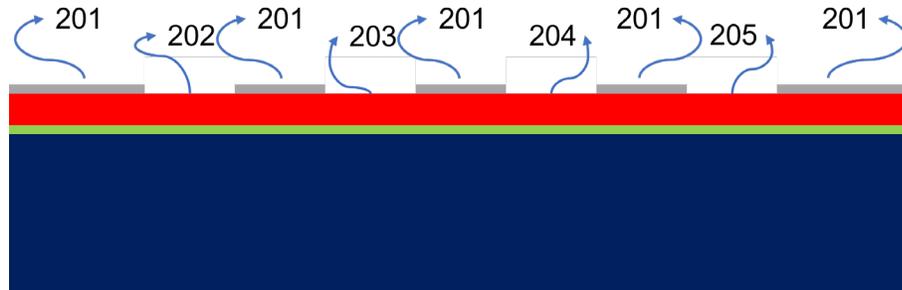


Figura 2.13. Alineación de fotolitografía. Adaptación de (Universidad Autónoma de Ciudad Juárez, 2016).

En la Figura 2.14 se muestra una sección de corte transversal de la oblea SOI, donde se muestran los pasos del proceso de fabricación donde se desarrolla un maquinado del elemento (101) a través de los elementos (202) – (205) con una profundidad (301) de acuerdo con los parámetros del diseño. El maquinado se puede llevar a cabo por Grabado iónico reactivo profundo (DRIE, por sus siglas en inglés) o por maquinado húmedo (KOH o TMAH).

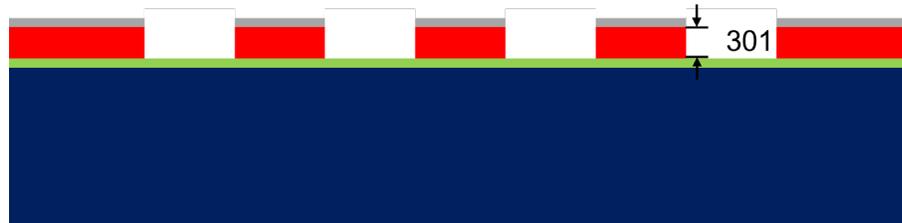


Figura 2.14. Maquinado en la oblea de estructura. Adaptación de (Universidad Autónoma de Ciudad Juárez, 2016).

En la Figura 2.15 se muestra una sección de corte transversal de la oblea SOI, donde se coloca una nueva litografía (401) sobre el elemento (101), alineándola para un mejor desempeño.

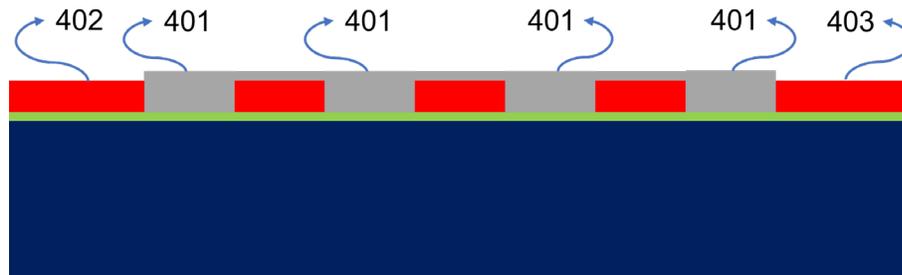


Figura 2.15. Alineación de fotolitografía. Adaptación de (Universidad Autónoma de Ciudad Juárez, 2016).

En la Figura 2.16 se muestra una sección de corte transversal de la oblea SOI, donde se muestra el depósito de un metal en los elementos (402) y (403) con un espesor de acuerdo con los parámetros del diseño.

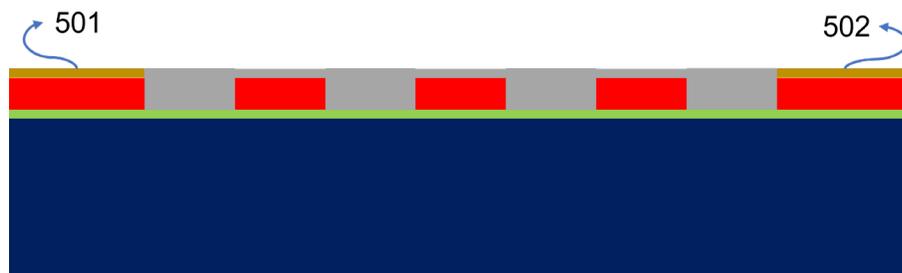


Figura 2.16. Depósito de metal. Adaptación de (Universidad Autónoma de Ciudad Juárez, 2016).

El depósito de metal se puede llevar a cabo por Deposición Física de Vapor de haz de electrones (EBPVD por sus siglas en inglés).

En la Figura 2.17 se muestra una sección de corte transversal de la oblea SOI, en el cual se agrega una capa protectora sobre los elementos que se encuentran en (101). Esta capa protectora puede ser SU8 o KMPR, también

se puede utilizar una oblea temporal de soporte unida con resina fácil de disolver en acetonas u otros disolventes.

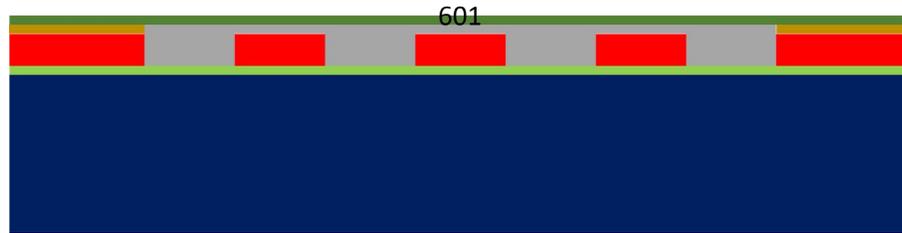


Figura 2.17. Colocación de la capa de protección. Adaptación de (Universidad Autónoma de Ciudad Juárez, 2016).

En la Figura 2.18 se muestra una sección de corte transversal de la oblea SOI, donde se muestra la alineación de la litografía (701) sobre el elemento (103), la alineación cuanta con un error permisible de  $\pm 1\mu\text{m}$ .

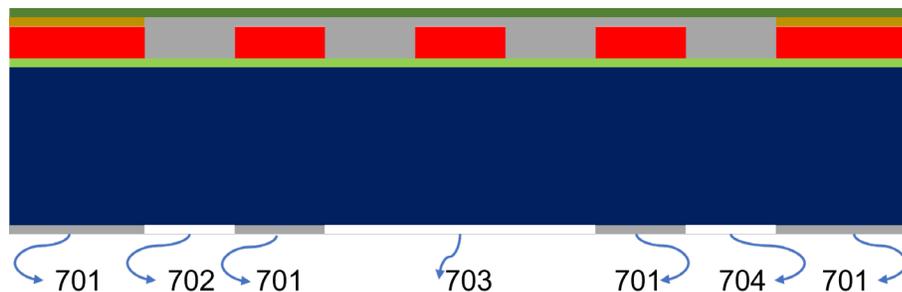


Figura 2.18. Alineación de la litografía inferior. Adaptación de (Universidad Autónoma de Ciudad Juárez, 2016).

En la Figura 2.19 se muestra una sección de corte transversal de la oblea SOI, donde se muestran los pasos del proceso de fabricación donde se desarrolla un maquinado del elemento (103) a través de los elementos (702) – (704) con una profundidad (801) de acuerdo con los parámetros del diseño.



Figura 2.19. Maquinado de liberación del dispositivo. Adaptación de (Universidad Autónoma de Ciudad Juárez, 2016).

En la Figura 2.20 se muestra una sección de corte transversal de la oblea SOI, donde se presenta la eliminación de la capa de protección (601), así como parte de la capa (102) que se encuentran descubiertas entre las aberturas (202) – (205) y (702) – (704), en los elementos (101) y (103). Las secciones descubiertas son (901).

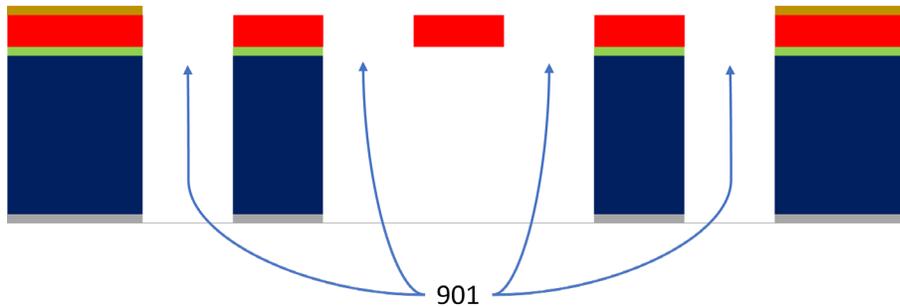


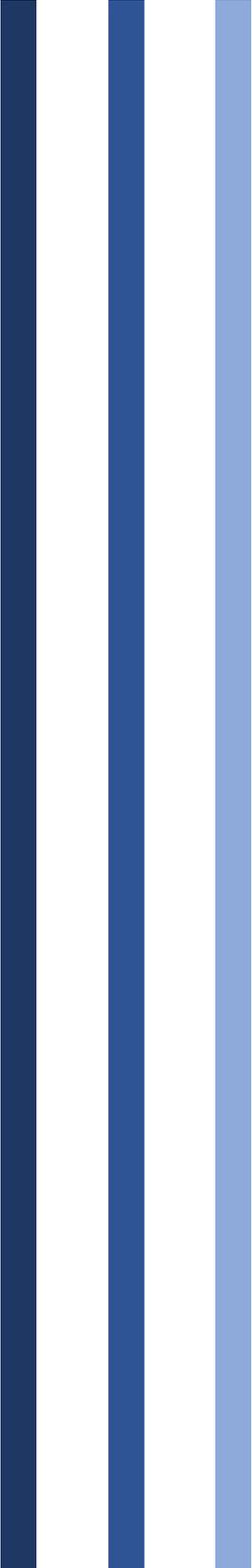
Figura 2.20. Maquinado de liberación del dispositivo. Adaptación de (Universidad Autónoma de Ciudad Juárez, 2016).

## 2.8. Silicio

En la fabricación de MEMS, el silicio es uno de los materiales más utilizados. En la Tabla 2.6 se presentan los parámetros eléctricos y mecánicos del silicio. Cabe señalar que la resistividad del material puede variar de acuerdo con el fabricante y debe verificarse el valor para el análisis matemático y numérico.

Tabla 2.6. Parámetros eléctricos y mecánicos del silicio.

Parámetros	Silicio (Yang & Qingsong, 2017)
Densidad, $\rho$ (kg/m <sup>3</sup> )	2329
Módulo de Young, E (GPa)	130.1
Coefficiente de expansión térmica, $\alpha$ (1/K)	2.568 e-6
Conductividad térmica, $\kappa$ (W/ m*K)	148
Razón de Poisson, $\nu$	0.33
Calor específico, Cp (J/ kg*K)	712
Resistividad, $\rho$ ( $\Omega$ *m)	3 e-5
Punto de fusión, (°C)	1450
Esfuerzo último (GPa)	7



# ***Capítulo 3.***

## ***Metodología***

En este capítulo, se presenta la metodología que se siguió para la elaboración de esta tesis, con un ejemplo sencillo para explicar cada una de las etapas y los pasos que se siguieron desde la investigación, simulación y fabricación.

## 3.1. Introducción

Los métodos de investigación son técnicas que se utilizan para realizar las investigaciones que se llevan a cabo en distintos tipos de trabajos, tales como tesis licenciatura o posgrado y proyectos de investigación. Estas herramientas sirven para establecer un orden en la ejecución de los procesos a seguir. Existen diferentes tipos de diseño de investigaciones, los cuales se aplican de acuerdo con los objetivos a realizar (Gomez Bastar , 2012) (Tamayo y Tamayo, 2003) (Walliman, 2011). Con la metodología a desarrollar, se busca controlar todos los aspectos de la investigación, así como los cambios que se obtienen al modificar una variable independiente, esto es, sus efectos (Walliman, 2011).

## 3.2 Metodología

La metodología se estructuró a partir de las necesidades de este trabajo. En la Figura 3.1 se muestra el diagrama de la metodología de la tesis y de igual manera se explican cada una de estas etapas con los respectivos pasos que se emplearon. Esta metodología se aplica a cada uno de los capítulos de esta tesis.



Figura 3.1. Metodología de la tesis.

### 3.2.1 Idea

Con la idea inicial el proyecto se genera la pregunta de investigación, para después generar la hipótesis pertinente a la investigación, por último, se plantean los objetivos que se esperan obtener de la investigación. En la Figura 3.2 se presenta el diagrama de flujo de la idea.

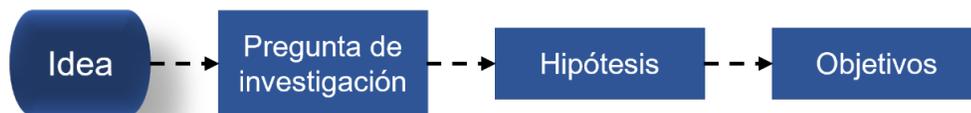


Figura 3.2. Proceso de la idea.

### 3.2.2 Investigación del estado del arte

En esta sección se parte de las fuentes de información del grupo de investigación de la Dra. Margarita Tecpoyotl Torres, una vez consultada la

información se investiga lo que se ha publicado en tesis, artículos y patentes para comprobar que sea pertinente la investigación. En la Figura 3.3 se presenta el diagrama de flujo de la investigación del estado del arte.

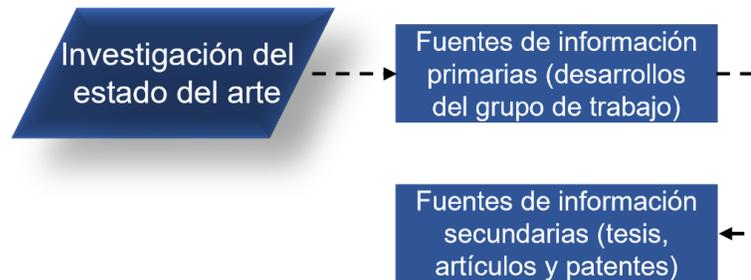


Figura 3.3. Proceso de Investigación del estado del arte.

### 3.2.3. Especificaciones de diseño

realizada la investigación pertinente se toma en cuenta toda la información recabada para empezar con el diseño del dispositivo tomando en cuenta los siguientes puntos:

- ❖ Selección del dispositivo
- ❖ Reconocer cada una de las partes del dispositivo
- ❖ Requerimientos y restricciones del dispositivo
- ❖ Determinar el tipo de material
- ❖ Tecnología de fabricación (Reglas de diseño)

Se selecciona el dispositivo a investigar como puede ser una micropinza impulsada por medio de un actuador chevrón, se reconoce que el chevron es un arreglo de vigas en voladizo, se analiza los requerimientos y las restricciones que puede tener el actuador. Se selecciona el material con el cual se va a fabricar y por último se analizan las reglas de diseño para al

tener un prototipo final las modificaciones sean las menores. En la Figura 3.4 se presenta el diagrama de flujo de las especificaciones del diseño.



Figura 3.4. Proceso de Especificaciones de diseño.

### 3.2.4. Diseño preliminar

Al tener identificada cada una de las partes del dispositivo se inicia con el diseño preliminar el cual consiste en los siguientes puntos:

- ❖ Principios físicos
- ❖ Condiciones iniciales y de frontera
- ❖ Modelado matemático
- ❖ Modelado por medio de Método de Elemento Finito

Se tienen que conocer los principios físicos con los que opera el dispositivo y las condiciones iniciales y de frontera con los que se va a operar. Se realiza el análisis matemático del dispositivo y el modelado por medio de Método de Elemento Finito donde se pueden llevar a cabo de ser necesario la parametrización de los elementos que compone a la micropinza. En la Figura 3.5 se presenta el diagrama de flujo del diseño preliminar.

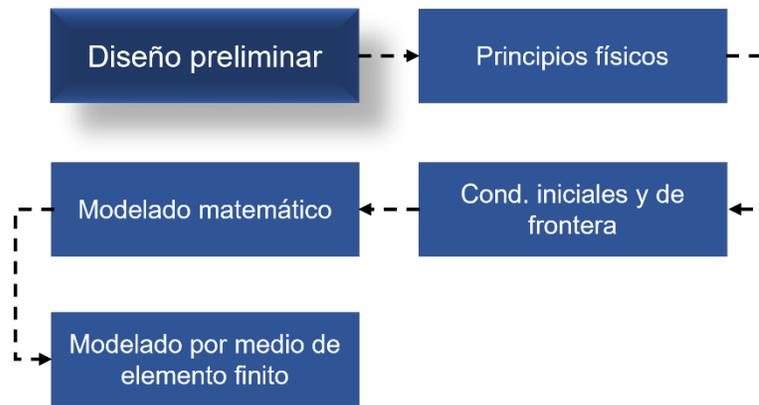


Figura 3.5. Proceso de Diseño preliminar.

### 3.2.5. Diseño validado

Realizado el análisis matemático y por medio de Método de Elemento Finito se comparan entre sí los resultados para conocer su comportamiento y error en los dispositivos, al validar los resultados se pasa a la fabricación.

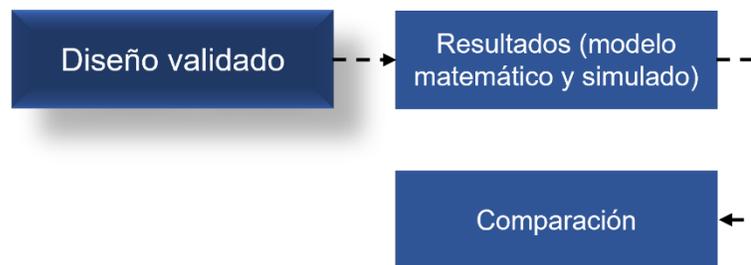


Figura 3.6. Proceso de Diseño validado.

### 3.2.6. Fabricación

Al tener un prototipo viable se pasa a la fabricación y se siguen los siguientes puntos:

- ❖ Reglas de diseño
- ❖ Ajustes y optimización de espacio.

- ❖ Prueba de fabricación

Se comprueba que las reglas de diseño se siguieron y de no ser el caso se realizan los ajustes. También se integran los diseños a los datos de separación para tener la mayor cantidad de dispositivos en el menor espacio, una forma de optimizar es que dos dispositivos compartan un contacto lo que disminuye el espacio y la complejidad al momento de realizar las pruebas. Se realiza una prueba de fabricación donde se puede observar por medio del microscopio si es necesario se realizan los ajustes a los diseños (engrosamientos). Al comprobar que los diseños están listos para la fabricación se procede a realizarla.

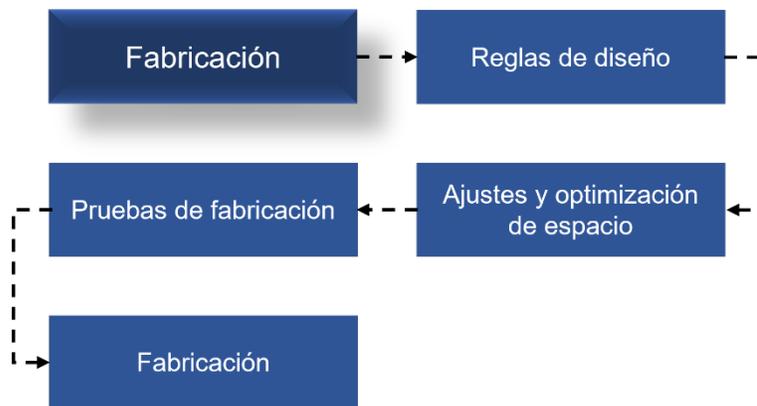


Figura 3.7. Proceso de Fabricación.

### 3.2.7. Pruebas

Una vez terminada la fabricación se procede a hacer las pruebas del dispositivo como son:

- ❖ Fuerza
- ❖ Desplazamiento

Las pruebas se llevaron a cabo para conocer el comportamiento de la micropinza comparando los resultados experimentales con los resultados analíticos y de la simulación.

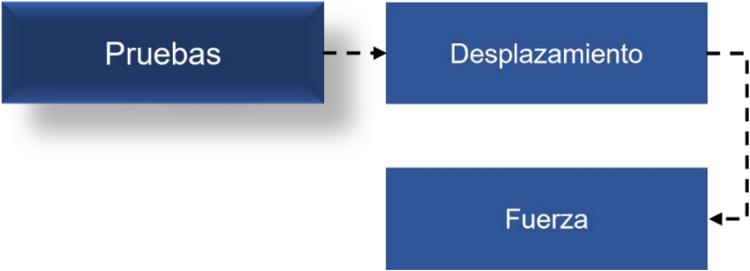
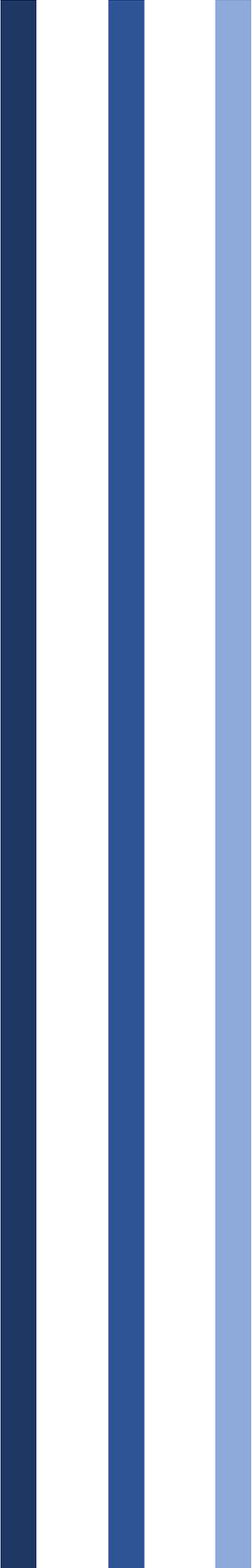


Figura 3.8. Proceso de Pruebas.



# **Capítulo 4. Diseño y simulación**

Es este capítulo se desarrolla el análisis matemático, así como la simulación de los elementos que componen a la micropinza, empezando por la viga en voladizo, siguiendo con el chevrón y por último el pantógrafo.

# Capítulo 4. Diseño y simulación

El análisis matemático y numérico de un dispositivo nos permiten conocer su desempeño. Se busca que ambas aproximaciones sean lo más cercanas posible, incrementando la precisión del modelado matemático. El uso de las simulaciones permite acelerar el proceso de diseño, ya se pueden realizar modificaciones a los diseños de manera rápida y encontrar la configuración para la micropinza más adecuada.

## 4.1. Diseño de la viga en voladizo

La viga en voladizo es una barra fijada en un extremo a un soporte y del otro lado está libre. El soporte puede ser alimentado por medio de una fuente de temperatura, lo cual genera una expansión térmica en la viga. La viga en voladizo se puede usar como resortes suaves que son necesarios en sensores y actuadores (Kaajakari, 2009).

### 4.1.1. Viga

Se considera en este trabajo necesario el diseño y parametrización de una viga en voladizo para su uso en el chevrón que servirá de base a la micropinza a diseñar. Las medidas iniciales que se tomaron para la viga en voladizo se presentan en la Tabla 4.1 y el diagrama se muestra en la Figura 4.1.

Tabla 4.1.- Medidas de la viga en voladizo

Variable	Descripción	Tamaño ( $\mu\text{m}$ )
<b><i>L</i></b>	Longitud de la viga	200
<b><i>W</i></b>	Ancho de la viga	3

$t$	Grosor de la viga	5
-----	-------------------	---

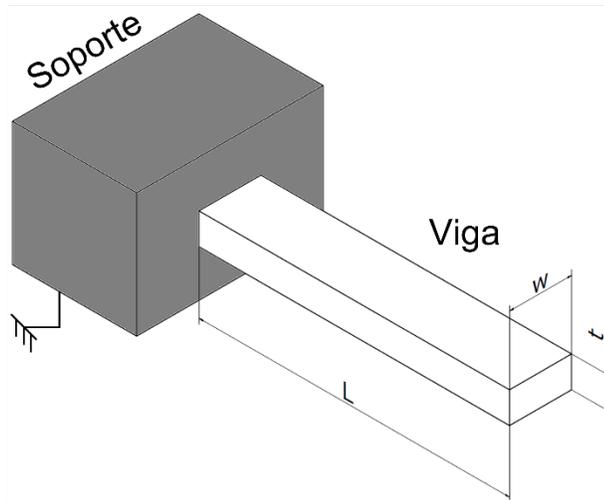


Figura 4.1. Viga en voladizo.

Se realizó el cálculo del desplazamiento y fuerza de la viga en voladizo de manera analítica y mediante simulación, para el análisis se consideran las ecuaciones de la sección 2.4 y en el Anexo A se aborda el proceso de la simulación en el software ANSYS™ Workbench. En la Figura 4.2 se puede observar la distribución de temperatura en la viga, en un extremo se tiene una temperatura de 20° C y en el otro extremo se tiene una temperatura de 80° C.

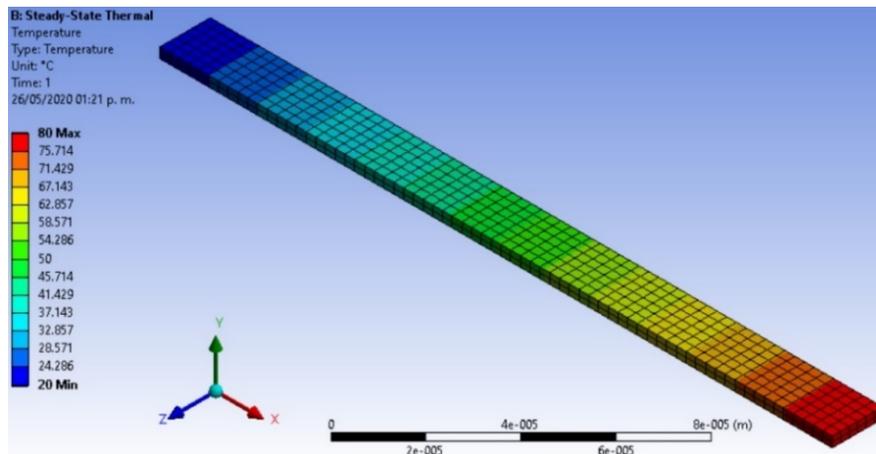


Figura 4.2. Distribución de temperatura en la viga en voladizo.

En la Tabla 4.2 se presentan los resultados obtenidos del análisis de la viga en voladizo y en la Figura 4.3 se observa el desplazamiento de la viga en voladizo.

Tabla 4.2 Comparación de desplazamiento analítico y simulado.

Desplazamiento analítico (nm)	Desplazamiento simulado (nm)	Error %
30.81	25.765	16.39%

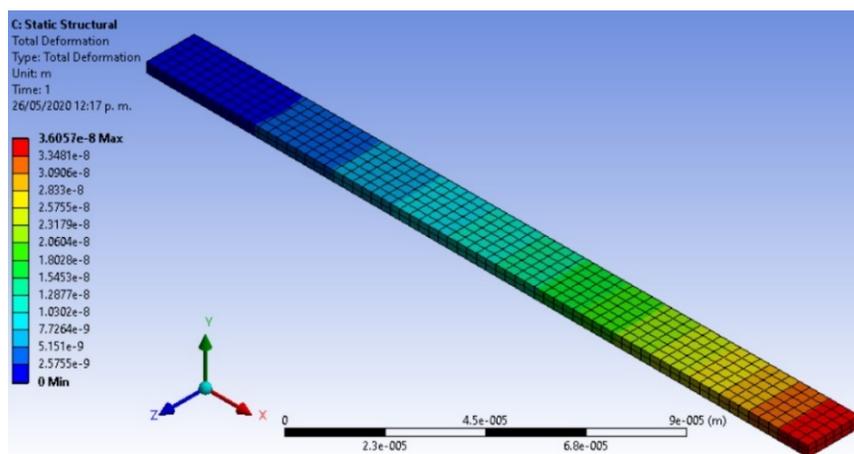


Figura 4.3. Desplazamiento en la viga.

En la Tabla 4.3 se presentan los resultados obtenidos del análisis de la viga en voladizo y en la Figura 4.4 se observa la expansión de la viga en voladizo.

Tabla 4.3. Comparación de fuerza analítica y simulada.

Fuerza analítico ( $\mu\text{N}$ )	Fuerza simulado ( $\mu\text{N}$ )	Error %
902.06	761.71	15.55%

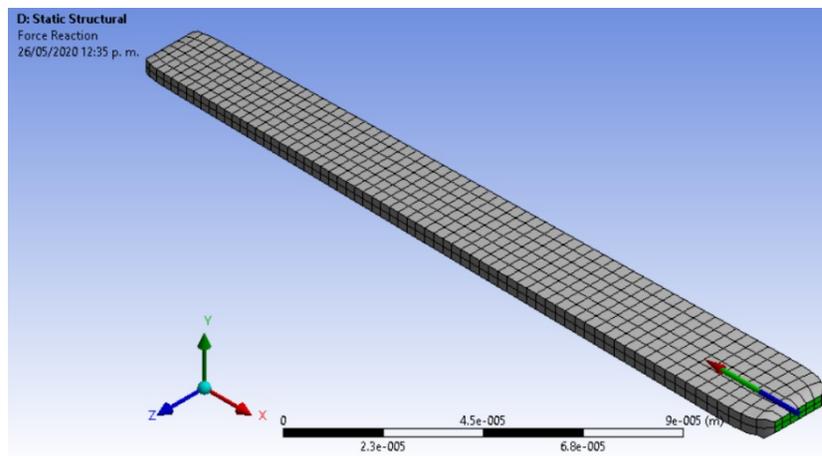


Figura 4.4. Fuerza de reacción en la viga.

El error en el desplazamiento y fuerza que se obtuvo de la viga en voladizo está dentro del rango que se presenta en (Kaajakari, 2009), el cual va de 10 a 20% para un dispositivo similar y estos se presentan en las Tablas 4.2 y 4.3.

## 4.1.2. Parametrización

La parametrización de un dispositivo permite conocer su comportamiento y al cambiar alguna de sus variables conocidas cambia el desempeño del dispositivo. Para la parametrización del actuador viga en voladizo se tomó

como valor a modificar la temperatura. Se realizo un barrido de la temperatura de 10 hasta 200° C haciendo saltos de 10 grados. En las Figuras 4.5 y 4.6, se muestran las gráficas de la Parametrización del desplazamiento y fuerza respectivamente.

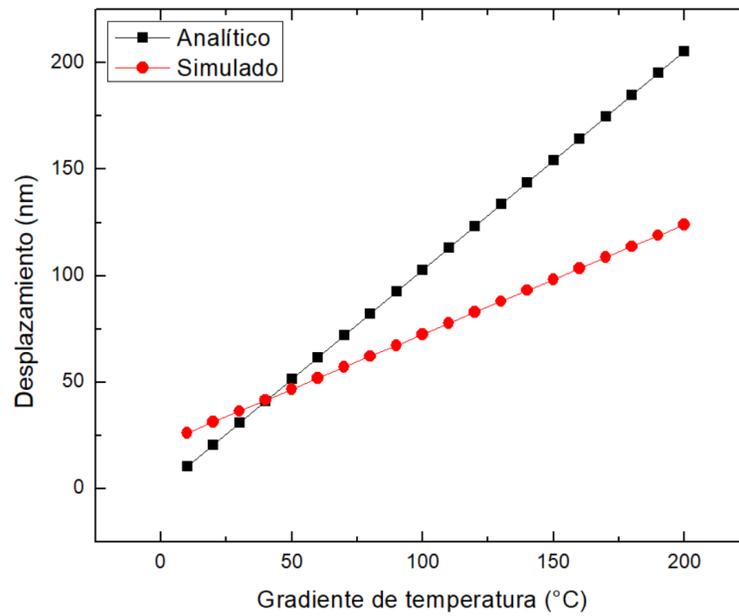


Figura 4.5. Parametrización de desplazamiento con respecto a la temperatura.

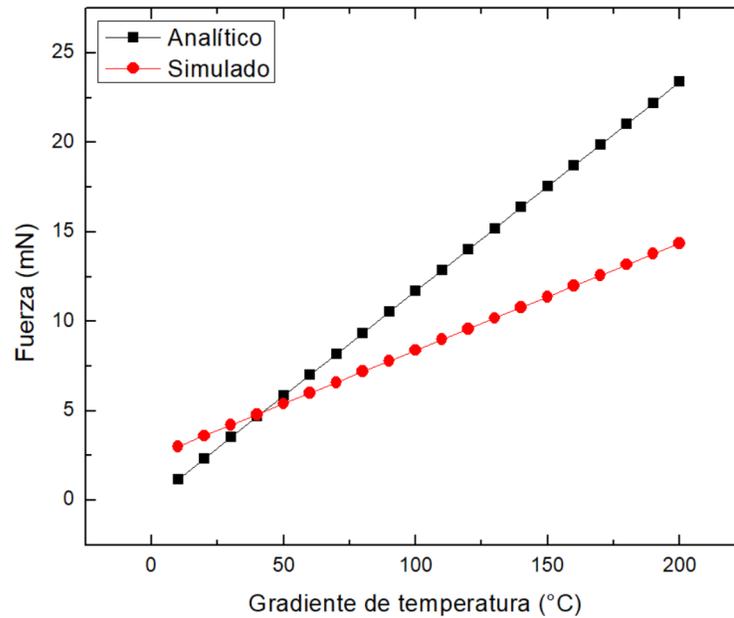


Figura 4.6. Parametrización de la fuerza con respecto a la temperatura.

La simulación mediante el Método de Elemento Finito permite validar la aproximación analítica, al incrementar la temperatura se empieza a generar un desapego en el comportamiento del dispositivo como se observa en las Figuras 4.5 y 4.6. Debe señalarse que hay valores considerados como constantes, tales como el coeficiente de expansión térmica, el cual también depende de la temperatura.

### 4.1.3. Análisis modal

El análisis modal es el proceso de determinar las características dinámicas de un dispositivo como las frecuencias naturales. Para el análisis modal se tomaron las ecuaciones de la sección 2.4 se realizó el análisis modal analítico y simulado y se presenta en la Tabla 4.4 y en las Figuras 4.7 la primera frecuencia modal de la viga.

Tabla 4.4. Comparación de la frecuencia.

Frecuencia analítico (Hz)	Frecuencia simulado (Hz)	Error %
90541.40	91168	0.68

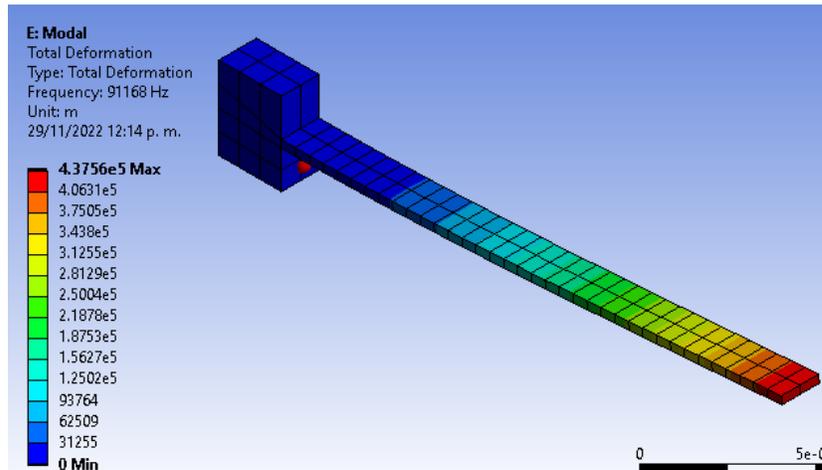


Figura 4.7. Primera frecuencia modal de la viga en voladizo.

El análisis modal permite conocer la frecuencia natural en la cual la viga tendrá un trabajo óptimo.

#### 4.1.4. Corrección en el diseño

Con el avance de la tesis se hicieron modificaciones al diseño de la viga en voladizo, esto se debe a que las obleas de silicio sobre aislante que se adquirieron para el proyecto son de un grosor de 70  $\mu\text{m}$  y no de 15  $\mu\text{m}$  como se tenía previsto. En la Tabla 4.5 se presentan las medidas finales del dispositivo.

Tabla 4.5. Medidas finales de la viga en voladizo.

Variable	Descripción	Tamaño ( $\mu\text{m}$ )
<b>L</b>	Longitud de la viga	400

<b><i>W</i></b>	Ancho de la viga	5
<b><i>t</i></b>	Grosor de la viga	70

En la Figura 4.8 se presenta la distribución de la Temperatura en la viga, donde se tiene un gradiente de temperatura de 60° C.

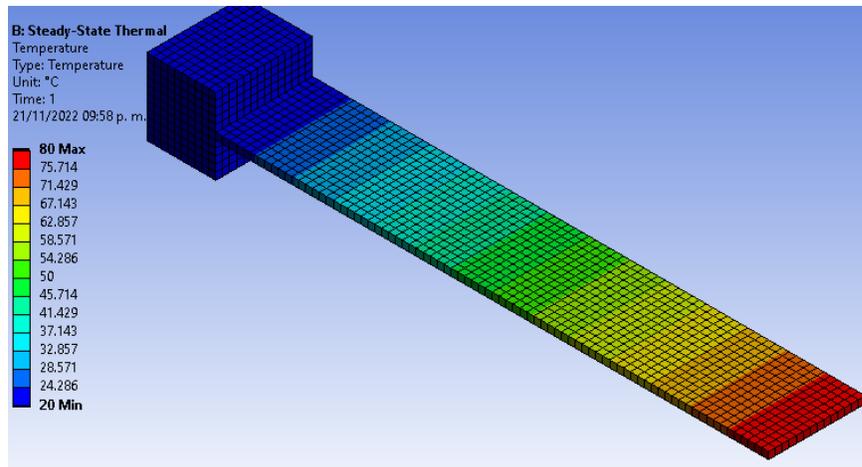


Figura 4.8. Distribución de temperatura en la viga en voladizo.

En la Tabla 4.6 se presentan los resultados analíticos y simulados del desplazamiento y en la Figura 4.9 se presenta la distribución del desplazamiento en la viga.

Tabla 4.6. Resultado del desplazamiento de la viga en voladizo.

Desplazamiento analítico (nm)	Desplazamiento simulado (nm)	Error %
61.63	51.83	15.90%

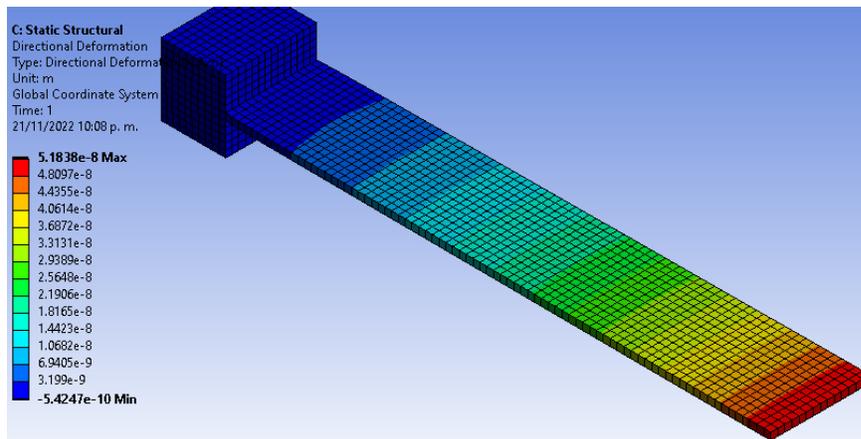


Figura 4.9. Distribución del desplazamiento en la viga en voladizo.

En la Tabla 4.7 se presentan los resultados analíticos y simulados de la fuerza y en la Figura 4.10 se presenta la distribución de la fuerza en la viga.

Tabla 4.7. Resultado de la fuerza en la viga en voladizo.

Fuerza analítico (mN)	Fuerza simulado (mN)	Error %
7.02	5.99	14.67%

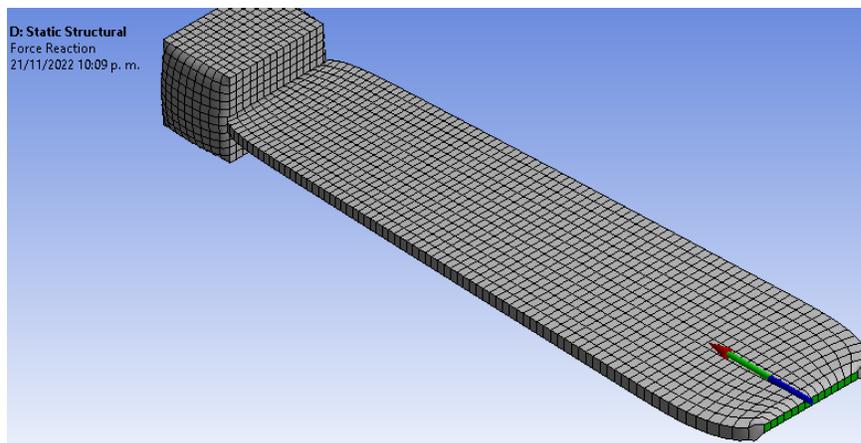


Figura 4.10. Distribución de la fuerza en la viga en voladizo.

En la Tabla 4.8 se presentan los resultados analíticos y simulados de la frecuencia modal y en la Figura 4.11 se presenta la distribución de la frecuencia modal en la viga.

Tabla 4.8. Resultado de la frecuencia modal de la viga en voladizo.

Frecuencia analítico (Hz)	Frecuencia simulado (Hz)	Error %
37725.58	38245	1.35

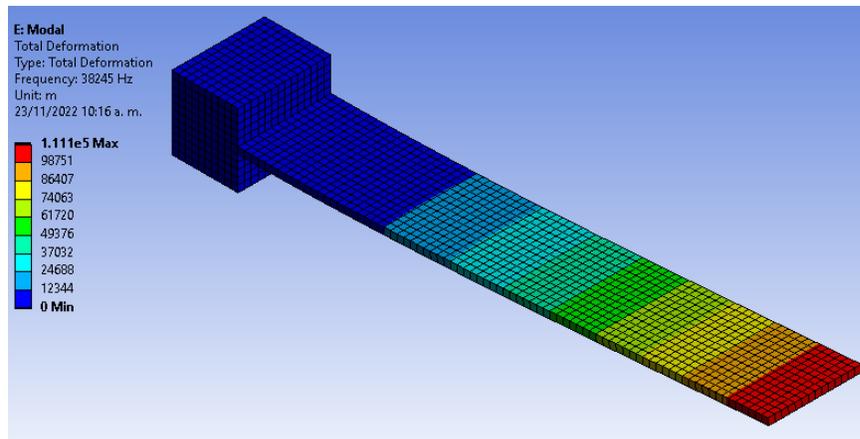


Figura 4.11. Primera forma modal de la viga en voladizo.

Como se puede observar al incrementar las dimensiones del dispositivo se tiene un mejor desempeño ya que se tiene una mayor masa y esto beneficia en que se incremente el desplazamiento y la fuerza al momento de su trabajo. El error presente en este nuevo diseño es menor al diseño anterior, lo cual beneficia a este trabajo.

## 4.2. Diseño del actuador chevrón

A continuación, se realiza la validación del modelo teórico con la simulación del micro actuador chevrón. La simulación se realizó utilizando los mismos materiales que en el caso de la microviga en voladizo. El microactuador

chevrón se excita en las anclas por medio de un potencial eléctrico o una fuente de alimentación térmica. Esta excitación por el coeficiente de expansión térmica del material y el Efecto de Joule genera una deformación o desplazamiento con una fuerza direccional sobre el eje Y. Este principio de funcionamiento permite proponer las dimensiones de la estructura. Las anclas además de funcionar como elementos de sujeción son utilizadas para alimentar a la estructura, ya sea mediante una fuente de voltaje o una fuente de energía térmica, por lo que deben ser lo suficientemente robustas. Las reglas de diseño proporcionan el tamaño mínimo de las mismas. Sobre el tamaño de las vigas, debe cuidarse que no tengan un largo excesivo y un ancho muy delgado, puesto que podría colapsarse o bien fracturarse. Las medidas para el chevrón se presentan en la en la Tabla 4.9. y el diagrama en la Figura 4.12.

Tabla 4.9. Medidas del chevrón.

Variable	Chevrón	Tamaño ( $\mu\text{m}$ )
$L_b$	Largo de la viga	200
$W_b$	Ancho de la viga	3
$\theta$	Angulo de la viga	0.9
$L_a$	Largo del ancla	250
$W_a$	Ancho del ancla	120
$L_s$	Largo de la flecha	120
$W_s$	Ancho de la flecha	25
$G$	Espacio entre vigas	5
$t$	Grosor	15
$N$	Número de brazos	16

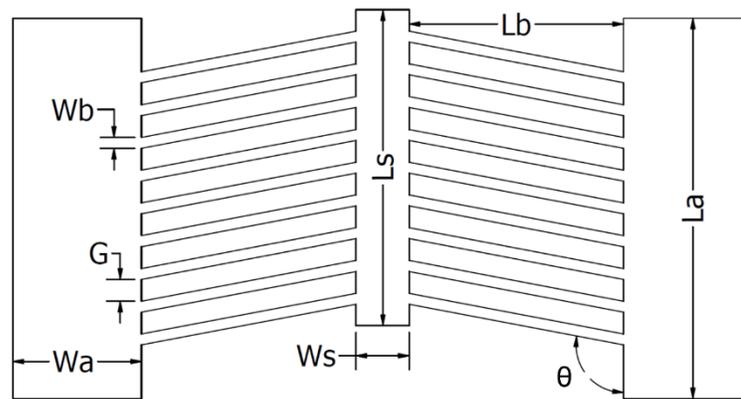


Figura 4.12. Diagrama del chevrón. Fuente: elaboración propia.

## 4.2.1. Parametrización del chevrón

La parametrización del chevrón permite conocer su comportamiento. Al modificar elementos que pertenecen al chevrón de manera individual permite conocer las posibles variaciones en el desempeño del desplazamiento y la fuerza. Se tomaron en cuenta 3 grosores (10, 15 y 20  $\mu\text{m}$ ) para la parametrización y un gradiente de temperatura de 60° C (en un ancla se alimenta con 82 °C y en la otra con 22 °C). En el Anexo B se aborda el proceso de la simulación en el software ANSYS™ Workbench. Los elementos que se modificaron son los siguientes:

- ❖ Ángulo de predoblamiento en la viga
- ❖ Grosor del dispositivo
- ❖ Ancho de la viga
- ❖ Largo de la viga
- ❖ Gradiente de temperatura

### 4.2.1.1. Ángulo

Se presenta una parametrización del ángulo de predoblamiento en la viga, esto sirve para comprobar el ángulo donde se obtiene el mayor desplazamiento, como se muestra en las Figuras 4.13 y 4.14.

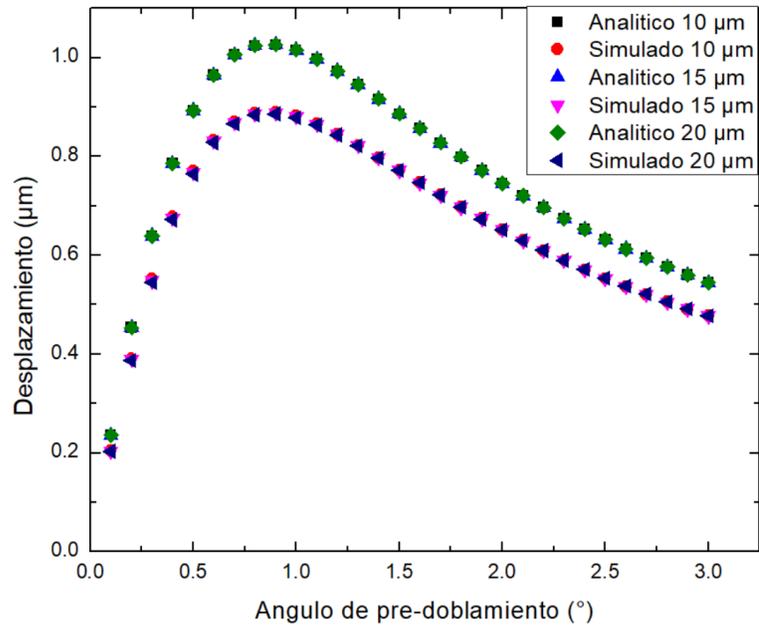


Figura 4.13. Parametrización del desplazamiento con respecto al ángulo.

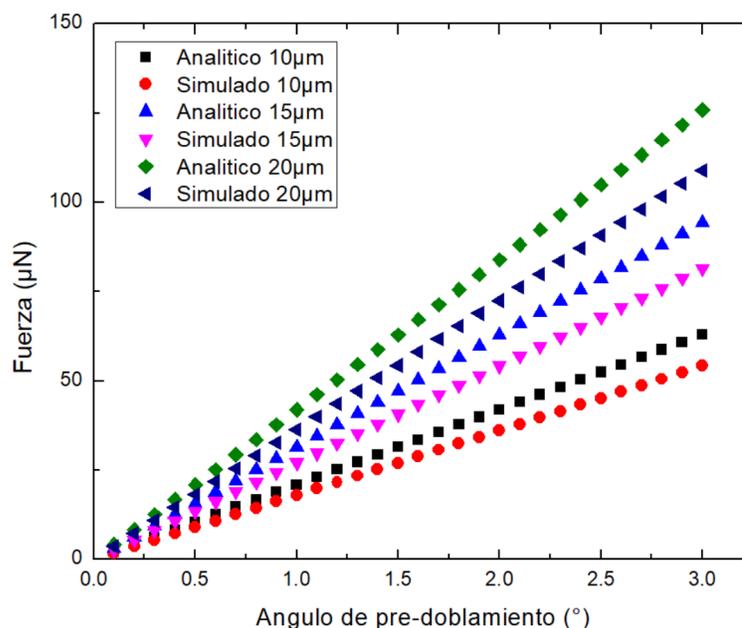


Figura 4.14. Parametrización de la fuerza con respecto al ángulo. Fuente: elaboración propia.

En las gráficas de las Figuras 4.13 y 4.14, se puede observar cual es el punto máximo en el desplazamiento y fuerza, el mayor desplazamiento se encuentra a 0.9 grados, ya que antes o después el desplazamiento es menor. Se puede observar un crecimiento lineal en la fuerza del actuador, pero ya que se requiere el chevrón como método de actuación para una micropinza con un desplazamiento amplio, se seleccionó el ángulo de 0.9°, donde se tiene el mayor desplazamiento con una fuerza considerable. Para las caracterizaciones siguientes considera a 0.9° como ángulo de predoblamiento.

#### 4.2.1.2. Grosor

La siguiente parametrización realizada es la del grosor del dispositivo, a partir del grosor de la oblea SOI, se pueden fabricar dispositivos de 10  $\mu\text{m}$  de grosor, por lo que se tomaron 3 medidas de grosor, pero en esta parametrización se toman desde 1 hasta 30  $\mu\text{m}$ , como se muestran en las

Figuras 4.15 y 4.16, de desplazamiento y fuerza contra el grosor del dispositivo.

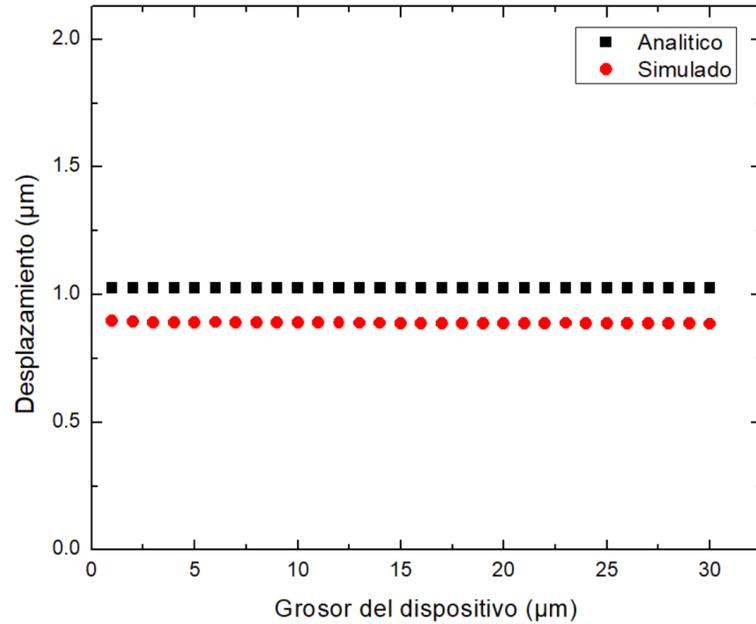


Figura 4.15. Parametrización del desplazamiento con respecto al grosor del dispositivo.

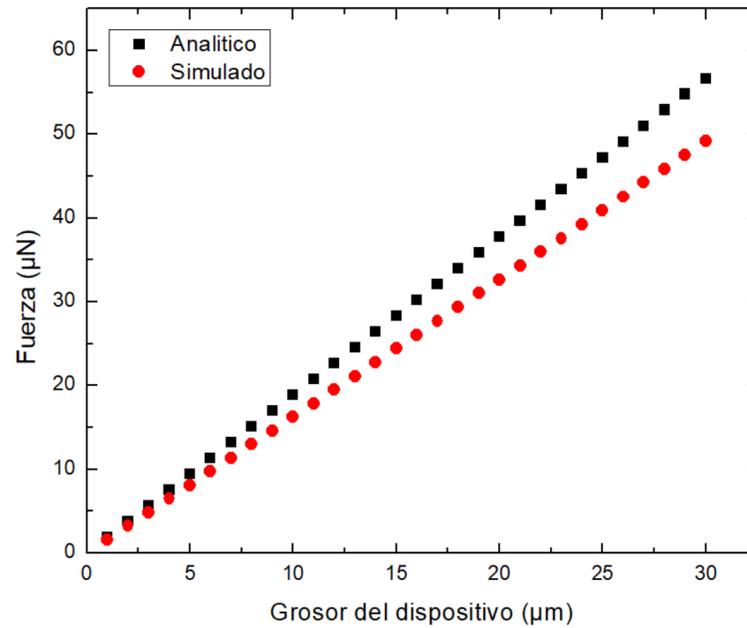


Figura 4.16. Parametrización de la fuerza con respecto al grosor del dispositivo.

Como se puede observar en las gráficas de las Figuras 4.15 y 4.16, el desplazamiento no tiene cambios significativos por la variable  $t$ . La fuerza por el contrario tiene un aumento ya que, al ser el dispositivo más grueso, se genera una mayor fuerza al tener una mayor área transversal.

### 4.2.1.3. Ancho de la viga

A continuación, se muestran en las Figuras 4.17 y 4.18, la parametrización del ancho de la viga, el ancho va de 1 a 10  $\mu\text{m}$ .

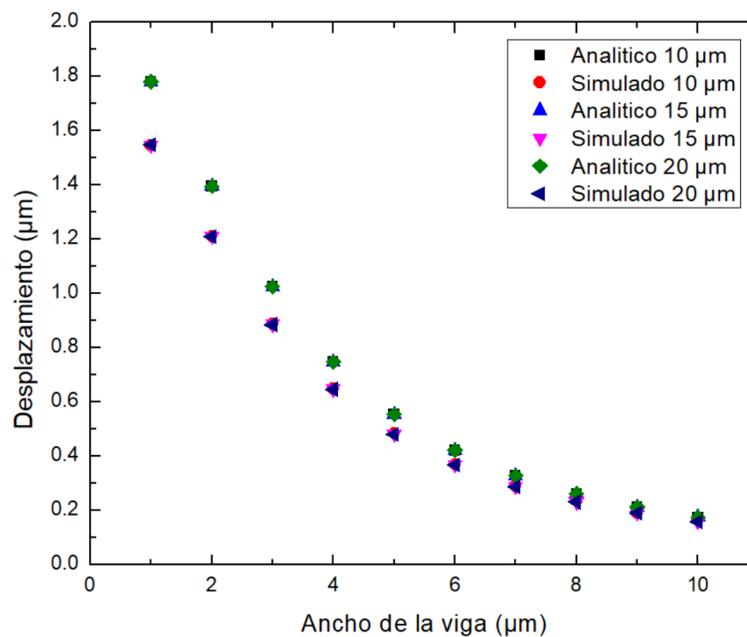


Figura 4.17. Parametrización del desplazamiento con respecto al ancho de la viga.

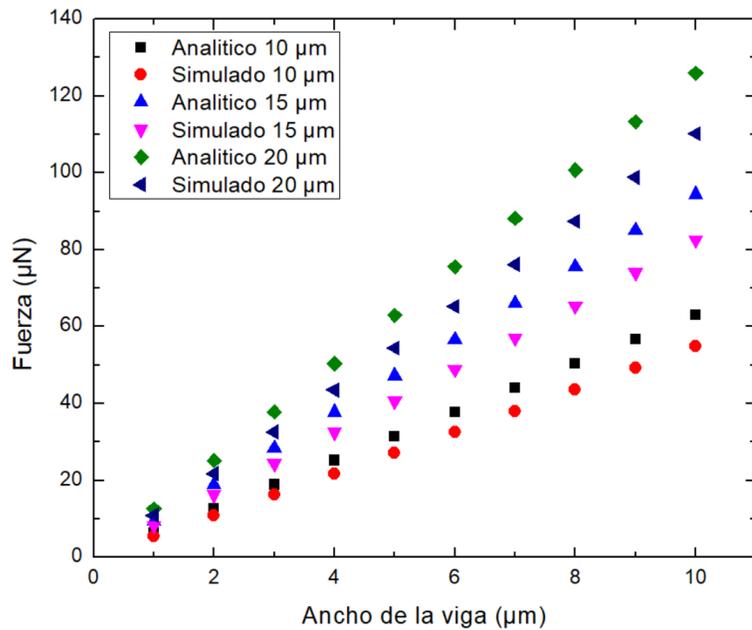


Figura 4.18. Parametrización de la fuerza con respecto al ancho de la viga.

Como se puede observar en las gráficas de las Figuras 4.17 y 4.18, el desplazamiento decrece al aumentar el ancho, ya que restringe la flexibilidad de la viga, y al ser más delgada tiene una mayor flexibilidad. En el caso de la fuerza al aumentar el grosor y volverse más rígida la viga aumenta la fuerza, por tener una mayor área transversal.

#### 4.2.1.4. Largo de la viga

A continuación, se muestran en las Figuras 4.19 y 4.20, la parametrización del largo de la viga, el largo va de 100 a 800 µm, ya que en la literatura se pueden encontrar largos de viga dentro de este rango.

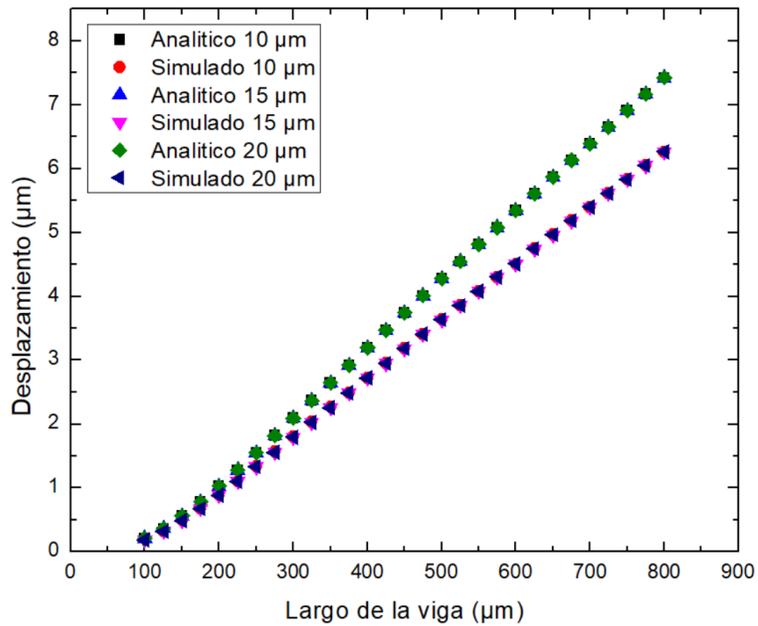


Figura 4.19. Parametrización del desplazamiento con respecto al largo de la viga.

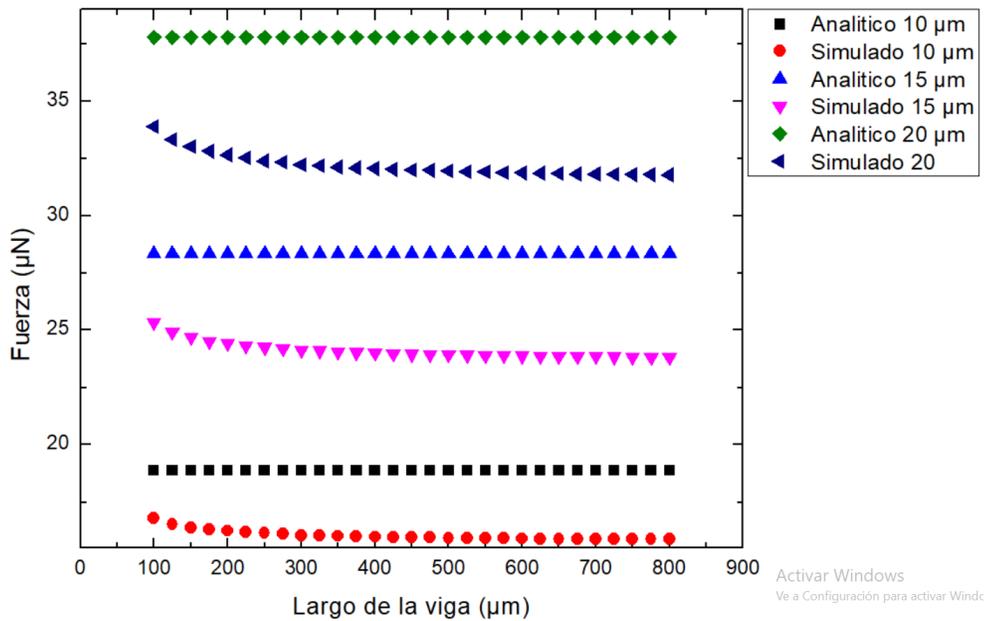


Figura 4.20. Parametrización de la fuerza con respecto al largo de la viga.

Como podemos observar en las gráficas de las Figuras 4.19 y 4.20 al aumentar el largo de la viga, se obtiene un mayor desplazamiento del

actuador, lo que nos da una mayor movilidad, pero la fuerza empieza a disminuir como se observa en la Figura 4.17, por lo cual, el largo de la viga debe ser pequeño para no comprometer la fuerza que se desea obtener.

#### 4.2.1.5. Gradiente de temperatura

A continuación, se presenta la parametrización del gradiente de temperatura, se realiza un barrido en la temperatura de 10 hasta 200 °C, utilizando un coeficiente de disipación térmica de 2250 pW/ $\mu\text{m}^2\text{K}$  haciendo saltos de 10 grados. En las Figuras 4.21 y 4.22 se muestran las gráficas de desplazamiento y fuerza.

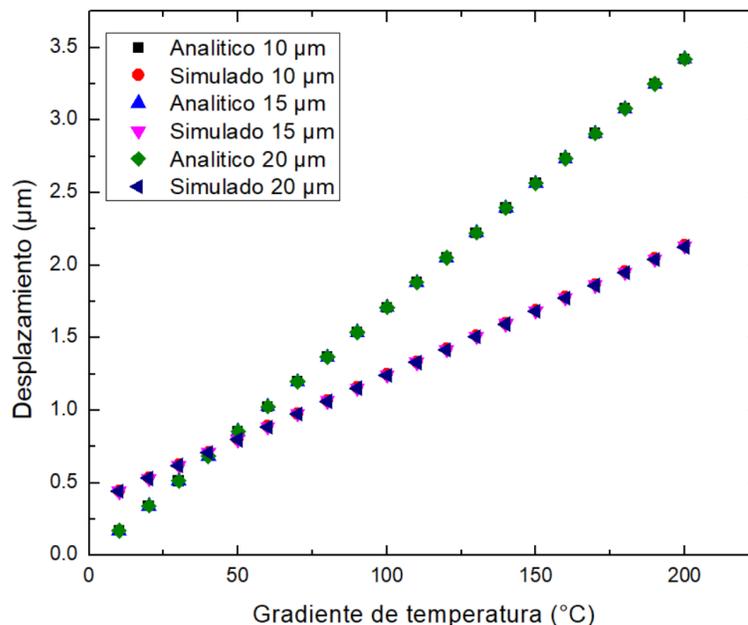


Figura 4.21. Parametrización del desplazamiento con respecto al gradiente de temperatura.

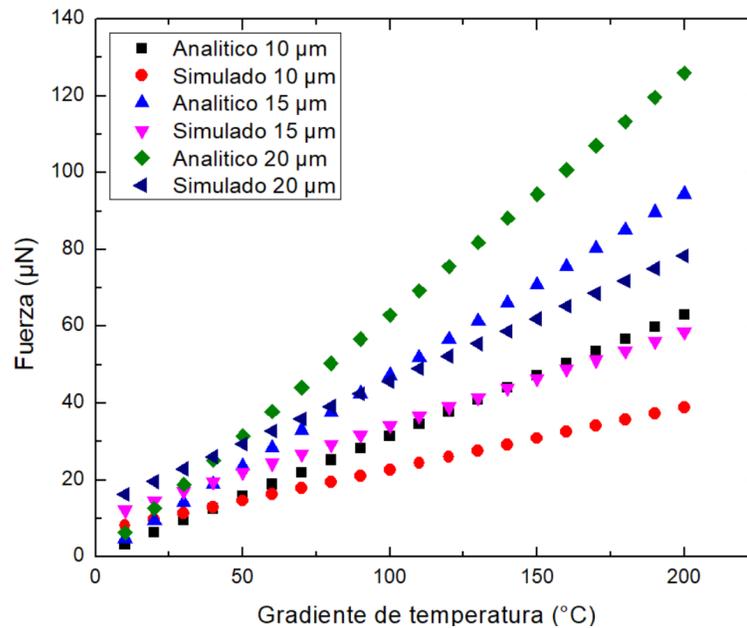


Figura 4.22. Parametrización de la fuerza con respecto al gradiente de temperatura

Como se puede observar en las gráficas de las Figuras 4.21 y 4.22, el desplazamiento en cualquiera de los tres grosores del dispositivo es casi igual, la diferencia es en algunas décimas de micrómetro, por lo cual se sobreponen las gráficas. Al incrementar la temperatura se puede apreciar un incremento en la fuerza del dispositivo, en el caso de los 3 dispositivos el más grueso obtiene una mayor fuerza, ya que al ser el mismo desplazamiento en una viga más gruesa genera más fuerza.

#### 4.2.1.6. Resultados

Se realizó el cálculo del desplazamiento de la flecha y fuerza de reacción del chevrón, de manera analítica y mediante simulación. Las ecuaciones para el cálculo analítico se tomaron de la sección 2.5. Se hicieron simulaciones con diferente número de vigas 2, 4, 8 y 16, respectivamente. En las Tablas 4.10 al 4.13 se presenta los resultados de la simulación en ANSYS<sup>TM</sup> Workbench.

Tabla 4.10. Resultados del chevrón de 2 brazos.

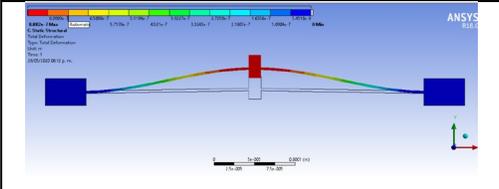
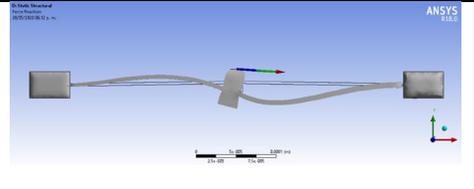
Desplazamiento		Fuerza	
			
Desplazamiento analítico (μm)	Desplazamiento simulado (μm)	Fuerza analítica (μN)	Fuerza simulado (μN)
1.02	0.88	28.33	24.41
Error %		Error %	
13.72%		13.83%	

Tabla 4.11. Resultados del chevrón de 4 brazos.

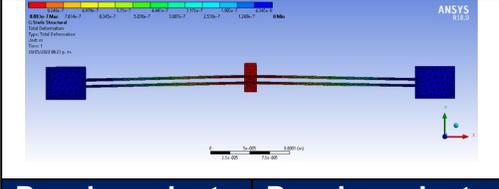
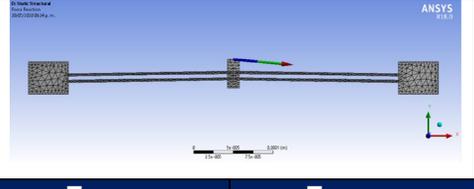
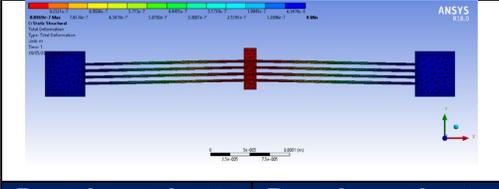
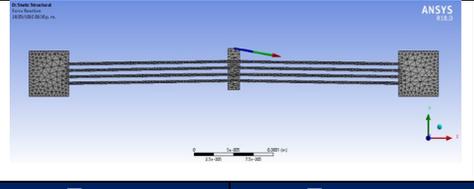
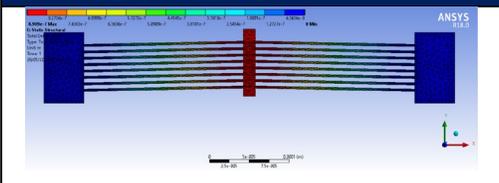
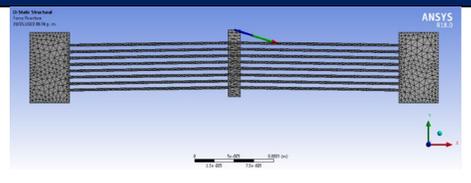
Desplazamiento		Fuerza	
			
Desplazamiento analítico (μm)	Desplazamiento simulado (μm)	Fuerza analítica (μN)	Fuerza simulado (μN)
1.02	0.88	56.67	48.79
Error en el desplazamiento		Error en la fuerza	
13.72%		13.90%	

Tabla 4.12. Resultados del chevrón de 8 brazos.

Desplazamiento		Fuerza	
			
Desplazamiento	Desplazamiento	Fuerza	Fuerza

analítico ( $\mu\text{m}$ )	simulado ( $\mu\text{m}$ )	analítico ( $\mu\text{N}$ )	simulado ( $\mu\text{N}$ )
1.02	0.88	113.35	97.61
<b>Error en el desplazamiento</b>		<b>Error en la fuerza</b>	
13.72%		13.88%	

Tabla 4.13. Resultados del chevrón de 16 brazos.

Desplazamiento		Fuerza	
			
Desplazamiento analítico ( $\mu\text{m}$ )	Desplazamiento simulado ( $\mu\text{m}$ )	Fuerza analítico ( $\mu\text{N}$ )	Fuerza simulado ( $\mu\text{N}$ )
1.02	0.89	226.70	195.78
<b>Error en el desplazamiento</b>		<b>Error en la fuerza</b>	
13.72%		13.63%	

En los resultados que se obtuvieron se puede observar que el desplazamiento no aumenta con el número de vigas. En el caso de la fuerza, al tener una mayor cantidad de vigas aumenta la fuerza y esto da la capacidad de mover objetos de mayor tamaño o peso y en el caso de esta tesis accionar una micropinza.

## 4.2.2. Análisis eléctrico

Dentro de las simulaciones que se realizaron, se generaron parametrizaciones modificando la resistividad del material, para conocer las posibles variaciones, se tomaron en cuenta 5 grosores del dispositivo (50, 55, 60, 65 y 70  $\mu\text{m}$ ) y una diferencia de potencial de 1 V. Los elementos que se parametrizan son los siguientes:

- ❖ Resistencia en el brazo del chevrón
- ❖ Resistencia total
- ❖ Consumo de corriente eléctrica
- ❖ Temperatura generada

### 4.2.2.1. Resistividad en el brazo del chevrón

A continuación, se presenta la parametrización de la resistencia en el brazo del chevrón, en la Figura 4.23 se muestra la gráfica.

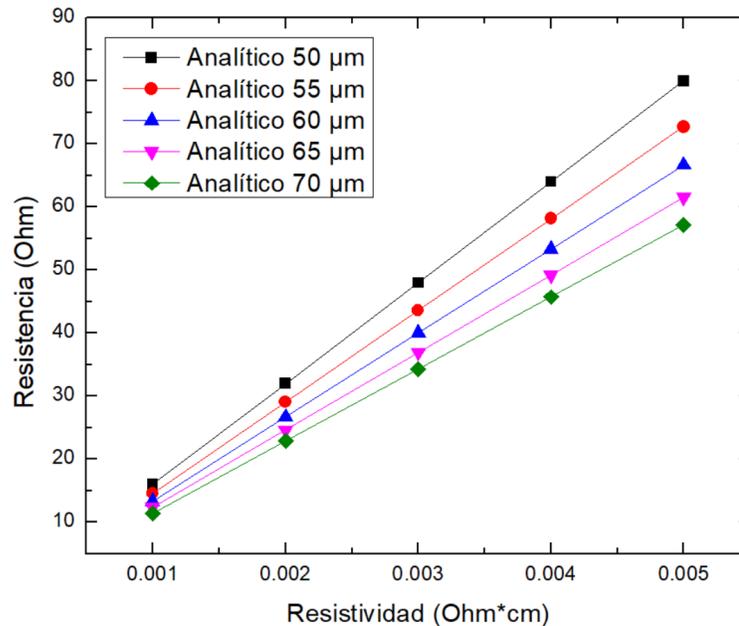


Figura 4.23. Parametrización de la resistencia en un brazo del chevrón.

En la gráfica de la Figura 4.23 se observa que entre mayor sea la resistividad se tiene una mayor resistencia en el brazo del chevrón, donde también tienen importancia las características de diseño como son: el largo, ancho y grosor del dispositivo.

### 4.2.2.2. Resistencia total

En la Figura 4.24 se presenta la parametrización de la resistencia total del chevrón, se realiza los cálculos analíticos y de simulación.

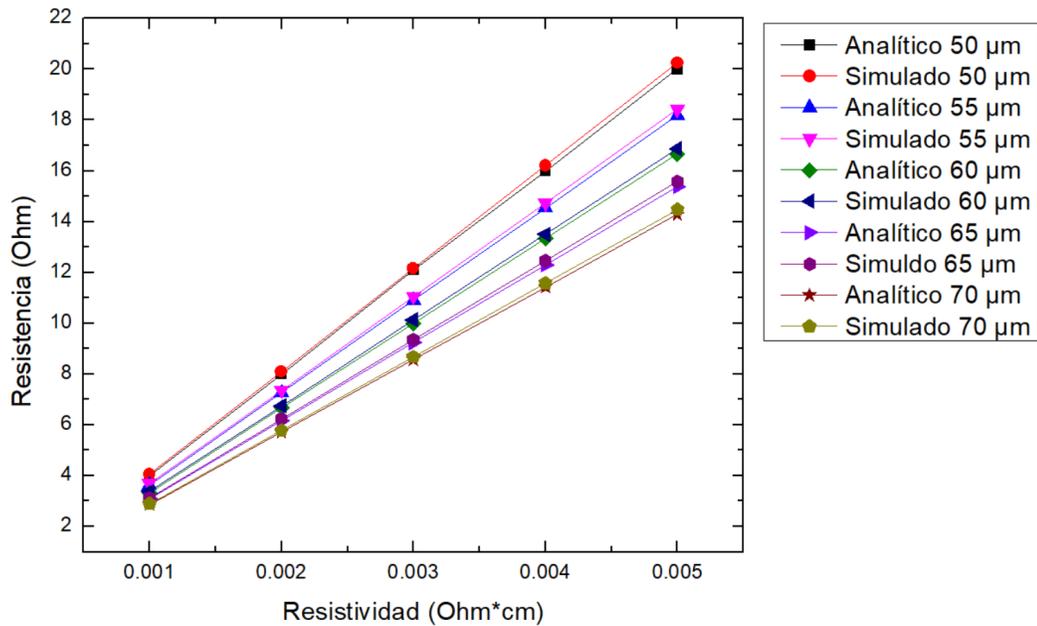


Figura 4.24. Parametrización de la resistencia total del chevrón.

Podemos observar en la gráfica de la Figura 4.24 que la resistencia total es mayor conforme aumenta la resistividad, y la resistencia total de chevrón es menor a la resistencia de cada brazo, ya que las resistencias se encuentran en paralelo y al hacer la suma de cada resistencia en paralelo, la resistencia total es pequeña en comparación con la resistencia de cada brazo.

### 4.2.2.3. Consumo eléctrico

A continuación, se parametriza el consumo eléctrico del chevrón, la gráfica se presenta en la Figura 4.25.

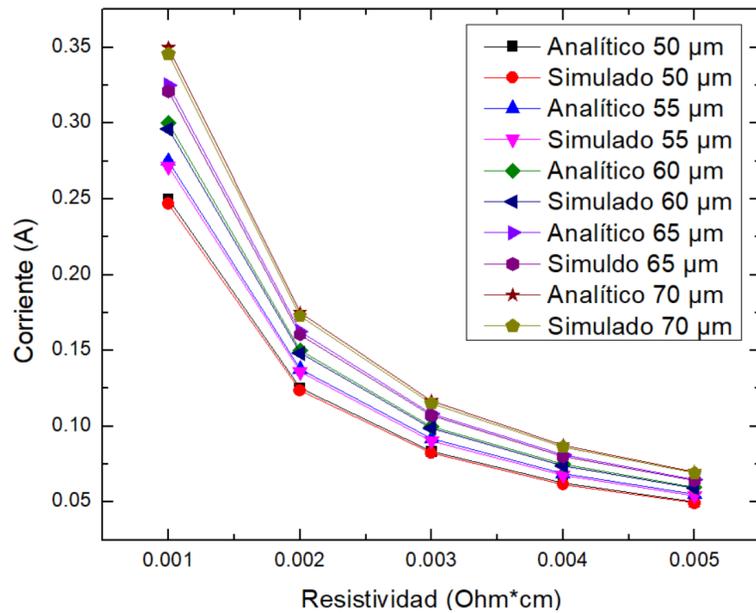


Figura 4.25. Parametrización del consumo eléctrico del chevrón.

En la gráfica de la Figura 4.25 se observa que la corriente empieza a decaer entre mayor sea la resistividad, este comportamiento esta dado por la Ley de Ohm se entiende que la corriente es inversamente proporcional a la corriente.

#### 4.2.2.4. Temperatura generada

A continuación, se presenta la parametrización de la temperatura generada por el cambio en la resistividad del chevrón, en la Figura 4.26.

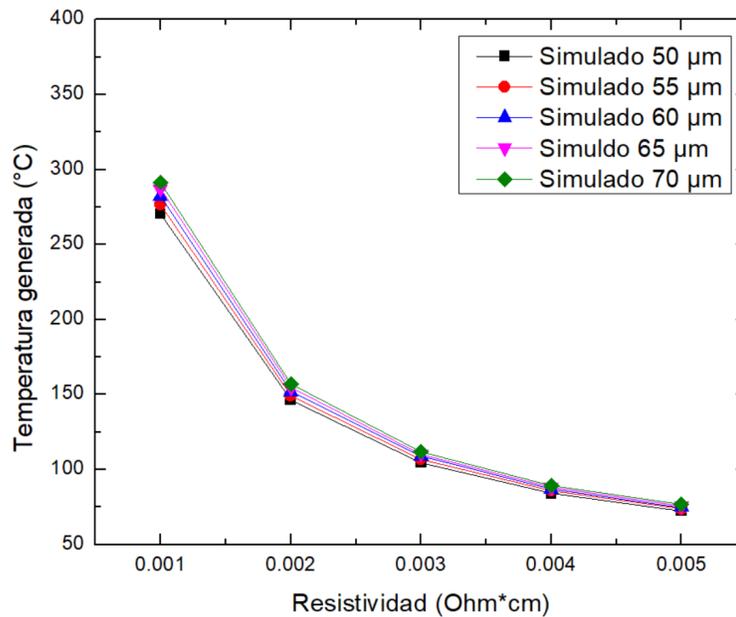


Figura 4.26. Parametrización del calor generado en el chevrón.

En la Figura 4.26 se observa como decae la temperatura total en el dispositivo al aumento de la resistividad, esto sucede por el aumento de la resistencia. Al tener mayor resistividad el flujo de electrones que circula a través de las estructuras es menor, en comparación con una menor resistividad.

### 4.2.3. Corrección en el diseño

Con el avance de la tesis se hicieron modificaciones al diseño del chevrón, esto se debe a que las obleas SOI que se adquirieron para el proyecto son de un grosor de 70 μm y no de 15 μm como se tenía previsto. En la Tabla 4.14 se presentan las medidas finales del chevron.

Tabla 4.14. Medidas finales del chevrón.

Variable	Chevrón	Tamaño (μm)
----------	---------	-------------

$L_b$	Largo de la viga	400
$W_b$	Ancho de la viga	5
$\theta$	Angulo de la viga	1.5
$L_a$	Largo del ancla	350
$W_a$	Ancho del ancla	120
$L_s$	Largo de la flecha	150
$W_s$	Ancho de la flecha	25
$G$	Espacio entre vigas	10
$t$	Grosor	70
$N$	Número de brazos	16

En la Figura 4.27 se presenta la distribución de la temperatura del chevrón, donde se tiene un gradiente de temperatura de  $112^\circ\text{C}$ , esto es el resultado de la alimentación por un potencial eléctrico y se puede observar el ancla caliente y fría del dispositivo.

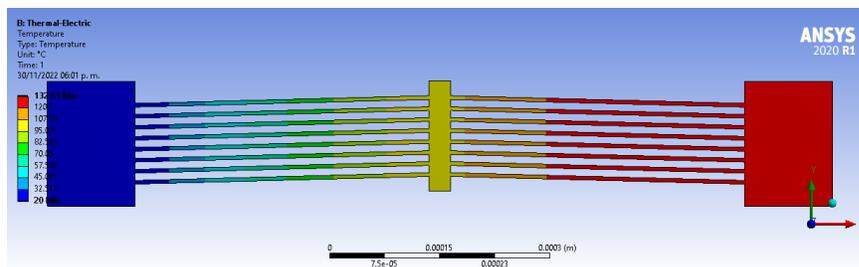


Figura 4.27. Distribución de la temperatura en el chevron.

A continuación, se presenta en la Tabla 4.15 y Figura 4.27 el desplazamiento del chevron, el beneficio del incremento en el tamaño del dispositivo se ve reflejado en el nuevo desplazamiento que puede tener, a su vez el error disminuye y esto nos permite tener un mejor margen de desempeño.

Tabla 4.15. Resultado del desplazamiento del chevrón.

Desplazamiento analítico ( $\mu\text{m}$ )	Desplazamiento simulado ( $\mu\text{m}$ )	Error %
<b>3.57</b>	<b>3.19</b>	<b>10.8%</b>

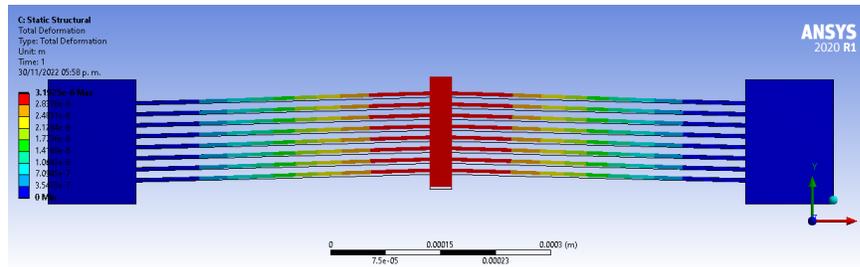


Figura 4.28. Resultado del desplazamiento.

A continuación, se presenta en la Tabla 4.16 y Figura 4.28 la fuerza generada por el chevrón, el incremento en la masa del dispositivo es un beneficio porque incrementa la fuerza al momento de realizar su trabajo. El nuevo error que presenta este nuevo diseño es menor comparado con el diseño anterior, lo cual resulta beneficioso.

Tabla 4.16. Resultados de la fuerza del chevrón.

Fuerza analítico (mN)	Fuerza simulado (mN)	Error %
<b>5.5</b>	<b>4.86</b>	<b>11.63%</b>

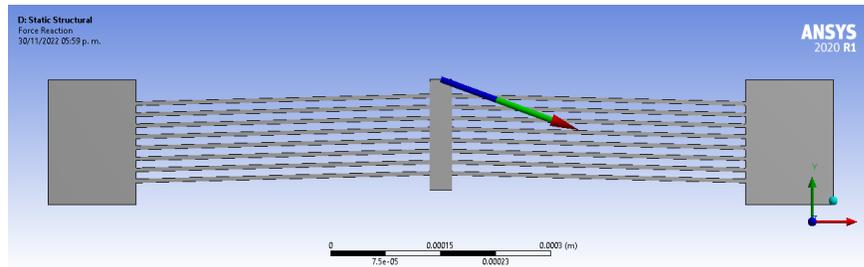


Figura 4.29. Resultado de la fuerza.

### 4.3. Pantógrafo

Un pantógrafo es un mecanismo con enlaces entre brazos para producir una amplificación lineal de una fuerza de entrada o el desplazamiento (Nielson & Howell, 1998). El pantógrafo es un instrumento para hacer una amplificación o disminución del movimiento y es ampliamente usado por dibujantes. Para el análisis se consideran las ecuaciones de la sección 2.6 y en el Anexo C se aborda el proceso de la simulación en el software ANSYS™ Workbench. En la Figura 4.30 y Tabla 4.17 se presentan las medidas del pantógrafo considerado. El análisis realizado al pantógrafo se llevó a cabo con las medidas de grosor final del dispositivo, por lo cual, no se tienen correcciones en sus medidas finales.

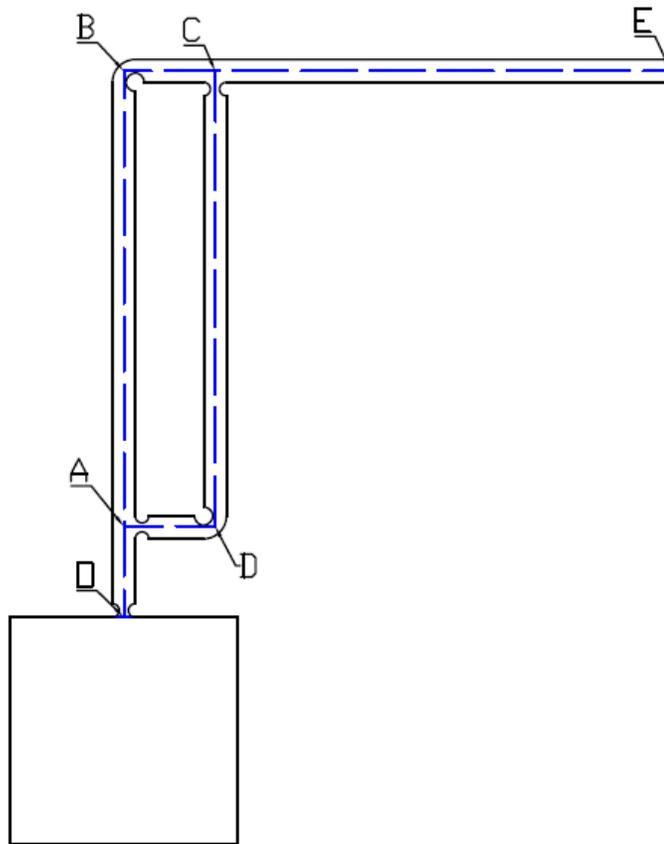


Figura 4.30. Diagrama del pantógrafo. Fuente: Elaboración propia.

Tabla 4.17. Medidas del pantógrafo.

Variable	Pantógrafo	Tamaño ( $\mu\text{m}$ )
<b>OA = AD = BC</b>	Distancia	40
<b>AB = DC = CE</b>	Distancia	200
<b>OB = BE</b>	Distancia	240
<b>R</b>	Radio de la bisagra	3
<b>t</b>	Ancho de la bisagra	4
<b>B</b>	Grosor del dispositivo	70
<b>w</b>	Ancho de la viga	10
<b>F</b>	Fuerza de entrada en D	1 $\mu\text{N}$
<b>f</b>	Factor de amplificación	6

Como se puede observar en la Figura 4.31, el esfuerzo de flexión se concentra en la zona de la bisagra del pantógrafo. Al utilizar esta geometría, se obtiene un mayor desplazamiento. Además, se obtienen el mayor esfuerzo, al cual es sometido el brazo, sin alcanzar el esfuerzo último del silicio, el cual es 7 GPa (Kaajakari, 2009; Muhammad, 2012; Petersen, 1982). En la Tabla 4.18 se muestra la comparación de resultados.

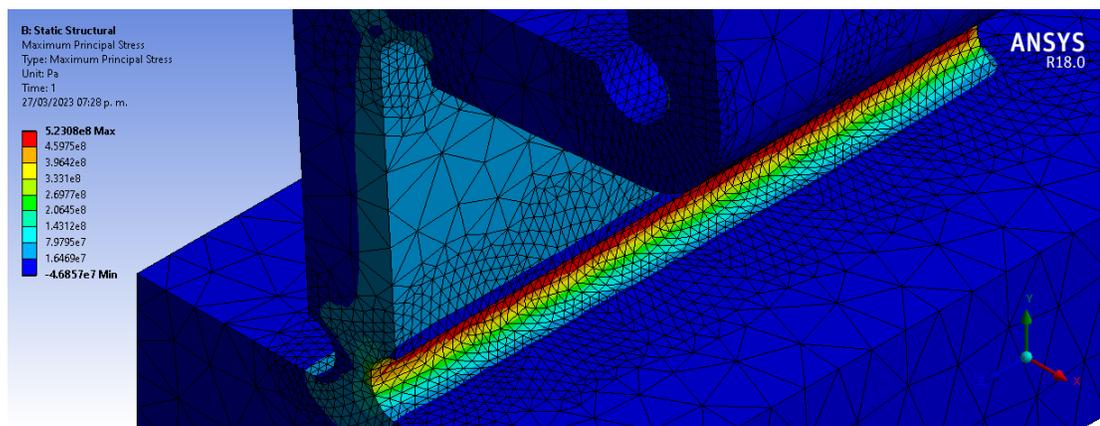


Figura 4.31. Distribución del esfuerzo en el pantógrafo.

Tabla 4.18. Comparación del esfuerzo de flexión.

Esfuerzo de flexión. Resultado analítico (MPa)	Esfuerzo de flexión. Resultado numérico (MPa)	Error %
<b>653.30</b>	<b>523.08</b>	<b>19.93</b>

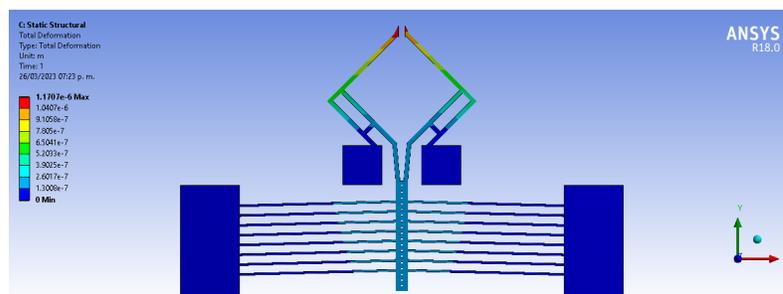
En los datos obtenidos del análisis matemático y numéricos podemos concluir que, hay un error 19.93% entre las aproximaciones que se presentan en la Tabla 4.18. A pesar de ser una magnitud elevada, se encuentra hasta cierto aceptable (Kaajakari, 2009).

Por otro lado, en la sección 2.5, se mencionó que el factor de amplificación del pantógrafo es de 6, debido a la configuración en sus brazos.

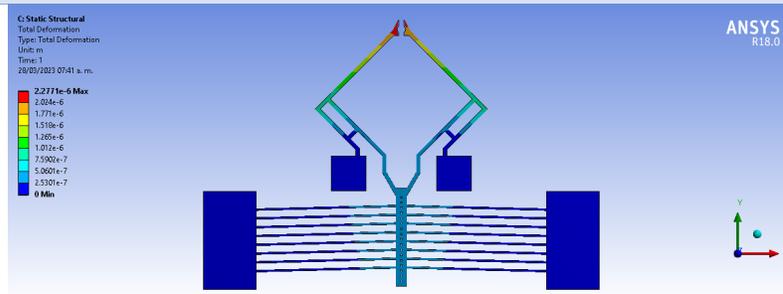
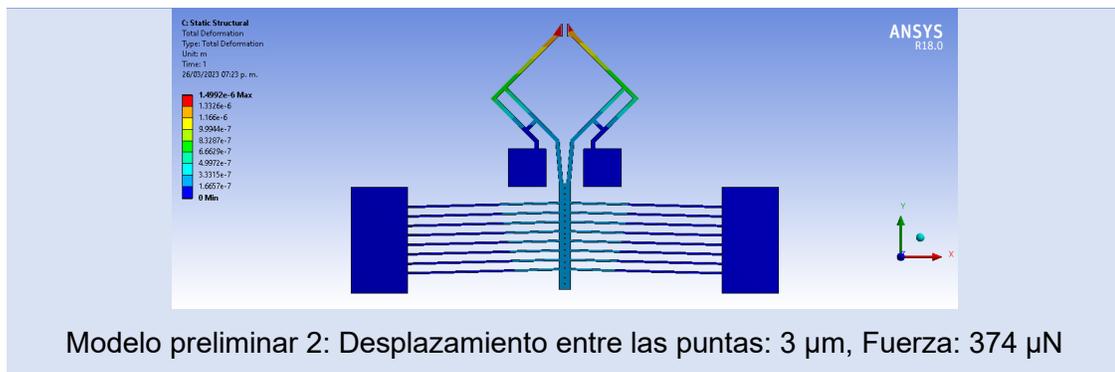
## 4.4. Micropinza

Con los resultados obtenidos en las secciones anteriores con respecto al microactuador viga en voladizo, el microactuador chevrón y el arreglo pantógrafo, se procedió a hacer las primeras aproximaciones de la micropinza, en la Tabla 4.19, se presentan los primeros diseños preliminares hasta llegar a un modelo aceptable. Las condiciones iniciales y de frontera que se utilizan para la simulación son de una temperatura ambiente de 22 °C asignada por ANSYS™ Workbench de manera automática, una alimentación de 1 V en un ancla y en la otra 0 V.

Tabla 4.19. Primeros modelos de micropinza.



Modelo preliminar 1: Desplazamiento entre las puntas: 2.34  $\mu\text{m}$ , Fuerza: 522  $\mu\text{N}$



El modelo preliminar 1 es el primer diseño con el que se trabajó el desplazamiento de la pinza es pequeño y la fuerza es buena. El modelo preliminar 2 el desplazamiento mejoró, pero te tiene una disminución en la fuerza en comparación con el modelo preliminar 1. El modelo preliminar 3 mejoró considerablemente el movimiento entre las puntas y a su vez incremento la fuerza de sujeción.

Posteriormente, se realizaron otros diseños con base en el modelo preliminar 3, que se analizan a continuación.

#### 4.4.1. Micropinza modelo base

Este diseño se obtuvo con base en las aproximaciones anteriores, con mejores resultados que los obtenidos para las micropinzas en la Tabla 4.19. En la Figura 4.32 se muestra la micropinza modelo 1.

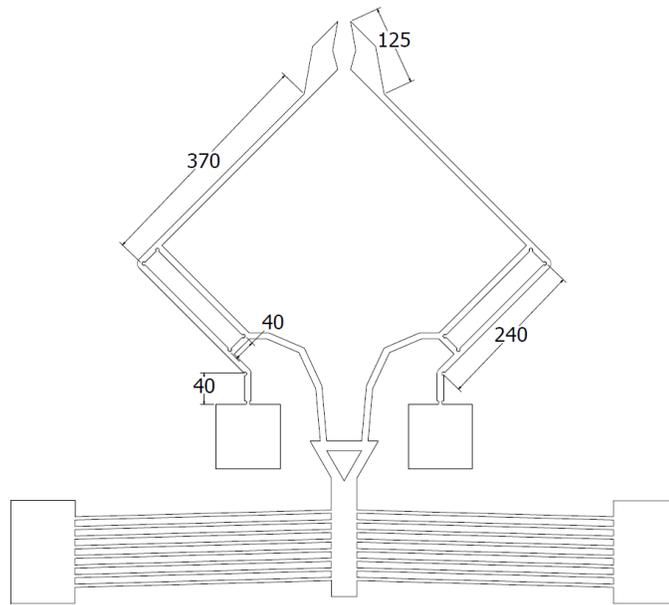


Figura 4.32. Dimensiones de la micropinza preliminar.

En la simulación realizada en el software ANSYS™ Workbench, se asignó en el ancla fría una temperatura de 22 °C y en la otra una alimentación de un 1 V, obteniéndose un desplazamiento máximo entre las mandíbulas de 11.64  $\mu\text{m}$ , como se muestra en la Figura 4.33.

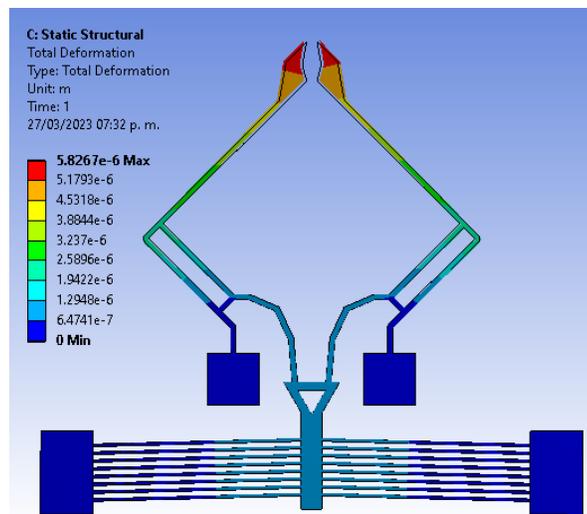


Figura 4.33. Desplazamiento entre las mandíbulas de la micropinza modelo base.

En la Tabla 4.20 se muestran los resultados obtenidos en la simulación de la pinza modelo base. El desplazamiento obtenido es mayor que en las aproximaciones previas, pero se tiene un desplazamiento residual relativamente alto en el eje Z.

Tabla 4.20. Resultados de la simulación de la micropinza modelo base.

Parámetros de desempeño	Magnitud
Desplazamiento entre las puntas	5.82 $\mu\text{m}$ x 2=11.64 $\mu\text{m}$
Fuerza de sujeción	665 $\mu\text{N}$
Temperatura en las puntas	75.8° C
Desplazamiento residual en Z	1.8 $\mu\text{m}$
Esfuerzo	238 MPa

Se analizó la siguiente solución para maximizar el desplazamiento y minimizar el desplazamiento en el eje Z:

1. Se mejora la conexión entre los brazos con muescas en las uniones de la flecha del actuador chevrón y el pantógrafo.
2. Se optimiza la forma de las conexiones entre el chevrón y el pantógrafo para incrementar el desplazamiento.
3. Se coloca un ancla entre los brazos de la pinza, para disminuir el desplazamiento de las mandíbulas en el eje Z

#### 4.4.2. Micropinza modelo 1

Para la primera modificación de la micropinza modelo base, se rediseñaron las secciones donde se une el chevrón con la polilínea y a su vez a polilínea con el pantógrafo, aumentando su flexibilidad y la apertura de la micropinza, como se observa en la Figura 4.34.

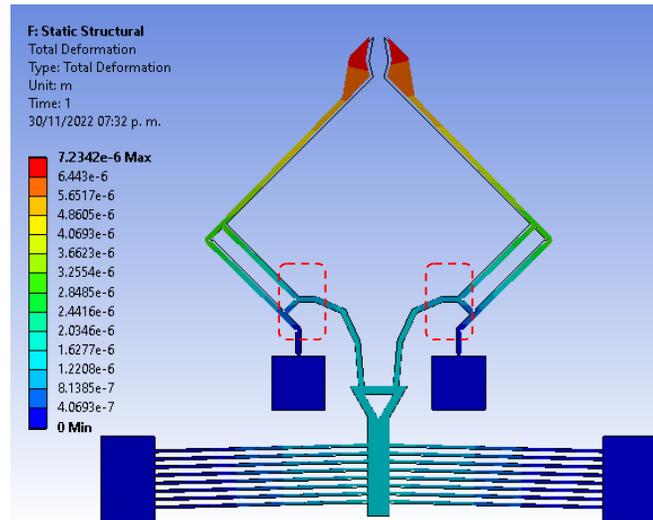


Figura 4.34. Desplazamiento entre las mandíbulas de la micropinza modelo 1.

En la Tabla 4.21 se muestran los resultados obtenidos en la simulación de la pinza Modelo 1. El desplazamiento obtenido es mayor que en las aproximaciones previas, pero se tiene un desplazamiento residual relativamente alto en el eje Z.

Tabla 4.21. Resultados de la simulación de la micropinza modelo 1.

Parámetros de desempeño	Magnitud
Desplazamiento entre las puntas	7.28 $\mu\text{m}$ x 2=14.56 $\mu\text{m}$
Fuerza de sujeción	664.5 $\mu\text{N}$
Temperatura en las puntas	75.8 $^{\circ}\text{C}$
Desplazamiento residual en Z	2 $\mu\text{m}$
Esfuerzo	617 MPa

### 4.4.3 Micropinza modelo 2

Para la segunda modificación de la micropinza modelo 1, se rediseñaron los segmentos de unión del chevrón con el pantógrafo, dejando de una polilínea

a ser un arco, aumentando su flexibilidad y la apertura de la micropinza, como se observa en la Figura 4.35.

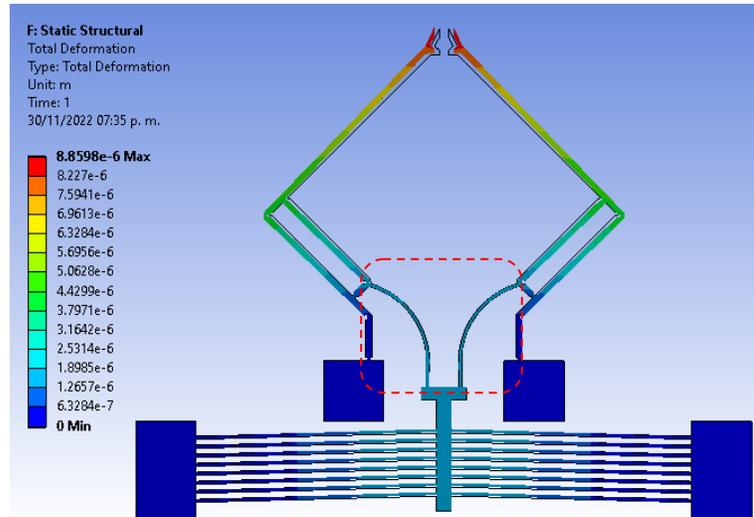


Figura 4.35. Desplazamiento en la micropinza. En el recuadro rojo se muestra la modificación al modelo 2.

En la Tabla 4.22 se muestran los resultados obtenidos en la simulación de la pinza modelo 2. Se incrementó el desplazamiento entre las mandíbulas, pero también se incrementó el movimiento residual en el eje Z.

Tabla 4.22. Resultados de la simulación de la micropinza modelo 2.

Parámetros de desempeño	Magnitud
Desplazamiento de las puntas	8.85 $\mu\text{m}$ x 2=17.7 $\mu\text{m}$
Fuerza de sujeción	411.8 $\mu\text{N}$
Temperatura en las puntas	75.85° C
Desplazamiento residual en Z	2.24 $\mu\text{m}$
Esfuerzo	526 MPa

#### 4.4.4. Micropinza modelo 3. Modelo final.

En la Figura 4.36 se observa la tercera modificación realizada a la pinza modelo 2. En este modelo se emplean las secciones de arco que sirven como unión entre el pantógrafo y el chevrón, en el modelo, 2 y se agregó un ancla para restringir el desplazamiento residual en el eje Z, ubicada entre los brazos de la micropinza, con segmentos curvos que se unen a las uniones previamente descritas.

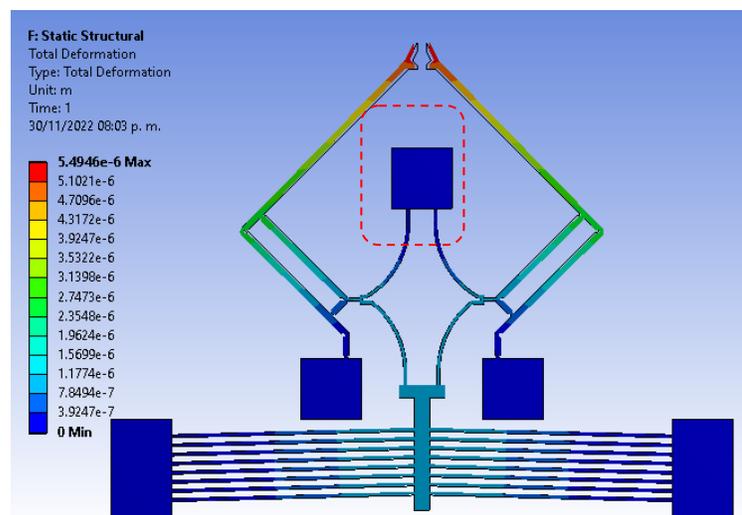


Figura 4.36. Desplazamiento en la micropinza. En el recuadro rojo se muestra la modificación al modelo 3.

En la Tabla 4.23 se muestran los resultados obtenidos en la simulación de la pinza modelo 2. Podemos observar que el desplazamiento se redujo, pero el desplazamiento en el eje Z se redujo a un movimiento en la escala de los nanómetros que puede ser despreciable y no afecta a la manipulación.

Tabla 4.23. Resultados de la simulación de la micropinza modelo 3.

Parámetros de desempeño	Magnitud
Desplazamiento de las puntas	5.6 $\mu\text{m}$ x 2=11.2 $\mu\text{m}$

<b>Fuerza de sujeción</b>	439.39 $\mu$ N
<b>Temperatura en las puntas</b>	73 °C
<b>Desplazamiento residual en Z</b>	22.24 nm
<b>Esfuerzo</b>	465 MPa

En el análisis numérico que se llevó a cabo en cada uno de los modelos de micropinza, se observó que esfuerzo al que se somete cada modelo se encuentran por debajo del Esfuerzo último de 7 GPa (Kaajakari, 2009; Muhammad, 2012; Petersen, 1982), estos valores incluso están por debajo del 10% del valor del Esfuerzo último manteniendo un desempeño satisfactorio con un valor de esfuerzo relativamente pequeño respecto al Esfuerzo último.

Este modelo se selecciona como modelo final, debido a los resultados de la comparación entre los 3 modelos, que se muestra en la Tabla 4.24, donde se aprecia que el desplazamiento de la micropinza mejora los modelos, pero el movimiento residual en el eje Z aumenta, una forma de reducir el movimiento residual se coloca un ancla entre medio de los brazos de la micropinza modelo 3 con la que se restringe el movimiento no deseado.

*Tabla 4.24. Tabla de comparación de las micropinza modelo 1, 2 y 3.*

<b>Parámetros de desempeño</b>	<b>Magnitud Modelo 1</b>	<b>Magnitud Modelo 2</b>	<b>Magnitud Modelo 3</b>
<b>Desplazamiento entre las puntas</b>	7.28 $\mu$ m x 2 = 14.56 $\mu$ m	8.85 $\mu$ m x 2 = 17.7 $\mu$ m	5.5 $\mu$ m x 2 = 11 $\mu$ m
<b>Fuerza de sujeción</b>	664.5 $\mu$ N	411.8 $\mu$ N	439.39 $\mu$ N
<b>Temperatura en las puntas</b>	75.8 °C	75.85° C	73 °C
<b>Desplazamiento residual</b>	2 $\mu$ m	2.24 $\mu$ m	22.24 nm

en Z			
Esfuerzo	617 MPa	526 MPa	465 MPa

La micropinza base sirvió de inspiración para los modelos 1, 2 y 3. Comparando los 3 modelos de las pinzas entre ellas podemos observar que la micropinza modelo 3 tiene un menor desplazamiento en el eje Z en comparación con el modelo 1 y 2 siendo menor del 1000% en cualquiera de los dos casos. El esfuerzo en la micropinza modelo 3, también es menor en comparación con los modelos 1 y 2 con un 15% y 24% respectivamente.

## 4.5. Implementación del diseño final de la micropinza con polisilicio

Con el diseño final de la micropinza se realizaron las simulaciones correspondientes a otros materiales, en la Tabla 4.25 se presentan la comparación entre el silicio y polisilicio. En la Tabla 4.25 se observa que la respuesta de la micropinza implementada en polisilicio tiene las siguientes mejoras porcentuales, incremento de 3.03% en desplazamiento, en fuerza de sujeción un incremento del 17.43%. En el desplazamiento residual en el eje Z, tiene un incremento de 34.89%. Se muestran además decrementos en temperatura de puntas (31.51%) y en esfuerzo de 7.1%.

Por lo anterior, puede observarse que, la micropinza en polisilicio tiene un desempeño superior al caso de silicio. Sin embargo, debido al proyecto de Ciencia Básica, ref. A1-S-33433, se cuenta con los materiales para realizar prototipos en tecnología SOI, además de acceso a laboratorio de cuarto limpio que maneja esta tecnología, aunque con profundidades de grabado menores a las requeridas. Incrementar esta profundidad fue uno de los retos enfrentados en este proyecto y trabajo de tesis. Por lo tanto, se seleccionó al silicio para la implementación.

Tabla 4.25. Comparación con polisilicio.

Parámetros de desempeño	Magnitud, Implementación con silicio	Magnitud. Implementación con polisilicio	Incremento porcentual utilizando polisilicio, %
Desplazamiento entre las puntas	5.56 $\mu\text{m} \times 2 =$ 11.2 $\mu\text{m}$	5.7 $\mu\text{m} \times 2 =$ 11.54 $\mu\text{m}$	3.03
Fuerza de sujeción	439.39 $\mu\text{N}$	516 $\mu\text{N}$	17.43
Temperatura en las puntas	73 $^{\circ}\text{C}$	50 $^{\circ}\text{C}$	-31.51
Desplazamiento residual en Z	22.24 nm	30 nm	34.89
Esfuerzo	465 MPa	432 MPa	-7.10

## 4.6. Comparación de la micropinza modelo

### 3. Modelo final

De acuerdo con el desempeño del modelo 3, se obtiene el diseño final utilizando silicio como material de fabricación, los resultados en desplazamiento y fuerza son aceptables. El desplazamiento es aceptable ya que se encuentra cercano a las magnitudes de 1.14  $\mu\text{m}$  y 12  $\mu\text{m}$  mostrados en (Demaghsi et al., 2014<sup>a</sup>) y (Demaghsi et al., 2014b). Con relación a la fuerza presentada en el dispositivo se encuentra por encima del rango de 38.5 nN a 242  $\mu\text{N}$  reportado por (Zhang et al., 2013)(Carlson et al., 2007), (Kim et al., 2008) y (Demaghsi et al., 2014b), lo cual es ampliamente deseable.

En la Tabla 4.26 se muestra la comparación de los resultados obtenidos con los que se hallaron en la literatura. La fuerza proporcionada es la mayor con

relación a las pinzas mencionadas. El desplazamiento de la micropinza propuesta es de 11.2  $\mu\text{m}$  con una alimentación de 1 V, mientras que, en (Kim et al., 2008) menciona que tienen un desplazamiento de 67  $\mu\text{m}$  con una alimentación de 10 V, la gráfica que presenta muestra que en 1 V se obtiene un desplazamiento cercano a 5  $\mu\text{m}$ , esto permite observar que, la pinza aquí muestra un incremento en 124%. El tamaño de la micropinza propuesta, comparado con el caso de la micropinza de (Kim et al., 2008), es notablemente menor.

Por lo tanto, la micropinza propuesta muestra un desempeño competitivo comparada con las que fueron analizadas.

Tabla 4.26. Tabla de comparación de resultados

Ref	Material	Desplazamiento ( $\mu\text{m}$ )	Fuerza ( $\mu\text{N}$ )	Tamaño ( $\mu\text{m}$ )	Alimentación (V)
(Demaghsi et al., 2014 <sup>a</sup> )	Silicio	12	N.D.	N.D.	36
(Kim et al., 2008)	Silicio	67	38.5 nN	6000 x 5000	10
(Carlson et al., 2007)	Silicio	N.D.	25	N.D.	20
Micropinza propuesta	Silicio	11.2	439.39	1065 $\mu\text{m}$ x 780 $\mu\text{m}$ x 70 $\mu\text{m}$	1

Nota: N. D. No disponible.

La fabricación del dispositivo se llevó a cabo en CIDESI, Querétaro con la colaboración del Dr. Jesús Javier Alcantar Peña. En la siguiente sección, se aborda el proceso completo de la fabricación.

## **4.7. Modelo adicional. Arreglo de dos micropinzas encontradas frontalmente**

Como modelo adicional se realizó un análisis numérico de un arreglo de 2 micropinzas encontradas frontalmente, con las puntas modificadas para manipular objetos más pesados que no podrían manipularse con una sola micropinza. En la Figura 4.37 se observa el arreglo de la micropinza.

En la Tabla 4.27 se muestra la comparación de los resultados obtenidos del arreglo, comparado con la micropinza propuesta en este trabajo. Se observa una mejora en el desplazamiento (11.96%), así como un incremento en la fuerza de 59.76, y en el esfuerzo (23.01%).

Se observa que el desplazamiento es muy similar en cada mandíbula. Se asume que la diferencia implementada en la forma de las puntas de las mandíbulas genera las pequeñas diferencias.

La fuerza se ve incrementada al utilizar 4 brazos en vez de 2, en un 59.76%. El esfuerzo tiene una reducción de 23.01%, lo cual, se debe a que se utilizan 4 brazos en la pinza, lo que distribuye la carga entre ellos y no en 2 como en la pinza individual.

Se continúa este trabajo con el enfoque en la micropinza individual, ya que en este diseño se enfocó el objetivo general.

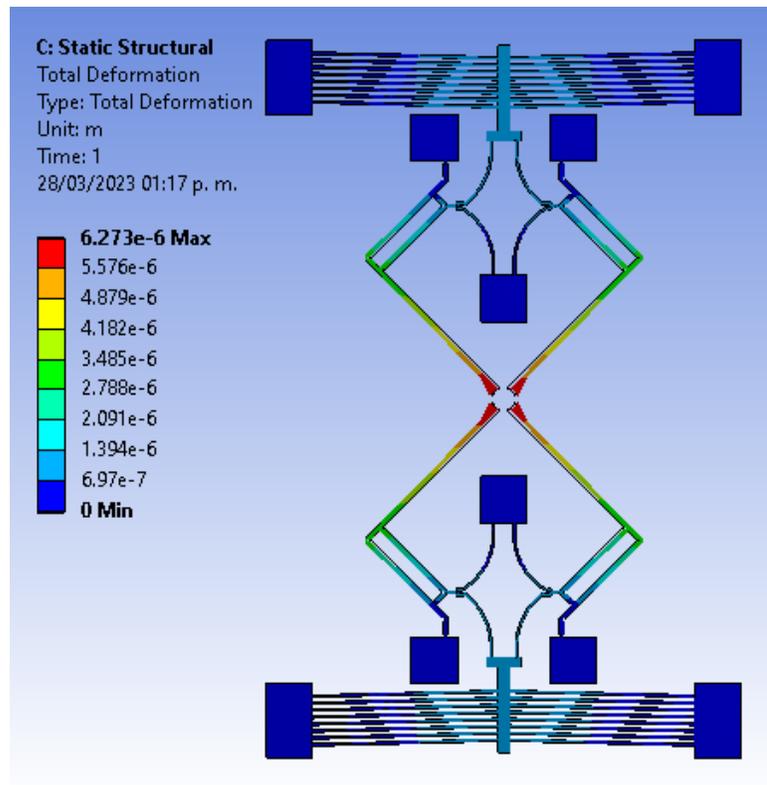
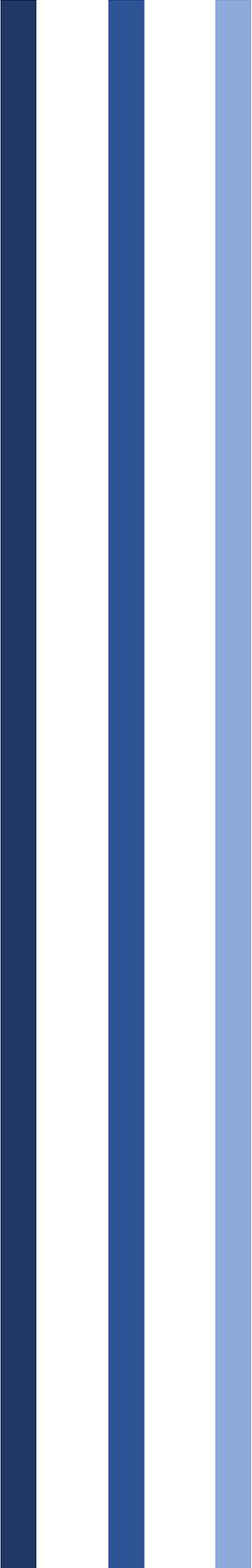


Figura 4.37. Arreglo de dos micropinzas.

Tabla 4.27. Tabla de comparación del arreglo de micropinzas con la pinza individual.

Parámetros de desempeño	Micropinza individual	Arreglo de micropinzas frontales	Porcentaje de mejora del arreglo, (%)
	Magnitud	Magnitud	
Desplazamiento en una punta, ( $\mu\text{m}$ )	$5.6 \times 2 = 11.2$	$6.27 \times 2 = 12.54$	11.96
Fuerza de sujeción, ( $\mu\text{N}$ )	439.39	702	59.76
Temperatura en las puntas, ( $^{\circ}\text{C}$ )	73	75	2.74
Desplazamiento residual en Z, (nm)	22.24	18.6	-16.36
Esfuerzo, (MPa)	465	358	-23.01



## **Capítulo 5.**

# ***Microfabricación***

En este capítulo se profundiza en el proceso de microfabricación de los MEMS. Este proceso se llevó a cabo en las instalaciones del Centro de Ingeniería y Desarrollo Industrial (CIDESI). En este centro se cuenta con un laboratorio de cuarto limpio para el fabricado de microelectrónica.

# Capítulo 5. Microfabricación

La microfabricación es el proceso en el cual se fabrican los Sistemas Microelectromecánicos (MEMS), hay una gran cantidad de procesos y todos estos varían dependiendo de cada institución o centro de investigación, también depende del tipo de material que sea usado en el proceso. En un inicio de la microfabricación de esta tesis se iba a realizar en el Centro de Investigación en Ciencia y Tecnología Aplicada (CICTA) de la Universidad Autónoma de Ciudad Juárez (UACJ) con el Dr. José Mireles Jr. García, pero se dañó uno de sus equipos clave, por lo cual el Dr. buscó otro centro de investigación que nos apoyará. Ahora, la fabricación de las micropinzas se llevará a cabo en el Centro de Ingeniería y Desarrollo Industrial (CIDESI), que se localiza en la ciudad de Querétaro siendo el Dr. Jesús Javier Alcantar Peña nuestro enlace para este trabajo. En el Anexo E se presentan las cartas de las estancias realizadas.

## 5.1. CIDESI

El Centro de Ingeniería y Desarrollo Industrial (Figura 5.1), es un centro fundado el 9 de marzo de 1984, contribuye al desarrollo del sector productivo del país, a través de proyectos de investigación e innovación, así como servicios tecnológicos especializados de alto nivel, en sus distintas ubicaciones: Estado de Querétaro, Estado de Nuevo León y el Estado de México.



Figura 5.1. Logo del CIDESI <https://www.cidesi.com/site/>

### **5.1.1. Misión**

Crear soluciones de alto valor para nuestros clientes basados en investigación aplicada y desarrollo experimental.

### **5.1.2. Visión**

Ser una institución de clase mundial, autosuficiente, con reconocimiento nacional e internacional por sus productos y servicios de alto impacto.

## **5.2. Departamento de Microtecnologías**

El Departamento de Microtecnologías del CIDESI se fundó en el año 2015, con la intención de la innovación en el sector de las Microtecnologías, donde se está empezando a acercarse a la industria para entregar soluciones a las necesidades de una industria emergente en México.

## **5.3. Oblea de silicio**

El silicio es uno de los materiales con más presencia en el planeta, y es uno de los principales materiales empleados en la fabricación de microelectrónica, este material se emplea desde la década de 1960 y la tecnología se ha refinado desde que se empezó a emplear permitiendo que se creen dispositivos MEMS. Existen dos tipos de oblea de silicio, la oblea de silicio mecánico y la oblea SOI. La oblea de silicio se compone de un solo nivel de silicio y la oblea SOI es una oblea que se compone de 3 niveles diferentes dentro de su estructura.

### 5.3.1. Características de la oblea SOI

Para la fabricación del dispositivo se adquirieron obleas de silicio sobre aislante (o SOI por sus siglas en inglés de ULTRASIL Corp), con una estructura cristalina (1,0,0), con la oblea estructural de 70µm, una capa de óxido de silicio de 2µm y la oblea de soporte de 350µm, con una resistividad que tiene una variación de 0.001 a 0.005 Ω x cm.

### 5.3.2. Niveles de la oblea SOI

La fabricación sobre una oblea SOI tiene diferentes niveles. Para entrar en el tema de la fabricación se tiene que explicar los diferentes niveles de la oblea, una oblea SOI tiene 3 niveles, los cuales se muestran en la Tabla 5.1 y Figura 5.2.

Tabla 5.1. Niveles de la oblea SOI.

Color	Nombre
	Silicio estructural
	Aislante (oxido de silicio)
	Silicio de soporte



Figura 5.2. Oblea SOI.

### **5.3.2.1. Silicio estructural**

El silicio estructural es el nivel donde se fabrican los dispositivos diseñados, este nivel tiene un grosor que va de acuerdo con la oblea que se compra en el caso de la oblea empleada para esta tesis es de 70  $\mu\text{m}$ , y aquí se realiza la mayor parte de la microfabricación.

### **5.3.2.2. Aislante**

El aislante es un óxido de silicio con un grosor de 2  $\mu\text{m}$ , el objetivo de este como su nombre lo dice es aislar el silicio estructural del silicio de soporte, para evitar el paso de energía eléctrica entre los niveles.

### **5.3.2.3. Silicio de soporte**

El silicio de soporte como su nombre lo indica soporta a los dispositivos a fabricar, y en casos especiales se puede micromaquinar para generar espacios que pueden ayudar al desempeño de los dispositivos, el grosor de este nivel es de 350  $\mu\text{m}$ .

## **5.4. Máscaras para microfabricación**

En el proceso de microfabricación de los MEMS, se utilizan una serie de máscaras que se superponen a la oblea de silicio para transferir el diseño.

Las máscaras de fabricación son cristales de 12.5  $\text{cm}^2$ , que llevan una capa de cromo depositada al vidrio, y sobre el cromo una capa de resina fotosensible resina positiva S1813 y se utiliza el proceso de grabado y revelado, en estas se graban los diseños y se traspasan a las obleas.

Dependiendo de las capas que forman a los dispositivos a micromaquinar, corresponde el número de máscaras que se emplearán en dicho proceso.

Las máscaras de grabado se pueden generar en positivo o negativo, esto consiste en la forma en la que se diseñe los dispositivos.

En la máscara positiva se graban los dispositivos a micromaquinar, estos son los patrones que se van a transferir a la oblea y como resultado son las estructuras que van a quedar al final de la microfabricación.

En una máscara negativa se graban los patrones de vacío, son los espacios que se tienen que eliminar en la microfabricación.

En el diseño de esta micropinza se emplearán 3 máscaras para su microfabricación:

- ❖ Máscara 1 (Dispositivo o Device)
- ❖ Máscara 2 (Metal BIAS)
- ❖ Máscara 3 (Metal contacto)
- ❖ Máscara 4 (Pozo o Back hole)

### **5.4.1. Máscara 1 (Dispositivo o Device)**

En la Figura 5.3. se observa máscara 1, en la que se encuentran los dispositivos a fabricar, los dispositivos se acomodan de la forma más adecuada para reducir el espacio vacío y evitar el desperdicio de material. Esta máscara se grabó de manera positiva, utilizando resina S1813, es la primera máscara que se colocará sobre la parte estructural de la oblea.

### **5.4.2. Máscara 2 (Metal BIAS)**

En la máscara Metal BIAS se graban los espacios para depositar una capa de metal (cromo) que ayuda a unir al silicio con metal de contacto (oro). Esta máscara transfiere su patrón sobre la primera, se grabó de manera negativa, utilizando SU8, para que al transferir el patrón se creen las condiciones en las zonas requeridas como anclas eléctricas, en las que se realizará el depósito de metal (cromo), como se muestra en la Figura 5.4.

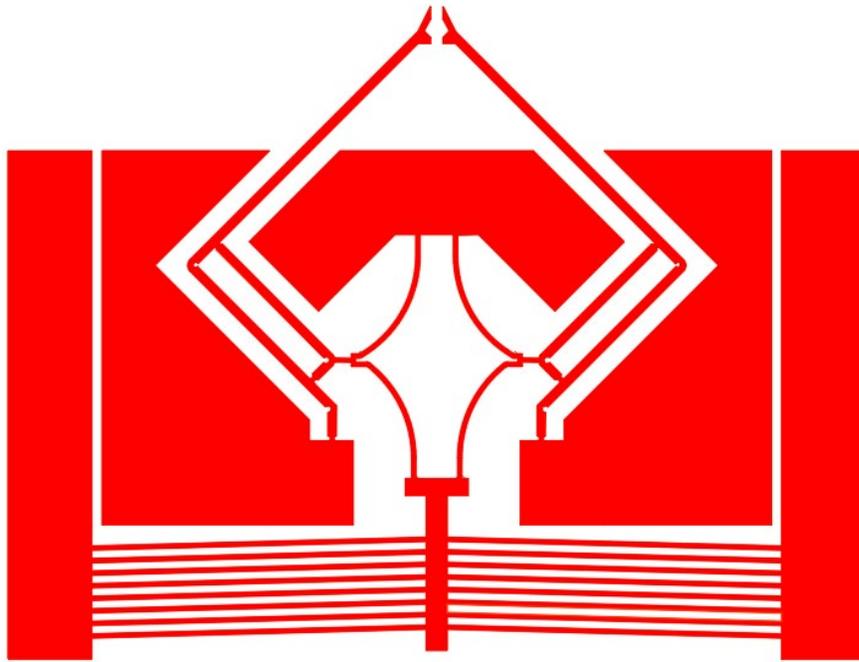


Figura 5.3. Máscara 1 estructura del dispositivo.

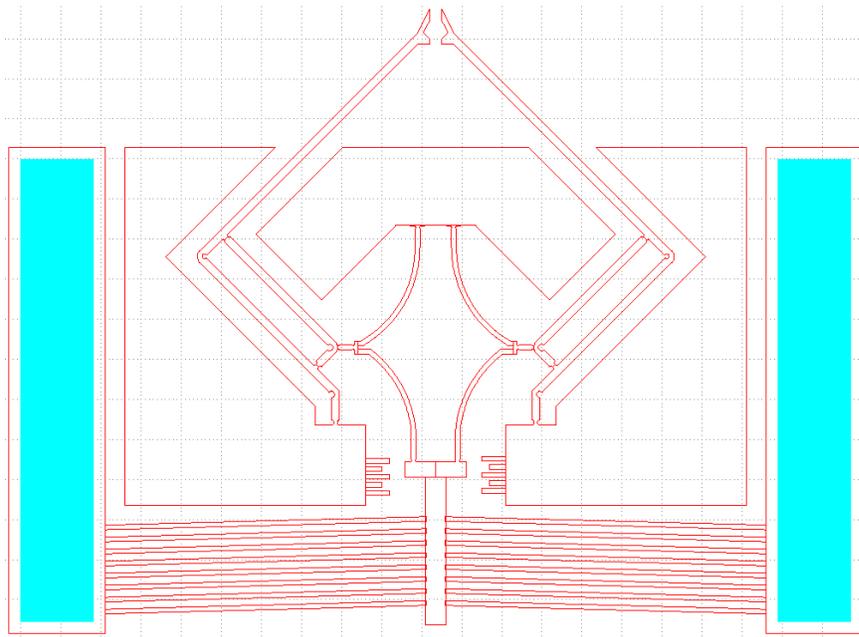


Figura 5.4. Máscara 2 Metal BIAS.

### 5.4.3. Máscara 3 (Metal de contacto)

En la Figura 5.5. se observa la máscara 3, mediante la cual, es posible posteriormente depositar una capa de metal (oro), en las anclas eléctricas, donde se soldarán los cables para la conexión eléctrica de los dispositivos. Esta máscara transfiere su patrón sobre el cromo previamente depositado. Esta máscara se grabó de manera negativa.

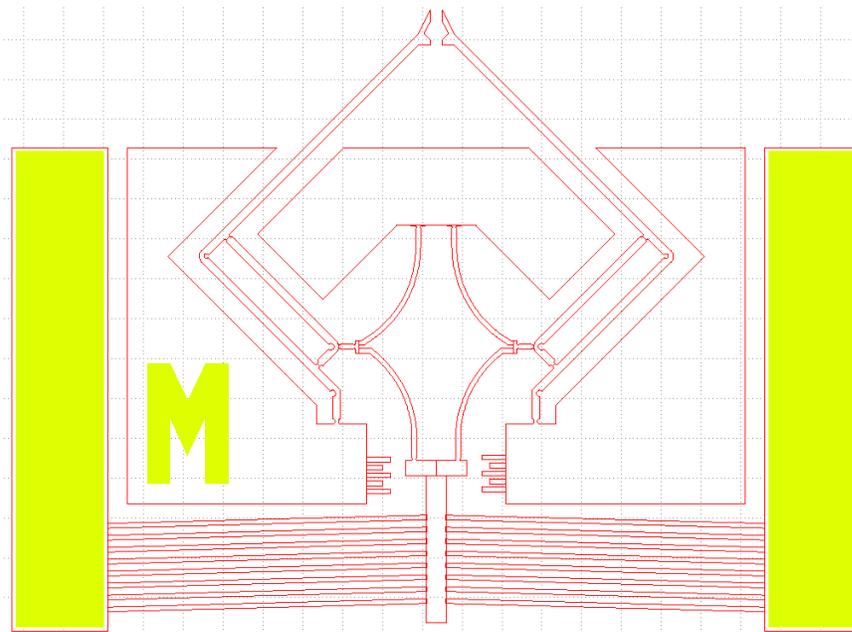


Figura 5.5. Máscara 2 Metal de contacto.

### 5.4.4. Máscara 4 (Pozo o Back hole)

En esta máscara se grabaron los pozos o espacios que se van a eliminar en la oblea de soporte. El objetivo de esto es liberar las puntas y las partes móviles de las micropinzas, para que su movimiento no esté limitado. Esta máscara se grabó de manera negativa, como se muestra en la Figura 5.6.

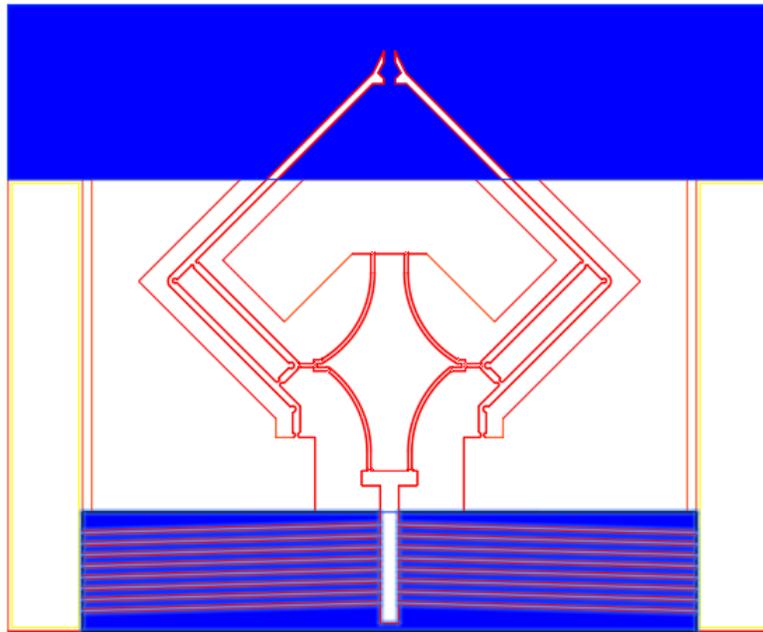


Figura 5.6. Máscara 4 Espacios en la oblea de soporte.

### 5.4.3. Niveles de la microfabricación

En la oblea SOI se tienen tres niveles. En el proceso de microfabricación se incluyen dos niveles permanentes más. En la Figura 5.7 se presentan todos estos niveles. En la Tabla 5.2 y, se identifican estos niveles.



Figura 5.7. Niveles de fabricación.

Tabla 5.2. Niveles de la oblea SOI micro maquinado.

Color	Nombre
	Silicio estructural
	Aislante (oxido de silicio)
	Silicio de soporte
	Metal BIAS
	Metal de contacto

### 5.4.3.1. Metal BIAS

El Metal BIAS es el nivel, corresponde al nivel en el que se fija el Metal de contacto con el silicio, esta capa cuenta con un solape con respecto al ancla, de 15  $\mu\text{m}$ .

### 5.4.3.2. Metal de contacto

El Metal de contacto es el nivel en el que se puede alimentar eléctricamente a los dispositivos, esta capa tiene un solape con respecto al ancla, de 5  $\mu\text{m}$ .

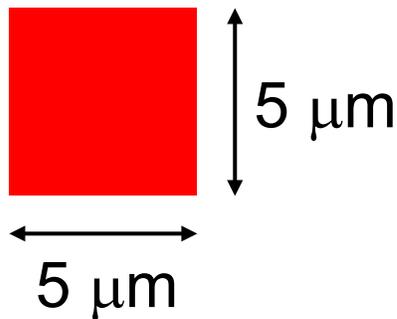
## 5.5. Reglas de diseño

Al diseñar un dispositivo MEMS, se deben considerar las reglas de diseño de la tecnología a utilizar para la microfabricación del dispositivo. Las reglas de microfabricación se determinan por cada laboratorio de cuarto limpio, centro

o instituto donde se realiza la fabricación, las reglas de diseño del CIDESI son las siguientes:

### 5.5.1. Grosor mínimo

El grosor mínimo que se debe tener en la estructura de silicio debe de ser  $5\mu\text{m}$ , porque el grabado que se hace en la máscara se realiza con un láser de un diámetro de  $4\mu\text{m}$ , en la Figura 5.8 se presenta un ejemplo de la estructura.



*Figura 5.8. Ejemplo del grosor mínimo. Adaptación de (Universidad Autónoma de Ciudad Juárez, 2016).*

### 5.5.2. Espacio entre estructuras

El espacio mínimo entre las estructuras de silicio es de  $5\mu\text{m}$ , porque el grabado que se hace en la máscara se realiza con un láser de un diámetro de  $4\mu\text{m}$ , en la Figura 5.9 se presenta un ejemplo de espacio entre estructuras.

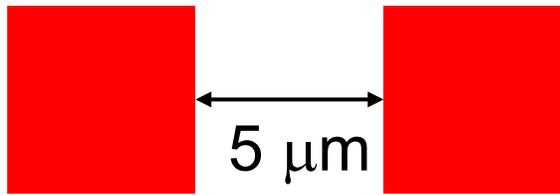


Figura 5.9. Ejemplo del espacio mínimo entre estructura. Adaptación de (Universidad Autónoma de Ciudad Juárez, 2016).

### 5.5.3. Diámetro o radio

Si en el diseño del dispositivo se tiene un diámetro o radio, se tiene que adaptar la geometría para que se pueda realizar el grabado, ya que el diámetro mínimo que se puede hacer es de  $5\ \mu\text{m}$ , en la Figura 5.10 se presenta un ejemplo.

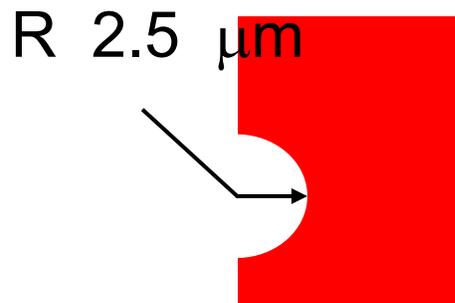


Figura 5.10. Ejemplo de un radio en la estructura. Adaptación de (Universidad Autónoma de Ciudad Juárez, 2016).

### 5.5.4. Anclas mecánicas

El tamaño mínimo del ancla mecánica es de  $120\ \mu\text{m} \times 120\ \mu\text{m}$ , y no tiene un límite de tamaño máximo de dicha ancla, en la Figura 5.11 se presenta un ejemplo.

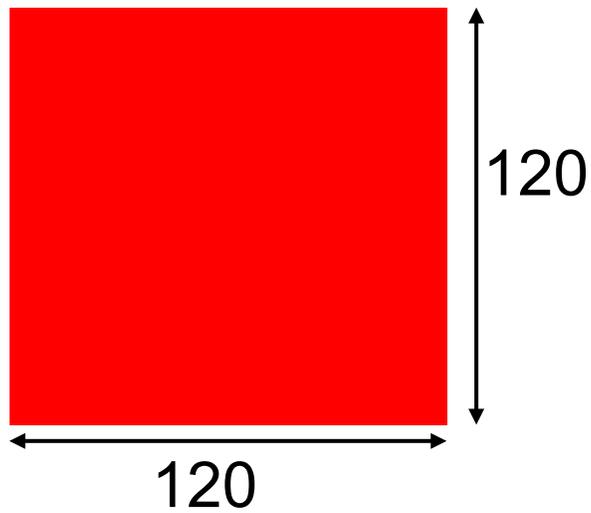


Figura 5.11. Ejemplo del ancla. Adaptación de (Universidad Autónoma de Ciudad Juárez, 2016).

### 5.5.5 Anclas de alimentación.

El tamaño mínimo del ancla eléctrica es de  $120\ \mu\text{m} \times 120\ \mu\text{m}$ , no tiene un límite en el tamaño máximo. Estas anclas se componen de 3 distintos niveles, el primer nivel pertenece a la parte estructural del dispositivo no tiene límite de tamaño, el segundo nivel es el Metal BIAS, este es un nivel que tiene un desface con el ancla de  $15\ \mu\text{m}$  por cualquier lado del ancla como se muestra en la Figura 5.12.

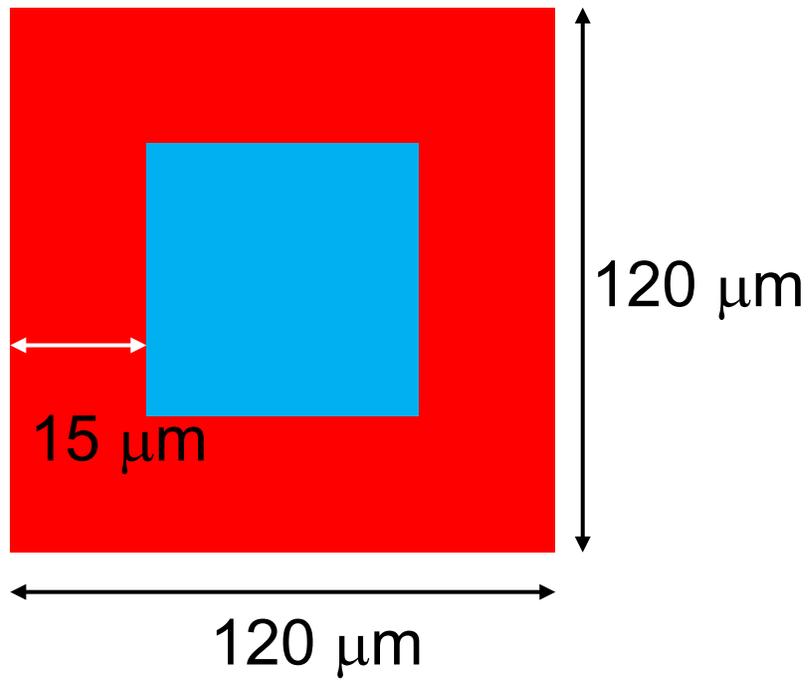


Figura 5.12. Ejemplo de anclas eléctricas del nivel 1 y 2. Adaptación de (Universidad Autónoma de Ciudad Juárez, 2016).

Sobre el nivel 2 se encuentra el nivel 3, este nivel es más grande que el nivel 2, este cuenta con un desfase de 5  $\mu\text{m}$  por cualquier lado del ancla, como se muestra en la Figura 5.13.

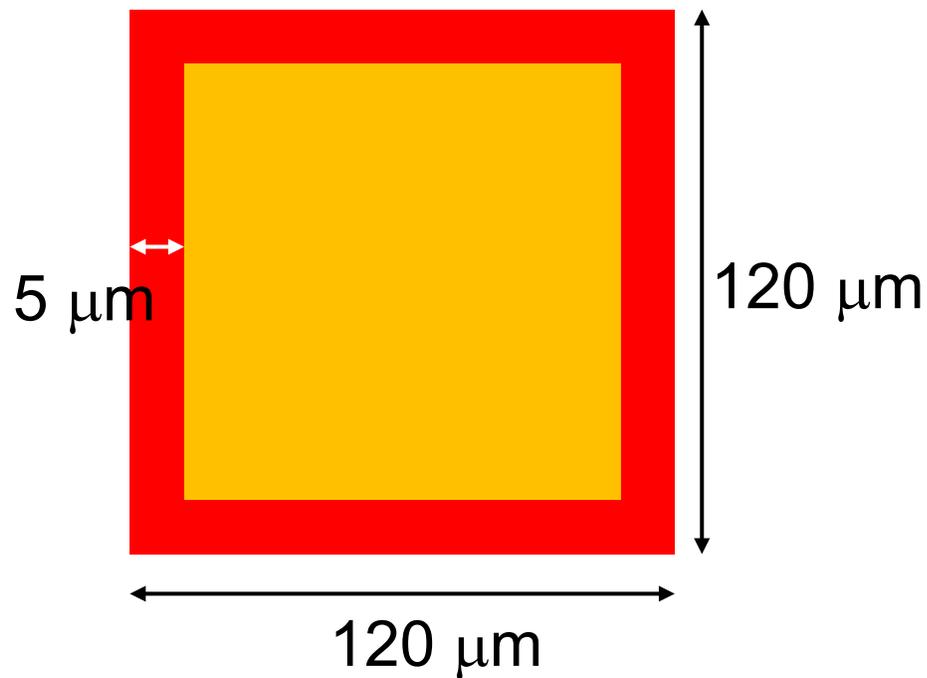


Figura 5.13. Ejemplo de anclas eléctricas del nivel 1 y 3. Adaptación de (Universidad Autónoma de Ciudad Juárez, 2016).

### 5.5.6. Aislante

Para aislar las anclas eléctricas se separan de cualquier parte del dispositivo con una distancia mínima de 25 μm, con el objetivo de no energizar otras partes de la oblea y no crear un corto circuito por accidente, como se muestra en la Figura 5.14.

### 5.5.7. Movimiento

Para la operación de la pinza debe haber una distancia de seguridad entre partes móviles y partes fijas, para evitar interferencia entre ellas, la distancia mínima es de 25 μm, de ambos lados de la parte móvil para evitar restringir su movimiento, como se muestra en la Figura 5.15.

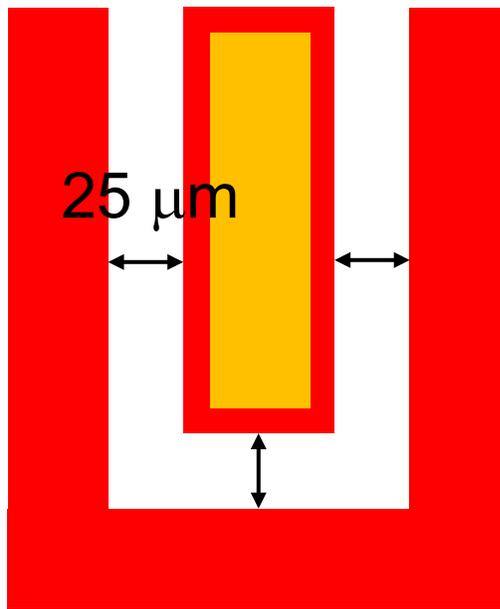


Figura 5.14. Forma de aislar. Adaptación de (Universidad Autónoma de Ciudad Juárez, 2016).

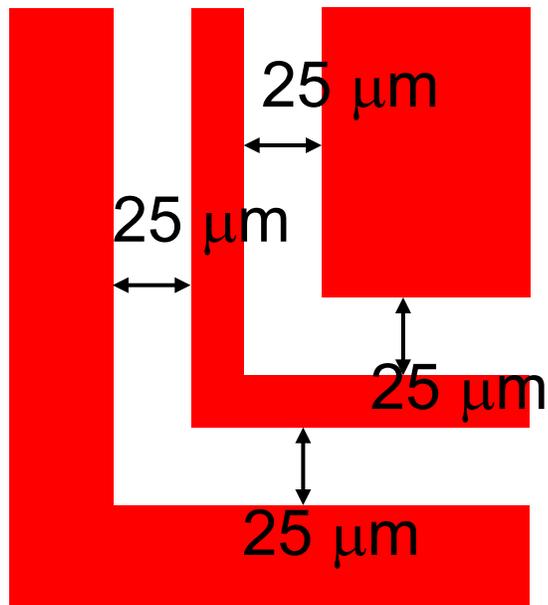


Figura 5.15. Espacio para un trabajo libre. Adaptación de (Universidad Autónoma de Ciudad Juárez, 2016).

### 5.5.8. Relleno

Si se cuenta con una parte móvil que tenga un espacio dentro de ella, se puede rellenar con silicio estructural. El tamaño mínimo para este relleno es de  $50\ \mu\text{m} \times 50\ \mu\text{m}$ , y no se recomienda que termine en punta. En caso necesario, se utilizan formas poligonales. Debe respetarse la regla anterior, como se muestra en la Figura 5.16.

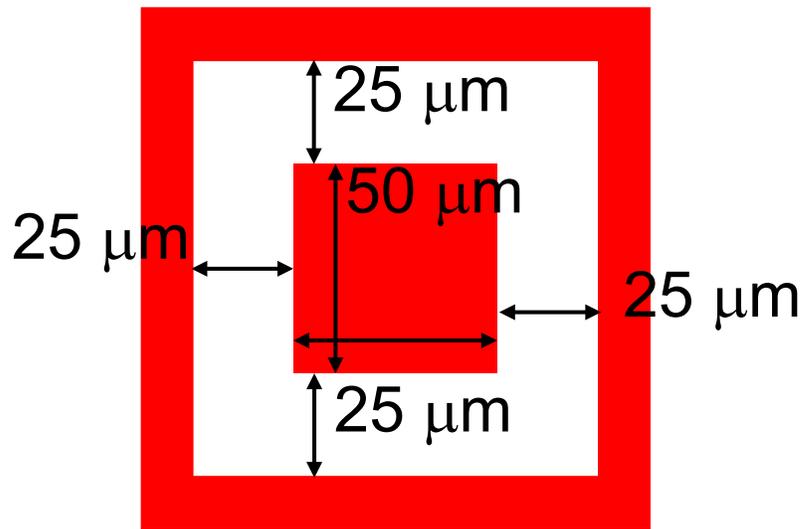


Figura 5.16. Relleno en los dispositivos. Adaptación de (Universidad Autónoma de Ciudad Juárez, 2016).

### 5.5.9. Regla para medir

Para medir el desplazamiento de las partes móviles del dispositivo, se agregan reglas en los sitios adecuados, de un solo lado o ambos. La regla está conformada por una serie de Viga en voladizo de dos longitudes diferentes, intercalados para facilitar la medición.

En los casos donde es posible agregar dos reglas de medición opuestas, es recomendable que exista un desfase entre ellas igual a la mitad del ancho de los dientes, con la finalidad de incrementar la precisión en un 50%, como se muestra en la Figura 5.17.

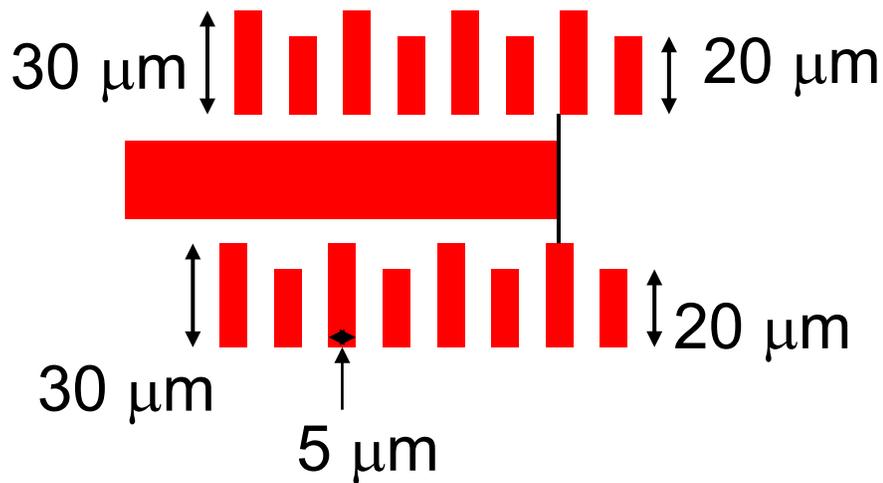


Figura 5.17. Reglas de medición. Adaptación de (Universidad Autónoma de Ciudad Juárez, 2016).

### 5.5.10. Dado

El dado está formado por una colección de dispositivos organizados de tal forma que, se minimice el espacio desperdiciado al fabricarlos. Su tamaño es de 4300 μm x 5800 μm, como se muestra en la Figura 5.18. Posteriormente, se procede a su liberación sobre la oblea. Esta liberación se favorece por el marco de separación.

### 5.5.7. Movimiento

Para la operación de la pinza debe haber una distancia de seguridad entre partes móviles y partes fijas, para evitar interferencia entre ellas, la distancia mínima es de 25 μm, de ambos lados de la parte móvil para evitar restringir su movimiento, como se muestra en la Figura 5.15.

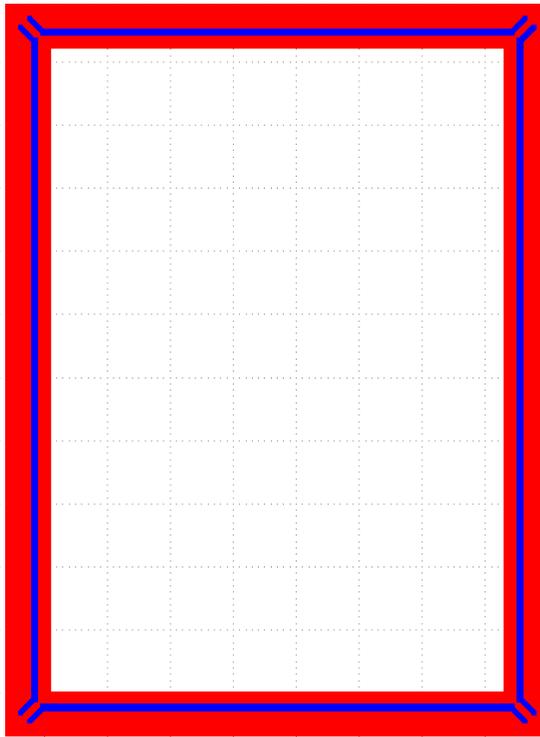
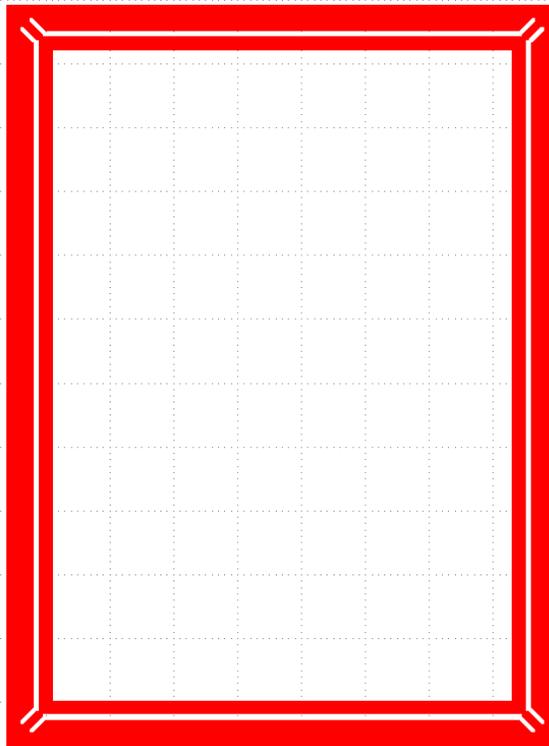


Figura 5.18. Dado. Adaptación de (Universidad Autónoma de Ciudad Juárez, 2016).

### 5.5.11. Marco de separación

En el dado se encuentra el marco de separación, este se conforma por dos rectángulos que se encuentran uno dentro del otro en la parte estructural de la oblea de silicio de un grosor de  $200\ \mu\text{m}$  y  $100\ \mu\text{m}$  respectivamente, con un pozo entre en medio de estos dos de  $50\ \mu\text{m}$ , el primer rectángulo es del tamaño del dado y el segundo rectángulo es de  $3800\ \mu\text{m} \times 5300\ \mu\text{m}$ . Estos dos rectángulos se encuentran unidos por sus cuatro esquinas con una forma que favorece la separación del rectángulo interior como se muestra en la Figura 5.19.



*Figura 5.19. Marco de separación. Adaptación de (Universidad Autónoma de Ciudad Juárez, 2016).*

## **5.6. Software de apoyo**

Para el proceso de microfabricación se necesita el apoyo de diferentes herramientas de software, que se usan con el propósito de verificar que los dispositivos estén en la posición correcta, así como que no se superpongan.

### **5.6.1. K-Layout**

K-Layout es un software de diseño de Integración a escala muy grande o en inglés “Very large-scale integration” o por sus siglas VLSI, este es un proceso para crear un microchip integrado por millones de transistores, como se muestra en la Figura 5.20.

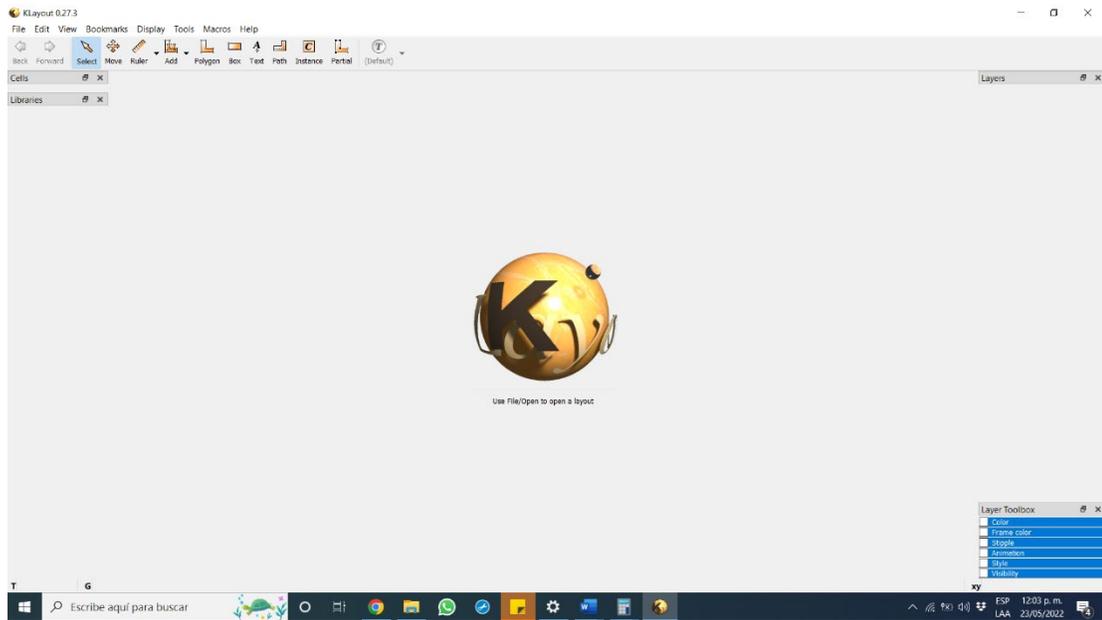


Figura 5.20. Interfaz de K-Layout.

El software permite encontrar errores de manera ágil, ya si un diseño tiene errores, lo presenta como contornos o perímetros, esto es, vacíos.

## 5.7. Microfabricación (proceso)

La microfabricación se llevó a cabo en el CIDESI en el departamento de Microtecnologías, donde el Dr. Jesús Javier Alcantar Peña funge como el Gerente del Laboratorio de Cuarto Limpio y el Mtro. Juan Ponce Hernández funge como encargado de las bahías de Fotolitografía y Grabado seco.

### 5.7.1. Metalización

En el inicio del proceso se deposita una capa de metal (aluminio) con un espesor de 200 nm, esta capa sirve como enmascarante para la protección de las estructuras que se forman en la oblea. El equipo que se utiliza para el depósito del metal es el Evaporador por haz de electrones (EBE, por las

siglas en inglés de Evaporador por haz de electrones) como se muestra en la Figura 5.21. La técnica empleada por el EBE es la Deposición Física de Vapor de haz de electrones (EBPV, por las siglas en inglés de Deposición Física de Vapor de haz de electrones).



*Figura 5.21. EBE en el cuarto limpio. Propiedad del Laboratorio de Microtecnologías de CIDESI.*

### **5.7.1.1. Deposición Física de Vapor de haz de electrones**

Esta técnica consiste en depositar una capa de aluminio con un espesor de 200 nm en la oblea SOI. Antes realizar este proceso, se deben identificar a las partes que conforman a la cámara de vacío (Figura 5.22). En las siguientes subsecciones se describen brevemente.

### **Base porta obleas**

Es la base donde se coloca la porta obleas de cabeza y esta está girando durante todo el proceso de depósito para un depósito uniforme, se muestra con el número 1.

### **Tapa de protección oblea**

Estas dos placas funcionan como protección a las obleas durante el inicio del proceso de depósito, su función es estar cerradas hasta que se tiene la suficiente potencia en el filamento de tungsteno, después se abren para continuar con el proceso de depósito del metal, es el número 2.

### **Sensores**

Estas plataformas son sensores que detectan la cantidad de material que se está depositando en la oblea, se muestra con el número 3.

### **Tapa de crisol**

Tapa del crisol de igual manera que la tapa de protección de las obleas protege en los inicios del proceso mientras el filamento empieza a tener la suficiente potencia para el depósito, con el número 4.

### **Contenedor de crisoles**

El contenedor de crisoles, este contenedor puede albergar hasta 6 crisoles con diferentes metales para el depósito en la oblea, es el número 5.

### **Filamento de tungsteno**

Dentro de la cavidad se encuentra un filamento de tungsteno el cual genera una carga de electrones que son impactados con el crisol que esta al descubierto para empezar con la evaporación del metal y su depósito en la oblea, que se muestra con el número 6.

## **Depósito de metal**

La oblea se coloca en una porta obleas como se muestra en la Figura 5.23. La porta obleas se coloca dentro de la cámara de vacío del equipo como se muestra en la Figura 5.22. Se cierra la cámara del equipo y se empieza a generar un vacío para iniciar el proceso. El vacío necesario dentro de la cámara es de  $5 \times 10^{-6}$  Torr el tiempo en llegar a presión necesaria varia, pero en promedio es de 2 horas. Una vez que se tiene la presión en la cámara el equipo empieza a generar un campo magnético en el filamento de tungsteno y crea un flujo continuo de electrones que se impactan en el metal que contiene el crisol, dependiendo del metal puede ser que pase al estado líquido por el impacto de los electrones para posteriormente evaporarse o el proceso sea de sublimación. Al evaporarse el metal se mueve a través de los electrones antes mencionado, estos salen disparados y se impactan con la oblea que tiene una carga positiva para impactar en la oblea y se genere la capa de metal, los sensores que se encuentran en la cámara se miden el grosor aproximado de la capa depositada en la oblea.

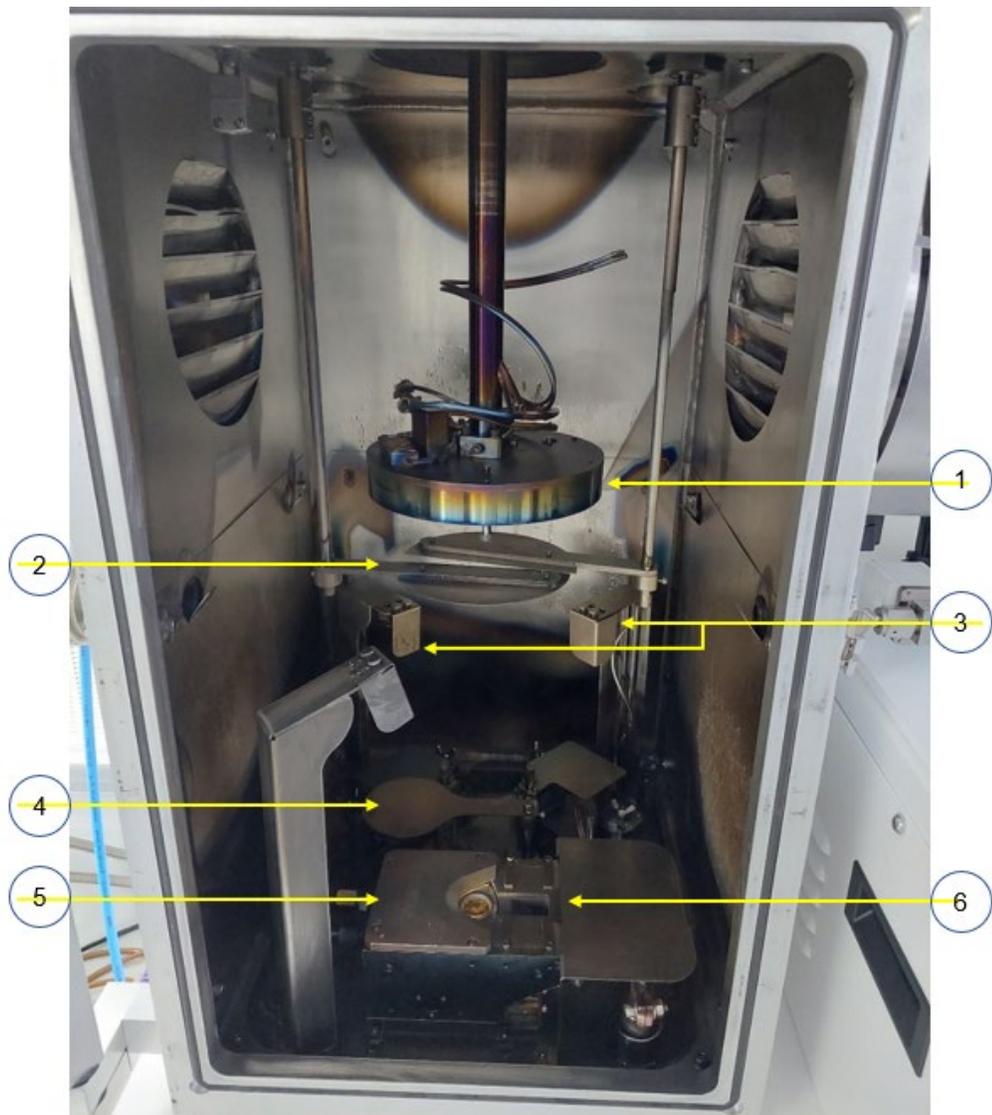
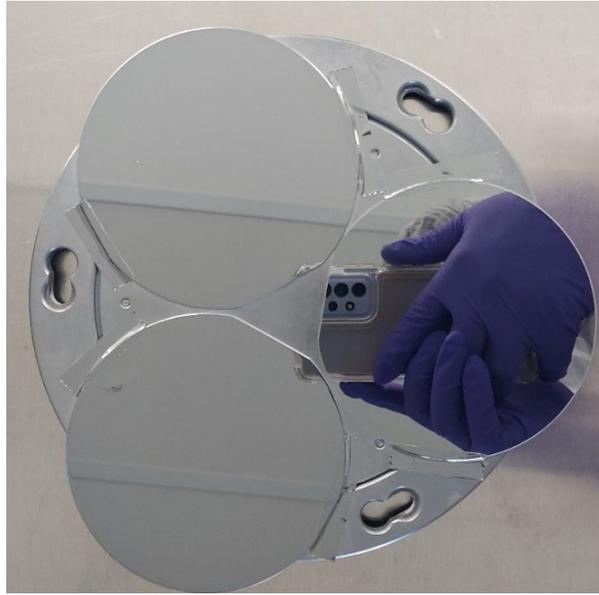


Figura 5.22. Cámara de vacío del EBE. Propiedad del Laboratorio de Microtecnologías de CIDESI. 1. Base porta oblea. 2. Tapa de protección. 3. Sensores. 4. Tapa de crisol. 5. Contenedor de crisol. 6. Filamento de tungsteno



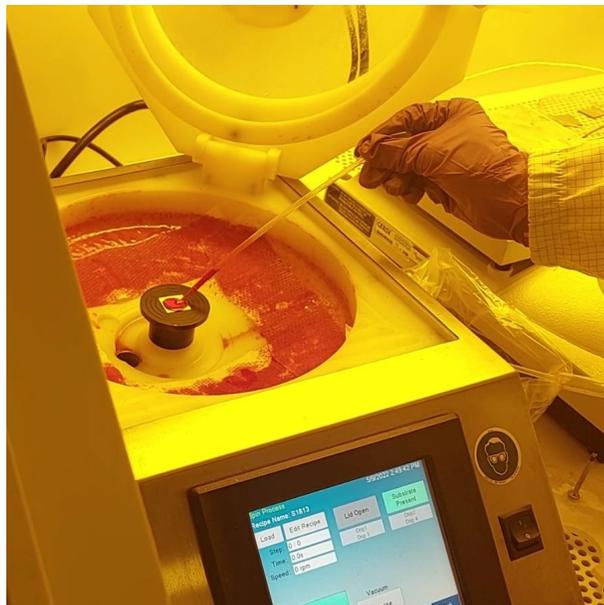
*Figura 5.23. Colocación de obleas SOI.*

## **5.7.2. Resina**

Una vez que se tiene el depósito de aluminio en la oblea SOI se procede a hacer el depósito de la resina positiva S1813, para este proceso se pone la oblea en una máquina centrífuga como se muestra en la Figura 5.24, la cual tiene la capacidad de hacer un vacío bajo la oblea con la intención de que al girar la oblea no salga disparada de su lugar, después se agrega la resina al centro de la muestra como se muestra en la Figura 5.25, después se pone a trabajar la centrífuga que trabaja a 4000 rpm, durante 45 segundos, después de que termina el centrifugado se pasa una plancha caliente a 100° C para calentar la resina durante 1 minuto (Figura 5.26) y mejorar su adherencia a la muestra, teniendo una espesor final de 1.5  $\mu\text{m}$  de resina.



*Figura 5.24. Oblea en la centrifuga. Propiedad del Laboratorio de Microtecnologías de CIDESI.*



*Figura 5. 25 Oblea en la centrifuga con la resina. Propiedad del Laboratorio de Microtecnologías de CIDESI.*

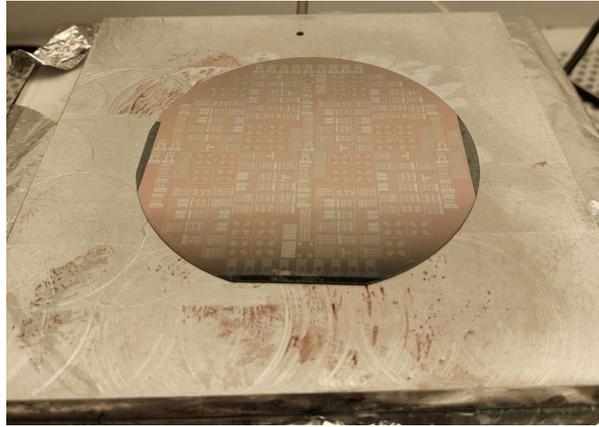


Figura 5.26. Oblea en la plancha. Propiedad del Laboratorio de Microtecnologías de CIDESI.

### 5.7.3. Grabado

Posteriormente, se realiza el grabado de la máscara, en la grabadora de patrones, en la máquina se graba con el cabezal de  $4\ \mu\text{m}$ , el tiempo en el que se desarrolla el proceso de grabado depende del tamaño del diseño total y su complejidad, puede durar desde minutos hasta días. Para las máscaras que se utilizaron en esta tesis el tiempo de grabado fue desde 2 hasta 24 horas, en la Figura 5.27 se muestra una máscara.

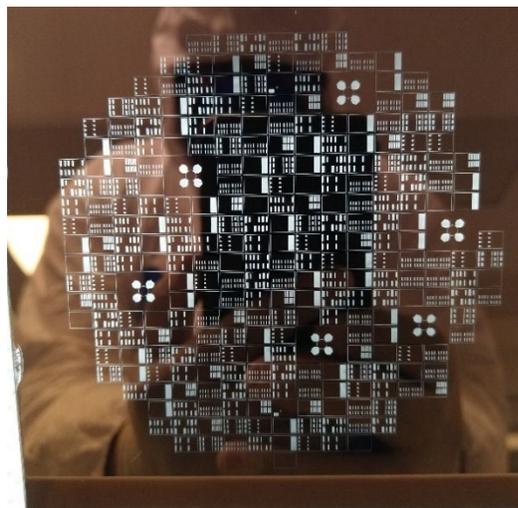


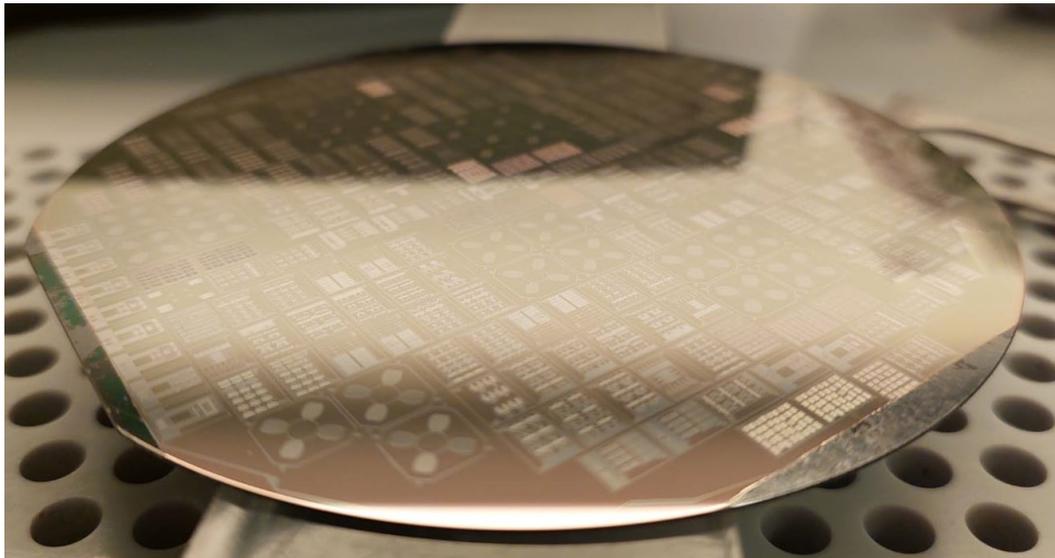
Figura 5.27. Máscara 4 (Pozos grabados).

#### 5.7.4. Traspaso de grabado de máscara a oblea

El traspaso de la oblea se hace por medio de fotolitografía donde se alinean la máscara con la oblea SOI, la distancia de separación entra ambas es de menos de 50  $\mu\text{m}$ . La fotolitografía consiste en transferir los patrones por medio de una luz ultravioleta que pasa los patrones antes grabados en la máscara a la oblea que tiene una capa de resina fotosensible, el tiempo que se expone a esta luz es de 16 segundos.

#### 5.7.5. Revelado de la resina

Una vez que termina el proceso de grabado se pasa al revelado de la resina que fue atacada por el láser en el grabado, este ataque se hace mediante la solución de hidróxido de tetrametilamonio. La solución se coloca en un vaso de vidrio, después se sumerge la muestra en la solución por aproximadamente 1 minuto, para desprender la resina. En la Figura 5.28 se muestra a la oblea grabada.



*Figura 5.28. Oblea después del revelado de la resina.*

## 5.7.6. Ataque químico

Después del revelado se pasa al ataque químico, donde se retira la capa de aluminio que está al descubierto porque no está protegida por la resina. Este ataque se realiza con una solución de atacante de aluminio tipo A, que contiene los ácidos indicados en la Tabla 5.3. El atacante se muestra Figura 5.29:

Tabla 5.3. Ácidos que componen al atacante (Sigma-Aldrich, 2021).

Ácidos	Concentración
Ácido fosfórico	$\geq 70 - < 90\%$
Ácido acético	$\geq 10 - < 20\%$
Ácido nítrico	$\geq 5 - < 10\%$

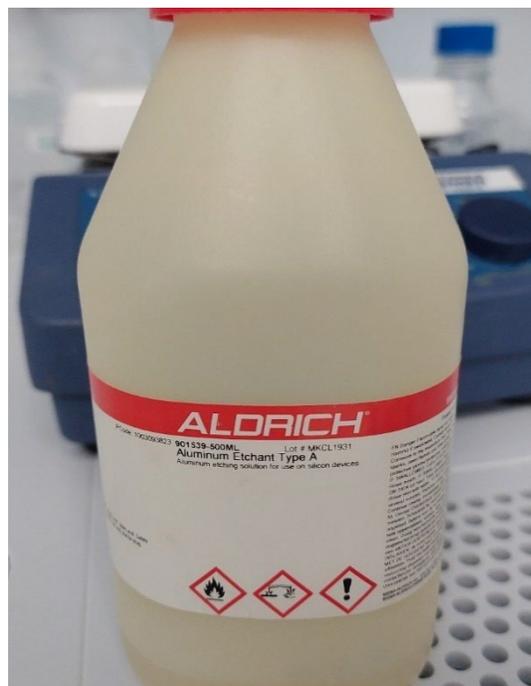


Figura 5.29. Botella de atacante. Propiedad del Laboratorio de Microtecnologías de CIDESI.

Para trabajar en el ataque químico del aluminio se requiere el uso de equipo de protección extra sobre el traje antiestático (Figura 5.30). Se usa una

careta para la protección de la cara, una mascarilla con filtro de carbono activado para evitar inhalar los gases que desprenden los ácidos, un mandil de plástico para la protección del cuerpo y guantes de plástico más grueso para proteger las manos.



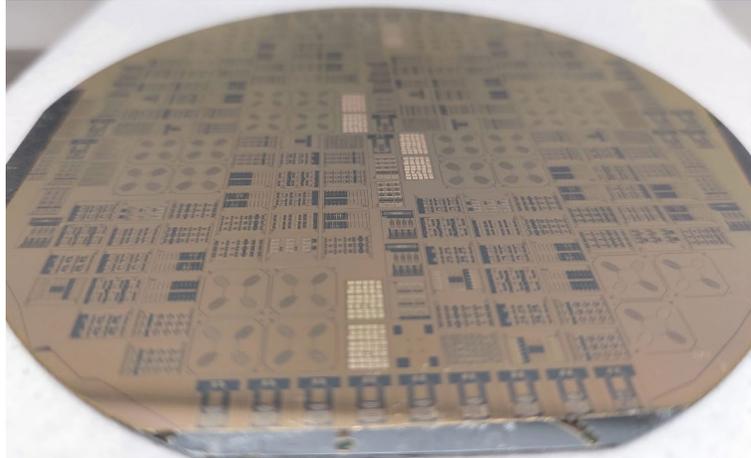
*Figura 5.30. Traje para la manipulación de ácidos. Propiedad del Laboratorio de Microtecnologías de CIDESI.*

En la Figura 5.31 se observa la oblea después del ataque al aluminio.

### **5.7.7. Grabado profundo de iones reactivos**

El grabado profundo de iones reactivos (o DRIE por las siglas en inglés de grabado profundo de iones reactivos), es un proceso de grabado anisotrópico

que se utiliza para crear cavidades profundas en las obleas SOI, en este caso, también se utiliza con obleas de silicio. En la Figura 5.32 se muestra el equipo DRIE.



*Figura 5.31. Oblea con ataque al aluminio.*



*Figura 5.32. Equipo DRIE. Propiedad del Laboratorio de Microtecnologías de CIDESI.*

Para este proceso se emplean varios gases como:

- ❖ Hexafluoruro de azufre (SF<sub>6</sub>)
- ❖ Octafluorociclobutano (C<sub>4</sub>F<sub>8</sub>)
- ❖ Argón
- ❖ Oxígeno

Estos gases son ingresados en la cámara del DRIE con distinto flujo, presión, potencia del Plasma acoplado inductivamente (ICP, por las siglas en inglés de Plasma acoplado inductivamente) y tiempo de exposición. Este proceso se compone de 3 etapas en las cuales hay 5 pasos, que son los siguientes:

- ❖ Pasivación
- ❖ Depasivación
- ❖ Ataque

### 5.7.7.1. Pasivación

La pasivación consiste en ingresar a la cámara el polímero C<sub>4</sub>F<sub>8</sub>, el cual sirve como protección en toda la oblea, en un inicio solo se concentra en la superficie, pero conforme van aumentando los ciclos de ataque, se empiezan a proteger las paredes de los dispositivos.

Tabla 5.4. Datos de la mezcla de gases de Pasivación.

Etapa 1	SF <sub>6</sub> (sccm)	SF <sub>6</sub> (Pa)	C <sub>4</sub> F <sub>8</sub> (sccm)	C <sub>4</sub> F <sub>8</sub> (Pa)	ICP (W)	Tiempo (s)
Paso 1	5	3.3	100	3.3	1000	1
Paso 2	10	3.3	200	3.3	1000	2.1

### 5.7.7.2. Depasivación

Esta etapa consiste en un adelgazamiento de la capa de protección de  $C_4F_8$  que se genera en la etapa anterior, en esta etapa se ingresa el gas  $SF_6$  para adelgazar de manera dirigida a la protección de la parte horizontal de la oblea. Las partes verticales (paredes) siguen con protección en el proceso.

Tabla 5.5. Datos de la mezcla de gases de Depasivación.

Etapa 2	$SF_6$ (sccm)	$SF_6$ (Pa)	$C_4F_8$ (sccm)	$C_4F_8$ (Pa)	$O_2$ (sccm)	$O_2$ (Pa)	ICP (W)	Tiempo (s)
Paso 3	100	4	10	4	5	4	2000	0.7
Paso 4	200	4	10	4	10	4	2000	1.4

### 5.7.7.3. Ataque

Con el ataque se ingresa el gas  $SF_6$ , va desbastando el silicio en las zonas libres de protección para seguir con el crecimiento de las cavidades.

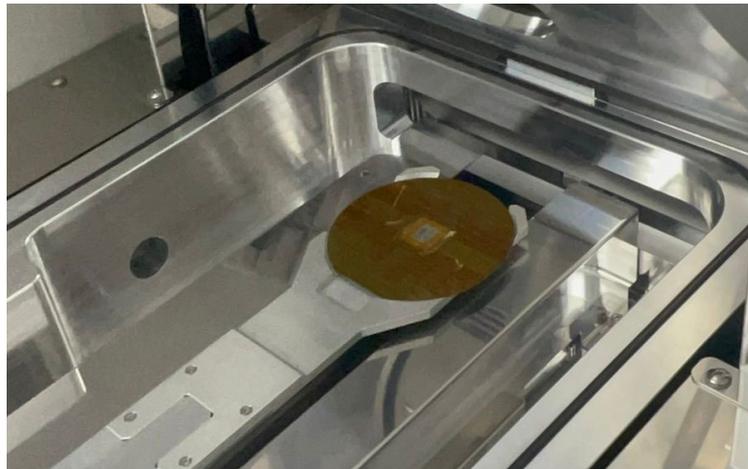
Tabla 5.6. Datos de la mezcla de gases de Ataque.

Etapa 3	$SF_6$ (sccm)	$SF_6$ (Pa)	$C_4F_8$ (sccm)	$C_4F_8$ (Pa)	$O_2$ (sccm)	$O_2$ (Pa)	ICP (W)	Tiempo (s)
Paso 5	400	9.3	10	9.3	20	9.3	1500	2

### 5.7.7.4. Proceso

El proceso de grabado en seco se realiza dentro de la cámara de vacío del equipo DRIE, se coloca la oblea en el brazo que ingresa a la cámara de vacío, como se muestra en la Figura 5.33. Una vez que se tiene en el brazo la oblea se tiene que elegir la receta de ataque. La receta de ataque consiste en la cantidad de gas que se ingresará a la cámara por un tiempo definido a una presión definida como se muestran en las Tabla 5.4 a 5.6. Luego, en la

cámara inicia el proceso de grabado seco, el primer paso es hacer limpieza automática de la cámara para limpiar cualquier residuo que haya quedado de otro proceso anterior. Después se ingresa la oblea a la cámara, se deposita en la base y empieza el proceso de la receta de gases. Los ciclos de ataque (pasivación, depasivación y ataque) dependen de la profundidad que se quiera grabar. Para poder obtener una profundidad de 70  $\mu\text{m}$  se necesitan un aproximado de 240 ciclos de ataque, en la Figura 5.34 se muestra la oblea en la cámara de vacío del equipo DRIE y en la Figura 5.35 a la oblea después de 240 ciclos de ataque.



*Figura 5.33. Muestra en el brazo antes de entrar a la cámara de vacío.*



Figura 5.34. Oblea en la cámara de vacío del DRIE en el proceso de grabado.



Figura 5.35. Micropinzas después del proceso DRIE.

### 5.7.8. Retiro de las capas enmascarantes

Una vez se ha completado el ataque seco de manera selectiva y se ha llegado al óxido de silicio en las zonas requeridas, el siguiente paso es el retiro de las dos capas de enmascarantes, resina S1813 y aluminio. Para el

retiro de la resina, la oblea se sumerge en acetona y se espera durante 2 minutos, mientras se mueve el contenedor de un lado a otro de manera suave para el retiro. Posteriormente la oblea se enjuaga con agua desionizada para retirar el exceso de acetona y, posteriormente, se seca exponiendo la oblea con una pistola que emite ráfagas de gas nitrógeno para secar el agua.

Al concluir el proceso anterior, se procede a sumergir la oblea en atacante de aluminio con una temperatura de 30°C durante 2 minutos para retirar el aluminio. mientras la oblea se encuentra sumergida, se mueve para retirar el aluminio. Posteriormente, se sumerge en agua desionizada para limpiar la oblea del atacante de aluminio y se procede a secar con nitrógeno.

### **5.7.9. Metalización de la capa Metal BIAS**

Con la oblea ya sin enmascarante, se hace un nuevo depósito de metal en este caso, cromo. En el DRIE se coloca la oblea, luego se realiza el depósito de resina y el papara transferir los patrones de la máscara 2 a la oblea, con la intención de proteger el metal que se debe quedar en las anclas, después se retira el excedente de metal con atacante de cromo. Por último, se realizó el retiro de la resina por medio de acetona.

### **5.7.10. Metalización de la capa Metal contactos**

Una vez finalizado el proceso anterior, se repite para hacer un nuevo depósito de metal (oro). El proceso inicia con una nueva capa de metal depositada, después de utiliza la técnica de fotolitografía para hacer un nuevo traspaso una nueva transferencia de patrones usando la máscara 3 (metal contacto). Luego, se retira el exceso de metal, para posteriormente, limpiar la oblea.

## 5.8. Prototipos

Con los procesos de fabricación descritos, se obtuvo el modelo de micropinza propuesto en este trabajo, la micropinza propuesta (modelo 3) que se muestra en la Figura 5.36.

En la estructura no se notaron adelgazamiento en los brazos de la micropinza, como se muestra en la Figura 5.37. En el caso del microactuador chevrón tampoco se tienen adelgazamientos en sus brazos, como se muestran en las Figuras 5.38. En la transferencia de las geometrías no hubo modificaciones en el grosor del dispositivo, ni posteriormente en el proceso de retirar el excedente de enmascarantes, ni en proceso de grabado en seco (DRIE). Para la caracterización de la micropinza se debe en principio, realizar la liberación de los dados con todas las micropinzas.

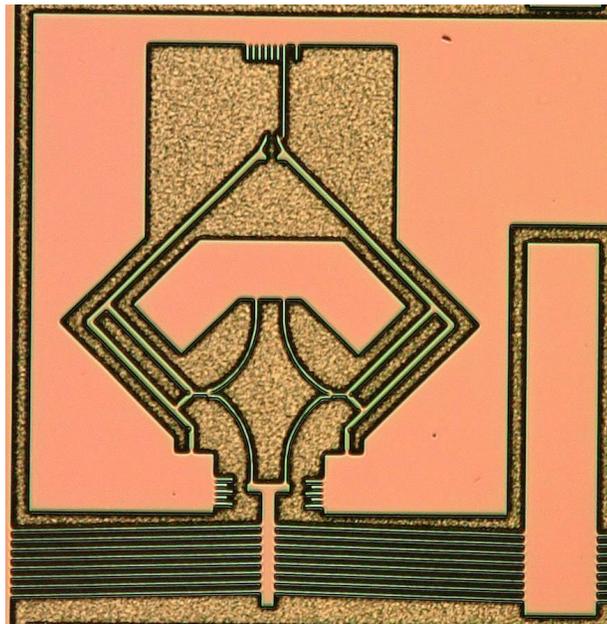


Figura 5.36. Micropinza modelo 3

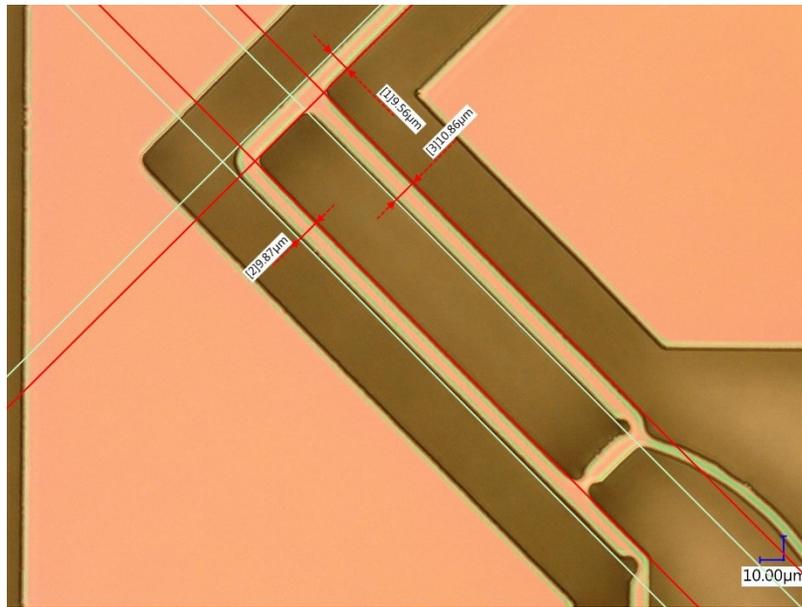


Figura 5.37. Brazo de la micropinza.

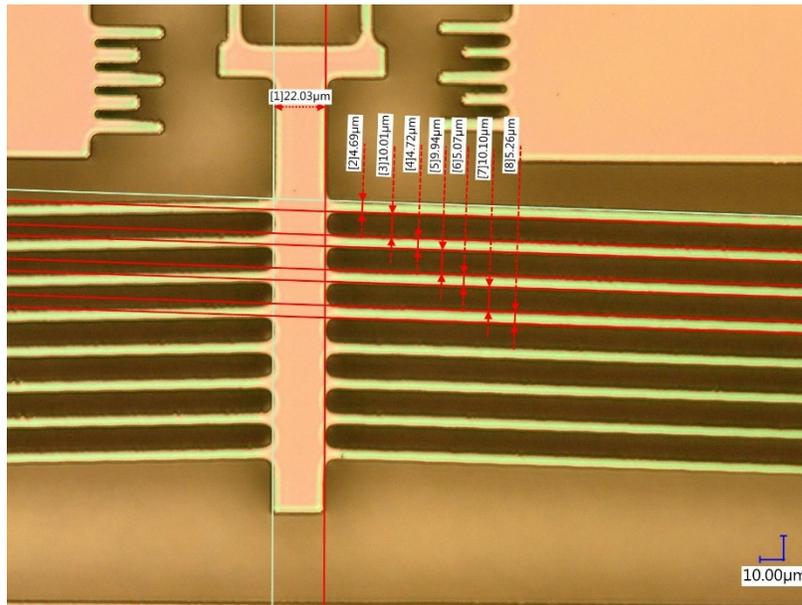
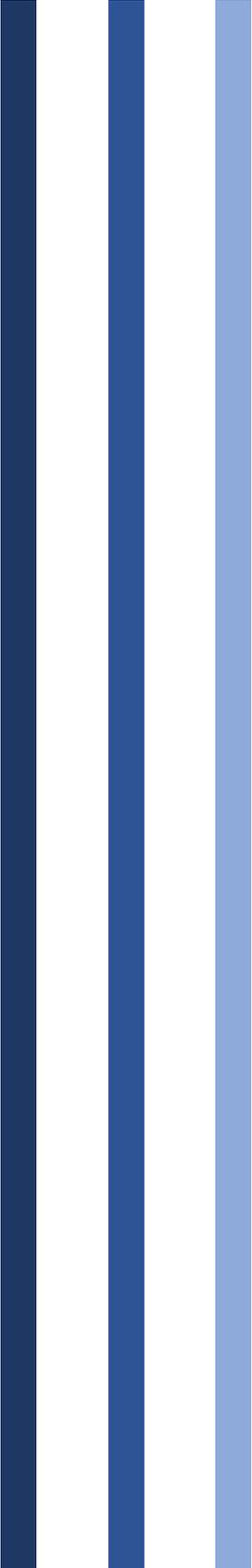


Figura 5.38. Micro actuador chevrón.



# ***Capítulo 6.***

## ***Conclusiones y trabajo futuro***

En este capítulo se presentan los resultados obtenidos, las conclusiones derivadas de este trabajo de tesis, así como el trabajo a futuro que se propone.

## 6.1. Conclusiones

Los parámetros básicos de la micropinza considerados en este trabajo son el desplazamiento entre sus puntas y la fuerza de sujeción que se generan, a través del arreglo de pantógrafo modificado.

Se realizó el modelado de los parámetros de desplazamiento y fuerza. El modelado se realizó en cada uno de los elementos que componen a la micropinza. Para la viga en voladizo se realizó el ajuste del modelo térmico, de acuerdo con las características de la viga. Para el chevrón utilizado, se adaptaron los modelos térmico y electrotérmico. Finalmente, para el pantógrafo se realizó el modelado mecánico correspondiente.

En la micropinza modelo 3, que se consideró como final, además de los elementos del actuador chevrón convencional, se integraron en los brazos 6 bisagras de flexión, y 2 anclas mecánicas, además de una adicional entre los brazos y 4 arcos de unión. Con el ancla entre los brazos, se incrementó a la fuerza de sujeción (6%), en comparación con el modelo 2. El movimiento residual de las mandíbulas en el eje Z se redujo, con esta ancla, localizada en la parte central de los brazos, siendo solamente de 22.24 nm.

En los análisis analítico y numérico se implementaron los siguientes materiales: silicio y polisilicio, para conocer el comportamiento de la micropinza, cuando se utilizan como materiales estructurales. Se observó que la implementación en polisilicio los resultados son mayores a los del silicio. Sin embargo, se optó por el silicio ya que es uno de los principales materiales usados para la microelectrónica y porque se cuenta con una mayor investigación en el proceso de fabricación. Además de que, gracias al proyecto A1-S-33433, se cuenta con materiales, así como convenios con UACJ y CIDESI para llevar a cabo las pruebas de microfabricación.

Se calculó de manera teórica y numérica a los parámetros básicos de la micropinza, con el apoyo del software ANSYS™ Workbench. El desplazamiento que se obtuvo en cada brazo es 11.2  $\mu\text{m}$ , lo que permite sujetar microcables de un diámetro de 36  $\mu\text{m}$  a 25  $\mu\text{m}$ . La fuerza obtenida es de 439  $\mu\text{N}$ , que permite sujetar pesos de hasta 44.7 mg. El esfuerzo de la pinza es de 465 MPa, menor al esfuerzo último del silicio.

Entre las pinzas de silicio con las que se comparó, se tiene un desempeño competitivo, con un tamaño de estructura menor.

El arreglo de dos micropinzas encontradas frontalmente, muestra mejores resultados que a micropinza individual. Sobre este arreglo, aún pueden realizarse ajustes para mejorar su desempeño. Además, su microfabricación puede ser relativamente sencilla, ya que, sus 4 puntas comparten el mismo pozo. Debido a que el objetivo se enfocó en el diseño de la micropinza individual, no se analizó su desempeño a una mayor profundidad. Pero, permite validar el uso de la micropinza individual en configuraciones complejas.

Se realizó el proceso de microfabricación de la micropinza individual en CIDESI, Querétaro. Cabe señalar que, este proceso se retrasó debido a la pandemia por SARS COV-2. No obstante, las pruebas de fabricación fueron concluidas, lográndose la profundidad de grabado requerida, el cual, fue el mayor reto enfrentado. En este periodo, también se enfrentaron varios contratiempos debidos a fallas en algunos de los equipos, primero de UCAJ, y después de CIDESI, principalmente, equipos DRIE y alineadoras. Los cambios al estar cerrados los laboratorios también implicaron que, las recetas estándar dejaran de ser funcionales, por lo que, la determinación de las nuevas recetas de gases, precisó de mucho tiempo y trabajo adicional.

## 6.2. Trabajo futuro

Como trabajo futuro se contempla obtener los datos, empaquetar y realizar las pruebas experimentales de la micropinza.

Se propone continuar con la mejora en los diseños, enfocándose, por ejemplo, en aumentar o disminuir la apertura inicial para considerar diferentes objetivos de sujeción.

Se propone retomar el trabajo con el arreglo de la micropinza, ya que es posible realizar mejoras al modelo, tales como las obtenidas al modificar la forma de las puntas.

# Bibliografía

- A. Serway, R., & Jewett Jr., J. W. (2009). Física Electricidad Y Magnetismo. In C. Learning (Ed.), *Electricidad Y Magnetismo* (Septima Ed).
- Ali, N., Shakoor, R. I., & Hassan, M. M. (2011). Design, modeling and simulation of electrothermally actuated microgripper with integrated capacitive contact sensor. *Proceedings of the 14th IEEE International Multitopic Conference 2011, INMIC 2011*, 201–206. <https://doi.org/10.1109/INMIC.2011.6151473>
- Bindu, R. S., Kushal, & Potdar, M. (2014). Study of Piezoelectric Cantilever Energy Harvesters. *International Journal of Innovative Research & Development*, 3(2), 39–42. [www.ijird.com](http://www.ijird.com)
- Bogue, R. (2013). Recent developments in MEMS sensors: A review of applications, markets and technologies. In *Sensor Review* (Vol. 33, Issue 4, pp. 300–304). <https://doi.org/10.1108/SR-05-2013-678>
- Carlson, K., Andersen, K. N., Eichorn, V., Petersen, D. H., Mølhave, K., Bu, I. Y. Y., Teo, K. B. K., Milne, W. I., Fatikow, S., & Bøggild, P. (2007). A carbon nanofibre scanning probe assembled using an electrothermal microgripper. *Nanotechnology*, 18(34). <https://doi.org/10.1088/0957-4484/18/34/345501>
- Cervantes Lozano, P. (2006). *Diseño, Modelado, Simulación y Experimentación de un Actuador Electrotermomecánico MEMS tipo Chevron*. Centro de Investigación y Estudios Avanzados del I.P.N. Unidad Guadalajara.
- Chu, J., Zhang, R., & Chen, Z. (2011). A novel SU-8 electrothermal microgripper based on the type synthesis of the kinematic chain method and the stiffness matrix method. *Journal of Micromechanics and Microengineering*, 21(5). <https://doi.org/10.1088/0960-1317/21/5/054030>
- Colin, A. (2020). *Micropinza basada en un arreglo de pantógrafos*. Universidad Tecnológica de Emiliano Zapata.

- D. Pilkey, W., F. Pilkey, D., & Bi, Z. (2012). Peterson's Stress Concentration Factors. In *הנוטע עלון* (Fourth Ed, Vol. 66). Wiley.
- Demaghsi, H., Mirzajani, H., & Ghavifekr, H. B. (2014a). A novel electrostatic based Microgripper (Cellgripper) integrated with contact sensor and equipped with vibrating system to release particles actively. *Microsystem Technologies*, 20(12), 2191–2202. <https://doi.org/10.1007/s00542-013-1989-3>
- Demaghsi, H., Mirzajani, H., & Ghavifekr, H. B. (2014b). Design and simulation of a novel metallic microgripper using vibration to release nano objects actively. *Microsystem Technologies*, 20(1), 65–72. <https://doi.org/10.1007/s00542-013-1888-7>
- Egor, P. P. (2000). *Mecánica de Sólidos* (2nd ed.). Pearson.
- Espinosa, H. D., Zhu, Y., & Moldovan, N. (2007). Design and operation of a MEMS-based material testing system for nanomechanical characterization. *Journal of Microelectromechanical Systems*, 16(5), 1219–1231. <https://doi.org/10.1109/JMEMS.2007.905739>
- Fraser, J., Hubbard, T., & Kujath, M. (2006). *Theoretical and experimental analysis of an off-chip microgripper Analyse th eorique et exp erimentale d ' une micro pince off chip*. 31(2).
- Fujita, H. (1998). Microactuators and micromachines. *Proceedings of the IEEE*, 86(8), 1721–1732. <https://doi.org/10.1109/5.704278>
- He, J., & Fu, Z.-F. (2001). *Modal Analysis*.
- Hibbeler, R. C. (2011). *Mecánica de materiales* (8th ed.). Pearson.
- Judy, J. W. (2001). Microelectromechanical systems (MEMS): fabrication, design and applications. *Smart Mater. Struct*, 10, 1115. <http://iopscience.iop.org/0964-1726/10/6/301>
- Kaajakari, V. (2009). *Practical MEMS* (1st ed.). small gear publishing.
- Kim, K., Liu, X., Zhang, Y., & Sun, Y. (2008). Nanonewton force-controlled manipulation of biological cells using a monolithic MEMS microgripper

- with two-axis force feedback. *Journal of Micromechanics and Microengineering*, 18(5). <https://doi.org/10.1088/0960-1317/18/5/055013>
- M. Gere, J. (2017). *Mecánica de Materiales* (6th ed., Vol. 91). Thomson.
- Medina-Cruz, R. (2022). *Micropinza mejorada, basada en arreglos flexibles, y su escalamiento*. Universidad Autónoma del Estado de Morelos.
- Mekalke, M. G. C., & Sutar, M. A. V. (2016). Modal Analysis of Cantilever Beam for Various Cases and its Analytical and Fea Analysis. In *International Journal of Engineering Technology, Management and Applied Sciences www.ijetmas.com* (Vol. 4, Issue 2). [www.ijetmas.com](http://www.ijetmas.com)
- Mia, M. S., Islam, M. S., & Ghosh, U. (2017). Modal analysis of cracked cantilever beam by finite element simulation. *Procedia Engineering*, 194, 509–516. <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2017.08.178>
- Muhammad, H. B. (2012). *DEVELOPMENT OF A BIO-INSPIRED MEMS BASED TACTILE SENSOR ARRAY FOR AN ARTIFICIAL FINGER*.
- Mustafa, G., Gul, S. T., Nadeem, S., Pakistan Institute of Engineering & Applied Sciences, Institute of Electrical and Electronics Engineers. Islamabad Section., & Institute of Electrical and Electronics Engineers. (2016). *2016 International Conference on Emerging Technologies: October 18-19, 2016, Islamabad, Pakistan*.
- Noolvi, B., & Nagaraj, S. (2020). Modal analysis of smart composite cantilever beams. *Materials Today: Proceedings*, 27, 1720–1722. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2020.03.643>
- P. Beer, F., Johnston Jr., E. R., & T. DeWolf, J. (2010). *Mecánica de materiales* (5th ed.). McGraw Hill. <https://doi.org/10.1017/CBO9781107415324.004>
- Panepucci, R. R., & Martinez, J. A. (2008). Novel SU-8 optical waveguide microgripper for simultaneous micromanipulation and optical detection. *Journal of Vacuum Science & Technology B: Microelectronics and*

- Nanometer Structures*, 26(6), 2624–2627.  
<https://doi.org/10.1116/1.2993171>
- Patil, V. S., Anerao, P. R., & Chinchankar, S. S. (2018). Design and Analysis of Compliant Mechanical Amplifier. *Materials Today: Proceedings*, 5(5), 12409–12418. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2018.02.220>
- Petersen, K. E. (1982). Silicon as a Mechanical Material. In *PROCEEDINGS OF THE EEE* (Vol. 70, Issue 5).
- Pilkey, W. D. (2005). *Formulas for stress, strain, and structural matrices*. John Wiley & Sons.
- Potekhina, A., & Wang, C. (2019). Review of electrothermal actuators and applications. *Actuators*, 8(4). <https://doi.org/10.3390/ACT8040069>
- Rebello, K. J. (2004). Applications of MEMS in surgery. *Proceedings of the IEEE*, 92(1), 43–55. <https://doi.org/10.1109/JPROC.2003.820536>
- Shivhare, P., Uma, G., & Umapathy, M. (2016). Design enhancement of a chevron electrothermally actuated microgripper for improved gripping performance. *Microsystem Technologies*, 22(11), 2623–2631. <https://doi.org/10.1007/s00542-015-2561-0>
- Sigma-Aldrich. (2021). *Ficha de datos de atacante de aluminio*.
- Solano, B., & Wood, D. (2007). Design and testing of a polymeric microgripper for cell manipulation. *Microelectronic Engineering*, 84(5–8), 1219–1222. <https://doi.org/10.1016/j.mee.2007.01.153>
- Southwest Center for Microsystems Education. (2017). *MEMS History*. <https://scme-support.org/index.php/educational-materials/introductory-topics/mems-history>
- T. Leondes, C. (2006). MEMS/NEMS Handbook Techniques and Applications. In *Methods*. Springer.
- Tecpoyotl Torres, M., Sandoval Reyes, J. O., & Vargas Chable, P. (2021). *Micro pinza con amplio rango de desplazamiento basada en un arreglo de pantógrafos*.

- Universidad Autónoma de Ciudad Juárez. (2016). *Tecnología SOI de fabricacion*.
- Vargas-Chable, P., Tecpoyotl-Torres, M., & Robles-Casolco, S. (2015). Structural Optimization of an Electrothermal Chevron V-Shape Microactuator Device. *Proceedings - 2015 International Conference on Mechatronics, Electronics, and Automotive Engineering, ICMEAE 2015*, 262–267. <https://doi.org/10.1109/ICMEAE.2015.36>
- Verotti, M., Dochshanov, A., & Belfiore, N. P. (2017). A Comprehensive Survey on Microgrippers Design: Mechanical Structure. *Journal of Mechanical Design, Transactions of the ASME*, 139(6), 1–46. <https://doi.org/10.1115/1.4036351>
- Wei, Y., & Xu, Q. (2015). An overview of micro-force sensing techniques. In *Sensors and Actuators, A: Physical* (Vol. 234, pp. 359–374). Elsevier B.V. <https://doi.org/10.1016/j.sna.2015.09.028>
- Xu, Q. (2012). Mechanism design and analysis of a novel 2-DOF compliant modular microgripper. *Proceedings of the 2012 7th IEEE Conference on Industrial Electronics and Applications, ICIEA 2012*, 1966–1971. <https://doi.org/10.1109/ICIEA.2012.6361051>
- Xu, Q. (2013). A new compliant microgripper with integrated position and force sensing. *2013 IEEE/ASME International Conference on Advanced Intelligent Mechatronics: Mechatronics for Human Wellbeing, AIM 2013*, 1, 591–596. <https://doi.org/10.1109/AIM.2013.6584156>
- Yong, Y. K., Lu, T. F., & Handley, D. C. (2008). Review of circular flexure hinge design equations and derivation of empirical formulations. *Precision Engineering*, 32(2), 63–70. <https://doi.org/10.1016/j.precisioneng.2007.05.002>
- Zeman, M. J. F., Bordatchev, E. v., & Knopf, G. K. (2006). Design, kinematic modeling and performance testing of an electro-thermally driven microgripper for micromanipulation applications. *Journal of*

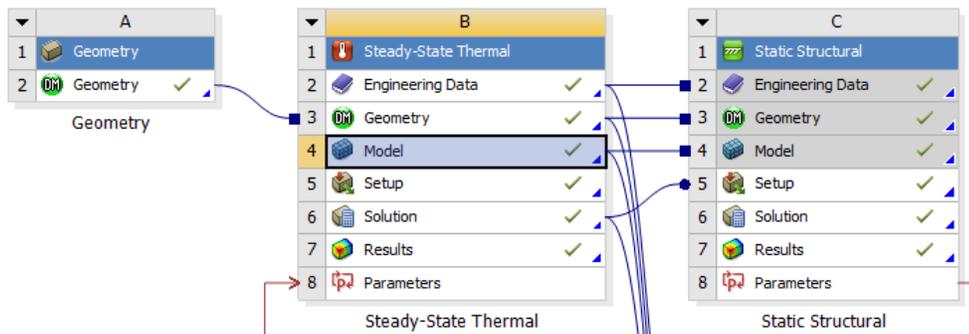
*Micromechanics and Microengineering*, 16(8), 1540–1549.  
<https://doi.org/10.1088/0960-1317/16/8/014>

Zhang, R., Chu, J., Wang, H., & Chen, Z. (2013). A multipurpose electrothermal microgripper for biological micro-manipulation. *Microsystem Technologies*, 19(1), 89–97.  
<https://doi.org/10.1007/s00542-012-1567-0>

Zhu, Y., Corigliano, A., & Espinosa, H. D. (2006). A thermal actuator for nanoscale in situ microscopy testing: Design and characterization. *Journal of Micromechanics and Microengineering*, 16(2), 242–253.  
<https://doi.org/10.1088/0960-1317/16/2/008>

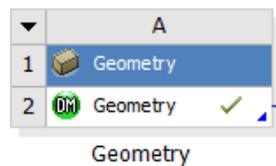
## Anexo A. Simulación viga en voladizo.

Para realizar la simulación se utilizó el software ANSYS™ Workbench, este software sirve para predecir cómo funcionarán y reaccionarán determinadas estructuras bajo un entorno real. El proceso que se lleva a cabo para realizar la simulación se muestra en la Anexo A.1.

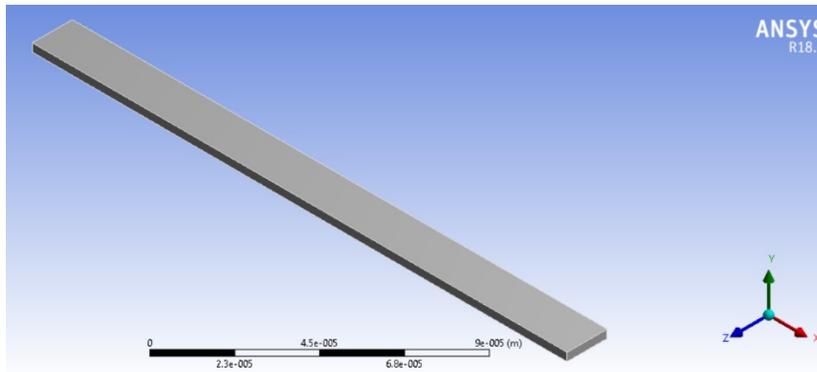


Anexo A.1. Árbol principal de simulación.

Primer paso: En el módulo “Geometry”, se dibuja la geometría propuesta ya antes mencionada, como se muestra en las Anexo A.2 Y A.3.

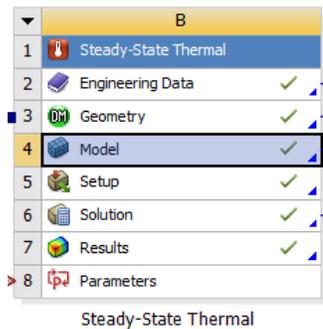


Anexo A.2. Módulo “Geometry”.



Anexo A.3. Geometría de la viga en voladizo dibujada.

Segundo paso: En el módulo “Steady-State Thermal” se agregan las: características del material, el mallado, la temperatura ambiente y el gradiente de temperatura, como se muestra en la Anexo A.4.



Anexo A.4. Módulo “Steady-State Thermal”.

Tercer paso: En la casilla “Engineering Data” del “Steady-State Thermal” se agregan los parámetros de simulación del silicio, como se muestra en la Anexo A.5.

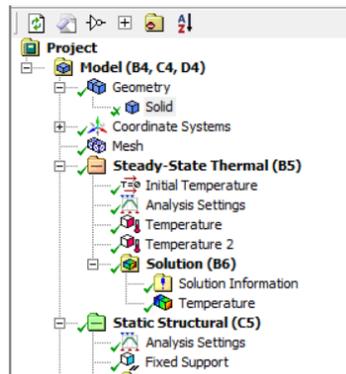
Outline of Schematic B2, C2, D2: Engineering Data				
A	B	C	D	E
1	Contents of Engineering Data		Source	Description
2	Material			
3	Silicon_ok_4		C:\Users\joseu\Documents\materiales\silicon1.5e-4.xml	
4	Structural Steel		General_Materials.xml	Fatigue Data at zero mean stress comes from 1998 ASME BPIV Code, Section 5, Div 2, Table 5-110.1
*	Click here to add a new material			

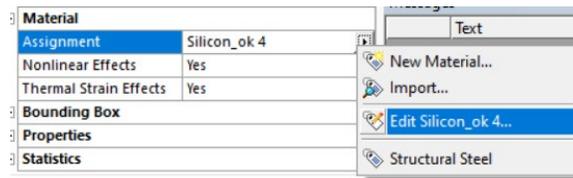
Properties of Outline Row 3: Silicon_ok_4				
A	B	C	D	E
1	Property	Value	Unit	
2	Material Field Variables	Table		
3	Density	2329	kg m^-3	
4	Isotropic Secant Coefficient of Thermal Expansion			
5	Isotropic Tangent Coefficient of Thermal Expansion	2.568E-06	C^-1	
6	Density_elasticity			
7	Derive from	Young's Modulus and Poisson's R...		
8	Young's Modulus	1.301E+11	Pa	
9	Poisson's Ratio	0.33		
10	Bulk Modulus	1.2755E+11	Pa	
11	Shear Modulus	4.891E+10	Pa	
12	Alternating Stress Mean Stress	Tabular		
13	Interpolation	Log-Log		
14	Scale	1		
15	Offset	0	Pa	
16	Isotropic Thermal Conductivity	148	W m^-1 C^-1	

Anexo A.5. Datos del material.

Cuarto paso: Se selecciona el material para la simulación, en la casilla “Geometry”/”Solid”, y en “Material” se selecciona el silicio, como se muestran en las Anexo A.6 y A.7.

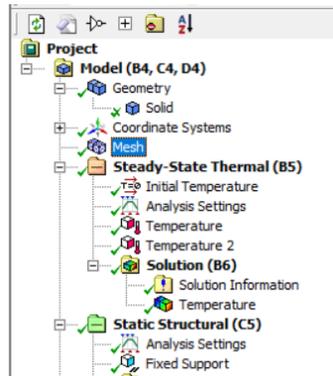


Anexo A.6. Árbol del proyecto.

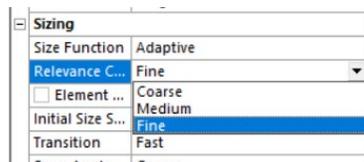


Anexo A.7. Selección del material.

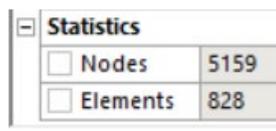
Quinto paso: Se selecciona el mallado automático de tamaño fino que el software propone siguiendo la siguiente ruta “Mesh”/”Sizing”/”Fine”. Los nodos y elementos que se generaron son: nodos 5159 y objetos 828, como se muestra en las Anexo A.8 a A.11.



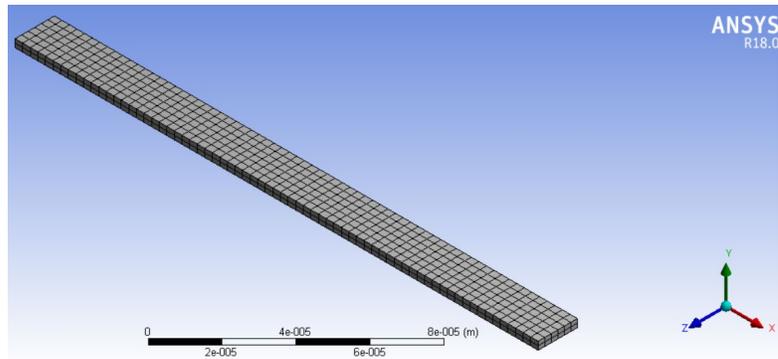
Anexo A.8. Árbol del proyecto.



Anexo A.9. Tamaño del mallado.

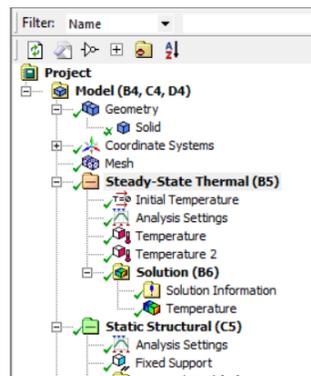


Anexo A.10. Cantidad de nodos y elementos.

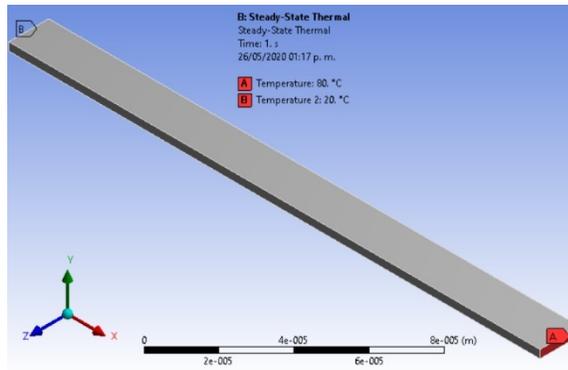


Anexo A.11. Asignación del mallado.

Sexto paso: En este paso se agrega la temperatura con la que se va a simular la viga en voladizo y se verá el comportamiento térmico. En “Steady-State Thermal” se agrega la temperatura ambiente ( $20^{\circ}\text{C}$ ) en uno de los extremos de la viga en voladizo y en el otro extremo de la viga se coloca la segunda temperatura ( $80^{\circ}\text{C}$ ) para crear el gradiente de temperatura de  $60^{\circ}\text{C}$ . En las etiquetas que se muestran en la Anexo A.12 y A.13, se asignaron las temperaturas correspondientes A es de  $80^{\circ}\text{C}$  y en B es de  $20^{\circ}\text{C}$ .

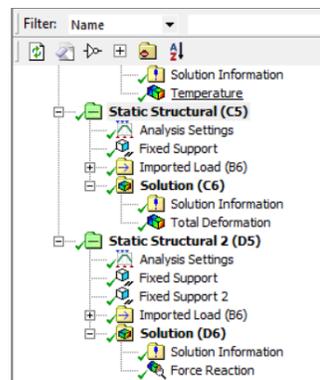


Anexo A.12. Árbol del proyecto.

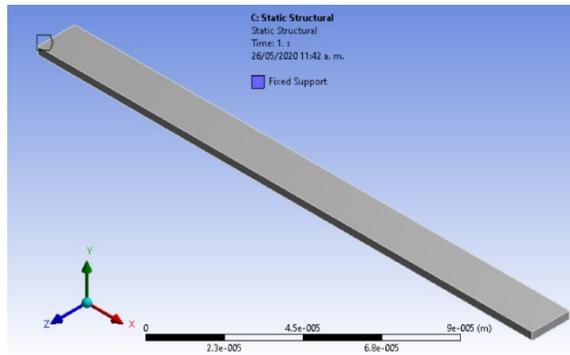


Anexo A.13. Asignación de las temperaturas.

Séptimo paso: En este paso se agrega un soporte fijo con el cual se va a simular la viga en voladizo y se verá el desplazamiento. En “Static Strutural” se agrega un soporte fijo para calcular el desplazamiento que se tiene en la viga. El soporte fijo se coloca en la cara donde se agregó la temperatura de 20°C, como se muestra en la Anexo A.14 y A.15.

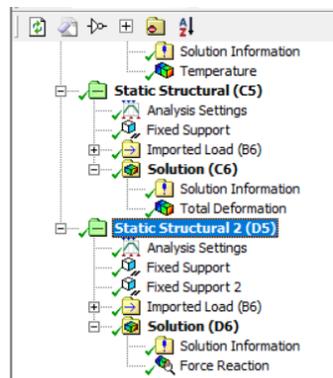


Anexo A.14. Árbol del proyecto.

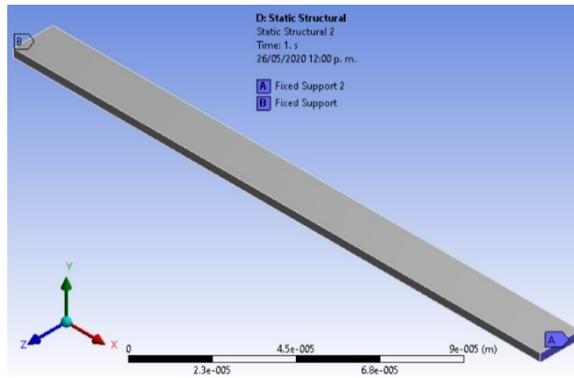


Anexo A.15. Asignación del soporte fijo.

Octavo paso: En este paso se agregan dos soportes fijos con los cuales se van a simular en la viga en voladizo y se verá la fuerza. En el segundo “Static Strutral” se agregan dos soportes fijos, el primer soporte se coloca como en el paso anterior. El segundo soporte fijo se coloca en la cara donde se agregó la temperatura de 80°C, como se muestra en la Anexo A.16 y A.17.



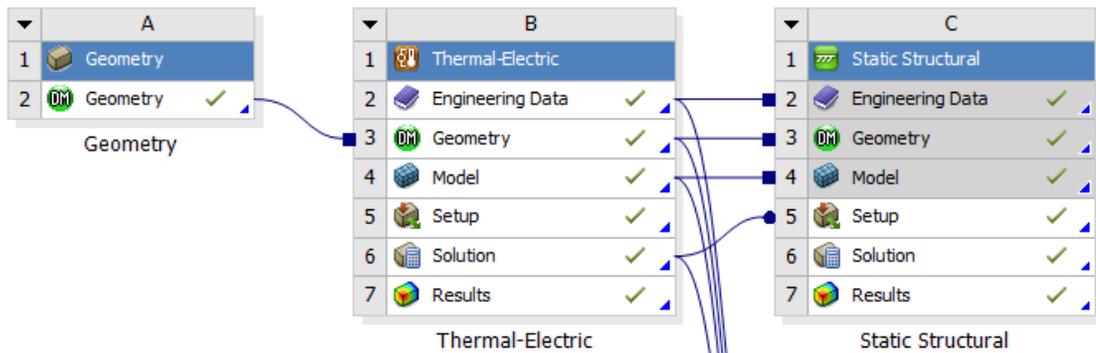
Anexo A.16. Árbol del proyecto.



Anexo A.17. Asignación de los soportes fijos.

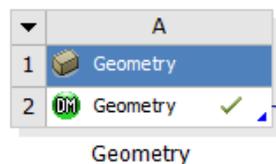
## Anexo B. Simulación chevrón

Para la simulación se utilizó el software ANSYS™ Workbench, este software sirve para predecir cómo funcionarán y reaccionarán determinadas estructuras bajo un entorno real, se realizó el mismo proceso de simulación en el caso de la viga en voladizo, como en la Anexo B.1.

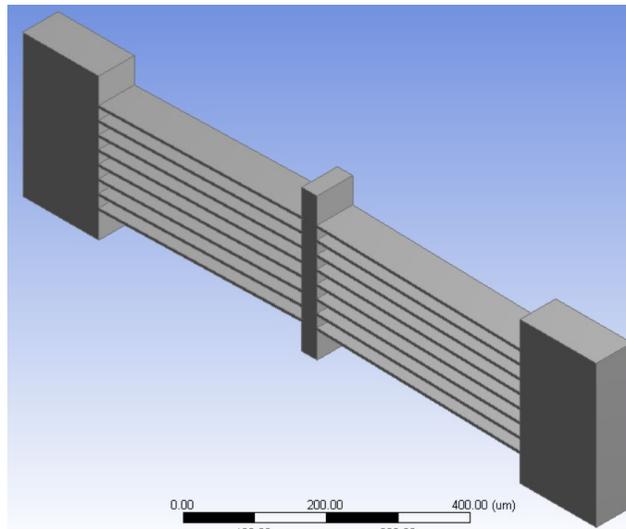


Anexo B.1. Árbol principal de simulación.

**Primer paso:** En el módulo “Geometry”, se dibuja la geometría propuesta ya antes mencionada, como se muestra en las Anexo B.2 y B.3.

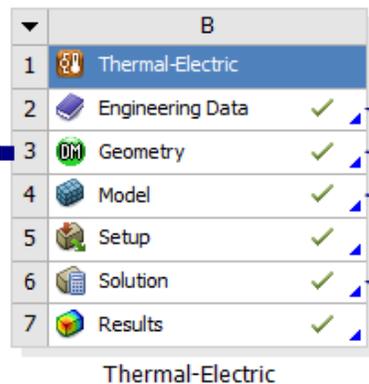


Anexo B.2. Módulo “Geometry”.



Anexo B.3. Geometría del chevrón dibujada.

**Segundo paso:** En el módulo “Thermal-Electric” se agregan las: características del material, el mallado, la temperatura ambiente y el voltaje, como se muestra en la Anexo B.4.



Anexo B.4. Módulo “Thermal - Electric”.

**Tercer paso:** En la casilla “Engineering Data” se agregan los parámetros de simulación del silicio, y se cambiara la resistividad para cada una de las simulaciones, como se muestra en la Anexo B.5.

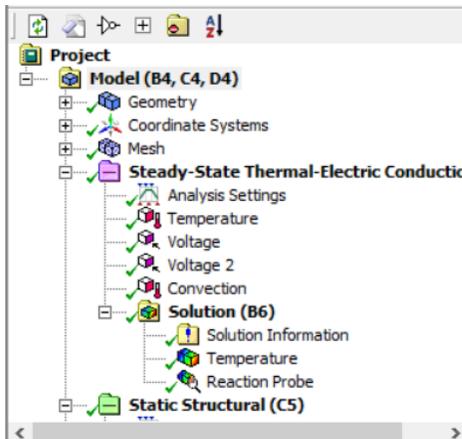
Outline of Schematic B2, C2, D2: Engineering Data				
	A	B	C	D
1	Contents of Engineering Data		Source	Description
2	Material			
3	Silicon_ok_4		C:\Users\jose\Documents\materiales\silicon1.5e-4.xml	
4	Structural Steel		General_Materials.xml	Fatigue Data at zero mean stress comes from 598 ASME BPI Code, Section 5, Div 2, Table 5-110.1
*	Click here to add a new material			

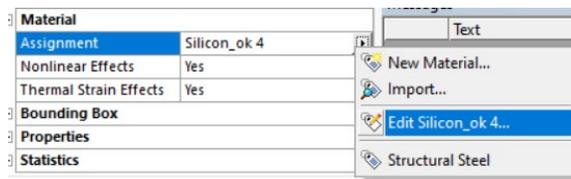
Properties of Outline Row 3: Silicon_ok_4				
	A	B	C	D
1	Property	Value	Unit	
2	Material Field Variables	Table		
3	Density	2329	kg m^-3	
4	Isotropic Secant Coefficient of Thermal Expansion			
5	Isotropic Tangent Coefficient of Thermal Expansion	2.568E-06	C^-1	
6	Density (elasticity)			
7	Derive from	Young's Modulus and Poisson's R...		
8	Young's Modulus	1.301E+11	Pa	
9	Poisson's Ratio	0.33		
10	Bulk Modulus	1.2755E+11	Pa	
11	Shear Modulus	4.891E+10	Pa	
12	Alternating Stress Mean Stress	Tabular		
13	Interpolation	Log-Log		
14	Scale	1		
15	Offset	0	Pa	
16	Isotropic Thermal Conductivity	148	W m^-1 C^-1	

Anexo B.5. Datos del material.

**Cuarto paso:** Se selecciona el material para la simulación, en la casilla “Geometry”/”Solid”, y en “Material” se selecciona el silicio, como se muestran en las Anexo B.6 y B.7.

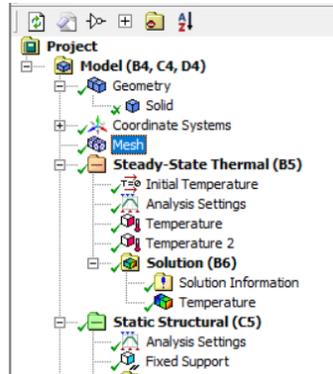


Anexo B.6. Árbol del proyecto.

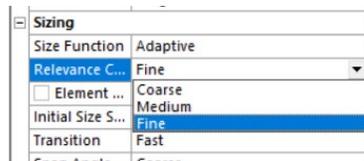


Anexo B.7. Selección del material.

**Quinto paso:** Se selecciona el mallado automático de tamaño fino que el software propone siguiendo la siguiente ruta “Mesh”/”Sizing”/”Fine”. Los nodos y elementos que se generaron son: nodos 278432 y objetos 170142, como se muestra en las Anexo B.8 y B.11.



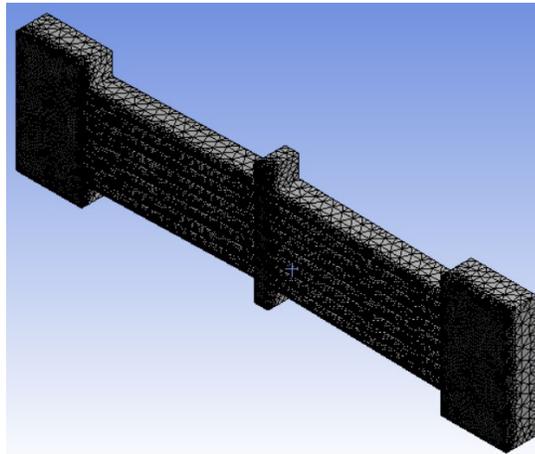
Anexo B.8. Árbol del proyecto.



Anexo B.9. Tamaño del mallado.

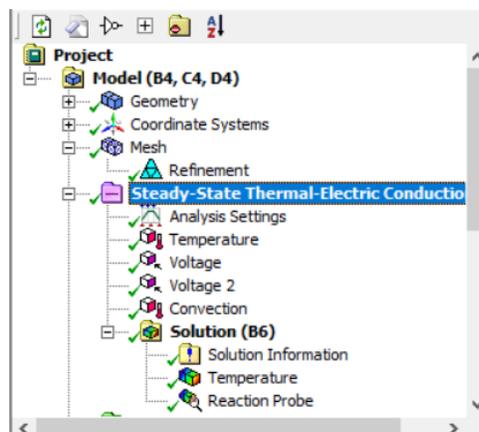
Statistics	
<input type="checkbox"/> Nodes	278432
<input type="checkbox"/> Elements	170142

Anexo B.10. Cantidad de nodos y elementos.

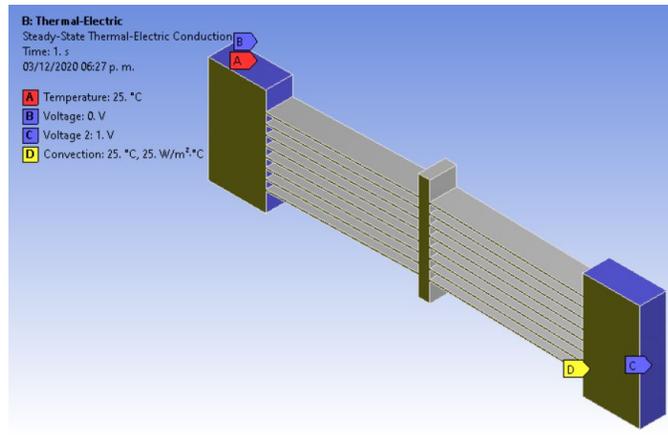


Anexo B.11. Asignación del mallado.

**Sexto paso:** En este paso se agrega la temperatura y el voltaje de alimentación con la que se va a simular el chevrón y se verá el comportamiento eléctrico. En “Thermal - Electric” se agrega la temperatura ambiente de 22°C y un voltaje de 0 V en una de las anclas del chevrón y en la otra ancla se agrega un voltaje de 1 V de alimentación, se muestran en la Anexo B.12 y B13, se asignaron la temperatura y voltaje.



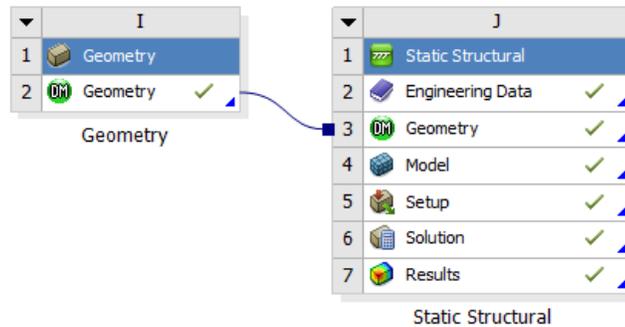
Anexo B.12. Árbol del proyecto



Anexo B.13. Asignación de la temperatura y voltaje.

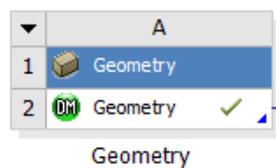
## Anexo C. Simulación pantógrafo

Para realizar la simulación se utilizó el software ANSYS™ Workbench, este software sirve para predecir cómo funcionarán y reaccionarán determinadas estructuras bajo un entorno real. El proceso que se lleva a cabo para realizar la simulación se muestra en la Anexo C.1.

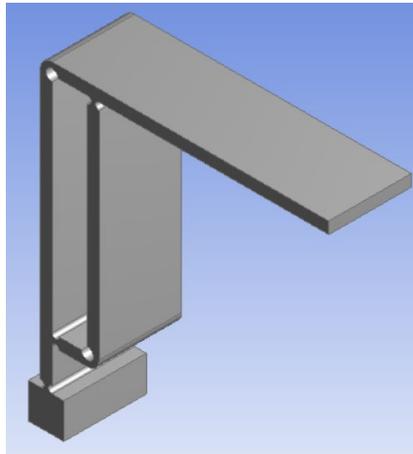


Anexo C.1. Árbol principal de simulación.

**Primer paso:** En el módulo “Geometry”, se dibuja la geometría propuesta ya antes mencionada, como se muestra en las Anexo C.2 y C.3.



Anexo C.2. Módulo “Geometry”.



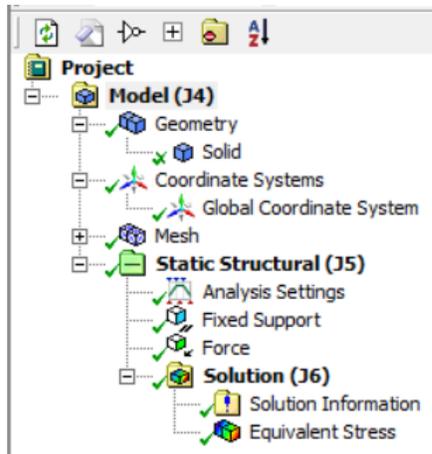
Anexo C.3. Geometría del pantógrafo dibujada.

**Segundo paso:** En la casilla “Engineering Data” del “Static Strutural” se agregan los parámetros de simulación del silicio, como se muestra en la Anexo C.4.

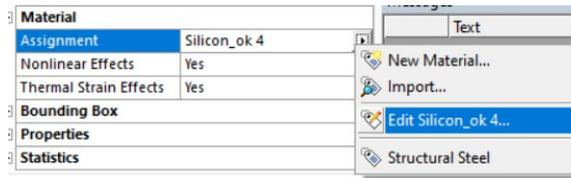
Outline of Schematic B2, C2, D2: Engineering Data				
A	B	C	D	E
1	Contents of Engineering Data		Source	Description
2	Material			
3	Silicon_pk-4		C:\Users\josue\Documents\materiales\silicon1.5e-4.xml	
4	Structural Steel		General_Materials.xml	Fatigue Data at zero mean stress comes from: 1998 ASME BPV Code, Section 8, Div 2, Table 5-110.1
* Click here to add a new material				
Properties of Outline Row 3: Silicon_pk-4				
A	B	C	D	E
1	Property	Value	Unit	
2	Material Field Variables	Table		
3	Density	2329	kg m <sup>-3</sup>	
4	Isotropic Secant Coefficient of Thermal Expansion			
5	Isotropic Secant Coefficient of Thermal Expansion	2.568E-06	C <sup>-1</sup>	
6	Density Elasticity			
7	Derive from	Young's Modulus and Poisson's R...		
8	Young's Modulus	1.301E+11	Pa	
9	Poisson's Ratio	0.33		
10	Bulk Modulus	1.275E+11	Pa	
11	Shear Modulus	4.891E+10	Pa	
12	Alternating Stress Mean Stress Interpolation	Tabular		
13	Interpolation	Log-Log		
14	Scale	1		
15	Offset	0	Pa	
16	Isotropic Thermal Conductivity	148	W m <sup>-1</sup> C <sup>-1</sup>	

Anexo C.4. Datos del material.

**Tercer paso:** Se selecciona el material para la simulación, en la casilla “Geometry”/”Solid”, y en “Material” se selecciona el silicio, como se muestran en las Anexo C.5 y C.6.

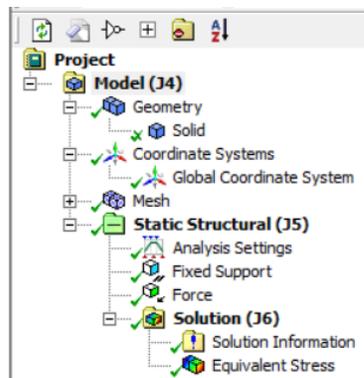


Anexo C.5. Árbol del proyecto.

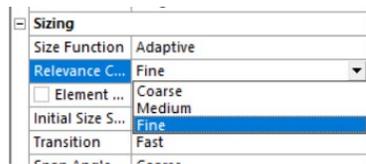


Anexo C.6. Selección del material.

**Cuarto paso:** Se selecciona el mallado automático de tamaño fino que el software propone siguiendo la siguiente ruta “Mesh”/”Sizing”/”Fine”. Los nodos y elementos que se generaron son: nodos 146324 y objetos 96814, como se muestra en las Anexo C.7 y C.10.



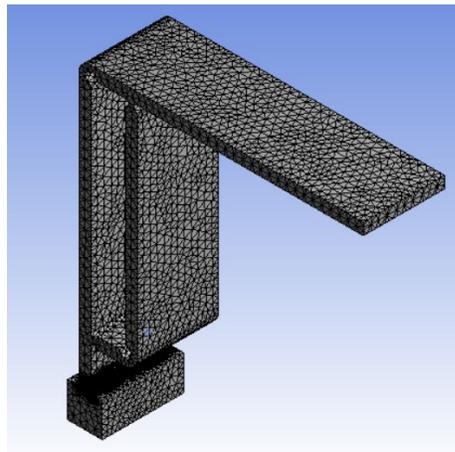
Anexo C.7. Árbol del proyecto.



Anexo C.8. Tamaño del mallado.

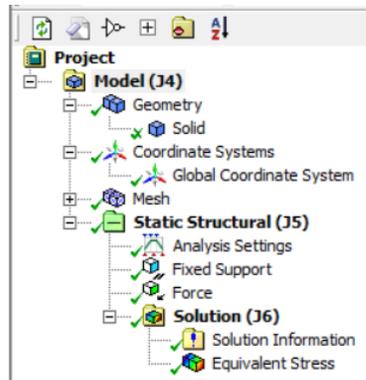
Statistics	
<input type="checkbox"/> Nodes	146324
<input type="checkbox"/> Elements	96814

Anexo C.9. Cantidad de nodos y elementos.

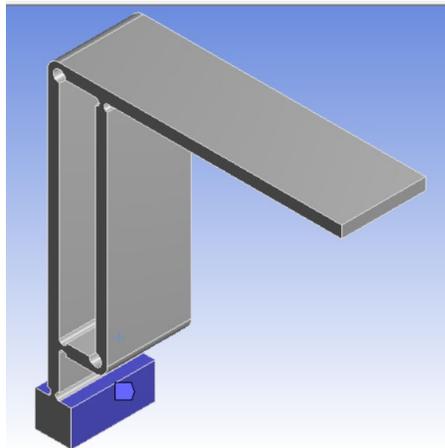


Anexo C. 10. Asignación del mallado.

**Quinto paso:** En este paso se agrega un soporte fijo con el cual se va a simular el pantógrafo y se verá el esfuerzo. En “Static Strutural” se agrega un soporte fijo para calcular el esfuerzo que se tiene en el dispositivo. El soporte fijo se coloca en el ancla, como se muestra en la Anexo C.11 y C.12.

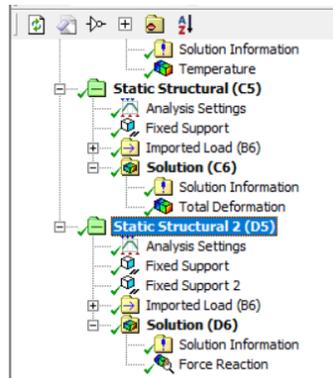


Anexo C.11. Árbol del proyecto.

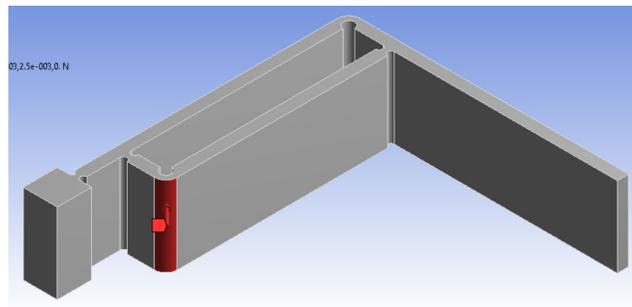


Anexo C.12. Asignación del soporte fijo.

**Sexto paso:** En este paso se agrega una fuerza de  $2.5\mu\text{N}$  en la cara exterior del punto D del pantógrafo, la fuerza es aplicada hacia adentro de la geometría, como se muestra en la Anexo C.13 y C.14.



Anexo C.13. Árbol del proyecto.



Anexo C.14. Asignación de los soportes fijos.

## Anexo D. Pruebas electrotérmicas de la micropinza escalada y fabricada en aluminio

Para comprobar el diseño de la pinza se realizó un escalamiento de la geometría. La geometría original se encuentra en la escala micrométrica y el escalamiento fue de 100, llevando el diseño a la escala milimétrica.

### Pinza sin ancla

Se maquinó la micropinza en aluminio con una máquina de control numérico, CNC, como se muestra en la Figura D. 1. La pinza se fijó a una base de madera comprimida con la intención de limitar su movimiento. Este modelo se alimentó con una planta de soldar con la que obtuvimos los siguientes resultados. Para observar el desplazamiento en uno de los brazos de la pinza, se utilizó un microscopio con una escala equivalente a un 1 mm por raya como se muestra en la Figura D. 2.

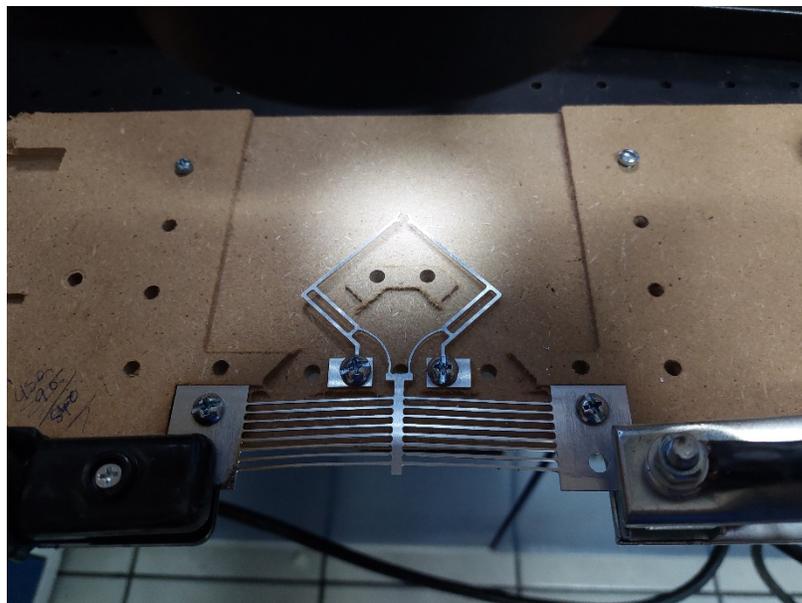


Figura D. 1. Micropinza de pantógrafo sin ancla central.

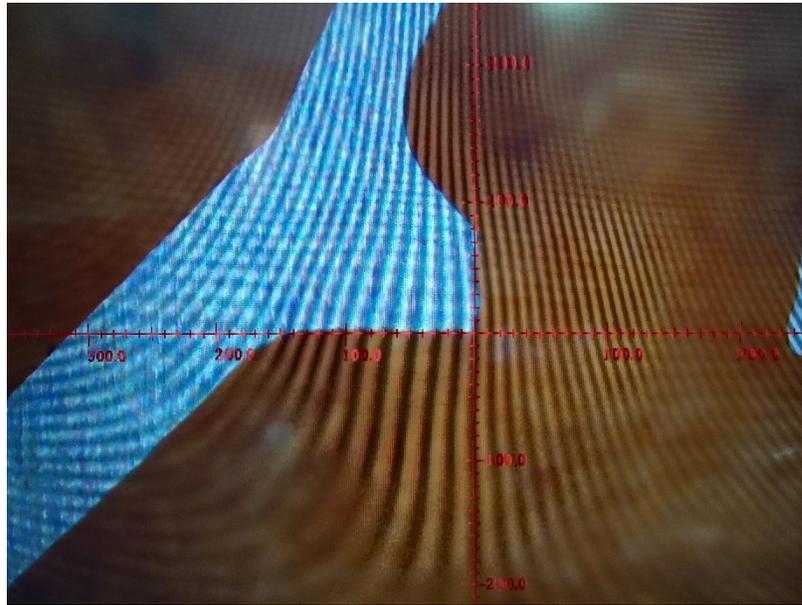


Figura D. 2. Alineación de un brazo de la pinza.

En la simulación se alimentó con un voltaje de 40 mV como se observa en la Figura D. 3 se aprecia la distribución de la temperatura teniendo a una temperatura máxima de 96.5 °C. En la Figura D. 4 se observa un desplazamiento de 9.36 mm por brazo en pinza.

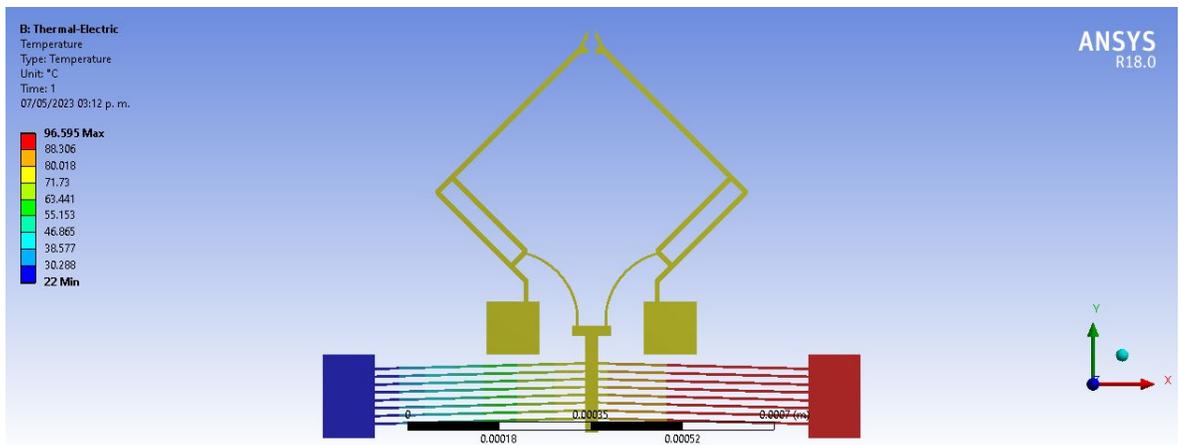


Figura D. 3. Temperatura en la pinza.

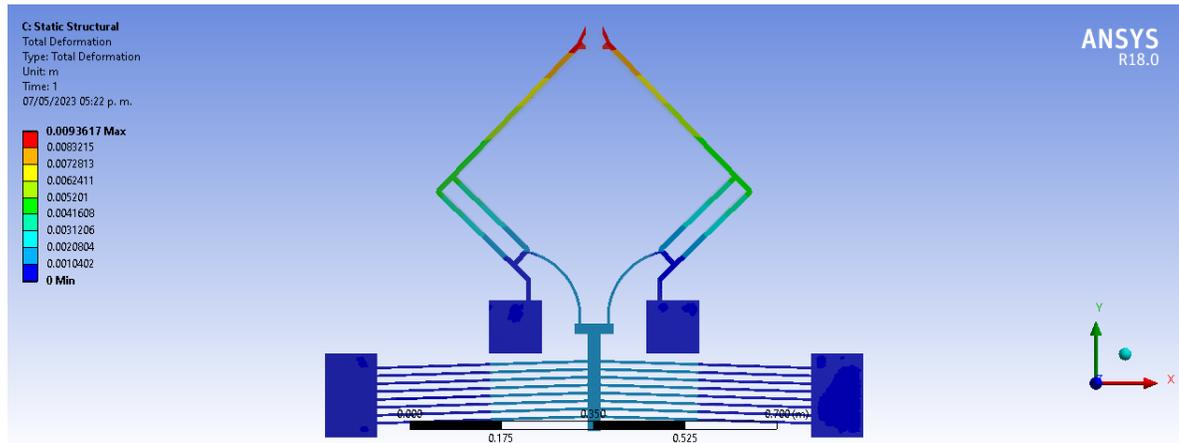


Figura D. 4. Desplazamiento en las puntas de la pinza.

#### Pinza sin ancla

En el experimento se utilizó una temperatura de 96.7 °C, temperatura similar a la simulación, obtenida al aplicar 0.9 V. La pinza se fijó una base de madera comprimida con la intención de limitar su movimiento. Este modelo se alimentó con una planta de soldar con la que obtuvimos los siguientes resultados. Para observar el desplazamiento en uno de los brazos de la pinza, se utilizó un microscopio con una escala equivalente a un 1 mm por división, con subdivisiones de 0.1 mm como se muestra en la Figura D.2. En la Figura D.5 se observa la distribución de temperatura y en la Figura D. 6 se muestra el desplazamiento de 0.8 mm en cada brazo de la pinza.

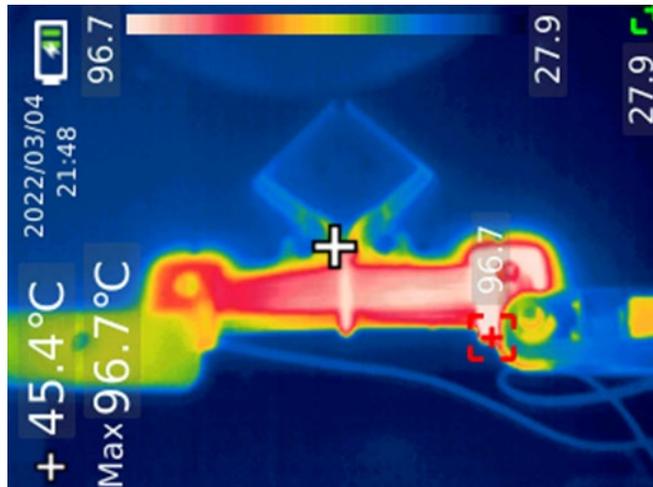


Figura D. 5. Distribución de temperatura en la pinza.



Figura D. 6. Desplazamiento en un brazo de la pinza.

En el modelo de la pinza con ancla se realizó la simulación de la pinza y se realizó el experimento de la pinza alimentándola con una planta de soldar, esta pinza se colocó en una base de madera comprimida donde se limitó el movimiento de en las anclas de la pinza como se observa en la Figura D. 7. Se alineó el brazo de la pinza con la cuadrícula del microscopio como se muestra en la Figura D.8.

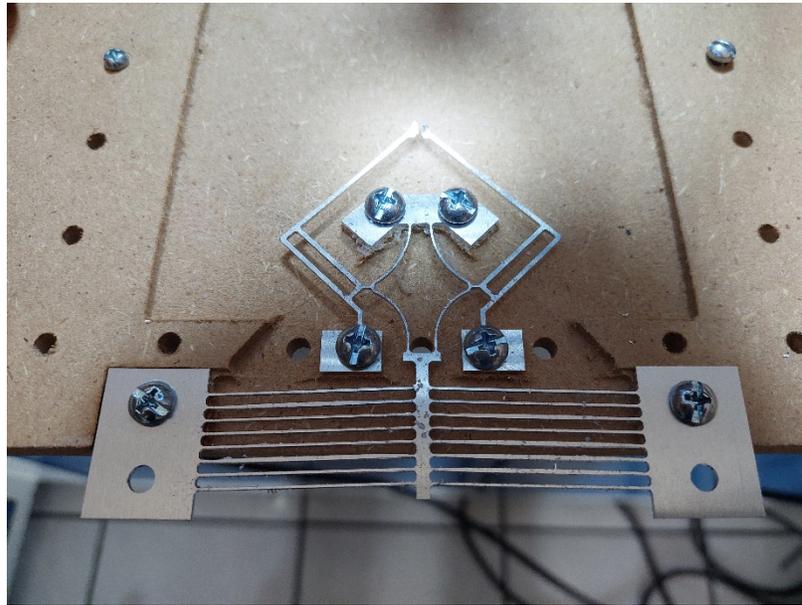


Figura D.7. Micropinza con ancla.



Figura D. 8. Alineación del brazo de la pinza.

En la simulación se alimentó con un voltaje de 40 mV como se observa en la Figura D9, La distribución de la temperatura tiene un máximo de 97.7°C. La

Figura D.10 muestra un desplazamiento máximo de 10.5 mm en cada brazo de la pinza.

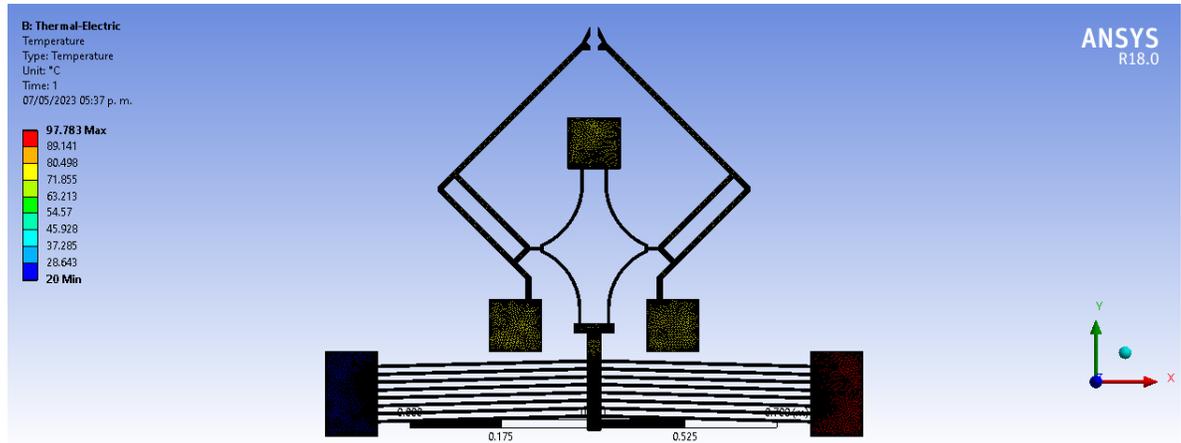


Figura D. 9. Temperatura en la pinza.

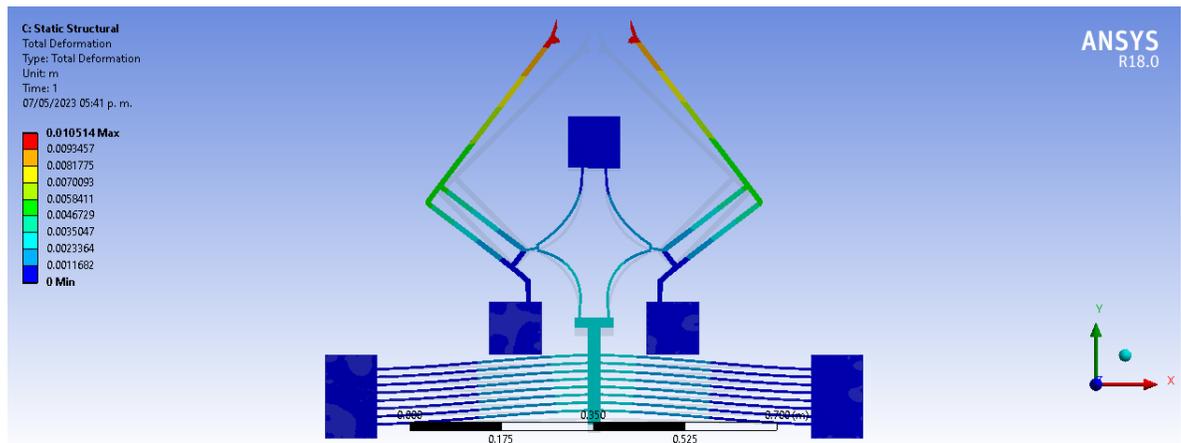


Figura D. 10. Desplazamiento en las puntas de la pinza.

Mientras que en el experimento se obtuvo una temperatura de 96.7°C con un desplazamiento de 0.8 mm, cuando se aplica 1.5 V. En la Figura D. 11 se observa la distribución de temperatura y en la Figura D. 12 se observa el desplazamiento de 0.8 mm en cada brazo de la pinza. Esto es, se requiere un mayor voltaje para lograr alcanzar la misma temperatura y apertura que en el caso anterior. Es necesario observar de manera lateral, para determinar

si se reduce el desplazamiento residual, pero al momento, no se cuenta con el equipo que nos lo permita.

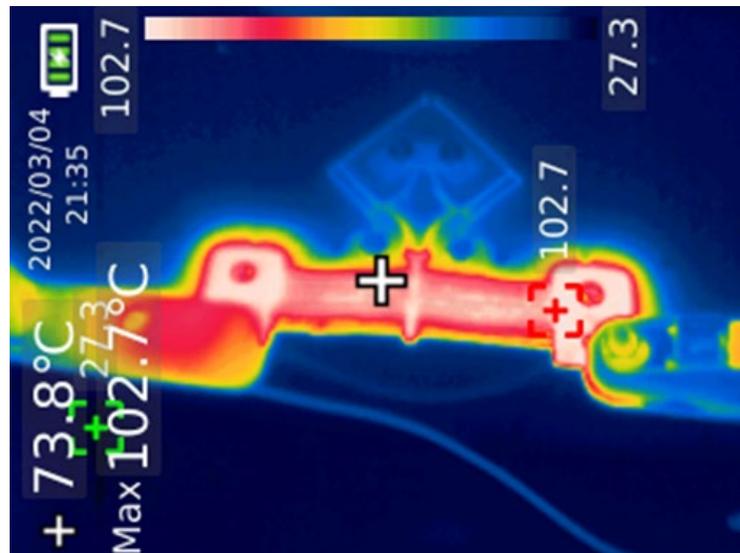


Figura D. 11. Distribución de temperatura en la pinza.



Figura D.12. Desplazamiento en un brazo de la pinza.

# Anexo E. Estancias realizadas



GOBIERNO DE  
MÉXICO



CONACYT  
Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología

CIDESI®

3 de octubre de 2022

Dra. Margarita Tecpoyotl Torres  
Responsable del Proyecto Ref.- A 1-S-33433  
Universidad Autónoma del Estado de Morelos  
Presente

**Asunto:** Carta Invitación para realizar  
estancia en CIDESI, Querétaro

Reciba un cordial saludo de la Gerencia de Microtecnologías (GMT) del Centro de Ingeniería y Desarrollo Industrial (CIDESI), Querétaro.

Se extiende una cordial invitación a nuestras instalaciones en la ciudad de Querétaro durante el periodo comprendido del 10 de octubre al 20 de diciembre de 2022. Donde se llevarán a cabo actividades de:

- Capacitación en diseño, pruebas y fabricación.

relacionados con el desarrollo del Proyecto: Diseño, análisis e implementación de novedosos dispositivos MEMS inerciales y electro-térmicos. Ref: A1-S-33433.

Invitado:

- MICA. Josué Osvaldo Sandoval Reyes.

Para cualquier información adicional requerida, quedo a sus órdenes

Atentamente

Dr. Jesús Javier Alcántar Peña  
Gerente de Microtecnologías.

Av. Playa Pie de la Cuesta No. 702, Desarrollo San Pablo, CP. 76125, Santiago de Querétaro, Qro., México.  
Tel: 442 211 9800 y 800 552 2040 [www.cidesi.com](http://www.cidesi.com)



Anexo D.1. Carta de invitación a la cuarta estancia.



**GOBIERNO DE  
MÉXICO**



Santiago de Querétaro, Querétaro a 20 de diciembre de 2022

**Dra. Margarita Tecpoyotl Torres**  
**Responsable del Proyecto Ref.- A 1-S-33433**  
**Universidad Autónoma del Estado de Morelos**  
**Presente**

**Asunto:** Terminación de estancia en CIDESI

Estimada Dra. Tecpoyotl Torres:

Reciba un cordial saludo de la Gerencia de Microtecnologías (GMT) del Centro de Ingeniería y Desarrollo Industrial (CIDESI). Por este medio, informo atentamente a Usted que el siguiente estudiante, colaborador del Proyecto: Diseño, análisis e implementación de novedosos dispositivos MEMS inerciales y electro-térmicos. Ref: A1-S-33433:

- MICA. Josué Osvaldo Sandoval Reyes.

Llevó a cabo la siguiente actividad, de manera satisfactoria, durante el periodo comprendido del 10 de octubre al 20 de diciembre de 2022:

- Capacitación en diseño, pruebas y fabricación.

Para cualquier información adicional requerida, quedo a sus órdenes

Atentamente

Dr. Jesús Javier Alcántar Peña  
Gerente de Microtecnologías.

Av. Playa Pie de la Cuesta No. 702, Desarrollo San Pablo, CP. 76125, Santiago de Querétaro, Qro., México.  
Tel: 442 211 9800 y 800 552 2040 [www.cidesi.com](http://www.cidesi.com)



*Anexo D.2. Carta de terminación de la cuarta estancia.*



GOBIERNO DE  
MÉXICO



13 de junio de 2022

**Dra. Margarita Tecpoyotl Torres**  
**Responsable del Proyecto Ref.- A 1-S-33433**  
**Universidad Autónoma del Estado de Morelos**  
**Presente**

**Asunto:** Carta Invitación para realizar estancia de 3 meses en CIDESI, Querétaro

Reciba un cordial saludo de la Gerencia de Microtecnologías (GMT) Centro de Ingeniería y Desarrollo Industrial (CIDESI), Querétaro.

Se extiende una cordial invitación a nuestras instalaciones en la ciudad de Querétaro durante el periodo del 13 de junio al 15 de septiembre de 2022, esto es, durante tres meses. Donde se llevarán a cabo actividades de:

- Ajustes al proceso de grabado en seco, necesarios debido a que la receta original del equipo ha presentado ataques agresivos a las muestras trabajadas en la breve estancia previa realizada de abril a mayo del presente año.
- Ajustes a los diseños, de manera conjunta con el equipo de diseño UAEM-UACJ-CIDESI.
- Realización de procesos de microfabricación en las instalaciones de este Centro
- Mediciones en microscopio de geometrías grabadas en máscara.

relacionados con el desarrollo del Proyecto: Diseño, análisis e implementación de novedosos dispositivos MEMS inerciales y electro-térmicos. Ref: A1-S-33433.

Invitado:

- MICA. Josué Osvaldo Sandoval Reyes.

Para cualquier información adicional requerida, quedo a sus órdenes

Atentamente

Dr. Jesús Javier Alcántar Peña  
Gerente de Microtecnologías.

Av. Playa Pie de la Cuesta No. 702, Desarrollo San Pablo, CP. 76125, Santiago de Querétaro, Qro., México.  
Tel: 442 211 9800 y 800 552 2040 [www.cidesi.com](http://www.cidesi.com)



*Anexo D.3. Carta de invitación de la tercera estancia.*



**GOBIERNO DE  
MÉXICO**



Santiago de Querétaro, Querétaro a 19 de septiembre de 2022

**Dra. Margarita Tecpoyotl Torres**  
**Responsable del Proyecto Ref.- A 1-S-33433**  
**Universidad Autónoma del Estado de Morelos**  
**Presente**

**Asunto:** Terminación de estancia de 3 meses en CIDESI

Estimada Dra. Tecpoyotl Torres:

Reciba un cordial saludo de la Gerencia de Microtecnologías (GMT) Centro de Ingeniería y Desarrollo Industrial (CIDESI). Por este medio, informo atentamente a Usted que el siguiente estudiante, colaborador del Proyecto: Diseño, análisis e implementación de novedosos dispositivos MEMS inerciales y electro-térmicos. Ref: A1-S-33433:

- MICA. Josué Osvaldo Sandoval Reyes.

llevó a cabo las siguientes actividades, de manera satisfactoria, durante el periodo comprendido del 13 de junio al 15 de septiembre de 2022:

- Ajustes al proceso de grabado en seco, necesarios debido a que la receta original del equipo ha presentado ataques agresivos a las muestras trabajadas en la breve estancia previa realizada de abril a mayo del presente año.
- Ajustes a los diseños, de manera conjunta con el equipo de diseño UAEM-UACJ-CIDESI.
- Realización de procesos de microfabricación en las instalaciones de este Centro
- Mediciones en microscopio de geometrías grabadas en máscara.

Para cualquier información adicional requerida, quedo a sus órdenes

Atentamente

Dr. Jesús Javier Alcántar Peña

Gerente de Microtecnologías.

Av. Playa Pie de la Cuesta No. 702, Desarrollo San Pablo, CP. 76125, Santiago de Querétaro, Qro., México.  
Tel: 442 211 9800 y 800 552 2040 [www.cidesi.com](http://www.cidesi.com)



*Anexo D.4. Carta de terminación de la tercera estancia.*



**GOBIERNO DE  
MÉXICO**



San Pablo Querétaro, Querétaro a 4 de abril de 2022

**Dra. Margarita Tecpoyotl Torres**  
**Responsable del Proyecto Ref.- A 1-S-33433**  
**Universidad Autónoma del Estado de Morelos**  
**Presente**

Asunto: Invitación de breve estancia en CIDESI

Estimada Dra. Tecpoyotl Torres:

Reciba un cordial saludo de la Gerencia de Microtecnologías (GMT) Centro de Ingeniería y Desarrollo Industrial (CIDESI).

Por este medio, extendemos la invitación para realizar una estancia en nuestras instalaciones en la ciudad de Querétaro, del 20 de abril al 13 de mayo de 2022, a los siguientes estudiantes, colaboradores del del Proyecto: Diseño, análisis e implementación de novedosos dispositivos MEMS inerciales y electro-térmicos. Ref: A1-S-33433:

- MICA. Josué Osvaldo Sandoval Reyes
- MICA. Carlos Andrés Ferrara Bello
- Lic. Sahiril Fernanda Rodríguez Fuentes

Durante este periodo se realizarán las siguientes actividades:

- Asesoría y entrenamiento sobre las metodologías de fabricación que se llevan a cabo en CIDESI.
- Revisión de diseños para fabricación de máscaras
- Realización masters para los procesos de microfabricación en las instalaciones de este Centro.
- Pruebas preliminares de fabricación

Para cualquier información adicional requerida, quedo a sus órdenes

Atentamente

Dr. Jesús Javier Alcántar Peña  
Gerente de Microtecnologías

Av. Playa Pie de la Cuesta No. 702, Desarrollo San Pablo, CP. 76125, Santiago de Querétaro, Qro., México.  
Tel: 442 211 9800 y 800 552 2040 [www.cidesi.com](http://www.cidesi.com)



*Anexo D.5. Carta de aceptación de la segunda estancia.*



**GOBIERNO DE  
MÉXICO**



San Pablo Querétaro, Querétaro a 13 de mayo de 2022

**Dra. Margarita Tecpoyotl Torres**  
**Responsable del Proyecto Ref.- A 1-S-33433**  
**Universidad Autónoma del Estado de Morelos**  
**Presente**

**Asunto:** Terminación de estancia en CIDESI

Estimada Dra. Tecpoyotl Torres:

Reciba un cordial saludo de la Gerencia de Microtecnologías (GMT) Centro de Ingeniería y Desarrollo Industrial (CIDESI).

Por este medio, informo atentamente a Usted que los siguientes estudiantes, colaboradores del del Proyecto: Diseño, análisis e implementación de novedosos dispositivos MEMS inerciales y electro-térmicos. Ref: A1-S-33433:

- MICA. Josué Osvaldo Sandoval Reyes
- MICA. Carlos Andrés Ferrara Bello
- Lic. Sahiril Fernanda Rodríguez Fuentes

Llevaron a cabo satisfactoriamente una breve estancia en nuestras instalaciones en la ciudad de Querétaro, del 20 de abril al 13 de mayo de 2022. Durante este periodo realizaron las siguientes actividades:

- Recibieron asesoría y entrenamiento sobre las metodologías de fabricación que se llevan a cabo en CIDESI.
- Revisión de diseños para fabricación de máscaras
- Realización masters para los procesos de microfabricación en las instalaciones de este Centro.
- Pruebas preliminares de fabricación

Para cualquier información adicional requerida, quedo a sus órdenes

Atentamente

Dr. Jesús Javier Alcántar Peña  
Gerente de Microtecnologías.

Av. Playa Pie de la Cuesta No. 702, Desarrollo San Pablo, CP. 76125, Santiago de Querétaro, Qro., México.  
Tel: 442 211 9800 y 800 552 2040 [www.cidesi.com](http://www.cidesi.com)



*Anexo D.6. Carta de conclusión de la segunda estancia.*



14 de septiembre de 2021

Asunto: Carta Invitación para realizar  
Breve estancia de capacitación y trabajo

Estimados colaboradores:

Reciban un cordial saludo de la Gerencia de Microtecnologías (GMT) del Centro de Ingeniería y Desarrollo Industrial (CIDESI).

Se extiende una cordial invitación a nuestras instalaciones en la ciudad de Querétaro los días 20 al 24 de septiembre de 2021. Donde se llevarán a cabo actividades de:

- Entrenamiento sobre las metodologías de fabricación que se llevan a cabo dentro del cuarto limpio
- Académicas y de investigación
- Realización de procesos de microfabricación en las instalaciones de microtecnologías

relacionados con el desarrollo del Proyecto: Diseño, análisis e implementación de novedosos dispositivos MEMS inerciales y electro-térmicos. Ref: A1-S-33433.

Invitados:

- Josué Osvaldo Sandoval Reyes
- Carlos Andrés Ferrara Bello
- Samuel Isaí Valle Morales

Para cualquier información adicional requerida, quedo a sus órdenes

Atentamente

Dr. Jesús Javier Alcántar Peña  
Gerente de Microtecnologías.

Av. Playa Pie de la Cuesta No. 702, Desarrollo San Pablo, CP. 76125, Santiago de Querétaro, Qro., México.  
Tel: 442 211 9800 y 800 552 2040 [www.cidesi.com](http://www.cidesi.com)



*Anexo D.7. Carta de aceptación de la primera estancia.*



San Pablo Querétaro, Querétaro a 24 de septiembre de 2021

**Dra. Margarita Tecpoyotl Torres**  
**Responsable del Proyecto Ref.- A 1-S-33433**  
**Universidad Autónoma del Estado de Morelos**  
**Presente**

Asunto: Terminación de breve estancia en CIDESI

Estimada Dra. Tecpoyotl Torres:

Reciba un cordial saludo de la Gerencia de Microtecnologías (GMT) del Centro de Ingeniería y Desarrollo Industrial (CIDESI).

Por este medio, informo atentamente a Usted que los siguientes estudiantes, colaboradores del del Proyecto: Diseño, análisis e implementación de novedosos dispositivos MEMS inerciales y electro-térmicos. Ref: A1-S-33433:

- MICA. Josué Osvaldo Sandoval Reyes
- MICA. Carlos Andrés Ferrara Bello
- Ing. Samuel Isai Valle Morales

Llevaron a cabo satisfactoriamente una breve estancia en nuestras instalaciones en la ciudad de Querétaro, los días 20 al 24 de septiembre de 2021. Durante este periodo realizaron las siguientes actividades:

- Recibieron asesoría y entrenamiento sobre las metodologías de fabricación que se llevan a cabo en CIDESI.
- Realización masters para los procesos de microfabricación en las instalaciones de este Centro.

Para cualquier información adicional requerida, quedo a sus órdenes

Atentamente

Dr. Jesús Javier Alcántar Peña  
Gerente de Microtecnologías.

Av. Playa Pie de la Cuesta No. 702, Desarrollo San Pablo, CP. 76125, Santiago de Querétaro, Qro., México.  
Tel: (80) 0552 2040 [www.cidesi.com](http://www.cidesi.com)



*Anexo D.8. Carta de conclusión de la primera estancia.*

# Anexo F. Propiedad intelectual.



MX/E/2021/035899

MX/a/2021/006056

**DIRECCIÓN DIVISIONAL DE PATENTES.**  
**SUBDIRECCIÓN DIVISIONAL DE PROCESAMIENTO ADMINISTRATIVO DE PATENTES.**  
**COORDINACIÓN DEPARTAMENTAL DE RECEPCIÓN Y CONTROL DE DOCUMENTOS.**

**EXPEDIENTE:** MX/a/2021/006056  
**FOLIO DE RECEPCIÓN:** MX/E/2021/035899  
**IDENTIFICADOR DE LA SOLICITUD:** 75490  
**LUGAR, FECHA Y HORA DE RECEPCIÓN DE LA SOLICITUD:**  
 CIUDAD DE MÉXICO 24/05/2021 11:11:22

**ACUSE DE RECIBO DE LA SOLICITUD DE:**

Patente

**SOLICITANTE(S)**

UNIVERSIDAD AUTONOMA DEL ESTADO DE MORELOS

**REPRESENTANTE LEGAL:**

Jose Mario ORDOÑEZ PALACIOS

**DOCUMENTOS DE LA SOLICITUD:**

DOCUMENTO	NOMBRE ARCHIVO	TAMAÑO	HOJA(S)
SOLICITUD	Solicitud_000075490_24_05_2021.pdf	430.66 KB	4
COMPROBANTE DE PAGO	Pago.pdf	24.07 KB	1
HOJA DE DESCUENTO	HOJA DE DESCUENTO.pdf	25.25 KB	1
CONSTANCIA RGP	RGP DR ORDOÑEZ, EZ.pdf	706.87 KB	1
MEMORIA_TECNICA	Descripción.pdf	76.64 KB	10
DIBUJOS	Figuras.pdf	2275.79 KB	3
OTROS	Cesiones de derechos.pdf	3093.38 KB	6

TOTAL DE HOJAS: 26 (No se incluyen hoja(s) del acuse)

Los documentos adjuntos están sujetos al estudio correspondiente que el Instituto Mexicano de la Propiedad Industrial realice de conformidad con la Ley Federal de Protección a la Propiedad Industrial o la Ley de la Propiedad Industrial, según sea el caso, considerando la fecha de recepción de su solicitud, así como de conformidad al Reglamento de la Ley de la Propiedad Industrial, aplicable a ambas legislaciones en términos de lo dispuesto por los artículos Transitorios Cuarto y Noveno del Decreto por el que se expide la Ley Federal de Protección a la Propiedad Industrial, publicado el día 01 de julio de 2020 en el diario oficial de la federación

La presente solicitud se recibe en términos del Acuerdo por el que se establecen lineamientos en materia de servicios electrónicos del Instituto Mexicano de la Propiedad Industrial, por lo tanto, previo a su presentación, el usuario aceptó lo siguiente:

I.- Que el trámite se efectúe, desde su inicio hasta su conclusión, a través de medios de comunicación electrónica;

II.- Bajo protesta de decir verdad, que revisó en la vista previa la información capturada y los anexos a la solicitud y que éstos son correctos; así mismo que, una vez concluido el proceso, no podría editar o variar la información o sus anexos;

III.- Bajo protesta de decir verdad, indicó que la información capturada es cierta;

IV.- Consultar su tablero, al menos, los días quince y último de cada mes, o bien, el día hábil siguiente si alguno de éstos fuere inhábil y que, en caso de no hacerlo, la notificación se tendría por hecha el día hábil siguiente a los días quince y último de cada mes. y

V.- Dar aviso por escrito, a través del correo electrónico [buzon@impi.gob.mx](mailto:buzon@impi.gob.mx), a la Dirección Divisonal de Patentes, dentro de los tres días hábiles siguientes a aquel en que se vea imposibilitado, por causas imputables al Instituto, a consultar el tablero o abrir los archivos depositados en el mismo, en los días señalados en la fracción IV anterior.

A efecto de que los documentos presentados a través del Sistema de Patentes en Línea, produzcan los mismos efectos que los documentos firmados autógrafamente y tengan el mismo valor probatorio, manifestó bajo protesta de decir verdad, que los documentos son copia íntegra e inalterada del documento impreso; que se encuentren digitalizados en formato PDF (Portable Document Format), y que los remitió de forma legible.

Arenal #550, Pueblo Santa María Tepepan, Xochimilco, 16020, Ciudad de México.  
 (55) 53340700 - [www.gob.mx/impi](http://www.gob.mx/impi)

*Anexo E.1. Micro pinza con amplio rango de desplazamiento basado en un arreglo de pantógrafos.*



MX/E/2021/035899

MX/a/2021/006056

Asimismo, desde su registro en el Portal de Acceso a Servicios Electrónicos, manifestó reconocer como propia la CURP, la cual no podrá ser sustituida con posterioridad; reconoció como propia y válida la dirección de correo electrónico proporcionada y aceptó que en ella se le envíe cualquier comunicación relacionada con la cuenta; aceptó que el uso de la contraseña queda bajo su exclusiva responsabilidad y que deberá notificar oportunamente al Instituto, cualquier situación que pudiera implicar un uso indebido; reconoció como propia, veraz y auténtica la información que envíe a través del PASE o de los servicios electrónicos del Instituto, ya sea haciendo uso de su CURP y contraseña o, en su caso, su e-firma; aceptó que el uso de su CURP y contraseña o, en su caso, e-firma, por persona distinta quedará bajo su exclusiva responsabilidad y acepta como propia la información que ésta envíe o descargue a través del PASE o de los servicios electrónicos del Instituto; asumió cualquier tipo de responsabilidad derivada del mal uso que hagan de su CURP y contraseña o, en su caso, su e-firma; y reconoció que el simple uso de los servicios electrónicos del Instituto constituye la aceptación más amplia de las condiciones señaladas en el artículo 11 del Acuerdo por el que se establecen lineamientos en materia de servicios electrónicos del Instituto Mexicano de la Propiedad Industrial.

El presente documento electrónico ha sido firmado mediante el uso de la firma electrónica avanzada por el servidor público competente, amparada por un certificado digital vigente a la fecha de su elaboración, y es válido de conformidad con lo dispuesto en los artículos 7 y 9 fracción I de la Ley de Firma Electrónica Avanzada y artículo 12 de su Reglamento.

El presente documento electrónico, su integridad y autoría, se podrá comprobar en [www.gob.mx/impi](http://www.gob.mx/impi). Asimismo, se emitió conforme lo previsto por los artículos 1° fracción III; 2° fracción VI; 37, 38 y 39 del Acuerdo por el que se establecen lineamientos en materia de Servicios Electrónicos del Instituto Mexicano de la Propiedad Industrial.

	<p><b>Cadena Original</b></p> <p>JAVIER ARIZMENDI SHO 00001000000413547625 Servicio de Administración Tributaria 75490 MX/a/2021/006056 MX/E/2021/035899 24/05/2021 11:11:22 Documento_Firma_Electronica.pdf 1 9568.85 K5 bK9w395AahIov7rhG14lx8UJWY=</p>
	<p><b>Sello Digital</b></p> <p>HdzrN/Cgs6rkqGJAYUAmSpICzpoK55d3PVUWp5fJHFxgHeE96X6b dpn3YdKNGzNe47wMOLyHpMfItT4AZkk8YG8tm1UH Xfe5WwZc0fnnNuVwH1TF9Lq5CWPPhXsFig2058jXen6RCKCzoZzePbMsc802gaqLNVYSJhLkH5ZA3nRsl.OGOxOASO +Haz8TlMX2XKleMzy1KeV/4bP8VYDataAOOT +z44rOrB3wZ9+yxeODOdMbuGrGIEEBe6fAz5PDq/C1NoKfh316wVZl67s6RyyW69bBCYU8g +mpbIRITHFPCdRTGgMojT9DI4sch2szxAJ2TnVw18W/gIQ==</p> <p>Para verificar la autenticidad del presente documento, podrá ingresar a la página electrónica <a href="https://validadocumento.impi.gob.mx/">https://validadocumento.impi.gob.mx/</a>, escaneando el código bidimensional QR que aparece a un costado de la e-firma del Servidor Público que signó el mismo, indicando, en su caso, el tipo de documento que pretende validar (solicitud, acuse, oficio o promoción); lo anterior, con fundamento en lo dispuesto por los artículos 1° fracción III; 2° fracción VI; 37, 38 y 39 del Acuerdo por el que se establecen lineamientos en materia de Servicios Electrónicos del Instituto Mexicano de la Propiedad Industrial; en caso de no contar con lector QR o en su defecto no pueda ser leído por su dispositivo, digitar en la página antes referida el siguiente código: Q3wcvtrvMKEIhp62m8hAtly9s=</p>

<b>gob mx</b>
<b>Instituto Mexicano de la Propiedad Industrial</b>

**REPRESENTACIÓN DE LA SOLICITUD DE REGISTRO DE PATENTE  
ENVIADA A TRAVÉS DEL PORTAL  
DE ACCESO A SERVICIOS ELECTRÓNICOS (PASE).**

<b>Homoclave del formato</b>	<b>Folio</b>
IMPI-00-009	Folio: MX/E/2021/035899
<b>Fecha de solicitud del trámite</b>	
24   05   2021	

**Datos generales de la solicitud**

<input checked="" type="radio"/> <b>Solicitud de Patente</b> <span style="float: right;"><b>Normal</b></span> <input type="radio"/> <b>Solicitud de Registro de Modelo de Utilidad</b> <input type="radio"/> <b>Solicitud de Registro de Diseño Industrial</b> Especifique cual: <input type="radio"/> <b>Modelo Industrial</b> <input type="radio"/> <b>Dibujo Industrial</b>	Expediente: MX/a/2021/006056 ID Solicitud: 75490 Fecha: 24/05/2021 11:11:22
--	---

**Datos del (de los) solicitante(s)**

Personas físicas	Personas morales
CURP:	RFC: UAE671122G49
Nombre(s):	Denominación o razón social:
Primer apellido:	UNIVERSIDAD AUTONOMA DEL ESTADO DE MORELOS
Segundo apellido:	Nacionalidad: MÉXICO
Nacionalidad:	Teléfono (Lada, Número, Extensión):
Teléfono (Lada, Número, Extensión):	7773297000, Ext. 2076
Correo electrónico:	Correo electrónico: milton.fragoso@uaem.mx
<input type="radio"/> Continúa en anexo	<input checked="" type="radio"/> Continúa en anexo

<b>gob mx</b>	
<b>Instituto Mexicano de la Propiedad Industrial</b>	
<b>Domicilio del (de los) solicitante(s)</b>	
Código postal: 62209	
Calle: AVENIDA UNIVERSIDAD	
Número exterior: 1001	Número interior:
Colonia: CHAMILPA	
Municipio o delegación: CUERNAVACA	Localidad:
Estado o entidad federativa: MORELOS	Entre calles:
País: MÉXICO	

<b>Datos del (de los) inventor(es) /diseñador(es)</b>	
CURP:	
Nombre(s): Margarita	
Primer apellido: TECPOYOTL	
Segundo apellido: TORRES	
Nacionalidad: MÉXICO	
Teléfono (Lada, Número, Extensión): 7773297000, Ext. 2076	
Correo electrónico: milton.fragoso@uaem.mx	Ⓞ Continúa en anexo

<b>Domicilio del (de los) inventor(es)/diseñador(es)</b>	
Código postal: 62209	
Calle: AVENIDA UNIVERSIDAD	
Número exterior: 1001	Número interior:
Colonia: CHAMILPA	
Municipio o delegación: CUERNAVACA	Localidad:
Estado o entidad federativa: MORELOS	Entre calles:
País: MÉXICO	

 <small>MÉXICO</small> <small>GOBIERNO DE LA REPÚBLICA</small>	 <small>SE</small> <small>SECRETARÍA DE ECONOMÍA</small>	 <small>GOMER</small> <small>GOBIERNO FEDERAL DE MORELOS</small>	 <small>IMPI</small> <small>INSTITUTO MEXICANO DE LA PROPIEDAD INDUSTRIAL</small>	Contacto: Arsenal #560, Pueblo Santa Maria Tepepan, Xochimilco, 16020, Ciudad de México. Teléfono: (55) 53340700 www.gob.mx/impi
---	---	---	--	---

<b>gob mx</b>	
<b>Instituto Mexicano de la Propiedad Industrial</b>	
<b>Datos del (de los) apoderado(s)</b>	
CURP: OOPM620127HTLRLR05	RGP:
Nombre(s): Jose Mario	Personas autorizadas para oír/recibir notificaciones: Milton René FRAGOSO RAMÍREZ, Miguel Angel BASURTO PENSADO, Daniel Alejandro ARANZA AGUADO, Margarita TECPOYOTL TORRES
Primer apellido: ORDOÑEZ	
Segundo apellido: PALACIOS	
Nacionalidad: MÉXICO	
Teléfono (Lada, Número, Extensión): 7773765379	
Correo electrónico: milton_fragoso@hotmail.com <span style="float: right;"><input type="radio"/> Continúa en anexo</span>	

<b>Domicilio del (de los) apoderado(s)</b>	
Código postal: 62209	
Calle: AV UNIVERSIDAD	
Número exterior: 1001	Número interior:
Colonia: CHAMILPA	
Municipio o delegación: CUERNAVACA	Localidad:
Estado o entidad federativa: MORELOS	Entre calles:
País: MÉXICO	

<b>Datos de la Solicitud</b>
Denominación o título de la invención: MICRO PINZA CON AMPLIO RANGO DE DESPLAZAMIENTO BASADA EN UN ARREGLO DE PANTÓGRAFOS
Fecha divulgación previa:

<b>Divisional de la solicitud</b>
Fecha presentación:
Número:
Figura jurídica:

<b>Prioridad Reclamada</b>			
País:	Fecha de Presentación:	Número de Serie:	Código DAS

 MÉXICO <small>GOBIERNO DE LA REPÚBLICA</small>	 SE <small>SERVICIO ELECTORAL FEDERAL</small>	 COFEMER <small>COMISIÓN FEDERAL DE ELECTROPECUNIA</small>	 IMPI <small>INSTITUTO MEXICANO DE LA PROPIEDAD INDUSTRIAL</small>	Contacto: Arenal #560, Pueblo Santa María Tepepan, Xochimilco, 16020, Ciudad de México. Teléfono: (55) 53340700 www.gob.mx/impi
--	--	---	---	--

gob mx
Instituto Mexicano de la Propiedad Industrial
Observaciones

**Bajo protesta de decir verdad, el firmante manifiesta que los datos asentados en esta solicitud son ciertos y que en caso de actuar como mandatario, cuenta con facultades para llevar a cabo el presente trámite.**

	<p><b>Cadena Original</b>                  JOSE MARIO ORDOÑEZ PALACIOS CURP OOPM620127HTLRLR05 RENAPO 24/05/2021 11:11:21 1044202 26                   Documento Firma Electronica.pdf 9297.1 KB bk9rw395AaHlov7rhG14ix8UWY=[000075490 PATENTE Normal MICRO                  PINZA CON AMPLIO RANGO DE DESPLAZAMIENTO BASADA EN UN ARREGLO DE PANTOGRAFOS UNIVERSIDAD                  AUTONOMA DEL ESTADO DE MORELOS MORAL Margarita TECPOYOTL TORRES Jose Mario ORDOÑEZ PALACIOS                   OOPM620127HTLRLR05 </p> <p><b>Sello Digital</b>                  EC9KdELiViyqqZWknDipcSq5ssWYP/7Ssx0yBKzDP8=</p>
---	---

Anexo(s)	
Hoja anexa a la solicitud ID: 75490	De Fecha: 24/05/2021 11:11:22

Lista Inventores/Diseñadores
Inventor/Diseñador 2
- Nombre: Josué Osvaldo SANDOVAL REYES
- CURP:
- Nacionalidad: MEXICO
- Domicilio: Calle AVENIDA UNIVERSIDAD, Ext. 1001, Col. CHAMILPA, C. P. 62209, Tel. 7773297000, Ext. 2076, E-mail milton.fragoso@uaem.mx
- Población, Estado y País: CUERNAVACA, MORELOS, MÉXICO
Inventor/Diseñador 3
- Nombre: Pedro VARGAS CHABLE
- CURP:
- Nacionalidad: MEXICO
- Domicilio: Calle AVENIDA UNIVERSIDAD, Ext. 1001, Col. CHAMILPA, C. P. 62209, Tel. 7773297000, Ext. 2076, E-mail milton.fragoso@uaem.mx
- Población, Estado y País: CUERNAVACA, MORELOS, MÉXICO

Número de Páginas Manifestadas
- Número de Páginas: 5

	<p>                     Contacto:                      Arenal #560, Pueblo Santa Maria Tepepan,                      Xochimilco, 16020, Ciudad de                      México.                      Teléfono: (55) 53340700  <a href="http://www.gob.mx/impi">www.gob.mx/impi</a> </p>
---	--

# Anexo G. Artículos indexados

 **actuators**  
an Open Access Journal by MDPI

**CERTIFICATE OF PUBLICATION**

Certificate of publication for the article titled:  
**Capacitive Accelerometers with Beams Based on Alternated Segments of Different Widths**

Authored by:  
**Margarita Tecpoyotl-Torres; Pedro Vargas-Chable; Josue Osvaldo Sandoval-Reyes; Sahiril  
Fernanda Rodriguez-Fuentes; Ramon Cabello-Ruiz**

Published in:  
**Actuators 2020, Volume 9, Issue 4, 97**

 **MDPI** | Academic Open Access Publishing  
since 1996  
Basel, October 2020

Article

## Capacitive Accelerometers with Beams Based on Alternated Segments of Different Widths

Margarita Tecpoyotl-Torres <sup>1</sup>, Pedro Vargas-Chable <sup>1,2,\*</sup>, Josue Osvaldo Sandoval-Reyes <sup>3</sup>, Sahiril Fernanda Rodriguez-Fuentes <sup>4</sup> and Ramon Cabello-Ruiz <sup>5</sup>

<sup>1</sup> Instituto de Investigación en Ciencias Básicas y Aplicadas-Centro de Investigación en Ingeniería y Ciencias Aplicadas, Universidad Autónoma del Estado de Morelos, Cuernavaca, Morelos 62209, Mexico; tecpoyotl@uaem.mx

<sup>2</sup> Facultad de Ciencias Químicas e Ingenierías, Universidad Autónoma del Estado de Morelos, Cuernavaca, Morelos 62209, Mexico

<sup>3</sup> Centro de Investigación en Ingeniería y Ciencias Aplicadas, Posgrado en Ingeniería y Ciencias Aplicadas, Universidad Autónoma del Estado de Morelos, Cuernavaca, Morelos 62209, Mexico; josue.sandovalrey@uaem.edu.mx

<sup>4</sup> Centro de Investigación en Ingeniería y Ciencias Aplicadas, Licenciatura en Tecnología con Áreas Terminales en Física Aplicada y Electrónica, Universidad Autónoma del Estado de Morelos, Cuernavaca, Morelos 62209, Mexico; 20144009513@alumnos.uaem.mx

<sup>5</sup> Universidad Tecnológica Emiliano Zapata, Emiliano Zapata, Morelos 62765, Mexico; ramon.cabello@uaem.mx

\* Correspondence: pedro.vargas@uaem.mx

Received: 8 August 2020; Accepted: 17 September 2020; Published: 1 October 2020



**Abstract:** Microelectromechanical (MEM) Accelerometers measure the accelerations or vibrations experienced by objects due to inertial forces or mechanical excitations. To improve their proof mass displacement, several alternatives have been used, such as the design of different shapes of suspension beams. In this work, a new shape of beam is proposed based on alternated segments of different widths. To analyze its performance, one-quarter, middle and complete accelerometers were calculated and simulated; the results were compared with similar cases using conventional uniform-shaped beams. A notable improvement in the proof mass displacement was obtained in all cases, especially with the proposed symmetrical-shaped beam. Harmonic response and explicit dynamic analysis were also considered to discover performance when they are subjected to structural load. An improvement in amplitude displacement was also observed, as well as operation frequency reduction. From the explicit dynamic analysis, a faster performance of the accelerometer with uniform arms can be observed; however, it responds at a lower range of input velocities. A performance comparison of the proposed beam is presented considering the two reported accelerometers. Finally, from the variation in the width of the thinner segment of the symmetrical arms, it can be observed that it is possible to obtain an increment in the displacement of the proof mass of 39.57% and a decrement in natural frequency of 15.30%, with respect to the case of the uniform arm. Other advantages of the symmetric beam are the stress distribution, reducing its effect on the proof mass, as well as their low cross-axis sensitivity. Simulations were performed with ANSYS.

**Keywords:** ANSYS; cantilever; displacement modeling; harmonic analysis; explicit dynamic analysis; silicon; cross-section sensitivity; geometrical nonlinearity

### 1. Introduction

Current commercial accelerometers are classified as piezoelectric, capacitive and piezoresistive. Thermal convection-based accelerometers are promising, but some requirements still need to be

# Anexo H. Capítulo de libro

## Chapter 3

Print ISBN: 978-93-89246-12-4, eBook ISBN: 978-93-89246-54-4

### Improved Dual Electrothermal Microgripper based on a Chevron actuator

M. Tecpoyotl-Torres<sup>1</sup>, P. Vargas-Chable<sup>2\*</sup>, J. O. Sandoval-Reyes<sup>2</sup>  
and R. Cabello-Ruiz<sup>3</sup>

DOI:10.9734/bpi/aast/v3

#### ABSTRACT

In Micro-Electro-Mechanical Systems (MEMS) technology, there is an important interest in the characterization of devices using dynamic analysis, which is a technique to determine the dynamic behavior of a structure or component, involving time, inertia and the possibly damping of the structure. This paper is focused on the analysis and simulation of an improved dual microgripper and its components: microcantilever and chevron. In addition, a movement amplifier based on an arrangement of beams was also designed in order to improve the opening of each jaw of the top gripper.

Dual microgrippers are designed on silicon and implemented using Professional Autodesk Inventor. Top gripper is initially closed, while the down one is initially open.

The analytical response of the microgripper components was acquired with Steady-State Thermal, Static Structural, and Modal modules of Ansys Workbench Software.

The dynamic behavior, resonance frequencies for chevron actuator and dual microgrippers are presented. Simulation results show the modal shapes of all analyzed devices, determining their respective modal frequencies.

A comparison between initial and improved dual microgrippers was also performed. About the top grippers, the increment showed by the improved microgripper in total displacement is of 24.4%, and the temperature distribution only showed a little reduction (7%). For the case of the down gripper, the total displacement decrease in approximately 50%, force remains without change and its temperature shows a little decrement (7.2%).

In both dual microgrippers, the biggest temperature value resides in the chevron inside, at the top part of its shuttle, with 162.76°C. Supply voltage was considered from 0 to 7 V. This swept could be useful to determine the more appropriate voltage level to obtain a desirable response. In each analyzed device, their corresponding modal shapes, using FEA, were determined. The modal shapes analysis allow to understand the performance of the analyzed devices, at the correspondent frequency. From the comparison between initial and improved dual microgrippers, implemented with Silicon, special attention was given to the top grippers. Total displacement showed by the improved microgripper has a maximum value of 0.86  $\mu\text{m}$ . Third natural frequency remains almost without change (4.7%), increasing at 70.38 kHz and the temperature distribution only showed a little reduction (7%, maximum temperature was of 131.49°C), which is better for practical applications. For the case of the down grippers of improved dual microgripper, the total displacement decrease in approximately 50% (with a value of 0.18  $\mu\text{m}$ ), force remains without change (3.8  $\mu\text{N}$ ) and its temperature decreases (7.2%), at 162.77°C, which is also better for practical applications. These parameters values of the improved dual microgripper are illustrative for possible applications.

<sup>1</sup>Centro de Investigación en Ingeniería y Ciencias Aplicadas, IICBA-CIICAp-UAEM, Mexico.

<sup>2</sup>Doctorado en Ingeniería y Ciencias Aplicadas, IICBA-CIICAp-UAEM, Mexico.

<sup>3</sup>Universidad Tecnológica Emiliano Zapata del Estado de Morelos (UTEZ), Mexico.

\*Corresponding author: E-mail: pedro.vargas@uaem.mx;

# Anexo I. Artículos en congreso

2019 International Conference on Mechatronics, Electronics and Automotive Engineering (ICMEAE)

## Design and 3D printed implementation of a microgripper actuated by a piezoelectric stack

C. A. Ferrara-Bello, J. O. Sandoval-Reyes, P. Vargas-Chable<sup>1</sup>

*Posgrado en Ingeniería y Ciencias Aplicadas  
Centro de Investigación en Ingeniería y Ciencias Aplicadas,  
CIICAp-IICBA*

<sup>1</sup>*Facultad de Ciencias Químicas e Ingenierías, FCOeI  
Universidad Autónoma del Estado de Morelos, UAEM  
Av. Universidad No. 1001, Morelos, MX*

{carlos.ferrarabl & josue.sandovalrey}@uaem.edu.mx,  
pedro.vargas@uaem.mx

M. Tecpoyotl-Torres

*Centro de Investigación en Ingeniería y Ciencias Aplicadas,  
CIICAp-IICBA  
Universidad Autónoma del Estado de Morelos, UAEM  
Av. Universidad No. 1001, Morelos, MX  
tecipoyotl@uaem.mx*

Jorge Varona  
*Facultad de Ingeniería, Universidad Panamericana  
Aguascalientes 20290, México;  
jvarona@up.edu.mx*

**Abstract** – This article presents the design and implementation of a microgripper device actuated by a piezoelectric stack. In order to reduce fabrication costs, conventional piezoelectric buzzers are used that are easily found in the market at very low cost. Polylactic Acid (PLA) was chosen as the structural material for the design of the mechanisms of the microgripper, the choice of this material considerably reduces the total implementation cost. The originality of this work resides in the material used and in the stacked piezoelectric actuator. The main contribution is the demonstration of a design methodology that implements prototype compliance mechanisms at millimeter scale for validation purposes before proceeding to the fabrication in micrometric scale. Even so, the system in mm scale can also be used for micromanipulation due to the range of its microgripper jaws' aperture and its reliability. ANSYS<sup>®</sup> was used as the software tool for simulation.

**Index Terms** – Compliance mechanisms, MEMS, PLA, buzzer.

### I. INTRODUCTION

In many fields, industrial processes require specialized tools for the manipulation of objects, either for molding, cutting, changing its position, etc. This need for object's manipulation also occurs at micro and nanoscale, that is called micro and nanomanipulation.

Among the multiple applications of micro and nanomanipulation, stand out their use in medicine [1], micro assembling systems [2], microelectromechanical systems (MEMS) [3], and others.

Microgrippers are devices widely used in micro and nanomanipulation [4], which are generally designed with compliance mechanisms, which can transmit displacement and have other appropriate characteristics [5].

There are several types of commonly used actuators [6]. In the case of grippers of millimeter scale, piezoelectric actuation type is frequently preferred. Piezoactuators of Lead Zirconate Titanate (PZT) are widely used, due to its high force, fast response, small volume, etc. [7]. However, they have some disadvantages, such as, small displacements and hysteresis effect, which affects the precision of the performed movements [8].

Several techniques are used for the fabrication of micro and nanogrippers, among them are wire electrical discharge machining (WEDM) [9], laser machining [10], and photolithography [11]. These technologies have high precision and costs.

In this paper, a low-cost microgripper is proposed and implemented. The device is built at mm scale by 3D printing and actuated with a piezoelectric stack.

### II. PIEZOELECTRIC ACTUATOR

Certain materials produce electric charges on their surfaces as consequence of applying mechanical stress. The induced charges are proportional to the mechanical stress. This is called the direct piezoelectric effect. Materials showing this phenomenon also conversely have a geometric strain proportional to an applied electric field. This is the converse piezoelectric effect [12]. A piezoelectric actuator is a device based on counter piezoelectric effect, applying a voltage to it creates a displacement, and vibrating it generates a voltage [13]. There is a wide variety of piezoelectric actuators in the market, with different geometries, output forces, actuation form, etc. [14], which satisfies several, including extreme, applications. However, they have in general high cost, which increases considerably when the required displacement and force are large. This fact represents a disadvantage when they are considered for prototype implementation.

As alternative, in this work a general purpose piezoelectric ceramic diaphragm actuator, commonly known as buzzer, is used, due to its low cost. It has a simple geometry (Figure 1a) composed by a brass disc and another concentric disc of smaller diameter made of PZT underneath. Figure 1b shows the maximum deformation obtained when voltage is applied to the buzzer.

In order to obtain a larger displacement, a stack of four buzzers was prepared, in the direction of deformation when the stack is powered (Figure 2a). The base of the piezoelectric stack was design and built with PLA as it is shown in Figure 2b.

### III. MICROGRIPPER DESIGN

## A novel electrothermal compliance microgripper

P. Vargas-Chable<sup>1</sup>, C. A. Ferrara-Bello, J. O. Sandoval-Reyes

*Posgrado en Ingeniería y Ciencias Aplicadas  
Centro de Investigación en Ingeniería y Ciencias Aplicadas,  
CIICAp-IICBA*

<sup>1</sup>Facultad de Ciencias Químicas e Ingenierías, FCQeI  
Universidad Autónoma del Estado de Morelos, UAEM  
Av. Universidad No. 1001, Morelos, MX  
{carlos.ferrara1 & josue.sandovalrey}@uaem.edu.mx  
pedro.vargas@uaem.mx

M. Tecpoyotl-Torres

*Centro de Investigación en Ingeniería y Ciencias Aplicadas,  
CIICAp-IICBA*

Universidad Autónoma del Estado de Morelos, UAEM  
Av. Universidad No. 1001, Morelos, MX  
tecpoyotl@uaem.mx

Jorge Varona  
Facultad de Ingeniería, Universidad Panamericana  
Aguascalientes 20290, Mexico;  
jvarona@up.edu.mx

**Abstract**—In this paper, a novel microgripper based on two perpendicular arrangements of beams and a chevron actuator is shown. In each perpendicular arrangement, the constrained displacement of the double clamped beams, joined at their endpoint, produces a buckling in each beam, which favors the displacement of each arm of the microgripper, normally open. These arrangements constitute the highly flexible structures of the microgripper. Their buckling is produced by the force applied by chevron arrow, producing a reaction force in the range of 174.44  $\mu\text{N}$  in the microgripper jaws. Chevron actuator is fed by a thermal source. Temperature in microgripper tips is of 34.42 °C and the operation frequency is 33.966 kHz, at maximum load thermal applied of 200 °C. The mechanical, thermal and modal analyses of this integrated structure was supported by SIMSOLID™, based on Finite Element Analysis. The simulation was developed with Polysilicon as structural material.

**Keywords**—component; MEMS; Thermal conditions; Structural analysis; Modal analysis; SIMSOLID™; buckling; FEA.

### I. INTRODUCTION

Microgrippers are generally designed to hold different shapes of microparticles or microcomponents with enough forces without damaging them. In the fields of micromanipulation and micro assembly, microgrippers are one of the essential devices and have received enormous attention for the past decade [1]. These microdevices have been widely used in biological, biomedical and robotics applications [2,3].

Different kinds of actuators, such as shape-memory alloys, electrostatic, electrothermal, piezoelectric, pneumatic and electromagnetic actuators have been designed to actuate microgrippers, dedicated to various applications [3,4]. Electrostatic actuators offer the highest frequency response with the lowest power consumption. However, they require a larger operating voltage and complex shapes of the gripper having many comb drives are necessary to increase the force. Regarding electrothermal actuators, they can generate a large displacement and force based on the thermal expansion of the materials under a very low operating

voltage. Furthermore, another property of this kind of actuators is their relatively small dimension. However, due to the restriction of high working temperature they cannot be widely used in the assembly of temperature sensitive objects [5].

The main parameters to consider in the design of microgrippers include kinematics, fingertips shape, releasing strategy, material biocompatibility, thermal stability, insulation and high temperature [5].

On the other hand, Altair SIMSOLID™ design software package is employed to perform theoretical analysis and design activities related to actuation behaviour dynamic simulation, frequency and stress analysis. The toolboxes that were utilized are: thermal » Structural » Modal, for developing the simulation by Finite Element Analysis (FEA). This software is quick because it does not require execution time in the development of the mesh.

FEA is very attractive since it can be applied to any geometry for any set of material properties and loading conditions if the appropriate constitutive relationships and equilibrium conditions are met [6]. Since the method is not restricted by size, one can use the so-called zoom feature in finite element meshing to use smaller size elements to describe a miniature MEMS device relative to the very large structure in which it is embedded. Thus, it is possible to achieve computational economy without sacrificing accuracy, material, and time [7-10]. Silicon library is required for this simulation.

In this paper, a microgripper based on two perpendicular arrangements of beams and a chevron actuator is shown. Its design is supported by SIMSOLID™.

The structure of this paper is organized as follows: in section II, the microgripper design is presented. Section III includes the simulation results and discussions about the mechanical and thermally behavior of the microgripper. Finally, in section IV, conclusions of this work are given.

## Anexo J. Asistencia a congresos



A: **Sandoval Reyes Josue Osvaldo**



Anexo I.1. Constancia de asistencia a congreso.

# Anexo K. Conferencias, cursos cortos y talleres impartidos



The certificate is a vertical document with a blue background on the left side containing logos and text. The right side is white with blue and red accents. It features the logos of the Universidad Autónoma del Estado de Morelos, the Instituto de Investigación en Ciencias Básicas y Aplicadas, and CIICAp. The name of the recipient, MICA Josué Osvaldo Sandoval Reyes, is written in a white cursive font on an orange banner. The event details are provided in black text, and the certificate is signed by Dr. J. Jesús Escobedo Alatorre.

**UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DEL ESTADO DE MORELOS**  
A TRAVÉS DEL CENTRO DE INVESTIGACIÓN EN INGENIERÍA Y CIENCIAS APLICADAS

**Otorga la presente**

**CONSTANCIA A**

**MICA Josué Osvaldo Sandoval Reyes**

Por su participación en el evento en línea **Puertas Abiertas CIICAp**, impartiendo su experiencia **Experiencias con Estudiantes de Posgrado en Ingeniería y Ciencias Aplicadas** el día 24 de noviembre 2021 las 16:00 H.

**Dr. J Jesús Escobedo Alatorre**  
Encargado de despacho del Centro de Investigación en Ingeniería y Ciencias Aplicadas CIICAp

Anexo J.1. Curso corto impartido.



El Centro de Investigación en Ingeniería y Ciencias Aplicadas de la Universidad Autónoma del Estado de Morelos y el Instituto de Ingenieros Electrónicos y Eléctricos de Morelos A.C

otorgan el presente

# RECONOCIMIENTO

A: **Dr. Josué Osvaldo Sandoval Reyes**

Por su participación como:

**Curso de Dispositivos MicroElectromecánicos**

En el marco del Congreso Internacional de Ingeniería Mecatrónica, Electrónica y Automotriz realizado de forma virtual del 16 al 21 de Noviembre de 2020.

M.I. Leoncio Aguilar Negrete  
Coordinador General del  
ICMEAE

M.C. Jonathan Villanueva Tavira  
Coordinador del Programa  
Técnico del ICMEAE



Anexo J.2. Conferencia impartida.



**ESCUELA DE TÉCNICOS LABORATORISTAS  
ESPECIALIDAD DE TECNOLOGÍAS AMBIENTALES**

**A quien corresponda:**

La suscrita profesora de la Especialidad de Tecnologías Ambientales de la Escuela de Técnicos Laboratoristas perteneciente a la Universidad Autónoma del Estado de Morelos

**HACE CONSTAR:**

Que

**MICA OSVALDO SANDOVAL REYES**

impartió el día 30 de septiembre del 2020, como parte de la materia TEMAS SELECTOS, el siguiente seminario:

**INGENIERÍA EN EL MICROMUNDO**

Para usos y fines legales que al interesado convengan, se extiende la presente constancia en la Ciudad de Cuernavaca, Morelos, a los 15 días del mes de junio del año dos mil veintiuno.

Atentamente

Por una humanidad culta  
Una universidad de excelencia

Dra. Gabriela Hernández Luna  
Profesora y coordinadora del Seminario  
Temas Selectos de la Especialidad de  
Tecnologías Ambientales

Vo.Bo.  
MSE Georgina Lizeth González  
González  
Presidenta de la Especialidad de  
Tecnologías Ambientales

Av. Universidad 1001, Col. Chamilpa, Cuernavaca Morelos, México, CP 62209  
E-mail: gabriela.hernandezluna@uaem.edu.mx



Una universidad de excelencia

RECTORÍA  
2017-2023

*Anexo J.3. Conferencia impartida.*



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**

**GABRIELA HERNANDEZ LUNA** | Fecha:2021-06-15 14:32:43 | Firmante  
yPvDhgYdzW6jZChJHs3L5P2OpixAEqCyH+ZaDuuwTWd3HUzHreL3KIn9UyNyrtpBzDp4/P2SFoBBW42u87mu5iOyzH0pgJSt+AAce8hrul3Y3s6UzUE7YyLKeW5re6NEbT5OS  
qK+eNRWke47ZE7G7C8GyKro4+kZ8C0yobb2nF4QmZbBwifYnoorZaCv8Uur3Kys9mOmJGbOl+Gy9eqy+bt1muUAB9Y9s2TJqn4n18yRhxtUGxpDaF4sXJ+HRYhUpUQJAusAzz+k  
CAAdnRgQuEpgotw+S26HOWZbLkDqd18ukP0Eul3590VeaKj+LgQTNEHdWLPkDrddfd5zqw==

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



6GjdNT

<https://efirma.uaem.mx/noRepudio?owdxcvySH7XL9G4BGUPZpi8BPaPrjOUQ>



Una universidad de excelencia

RECTORÍA  
2017-2023



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**

GEORGINA LIZETH GONZALEZ GONZALEZ | Fecha:2021-06-15 15:01:15 | Firmante  
Mj3SzcKz0Op5Hhsp9waCwUER7Lew5TC7B12KRYj7vGOpFkVcGVMEs0bK6bx9PEcgOnXJaTn+5D94KP+5CSQN40rQF9KG+0/dTXxg4famnNysM6GA5OxpmzdMpc5PY  
FmXs9SFDz4dEep5Ok0oivlDO6BS9EEfGTlan4Zkx5v9uBaL92uz+KVF.QGaKIOFKJxlIggagYV/CzZu4vz71ROBlaEcTRTh17moPOTIKM3HW6FGDxbCTG/KT+FBu4B51kQ6C2Jub  
pTTWad+1s328zCjHcH3ZTCSFHulvHzquegk56vy4QbeARTmzkmn7h/0BxsVyx+VoNYEPsWv==

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



4qkjWL

<https://efirma.uaem.mx/noRepudio/PORSb3fW49e3Dtsflav9UFB9gKAz9pVI>



Una universidad de excelencia

RECTORÍA  
2017-2023



UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DEL  
ESTADO DE MORELOS



PUBLICACIONES  
Y DIVULGACIÓN

SECRETARÍA ACADÉMICA

Dirección de Publicaciones y Divulgación

La que suscribe, maestra Ana Silvia Canto Reyes, directora de Publicaciones y Divulgación de la Universidad Autónoma del Estado de Morelos hace:

### CONSTAR

Que el MICA. **Josué Osvaldo Sandoval Reyes** apoyó durante el desarrollo del Club de Ciencias para niños, actividad de divulgación de las ciencias organizada por esta dirección, que se realizó el día 31 de enero de 2020, y cuyo tema fue **"Conociendo el micro-mundo con micro-herramientas"**.

Se extiende la presente constancia para los fines que al interesado convengan, a los treinta y un días del mes de enero de dos mil veinte.

Atentamente

*Por una humanidad culta*



UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DEL  
ESTADO DE MORELOS

**Mtra. Ana Silvia Canto Reyes**

Directora de Publicaciones y Divulgación

c.i.p. – Expediente.

Av. Universidad 1001 Col. Chamilpa, Cuernavaca Morelos, México, 62209  
Tel. (777) 329 70 00, Ext. 3415 y 3416 / divulgacion@uaem.mx

UA  
EM

Una universidad de excelencia

RECTORÍA  
2017-2023

Anexo J.4. Conferencia impartida.



La presente memoria fue elaborada por el equipo de trabajo de la Dirección General de Planeación y Políticas de la Secretaría de Economía del Poder Judicial Federal.

### CONTENIDO

Que el MICA tiene como finalidad brindar a los usuarios un servicio de calidad y que el equipo de trabajo de la Dirección General de Planeación y Políticas de la Secretaría de Economía del Poder Judicial Federal ha elaborado esta memoria para dar a conocer los resultados de su trabajo.



**Folio No. DPyD/CC/004-20**

Cuernavaca, Mor. a 31 de enero de 2020

UNIVERSIDAD TECNOLÓGICA  
EMILIANO ZAPATA DEL ESTADO DE MORELOS  
ORGANISMO PÚBLICO DESCENTRALIZADO DEL GOBIERNO DEL ESTADO DE MORELOS

otorga el presente

# RECONOCIMIENTO

Al: MICA. Josué Osvaldo Sandoval Reyes

Por haber impartido el Taller:  
**"Introducción al Diseño de Sistemas Micro-Electro-Mecánicos"**  
llevado a cabo en las instalaciones de esta Universidad Tecnológica,  
el día 13 de noviembre del presente año.

Emiliano Zapata, Mor., noviembre de 2019



M. en C. Jaime Vázquez Colín  
Director de la División Académica  
de Mecánica Industrial



Anexo J.5. Conferencia impartida.



LA PREPARATORIA FEDERAL POR COOPERACIÓN ANDRÉS QUINTANA ROO EN COORDINACIÓN CON EL CONSEJO DE CIENCIA Y TECNOLOGÍA DEL ESTADO DE MORELOS Y LA ACADEMIA DE CIENCIAS DE MORELOS

En el marco de la Celebración de la 19ª Semana de la Ciencia y Tecnología.  
**"Año Internacional de la Tabla Periódica de los Elementos Químicos"**



**A: Mtro. Josue Osvaldo Sandoval Reyes**

Por su valiosa participación como Ponente en el taller **"Introducción al Diseño de Sistemas Micro-Electro-Mecánicos (MEMS)"** en la 19ª Semana de la Ciencia y Tecnología. Celebrada en las instalaciones de nuestra Institución, los días 23 al 25 de octubre del 2014.

UNIVERSIDAD DE QUINTANA ROO  
 SUBSECRETARÍA DE EDUCACIÓN MEDIA SUPERIOR  
 DIRECCIÓN GENERAL DEL BACHILLERATO  
 PREPARATORIA FEDERAL POR COOPERACIÓN  
 ANDRÉS QUINTANA ROO  
 C.C.T. 1758IC28A2G  
 QUINTANA ROO

  
**DR. JESÚS ALEJANDRO VERA JIMÉNEZ**  
 DIRECTOR GENERAL DEL CCYTEM

  
**DRA. BRENDA VALDERRAMA BLANCO**  
 PRESIDENTE DE LA AC MOR

  
**MTRO. FERNANDO MENDOZA VERGARA**  
 DIRECTOR DE PREPARATORIA

# RECONOCIMIENTO



Cuernavaca Mor., 15 de enero del 2020



**A QUIEN CORRESPONDA**

Quien suscribe la M. en E.C. Angélica del Carmen Arellano Franco Directora de la Escuela Técnicos Laboratoristas, **HAGO CONSTAR** que el **M.I.C.A. Josué Osvaldo Sandoval Reyes** impartió el seminario de “La ingeniería del micromundo” de los alumnos de la carrera de Tecnologías Ambientales Grupo 5°F el día 7 de octubre del 2019.

Se expide la presente constancia para los fines que al interesado convengan.



Atentamente

M. en E.C. Angélica del Carmen Arellano Franco  
Directora de la Escuela de Técnicos Laboratoristas


 UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DEL ESTADO DE MORELOS  

 CIICAp ANIVERSARIO 20 años  

 Taller Niños Científicos CIICAp

**El Centro de Investigación en Ingeniería y Ciencias Aplicadas**  
**Otorga la siguiente constancia a:**  
*MICA Josue Osvaldo Sandoval*

Por su valiosa participación como apoyo (12h)  
 en el Cuarto "Taller Niños Científicos CIICAp"  
 Enero-Junio 2019

Dra. Elsa Carmina MENCHACA CAMPEA  
 DIRECTORA GENERAL DEL CENTRO DE INVESTIGACIÓN EN INGENIERÍA Y CIENCIAS APLICADAS

Lic. Guadalupe Trojeiro  
 SUPERVISORA DE LA ZONA No. 5 DE EDUCACIÓN ESPECIAL EN EL ESTADO DE MORELOS.

INSTITUTO BÁSICO DE INVESTIGACIONES SUPERVISIÓN DE EDUCACIÓN ESPECIAL CLAVE: 17F5ED009F  
 UAEM CENTRO DE INVESTIGACIÓN EN INGENIERÍA Y CIENCIAS APLICADAS

Cuernavaca, Morelos a 28 de junio de 2019

Anexo J.8. Conferencia impartida.

# Anexo L. Asistencia a conferencias

Centro de Ingeniería y Desarrollo Industrial

**CIDESI**

Otorga la presente:

*Constancia*

**Josué Osvaldo Sandoval Reyes**

Por haber completado el Curso Teórico-Práctico  
"Inducción y seguridad laboral de Cuartos Limpios ISO 6 e ISO 7"

Con una duración de tres horas, impartido el 21 de septiembre del 2021 en  
el Centro de Ingeniería y Desarrollo Industrial, Sede Querétaro.

  
L.I.N. Víctor Manuel Hurtado Pájaro  
Responsable de Seguridad, Salud y Medio Ambiente  
Gerencia de Microtecnologías

  
Dr. Jesús Javier Alcántar Peña  
Titular de la  
Gerencia de Microtecnologías

Gerencia de Microtecnologías

Anexo K.1. Asistencia a conferencia.



UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DEL ESTADO DE MORELOS, A TRAVÉS  
DEL INSTITUTO DE INVESTIGACIÓN EN CIENCIAS BÁSICAS Y APLICADAS  
Y EL CENTRO DE INVESTIGACIÓN EN INGENIERÍA Y CIENCIAS APLICADAS

Otorga la presente

# CONSTANCIA A

## ◀ Sandoval Reyes Josué Osvaldo ▶

Por su asistencia al Taller **“Tecnología de Fabricación de Dispositivos Microelectromecánicos de la Universidad Autónoma de Ciudad Juárez”**, impartido por el **Dr. José Mireles Jr. García**, llevado a cabo mediante la plataforma Microsoft Teams, durante los días 12 de abril y 3 de mayo de 2021, con una duración de 4 hrs.

Este taller forma parte de las actividades del Proyecto: Diseño análisis e implementación de novedosos dispositivos MEM inerciales y electro-térmicos. Ref: A1-S-33433. “Proyecto Apoyado por el Fondo Sectorial de Investigación para la Educación”.

**Dra. Margarita Tecpoyotl Torres**  
Organizadora  
Responsable del Proyecto de Ciencia Básica  
Ref: A 1-S-33433 y del UAEMOR-CA-52

**Dr. Jesús Escobedo Alatorre**  
Director Interino del Centro de Investigación  
en Ingeniería y Ciencias Aplicadas CIICAp



Anexo K.2. Conferencia impartida.



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**

**J JESUS ESCOBEDO ALATORRE | Fecha:2021-08-06 16:32:37 | Firmante**  
CQBjr17Q0B0/XBQGS0d0w8EB7c9g8Jucsm11IH+GdbVn2i7+jZF3IPkVvSNKZTnsPSJAIRSFGrwYF+WKOI+La8Juu6UnzlGaaZcMvDGyFrNduZtkN9WpuyYeZz466Ruq6wdqhb5ex3MX+1F5i29grfMmg+xq2+abHatiB9te7dLEKu5y3i3oukkE5yJlBMmM4YyWix6Zm20euMwEpFn6KGGb1nLbCur4m83MUHps0VPh30oGlnxbz2Msb9ArNjaE8/bb3cHqNRxcWYAywjjQLa5k441T6YNIJjvth+1FzwhL+qRVfswsk11MhpxG79EnfUaLnzMOpgQ==

**MARGARITA TECPOYOTL TORRES | Fecha:2021-08-06 17:19:02 | Firmante**  
G08xqgcEz9ei20lYeqMiv67VbPdYx780xzL0uNHSJEx09ztTrD7+gczjJNndVMowEHc+1UKTleZz+7SYO7G01npru5P3VchueN8rBrJLhyL8a+VskBhwzQees8xPfdAvHHGEMnX/nfABxdbPaz602VjfZ3kpE4ZkBiBjUMk11LNB1OJKf90Fe2Cfux85thZFTKU/WQsfui47qYafAVbq28AEi18q9QU4OZ+rjT54KoSunrMnUGPbOxyN5N1G5HTPHCF3Lxs0eLsK1YzhFjJ/+neKNMskRZ6zPH9iXBk5NDMNYqR/4+E8S8d0i/FfDIZmtWvirYIRKLW==

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



TC1VY9

<https://efirma.uaem.mx/noRepudio/Cd3BkPthWGxIXLsa0TUGDirD7z17KYAV>



Una universidad de excelencia

RECTORÍA  
2017-2023



UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DEL  
ESTADO DE MORELOS



## INSTITUTO DE INVESTIGACIÓN EN CIENCIAS BÁSICAS Y APLICADAS

Jefatura de Posgrado en Ingeniería y Ciencias Aplicadas



Cuernavaca, Morelos, 25 de octubre de 2023.

**DR. JUAN CARLOS GARCÍA CASTREJÓN**  
**COORDINADOR DEL POSGRADO**  
**EN INGENIERÍA Y CIENCIAS APLICADAS**  
**P R E S E N T E**

Atendiendo a la solicitud para emitir DICTAMEN sobre la revisión de la TESIS titulada: “DISEÑO E IMPLEMENTACIÓN DE UNA MICROPINZA MEM CON MECANISMOS FLEXIBLES”, que presenta el alumno **JOSUÉ OSVALDO SANDOVAL REYES**, para obtener el título de **DOCTORADO EN INGENIERÍA Y CIENCIAS APLICADAS**.

Nos permitimos informarle que nuestro voto es **APROBATORIO**.

Atentamente  
***Por una humanidad culta***  
*Una universidad de excelencia*

**DR. J JESÚS ESCOBEDO ALATORRE**

**DR. VOLODYMYR GRIMALSKY**

**DR. JOSÉ ALFREDO RODRÍGUEZ RAMÍREZ**

**DR. JOSÉ ANTONIO MARBAN SALGADO**

**DR. OUTMANE OUBRAM**

**DR. JOSÉ MIRELES JR. GARCÍA**

**DRA. MARGARITA TECPOYOTL TORRES**

Se adiciona efirma UAEM





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

**OUTMANE OUBRAM | Fecha:2023-10-25 17:35:35 | Firmante**

Ku3WxBC/sySUDx/BtOslfPqRowoZfj66DP5RIRuQIMpAnBnB4ROi6lGefHzqAesNWawzAoTXAQSfKqzzKBdKWtmXXupkTpNvZzoMU++jfwHOM8Csud+mLzvb8amWF+uzpN ZJ9dcYS2OPchlyGfQmrzCB+QwHaPuaOUVgMvvgAXZL6Sb6JCS5PwjmG0F/bVaAUQ6fiqYnz7sgErr8ekB0cUBoyaCmpySPC4kEsMbGfZMla2qmf1Ga644x1TNEZ/EwSxgE1q aGHWKA6X47Pbt+AxVjRFukQo+oSsNR5CqWqNlqQm1uh4DQO7Lof7BkJsTO2AdFlixYxOeT+IFaFZA==

**MARGARITA TECPOYOTL TORRES | Fecha:2023-10-25 18:18:13 | Firmante**

b5TS5qOEOJQWK1eAI3BWlMk9XE8vK+i0d6WbUGGI15cAXTZpsn/f+eqYTsGOIz38q/7H4IIQfAFS0aywgWYImQ+npBTizp/ZHwwAEDv2ODV07QuOxolSgTfJCh4b4xb6m/NIn/ z4fn8pJCxd2gu615sFx9J26WX72tA8UGCMvo8uErEAncPhjaq/mdlEN3sGMiGnh85xI/G8YoRiVIN6KWcUNXBALWFNUWVwv1A2F1+ZyZezqh0UjIm+ZctJVM6I1GELfTYacvVH efilcG/2Ri2GondQLkq5lae81H+7V7T10jTgADgEj2vWANE05S00rm/sLjU6dXYjWRKKsw==

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

F8XAgG86o6cMQdVz7gh5kDF4zhL7+OikVZ0YZUpTpEr4K+Y0mtWGkxKHbDcsINTrijt8yvMPY4dPOUy58oJXvH7W0i6jdwkTogJo6AJ7M90RhD5FXRcZVTPOJ/kiGb6qroU+oR6 pkW29rZBXPWx97anRalJIX+BLZq57kosVXX0U5XaSkMiGTY7w/GdbeJYERmorrpc5hsT0/uj2hilu9UTIhKHWJC+evz5wvFLCxNbClrQmhl4F+NKKcfaU+uu+q/nL8c9pKCsXqFhPxjh D+B51KKVp0oQAFiceJuNCTfVpg2t+1LJD94fdzK0mswWBuvpqq92kgRGoBryMPq6E4Q==

**VOLODYMYR GRIMALSKY | Fecha:2023-10-26 11:25:35 | Firmante**

L8DCCWYikewKt4EZ8rWbVgbyUC7j8GhGaoZ2+s5D3aFqM9MYCJm0QTjGcEjCEli/KjgiWlez3DGCwWGQxhJWkLU2jd/ouBkJqlwAq7Fgz7NUC/+pguAHU6OcCRGRQtga9d vwdQDu8IGC0It7kT1yGfCgBa5MfwcCWTpw1lodkyTOKHi8UqTbu9wd5qO3xicGBEA45JG7oDY15fnpd6/wNiWH0gDVaNRQN/Q4sXabHyBxIny6/igH4/ypt0Q5EsaTC1R5SCsfvQ cQaSmYyGeQYPJ4y20j+XZmOpjO/c4inTFpfhoYyKJBizcojHW31pU/8mwU1USZlqdhjAcsnMz3Q==

**J JESUS ESCOBEDO ALATORRE | Fecha:2023-10-26 14:22:00 | Firmante**

sQtqOF3yOfEpglqniKCaW1u2CHmdgfg3GcipKanknUgDz5L4MAaloB7Cbo6UWYDpGpvHNoUV/OKrAMNHVC3MzuvL5UxryrSEeEYKxrAAlDbmKFSouBfo1H6pjmAXPs556edErX KQvEqdwOt/3k0F0noaT1iueGSG1ohyZUnx3AEWn6gpU/Gcw2PFgnVivSK9HqvF1b02HQBUUoZfkHTO1r3boniOKJ/RcHujTv0jwA9KoiNgdBjQ4Eauc8uGxPqUxC0VBmo1F 7NVBEhUMRMgRCVDq+GzYAKCfvNhVrCrMZnohUo7Vkf0Xqcxo1TkDjW3a9pjirzFibo1N1Ovaw==

**JOSÉ MIRELES JR. GARCÍA | Fecha:2023-10-26 16:16:36 | Firmante**

hYGwM4IMWRAw1pJ6527lte1bX2ttAH/dRdJmU1IHwNvsthnUiiCYSu1mf0t+AaAv67HQJEmB7aKKi/lZGcKdnFSmftqRwrhclznTFSJZBbdSDhY2NBHXRyWScqn697Eyl1DNg FgbdK05934VtzeJr5HPyW7fzuaY78Ou0NfCC2Wc6OSiqwsKJOSQ1MBDSaiYBCsRu9fgUCZj6s2ihNnKk3pMPy/R8mDEeJYMQAiuRLVu5KhC9JKQ6XHuxCdJnGkmQpcudpFa BGR6Us6mq4pFWkfmBj6o5tm5FKWjENDyHBWt+u67oc2nVHzrBaNcRgWtUM0etsSsi6VIMKB8hg==

**JOSE ANTONIO MARBAN SALGADO | Fecha:2023-10-31 11:04:48 | Firmante**

XhYce34LaNEhgSqPI0JXPXL8ddU30IRr9c6NEulkRNjKxOitlU15sZ+y0qjsC6B9HPcR9IhnmNzXLaxTOFBkNE2w+I0Nbyouybv8PBxwbijHnAreH24dr8N+FpZiI4dg1zKXgcOwKMc by0ryhsX3qj9ANJU25f1jt5yypuKuoElurt6Qs8qIHcskZRC6kRJRJBVaGiiYwKmvNDJ840FbN96Pde4lwwgPpQpU+I7CWt537BQX2F/bJE1kyEE+tnpfyY1amDjtjyuvWF7rOpbVfd w0fUsGcFTUm7NcLND6QNMBraJbBhPvdQQBh1Jq0clXB4/E4PG48OoFh3stet2A==

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



SbfV7sUKY

<https://efirma.uaem.mx/noRepudio/ETNUl6o6ei83N0iAGTY5oChG4XHF3yUC>

