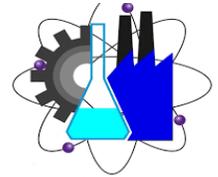




**UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DEL  
ESTADO DE MORELOS**



**Facultad de Ciencias  
Químicas e Ingeniería**

**UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DEL ESTADO DE MORELOS  
FACULTAD DE CIENCIAS QUÍMICAS E INGENIERÍA  
CENTRO DE INVESTIGACIÓN EN INGENIERÍA Y CIENCIAS APLICADAS**

**“MICROPINZA BASADA EN UN ARREGLO DE ACTUADORES  
CHEVRÓN PARA LA MANIPULACIÓN DE MICROALAMBRES”**

**TESIS PARA OBTENER EL GRADO DE:**

**LICENCIATURA EN INGENIERIA ELÉCTRICA ELECTRÓNICA  
C.DALIA MARGARITA MARTINEZ RODRIGUEZ**

**DIRECTOR**

**DRA. MARGARITA TECPOYOTL TORRES**

**SINODALES**

**Dr. Pedro Vargas Chablé**

**Dr. José Gerardo Vera Dimas**

**Dr. Oubram Outmane**

**Dr. José Alfredo Rodríguez Ramírez**

**CUERNAVACA MORELOS, 28 DE JUNIO 2022**

## RESUMEN

En la tecnología MEMS existen diversos dispositivos micrométricos que integran elementos mecánicos, eléctricos, electrónicos, ópticos, entre otros, las cuales se utilizan en diversos campos de aplicación como la medicina, la ingeniería, la agricultura, etc. Los dispositivos de interés en este trabajo son las micropinzas.

En este trabajo proponemos un novedoso diseño de micropinza electrotérmica basada en tecnología MEMS, en la cual se integró un arreglo de cuatro actuadores chevrón (de forma V) frontalmente encontrados, con brazos Z modificados, y cuyas flechas alargadas constituyen los 4 brazos de la pinza convencionalmente abierta, con una apertura inicial de 80  $\mu\text{m}$ , con Silicio como su material estructural. El objetivo es manipular microcables o microestructuras tales como fibra óptica, conductores eléctricos, hilos conductores o elementos de tipo filamento. Se consideran diámetros de estos filamentos desde los 80  $\mu\text{m}$  hasta 93  $\mu\text{m}$ .

Cabe señalar que, esta pinza muestra mayor flexibilidad y fuerza, que en el caso en el que se utilizan actuadores de brazo Z convencionales, y estos a su vez, mayor respuesta que en el caso del actuador V de brazos uniformes.

Con relación a los resultados de la simulación de la micropinza con brazos Z modificados, se obtuvo un desplazamiento en cada flecha de 6.9137  $\mu\text{m}$  y fuerza de reacción en cada una de las flechas de 50.552 mN. Por lo que, se tiene una apertura total de 93.82  $\mu\text{m}$ , cubriendo el rango de diámetros considerado. Con relación a la fuerza de reacción, el peso máximo que puede sujetar la pinza es de 20.61 g, por lo que se pueden sujetar 1.7175 m de filamento que tenga un peso de 12 kg/km (Fiberline, 2022)

Posterior a esto, para hacer pruebas de validación de funcionamiento del diseño, en escala meso, se realizan las pruebas físicas utilizando un

escalamiento de 100, con aluminio 60-63, como material estructural. En este caso, se realizan también las simulaciones correspondientes y los cálculos teóricos. No se consideró la microfabricación debido a limitaciones actuales en los procesos en el Centro de Ingeniería y Desarrollo Industrial, CIDESI, centro con el que se tiene convenio de colaboración,

Por tanto, el prototipo en aluminio se implementó con una Máquina de Control Numérico Computarizado, CNC, con la que se cuenta en el laboratorio de Electrónica y dispositivos para sistemas de comunicación.

Los resultados experimentales del actuador chevrón de brazos Z modificados se comparan con los teóricos y numéricos obteniéndose aproximaciones aceptables, considerando como elemento base de comparación a los resultados numéricos. En desplazamiento se tiene un error teórico contra el experimental de 37.82%. Mientras que, sobre la fuerza de reacción, se tiene un error teórico comparado con el experimental de 27%.

De manera experimental se obtuvo un desplazamiento en los brazos (flechas) izquierda, derecha, arriba y debajo de 0.6, 0.5, 0.4 y 0.4 mm, respectivamente. Las diferencias se atribuyen a la alta demanda de corriente, que no se distribuye de forma totalmente equitativa, debido a limitaciones particularmente de conexiones adecuadas, requiriéndose cables especiales, de alto calibre. Se espera que, con la microfabricación en Silicio, se solventen estas desviaciones de las condiciones de operación deseadas.

Con relación a la fuerza, idealmente, la fuerza total es equivalente a la suma de las fuerzas de reacción en cada una de las flechas, la dificultad en la medición experimental de la fuerza total radica nuevamente en el alto nivel de corriente utilizado. Por lo que, sólo se realizó la medición en uno de los chevrónes del arreglo, esto es, de manera individual. La mayor masa que pudo soportarse es de 133.33 g, equivalente a 1.30796 N.

Por lo tanto, de manera adicional, se valida experimentalmente el desempeño esperado en desplazamiento y fuerza en escala meso, aunque con ciertas limitaciones, impuestas por el alto nivel de corriente involucrado.

## **PALABRAS CLAVE**

Actuador, chevrón, fibra óptica, MEMS, micropinza.

## ABSTRACT

In MEMS technology, there are various micrometric devices that integrate mechanical, electrical, electronic, optical elements, among others, such as the group where the micro-tweezers are found, which are used in various fields of application such as medicine, engineering, agriculture, etc.

In this work we propose a novel design of electrothermal micro-gripper based on MEMS technology, in which four chevron actuators (V-shaped) frontally arranged, with modified Z-arms, and whose elongated arrows constitute the 4 arms of the conventionally open gripper, with an initial opening of 80  $\mu\text{m}$ , was integrated with Silicon as its structural material. The objective is to manipulate microcables or microstructures such as optical fiber, electrical conductors, conducting wires or filament type elements. Diameters of these filaments are considered from 80  $\mu\text{m}$  to 93  $\mu\text{m}$ .

It should be noted that, this gripper shows greater flexibility and strength, than in the case where conventional Z-arm actuators are used, and these in turn, greater response than in the case of the V-shape actuator.

In relation to the results of the simulation of the microgripper with modified Z arms actuator, a displacement of 6.9137  $\mu\text{m}$  was obtained in each shaft and a reaction force of 50.552 mN in each of the shafts. Therefore, a total opening of 93.82  $\mu\text{m}$  was obtained, covering the range of diameters considered. Regarding the reaction force, the maximum weight that the gripper can hold is 20.61 g, so 1.7175 m of filament with a weight of 12 kg/km can be held.

Subsequently, to perform validation tests of the design performance, at meso scale, physical tests are performed using a scaling of 100, with aluminum 60-63, as structural material. In this case, the corresponding simulations and theoretical calculations are also performed. Microfabrication was not

considered due to current limitations in the processes at the Centro de Ingeniería y Desarrollo Industrial, CIDESI, a center with which we have a collaboration agreement.

Therefore, the aluminum prototype was implemented with a Computerized Numerical Control Machine, CNC, which is available in the laboratorio de Electrónica y dispositivos para sistemas de comunicación of UAEM.

The experimental results of the modified Z-arm chevrón actuator are compared with the theoretical and numerical results, obtaining acceptable approximations, considering the numerical results as the base element of comparison. In displacement, there is a theoretical error against the experimental error of 37.82%. While, on the reaction force, there is a theoretical error compared to the experimental one of 27%.

Experimentally, a displacement in the left, right, up and down microgripper arms (arrows) of 0.6, 0.5, 0.4 and 0.4 mm, respectively, was obtained. Differences are attributed to the fact that there is a high current demand which is not distributed in a totally equal way, due to limitations particularly of adequate connections, requiring special cables of high caliber. It is expected that, with silicon microfabrication, these deviations from the desired operating conditions will be solved.

In relation to the force, ideally, the total force is equivalent to the sum of the reaction forces on each of the shafts, the difficulty in the experimental measurement of the total force lies again in the high level of current used. Therefore, the measurement was only performed on one of the chevrons of the array, i.e., individually. The highest mass that could be supported is 133.33 g, equivalent to 1.30796 N.

Therefore, additionally, the expected performance in displacement and force at mesoscale is experimentally validated, although with certain limitations, imposed by the high level of current involved.

**KEYWORDS**

Actuator, chevron actuator, fiber optics, MEMS, microgripper.

## **AGRADECIMIENTOS**

Primeramente, mediante estas palabras quiero expresar mi eterno agradecimiento y admiración a la Dra. Margarita Tecpoyotl Torres quien me integró en su equipo de trabajo en el "Laboratorio de Electrónica y dispositivos para sistemas de comunicación" en el Centro de Investigación en Ingeniería y Ciencias Aplicadas (CIICAp), sin duda gracias a su apoyo, consejos, conocimiento, paciencia e inspiración este proyecto se logró satisfactoriamente, mi gratitud y afecto eterno.

Agradezco también al Centro de Investigación en Ingeniería y Ciencias Aplicadas (CIICAp), por todos los conocimientos que me brindó al pertenecer a este grupo, a mis compañeros de laboratorio que desde el primer momento me brindaron su apoyo y amistad compartiendo sus conocimientos conmigo, al Dr. Pedro Vargas Chablé, Maestro Josué Sandoval Reyes, Lic. Sahiril Fernanda Rodríguez Fuentes, Maestro Andrés Ferrara, Ing. Rubenio Medina Cruz e Ing. Alan Jesús Estrada Cabrera.

A CONACyT, por el apoyo de beca de tesis de licenciatura, número de referencia 31639, obtenido como parte del proyecto de Ciencia Básica "Diseño, análisis e implementación de novedosos dispositivos MEM inerciales y electro-térmicos".

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

Gracias a la oportunidad que brinda CONACyT mediante este apoyo económico, que anima e impulsa a los jóvenes a convertirse en futuros investigadores, promoviendo el desarrollo de la ciencia y la tecnología en México con el compromiso de ayudar a la sociedad.

Agradezco a la Facultad de Ciencias Químicas e Ingeniería (FCQel), por abrirme sus puertas a esta máxima casa de estudios y otorgarme esta segunda oportunidad escolar de gran calidad educativa, por permitirme ser alumno de su programa de Ingeniería Eléctrica y pertenecer a su Rama estudiantil del IEEE UAEM y finalmente por darme el honor de ser de las pioneras en la creación del grupo de afinidad WIE-UAEM (Mujeres en la ingeniería) perteneciente al IEEE para promover, motivar y reconocer a la mujer en la Ingeniería.

A Unbound Superando Juntos A.C. por creer en nosotros los jóvenes y caminar conmigo a lo largo de mi estancia universitaria, años en los que me permitió conocer, servir, ayudar, querer y vivir la experiencia más gratificante y hermosa de mi vida, no solo fueron un apoyo económico en mi vida, son y serán siempre el pilar fundamental para el logro de esta meta, gracias a todos los donadores, personal de Unbound Cuernavaca y a todos los que hacen posible el programa de becas servicio Unbound, gracias Daniel, gracias Mariana, gracias Helena.

A los miembros del comité revisor, por sus consejos, paciencia, sugerencias y apoyo para el fortalecimiento de este trabajo de investigación.

## DEDICATORIA

Me gustaría agradecer en estas líneas la ayuda que muchas personas y colegas me han prestado durante el proceso de investigación y redacción de este trabajo, además de creer en mí, me impulsaron a seguir adelante e influyeron para tomar esta nueva oportunidad.

A mis padres, Melitón Martínez Mentado y Margarita Rodríguez Ramírez quienes gracias a su esfuerzo, trabajo honesto, amor y paciencia de cada día me permitieron llegar a cumplir este sueño, por inculcar en mí el ejemplo de responsabilidad y constancia, por animarme a salir adelante siempre aún en la adversidad, el logro de meta es de ellos y por ellos, mi respeto y admiración hacia la labor que hacen por nuestra familia, por formarnos como personas de bien y alentarnos a ser seres preparados, felices, espirituales y trabajadores, por creer en mí siempre, todo mi amor a ustedes, porque :

*“Si se tiene que empezar de cero, se empieza, mientras estés bien”.*

A mis hermanos, Emmanuel, Miguel Ángel y Alejandro Everardo por su perseverancia, cariño y apoyo incondicional durante todo este proceso, por estar conmigo en todo momento, gracias por la paciencia a lo largo de estos años, por ayudarme de acuerdo con sus posibilidades.

A la familia Martínez Mentado y Rodríguez Ramírez, mi abue Angelina, mi tía Lorena, mis padrinos Eligia y José Santos, Juana y Fabiola porque con sus oraciones, consejos y palabras de aliento hicieron de mí una mejor persona y de una u otra forma me acompañan en todos mis sueños y metas.

A la memoria de Luciana Mentado, Adrián Martínez, Miguel Ángel Rodríguez y Everardo Rodríguez quienes, aunque ya no están en este plano, su amor seguirá conmigo todos los días de mi vida.

A Evaristo Casanova, Elaine Levine y María del Carmen Rodríguez, quienes más haya de ser jefes de trabajo para mi familia y para mí, nos han

brindado su valiosa amistad, por los consejos y ayuda en todos los momentos difíciles y más en los de enfermedad, por los libros, las charlas e incluso las visitas a la ópera hace algunos años, gracias.

A Jorge Alejandro, por llegar a iluminar mi vida, ayudarme a alcanzar mis metas, por los consejos, paciencia y amor que me ayudaron a concluir este reto, agradezco por toda la ayuda y los aportes no solo para el desarrollo de mi tesis, sino también para mi vida; eres mi inspiración y mi motivación.

A Ekson Eduardo, quien con su amistad me ayudó a adaptarme en esta etapa, sin duda no solo formamos un gran equipo en liderazgo, considero que sin sus palabras jamás hubiera creído hacer posible todo esto, gracias por el aprendizaje de vida, volemos alto.

A la familia que elegí desde secundaria, mis mejores amigos Ing. Marco Aurelio quien me motivó en este mundo de la ingeniería con su curiosidad por aprender, a Montserrat quien me ha escuchado todos estos años y ayudado siempre en los momentos difíciles, a la gran amistad de Max, se convirtieron en amigos de vida gracias por todo su apoyo y diversión.

A mis compañeros y amigos de la FCQel, Octavio Elizalde, Ricardo Acosta, Yuriko Lugo, Miguel Ángel Juárez, Francisco Garay, Gaby Santamaria, Leslie Solís, Miguel Celaya, Daniel Ortigoza, Kevin Zavaleta y a todos con todos los que compartí dentro y fuera de las aulas.

A el Dr. Gerardo Vera Dimas y el Ing. Luis Mardonio quienes desde el inicio en esta Facultad me brindaron su amistad y apoyo sincero, mi gratitud siempre.

A todos docentes que, con su sabiduría, conocimiento y apoyo, motivaron a desarrollarme como persona y profesional, Ing. Luis Mardonio, Dr. Gerardo Vera, Dr. Outmane, Dr. Luis Cisneros, MC. Eduardo Vargas, MC Genaro Ixmatlahua, MC. Jorge Rendon.

Por último, agradezco a el destino y a todas las puertas que me abrió luego de marcar un antes y un después en mi vida, por hacerme evolucionar, crecer y aprender de cada experiencia a lo largo de estos años, por hacerme coincidir con seres tan especiales en mi vida, por la familia tan diferente que tengo y darnos la mejor herencia que pueden; el dejarnos y alentarnos a estudiar aún en contra de las creencias de los demás.

*“Cuando una puerta de felicidad se cierra, se abre otra: pero a menudo vemos tanto la puerta cerrada, que no nos percatamos de aquélla que se ha abierto para nosotros”.*

-Helen Keller

## Contenido

RESUMEN .....	IV
PALABRAS CLAVE .....	VI
ABSTRACT.....	VII
KEYWORDS.....	IX
AGRADECIMIENTOS .....	X
DEDICATORIA .....	XII
Lista de Figuras.....	XVIII
Lista de Tablas.....	XXI
CAPÍTULO 1. INTRODUCCIÓN.....	1
1.1 Introducción.....	2
1.2 Antecedentes .....	3
1.3 Objetivo general.....	4
1.4 Objetivos particulares .....	4
1.5 Justificación.....	4
1.6 Preguntas de investigación .....	5
1.7 Hipótesis.....	5
1.8 Alcance .....	5
1.9 Limitaciones .....	6
1.10 Organización de la tesis .....	6
CAPÍTULO 2. MARCO TEÓRICO .....	8
2.1 ¿Qué son los MEMS? .....	9
2.2 Ventajas de los MEMS.....	11
2.3 Materiales para fabricación de MEMS.....	12
2.4 Tipos de actuación .....	14
2.5 Micropinzas.....	15
2.6 Efecto Joule.....	17
2.7 Tipos de actuación .....	18
2.8 Actuadores chevrón .....	19
2.9 Modelado del chevrón Z, con base en la temperatura.....	21
2.10 Modelado eléctrico del actuador Z y Z modificado .....	23
2.11 Análisis de elementos finitos ANSYS™ .....	28

2.12 Parámetros del Silicio.....	29
2.13 Características básicas de una fibra óptica .....	30
CAPÍTULO 3. METODOLOGÍA .....	31
3.1 Detección de necesidad de uso de la micropinza .....	33
3.2 Determinación de dimensiones del objetivo de sujeción .....	34
3.3 Selección de dimensiones, tecnología, forma de los elementos, del actuador y del tipo de actuación .....	34
3.4 Integración del sistema (Micropinza) .....	34
3.5 Comparación de resultados analíticos y numéricos .....	35
3.6 Simulación y comparación de resultados satisfactorios .....	35
3.7 Metodología complementaria para la fabricación en aluminio .....	36
3.8 Geometría .....	36
3.9 Selección del factor escalamiento en la metodología complementaria.....	36
3.10 simulación del actuador .....	36
3.11 Fabricación del actuador.....	36
CAPÍTULO 4. DISEÑO, SIMULACIÓN Y PRUEBAS DEL CHEVRÓN DE BRAZO Z MODIFICADO EN SILICIO Y ALUMINIO .....	37
4.1 Comparación de resultados analíticos y numéricos .....	38
4.2 Diseño del microactuador con brazos Z modificados (Silicio) .....	40
4.3 Simulación del microactuador con brazos Z modificados (Silicio).....	42
4.4 Simulación, fabricación y pruebas. Chevrón con escalamiento, implementada en Aluminio .....	48
4.3 Fabricación de prototipo en aluminio mediante una Máquina de Control Numérico Computarizado, CNC.....	52
4.5 Desplazamiento del chevrón Z modificado.....	56
4.6 Determinación experimental de la fuerza .....	58
CAPÍTULO 5. DISEÑO, SIMULACIÓN Y CARACTERIZACIÓN DE LA MICROPINZA BASADA EN UN ARREGLO DE ACTUADORES CHEVRÓN DE BRAZO Z MODIFICADO.....	61
5.1 Diseño y simulación (Silicio).....	62
5.2 Diseño y simulación (Aluminio).....	65
5.3 Fabricación de prototipo en aluminio mediante una Máquina de Control Numérico Computarizado, CNC.....	67
5.4 Comparación numérica y experimental, pinza implementada en Aluminio .....	70

CAPÍTULO 6.- CONCLUSIONES Y TRABAJO FUTURO .....	71
6.1. Conclusiones .....	72
6.2 Trabajo Futuro .....	73
Bibliografía .....	75
Anexo 1- Constancias .....	78

## Lista de Figuras

Figura 1 Actuador electrotérmico. Fuente (Ehrfeld W, 2000). .....	14
Figura 2 Ejemplos de micropinzas. Fuente ( NikoobinM. & Hassani, 2012) .....	16
Figura 3 Tipos de puntas de agarre en micropinzas. Fuente ( NikoobinM. & Hassani, 2012).17	
Figura 4 Efecto Joule, Fuente (Quiñones N, 2009).....	18
Figura 5 Actuador electrotérmico en forma de V con dos brazos. ....	20
Figura 6 Actuador electrotérmico en forma de Z convencional con dos brazos. Adaptada de (Guan & Zhu, 2010).....	20
Figura 7 Actuador electrotérmico en forma de Z modificada con un brazo. Adaptada de (Guan & Zhu, 2010).....	21
Figura 8 Circuito eléctrico equivalente (Analogía eléctrica). ....	23
Figura 9 analogía eléctrica equivalente .....	24
Figura 10 Analogía resistencias equivalentes serie .....	24
Figura 11 Resistencia total del actuador.....	24
Figura 12 metodología general .....	32
Figura 13 metodología adicional.....	33
Figura 14 Integración de la micropinza con actuadores chevrón de brazos Z modificados. ..	35
Figura 15 Actuador a utilizar. ....	40
Figura 16 Detalle de brazo de actuador.....	40
Figura 17 Chevrón a utilizar .....	41
Figura 18 Selección de material (Silicio). ....	42
Figura 19 Árbol de análisis de Workbench en silicio.....	43
Figura 20 Outline del Workbench. ....	43
Figura 21 Voltaje inicial.....	44
Figura 22 Voltaje final 1V. ....	44
Figura 23 Fixed support 1.....	45
Figura 24 Fixed supports 1, 2 y 3. ....	45
Figura 25 Fixed support 2.....	45
Figura 26 Condiciones iniciales de Temperatura y Voltaje, así como convección de temperatura, presentes en el actuador chevrón.....	46
Figura 27 Deformación total en chevrón de brazo Z modificado. ....	46
Figura 28 Esfuerzo equivalente en chevrón brazo Z modificado.....	47
Figura 29 Estrés máximo del chevrón.....	47
Figura 30 Fuerza de reacción en brazo z modificado.....	47
Figura 31 Resultados de la fuerza de reacción (simulación brazo z modificado). ....	48
Figura 32 Parámetros del material aluminio a utilizar.....	49
Figura 33 Árbol de análisis de Workbench. ....	49
Figura 34 Outline Workbench brazo z modificado aluminio. ....	50
Figura 35 Temperatura (Simulación) chevrón Z modificado, aluminio. ....	50
Figura 36 Deformación (Simulación) chevrón Z modificado, aluminio.....	51
Figura 37 Esfuerzo equivalente (Simulación) chevrón Z modificado, aluminio.....	51

Figura 38 Fuerza de reacción (Simulación) chevrón Z modificado, aluminio. ....	52
Figura 39 Resultados de Fuerza de reacción (Simulación) chevrón z modificado, aluminio. .	52
Figura 40 Interfaz del programa para el manejo de CNC.....	53
Figura 41 Inicio de fabricación de chevrón en aluminio. ....	53
Figura 42 Finalización de fabricación de chevrón en aluminio. ....	53
Figura 43 Chevrón fabricado en CNC. ....	54
Figura 44 Prueba 1- Cámara termográfica (brazos).....	55
Figura 45 Prueba2 - Cámara termográfica (flecha).....	55
Figura 46 Prueba 3- Cámara termográfica (brazos).....	55
Figura 47 Micropinza colocada en plataforma de experimentación. ....	55
Figura 48 Prueba 1 -Temperatura en los brazos modificados medido con termopar.....	56
Figura 49 Temperatura en la flecha medido con termopar.....	56
Figura 50 Temperatura en los brazos después de modificar, medido con termopar.....	56
Figura 51 Relación Temperatura-desplazamiento.....	57
Figura 52 Desplazamiento en la pinza (1). ....	57
Figura 53 Desplazamiento en la pinza (3). ....	58
Figura 54 Desplazamiento en la pinza (2). ....	58
Figura 55 Desplazamiento en la pinza (4). ....	58
Figura 56 Arreglo para análisis experimental de la fuerza.....	59
Figura 57 Valor inicial de la punta de la flecha. ....	60
Figura 58 Desplazamiento de la flecha con masa 1 . ....	60
Figura 59 Geometría micropinza (Elaboración propia).....	62
Figura 60 Árbol de análisis de Workbench. ....	63
Figura 61 Planos para el dibujo de la geometría de micropinza.....	63
Figura 62 Geometría (construcción con planos).....	63
Figura 63 Condiciones iniciales de la micropinza.....	64
Figura 64 Temperatura en la micropinza. Valor mayor es de 99.435°C, en un par de anclas.64	
Figura 65 Deformación total en la micropinza. Valor máximo de 6.9137 $\mu\text{m}$ , en las puntas de las flechas.....	64
Figura 66 Esfuerzo equivalente de von-Mises, en la micropinza. Valor mayor es de 150.26 MPa (valor menor al esfuerzo último). ....	64
Figura 67 Fuerza de reacción en la micropinza. Valor máximo en Y, 4 $\mu\text{N}$ . ....	64
Figura 68 Resultados de Fuerza de reacción (Simulación)Micropinza brazo Z modificado....	64
Figura 69 Árbol de análisis de Workbench. ....	65
Figura 70 Outline de la simulación.....	65
Figura 71 Temperatura micropinza, Temperatura máxima 44.61°C. ....	66
Figura 72 66 Esfuerzo equivalente de von-Mises, en la micropinza. Valor mayor es de 172.24 MPa (valor menor al esfuerzo último). ....	66
Figura 73a Deformación micropinza, aluminio, deformación máxima 2427 $\mu\text{m}$ (2.4 mm)....	66
Figura 74b Acercamiento e las puntas de la micropinza de aluminio, deformación máxima 2427 $\mu\text{m}$ (2.4 mm). ....	66

Figura 75 Fuerza de reacción en las puntas de las flechas en la micropinza. Valor máximo en el eje Y de 2.4 N. ....	67
Figura 76 Figura 68 Resultados de Fuerza de reacción en la micropinza brazo Z modificado. ....	67
Figura 77 Interfaz del programa para el manejo de CNC.....	67
Figura 78 Inicio de corte mediante CNC. ....	68
Figura 79 Micropinza fabricada en Aluminio. ....	68
Figura 80 Prueba 1 Cámara termográfica ....	69
Figura 81 Prueba 2 Cámara termográfica ....	69
Figura 82 Prueba 3 Cámara termográfica ....	69
Figura 83 Posición inicial en la micropinza ....	70
Figura 84 Desplazamiento final simultáneo de.....	70

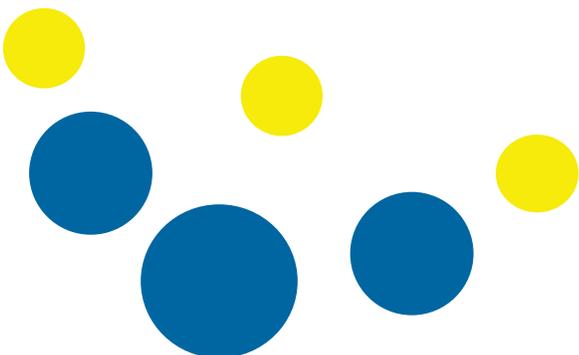
## Lista de Tablas

Tabla 1 Conocimientos necesarios para entender MEMS. ....	9
Tabla 2 Mecanismos comunes de micro accionamiento (Oliver, Korvink, & Paul, 2006). ....	19
Tabla 3 Descripción de los parámetros de diseño del actuador chevrón. ....	20
Tabla 4 Parámetros del Silicio, (Ghatkesar, y otros, 2007) (Reddy & Kumar, 2013) (Ansys Workbench Multiphysics, 2020) .....	29
Tabla 5 Características de la fibra óptica. ....	30
Tabla 6 Dimensiones del chevrón Z convencional. ....	38
Tabla 7 Resultados Desplazamiento actuador chevrón Z convencional. ....	39
Tabla 8 Rigidez actuador chevrón Z convencional. ....	39
Tabla 9 Fuerza actuador chevrón Z convencional. ....	39
Tabla 10 Dimensiones propuestas para actuador. ....	41
Tabla 11 Comparación de valores de parámetros de actuador Z convencional con actuador Z de brazos modificados. ....	48
Tabla 12 Resultados de pruebas realizadas con cámara termográfica. ....	55
Tabla 13 Resultados experimentales Fuerza (polea) .....	58
Tabla 14 Pruebas de temperatura con cámara termográfica y termopar del multímetro. ....	68
Tabla 15 Comparación de resultados numéricos y experimentales de la pinza escalada e implementada en Aluminio. ....	70



## **CAPÍTULO 1. INTRODUCCIÓN**

En el presente capítulo se describen los objetivos específicos y general, además de la justificación de este proyecto de investigación, agregando también la organización de cada uno de los capítulos de esta Tesis.



## 1.1 Introducción

En los Estados Unidos, esta tecnología se conoce como sistemas microelectromecánicos (MEMS); en Europa, se denomina tecnología de microsistemas (MST). Esta tecnología se compone de sistemas en miniatura o también llamadas estructuras micro maquinadas, sus dimensiones se encuentran en escalas que van de un milímetro a la milésima parte de un milímetro (micrómetros).

Los MEMS, también conocidos como microsistemas, son definidos típicamente como dispositivos microscópicos diseñados, fabricados, y utilizados para interactuar o producir cambios dentro de un ambiente controlado (Fujita H, 1996).

Con el descubrimiento del transistor y el gran avance en el desarrollo de los Circuitos Integrados, hoy en día los MEMS pertenecen a el pilar del desarrollo de las nuevas tecnologías de microsistemas.

Debido a las características que presentan estos novedosos dispositivos, se han estado reemplazando a los sistemas actuales o tradicionales de algunas aplicaciones con funciones mecánicas, eléctricas, magnéticas, térmicas, ópticas y otras en un mismo dispositivo.

Para la creación de los MEMS se usan herramientas, técnicas y materiales similares a las desarrolladas en los circuitos integrados; técnicas como la fotolitografía, moldeo por inyección, estampado, estereo litografía y galvanoplastia, en esta tecnología se permite el uso de diferentes materiales, de acuerdo con el tipo de dispositivo a crear, los materiales más comunes son el silicio, los polímeros y los metales (Ehrfeld W, 2000).

Gracias a la tecnología y el tamaño que presentan los MEMS se aplican en varias áreas útiles en nuestra vida diaria como: las impresoras de inyección de tinta, acelerómetros, giroscopios a microescala para aplicaciones aeroespaciales, sensores de presión, Sensores biomédicos, dispositivos para comunicaciones inalámbricas, micropinzas, sistemas de posicionamiento, instrumentos miniatura para análisis bioquímicos, **componentes para fibra óptica en telecomunicaciones**, entre muchas más (Garnica, 2021), (Bryzek, 1996).

## 1.2 Antecedentes

En los últimos años, se ha presentado un gran avance tecnológico por la manufactura de productos a microescala, se ha impulsado no solo en la fabricación, sino también en la manipulación, donde diminutos y precisos movimientos son los que hacen la diferencia.

Áreas como la electrónica, en la fabricación de semiconductores, la manipulación de obleas de diversos materiales, el ensamblado de circuitos integrados, requieren de este tipo de tecnología de precisión a escalas micro/nanométricas, se benefician de sistemas cada vez más eficientes que cumplan con estas características.

Otra área en la que los MEMS dan lugar a importantes mejoras es la cirugía mínimamente invasiva. Esto es posible gracias a los nuevos dispositivos e instrumentos miniaturizados, que incorporan microestructuras mecánicas, componentes microópticos y de fibra óptica, microsensores táctiles y de presión, etc. Los motores lineales para microcirugía controlan la posición de instrumentos quirúrgicos a muy pequeña escala (en el orden de la micra) mejorando los resultados de la mayoría de las técnicas quirúrgicas actuales (Maseeh, Swiecki, & Finch, 2000).

El principio de operación de estas micropinzas se basa fundamentalmente en fuentes de excitación electrostáticas, piezoeléctricas, electrotérmicas, ópticas o por memoria de forma (Jia, 2013).

Entre los materiales más utilizados para su fabricación están el Silicio (Si), el polímero SU-8, el Aluminio (Al), el Níquel (Ni), el Titanio (Ti), Arsenuro de Galio (GaAs), Nitruro de Silicio, entre otras (Chable P, 2019).

Una de las aplicaciones principales de los MEMS es la micromanipulación de objetos, utilizada en el ensamblado y montaje de microestructuras, al transportar o sujetar objetos mecánicos, electrónicos o biológicos con alta precisión y sin afectar su estructura o características principales, esto ha ocasionado la necesidad de crear novedosas pinzas de aplicaciones específicas.

### 1.3 Objetivo general

Diseñar una micropinza basada en un arreglo de actuadores chevrón para la manipulación de microalambres.

### 1.4 Objetivos particulares

- ✓ Diseñar y fabricar una micropinza basada en un arreglo de actuadores chevrón.
- ✓ Realizar el modelado matemático del desempeño electrotérmico correspondiente al actuador chevrón básico.
- ✓ Realizar el modelado eléctrico correspondiente al actuador chevrón de brazos Z modificados.

### 1.5 Justificación

La manipulación de precisión a escalas micrométricas para ciencias como la medicina o el ensamblado de microcomponentes hacen necesario el desarrollo de sistemas de micro/nano posicionamiento para lograr una implementación adecuada de la manipulación o sujeción, por ejemplo, en manipulación de fibra óptica adelgazada o microhilos de materiales polímeros; como estos hay muchos otros más campos de aplicación que se benefician del diseño de micropinzas, gracias a las ventajas que implican sus pequeñas dimensiones, tales como su alta precisión y resolución.

De acuerdo con lo anterior, se plantea el desarrollo de una novedosa micropinza electrotérmica basada en un arreglo de actuadores chevrón de brazos Z modificados. Esta pinza muestra mayor flexibilidad y fuerza, que en el caso en el que se utilizan actuadores de brazo uniforme y Z convencional.

En la revisión bibliográfica no se halló un modelo de micromanipulación de microalambres que haya hecho uso de actuadores tipo chevrón de brazos Z modificados, esto propondría un sistema novedoso, específicamente como elemento de sujeción.

## 1.6 Preguntas de investigación

1. ¿Por qué usar MEMS para micropinzas?
2. ¿Es posible diseñar e implementar MEMS como aplicaciones emergentes para componentes de fibra óptica (sujeción)?
3. ¿Qué beneficio se tendría al implementarlos?
4. ¿Cuáles son las limitaciones que se pueden tener?
5. ¿Qué se debe considerar al diseñar MEMS para esta aplicación?

## 1.7 Hipótesis

Con un arreglo de 4 actuadores chevrón electrotérmicos con brazos Z modificados y con la implementación de una flecha alargada con una terminación en forma similar a un arco en cada uno de ellos, es posible diseñar una micropinza de 4 brazos para la sujeción de microalambres, tales como fibras ópticas, de acuerdo con las dimensiones y características de estos objetivos de sujeción.

## 1.8 Alcance

En esta tesis se llevará a cabo el diseño y la simulación de la micropinza implementada en Silicio.

Además, para validar al diseño en escala meso, se implementará al diseño en Aluminio genérico, con un factor de escalamiento de 100, el cual será fabricado en una CNC, para posteriormente, realizar las pruebas experimentales pertinentes.

## 1.9 Limitaciones

- Se requiere un conocimiento profundo en el software ANSYS™ Workbench, lo que implica dedicación para el desarrollo del proyecto.
- Se requiere acceso al software con licencia de manera portátil para realizar avances significativos en periodos donde es imposible estar en el laboratorio donde si se cuenta con licencia del software ANSYS™ Workbench.
- Es importante considerar el esfuerzo máximo del material para evitar que los brazos del actuador se fracturen o se rompan.
- Se requiere distintos análisis y diseños experimentales para llegar a la forma y dimensiones correctas del actuador a utilizar, lo que conlleva tiempo de investigación y diseño.
- La fabricación a nivel micrométrico requiere de un alto costo de inversión, por lo que se prevé solo la simulación y corte en Aluminio para su validación experimental.
- La distribución de corriente proporcionada por el equipo con el que se cuenta en el arreglo de la micropinza en aluminio no es suficiente, por lo que se debe sustentar las pruebas con un solo chevrón. De ser posible se realizarán pruebas con el arreglo de 4 chevrones.

## 1.10 Organización de la tesis

La presente tesis está organizada en 6 capítulos, conformada en la siguiente distribución:

Capítulo 1. Este capítulo se encuentra la introducción, antecedentes, objetivo general, objetivos particulares, justificación, preguntas de investigación, hipótesis y limitaciones de este trabajo de investigación.

Capítulo 2. En este capítulo se da una breve introducción sobre los MEMS, ventajas, materiales de fabricación, entre otros conceptos. Se describen los tipos de microactuadores, geometrías y partes que conforman a la micropinza.

Capítulo 3. Se establece la metodología seguida para el diseño de la micropinza.

Capítulo 4. Se presentan el diseño y la simulación del chevrón, con apoyo del software ANSYS™. Se lleva a cabo, la comparación entre los resultados teóricos y los resultados de la simulación.

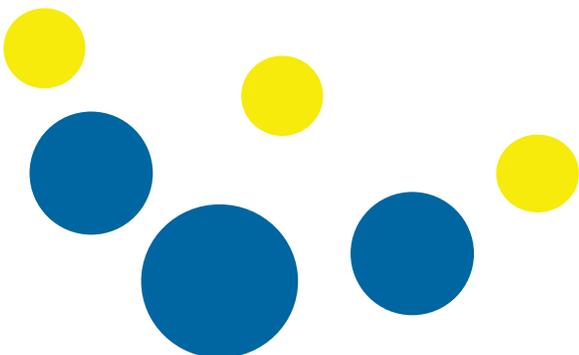
Capítulo 5. Se presenta el diseño completo y la simulación de la micropinza, con Silicio como material estructural. Se lleva a cabo, además, la comparación entre los resultados teóricos, los resultados de la simulación y las pruebas realizadas en el escalamiento en el material Aluminio 60-63.

Capítulo 6. Se presentan las conclusiones y el trabajo futuro.



## **CAPÍTULO 2. MARCO TEÓRICO**

En el presente capítulo se presenta el marco teórico de este proyecto, con el fin de sustentar la factibilidad de este proyecto.



## 2.1 ¿Qué son los MEMS?

Los sistemas microelectromecánicos (microelectromechanical systems, MEMS) forman un conjunto de tecnologías que permiten el diseño y construcción de dispositivos miniatura para solucionar problemas específicos. Los MEMS hacen uso de las tecnologías de microfabricación para generar estructuras en escalas que van de un milímetro a la milésima parte de un milímetro (micrómetro) (Choreño, 2022).

Podemos considerar a los MEMS conjunto de tecnologías novedosas, diversas y ajustables a cualquier tipo de aplicación o solución de problema específico, estas características las podemos observar en su proceso de diseño y manufactura, estos dispositivos, se componen de pequeños sistemas los cuales involucran a dispositivos mecánicos o componentes eléctricos, estos requieren del conocimiento de diversas áreas. En la Tabla 1 se muestran agrupados algunos de los conocimientos necesarios para entender y desarrollar MEMS (LEE, 2011).

*Tabla 1 Conocimientos necesarios para entender MEMS.*

<b>MEMS</b>	<b>Derivados</b>
<ul style="list-style-type: none"><li>• Ingeniería mecánica: Estática, dinámica, vibración mecánica, dinámica de fluidos, transferencia de calor, etc.</li></ul>	MOEMS: Optica+MEMS
<ul style="list-style-type: none"><li>• Ingeniería Eléctrica: Electromagnetismo, teoría de circuitos, microfabricación, etc.</li></ul>	BioMEMS: Biotecnología+MEMS
<ul style="list-style-type: none"><li>• Física: Óptica, mecánica cuántica, etc.</li></ul>	NEMS: Nano escala + MEMS

<ul style="list-style-type: none"> <li>• Química: bioquímica, química orgánica, etc.</li> <li>• Matemáticas: Ecuaciones diferenciales, transformada de Laplace, matrices, cálculo, análisis numérico, etc.</li> </ul>	<p>RF MEMS: Aplicaciones de radiofrecuencia</p>
---	---

Los microsistemas se pueden categorizar en seis distintos tipos: (Fujita, 1998)

- Sensores: Son dispositivos MEMS diseñados para medir cambios e interactuar con el ambiente. Estos microsistemas incluyen sensores químicos, de movimiento, inerciales, térmicos y ópticos.
- Actuadores: Son un grupo de dispositivos diseñados para proporcionar un estímulo a otros componentes o dispositivos MEMS. En los microsistemas los actuadores son operados electrostática o térmicamente.
- MEMS RF: Son una clase de dispositivos usados para transmitir alta frecuencia, señales de radio frecuencia. Los dispositivos típicos incluyen: interruptores (switches), capacitores, antenas, etc.
- MEMS ópticos o MOEMS (Micro-Opto-Electro-Mechanical Systems): Son dispositivos diseñados para dirigir, reflejar, filtrar, y/o amplificar la luz. Estos componentes incluyen interruptores ópticos y reflectores.
- MEMS para microfluidos: Son dispositivos diseñados para interactuar con fluidos. Dispositivos como bombas y válvulas se han diseñado para trabajar con pequeños volúmenes de fluido.
- BioMEMS: Son dispositivos que, como muchos de los MEMS para microfluidos, son diseñados para interactuar específicamente con muestras biológicas. Dispositivos como éstos son diseñados para interactuar con proteínas, células biológicas, reactivos médicos, etc. y pueden usarse para suministrar medicamentos u otro análisis médico en sitio.

Todas estas áreas son aplicaciones diferentes de los MEMS que se encuentran en desarrollo con fin comercial o de investigación, los últimos años han sido testigos de

una creciente madurez de la industria MEMS y una rápida introducción de nuevos productos que agrupan aplicaciones que van desde el análisis bioquímico hasta las telecomunicaciones de fibra óptica.

En el futuro, MEMS promete hacer contribuciones a la sociedad del siglo XXI en tres grandes áreas:

- 1) Ofrecer un acceso más fácil a la información
- 2) Hacer que los estilos de vida humanos sean más compatibles con el medio ambiente
- 3) Mejorar el bienestar social de las personas (Fujita, 1998).

## 2.2 Ventajas de los MEMS

Los MEMS poseen una serie de ventajas frente a los sistemas de mayor tamaño, entre las cuales se encuentran: (Fujita, 1998) (Janson, 2000)

- Posibilidad de fabricación masiva con bajo costo.
- Componentes más finos y delicados.
- Tamaño y peso reducido.
- Consumo de energía reducido.
- Alta precisión y biocompatibilidad.
- Partes mecánicas precisamente diseñadas, las cuales serán más eficientes y durables.
- Micromateriales con propiedades que les permitan ser más fuertes y ligeros.
- Desarrollo de componentes electrónicos más rápidos, de mayor potencia y funcionalidad.
- Sistemas mecánicos y ópticos más rápidos y complejos. Mayor número de partes, mayor funcionalidad.
- Nuevos dispositivos Optoelectrónicos sobre la base de principios cuánticos.

- Aprovechamiento de reacciones químicas resultantes de "nuevas propiedades" como reducir las dimensiones de trabajo (exposición de mayor número de electrones disponibles para la reacción).

Dichas ventajas han favorecido la introducción de los MEMS en un gran número de aplicaciones y mercados (Fujita H, 1996).

Existe la presencia de los MEMS en diversos mercados y sectores como el medioambiental, domótica, electrodomésticos o máquina-herramienta, contando con muchas aplicaciones como micromotores, sensores de presión, giróscopos, micro espectrómetros, y muchos otros. Las crecientes inversiones en las actividades de investigación y desarrollo y los crecientes avances tecnológicos en el mercado Actuadores MEMS, aumentan el crecimiento del mercado (TDK InvenSense, 2021).

### 2.3 Materiales para fabricación de MEMS

Los grandes avances en el campo de los semiconductores han abierto las puertas a tecnologías como los MEMS, estos elementos pueden fabricarse en materiales diferentes, aunque los más destacados son:

#### **Silicio:**

Es un material que se suele usar para los dispositivos MEMS que también tienen partes electrónicas o usado dentro de la industria de circuitos integrados microelectrónicos, ya que es un material semiconductor.

Presenta ventajas como:

- Propiedades eléctricas entendidas y controlables
- Alta calidad, bajo costo
- Disponibilidad de las herramientas de diseño existentes
- Económico para producir sustratos monocristalinos
- El silicio en sí existe en tres formas: cristalino, amorfo y policristalino, (polisilicio).

**Polímeros:**

Este tipo de materiales ha dado la oportunidad a opciones de fabricación alternativas y potencialmente más rentables para producir estructuras flexibles con propiedades destacables.

A diferencia del silicio los materiales polímeros se pueden moldear o fotomoldear, eliminando la necesidad de complicados pasos de grabado y enmascaramiento litográfico.

Estos polímeros se pueden producir a grandes volúmenes con una gran variedad de materiales. Por otro lado, otras ventajas de los polímeros es que se pueden crear MEMS para aplicaciones microfluídicas

Presentan un conjunto de propiedades que no están comúnmente presentes en los materiales tradicionales para la microfabricación.

**Metales:**

En los MEMS se puede usar metal para fabricar elementos o interconexiones. Los metales tienen propiedades mecánicas mejores que las del silicio y se caracterizan por ser más fiables.

Algunos de los metales utilizados en los sistemas MEMS incluyen oro, níquel, aluminio, cobre, cromo, titanio, tungsteno, platino y plata, y los métodos elegidos para crear estos dispositivos suelen ser la galvanoplastia, la evaporación y la pulverización catódica, la tecnología MEMS ha superado sus orígenes en la industria de semiconductores al incluir otras técnicas de fabricación, como el micromecanizado de silicio superficial, micro mecanizado de silicio en volumen, fotolitografía, deposición y moldeo de plástico (LIGA), y maquinado por electro descarga. Algunas de las aplicaciones emergentes y futuras incluyen sensores de presión para neumáticos, dispositivos para RF y comunicaciones inalámbricas, componentes para fibra óptica, dispositivos de manejo y procesamiento fluidos para microanálisis químico, diagnósticos médicos y suministro automático de medicamentos (Ehrfeld W, 2000).

## 2.4 Tipos de actuación

Un microactuador es un dispositivo que convierte alguna forma de energía (energía eléctrica, mecánica, térmica, magnética, química y radiante), en forma mecánica.

Estos microactuadores generan fuerzas de propulsión o desplazamientos para diversos tipos de aplicaciones en microsistemas. Los microactuadores, han sido desarrollados en una amplia variedad de formas y su funcionamiento se basa en diversos efectos físicos (Quiñones N, 2009).

Dentro de los MEMS podemos encontrar varias tecnologías de microactuadores, a continuación, se presenta una breve explicación de las formas más comunes de operación.

### Actuación electrostática

En este tipo de MEMS su funcionamiento es mediante la atracción electrostática de placas cargadas de polaridad opuesta, utilizando fundamentalmente la Ley de atracción de Coulomb, es posible accionar el dispositivo.

### Actuación electrotérmica

El accionamiento electrotérmico se basa en un equilibrio entre la energía térmica generada por una corriente eléctrica y la disipación de calor a través del entorno o el sustrato. Se puede acceder al enfriamiento por la conducción al sustrato, así como por convección al aire (o líquido) circundante.

En la Figura 1 se observa un ejemplo de actuador electrotérmico (Ehrfeld W, 2000).

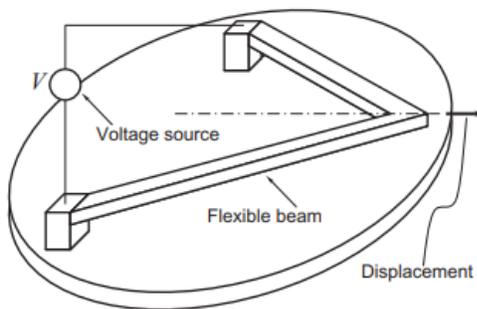


Figura 1 Actuador electrotérmico. Fuente (Ehrfeld W, 2000).

## 2.5 Micropinzas

Las Micropinzas son una importante herramienta dedicada a tareas de micromanipulación, y por lo general se emplean para ejecutar una operación de agarre de micro objetos (Xu, 2015).

En los actuadores comunes, se encuentran las micropinzas. Estas son utilizadas en diferentes áreas, como, por ejemplo:

- Industria automotriz
- Rehabilitación
- Sector salud
- Aeroespacial
- Micromanipulación
- Micro ensamblaje
- Biología
- Ciencia de materiales
- Tecnologías de la información
- Ingeniería de tejidos
- Aplicaciones que necesitan movimiento de ultra alta precisión
- Agarrar y liberar muestras biológicas.

Las pinzas MEMS tienen algunos requisitos, como una fuerza motriz suficientemente grande y contar con gran desplazamiento. En general, los enfoques de actuación se clasifican principalmente en cuatro clases en términos de actuador electrostático, actuador electromagnético, actuador piezoeléctrico, y actuador electrotérmico (Yang & Qingsong, 2016).

Hay dos técnicas principales utilizadas para la micromanipulación conocidas como métodos de contacto y sin contacto, ejemplos de estas tecnologías son los campos electromagnéticos, los materiales piezoeléctricos, las fuerzas electrostáticas, el efecto electrotérmico, las aleaciones con memoria de forma, los sistemas de guía magnética y las tecnologías ópticas. Estas tecnologías se pueden utilizar en forma de sondas, agujas, pinzas y dispositivos sin contacto. Todos estos métodos tienen varias ventajas y desventajas, mientras que todos se encuentran en diferentes etapas de desarrollo continuo dentro de la comunidad de investigación ( NikoobinM. & Hassani, 2012).

Hasta ahora, los investigadores han fabricado numerosas micropinzas con diferentes especificaciones y capacidades. En la Figura 2 se muestran algunas micropinzas que

se han desarrollado por diferentes investigadores, cada una con aplicaciones y características diferentes, algunas por actuadores electrostáticos, otras con actuadores electromagnéticos, compuestas por sensores, accionadas mecánicamente para la manipulación de micro y nanopartículas, otras basadas en elementos flexibles utilizando alambres de aleación con memoria de forma (SMA).

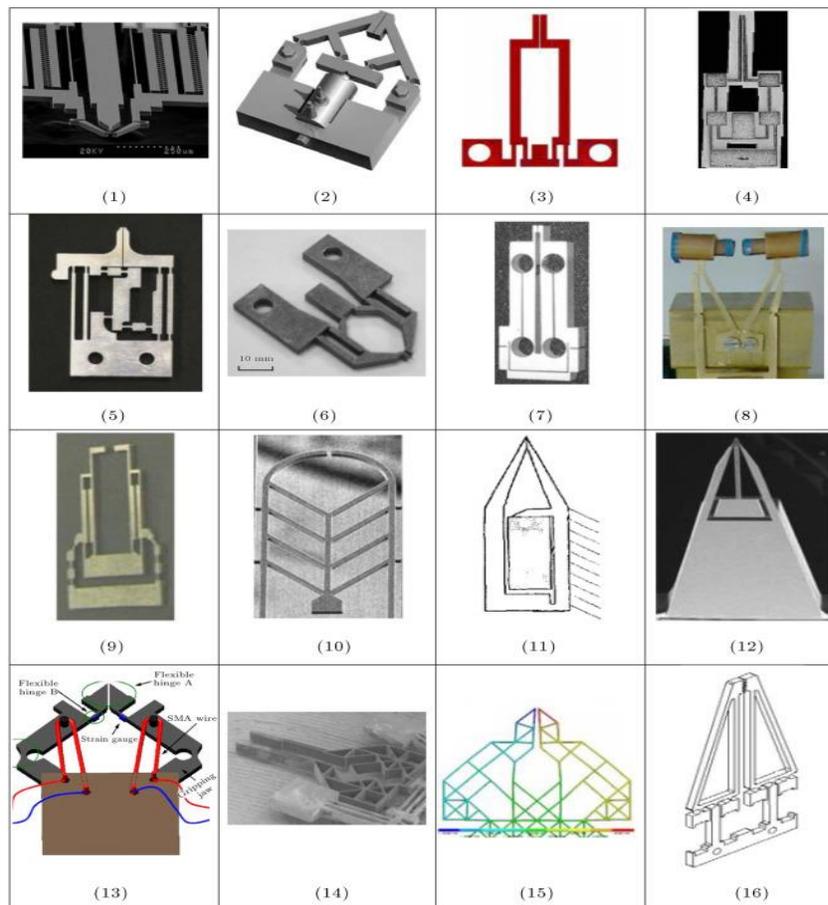


Figura 2 Ejemplos de micropinzas. Fuente ( NikoobinM. & Hassani, 2012)

Con respecto a los materiales utilizados para fabricar las micropinzas, se ha afirmado que el silicio, el acero inoxidable y las aleaciones de aluminio de alta calidad son opciones comunes para las micropinzas accionadas electrotérmica mente ( NikoobinM. & Hassani, 2012).

La forma de las puntas es un factor importante. En la Figura 3 se muestran algunas puntas comunes de las pinzas. Muchas micropinzas se han fabricado con puntas de

superficie plana, que pueden utilizarse en la manipulación de objetos uniformes y de formas irregulares.

El diseño de las puntas con formas especiales para una aplicación específica hace que la manipulación sea más fácil de lo habitual.

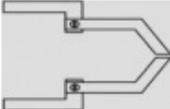
Puntas de agarre	Diagrama de muestra	Descripción
Puntas de superficie plana		Agarre de formas uniformes e irregulares
Puntas de superficie rugosa		Reducción del deslizamiento y la fuerza de Van Der Waals
Forma especial para aplicaciones especiales		Manipulación celular
		Manipulación de alambre de teflón
Puntas cambiables		Agarre de diferentes tamaños, formas y materiales.

Figura 3 Tipos de puntas de agarre en micropinzas. Fuente ( NikoobinM. & Hassani, 2012).

La creación de las micropinzas surge de la necesidad de sujetar micro objetos con delicadeza sin dañarlos o deformarlos.

## 2.6 Efecto Joule

El Efecto Electrotérmico Joule consiste en hacer circular una corriente eléctrica a través de un material isotérmico, generando calor. Este efecto ocurre en cualquier conductor eléctrico al que se le aplique una diferencia de potencial. Los electrones del material son impulsados por el campo eléctrico a lo largo de la estructura. Parte de la energía cinética de los electrones se convierte en calor al colisionar con los átomos/moléculas del material. Estas colisiones ocasionan vibraciones en la estructura,

que se manifiestan en un incremento de la temperatura, y en una expansión del volumen del material (Alanís Navarro, 2008.)

La Figura 4 ilustra este efecto (Quiñones N, 2009); matemáticamente se define de la siguiente manera: “La cantidad de energía calorífica  $Q_c$ , producida por una corriente eléctrica, depende directamente del cuadrado de la intensidad de la corriente, del tiempo que ésta circula y de la resistencia eléctrica del material”.

$$Q_c = I^2 R t \quad \text{Ecuación 1. 1}$$

donde:

- $Q_c$  es la energía calorífica producida por el corriente dado en [ $W \cdot s$ ]
- $I$  la intensidad de corriente que circula dada en Amperes [A]
- $R$  la resistencia eléctrica del conductor [ $\Omega$ ]
- $t$  tiempo [s]

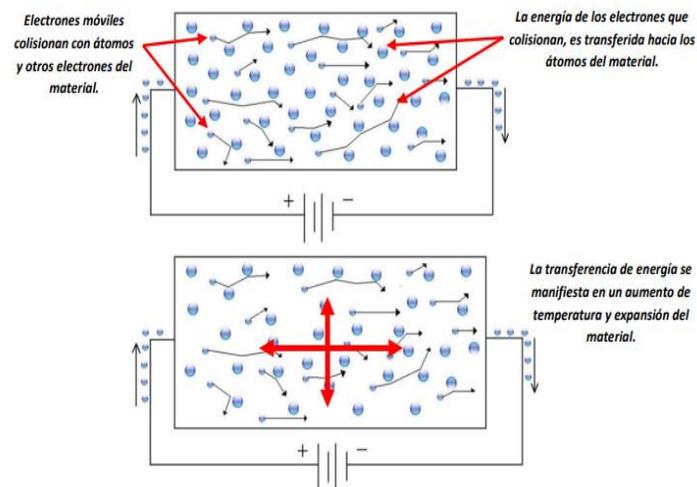


Figura 4 Efecto Joule, Fuente (Quiñones N, 2009).

## 2.7 Tipos de actuación

En las micropinzas con actuación electrotérmica, por efecto Joule se presenta la expansión térmica de los brazos de sujeción en presencia de corriente eléctrica. Las micropinzas electrotérmicas tienen muchas ventajas, tales como una amplia deformación, intensa fuerza de sujeción, bajo voltaje de operación y estructura compacta.

Las limitaciones de los actuadores electrotérmicos están relacionadas con la alta temperatura en la región cercana a los objetivos de sujeción, por lo que deben usarse brazos de sujeción largos que disipen el calor producido por los actuadores (Somà & Lamoni, 2014) entre otras estrategias que han sido empleadas. En la literatura pueden encontrarse varios ejemplos de micropinzas actuadas mediante actuadores chevrón.

Los mecanismos de actuación destacados utilizados en MEMS se enumeran en la Tabla 2.1 donde cada uno de ellos tiene sus propias ventajas, desventajas y conjunto apropiado de aplicaciones (Oliver, Korvink, & Paul, 2006).

Tabla 2 Mecanismos comunes de micro accionamiento (Oliver, Korvink, & Paul, 2006).

Entrada	Salida mecánica
<p>Eléctrica</p> <p>Magnética</p> <p>Mecánica</p> <p>Térmica</p> <p>Química</p>	Electrostática
	Piezoeléctrica
	Magnetostática
	Neumática
	Hidráulica
	Expansión
	Efecto de memoria de forma
	Cambio de fase
	Combustión

## 2.8 Actuadores chevrón

Los actuadores Chevrón, también llamados actuadores térmicos con brazos-V, o actuadores de viga flexionada, se encuentran entre los actuadores MEMS más conocidos.

El actuador en forma de Z a diferencia del anterior facilita la fabricación y diseño debido a que no presenta las vigas inclinadas.

La Figura 5 muestra el esquema de los actuadores electrotérmicos en forma de V, mientras que en la Figura 6, observamos el esquema de un actuador en forma de Z

convencional, finalmente en la Figura 7 se encuentra el esquema de un actuador electrotrmico con una variación en el grosor en forma de Z.

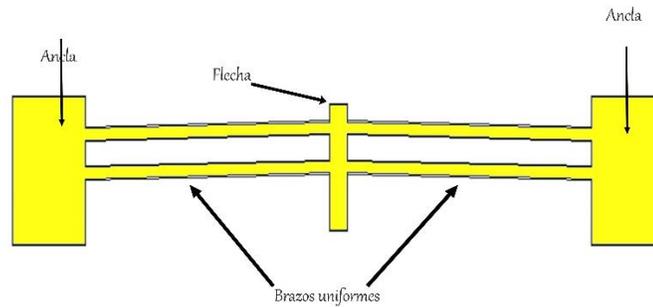


Figura 5 Actuador electrotrmico en forma de V con dos brazos.

En la Tabla 3, se muestran los parámetros básicos de los actuadores V de brazo uniforme.

Tabla 3 Descripción de los parámetros de diseño del actuador chevrón.

Variable	Descripción
$L_b$	Largo del brazo
$W_b$	Ancho del brazo
$T_b$	Grosor del brazo
$W_f$	Ancho de la flecha
$L_f$	Largo de la flecha
$\theta$	Angulo de inclinación

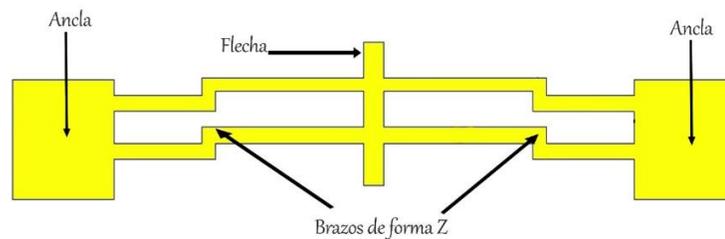


Figura 6 Actuador electrotrmico en forma de Z convencional con dos brazos. Adaptada de (Guan & Zhu, 2010).

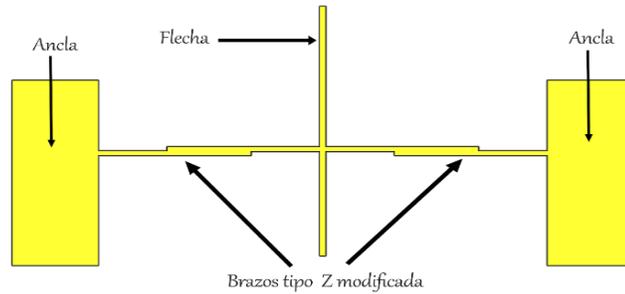


Figura 7 Actuador electrotr mico en forma de Z modificada con un brazo. Adaptada de (Guan & Zhu, 2010).

Un actuador chevrón consiste básicamente de un arreglo de pares de brazos, anclados en sus extremos exteriores, con un ángulo inicial predefinido ( $\theta$ ), y una flecha, también llamada haz central, masa de prueba o vástago movable, la cual permite el acoplamiento de los brazos.

El actuador se calienta por el Efecto de Joule, debido al paso de corriente a través de la estructura, generada al aplicar una diferencia de potencial en los contactos anclados al sustrato (anclas).

Cuando los brazos se calientan, se expanden y tienden a deformarse para generar un movimiento lineal uniforme en la flecha. El  ngulo predefinido de los brazos direcciona al movimiento de la flecha. Al  ngulo predefinido, también se le conoce como ángulo inicial, de inclinación o de apertura.

## 2.9 Modelado del chevrón Z, con base en la temperatura

Para un chevrón con brazos de forma Z, el desplazamiento en la flecha se puede obtener de (Guan & Zhu, 2010).

$$U_y = \frac{12\alpha \Delta T L_{b1}^3}{w_1^2 + 6L_{b1}(w_1 + \frac{w^2}{3w_1})}$$

Ecuación 1. 2

donde:

- $U_y$  es el desplazamiento en la dirección Y

- $\alpha$  es el coeficiente de expansión térmica
- $\Delta T$  es la diferencia de temperatura
- $Lb1$ , longitud de la viga del brazo largo
- $w1$  es la longitud de la viga central
- $w$  es el ancho de la viga en todas las secciones

La fuerza de salida se da por el producto del desplazamiento y la rigidez, como se establece en la Ecuación 1.3.

$$f = kU$$

*Ecuación 1. 3*

La ecuación (1.3) se puede generalizar considerando n brazos:

$$f = nkU$$

*Ecuación 1. 4*

Para mantener una geometría simétrica en todo el brazo, el ancho lateral del brazo, en los extremos opuestos de la forma de Z, se puede considerar:

$$wZ - \text{modificado} = 2 wZ - \text{original}$$

*Ecuación 1. 5*

donde:

- $wZ - \text{modificado}$  corresponde al ancho de la forma de Z ampliado.
- $wZ - \text{original}$  corresponde al ancho de la forma de Z original.

La constante de rigidez  $k$  se da por la Ecuación (1.6) (Guan & Zhu, 2010)

$$k = \frac{Ew^3t_h(l^3 + 2Lw^2 + 6Ll^2)}{(8L^3l^3 + w^2l^4 + 16w^2L^4 + 2w^4Ll + 12L^4l^2 + 6w^2Ll^3)}$$

*Ecuación 1. 6*

donde:

- $E$  es el módulo de Young
- $t_h$  es el grosor de la viga.

Los actuadores térmicos en forma de V no pueden lograr grandes movimientos (típicamente hasta unos pocos  $\mu\text{m}$ ) pero puede generar fácilmente una fuerza grande (del orden de mN).

## 2.10 Modelado eléctrico del actuador Z y Z modificado

Para realizar el análisis eléctrico se busca hallar la resistencia equivalente, para el actuador chevrón con brazo modificado de 8 pares de brazos. La resistencia equivalente se obtiene para posteriormente comparar los resultados con las pruebas realizadas.

Para realizar los cálculos correspondientes, se consideran los cálculos de acuerdo con el procedimiento de simplificación, empleando los equivalentes de resistencias en serie y en paralelo, indicados en las Figuras 8-11:

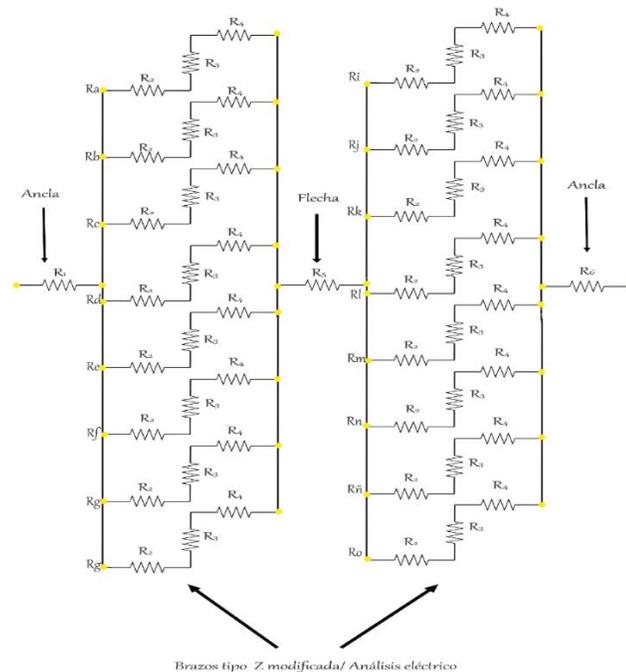


Figura 8 Circuito eléctrico equivalente (Analogía eléctrica).

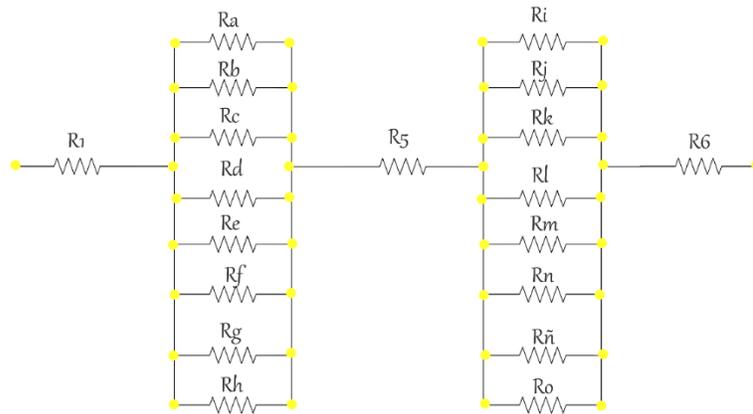


Figura 9 analogía eléctrica equivalente



Figura 10 Analogía resistencias equivalentes serie



Figura 11 Resistencia total del actuador

Como paso inicial tomaremos para cada brazo una resistencia equivalente, conformada por la suma de las resistencias que se encuentran dentro de cada una de ellas y obtenemos las siguientes expresiones:

$$\begin{aligned}
 Ra &= R_2 + R_3 + R_4 \\
 Rb &= R_2 + R_3 + R_4 \\
 Rc &= R_2 + R_3 + R_4 \\
 Rd &= R_2 + R_3 + R_4 \\
 Re &= R_2 + R_3 + R_4 \\
 Rf &= R_2 + R_3 + R_4 \\
 Rg &= R_2 + R_3 + R_4 \\
 Rh &= R_2 + R_3 + R_4
 \end{aligned}$$

Ecuación 1. 7

Ahora para cada resistencia individual ( $R1, R2, R3, R4$ ) se realizan las substituciones correspondientes, obteniéndose:

$$\begin{aligned}
 R1 &= \rho \frac{l_1}{A} & Rh &= \rho \frac{l_2}{A} + \rho \frac{l_3}{A} + \rho \frac{l_4}{A} \\
 R5 &= \rho \frac{l_5}{A} & Ri &= \rho \frac{l_2}{A} + \rho \frac{l_3}{A} + \rho \frac{l_4}{A} \\
 R6 &= \rho \frac{l_6}{A} & Rj &= \rho \frac{l_2}{A} + \rho \frac{l_3}{A} + \rho \frac{l_4}{A} \\
 Ra &= \rho \frac{l_2}{A} + \rho \frac{l_3}{A} + \rho \frac{l_4}{A} & Rk &= \rho \frac{l_2}{A} + \rho \frac{l_3}{A} + \rho \frac{l_4}{A} \\
 Rb &= \rho \frac{l_2}{A} + \rho \frac{l_3}{A} + \rho \frac{l_4}{A} & Rl &= \rho \frac{l_2}{A} + \rho \frac{l_3}{A} + \rho \frac{l_4}{A} \\
 Rc &= \rho \frac{l_2}{A} + \rho \frac{l_3}{A} + \rho \frac{l_4}{A} & Rm &= \rho \frac{l_2}{A} + \rho \frac{l_3}{A} + \rho \frac{l_4}{A} \\
 Rd &= \rho \frac{l_2}{A} + \rho \frac{l_3}{A} + \rho \frac{l_4}{A} & Rn &= \rho \frac{l_2}{A} + \rho \frac{l_3}{A} + \rho \frac{l_4}{A} \\
 Re &= \rho \frac{l_2}{A} + \rho \frac{l_3}{A} + \rho \frac{l_4}{A} & R\tilde{n} &= \rho \frac{l_2}{A} + \rho \frac{l_3}{A} + \rho \frac{l_4}{A} \\
 Rf &= \rho \frac{l_2}{A} + \rho \frac{l_3}{A} + \rho \frac{l_4}{A} & Ro &= \rho \frac{l_2}{A} + \rho \frac{l_3}{A} + \rho \frac{l_4}{A} \\
 Rg &= \rho \frac{l_2}{A} + \rho \frac{l_3}{A} + \rho \frac{l_4}{A}
 \end{aligned}$$

*Ecuación 1. 8*

Posteriormente se sustituye A por la siguiente expresi3n y se cambia en las expresiones anteriores.

$$A = wt$$

$$\begin{aligned}
 R1 &= \rho \frac{l_1}{wt} & Ra &= \rho \frac{l_2}{w_2t} + \rho \frac{l_3}{w_3t} + \rho \frac{l_4}{w_4} \\
 R5 &= \rho \frac{l_5}{wt} & Rb &= \rho \frac{l_2}{w_2t} + \rho \frac{l_3}{w_3t} + \rho \frac{l_4}{w_4} \\
 R6 &= \rho \frac{l_6}{wt} & Rc &= \rho \frac{l_2}{w_2t} + \rho \frac{l_3}{w_3t} + \rho \frac{l_4}{w_4} \\
 & & Rd &= \rho \frac{l_2}{w_2t} + \rho \frac{l_3}{w_3t} + \rho \frac{l_4}{w_4t}
 \end{aligned}$$

$$Re = \rho \frac{l_2}{w_2 t} + \rho \frac{l_3}{w_3 t} + \rho \frac{l_4}{w_4 t}$$

$$Rf = \rho \frac{l_2}{w_2 t} + \rho \frac{l_3}{w_3 t} + \rho \frac{l_4}{w_4 t}$$

$$Rg = \rho \frac{l_2}{w_2 t} + \rho \frac{l_3}{w_3 t} + \rho \frac{l_4}{w_4 t}$$

$$Rh = \rho \frac{l_2}{w_2 t} + \rho \frac{l_3}{w_3 t} + \rho \frac{l_4}{w_4 t}$$

$$Ri = \rho \frac{l_2}{w_2 t} + \rho \frac{l_3}{w_3 t} + \rho \frac{l_4}{w_4 t}$$

$$Rj = \rho \frac{l_2}{w_2 t} + \rho \frac{l_3}{w_3 t} + \rho \frac{l_4}{w_4 t}$$

$$Rk = \rho \frac{l_2}{w_2 t} + \rho \frac{l_3}{w_3 t} + \rho \frac{l_4}{w_4 t}$$

$$Rl = \rho \frac{l_2}{w_2 t} + \rho \frac{l_3}{w_3 t} + \rho \frac{l_4}{w_4 t}$$

$$Rm = \rho \frac{l_2}{w_2 t} + \rho \frac{l_3}{w_3 t} + \rho \frac{l_4}{w_4 t}$$

$$Rn = \rho \frac{l_2}{w_2 t} + \rho \frac{l_3}{w_3 t} + \rho \frac{l_4}{w_4 t}$$

$$R\tilde{n} = \rho \frac{l_2}{w_2 t} + \rho \frac{l_3}{w_3 t} + \rho \frac{l_4}{w_4 t}$$

$$Ro = \rho \frac{l_2}{w_2 t} + \rho \frac{l_3}{w_3 t} + \rho \frac{l_4}{w_4 t}$$

Ecuación 1. 9

A continuación, se simplifican cada una de las expresiones para obtener ecuaciones más simples:

$$Ra = \frac{\rho}{t} \left[ \frac{l_2}{w_2} + \frac{l_3}{w_3} + \frac{l_4}{w_4} \right]$$

$$Rb = \frac{\rho}{t} \left[ \frac{l_2}{w_2} + \frac{l_3}{w_3} + \frac{l_4}{w_4} \right]$$

$$Rc = \frac{\rho}{t} \left[ \frac{l_2}{w_2} + \frac{l_3}{w_3} + \frac{l_4}{w_4} \right]$$

$$Rd = \frac{\rho}{t} \left[ \frac{l_2}{w_2} + \frac{l_3}{w_3} + \frac{l_4}{w_4} \right]$$

$$Re = \frac{\rho}{t} \left[ \frac{l_2}{w_2} + \frac{l_3}{w_3} + \frac{l_4}{w_4} \right]$$

$$Rf = \frac{\rho}{t} \left[ \frac{l_2}{w_2} + \frac{l_3}{w_3} + \frac{l_4}{w_4} \right]$$

$$Rg = \frac{\rho}{t} \left[ \frac{l_2}{w_2} + \frac{l_3}{w_3} + \frac{l_4}{w_4} \right]$$

$$Rh = \frac{\rho}{t} \left[ \frac{l_2}{w_2} + \frac{l_3}{w_3} + \frac{l_4}{w_4} \right]$$

$$Ri = \frac{\rho}{t} \left[ \frac{l_2}{w_2} + \frac{l_3}{w_3} + \frac{l_4}{w_4} \right]$$

$$Rj = \frac{\rho}{t} \left[ \frac{l_2}{w_2} + \frac{l_3}{w_3} + \frac{l_4}{w_4} \right]$$

$$Rk = \frac{\rho}{t} \left[ \frac{l_2}{w_2} + \frac{l_3}{w_3} + \frac{l_4}{w_4} \right]$$

$$Rl = \frac{\rho}{t} \left[ \frac{l_2}{w_2} + \frac{l_3}{w_3} + \frac{l_4}{w_4} \right]$$

$$Rm = \frac{\rho}{t} \left[ \frac{l_2}{w_2} + \frac{l_3}{w_3} + \frac{l_4}{w_4} \right]$$

$$Rn = \frac{\rho}{t} \left[ \frac{l_2}{w_2} + \frac{l_3}{w_3} + \frac{l_4}{w_4} \right]$$

$$Ro = \frac{\rho}{t} \left[ \frac{l_2}{w_2} + \frac{l_3}{w_3} + \frac{l_4}{w_4} \right]$$

Ecuación 1. 10

Como el conjunto de resistencias  $Ra$ ,  $Rb$ ,  $Rc$ ,  $Rd$ ,  $Re$ ,  $Rf$ ,  $Rg$ ,  $Rh$  están conectadas en paralelo se pueden expresar de la siguiente forma:

$$Req1 = \frac{1}{\frac{1}{Ra} + \frac{1}{Rb} + \frac{1}{Rc} + \frac{1}{Rd} + \frac{1}{Re} + \frac{1}{Rf} + \frac{1}{Rg} + \frac{1}{Rh}}$$

$$Req2 = \frac{1}{\frac{1}{Ri} + \frac{1}{Rj} + \frac{1}{Rk} + \frac{1}{Rl} + \frac{1}{Rm} + \frac{1}{Rn} + \frac{1}{Rñ} + \frac{1}{Ro}}$$

$$Req1 = \frac{1}{8 \left[ \frac{1}{\frac{\rho}{t} \left[ \frac{l_2}{w_2} + \frac{l_3}{w_3} + \frac{l_4}{w_4} \right]} \right]}$$

$$Req2 = \frac{1}{8 \left[ \frac{1}{\frac{\rho}{t} \left[ \frac{l_2}{w_2} + \frac{l_3}{w_3} + \frac{l_4}{w_4} \right]} \right]}$$

Ecuación 1. 11

Como  $Req1$  y  $Req2$  son iguales, podemos decir que:

$$Req3 = 2 \left[ \frac{1}{8 \left[ \frac{1}{\frac{\rho}{t} \left[ \frac{l_2}{w_2} + \frac{l_3}{w_3} + \frac{l_4}{w_4} \right]} \right]} \right]$$

Ecuación 1. 12

En la expresión siguiente se suman con las resistencias que se encuentran en serie:

$$RT = \rho \frac{l_1}{wt} + 2 \left[ \frac{1}{8 \left[ \frac{1}{\frac{\rho}{t} \left[ \frac{l_2}{w_2} + \frac{l_3}{w_3} + \frac{l_4}{w_4} \right]} \right]} \right] + \rho \frac{l_5}{wt} + \rho \frac{l_6}{wt}$$

Ecuación 1. 13

$$RT = \frac{\rho}{t} \left[ \frac{l_1}{w_1} + \frac{l_5}{w_5} + \frac{l_6}{w_6} \right] + 2 \left[ \frac{1}{8 \left[ \frac{1}{\frac{\rho}{t} \left[ \frac{l_2}{w_2} + \frac{l_3}{w_3} + \frac{l_4}{w_4} \right]} \right]} \right]$$

Ecuación 1. 14

Al sustituir los valores en esta ecuación se obtiene que la resistencia en este chevrón es de  $16.13 \Omega$ . Este valor nos será de utilidad para realizar los cálculos teóricos de corriente.

## 2.11 Análisis de elementos finitos ANSYS™

ANSYS™ es el Software líder de simulación CAE multifísico para análisis y simulación por elementos finitos (FEA). Incluye las fases de preproceso, resolución y postproceso en una única plataforma de trabajo. ANSYS™ ejecuta análisis a piezas o conjuntos usados en ingeniería y diseño mecánico que están sometidos a uno o varios fenómenos físicos de manera individual o simultánea. Es un programa de aplicación general para el cálculo con elementos finitos, gracias a este software se pueden resolver problemas estructurales, térmicos, eléctricos, magnéticos, de fluidos entre otros. (ANSYS, 2017)

El análisis de elementos finitos es un método computarizado para predecir cómo reaccionará un producto ante las fuerzas, la vibración, el calor, el flujo de fluidos y otros efectos físicos del mundo real. (ANSYS, 2017)

La simulación de elementos finitos permite comprobar si un producto se romperá, desgastará o funcionará como se espera. Se denomina análisis, pero en el proceso de desarrollo de productos, se utiliza para predecir qué ocurrirá cuando se utilice un producto.

El análisis de elementos finitos descompone un objeto real en un gran número (entre miles y cientos de miles) de elementos finitos, como pequeños cubos. Las ecuaciones matemáticas permiten predecir el comportamiento de cada elemento. Luego, una computadora suma todos los comportamientos individuales para predecir el comportamiento real del objeto.

El análisis de elementos finitos predice el comportamiento de los productos afectados por una variedad de efectos físicos, entre los que se incluyen: (ANSYS, 2017)

- Esfuerzo mecánico
- Vibración mecánica
- Fatiga
- Movimiento
- Transferencia de calor
- Flujo de fluidos
- Electrostática
- Moldeo por inyección de plástico

El análisis por el método de elementos finitos (FEA) es la solución a muchos problemas de ingeniería, caracterizado por modelos matemáticos más o menos complejos en los cuales intervienen un conjunto de parámetros para predecir fallos en todo sistema físico continuo con un material específico determinado (Naula I., Carrillo, & Izurieta, 2016).

Algunas de las aplicaciones del análisis del elemento finito pueden ser: rendimiento de antenas, refrigeración electrónica, electromagnetismo de baja frecuencia, electrónica de potencia, software incrustado, sistemas multifísico, estructurales de impacto, esfuerzos, térmicos, vibraciones, sistemas de prototipos virtuales etc. (ANSYS, 2017).

## 2.12 Parámetros del Silicio

la Tabla 4, se muestran los parámetros del Silicio a considerar en la simulación de los actuadores chevrón y de la micropinza.

Tabla 4 Parámetros del Silicio, (Ghatkesar, y otros, 2007) (Reddy & Kumar, 2013) (Ansys Workbench Multiphysics, 2020)

Parámetros del Silicio	
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 isotrópica, $k$ [W/m*K]	148
Relación de Poisson, $\nu$ [adimensional]	0.33
Calor específico, $C_p$ [J/kg*K]	712

Resistividad, $\rho$ [ $\Omega \cdot m$ ]	3 e-5
Punto de fusión, [ $^{\circ}C$ ]	1450
Resistencia a la tracción [MPa]	250

## 2.13 Características básicas de una fibra óptica

En la Tabla 5 se muestran las características de un posible elemento de sujeción.

*Tabla 5 Características de la fibra óptica.*

<b>Características de la fibra óptica.</b>	
Diámetro	20-125 $\mu m$
Punto de fusión	1800 $^{\circ}C$
Perturbaciones	1000 $^{\circ}C$



## CAPÍTULO 3. METODOLOGÍA

En este capítulo se describe la metodología a usar para el desarrollo de este proyecto.

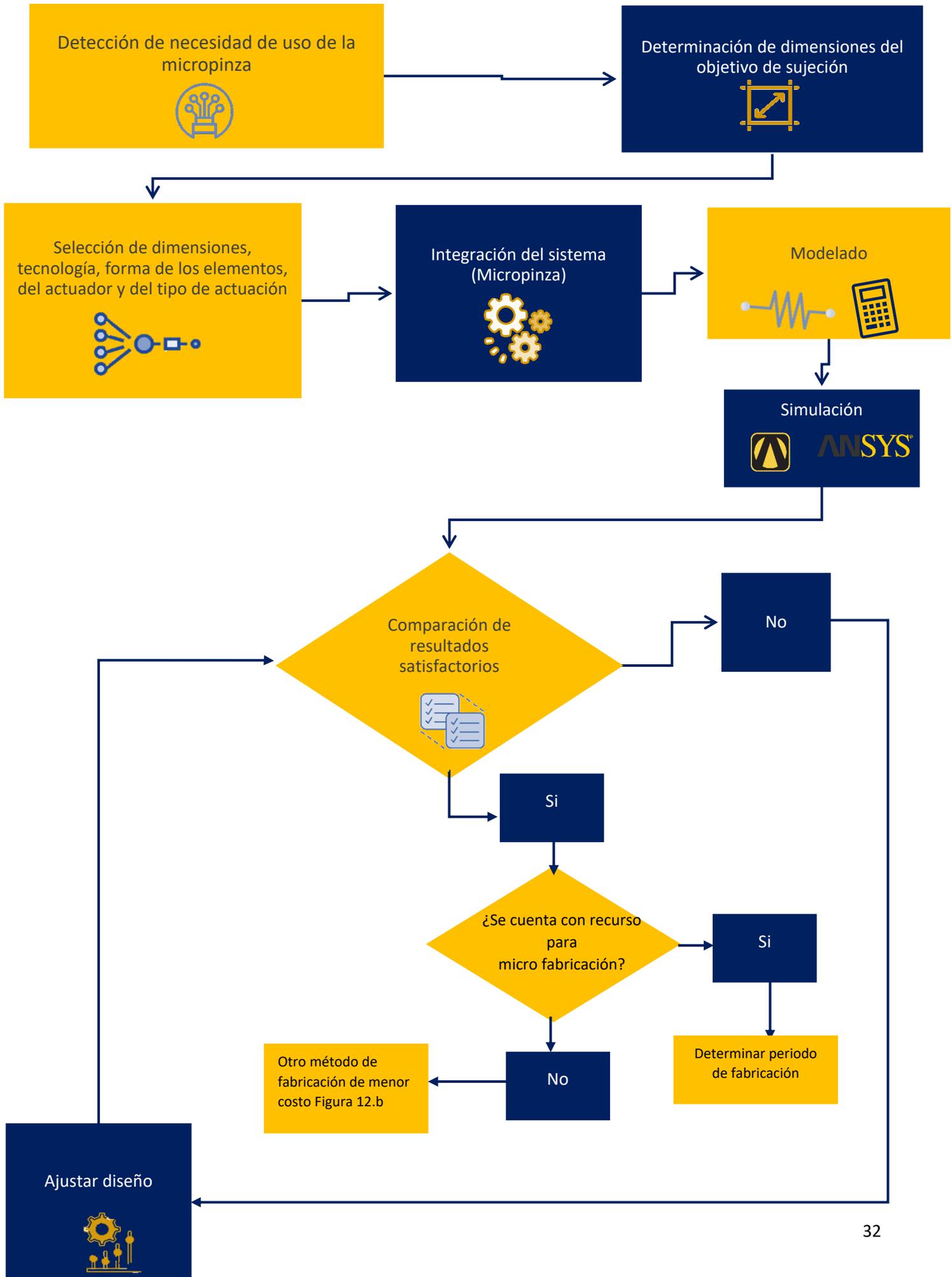


Figura 12 metodología general

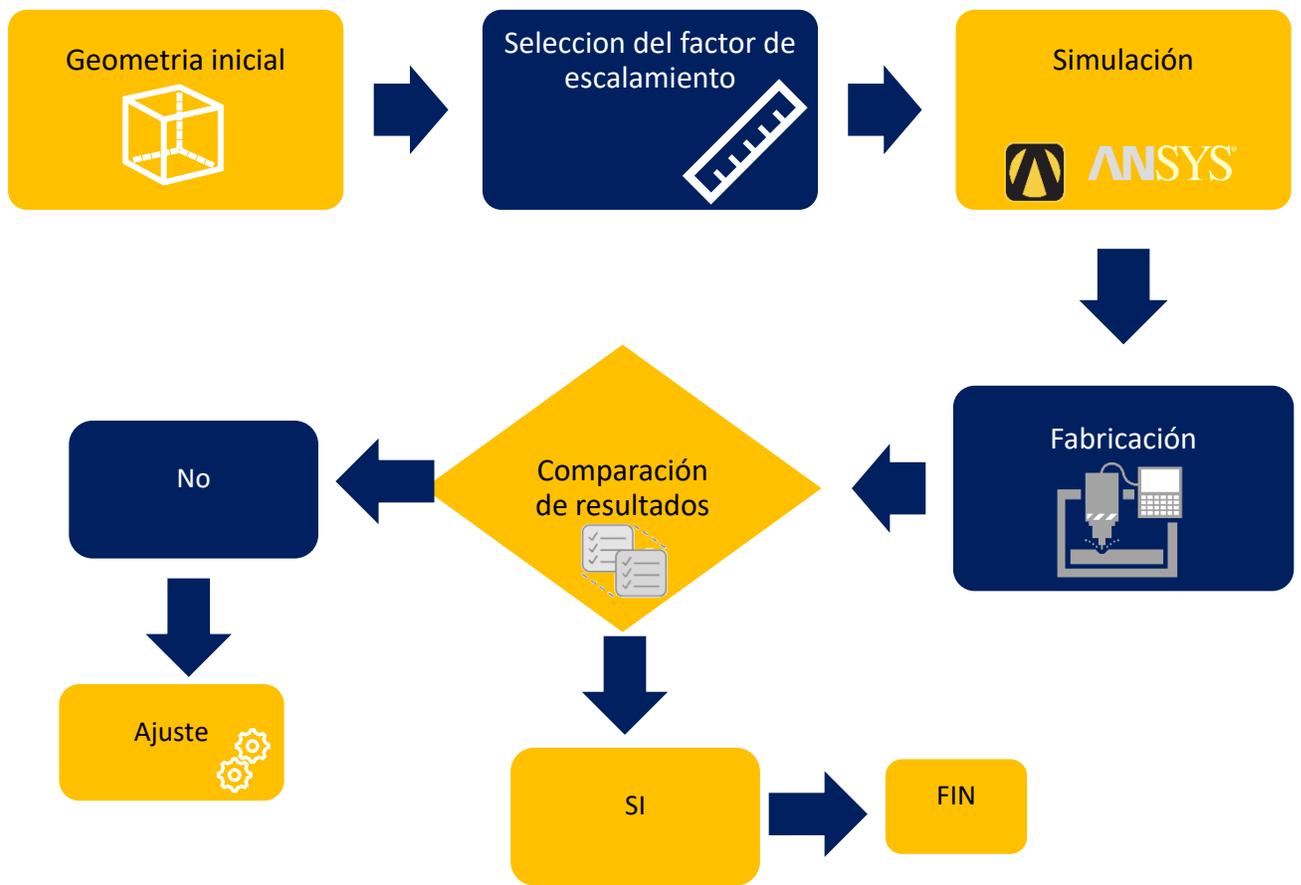


Figura 13 metodología adicional

En la Figura 12 se presenta la metodología general diseñada para obtener a la micropinza de Silicio.

En la Figura 13 se presenta la metodología adicional seguida para los actuadores implementados, en este caso, en aluminio. Una vez que se tiene la geometría del microactuador, se valida su desempeño a escala.

### 3.1 Detección de necesidad de uso de la micropinza

Al realizar diseños anteriores de los diferentes tipos de actuadores para su implementación en obleas de silicio, se observó durante el diseño que el espacio en ella podía optimizarse en el acomodo de estos dispositivos chevrón, haciendo que compartieran un pozo en común, es así como surge la propuesta del desarrollo de un sistema electromecánico compuesto de un arreglo de actuadores, el cual serviría para sujeción o manipulación de elementos de tipo fibra óptica, siendo este el uso principal de este dispositivo, todo esto teniendo en cuenta los grandes avances tecnológicos que

actualmente existen en este campo, como el adelgazamiento de fibras o la creación de micro o nano hilos de diferentes polímeros.

### 3.2 Determinación de dimensiones del objetivo de sujeción

Luego de identificar las necesidades que existen de este tipo de elementos complementarios para el estudio, sujeción o manipulación de las fibras ópticas se realizó la investigación de las características del elemento a sujetar y se logró identificar los mostrados en la Tabla 5.

Los componentes que se utilizan en este tipo de microactuador son: dos anclas, ocho pares de brazos y una flecha.

### 3.3 Selección de dimensiones, tecnología, forma de los elementos, del actuador y del tipo de actuación

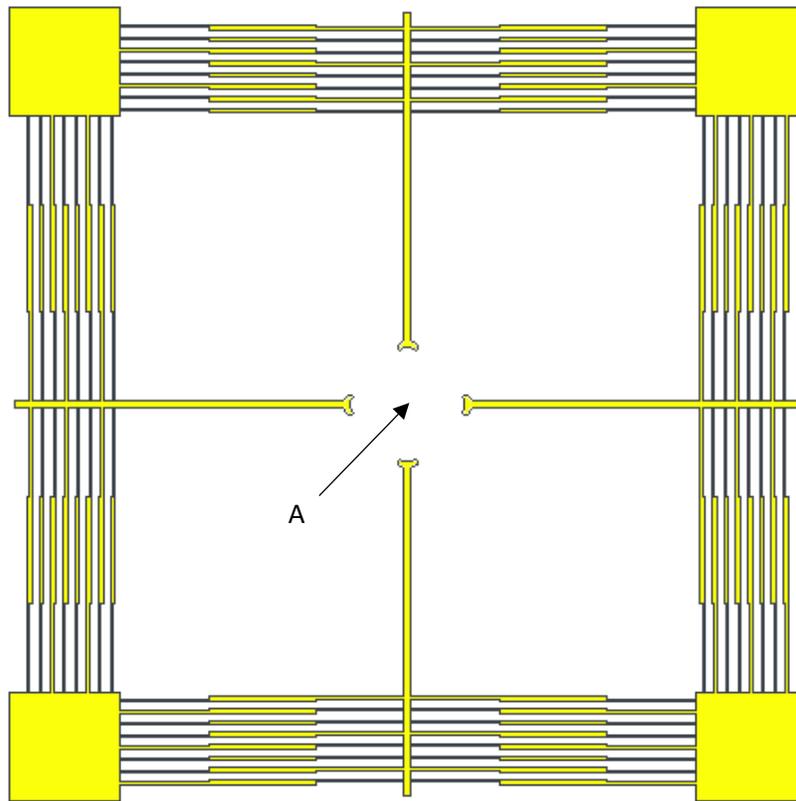
Tomando en cuenta el punto anterior se procedió a experimentar con el diseño en general del actuador a utilizar, revisando en la literatura existente el tipo de actuador que es el mejor para esta aplicación y que se pudiesen obtener los resultados esperados.

Al realizar la investigación necesaria se tomó la decisión de realizar esta micropinza con actuadores chevrón en forma de brazo Z modificado.

### 3.4 Integración del sistema (Micropinza)

Una vez que se eligieron las dimensiones y tipo de actuación, se realizó la integración de la micropinza como se muestra en la Figura 13, haciendo uso del software de simulación ANSYS™. En el capítulo 5 se presentan los resultados obtenidos de este dispositivo.

En la Figura 14 se denomina al punto A como el espacio donde se encontrará el espacio para sujeción de fibra óptica como elemento de prueba principal.



*Figura 14 Integración de la micropinza con actuadores chevrón de brazos Z modificados.*

### 3.5 Comparación de resultados analíticos y numéricos

Las comparaciones necesarias se deben llevar a cabo , en su momento.

### 3.6 Simulación y comparación de resultados satisfactorios

Finalmente, se procede a el apartado del diseño y modelado en ANSYS™ Workbench para simulación del dispositivo. Se determinan las condiciones iniciales y de frontera, se selecciona también a la fuente de alimentación, en las simulaciones de chevrones Z convencional y modificado se alimentó con 1 V.

Posteriormente, se realizan las parametrizaciones correspondientes, con el objetivo de optimizar las dimensiones de los elementos del actuador Z modificado, que proporcionan los resultados más adecuados correspondientes al desplazamiento y fuerza. En caso de no obtener resultados satisfactorios se realizan los ajustes necesarios.

### 3.7 Metodología complementaria para la fabricación en aluminio

### 3.8 Geometría

En este apartado se retoma la geometría diseñada en la metodología anterior para la fabricación en aluminio con la CNC, en este caso en escala meso

### 3.9 Selección del factor escalamiento en la metodología complementaria

Para fabricar este dispositivo en escala meso se considera un factor de escalamiento de 100, con el fin de obtener el dispositivo en una escala a centímetros.

### 3.10 simulación del actuador

Se realiza la simulación correspondiente en escala meso, se agregan los parámetros del aluminio y se modifica la extrusión del dispositivo en el diseño y modelado en ANSYSTM Workbench para simulación del dispositivo.

Se determinan las condiciones iniciales y de frontera, se selecciona también a la fuente de alimentación.

### 3.11 Fabricación del actuador

Se calibra la CNC con las características del aluminio y se importa la geometría previamente trabajada en Autocad (dejando únicamente el plano X,Y)

Se realizan los perfilados de corte correspondientes según la geometría a cortar.

### 3.12 comparación de resultados

Las comparaciones necesarias se deben llevar a cabo, en su momento.



## **CAPÍTULO 4. DISEÑO, SIMULACIÓN Y PRUEBAS DEL CHEVRÓN DE BRAZO Z MODIFICADO EN SILICIO Y ALUMINIO**

En el presente capítulo se presentan el diseño, simulación y pruebas realizadas al chevrón de brazo Z modificado, que se utilizó en este trabajo de investigación.

En este capítulo, iniciamos con la comparación de resultados teóricos y numéricos de un actuador chevrón Z convencional, para posteriormente hacer una comparación entre los resultados numéricos del actuador chevrón Z convencional, con el Z de brazos modificados.

#### 4.1 Comparación de resultados analíticos y numéricos

En esta sección, se obtienen los resultados analíticos y simulados respectivamente, donde se hizo uso de las ecuaciones 1.2, 1.3 y 1.6 para los cálculos teóricos, y se compararon con los resultados obtenidos mediante simulación y, así se encontró un porcentaje de error aceptable.

En la Tabla 6 se presentan las dimensiones consideradas en el diseño.

Cabe señalar que, debido a que el Silicio es el material estructural, se consideran los parámetros físicos, térmicos, eléctricos y mecánicos de este material, mostrados en la Tabla 3.

*Tabla 6 Dimensiones del chevrón Z convencional.*

Variable	Valor
Lb1 [m]	3.00E-04
w1=l [m]	5.00E-06
W [m]	5.00E-06
th=h [m]	7.00E-05

Al hacer uso de la ecuación 2 mencionada se obtiene los resultados que se muestran en la Tabla 7, para el desplazamiento  $U_y$ , en la que se presenta además la comparación con los resultados numéricos.

Tabla 7 Resultados Desplazamiento actuador chevrón Z convencional.

<b>Desplazamiento en actuador chevrón Z convencional</b>	
Analítico [m]	3.390E-06
Numérico [m]	2.95E-06
Porcentaje de error %	14.97

Al calcular la rigidez se obtienen los datos de la Tabla 8, donde podemos observar que se tiene un error del 5.21% con respecto al resultado de la simulación.

Tabla 8 Rigidez actuador chevrón Z convencional.

<b>Rigidez, k (N/m), en actuador chevrón Z convencional</b>	
Analítico	27.84
Numérico	2.65E+01
Porcentaje de error %	5.21

Finalmente, se presentan los datos que se obtuvieron para el cálculo de la fuerza de reacción en el actuador en la Tabla 9, así como el porcentaje de error, al comparar con los resultados numéricos.

Tabla 9 Fuerza actuador chevrón Z convencional.

<b>Fuerza en actuador chevrón Z convencional</b>	
Analítico [N]	9.44E-05
Numérico [N]	7.80E-05
Porcentaje de error %	20.96

Con relación a los errores mostrados en las Tablas 9-11, puede observarse que el mayor error corresponde al caso de la fuerza de reacción, cercano a un 21%. Cabe señalar que, en estructuras complejas, suelen encontrarse valores similares, debido a que las aproximaciones teóricas son relativamente nuevas.

## 4.2 Diseño del microactuador con brazos Z modificados (Silicio)

En la Figura 15 se muestra el diseño del del actuador Z modificado, mientras que en la Figura 16, se muestra un acercamiento a la geometría de un solo brazo.

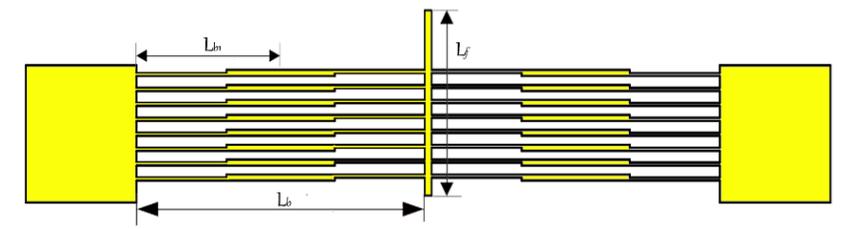


Figura 15 Actuador a utilizar.

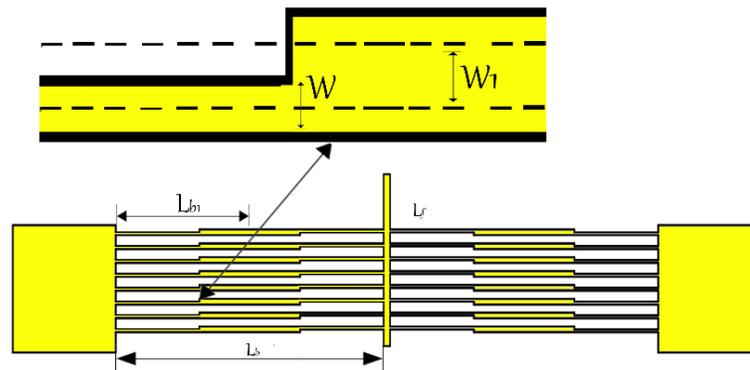


Figura 16 Detalle de brazo de actuador

Las dimensiones del actuador se pueden observar en la Tabla 10. Los valores de los parámetros del Silicio se toman de la Tabla 4.

Tabla 10 Dimensiones propuestas para actuador.

Variable	Descripción	Valor [m]
W	Ancho del brazo Z	5E-6
W <sub>1</sub>	Ancho de la forma Z	5E-6
L <sub>b1</sub>	Largo del brazo	300E-6
L <sub>b</sub>	Largo total del brazo	600E-6
t <sub>h</sub>	Grosor del dispositivo	70E-6
L <sub>f</sub>	Largo de la flecha	689E-6
W <sub>f</sub>	Ancho de la flecha	14E-6

Se determinó que el actuador chevrón fuera de actuación electrotérmica. Se propuso que se utilizara un voltaje máximo de 1 V en su extremo positivo, el cual genera un  $\Delta T$  de 89.94 °C. Se propone también una modificación de brazo Z de 45 veces el ancho del brazo.

Se procedió con el diseño y modelado del microactuador chevrón de 8 pares de brazos para el análisis de fuerza y el desplazamiento. En la Figura 17 se muestra el diseño del chevrón a utilizar, a continuación, se presenta la simulación y caracterización del dispositivo realizado en ANSYSTM.

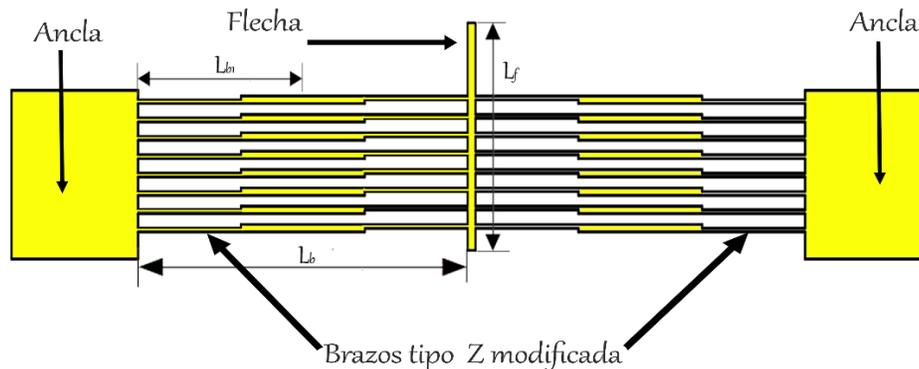


Figura 17 Chevrón a utilizar

Se toman como condiciones iniciales una temperatura de 22°C, voltaje inicial de 0 V. Para el desarrollo de esta simulación se utilizó el software ANSYSTM™ Workbench, donde se realizará el dibujo, utilizando las dimensiones de la Tabla 6 y los parámetros del material mostrados en la Tabla 4. Se obtendrán las simulaciones de fuerza y

desplazamiento, para hacer la comparación de resultados analíticos y obtenidos de la simulación (numéricos).

### 4.3 Simulación del microactuador con brazos Z modificados (Silicio)

El primer paso para simular la geometría del diseño será definir las propiedades del material, para lo cual se consideran las propiedades mostradas en la Tabla 14, para ello se crea el material en el software y posteriormente se importa como se muestra en la Figura 18.

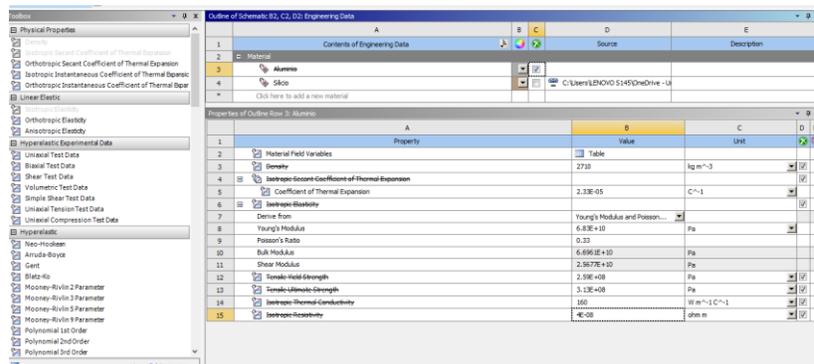


Figura 18 Selección de material (Silicio).

Construimos un árbol de sistemas de análisis de Workbench, que consta de un Thermal-Electric y dos Static Structural (Figura 19).

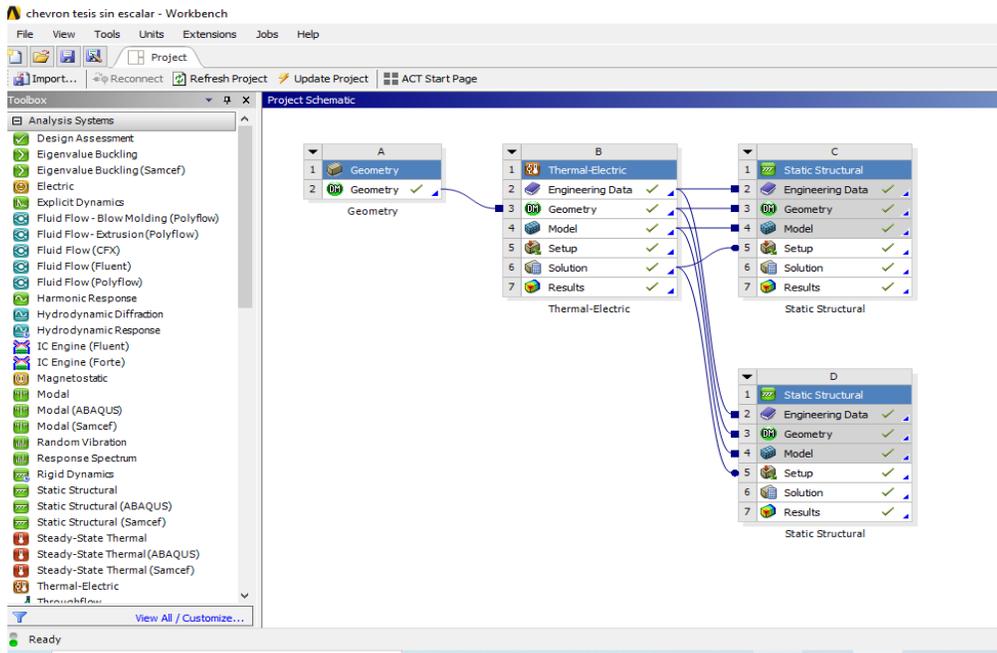


Figura 19 Árbol de análisis de Workbench en silicio.

Teniendo nuestro árbol de sistemas de análisis pasaremos a editar el modelo de cada uno de los sistemas, desplegando así una ventana de análisis mecánico, donde el primer paso es asignarle las propiedades del material a la geometría.

Continuaremos con el mallado, considerando mallado fino por las características del equipo con el que se está realizando la simulación (Figura 20).

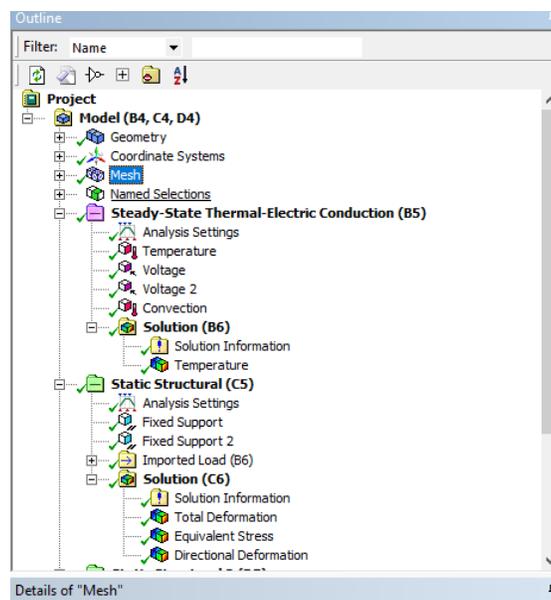


Figura 20 Outline del Workbench.

Para el análisis de Thermal-Electric se asigna la temperatura a una de las anclas donde también le aplicaremos voltaje de 1 V a la otra ancla. Como soluciones seleccionamos Temperatura como se muestra en la Figura 21, mientras que en la Figura 22 se muestra el voltaje que se aplicara a el chevrón en la simulación

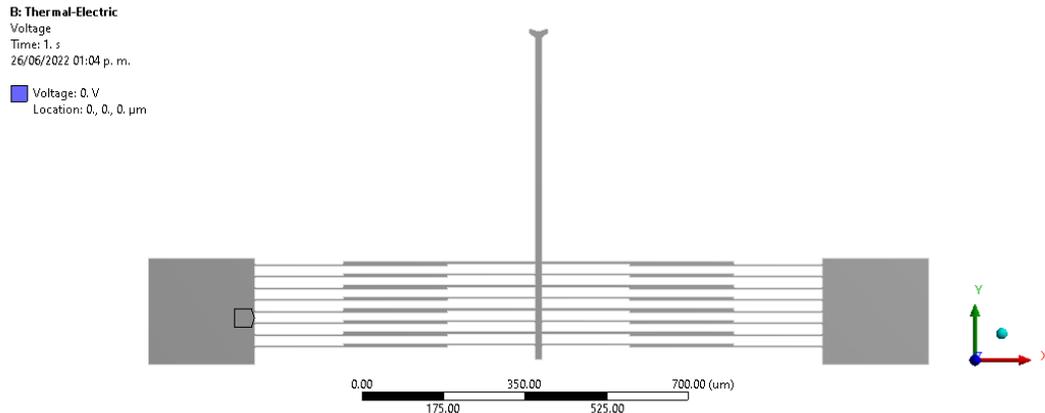


Figura 21 Voltaje inicial.

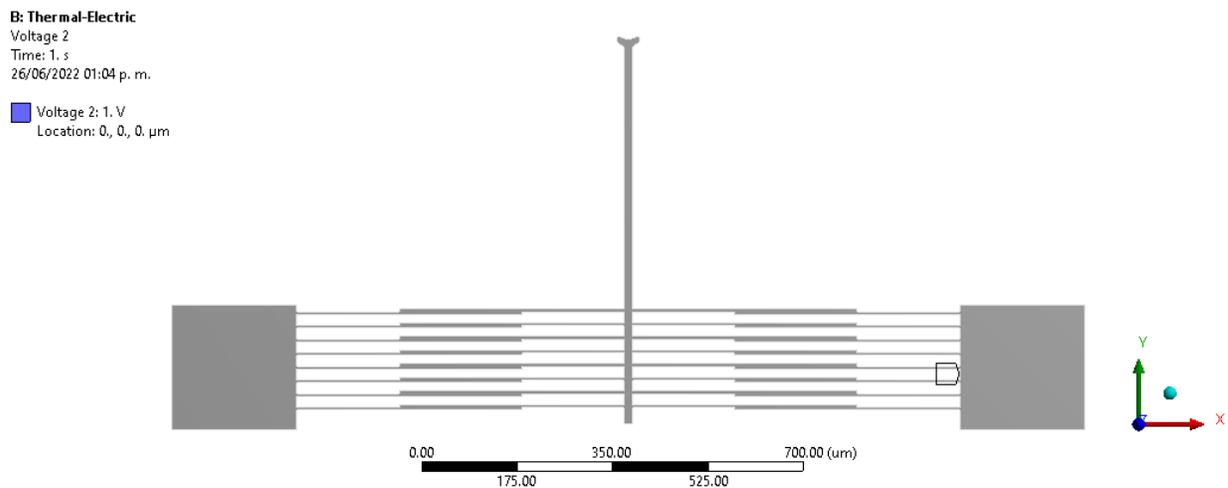


Figura 22 Voltaje final 1V.

Teniendo los resultados del sistema termoeléctrico, se continúa con el análisis de los Static Structural, primero las anclas serán fijadas (Fixed Support) y se procederá a resolver la deformación total de la geometría como se muestra en la Figura 23. En el segundo caso también se fijarán las anclas (Fixed Support 2) y, además, la punta de la flecha (Fixed Support 3), en la solución de esta parte se analizará la fuerza que se generara en la flecha, las secciones se encuentran conformadas como se muestra en la Figura 24 y Figura 25.

**C: Static Structural**  
 Fixed Support  
 Time: 1. s  
 26/06/2022 01:04 p. m.  
 Fixed Support

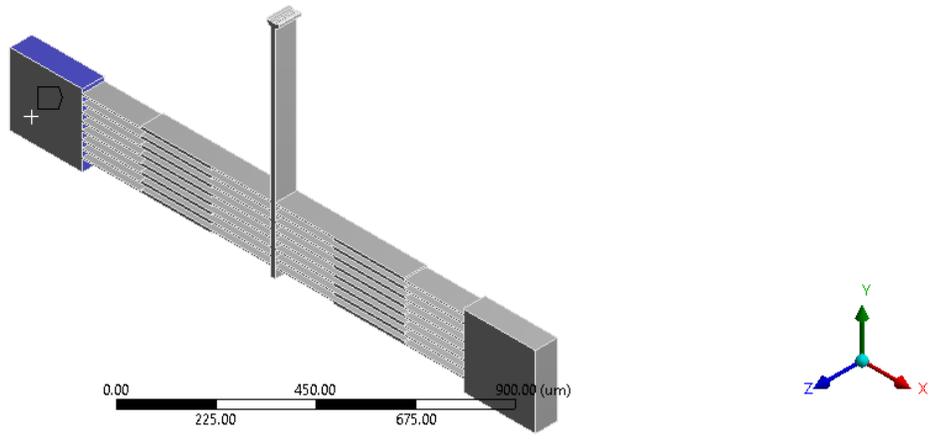


Figura 23 Fixed support 1.

**D: Static Structural**  
 Static Structural 2  
 Time: 1. s  
 27/06/2022 09:10 a. m.  
 Fixed Support  
 Fixed Support 2  
 Fixed Support 3

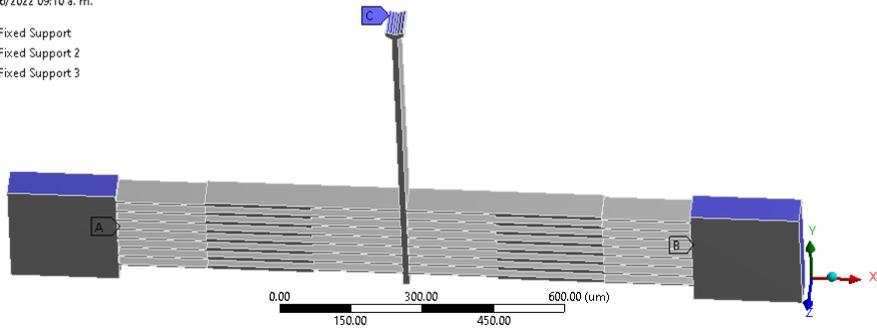


Figura 24 Fixed supports 1, 2 y 3.

**C: Static Structural**  
 Fixed Support 2  
 Time: 1. s  
 26/06/2022 01:05 p. m.  
 Fixed Support 2

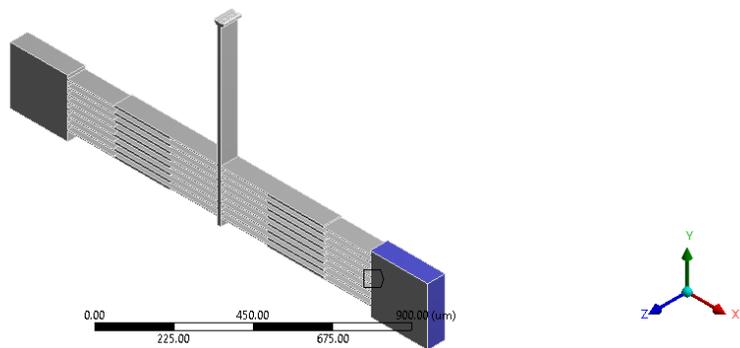


Figura 25 Fixed support 2.

En la Figura 26 se muestran las condiciones iniciales implementadas en la simulación del actuador chevrón de brazo Z modificado.

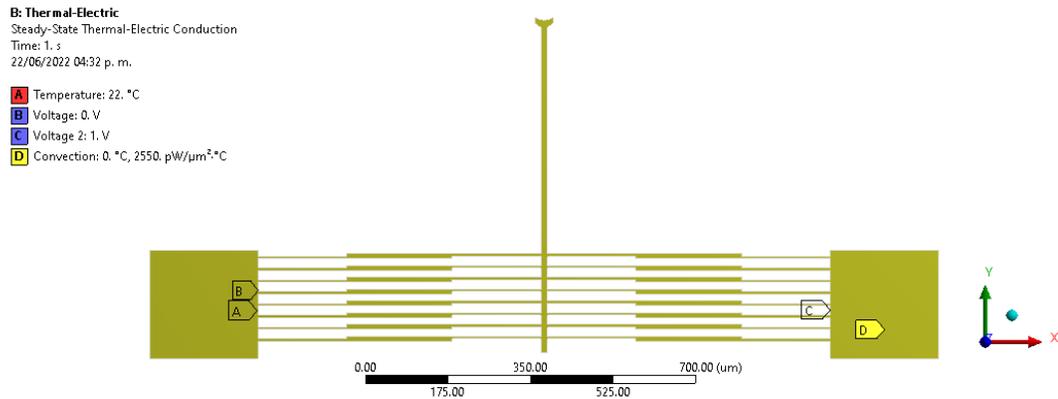


Figura 26 Condiciones iniciales de Temperatura y Voltaje, así como convección de temperatura, presentes en el actuador chevrón.

En la Figura 27 se muestra el desplazamiento generado. El valor máximo se presenta en la punta del chevrón, con un valor de 6.45  $\mu\text{m}$ .

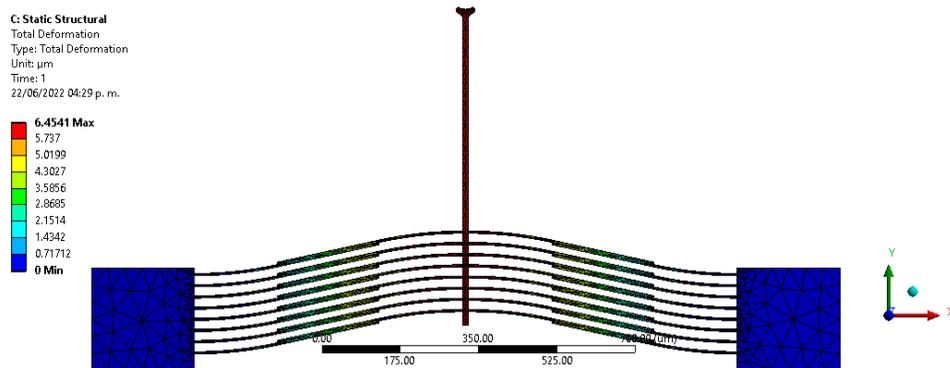


Figura 27 Deformación total en chevrón de brazo Z modificado.

El esfuerzo equivalente de von-Mises se muestra en la Figura 28, con un valor máximo de 141.29 MPa, en el lugar señalado en la etiqueta (Figura 29). Cabe señalar que, este valor máximo no supera el esfuerzo último para Silicio.

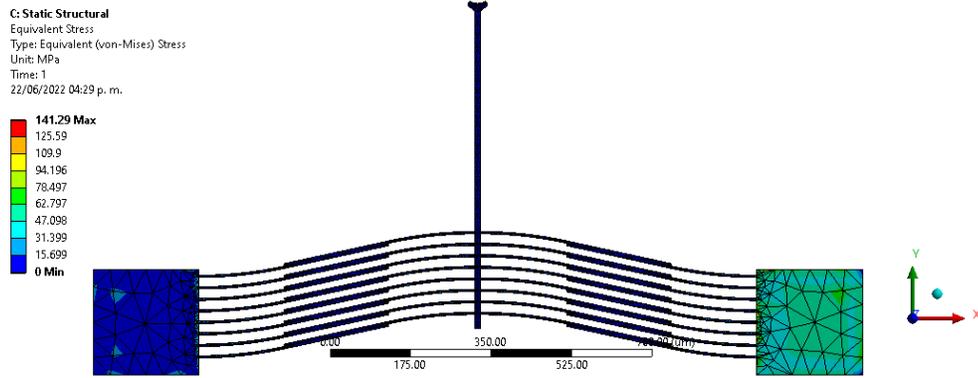


Figura 28 Esfuerzo equivalente en chevrón brazo Z modificado.

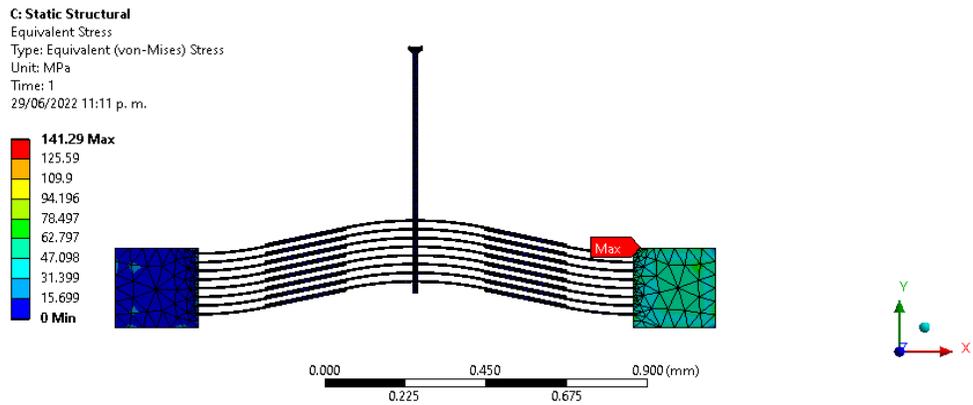


Figura 29 Estrés máximo del chevrón

En la Figura 30 se presenta a la fuerza de reacción presentada en la punta de la flecha. En la Figura 31, se presentan los valores en cada uno de los ejes, así como la fuerza total, de 72.913 mN, el cual es un valor adecuado para soportar microobjetos en el rango de peso determinado (7.4 g).

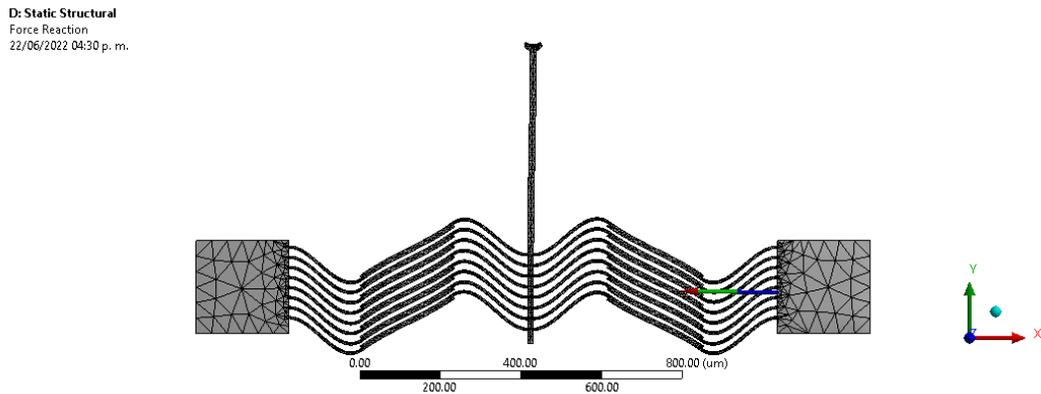


Figura 30 Fuerza de reacción en brazo z modificado.

Tabular Data					
	Time [s]	Force Reaction (X) [ $\mu$ N]	Force Reaction (Y) [ $\mu$ N]	Force Reaction (Z) [ $\mu$ N]	Force Reaction (Total) [ $\mu$ N]
1	1.	-72908	828.	-1.0131	72913

Figura 31 Resultados de la fuerza de reacción (simulación brazo z modificado).

En la Tabla 11, se muestra la comparación de resultados del actuador Z convencional con el de brazos Z modificados. Puede observarse que el actuador chevrón de brazo modificado supera en desplazamiento en un 218.64%.

La rigidez es un 19.57% más alta en el actuador Z modificado, pero no limita su funcionamiento.

Tabla 11 Comparación de valores de parámetros de actuador Z convencional con actuador Z de brazos modificados.

Parámetro	Actuador Z convencional	Actuador Z brazos modificados	% de incremento
Desplazamiento, ( $\mu$ m)	2.95	6.45	218.644
Fuerza, (N)	$7.80 \times 10^{-5}$	$72.913 \times 10^{-3}$	$9.28 \times 10^4$

#### 4.4 Simulación, fabricación y pruebas. Chevrón con escalamiento, implementada en Aluminio

Además de considerar al Silicio como material estructural, se realizan simulaciones considerando la implementación de la pinza escalada e implementada con Aluminio, con la finalidad de analizar la factibilidad de su uso, con base en el comportamiento de los parámetros de desempeño.

Para este nuevo caso realizamos primero, como en el caso anterior, la selección del material, en este caso se introducen los datos del aluminio que se ocupó para la fabricación de este dispositivo con el fin de comparar resultados, y a su vez, comprobar el funcionamiento de esta micropinza en escala meso (Figura 32).

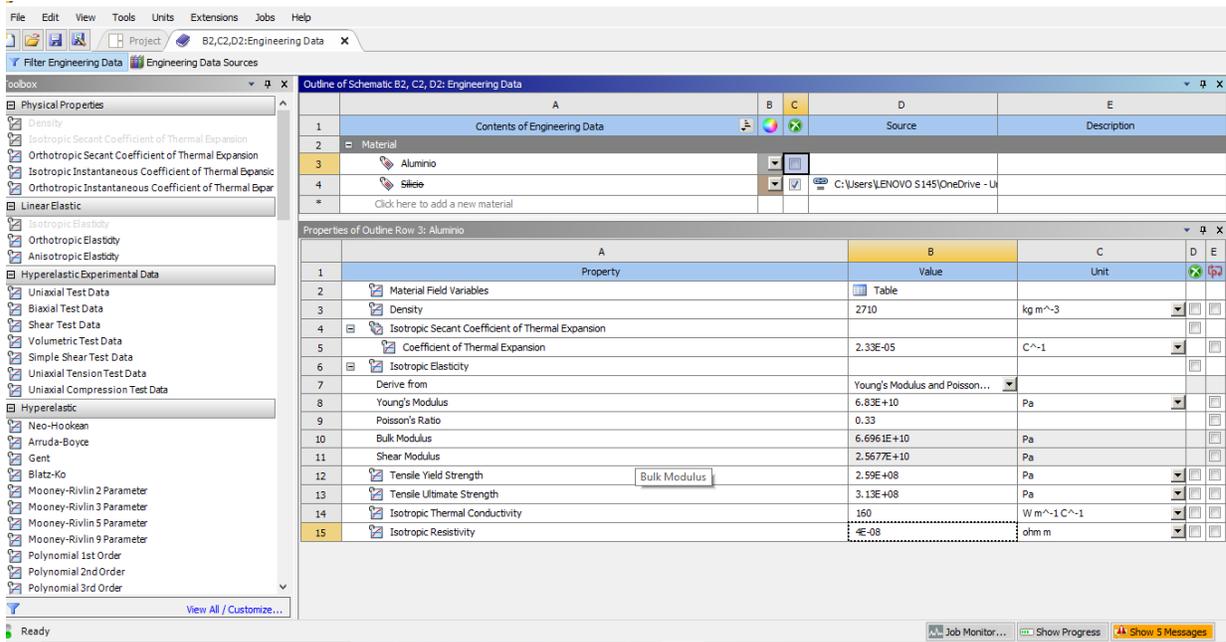


Figura 32 Parámetros del material aluminio a utilizar.

En el diagrama de árbol (Figura 33) en el software de análisis de Workbench, podemos observar que consta de un Thermal-Electric y dos Static Structural.

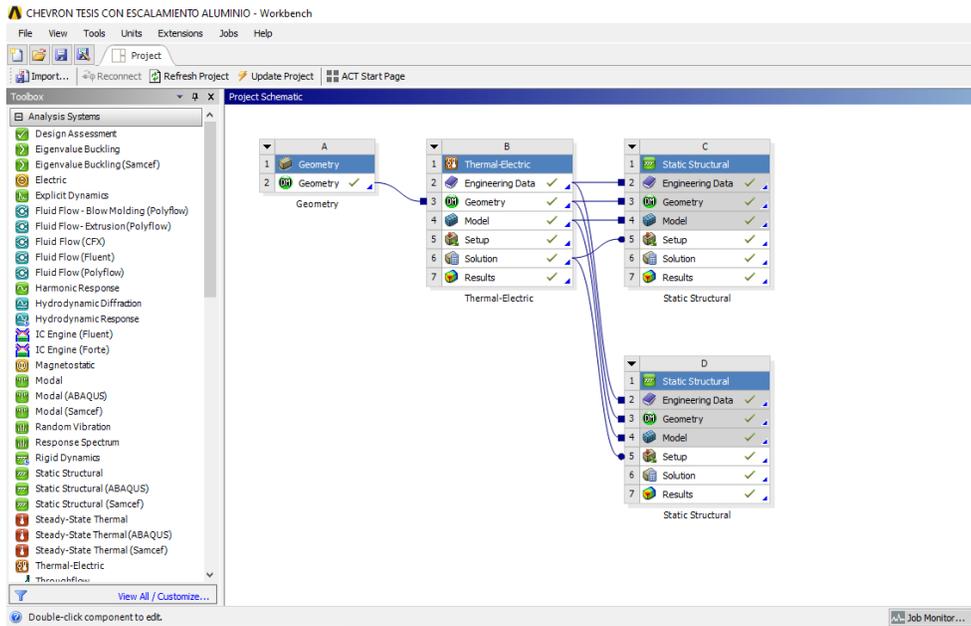


Figura 33 Árbol de análisis de Workbench.

Con el árbol de ANSIS™ en workbench se procede al análisis, colocando un mallado fino por las características que presenta el equipo con el que es realizada la simulación (Figura 34).

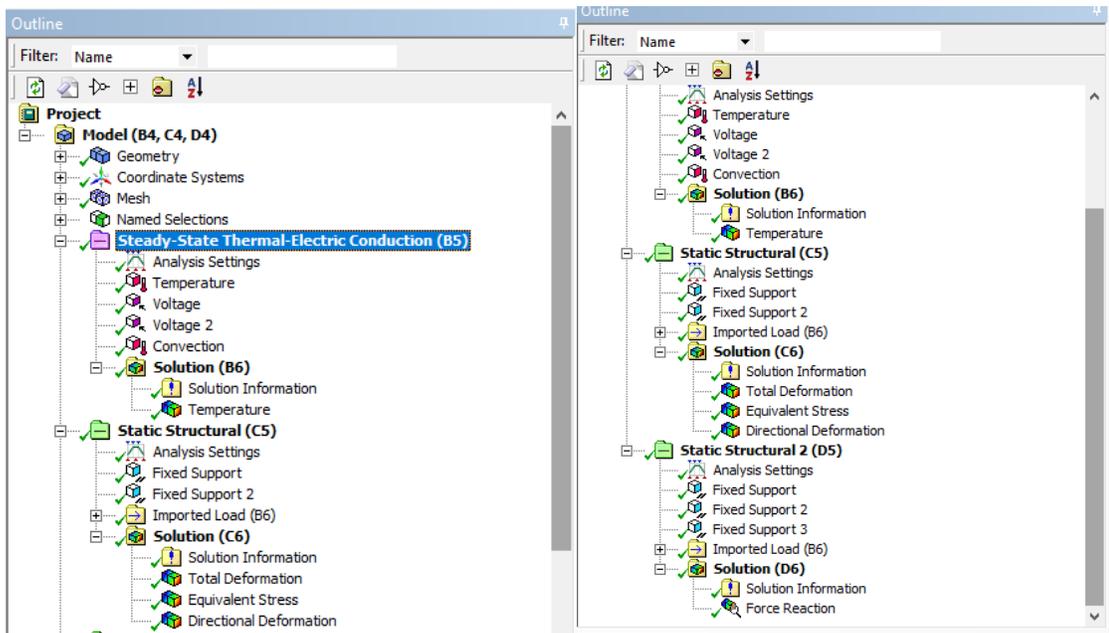


Figura 34 Outline Workbench brazo z modificado aluminio.

En la Figura 35 se muestra la temperatura máxima que alcanza el microactuador chevrón de brazo modificado, alcanzando una temperatura máxima de 22°C en el ancla izquierda.

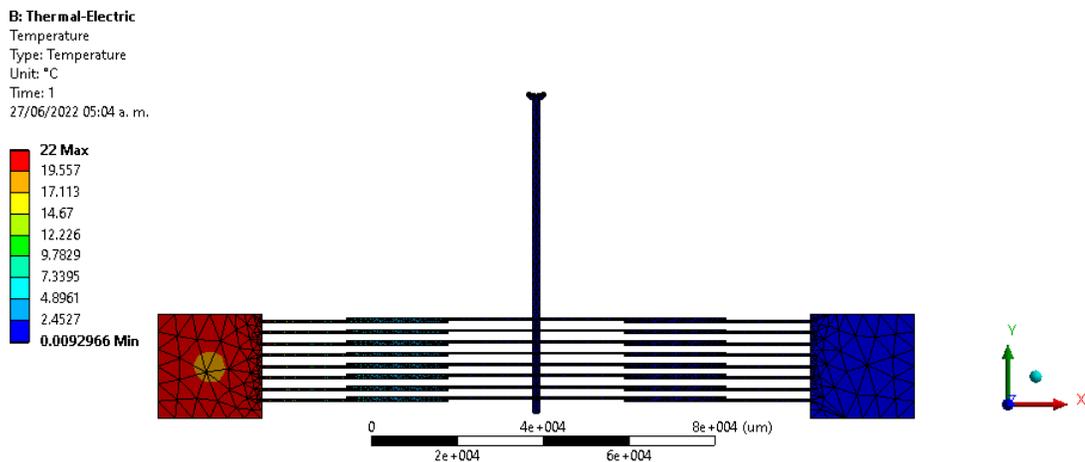


Figura 35 Temperatura (Simulación) chevrón Z modificado, aluminio.

La deformación que resulta de la simulación del chevrón de brazo Z modificado alcanza los 283.18  $\mu\text{m}$  como lo muestra la Figura 37.

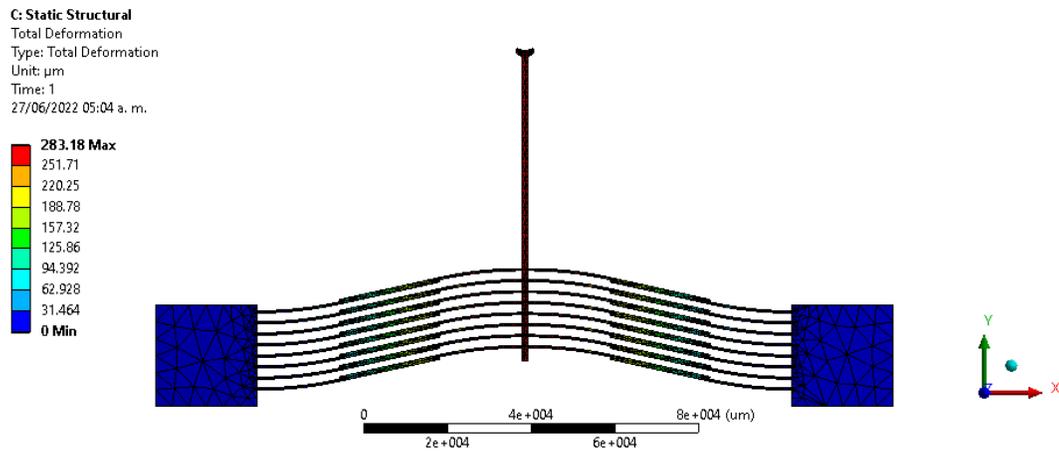


Figura 36 Deformación (Simulación) chevrón Z modificado, aluminio.

El esfuerzo equivalente se puede observar en la Figura 37, donde 158.5MPa es el valor máximo en la simulación realizada.

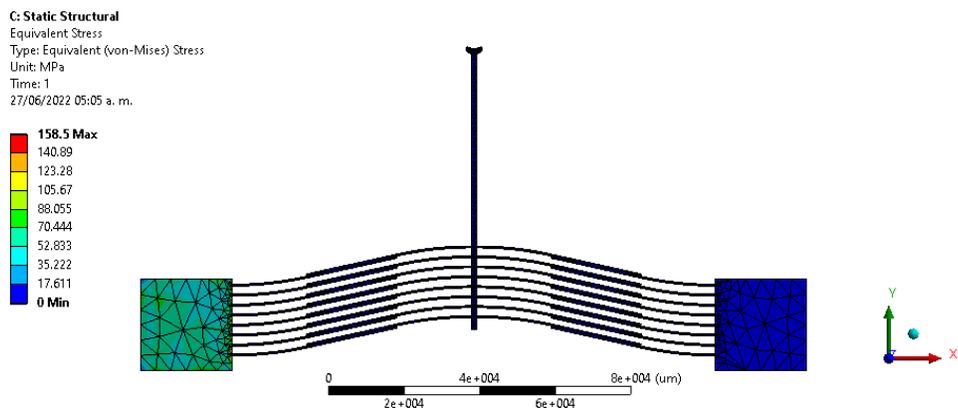


Figura 37 Esfuerzo equivalente (Simulación) chevrón Z modificado, aluminio.

La fuerza de reacción que se encuentra en la simulación de este chevrón de brazo Z modificado, en el eje Y es de 2N, como se puede observar de la Figura38 y Figura 39.

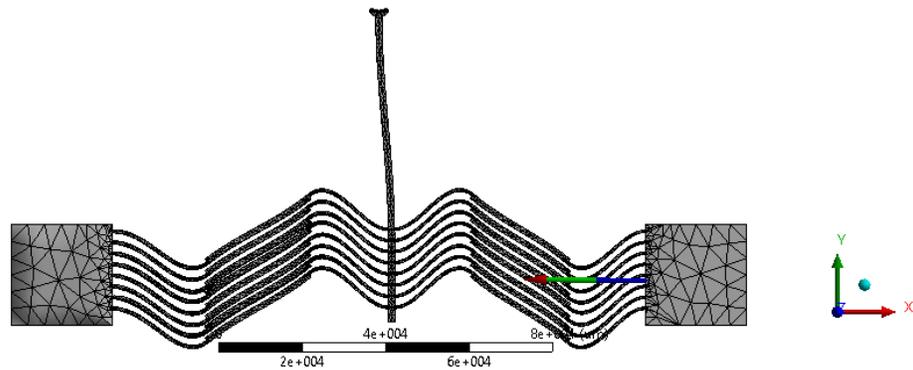


Figura 38 Fuerza de reacción (Simulación) chevrón Z modificado, aluminio.

Tabular Data				
Time [s]	<input checked="" type="checkbox"/> Force Reaction (X) [ $\mu$ N]	<input checked="" type="checkbox"/> Force Reaction (Y) [ $\mu$ N]	<input checked="" type="checkbox"/> Force Reaction (Z) [ $\mu$ N]	<input checked="" type="checkbox"/> Force Reaction (Total) [ $\mu$ N]
1 1.	-1.7723e+008	2.0016e+006	-1.4953e+005	1.7724e+008

Figura 39 Resultados de Fuerza de reacción (Simulación) chevrón z modificado, aluminio.

### 4.3 Fabricación de prototipo en aluminio mediante una Máquina de Control Numérico Computarizado, CNC

Luego de realizar la simulación correspondiente se procede con la fabricación del prototipo en aluminio, para la cual se necesitó como primer paso pasar el diseño realizado en ANSYSTM a AutoCAD, y modificar la geometría únicamente en los ejes X y Y, finalmente se exporta en formato.

En la CNC se realizan los ajustes necesarios y se realiza la calibración de la máquina, en la Figura 40 se muestra la interfaz que muestra el programa para el manejo de la CNC (ejemplo de la micropinza).

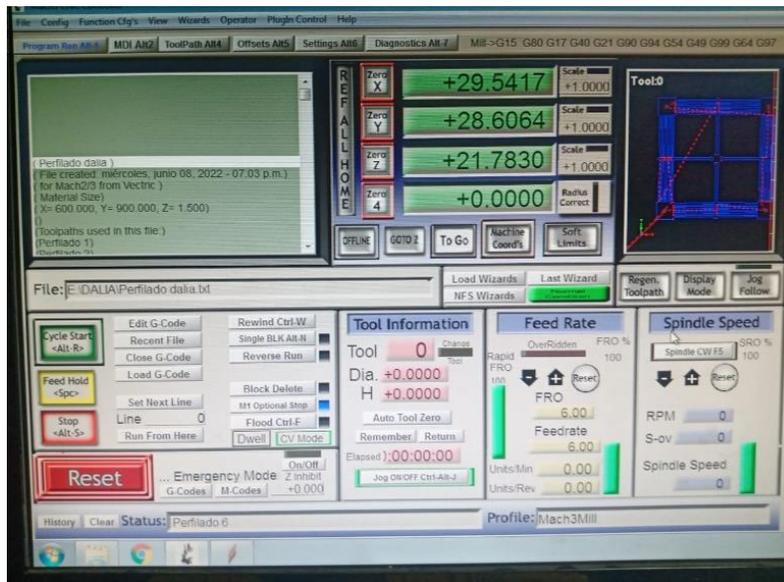


Figura 40 Interfaz del programa para el manejo de CNC.

Luego de corroborar que se cuenta con los parámetros y características necesarias se procede a la fabricación del dispositivo. En la Figura 41 y Figura 42 se muestra el corte inicial del chevrón a fabricar en aluminio genérico.

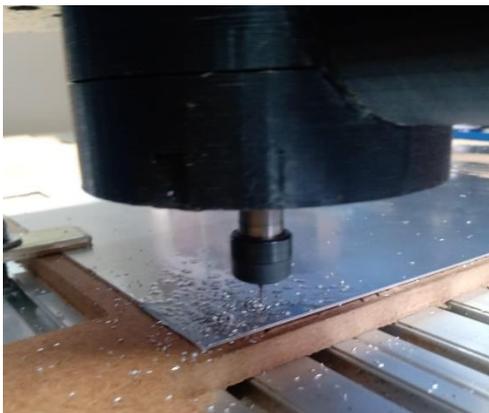


Figura 41 Inicio de fabricación de chevrón en aluminio.



Figura 42 Finalización de fabricación de chevrón en aluminio.

Como dispositivo final fabricado se obtiene la Figura 43, donde se muestra el chevrón desarrollado en la CNC con aluminio.



*Figura 43 Chevrón fabricado en CNC.*

Finalmente, en las Figuras 44-46 se muestran las respuestas que se obtuvieron con la cámara termográfica, las cuales nos muestran las temperaturas que se encuentran en la Tabla 15, con el lugar correspondiente al que pertenece esta medición, Se realizaron las pruebas de temperatura en la parte ancha del brazo (Figura 44), Flecha (Figura45), brazo delgado después de la modificación (Figura46). También se realizaron pruebas de temperatura en el dispositivo con ayuda del multímetro con termopar, en la Figura 47 se muestra la micropinza en la plataforma de experimentación De la Tabla 12 se observa que la mayor temperatura se concentra en la parte delgada del brazo cercana a la flecha.

Con la finalidad de determinar la validez de la medición, se procedió a realizar las mediciones considerando 2 equipos alternativos, puede observarse que la diferencia mayor es de 7.7°C. El equipo más confiable es el que cuenta con la mayor precisión, de acuerdo con las indicaciones del fabricante en este caso el multímetro, así como por carácter de contacto. No obstante, la cámara termográfica nos permite contar con el perfil de variación de la temperatura, lo cual es de utilidad para determinar la variación de la temperatura en toda la estructura.

Tabla 12 Resultados de pruebas realizadas con cámara termográfica.

Número de prueba	Valor -Cámara Termográfica, (°C)	Valor en Termopar del multímetro (°C)	Diferencia	Lugar de la prueba
Prueba 1	29.7	26	3.7	Parte ancha de brazos Z modificados
Prueba 2	32	39	7	Flecha del chevrón
Prueba 3	48.3	56	7.7	Brazo delgado después de la modificación Z

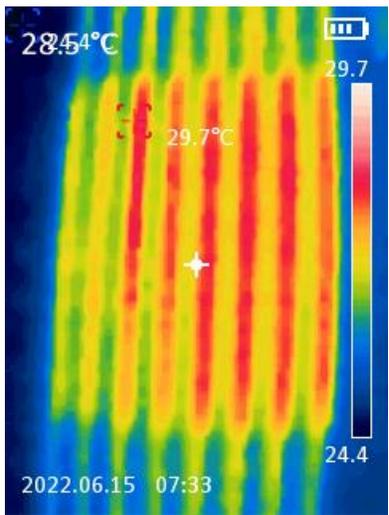


Figura 44 Prueba 1- Cámara termográfica (brazos).

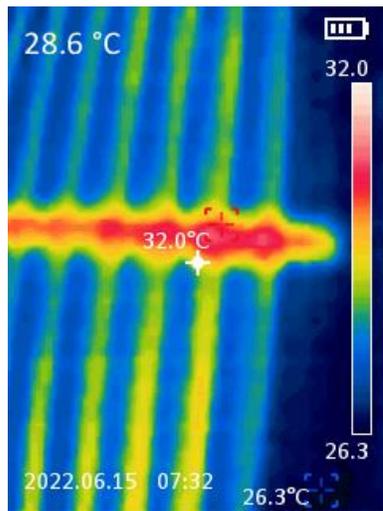


Figura 45 Prueba2 - Cámara termográfica (flecha)..

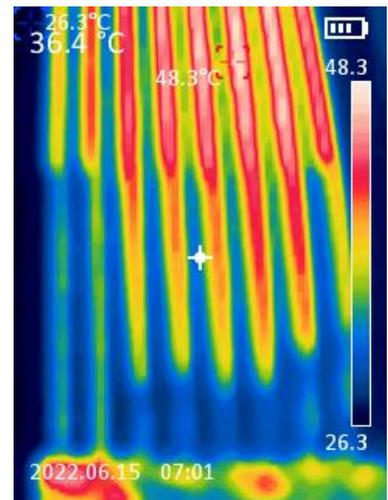


Figura 46 Prueba 3- Cámara termográfica (brazos)

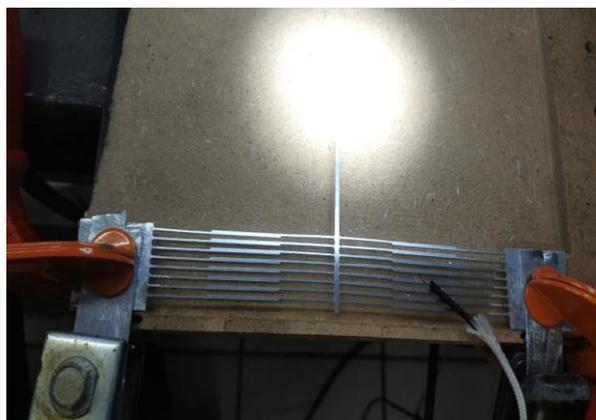


Figura 47 Micropinza colocada en plataforma de experimentación.

En la Figura 48 se observa en la prueba 1, una temperatura de 26° en los brazos modificados del actuador Z, en la prueba 2 la temperatura registrada en la flecha del chevrón es de 39° con el termopar del multímetro (Figura 49) y en la prueba 3 que consiste en realizar la prueba en el brazo delgado después de la modificación del brazo Z se obtienen 56° con el termopar (Figura 50).



Figura 48 Prueba 1 -Temperatura en los brazos modificados medido con termopar



Figura 49 Temperatura en la flecha medido con termopar



Figura 50 Temperatura en los brazos después de modificar, medido con termopar.

## 4.5 Desplazamiento del chevrón Z modificado

El desplazamiento que genera este dispositivo puede observarse mediante un microscopio, el cual como punto inicial lo colocaremos en 200, equivalente a -2 mm, este será tomado como cero del eje Y. Esto, con la finalidad de observar con mayor claridad al desplazamiento total.

En la Figura 51 se muestra la gráfica experimental temperatura- desplazamiento del dispositivo chevrón de brazo Z modificado. A partir de ella, puede observarse que,

conforme se incrementa la temperatura, el desplazamiento también se incrementa, de manera cuasi lineal.

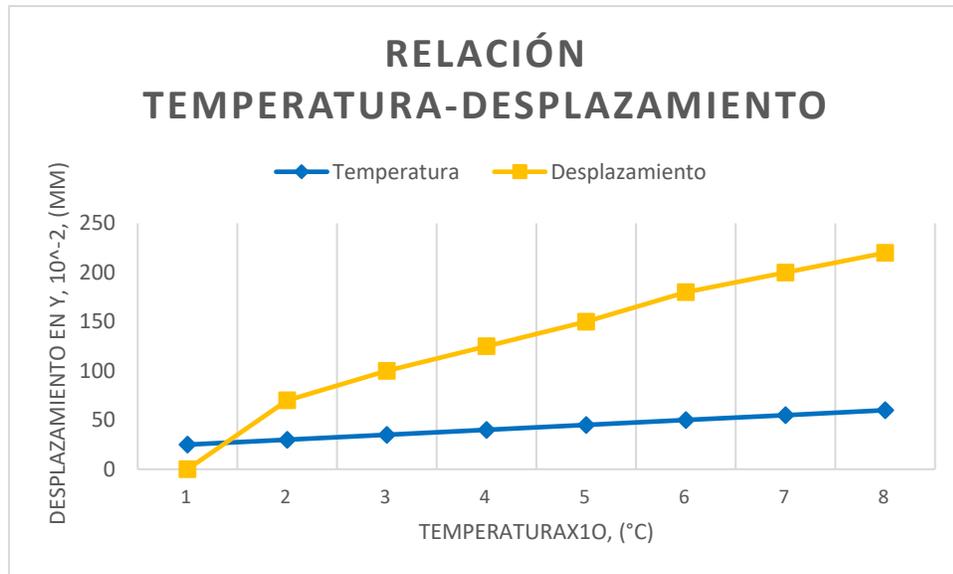


Figura 51 Relación Temperatura-desplazamiento

En las Figuras 52-55 se muestran ejemplos del desplazamiento de la flecha del actuador chevrón Z modificado, que constituye a uno de los brazos de la pinza, vista en el microscopio, en ellas se observa el desplazamiento que tiene conforme pasan los segundos y aumenta la temperatura, comprobando el efecto Joule que se presenta en el material.

El mayor desplazamiento que se logra es de 2.40 mm, al aplicar una temperatura máxima de 65°. Este desplazamiento puede ser útil para accionar algún dispositivo a la temperatura indicada.

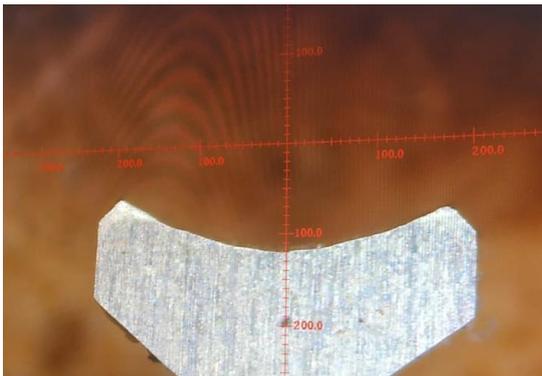


Figura 52 Desplazamiento en la pinza (1).

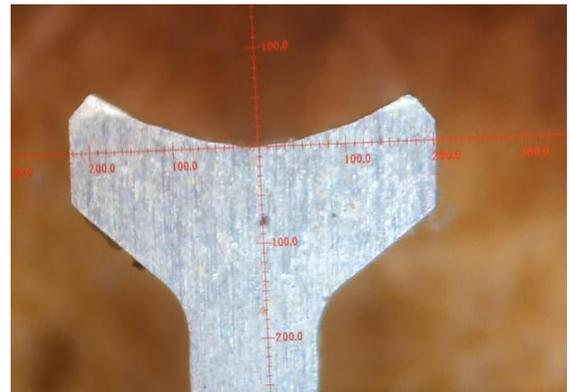


Figura 53 Desplazamiento en la pinza (3).

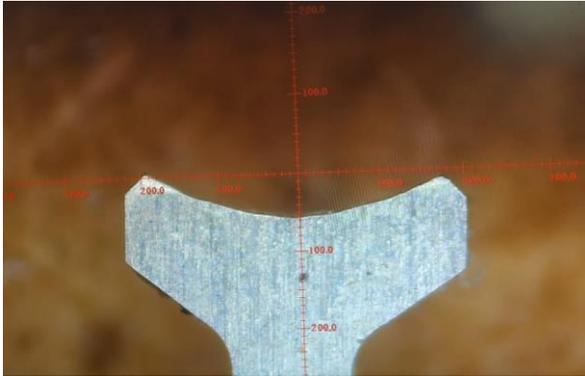


Figura 54 Desplazamiento en la pinza (2).

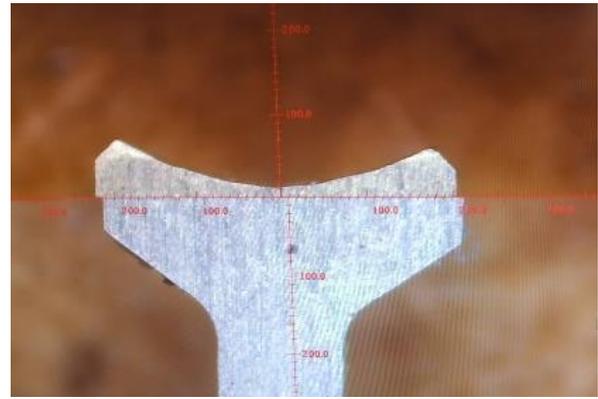


Figura 55 Desplazamiento en la pinza (4).

## 4.6 Determinación experimental de la fuerza

Para el presente análisis se realiza un arreglo entre el microactuador chevrón en escala fabricado en aluminio con una polea mecánica como se observa en la Figura 56, la cual, se sometieron diferentes masas sujetas al final de la polea, con el objetivo de calcular la fuerza que genera el micro actuador, observando el desplazamiento generado por cada masa.

En la Tabla 13, se muestran los desplazamientos obtenidos por cada masa de prueba. En todos los casos la temperatura en las anclas del actuador fue de 65°C.

Se observa que, cuando el peso aumenta en la polea, el desplazamiento es menor, por lo cual, la fuerza en la flecha aumenta. Se considera el mismo escenario y resultados para cada brazo de la micropinza completa. A partir de la Tabla 13, puede observarse que, conforme se incrementa el valor de la masa, hay un incremento en la fuerza, limitada por la masa 4. Si se incrementa el valor de la masa, sobre este indicador, la fuerza empieza a disminuir. Por lo tanto, puede concluirse que la mayor masa que puede soportarse es la masa 4.

}

Tabla 13 Resultados experimentales Fuerza (polea)

Valor de la Masa (g)	Desplazamiento			Fuerza, (N)
	Valor inicial eje	Valor final	Desplazamiento, (mm)	

		-Y, ( $\wedge$ -2, mm)	+Y, ( $\wedge$ -2, mm)		
<b>Masa 1</b>	<b>33.3</b>	-100	130	2.3	326.67
<b>Masa 2</b>	<b>66.66</b>	-110	130	2.3	653.93
<b>Masa 3</b>	<b>100</b>	-120	120	2.2	981
<b>Masa 4</b>	<b>133.33</b>	-140	70	2.1 mm	1307.96

En la figura 56 se observa el arreglo realizado en el tablero de pruebas experimentales, formado por una lámina de hierro horadada. El arreglo experimental mostrado se utilizó para realizar las pruebas de fuerza considerando cuatro diferentes masas.

El arreglo consta de:

- Una polea
- 4 objetos con una masa determinada
- Chevrón alimentado por una diferencia de potencial
- La punta del termopar se une a la flecha que, al calentarse, se desplaza hacia la parte positiva del eje Y (arriba). La temperatura en del termopar, se mide directamente con un multímetro.

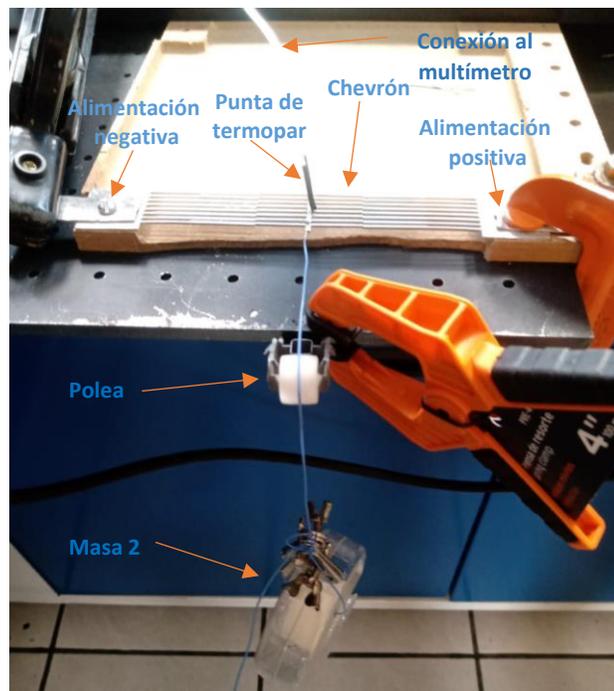
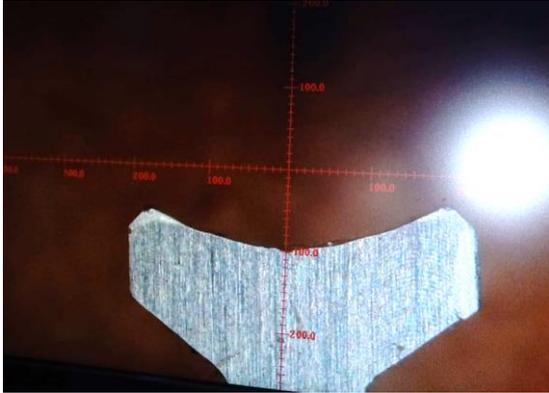
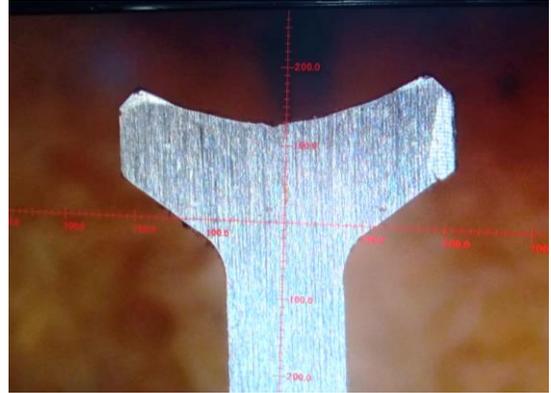


Figura 56 Arreglo para análisis experimental de la fuerza.

En la Figura 57, el valor inicial (posición de origen) de la punta de la flecha en el tablero de pruebas, y observada al microscopio, donde las etiquetas de las marcas mayores indican 1 mm, esto es el 100 observado corresponde a 1 mm. Las marcas menores corresponden a divisiones de 100  $\mu\text{m}$  cada uno. En la Figura 58, se muestra el desplazamiento de la flecha generado con una masa de 33.33 gr en la polea que corresponde a 2.3 mm.



*Figura 57 Valor inicial de la punta de la flecha.*

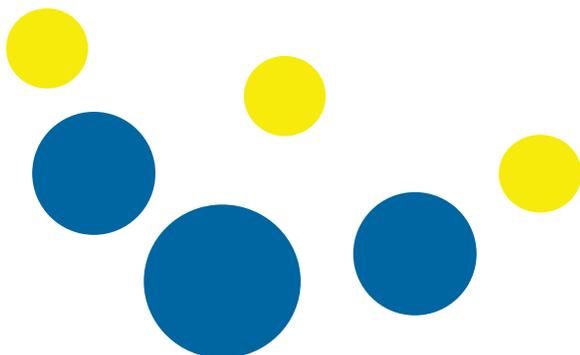


*Figura 58 Desplazamiento de la flecha con masa 1 .*



## **CAPÍTULO 5. DISEÑO, SIMULACIÓN Y CARACTERIZACIÓN DE LA MICROPINZA BASADA EN UN ARREGLO DE ACTUADORES CHEVRÓN DE BRAZO Z MODIFICADO**

En el presente capítulo se muestra el diseño y simulación de la micropinza realizada en Silicio y Aluminio.



## 5.1 Diseño y simulación (Silicio)

Para el diseño del arreglo de los cuatro chevrones, se retomó el archivo de la simulación del chevrón con brazo Z modificado, se realizaron ajustes, como la creación de nuevos planos en el software y “espejos” que ayudaron a determinar la geometría final de la micropinza. La Figura 59 muestra la geometría final.

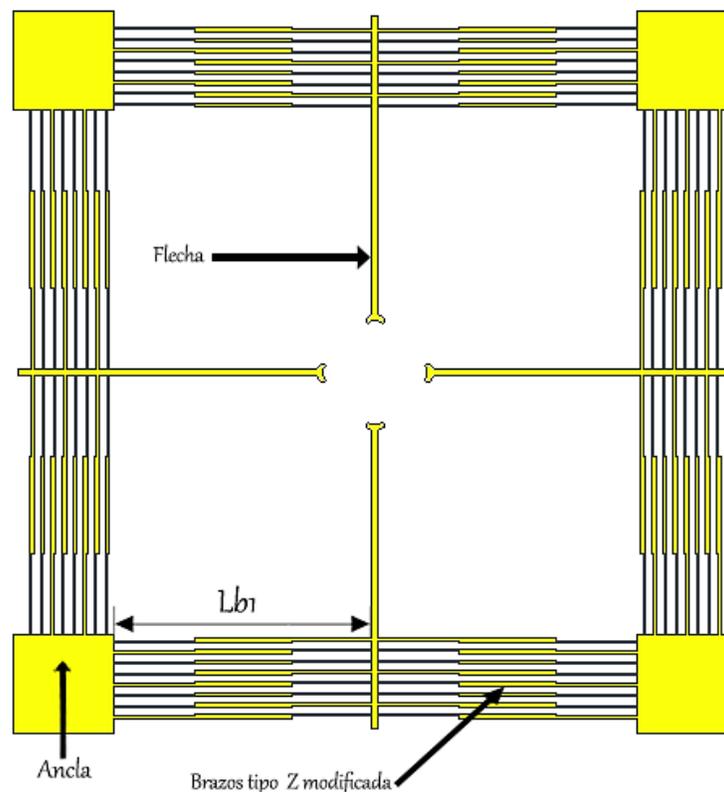


Figura 59 Geometría micropinza (Elaboración propia)

Para iniciar con la simulación se muestra el Árbol de análisis de Workbench en la Figura 60, el cual está compuesto por los mismos elementos con los que cuenta la simulación del chevrón individual, Una geometría, Un bloque de Thermal Electric, y dos bloques de Static Structural.

En la geometría se crearon dos planos más para establecer el diseño final de la micropinza, y con ayuda de estos, se crearon los dos Mirror para girar la estructura en el plano correspondiente (Figuras 61-62).

En la Figura 63 se presentan las condiciones térmicas y eléctricas iniciales, son las mismas que en el caso del chevrón de todos los casos analizados en Silicio. En las Figuras 64-67 se presentan los resultados de la simulación de la micropinza.

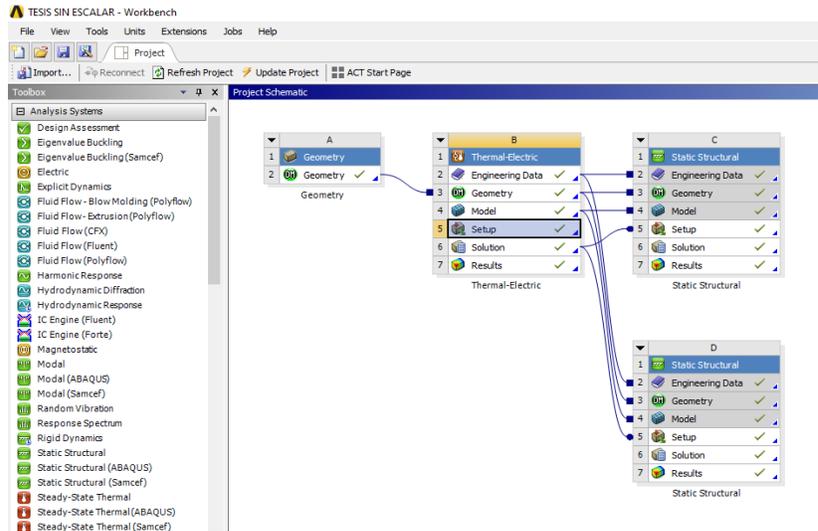


Figura 60 Árbol de análisis de Workbench.

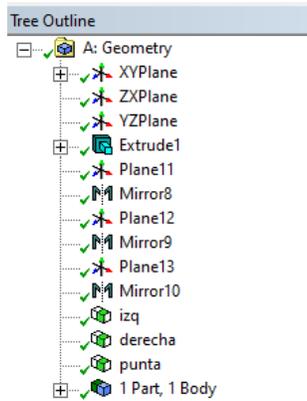


Figura 61 Planos para el dibujo de la geometría de micropinza.

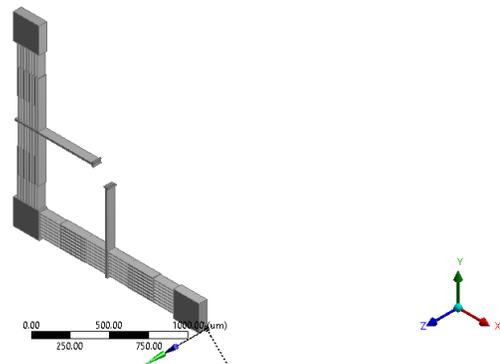


Figura 62 Geometría (construcción con planos)

**Steady-State Thermal-Electric Conduction**  
 Time: 1. s  
 22/06/2022 04:13 p. m.

- A** Temperature: 22. °C
- B** Voltage: 0. V
- C** Voltage: 2.1. V
- D** Convection: 0. °C, 2550. pW/μm<sup>2</sup>·°C

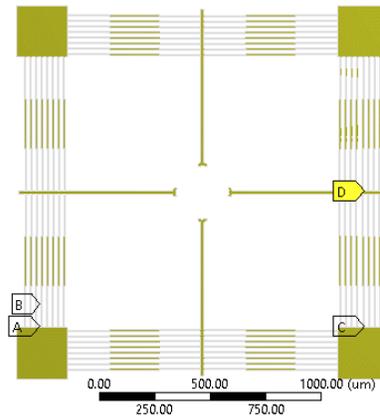


Figura 63 Condiciones iniciales de la micropinza

**B: Thermal-Electric**  
 Temperature  
 Type: Temperature  
 Unit: °C  
 Time: 1  
 22/06/2022 04:14 p. m.

- 99.435 Max**
- 90.824
- 82.212
- 73.601
- 64.989
- 56.378
- 47.767
- 39.155
- 30.544
- 21.932 Min**

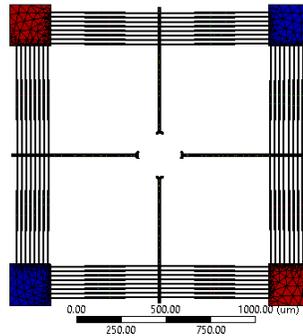


Figura 64 Temperatura en la micropinza. Valor mayor es de 99.435°C, en un par de anclas.

**C: Static Structural**  
 Equivalent Stress  
 Type: Equivalent (von-Mises) Stress  
 Unit: MPa  
 Time: 1  
 22/06/2022 04:16 p. m.

- 159.26 Max**
- 141.56
- 123.87
- 106.17
- 88.477
- 70.782
- 53.006
- 35.391
- 17.695
- 0 Min**

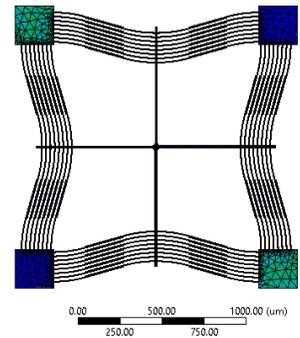


Figura 66 Esfuerzo equivalente de von-Mises, en la micropinza. Valor mayor es de 150.26 MPa (valor menor al esfuerzo último).

**C: Static Structural**  
 Total Deformation  
 Type: Total Deformation  
 Unit: μm  
 Time: 1  
 22/06/2022 04:16 p. m.

- 6.9137 Max**
- 6.1455
- 5.3773
- 4.6091
- 3.8409
- 3.0727
- 2.3046
- 1.5364
- 0.76818
- 0 Min**

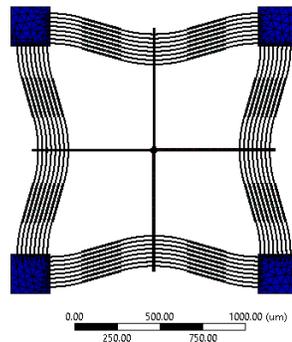


Figura 65 Deformación total en la micropinza. Valor máximo de 6.9137 μm, en las puntas de las flechas.

**D: Static Structural**  
 Force Reaction  
 22/06/2022 04:17 p. m.

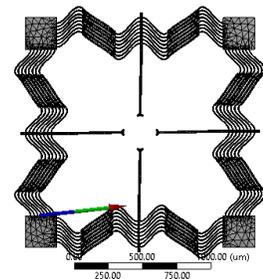


Figura 67 Fuerza de reacción en la micropinza. Valor máximo en Y, 4 μN.

Time [s]	Force Reaction (X) [μN]	Force Reaction (Y) [μN]	Force Reaction (Z) [μN]	Force Reaction (Total) [μN]
1.	38.581	4.3255	-4.6065	39.095

Figura 68 Resultados de Fuerza de reacción (Simulación) Micropinza brazo Z modificado.

## 5.2 Diseño y simulación (Aluminio)

Como en el caso anterior, primero se selecciona al material, ahora se introducen los datos del aluminio que se ocupa para la fabricación de este dispositivo, con el fin de comparar resultados, y a su vez, comprobar el funcionamiento de esta micropinza en escala meso.

En la Figura 69 se muestra el árbol de análisis de Workbench y en la Figura 70 el outline de la simulación.

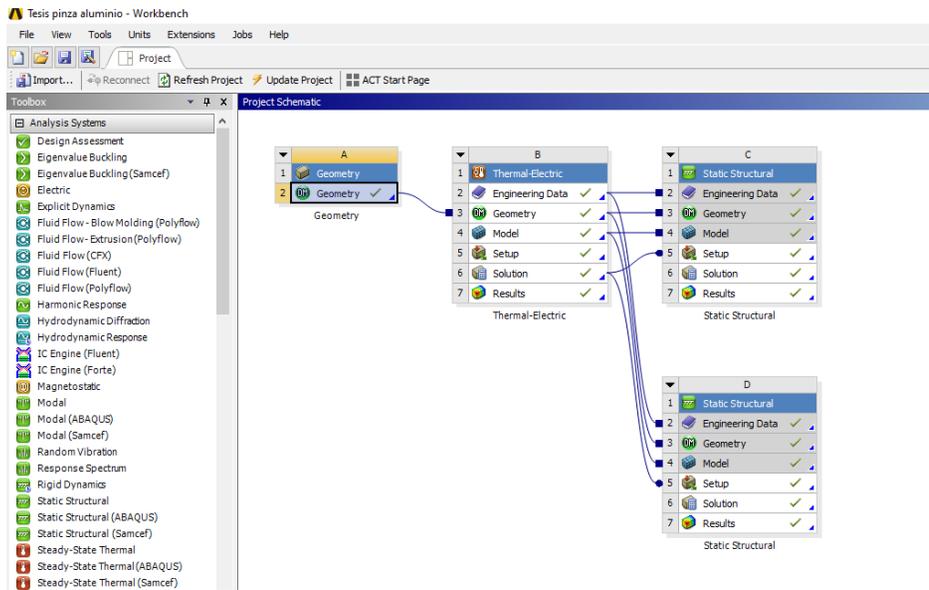


Figura 69 Árbol de análisis de Workbench.

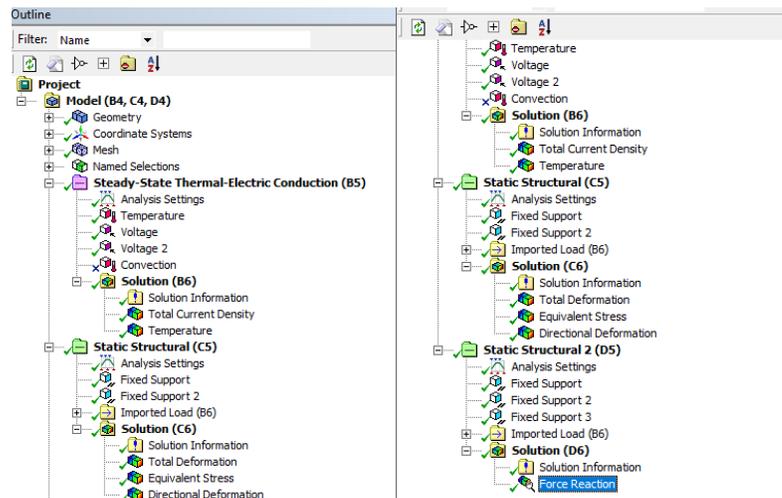


Figura 70 Outline de la simulación.

Los resultados de la simulación se presentan en las Figuras 71-74. El voltaje que se aplicó es de 65 mV, en las anclas donde se observa la mayor temperatura (Figura 71). Las anclas azules fueron aterrizadas (0 V).

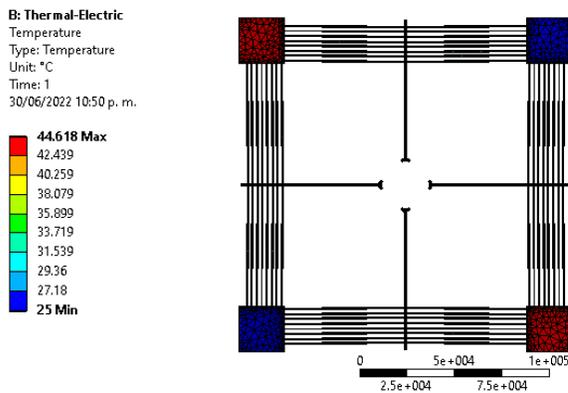


Figura 71 Temperatura micropinza, Temperatura máxima 44.61°C.

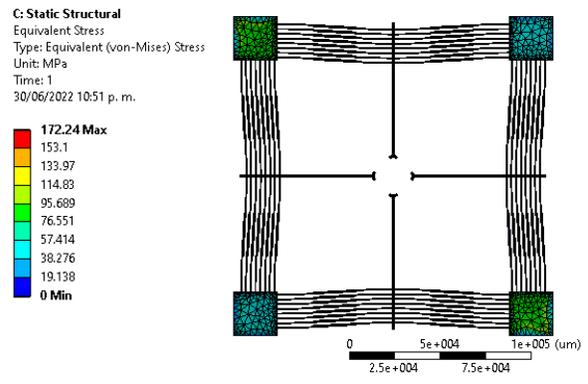


Figura 72 66 Esfuerzo equivalente de von-Mises, en la micropinza. Valor mayor es de 172.24 MPa (valor menor al esfuerzo último).

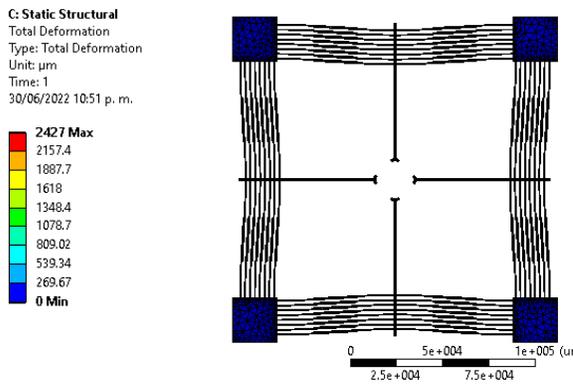


Figura 73a Deformación micropinza, aluminio, deformación máxima 2427µm (2.4 mm)

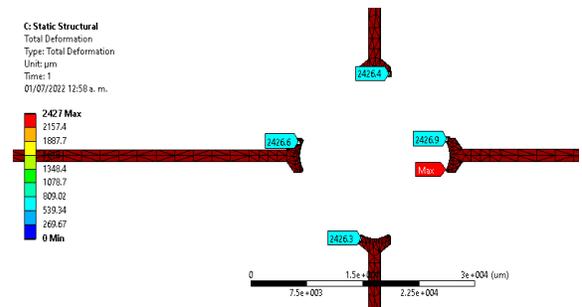


Figura 74b Acercamiento e las puntas de la micropinza de aluminio, deformación máxima 2427µm (2.4 mm).

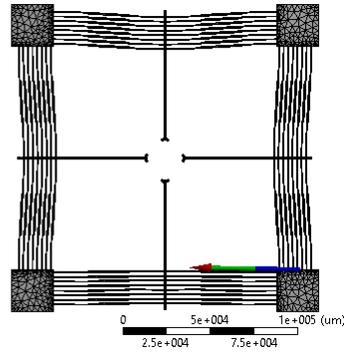


Figura 75 Fuerza de reacción en las puntas de las flechas en la micropinza. Valor máximo en el eje Y de 2.4 N.

Time [s]	Force Reaction (X) [µN]	Force Reaction (Y) [µN]	Force Reaction (Z) [µN]	Force Reaction (Total)
1	-1.3805e+008	2.4058e+006	379.88	1.3807e+008

Figura 76 Resultados de Fuerza de reacción en la micropinza brazo Z modificado.

### 5.3 Fabricación de prototipo en aluminio mediante una Máquina de Control Numérico Computarizado, CNC

Después de realizar la simulación en el programa ANSYSTM, se exporta el formato al software de diseño AutoCAD para modificar la geometría, ubicando al dibujo en los ejes X y Y, al finalizar se exporta el formato dxf2010, como paso siguiente se procede a abrir el software Aspire en el que se realiza el perfilado de los cortes tanto interno como externo, nuevamente se debe calibrar el equipo, en la Figura 69 se muestra la interfaz que muestra el programa para el manejo de la CNC.



Figura 77 Interfaz del programa para el manejo de CNC

Luego de comprobar que se cuenta con los parámetros y características necesarias, se procede a la fabricación del dispositivo. La Figura 77 muestra el proceso que realiza la CNC para realizar el corte del dispositivo.

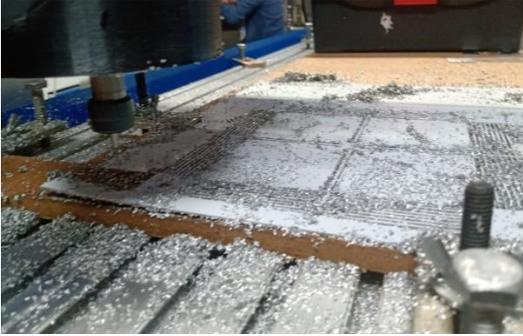


Figura 78 Inicio de corte mediante CNC.

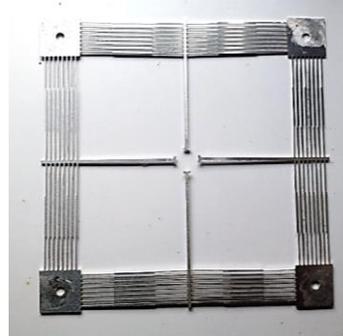


Figura 79 Micropinza fabricada en Aluminio.

Finalmente, en las Figuras 72-74 se muestran las respuestas que se lograron obtener con apoyo de la cámara termográfica, la cual nos muestra las temperaturas que se encuentran en la Tabla 14, con la ubicación correspondiente a la medición.

En la Tabla 14 encontramos la comparación entre las pruebas realizadas con la cámara termográfica y el valor obtenido con el termopar del multímetro, señalando el lugar físico de la prueba en el chevrón. Se observan nuevamente variaciones en las mediciones, que fueron justificadas en el caso del chevrón de brazo Z modificado.

Tabla 14 Pruebas de temperatura con cámara termográfica y termopar del multímetro.

Número de prueba	Valor -Cámara Termográfica, (°C)	Valor en Termopar del multímetro, (°C)	Lugar de la prueba
<b>Prueba 1</b>	33.8.7	38	Parte ancha de brazos Z modificados
<b>Prueba 2</b>	29	35	Flecha del chevrón
<b>Prueba 3</b>	43.6	59	Segmento delgado del Brazo, cercano a la flecha, del lado

			del ancla alimentada.
--	--	--	-----------------------

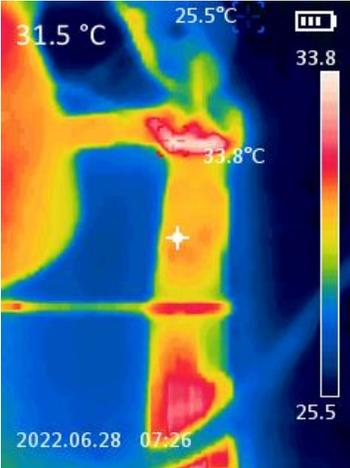


Figura 80 Prueba 1 Cámara termográfica

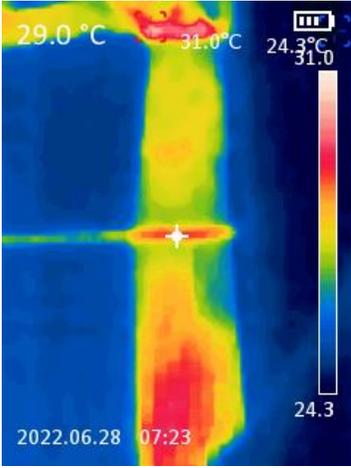


Figura 81 Prueba 2 Cámara termográfica

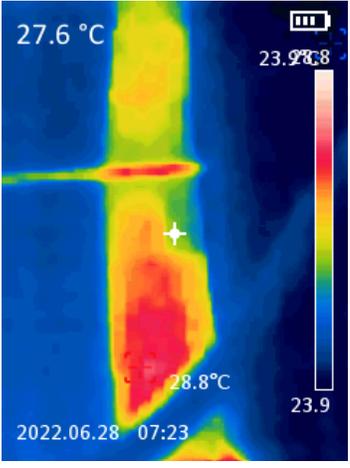


Figura 82 Prueba 3 Cámara termográfica

De manera experimental, en la Figura 82, se observa la posición en reposo, mientras que, al alimentar al arreglo de chevrones, se obtuvo un desplazamiento en los brazos (flechas) izquierda, derecha, arriba y debajo de 0.6, 0.5, 0,4 y 0.4 mm, respectivamente, de manera simultánea (Figura 83). Las diferencias se atribuyen a la alta demanda de corriente, que no se distribuye de forma totalmente equitativa, debido a limitaciones particularmente de conexiones adecuadas, requiriéndose cables especiales, de alto calibre. Se espera que, con la microfabricación en Silicio, se solventen estas desviaciones de las condiciones de operación deseadas.

Con relación a la fuerza, idealmente, la fuerza total es equivalente a la suma de las fuerzas de reacción en cada una de las flechas, la dificultad en la medición experimental de la fuerza total radica nuevamente en el alto nivel de corriente utilizado. Por lo que, sólo se realizó la medición en uno de los chevrones del arreglo, esto es, de manera individual. La mayor masa que pudo soportarse es de 133.33 g, equivalente a 1.30796 N.



Figura 83 Posición inicial en la micropinza

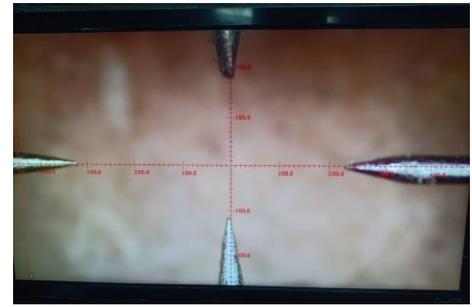


Figura 84 Desplazamiento final simultáneo de cada una de las flechas de la micropinza

## 5.4 Comparación numérica y experimental, pinza implementada en Aluminio

Se realiza la comparación de los datos obtenidos, la cual se muestra en la Tabla 15.

Tabla 15 Comparación de resultados numéricos y experimentales de la pinza escalada e implementada en Aluminio.

Parámetro	Pinza Resultados numéricos	Pinza Resultados experimentales	% de error
Desplazamiento total en cada eje ( $d_{individual \times 2}$ ) (mm)	4.2	Promedio 0.95	342.1
Fuerza total ( $F_{individual \times 4}$ ) (N)	9.6	5.23	81.64

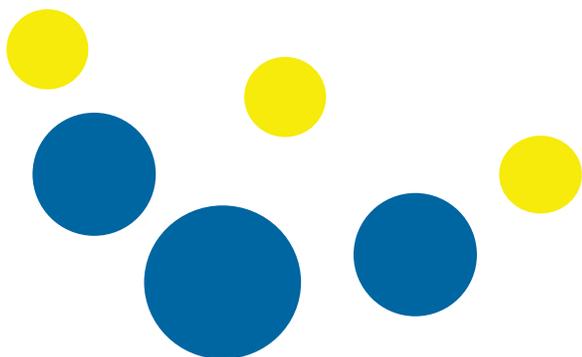
Como puede apreciarse, la variación es muy alta, debido a que, se enfrentaron dificultades ante el alto valor de corriente requerida para lograr la deformación de los brazos de la pinza. En particular, en el caso del desplazamiento, ya que las mediciones se realizaron de manera simultánea, lo que incrementó la pérdida de energía.

No obstante, lo que se buscaba era validar el funcionamiento de la pinza, por lo que, se considera que pudo apreciarse en esta escala, aunque con las limitaciones mencionadas.



## **CAPÍTULO 6.- CONCLUSIONES Y TRABAJO FUTURO**

En este capítulo encontramos las conclusiones, resultados obtenidos y encontrados en cada capítulo y finalmente se redactan los trabajos futuros.



En la actualidad las tecnologías cada vez más se enfocan en la miniaturización de dispositivos, lo cual abre un campo de oportunidades muy grande para el desarrollo de nuevos dispositivos MEMS que cumplan o satisfagan las necesidades de estas tecnologías, con el fin de optimizar energía, procesos, tiempos y espacios de diseño.

Se propuso un novedoso diseño de micropinza electrotérmica basada en tecnología MEMS, en la cual se integró un arreglo de cuatro actuadores chevrón (de forma V) frontalmente encontrados, con brazos Z modificados, y cuyas flechas alargadas constituyen los 4 brazos de la pinza convencionalmente abierta, con una apertura inicial de 80, con Silicio como su material estructural.

No se consideró la microfabricación de la micropinza diseñada en Silicio, debido a limitaciones actuales en los procesos en el Centro de Ingeniería y Desarrollo Industrial, CIDESI, centro con el que se tiene convenio de colaboración. Por la razón anterior, para validar la funcionalidad del diseño de manera experimental, se simuló y escaló a la pinza original en un factor de escalamiento de 100, con aluminio 60-63, como material estructural. En este caso, se realizan también las simulaciones correspondientes y los cálculos teóricos.

## **6.1. Conclusiones**

Después de analizar las geometrías del actuador chevrón Z de brazo convencional, con el actuador chevrón de brazos Z modificados, se observó que, este último es el más adecuado para el tipo de objeto de sujeción considerado. Por lo que, este actuador fue el seleccionado para realizar el diseño de la micropinza.

La geometría lograda con el arreglo de chevrones de brazos Z modificados es novedosa, además de basarse en un arreglo relativamente sencillo.

Con la apertura lograda con la micropinza formada por el arreglo de chevrones de brazo Z modificados, pueden sujetarse objetos de dimensiones en el rango de los 80 a los 93 micrómetros, con pesos en un rango cercano a 20.61 g, por lo que se pueden sujetar 1.7175 m de filamento, que tenga un peso de 12 kg/km.

Sobre el prototipo escalado correspondiente al actuador chevrón de brazos Z modificados, implementado en Aluminio, los resultados experimentales se comparan con los teóricos y numéricos obteniéndose aproximaciones aceptables, considerando como elemento base de comparación a los resultados numéricos. En desplazamiento se tiene un error teórico contra el experimental de 37.82%. Mientras que, sobre la fuerza de reacción, se tiene un error teórico comparado con el experimental de 27%.

Con relación al prototipo de la pinza escalada e implementada en Aluminio, se manera experimental se obtuvo un desplazamiento en los brazos (flechas) izquierda, derecha, arriba y debajo de 0.6, 0.5, 0,4 y 0.4 mm, respectivamente. Las diferencias se atribuyen a la alta demanda de corriente (100.7 A), que no se distribuye de forma totalmente equitativa, debido a limitaciones particularmente de conexiones adecuadas, requiriéndose cables especiales, de alto calibre.

Con relación a la fuerza, idealmente, la fuerza total es equivalente a la suma de las fuerzas de reacción en cada una de las flechas, la dificultad en la medición experimental de la fuerza total radica nuevamente en el alto nivel de corriente utilizado. Por lo que, sólo se realizó la medición se realizó de manera individual. La mayor masa que pudo soportarse es de 133.33 g, equivalente a 1.30796 N.

Por lo tanto, de manera adicional, se valida experimentalmente el desempeño esperado en desplazamiento y fuerza en escala meso, aunque con ciertas limitaciones, impuestas por el alto nivel de corriente involucrado.

## **6.2 Trabajo Futuro**

Como trabajo futuro se espera realizar el análisis de las ecuaciones para el desplazamiento, fuerza y rigidez del chevrón de tipo Z modificado, las cuales requieren un mayor nivel de conocimiento y manejo en el área matemática, entre otros.

Además, se espera realizar la impresión en micro maquinado de esta micropinza y comprobar su funcionamiento práctico al sujetar o liberar una sección de filamento.

Es recomendable realizar mejoras en las geometrías para lograr un mayor desplazamiento y fuerza, e incluso lograr mejorar el diseño incorporando la bioinspiración y aprovechar este recurso como elemento de mejora continua.

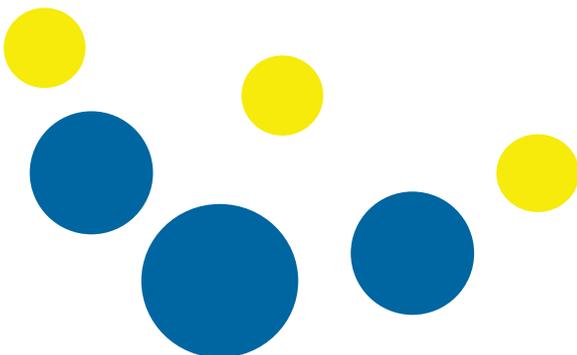
## Bibliografía

- Nikoobin M., N., & Hassani. (2012). Derivación y análisis de los parámetros efectivos en rendimiento de las micropinzas. *Ciencia Iranica*, 1-5.
- Alanís Navarro, J. A. (2008.). *Desarrollo del proceso de fabricación PolyMEMS/INAOE*. Puebla, México : s.n.: Tesis.
- ANSYS. (2017). *Ansys advantage-magazine*. Obtenido de Ansys advantage-magazine.: <http://www.ansys.com/-/media/Ansys/corporate/resourcelibrary/article/AA-V6-I2-Full-Version.pdf>
- Ansys Workbench Multiphysics, v. 1. (2020). Isotropic elasticity data. Blacksburg, VA, USA. Obtenido de <http://www.matweb.com/services/contact.aspx> (accessed on Junio 2022).
- Bryzek, J. (1996). Impact of MEMS technology on society . *Sensors and Actuators A* 56, 1-3.
- Chable P. (2019). *DISEÑO Y CARACTERIZACIÓN DE MICROPINZAS*. Obtenido de Tesis Doctoral, Universidad Autónoma del estado de Morelos: <http://riaa.uaem.mx/xmlui/bitstream/handle/20.500.12055/1784/VAPECH01T.pdf?sequence=1>
- Choreño, O. P. (22 de Junio de 2022). *Instituto de ingeniería UNAM*. Obtenido de <http://www.ii.unam.mx/es-mx/AlmacenDigital/Gaceta/Gaceta-Septiembre-October-2019/Paginas/micromecanica-aplicada-a-biologia-biomems.aspx>
- Ehrfeld W, , F. (2000). Fabrication of microstructures using the LIGA process. *Revista Ciencia e Ingeniería. Vol. 27, No. 3*, 109-117.
- Fiberline, L. b. (29 de Junio de 2022). *syscom*. Obtenido de syscom: <https://www.syscom.mx/producto/IC-DROPA2-1C-LINKEDPRO-BY-FIBERHOME-172102.html>
- Fujita H. (1996). *Future of actuators and microsystems, sensors and actuators*, A56,, 105–111.
- Fujita, H. (1998). Microactuators and micromachines. *IEEE, Vol. 86 No. 8*, 721–1732.
- Garnica, C. C. (2021). *Diseño de un sistema de escritura y dibujo virtuales, basado en un acelerometro*. Ciudad de Mexico: Centro de investigacion y estudios avanzados del instituto politecnico nacional.
- Ghatkesar, M., Barwich, V., Braun, T., Ramseyer, J.-P., Gerber, C., Hegner, M., . . . Despont, M. (2007).
- Ghatkesar, M., Barwich, V., Braun, T., Ramseyer, J.-P., Gerber, C., Hegner, M., . . . Despont, M. (2007). . Higher modes of vibration increase mass sensitivity in nanomechanical microcantilevers. *Nanotechnology*, 18-24.
- Guan, C., & Zhu, Y. (2010). New Electrothermal Microactuator with Z-shaped Beams. *Journal of Micromechanics and Microengineering.*, 209-213.
- Janson, e. a. (2000). Fabrication of microstructures using the LIGA process. *IEEE Micro Robots an Teleoperators Worksop*.
- Jia, Y. &. (2013). Design of a Monolithic Dual Axis Electrostatic Actuation MEMS Microgripper with Capacitive Position/Force Sensors. *IEEE International Conference* (págs. 817-820). Beijing: IEEE.

- LEE, K. B. (2011). *Principios de Sistemas Microelectromecánicos*. Hoboken, New Jersey: John Wiley & Sons, Inc.
- Maseeh, F., Swiecki, A., & Finch, N. (2000). Reducing MEMS product development and commercialization time. *Future Fab International* , 8 ., 1-8.
- Naula I., A. G., Carrillo, R., & Izurieta, C. (2016). Modelación y simulación numérica de la Ecuación de Richards para problemas de infiltración (Vol. 7). *Revista Enfoque UTE*, 46-58.
- Oliver, Korvink, J. G., & Paul. (2006). *MEMS a practical guide to desing, analysis and applications*. USA.
- Quiñones N, F. J. (2009). *Desarrollo y caracterización de microestructuras Joule con poly-silicio*. Tonantzintla, Puebla: INAOE.
- Reddy, V., & Kumar, G. (2013). Design and Analysis of Microcantilevers with Various Shapes. *Using COMSOL Multiphysics Software. Int. J. Emerg. Technol. Adv. Eng.*, 2250-2459.
- Somà, A., & Lamoni, S. (2014). Design of an electro-thermally actuated cell microgripper. *Microsystem Technologies*, 2-10.
- TDK InvenSense, S. R. (2021). Mercado de actuadores MEMS - Análisis de investigación de la industria global. *Investigación Maia*, 111.
- Tecpoyotl-Torres, M., Rodríguez-Fuentes, S., Koshevaya, S., & Vargas-Chablé, P. (2020). Capítulo 7 Análisis paramétrico de los elementos del actuador chevrón. En J. O. A. Marroquín, *Handbook T-V CIERMMI Mujeres en la Ciencia Ingeniería* (págs. 117-140). Querétaro: ECORFAN.
- Xu, Q. (2015). Design, Fabrication, and Testing of an MEMS. *IEEE SENSORS JOURNAL, VOL. 15, NO. 10* , 1-10.
- Yang , S., & Qingsong, X. (2016). Design of a microelectromechanical systems microgripper with integrated electrothermal actuator and force sensor. *Avanced Robotic Systems*, 1-3.



## CAPÍTULO 7.- ANEXOS



## Anexo 1- Constancias

**R E C O N O C I M I E N T O**

El Consejo de Ciencia y Tecnología del Estado de Morelos  
otorga el presente reconocimiento a:

**Dalia Margarita Martínez Rodríguez**

Por su participación como tallerista en el evento "Museo Fest 2022"  
llevado a cabo el 29 de abril del 2022

  
**ADRIÁN MARGARITO MEDINA CANIZAL**  
Director del Centro Morelense de Comunicación  
de la Ciencia



 SECRETARÍA DE DESARROLLO ECONÓMICO Y DEL TRABAJO CCYTEM CONSEJO DE CIENCIA Y TECNOLOGÍA DEL ESTADO DE MORELOS MUSEO DE CIENCIAS DE MORELOS 



**R E C O N O C I M I E N T O**

**"SOY MUJER Y HAGO CIENCIA"**

El Consejo de Ciencia y Tecnología del Estado de Morelos  
otorga el presente reconocimiento a:

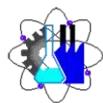
**DALIA MARGARITA MARTÍNEZ RODRÍGUEZ**

Por su participación en el evento "Soy mujer y hago ciencia"  
llevado a cabo en el mes de febrero del 2022

  
**JOSÉ FRANCISCO PULIDO MACÍAS**  
Director General del Consejo de Ciencia y Tecnología  
del Estado de Morelos

  
**ADRIÁN MARGARITO MEDINA CANIZAL**  
Director del Centro Morelense de Comunicación  
de la Ciencia

 SECRETARÍA DE DESARROLLO ECONÓMICO Y DEL TRABAJO CCYTEM CONSEJO DE CIENCIA Y TECNOLOGÍA DEL ESTADO DE MORELOS MUSEO DE CIENCIAS DE MORELOS



**DRA. MARGARITA TECPOYOTL TORRES.**  
**DR. JOSE GERARDO VERA DIMAS.**  
**DR. PEDRO VARGAS CHABLE.**  
**DR. OUTMANE OUBRAM.**  
**DR. JOSE ALFREDO RODRIGUEZ RAMIREZ.**

**P R E S E N T E**

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

**Titulado:**

**MICROPINZA BASADA EN UN ARREGLO DE ACTUADORES CHEVRÓN PARA LA  
MANIPULACIÓN DE MICROALAMBRES**

Que presenta (el) o (la) **C. MARTINEZ RODRIGUEZ DALIA MARGARITA**, del programa educativo de **INGENIERÍA ELÉCTRICA-ELECTRÓNICA.**

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

**DRA. VIRIDIANA AYDEÉ LEÓN HERNÁNDEZ**  
**DIRECTORA**

Se anexa firma electrónica

**D I C T A M E N**

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

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

VOTO	NOMBRE	FIRMA
	<b>DRA. MARGARITA TECPOYOTL TORRES.</b>	
	<b>DR. JOSE GERARDO VERA DIMAS.</b>	
	<b>DR. OUTMANE OUBRAM.</b>	
	<b>DR. JOSE ALFREDO RODRIGUEZ RAMIREZ.</b>	
	<b>DR. PEDRO VARGAS CHABLE.</b>	

***El voto del comité es aprobatorio, se anexan firmas electrónicas***

VALH/fjbg



UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DEL  
ESTADO DE MORELOS

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

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

### Sello electrónico

**VIRIDIANA AYDEE LEON HERNANDEZ** | Fecha:2022-06-25 01:27:21 | Firmante

igRcD98wR9u6Bqb5DdavicHrB1LzZ9HARjX7NwICNHMGEG0Dk59JialpQ9xM7HiYrQHPTvYpJrkSQ1dMM3J4F9vLEbCRE3bnL7ZBmBSsbFm3Z32BK6johr0AtGixwifmJgM2IHU  
HIEBGjOwl5+2dijSMeg/RJHIL47czpViiEUjFCEBoI857qNasW5sbH0YO6hSthJS4JZ8ZeuMyPTmRZppoBVS8TodzfEicb+Yu6RxlH+hArVIYc2E7uLQVYVfas4iC652019xAYAD8  
VOIdT2XN+X/45q6XLqVwlxsOayB4WpQxQmDvOd36Js2HbgfGgq1upuZDtDF5eEsp9QZbA==

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



[Pvdn7Sxgs](#)

<https://efirma.uaem.mx/noRepudio/aY77ys4173wbQvHWmR0MEoHRGIFomPpn>





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:2022-06-27 18:06:19 | Firmante**

Ts/HhEvhU/qIPqNmzTSMh1otJMfruNIZn9SKk3dY9q3gTTa6/cMuXjZf+v5X4uaknUz7oYGlseoamU+RIHkXL0CDo01Lah66dlCynCf5gcotMRXw0LyJh3+03k/V8ICJAVLcF74BtpbYk8cfEt99haUdKErj4bfRonzaO9BvqiB/Z7yI0iGam5/sTICjV+ym43cmR6wXRy9I6EXFLwMMchy4FtLk44I0LoS49QI/vw12tT6O726UGYSqbyM+Njp5YFLcK+lyaeD/pf95UJYKsMogtJKrHAKchmeZ6czMQlwQJKK5sm1USznAHs7krGZ/nZdKI5JFhv4H21g==

**MARGARITA TECPOYOTL TORRES | Fecha:2022-06-27 18:35:51 | Firmante**

P/H7ebl3dRXO6oSFMYbPfv+gLh5FSIfN2j01TzhZe3yZGf009Kf+QjgaVuV4OXUVpaY1P1L9Qc6hObok+BqjVWuO3zX9J1UStvTdxWbY2ljbZg07/XTuKanO3ETuHztm67C1OvzG55/mQyVXYhs0nuUQ56qrmFoi64sqApOo6DuYjPWFOVrOst8Su5d4xFszazFACi33skzco0+ZWoE2BnocYLDKI1tWL1frOVFbLAELqekxDKIKpE4OS56i9PmgMJ+y0fYiGhqN6aQ/RuylosvwQ0c2hw6doZ/kKaRzZUWgXQ+UWcqBovJWk0jxC1T3GCzI84leH1pt14mXo04PA==

**PEDRO VARGAS CHABLE | Fecha:2022-06-29 00:05:35 | Firmante**

rR8DEq54eKCbQiX2TWmarCt37SFeVmwfcy7oNWPevkKpW0A+m+pfXqO+byWikiHv0F5WMUaYULMKo5fQoNFBi+q0T7qUwI48ObsKuGBHGFJmVcwb0MhWC/I95zQrhfmVpGjR7vJkw4hoUtUiJcQM6wrX236A3PpvW9RQM20Ya66R0MKyJikovNSz2H2M8Sm2IXzLRN73UXw7GuamH+TZhTWzkyVrKFFU+KIKV7d9STdK7jrSMHloYOzhnKtf+u5kfoFmrxriarLbKc7e11wr2Nylcve+iFYsldNd8Y4Mr2na1Ymo1xs5900r140tdWltjYFUAb4ooAstSpSiQ==

**JOSE ALFREDO RODRIGUEZ RAMIREZ | Fecha:2022-06-29 12:15:34 | Firmante**

laUmyks9o+6KJ+rmfLBODFvCIZWcfYAtMrGnfrRD/08LPQyPLAP8UH2NsVvCC1XUU68OAZuGBSalsWadCTdE+Rbc2dSHDG41ZjgNC5Int+GQtBU5m8BhIZ0xK+eEYsXhIQRJvP/80CXLRNTv6b+KJXW8hkrS8Wc9nPOQf7ZS1I/96qpb9eOdablf+G3gEX9UDDh32n4sVvd57sew2/b7HG4xfDL+6T0DaSCu+DhWvK17JGvalZMUqOVQuYbE28fTOH43Bap6VM6aQ9s6gsP4Qrs4F3yJCOcwodjnuHxmmBwDf9XFK4TRgES9Nqar/z00/aNp5ss9EaWkVxflpU10A==

**JOSE GERARDO VERA DIMAS | Fecha:2022-06-29 13:46:47 | Firmante**

Or5qd2rCp6cgfxqAxkiN+pZq513/9FbK4WrdzRJqear22yRHOGYKT+2zsBkZFDn4WTyvaD5z7RXCYPnsOmCXXiiKd8mclEfbUTY6ekWy406qMwTZ7Y4mkJBPcEUaqCDyX4NrNLa7RkEiI4HE4UvmQQw0IDyL/dDz2CTGWEVZw4N4+jAhmVoLmbk98eTjo1Qzj5R/Stim2XkiN3z/F+E+TzSqtUu/0E8tR8o5ID+UM/V44OhHmTe+V1mnfTbt/HV0wgLy9r+XY2bkjF9n+HnNqpNpNgL5uujbaChIK6zNyWcQ9QnmZHt0KI1IU0tZmEgkMWR6f5HyZ1JxDf4LEu1w==

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



fIKCqt9py

<https://efirma.uaem.mx/noRepudio/RxEw1hkNeqMqQqUpEkkUuOttLrb31D0z>

