



UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DEL  
ESTADO DE MORELOS

## **UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DEL ESTADO DE MORELOS**

INSTITUTO DE INVESTIGACIÓN EN CIENCIAS BÁSICAS Y  
APLICADAS

**CENTRO DE INVESTIGACIÓN EN INGENIERÍA Y CIENCIAS APLICADAS**

**“MICROPINZA MEJORADA, BASADA EN ARREGLOS  
FLEXIBLES, Y SU ESCALAMIENTO”**

TESIS PARA OBTENER EL GRADO DE:

LICENCIATURA EN TECNOLOGÍA CON ÁREA TERMINAL  
ELECTRÓNICA

C. RUBENIO MEDINA CRUZ

**DIRECTOR**

**DRA. MARGARITA TECPOYOTL TORRES**

**SINODALES**

**Dr. José Antonio Marbán Salgado**

**Dr. Omar Paillero Sandoval**

**MICA. Jorge Arturo Sandoval Espino**

**Dr. Pedro Vargas Chablé**

**Dra. Margarita Tecpoyotl Torres**

**CUERNAVACA, MORELOS, MARZO 2022**



UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DEL  
ESTADO DE MORELOS



## INSTITUTO DE INVESTIGACIÓN EN CIENCIAS BÁSICAS Y APLICADAS



Control Escolar de Licenciatura

### VOTOS DE APROBATORIOS

Secretaria ejecutiva del Instituto de Investigación en Ciencias Básicas Aplicadas de la Universidad Autónoma del Estado de Morelos.

P r e s e n t e .

Por medio de la presente le informamos que después de revisar la versión escrita de la tesis que realizó la C. **MEDINA CRUZ RUBENIO** con número de matrícula **10003999** cuyo título es:

**“Micropinza mejorada, basada en arreglos flexibles, y su escalamiento”.**

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

Cuernavaca, Mor a 06 de abril de 2022

Atentamente  
Por una universidad culta

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

**MTRO. JORGE ARTURO SANDOVAL ESPINO**  
**DR. OMAR PALILLERO SANDOVAL**  
**DRA. MARGARITA TECPOYOTL TORRES**  
**DR. PEDRO VARGAS CHABLÉ**  
**DR. JOSÉ ANTONIO MARBÁN SALGADO**

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



UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DEL  
ESTADO DE MORELOS

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

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

### Sello electrónico

**OMAR PALILLERO SANDOVAL | Fecha:2022-04-07 09:07:32 | Firmante**

qX3JkZnMzEm+Dmnk7cdDs2tZQRKZ/u3w0pbS+ODgy8TusgktWw0bWJGRaVfZofWysYObH+aXcZaFnhDcvuBz6j3XOL/YiCthVIBIWZ5kJYX9OmTAd2yxaYwXkSLi0aal+SIGW  
O20tkDf2WWMB1fCAhTt384If+FYgcBbE73Xl6S4WxUtRliiPRNV65ogRzu0TtwofgKTDxznA8QL4xuOUfUD+mMBzY/0vJX+0Zab0pYOIN+OxXZ3M5KakWeNxbViiQPqkforF17DX  
dDU+pWN+ymW97Slac6cUBFV4ekctSEi/iOYpdAg7uKNY3WkpdMVvnnqhmJlx7RfWYDPxBHN5A==

**PEDRO VARGAS CHABLE | Fecha:2022-04-07 11:57:41 | Firmante**

iLeYgfivPaWn99reeselt4oqTyYiZUJC6RXzD6iG9u9LhGcmibZ99QTqWZZWHxnYShvgCNBIQKEc6OiOdjguv4JxVb549D9QMCDGBOv3isiuBPXVSOEbZyoMl6cJm1IIAUvPnW5q  
G8MLgP7oFxcyudTuQsm3roQGylY20Q054uxKQRzsgUgKST9QBT+V6YQ+lhHLrmRgS+HDyKY71VjSHq/sFVtyxUCnG31a2lfeSQsO3/xnvgneRfOxaGhB70GeUPE1iDWypSsIIP  
FQ7edgQXRdMfjLY+UwmgjrEqEVEx2M8paH7IBrfv/7b+pCW+k+8C7yFvXOt1Ql1eqwohO2g==

**MARGARITA TECPOYOTL TORRES | Fecha:2022-04-07 13:43:37 | Firmante**

ilgNwYlcehgCBkoRdsPk8kO9ZcBqq/ZUuWdTmDNN7ck6YmHrIOaYlItjYV+ur5ktu2t6eaS+RZlPFSiMWq0BHYRD8VDkQh4WnFNC7wcpigd2VXwX9jKWGnEuEtODA7ODj0En9Y  
xX3ZEVX6puV1KGaDOPCd2d+8tM4LeH1Z0U8xuMC0ZMKJIOHz6uQ9cQGcD1sps5zvvn+NXc8+Y4A/103IEVRQZYqinvludEbMxumh6DxWZAqP2K0wTAhNa+2RFoTFTMdHu  
aK23iShj0iHFhXhOL/u78WVjZxu2COEHe2RbsHcvEXA6P7irc5jqilYl1kRaOb4B0SezlC7lf4Ew==

**JORGE ARTURO SANDOVAL ESPINO | Fecha:2022-04-07 16:21:04 | Firmante**

cCzO3qgCOWoXU5KflzMKn2OR4Jf0Z+VD/LDvmYHSTLLEwEEe/4si0ObBtHcSaiaTNDH0zWIKZe0LNwI3WYfIqrbm81r1Bt3QYkLv9/CF8OLHs2V2fxOWO/AiKK3wklkcQZuds2  
ONoanNtP7maED7JUPMzrF8Qx6hcfXl9qDgLC6wiMhsVyY675wRW5fRE6fZYPNasgl7p6v1EEb72cf/QxhT9SQ8pNhpccQurm2zrK0NFXg9qkneLDorz/6MB8Xtw65+fljTtBaud7E  
mRWscqtgq6RQZnp6OwwZXgDPKE+1PMAeVIYk5tgQ1KOAKCK1W5dcT5Oiz7YXFuqqRq5w==

**JOSE ANTONIO MARBAN SALGADO | Fecha:2022-04-23 14:02:12 | Firmante**

IXa60We3VjXyGqYbu133Swgami+70PySxSvJm44BvBUUmkxc1MQv5VGdXPIF94znmjHit6QhBYabpf5udNF0WxcSCFUuGctTBEIlgj8nBZKROHINQEy+93Kp3NnQL4jclBeCY  
XZjDlfi/5GR6dppvOqwjtUQUh+0PPt6t3c/ULgHuXI48RPHk68BMUuKM5CDRlo6ytpHEgtdlpcwk7iK9CIZ7x4q7JM3TceEmVH4hw0QbSMBgPL1WoJyZFR0oYNJA1cj61Pj/VnjTJx  
CbK44dcol0HLhIPrsu7M/HSiOTjMGn2eSafZf01euEdKvE8Vvy/WRCdxKzm1x9pprgVEB6w==

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



[mrxfXQ3J](#)

<https://efirma.uaem.mx/noRepudio/GotD1GaZ1cXdPhDscZE39rja4HpO7g5X>



## Resumen

Esta tesis se enfoca en el mejoramiento de una micropinza normalmente abierta basada en un actuador chevrón, realizada en un arreglo de barras flexibles, que originan a los brazos con forma de pantógrafo; con la finalidad de que no se genere una alta temperatura, en las mandíbulas de la pinza escalada e implementada en aluminio para su funcionamiento e incrementar, con ello el potencial de uso se utiliza una fuente de alimentación que genere una temperatura de aproximadamente 300°C en una de las anclas del actuador chevrón. Nuestro interés se enfoca en la temperatura ya que, debido a que se trata de un metal, la temperatura se eleva notablemente.

Cabe señalar que, el desplazamiento total entre las mandíbulas de la micropinza sin escalamiento, cuando se aplica la temperatura máxima mencionada, es de  $3.43 \times 10^{-5}$  m. A este valor de temperatura se obtiene una fuerza de reacción en la punta de las mandíbulas de  $4.25 \times 10^{-4}$  N. Esta apertura permite sujetar microobjetos en un rango de dimensiones entre 45  $\mu\text{m}$  y 80  $\mu\text{m}$ . La apertura inicial es de 45  $\mu\text{m}$  de punta a punta de la micropinza.

La temperatura en las puntas fue de 232.9°C. Durante el proceso de mejoramiento, con el propósito de optimizar al microactuador chevrón, se realizaron parametrizaciones considerando a sus elementos principales como: grosor de la estructura, ángulo de inclinación, ancho y largo de brazo. Para realizar las parametrizaciones se utilizó el software ANSYS.

Se realizó la validación experimental del desempeño del prototipo con un factor de escalamiento de 100, así como del proceso de fabricación, con resultados de desplazamiento cercanos a los obtenidos en la simulación, con un error del 9.63%.

Considerando a las aperturas inicial y final, es posible sujetar objetos como microalambres, micromanipulación de ensamblaje de elementos cuadrados de 40  $\mu\text{m}$ , y dispositivos mecánicos de enchufe entre dos piezas de

40  $\mu\text{m}$  (con diámetros entre 50 y 80  $\mu\text{m}$ ), con pesos menores a  $43.32 \times 10^{-6}$  kg y que tengan una temperatura de fusión menor a 232.94°C.

Con relación a la estructura propia de la micropinza, debe señalarse que se trata de una configuración basada en un arreglo de elementos flexibles, donde la distribución angular de la base y las proporciones en las longitudes del pantógrafo es fundamental en su respuesta. Además, su tamaño es compacto puede mencionarse, además, que es competitiva tanto en fuerza, como en desplazamiento, con relación a las que fue comparada, dentro del margen de voltaje aplicado.

## Abstract

This thesis focuses on the improvement of a normally open micro gripper based on a chevron actuator, made in an arrangement of flexible bars, which originate the arms with pantograph shape; In order not to generate a high temperature in the jaws of the scaled gripper and implemented in aluminum, for its operation, and thus increase the potential for use a power supply that generates a temperature of approximately 300 ° C in one of the anchors of the chevron actuator is used. Our interest is focused on the temperature since, due to the fact that it is a metal, the temperature rises significantly.

It should be noted that, the total displacement between the microgripper jaws without scaling, when the maximum temperature is applied, is  $3.43 \times 10^{-5}$  m. At this temperature value a reaction force is obtained at the tip of the jaws of  $4.25 \times 10^{-4}$  N. This aperture allows clamping micro-objects in a range of dimensions between 45  $\mu\text{m}$  and 80  $\mu\text{m}$ . The initial aperture is 45  $\mu\text{m}$  from tip to tip of the microgripper. The temperature at the tips was 232.9°C. During the improvement process, in order to optimize the chevron microactuator, parameterizations were performed considering its main elements such as: thickness of the structure, angle of inclination, width and length of the arm. ANSYS software was used to perform the parameterizations.

Considering the initial and final openings, it is possible to hold objects such as micro-wires, micro-manipulation of 40  $\mu\text{m}$  square jigsaw assembly, and mechanical plug device between two 40  $\mu\text{m}$  pieces (with diameters between 80 and 50  $\mu\text{m}$ ), with weights less than  $43.32 \times 10^{-6}$  kg, and having a melting temperature lower than 232.94°C.

Experimental validation of the prototype performance with a scaling factor of 100 and, of the manufacturing process was carried out, with displacement results close to those obtained in the simulation, with an error of 9.63%.

Regarding the structure of the microgripper, it should be noted that it is a configuration based on an arrangement of flexible elements, where the angular distribution of the base and the proportions in the lengths of the pantograph is fundamental in its response. In addition, its size is compact. It can also be mentioned that it is competitive both in force and displacement, in relation to those compared, within the applied voltage range.

## AGRADECIMIENTOS

Agradezco a:

La Dra. Margarita Torres Tecpoyotl quien fue mi guía durante el proceso de tesis. Además de haber sido mi profesora en varias asignaturas durante mi carrera universitaria.

Al Maestro Josué Osvaldo Sandoval Reyes por apoyarme durante el proceso de fabricación de la pinza.

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

A Mis profesores por haber transmitido mucho de su conocimiento en mí.

Al Centro de Investigación de Ingeniería y Ciencias Aplicadas (CIICAp), por haberme permitido ser parte de su alumnado.

A CONACyT, por el apoyo de beca de tesis de licenciatura, 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.

## DEDICATORIA

A mis padres, por el apoyo y la motivación el día a día para seguir adelante.

A mis hermanos que, me motivaron y apoyaron durante este periodo académico, brindándome su invaluable apoyo y confianza.

A mis padres, porque todo lo que soy se los debo a ellos y por inculcar en mí la importancia de estudiar.

Mis queridos compañeros de laboratorio que siempre me brindaron su apoyo.

Dios por haberme dado la sabiduría y fuerza para culminar esta etapa académica.

# Contenido

Resumen.....	ii
Abstract.....	iv
AGRADECIMIENTOS .....	vi
DEDICATORIA .....	vii
CAPITULO 1: INTRODUCCIÓN.....	2
1.1 Introducción.....	2
1.2 Antecedentes.....	2
1.3 Pregunta de investigación.....	4
1.4 Hipótesis. ....	4
1.5 Planteamiento del problema. ....	4
1.6 Objetivo general .....	5
1.7 Objetivos específicos .....	5
1.8 Justificación.....	6
1.9 Equipos .....	6
1.10 Limitaciones .....	6
1.11 Organización de la tesis .....	6
CAPITULO 2: MARCO TEÓRICO.....	9
2.1 Tecnología MEMS .....	9
2.2 Micropinza .....	9
2.3 Actuación electrotérmica.....	10
2.4 Estado del arte sobre micropinzas.....	11
2.4.1 Overview of Microgrippers and Design of a Micromanipulation Station Based on a MMOC Microgripper (Agnus, Nectoux, & Chaillet, 2013).....	11
2.4.2 A novel electrothermal compliance microgripper (Vargas-Chable, Ferrara-Bello, Sandoval-Reyes, & Tecpoyotl-Torres, 2019). ....	12
2.4.3 Micro-tweezers: design, fabrication, simulation and testing of a pneumatically actuated micro-gripper for micromanipulation and microtactile sensing (Alogla; Amalou; Balmer; Scanlan; Shu; Reuben, 2015). ....	13
2.4.4 A new design of piezoelectric driven compliant-based microgripper for micromanipulation (Zubir, Shirinzadeh, & Tian, 2009) .....	13
2.4.5 Design and simulation of an optimized electrothermal microactuator with Z-shaped beams .....	14

2.4.6 Comparison of Different Materials on Performance of Chevron Shaped Electrothermal Microgripper.....	14
2.5 Microactuador Chevrón .....	16
2.5.1 Ecuaciones para el modelado matemático del microactuador chevrón .....	17
2.5.2 Ecuaciones para el modelado matemático del microactuador chevrón con arreglos de resistencias.....	18
2.6 Pantógrafo .....	21
2.8 Herramienta CAD .....	21
2.8 Ansys .....	22
CAPITULO 3: METODOLOGÍA .....	24
3.1 Metodología de la tesis.....	24
3.2. Proceso de diseño y simulación de la micropinza y sus respectivos componentes en ANSYS. .	25
3.3. Proceso de obtención de resultados numéricos.....	26
CAPITULO 4: DISEÑO, SIMULACIÓN Y CARACTERIZACIÓN DEL ACTUADOR CHEVRÓN.....	30
4.1. Proceso de diseño del actuador chevrón.....	30
4.1.1 Software utilizado en la simulación.....	30
4.2. Características del material a utilizar en el chevrón .....	30
4.2.1 Determinación de requerimientos y restricciones .....	32
4.3. Diseño y modelado del chevrón .....	33
4.3.1 Selección de componentes.....	34
4.3.2 Actuación electrotérmica del chevrón .....	34
4.4. Resultados de la simulación del actuador en Silicio .....	34
4.4. Comparación de resultados analíticos y numéricos, así como los porcentajes de error del chevrón implementado en Silicio .....	36
4.5. Graficas .....	38
4.6. Diseño y modelado del chevrón en aluminio.....	41
4.7 Resultados de la simulación en aluminio.....	41
4.8 Comparación de resultados analíticos y numéricos, así como los porcentajes de error del actuador chevrón en aluminio.....	43
4.9 Graficas del actuador chevrón en Aluminio.....	44
CAPITULO 5: DISEÑO, SIMULACIÓN Y FABRICACIÓN DE MICROPINZA .....	48
5.1 Especificaciones de diseño.....	48
5.2 Determinación de los materiales .....	48
5.3 Determinación de requerimientos y restricciones .....	48

5.4 Diseño preliminar.....	48
5.5 Resultados de simulación en pinza sin escala.....	49
5.6 Resultados de simulación de pinza escalada, en Aluminio.....	51
5.7 Comparación entre las micropinzas desarrolladas.....	53
5.8 Proceso de fabricación.....	55
5.7 Resultados de las pruebas físicas.....	59
5.7.1 Resultados de las pruebas de la fabricación final de la micropinza.....	62
CAPÍTULO 6. CONCLUSIONES Y TRABAJO FUTURO.....	70
6.1 Conclusiones.....	70
6.2 Trabajo futuro.....	71
Referencias.....	72



## Índice de Figuras

Figura 1: micropinza previa (Colín, 2020).....	3
Figura 2 Diagrama esquemático de la micro pinza electrotérmica reportada por (Ali et al, 2011). .....	11
Figura 2-1 Diagrama esquemático de la micropinza electrotérmica Chevrón (Aravind, Ramesh, Ramya, & Kalaiarasi, 2016) .....	15
Figura 2-2 Actuador Chevrón (Chable et al, 2019). .....	17
Figura 2-3 Modelo resistivo del actuador chevrón, adaptado de (Álvarez, 2011). .....	19
Figura 2-4 Pantógrafo (Patila, Aneraob, & Chinchankar, 2018). .....	21
Figura 3-1 Metodología general. ....	24
Figura 3-2: Proceso de diseño en Ansys. ....	26
Figura 3-3: Diagrama de obtención de resultados numéricos. ....	27
Figura 4-3 Microactuador chevrón (Elaboración propia). ....	33
Figura 4-4 Distribución de temperatura.....	34
Figura 4-5 Deformación total del microactuador chevrón.....	35
Figura 4-6 Fuerza total de reacción.....	35
Figura 4-7 Esfuerzo en la flecha. ....	36
Figura 4-8 Ángulo de inclinación vs desplazamiento. ....	39
Figura 4-9 Ángulo de inclinación vs fuerza. ....	39
Figura 4-10 Grosor de la estructura vs fuerza. ....	40
Figura 4-11 Grosor de la estructura vs desplazamiento.....	40
Figura 4-12 Distribución de temperatura en Aluminio. ....	41
Figura 4-13 Deformación total. ....	42
Figura 4-14 Fuerza total .....	42
Figura 4-15 Esfuerzo de la flecha. ....	43
Figura 4-16 Grosor de la estructura vs fuerza del chevrón en aluminio. ....	45
Figura 4-17 Grosor de la estructura vs desplazamiento.....	46

Figura 5-1 Dimensiones de la micropinza preliminar.....	49
Figura 5-2 Desplazamiento total, correspondiente a 18.3 $\mu\text{m}$ , ubicado en las puntas de la pinza, obtenido al aplicar 0.6 V. ....	50
Figura 5-3 Fuerza total de reacción.....	50
Figura 5-4 Dimensiones de la micropinza escalada.....	51
Figura 5-5 Desplazamiento total de pinza escalada, correspondiente a 1.82 mm, ubicado en las puntas de la pinza, obtenido al aplicar 0.6 V. ....	51
Figura 5-8 Extensión de ANSYS a AutoCAD. ....	55
Figura 5-9 Importar la pinza en AutoCAD. ....	55
Figura 5-10 Procesamiento de importación.....	56
Figura 5-11 Micropinza importada en AutoCAD. ....	56
Figura 5-12 Micropinza guardada en extensión DFX.....	57
Figura 5-13 Software Mach3 CNC Controller. ....	58
Figura 5-14 Fabricación de la micropinza con desfases en el corte. ....	59
Figura 5-15 Fabricación de la micropinza final y base.....	59
Figura 5-16 Montaje de prueba. ....	60
Figura 5-17 Posición inicial de la micropinza.....	61
Figura 5-18 Temperatura aplicada 75.4°C.....	61
Figura 5-19 Movimiento de la flecha. ....	61
Figura 5-20 Temperatura aplicada 180°C.....	62
Figura 5-21 Movimiento de la flecha a 180°C. ....	62
Figura 5-22 Montaje de prueba final. ....	63
Figura 5-23 Apertura inicial de la micropinza.....	64
Figura 5-24 Posición inicial de la flecha.....	64
Figura 5-25 Apertura de las puntas.....	65
Figura 5-26 Desplazamiento de la flecha. ....	65
Figura 5-27 Apertura de las puntas a 150°C.....	66

Figura 5-28 Desplazamiento de la flecha .....66

Figura 5-29 Apertura de las puntas a 180°C.....67

Figura 5-30 Desplazamiento de la flecha .....67

Figura 5-31 Temperatura .....68

## Índice de Tablas

Tabla 1 Resultados de la micropinza previa. ....	3
Tabla 2 Comparación de diferentes materiales. ....	15
Tabla 4.1 Parámetros del silicio (Si) (Yang & Qingsong, 2017) y aluminio (Thangavel, Sekar, R, & Sukumar, 2016) .....	31
Tabla 4.2: Dimensiones del Microactuador Chevrón .....	33
Tabla 4.3 Resultados simulados y analíticos obtenidos de la parametrización del ángulo de inclinación. ....	36
Tabla 4.4 Resultados simulados y analíticos obtenidos de la parametrización del grosor de la estructura. ....	37
Tabla 4.5 Resultados analíticos y numéricos obtenidos de la parametrización del grosor de la estructura. ....	43
Tabla 5.1. Comparación de valores de esfuerzo Von-Mises. ....	54

---

---

## CAPITULO 1: INTRODUCCIÓN

En este capítulo se presentan los objetivos particulares y general, así como la justificación de esta investigación y las limitaciones bajo las cuales se desarrolló este trabajo.

# CAPITULO 1: INTRODUCCIÓN

## 1.1 Introducción

Las micropinzas forman parte de los Sistemas Microelectromecánicos (MEMS). Ellas son ampliamente requeridas para la manipulación de objetos en escala micro y nanométrica. Gracias al rápido desarrollo de la ciencia y la tecnología en las últimas dos décadas, estos dispositivos han sido ampliamente estudiados (Electromecánicos, 2013).

Las aplicaciones clave de las micropinzas son: traslación y manipulación de microobjetos, por ejemplo, en aplicaciones quirúrgicas (Agnus, Nectoux, & Chaillet, 2005), el microensamblaje, etc., por lo que se han diseñado bajo diferentes geometrías. En el mercado se comercializan micropinzas con diferentes materiales y especificaciones diversas.

Existen diferentes tipos de actuación que se aplican para el funcionamiento de las micropinza, tales como electrostáticos, electrotérmicos, piezoeléctricos, neumáticos y electromagnéticos, los cuales pueden ser utilizados para actuar micropinzas, dedicados a diversas aplicaciones (Power, Thompson, Anastasova, & Yang, 2018). Nuestro interés en este trabajo es el electrotérmico.

En este trabajo se realizará la mejora en el diseño de una micropinza previa, con actuación electrotérmica, además de realizarse su escalamiento y fabricación en aluminio.

## 1.2 Antecedentes

La micropinza en la que se basa es en la micropinza con arreglos de pantógrafos, para aplicaciones demostrativas, implementada en PLA.

La micropinza previa cuenta con las siguientes características:

Se diseñó en Polisilicio. Los brazos se basan en amplificadores de desplazamiento en un arreglo similar al de un pantógrafo. Las dimensiones de la micropinza se muestran en la Figura 1.

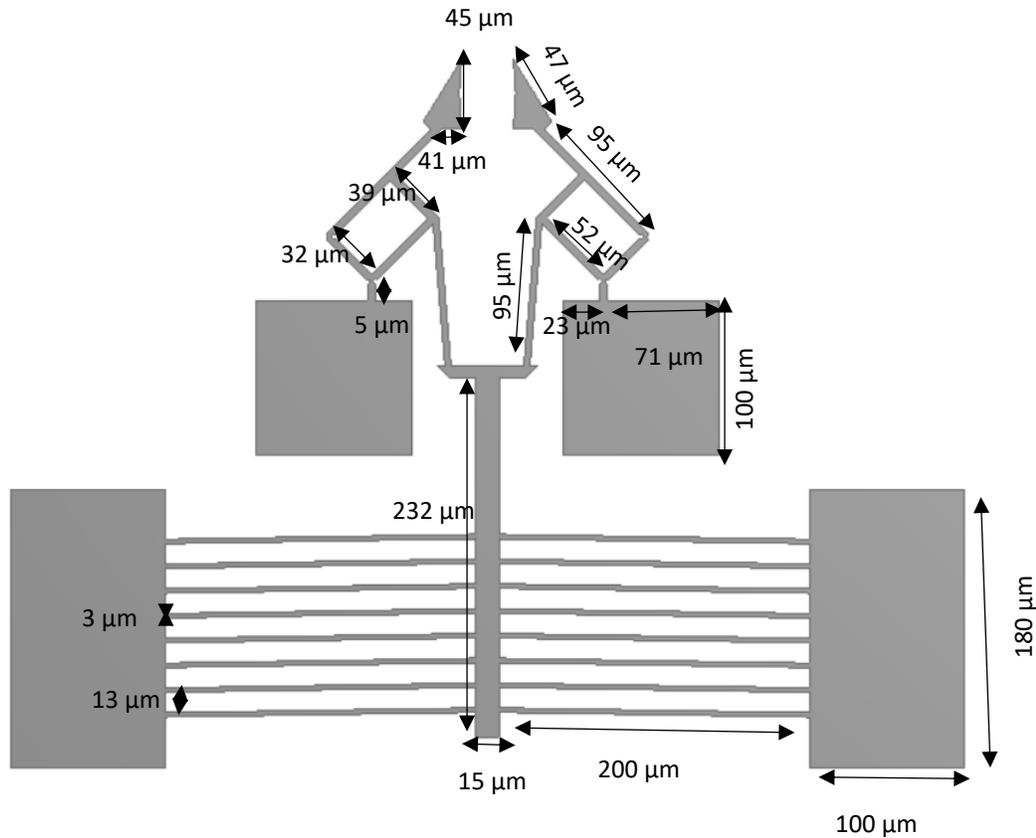


Figura 1: micropinza previa (Colín, 2020).

En la Tabla 1, se muestran los resultados de voltaje, corriente generada, temperatura, desplazamiento, fuerza y esfuerzo máximo de la micropinza simulada en Ansys.

Tabla 1 Resultados de la micropinza previa.

Voltaje (V)	Corriente generada (A)	Desplazamiento (m)	Fuerza máxima (N)	Esfuerzo máximo
5	$2.68 \times 10^{-2}$	$4.67 \times 10^{-5}$	$2.10 \times 10^{-3}$	$1.63 \times 10^{+10}$

Esta pinza fue escalada y fabricada en impresión 3D, utilizando PLA, la cual fue utilizada para talleres infantiles llamados “Descubriendo a las microtecnologías”. El uso continuo de estas pinzas hacía que se presentara una fractura en la base de los pantógrafos que forman a los brazos de la pinza.

### 1.3 Pregunta de investigación.

¿Es posible mejorar la flexibilidad de los brazos de una micropinza implementada en aluminio?

¿Al engrosar la viga que conecta a las anclas de la pinza con los brazos de forma similar a pantógrafos, superará el esfuerzo último?

### 1.4 Hipótesis.

#### Antecedente

Una micropinza que utiliza dos secciones con forma de pantógrafo como brazos, genera un amplio desplazamiento, debido a que es un dispositivo de amplificación. Sin embargo, al implementar la bisagra en la viga que conecta a los brazos con el ancla mecánica, es un elemento susceptible de ruptura.

#### Hipótesis

Si se engrosa la viga de conexión de brazos a ancla mecánica, es posible mantener un valor de esfuerzo por debajo del esfuerzo último, en una pinza escalada e implementada en Aluminio.

### 1.5 Planteamiento del problema.

En el laboratorio de Electrónica y Dispositivos para sistemas de Comunicación, muchos de los diseños generados en los últimos años sobre sistemas microelectromecánicos (MEMS), no han podido ser microfabricados. Se cuenta con las simulaciones de estos diseños. Cabe señalar que, aunque el costo de

fabricación es alto, la razón fundamental por la que actualmente no han sido fabricados son las limitaciones debidas a la contingencia sanitaria.

Esto hizo necesario que algunas estructuras fueran escaladas para su fabricación utilizando impresión 3D, validando el funcionamiento de manera mecánica, tal es el caso de la pinza en la que se basa este trabajo, la cual fue descrita en la sección anterior, cuyos brazos son similares a estructuras denominadas pantógrafos.

Por lo anterior, se determinó la realización de esta tesis para mejorar el diseño y facilitar su uso continuo. Además, se planea posteriormente, utilizar un metal para llevar a cabo su implementación, con la finalidad de incrementar su potencial de aplicación.

#### 1.6 Objetivo general

Mejorar el diseño de una micropinza basada en arreglos, flexibles, similares a pantógrafos, utilizando un material metálico, empleando un escalamiento determinado por las características del proceso de fabricación, así como por los materiales y recursos disponibles.

#### 1.7 Objetivos específicos

A continuación, se presentan los objetivos específicos realizados en este periodo de tesis.

- Analizar el funcionamiento de la micropinza previamente diseñada.
- Realizar simulaciones de desplazamiento, fuerza y esfuerzo.
- Mejorar el diseño previo para evitar la ruptura.
- Seleccionar un material apropiado para el escalamiento de la micropinza.

## 1.8 Justificación

El interés en las micropinzas se debe a su amplio uso en diversas áreas, tales como la ingeniería bioquímica, la medicina y la electrónica. Las micropinzas se utilizan ampliamente en la micromanipulación y el microensamblaje.

En el campo tecnológico, aportará una geometría mejorada que, a futuro podría publicarse en alguna revista de investigación, aportando al estado del arte.

## 1.9 Equipos

En este caso, la implementación se llevará a cabo utilizando la máquina de control numérico CNC, que se tiene en el laboratorio.

Para el uso de la CNC, se tomó un curso intensivo de capacitación, aportando a fortalecer el perfil del autor, ya que se adquirieron nuevas habilidades,

Para el desarrollo de esta tesis, se requiere también de un conocimiento profundo en el software Ansys™ Workbench, cuyo uso por el autor de este trabajo es reciente. Cabe señalar que en CIICAp se cuenta con la licencia correspondiente.

## 1.10 Limitaciones

Este trabajo se desarrolló en el periodo noviembre 2021-marzo de 2022. Cabe señalar que, la asistencia de estudiantes al Centro se llevó a cabo a partir del mes de enero de 2022, debido al entorno de pandemia, y que aún existen limitaciones presenciales debido a él.

## 1.11 Organización de la tesis

La presente tesis está organizada por 6 capítulos, mediante la siguiente distribución:

- Capítulo 1.** Este capítulo presenta como punto de partida la introducción, objetivo general, objetivos particulares, planteamiento de problema, la justificación y limitaciones de este trabajo de investigación.
- Capítulo 2.** En este capítulo se da una breve introducción sobre los MEMS. Se describen también las geometrías del cantiléver y el chevrón, los cuales serán considerados como elementos básicos de la micropinza. Además, se presenta una breve descripción de las micropinzas, cuyo funcionamiento se basa en un actuador chevrón.
- Capítulo 3.** Se establece la metodología seguida para el diseño de la micropinza.
- Capítulo 4.** Se presentan el diseño y la simulación del actuador 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 muestran los procesos de fabricación utilizados y resultados de las pruebas realizadas.
- Capítulo 6.** Conclusiones y trabajo futuro.

---

---

## CAPITULO 2: MARCO TEÓRICO

En este capítulo se presenta, una breve introducción de los sistemas microelectromecánicos. También se describe al actuador chevrón, ya que es el utilizado en el diseño de la micropinza. Se muestran, además, artículos representativos de micropinzas y, se describen las características básicas de su funcionamiento.

## CAPITULO 2: MARCO TEÓRICO

En esta sección se presenta una breve introducción de los sistemas microelectromecánicos (MEMS). Se enfoca el interés en micropinzas actuadas por chevrón, que se llevan a cabo en la investigación del estado del arte.

Además, se describe al actuador chevrón, debido a que es el utilizado para el diseño de la micropinza.

### 2.1 Tecnología MEMS

Los Sistemas Micro-Electro-Mecánicos, MEMS. Se definen típicamente como dispositivos de pequeñas dimensiones compuestos por elementos activos y pasivos microfabricados y que realizan diferentes funciones como percepción, procesamiento de datos, comunicación y actuación sobre el entorno (portaldoc, 2021).

Los tipos de MEMS pueden variar desde estructuras relativamente simples, hasta sistemas electromecánicos muy complejos en los que múltiples elementos se mueven bajo el control de la electrónica integrada. Gracias a los avances en el campo de los semiconductores, los MEMS son una tecnología que puede aplicarse utilizando una gran diversidad de materiales y técnicas de fabricación; la elección dependerá del tipo de dispositivo que se busque fabricar y el sector comercial en el que desee operar. Esta visión de los MEMS, donde microsensores, microactuadores, microelectrónica y otras tecnologías se pueda integrar en un microchip, se espera que sea uno de los avances más importantes del futuro.

### 2.2 Micropinza

Entre los MEMS, se encuentran las micropinzas, las cuales se utilizan en diferentes campos como, por ejemplo, la manipulación de partículas en la industria

mecatrónica, siempre y cuando se satisfaga los requerimientos de cada caso, los más importantes serían: frecuencia, apertura, fuerza y temperatura de operación. Algunas micropinzas se basan en actuadores chevrón o en arreglos de trampolines. La mayoría de las micropinzas están diseñadas para sostener o manipular diferentes formas de micropartículas o microcomponentes con suficiente fuerza sin provocar algún daño. También se utilizan para realizar microensamblaje.

### 2.3 Actuación electrotérmica

Los actuadores electrotérmicos funcionan con tensiones bajas y ofrecen una gran fuerza de salida. Sin embargo, su uso en operaciones de sujeción es limitado debido al elevado consumo de energía y a las altas temperaturas de funcionamiento (Varona et al, 2009).

La Figura 2 muestra una micropinza electrotérmica que contiene un par de mordazas accionadas por dos actuadores electrotérmicos y un sensor integrado. La tensión aplicada a través de los extremos de las vigas de los actuadores establece un flujo de corriente a través de ellas que, a su vez, experimentan un calentamiento debido al efecto Joule. El aumento de la temperatura provoca una expansión térmica de las vigas que hace que la viga central se mueva. Se asigna un pequeño ángulo a las vigas para lograr el movimiento de la viga central en la dirección deseada hacia arriba. Con la ayuda de flexiones horizontales y verticales, el movimiento vertical de la viga central se transmite al movimiento horizontal de la punta de cada mandíbula (Ali et al, 2011).

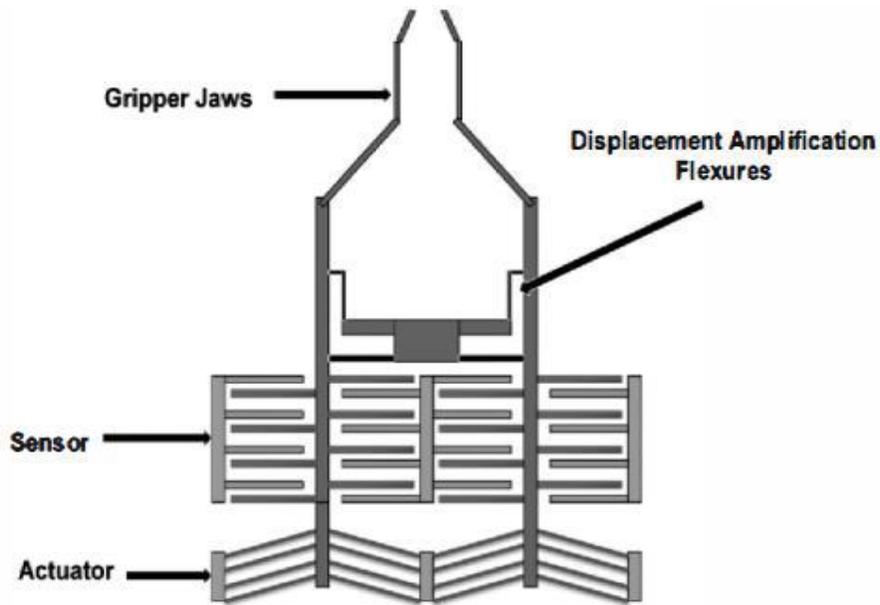


Figura 2 Diagrama esquemático de la micro pinza electro térmica reportada por (Ali et al, 2011).

En este trabajo, el actuador chevrón es el utilizado en el diseño de la micropinza diseñada previamente, y que se espera mejorar, por lo que, su funcionamiento se describe a continuación.

## 2.4 Estado del arte sobre micropinzas

En la siguiente subsección, se muestran algunas micropinzas impulsadas por actuadores chevrón, los cuales se conforman por un arreglo de cantilévers.

### 2.4.1 Overview of Microgrippers and Design of a Micromanipulation Station Based on a MMOC Microgripper (Agnus, Nectoux, & Chaillet, 2013)

En este artículo se presenta una descripción general de las recientes micropinzas desarrolladas. Se utiliza la terminología end-effectors para los de sistemas de micro manipulación. Las micropinzas son punto crucial de tales sistemas para su eficiencia y su fiabilidad.

La mayoría de los efectores finales son mecánicos o electromecánicos y sirven como pinzas, herramientas de proceso o sensores. Van desde simples pinzas de dos dedos para tareas de sujetar y colocar hasta complejos sistemas de sensores, en particular, para la inspección robótica (Ferrobotics, 2021) .

Agnus et al, 2013 enumera una gran cantidad de prototipos desarrollados en laboratorios, y aún se observa un fuerte interés de la comunidad científica por las micropinzas. Una pasión justificada porque el campo de la micro manipulación debido a que las necesidades crecientes de su uso. La micro manipulación se refiere al manejo de objetos con dimensiones de 1  $\mu\text{m}$  a 1 mm, y microensamblaje concierne a muchas áreas.

Observamos, que la mayoría de los micropinzas presentadas en este artículo ofrecen un grado de libertad, normalmente movimiento de apertura / cierre de los dedos o, en el mejor de los casos, dos grados de libertad, cuando los dos dedos se controlan de forma independiente.

2.4.2 A novel electrothermal compliance microgripper (Vargas-Chable, Ferrara-Bello, Sandoval- Reyes, & Tecpoyotl-Torres, 2019).

En este artículo, se muestra una micropinza de polisilicio basada en arreglos de dos vigas perpendiculares y un actuador chevrón. Su diseño es apoyado por SIMSOLID™.

En cada arreglo perpendicular, la restricción del desplazamiento de las vigas de doble abrazadera, unidas en su punto final, produce un pandeo en cada viga, lo que favorece el desplazamiento de cada brazo de la micropinza, normalmente abierta. Estos arreglos constituyen las estructuras altamente flexibles de la micropinza. Su pandeo es producido por la fuerza aplicada por la flecha del chevrón, produciendo una fuerza de reacción en un rango de 174.44  $\mu\text{N}$  en las mandíbulas de la micropinza. El actuador chevrón es alimentado por una fuente térmica. La temperatura en las puntas de la micropinza es de 34.42° C y la frecuencia de operación es 33.966 kHz, a carga térmica máxima aplicada de 200° C. La mecánica,

el análisis térmico y modal de esta estructura integrada fue proporcionado por SIMSOLID™, basado en análisis de elementos finitos.

2.4.3 Micro-tweezers: design, fabrication, simulation and testing of a pneumatically actuated micro-gripper for micromanipulation and microtactile sensing (Alogla; Amalou; Balmer; Scanlan; Shu; Reuben, 2015).

Este documento presenta un novedoso diseño de micropinzas con funciones duales de manipulación y detección de fuerza. El dispositivo consta de dos placas paralelas, cada una montada en barras de torsión, que se pueden hacer girar hacia o alejándose una de la otra, mediante el uso de una membrana elástica accionada neumática o hidráulicamente. Las placas se pueden fabricar cómodamente mediante fotograbado. El diseño permite una variedad de relaciones entre el desplazamiento y la fuerza de apertura de la punta. Las puntas de agarre elásticas pueden diseñarse para proporcionar un desempeño suficiente para que su tensión se pueda utilizar para monitorear y controlar la fuerza de agarre. Se fabricó un prototipo, cuyo comportamiento se caracterizó por una serie de mediciones de fuerza y desplazamiento.

2.4.4 A new design of piezoelectric driven compliant-based microgripper for micromanipulation (Zubir, Shirinzadeh, & Tian, 2009)

Este documento describe el desarrollo de un mecanismo de micropinzas capaz de entregar manipulación de microobjetos de alta precisión y fidelidad. El mecanismo adopta un concepto de uniones basadas en flexuras para abordar las no linealidades inherentes, asociadas con la aplicación de bisagras rígidas convencionales, una combinación de dos técnicas de modelado se da a conocer. Se implementó el Modelo de Cuerpo Pseudo Rígido (PRBM) y el Análisis de Elementos Finitos (FEA) para acelerar el procedimiento de creación de prototipos que conduce al establecimiento de un mecanismo de alto rendimiento. Para fabricar la estructura monolítica del mecanismo de agarre.

La pinza mostrada en el artículo adopta una configuración asimétrica dentro de su mecanismo de mainframe con la capacidad de demostrar movimiento paralelo e idéntico por sus mandíbulas. Además, la pinza también implementa un enfoque de diseño dividido en el que el actuador y el mecanismo de amplificación se derivan de fuentes independientes. Este atributo promoverá la flexibilidad durante el desarrollo del modelo para llegar a los más pequeños y sistema de agarre de alta eficiencia. La configuración de paralelogramo de cuatro barras se compone de una combinación de voladizo y estructuras de bisagra de flexión.

#### 2.4.5 Design and simulation of an optimized electrothermal microactuator with Z-shaped beams (Tecpoyotl, Cabello, & Vera, 2015)

En este artículo se describe El desplazamiento de la flecha central de un actuador chevrón con brazos basados en una geometría de forma Z puede ser calculado utilizando una aproximación desarrollada por otros autores, quienes probaron que los actuadores con un solo brazo ofrecen un mayor desplazamiento comparado con los actuadores en forma V convencionales, y que a su vez también ofrecen mayor rango de rigidez y fuerza de salida. Este artículo está enfocado en optimizar un actuador de ocho brazos en forma Z, buscando incrementar la respuesta anteriormente mencionada. La estructura fue diseñada en un paquete de modelado paramétrico de sólidos en 3D, Autodesk Inventor y simulada por el método de elemento finito en Ansys 15.0. Se implementaron varias longitudes en el largo de la forma Z, con la finalidad de seleccionar la longitud que proporcione el mayor desplazamiento. El potencial eléctrico aplicado en todos los casos fue de 0.2 V hasta 5 V (Tecpoyotl, Cabello, & Vera, 2015).

#### 2.4.6 Comparison of Different Materials on Performance of Chevron Shaped Electrothermal Microgripper (Aravind, Ramesh, Ramya, & Kalaiarasi, 2016).

En este documento, se presenta el rendimiento de una micropinza térmica de viga doblada en forma de chevrón. Se ha comparado el desplazamiento de esta

micropinza térmica para diferentes materiales. La micropinza de chevrón propuesta funciona según el principio del efecto de calentamiento y la expansión térmica de Joule, que utiliza la forma de chevrón para ampliar la expansión térmica de modo que pueda producir un gran desplazamiento en el plano con un voltaje de funcionamiento mínimo.

La ley de Joule establece que un material sometido a una corriente eléctrica adquirirá energía térmica. Esto conduce a la colisión de los electrones y átomos en movimiento en el material. Esta colisión de electrones y átomos a su vez provoca vibraciones que bombean los átomos circundantes (Joule, 2018).

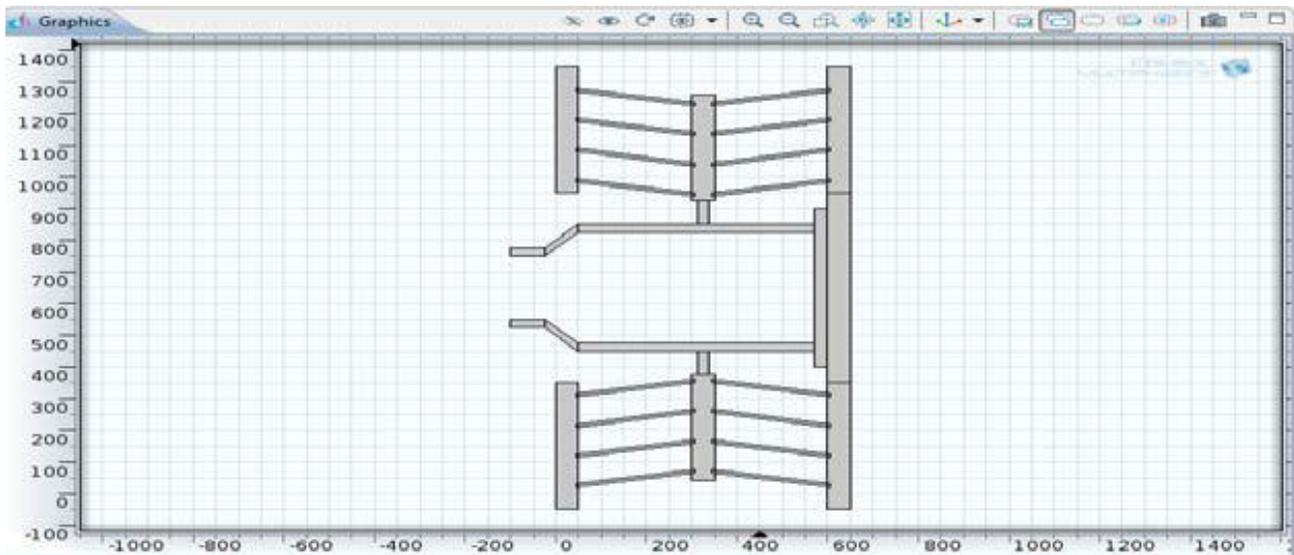


Figura 2-1 Diagrama esquemático de la micropinza electro térmica Chevrón (Aravind, Ramesh, Ramya, & Kalaiarasi, 2016)

Los resultados obtenidos en este documento para un potencial eléctrico aplicado de 0.2V para diferentes materiales como Aluminio (Al), Oro (Au), Argentum (Ag), Cuprum (Cu) y Níquel (Ni) como se muestra en la Tabla 1.

Tabla 2 Comparación de diferentes materiales.

Materiales	Desplazamiento( $\mu\text{m}$ )	Temperatura( $^{\circ}\text{C}$ )
Al	16.2	445

Au	14.7	670
Ag	18.9	703
Cu	15.4	682
Ni	17.6	726

En la Tabla 1, se compara los parámetros de desplazamiento y temperatura de la micropinza para diferentes materiales. El estudio comparativo muestra que, entre diferentes materiales como Aluminio, Oro, Argentum, Cuprum y Nickel, el aluminio tiene el desplazamiento deseado de unos 16,2  $\mu\text{m}$  con una temperatura mínima de funcionamiento de unos 445  $^{\circ}\text{C}$ , lo que es compatible con aplicaciones biomédicas y para manipular micro objetos (Aravind, Ramesh, Ramya, & Kalaiarasi., 2016).

En la siguiente sección se presentan los fundamentos básicos de la actuación del chevrón.

## 2.5 Microactuador Chevrón

El actuador chevrón (así llamado por su forma en “V”) es el que ofrece mayor fuerza por unidad de área, entre otros actuadores reportados. Esta topología presenta ventajas como el desplazamiento lineal de su flecha y la capacidad de posicionar a esta flecha, en los puntos intermedios de su recorrido, con precisión submicrométrica.

Este actuador consiste en un arreglo de barras organizadas en pares y dispuestas una contra la otra, para generar desplazamiento unidireccional. Cada par de barras se encuentra unido por una flecha central.

En la Figura 2.2 se muestra el diagrama correspondiente a un actuador chevrón de un par de brazos.

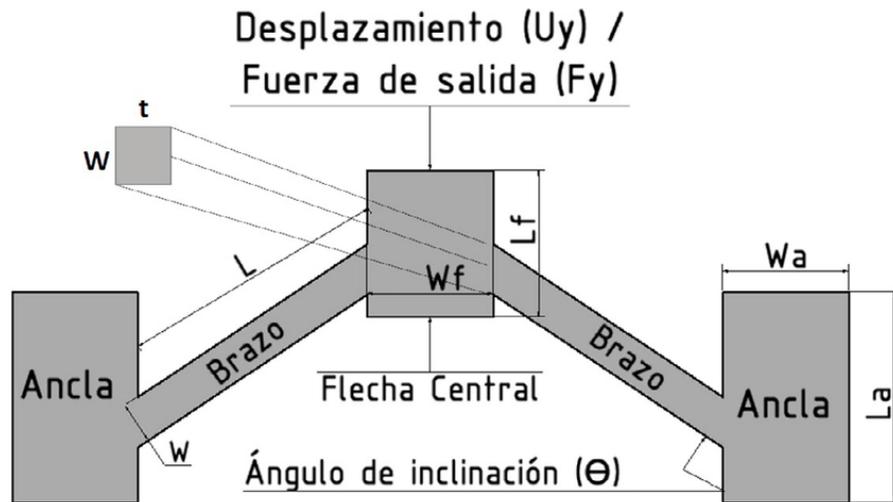


Figura 2-2 Actuador Chevrón (Chable et al, 2019).

### 2.5.1 Ecuaciones para el modelado matemático del microactuador chevrón

Para el análisis del desplazamiento para un actuador chevrón de “n” brazos, en función de la fuerza aplicada, puede utilizarse la ecuación 2.1 (Zhu, Corigliano, & Espino, 2016).

$$U_y = \frac{F_y}{N \left( s^2 \frac{EA}{L} + c^2 \frac{12EI}{L^3} \right)} \quad (2.1)$$

donde:

$F_y$  = Fuerza del microactuador chevrón [N].

$N$  = Número de brazos [Adimensional].

$s$  = Seno del ángulo de apertura de cada brazo

$c$  = Coseno del ángulo de apertura de cada brazo

$E$  = Módulo de Young [GPa]

$A$  = Área de sección transversal [ $\mu\text{m}^2$ ].

Para calcular la fuerza, en función del cambio en la temperatura, puede utilizarse la ecuación 2.2 (Espinosa, Zhu, & Moldovan, 2007).

$$F = N\alpha EA\Delta T \sin(\theta) \quad (2.2)$$

donde:

N = Número de brazos [Adimensional].

$\alpha$  = Coeficiente de expansión térmica [1/k]

E = Módulo de Young [GPa].

A = Área de sección transversal [ $\mu\text{m}^2$ ].

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

s = Seno del ángulo de apertura de cada brazo

$\theta$  = Ángulo de inclinación [ $^{\circ}$ ]

Con estas ecuaciones se llevarán a cabo los cálculos analíticos, cuando se realiza el análisis con base en la temperatura, los cuales serán comparados con los resultados obtenidos de manera numérica, mediante simulación utilizando el software ANSYS.

2.5.2 Ecuaciones para el modelado matemático del microactuador chevrón con arreglos de resistencias.

Cuando se lleva a cabo el análisis de desplazamiento y fuerza a partir del voltaje aplicado, es decir, debido a actuación electrotérmica, puede considerarse el siguiente modelo.

El actuador chevrón se puede interpretar como un arreglo de dos resistencias equivalentes en serie, donde cada resistencia equivalente es a su vez un arreglo de resistencias en paralelo, de acuerdo con el número de brazos en cada lado de la flecha (Álvarez, 2011), como se muestra en la Figura 2-3.

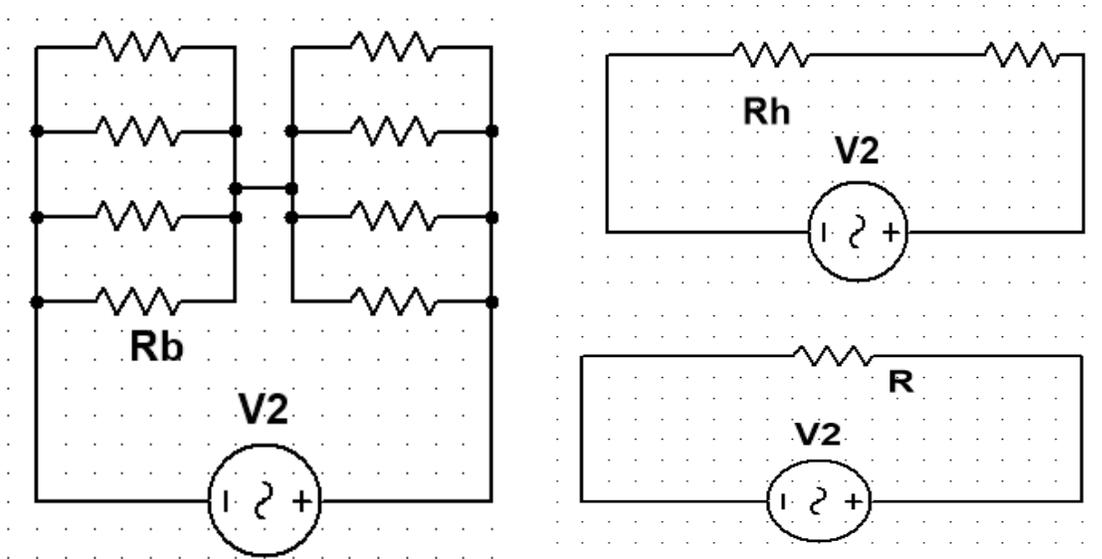


Figura 2-3 Modelo resistivo del actuador chevrón, adaptado de (Álvarez, 2011).

La Ley de Ohm se usa para determinar la relación entre la tensión, la resistencia y la corriente en un circuito.

La resistencia en cada brazo se calcula a partir de la ecuación (2.3).

$$R_b = \frac{\rho L}{wt} \quad (2.3)$$

donde:

$R_b$ = Resistencia de un brazo [ $\Omega$ ].

$\rho$  = Resistividad [ $\rho$ ].

$L$ = Longitud del brazo [ $\mu\text{m}$ ].

$w$ = Ancho del brazo [ $\mu\text{m}$ ].

$t$ = Grosor del brazo [ $\mu\text{m}$ ].

La resistencia equivalente, correspondiente a una de las mitades del dispositivo, se calculan como se muestra en la ecuación (2.4).

$$R_h = \frac{\left(\frac{\rho L}{wt}\right)}{n} \quad (2.4)$$

donde:

$R_h$ = Resistencia correspondiente a la mitad del dispositivo [ $\Omega$ ].

$n$ = Número de brazos del chevrón, en uno de sus extremos [Adimensional].

Por lo que, la resistencia total del actuador chevrón se calcula mediante (ecuación 2.5)

$$R = 2R_h \quad (2.5)$$

La corriente del dispositivo se calcula a partir de la Ley de Ohm, substituyendo a  $R_h$ , como sigue:

$$I = \frac{V}{R} = \frac{V}{2R_h} = \frac{V}{2\frac{\rho L}{wt n}}$$

Por lo tanto:

$$I = \frac{Vwt n}{2\rho L} \quad (2.6)$$

En la siguiente sección, se presentan los fundamentos del pantógrafo, debido a que es la seleccionada para implementar a los brazos de la micropinza.

## 2.6 Pantógrafo

El pantógrafo es un mecanismo bien articulado basado en las propiedades de los paralelogramos. Es un mecanismo bien conocido. Se trata de una herramienta ampliamente utilizada que se utiliza para replicar / imitar y amplificar / reducir el movimiento al seleccionar las longitudes de enlace adecuadas.

En general, se compone de varillas o vigas conectadas entre sí que se pueden mover sobre un punto fijo llamado pivote.

En (Deshmukh & Pardeshi, 2012), se presenta un arreglo mecánico conectado en una configuración de paralelogramo, de acuerdo con la Figura 2-4.

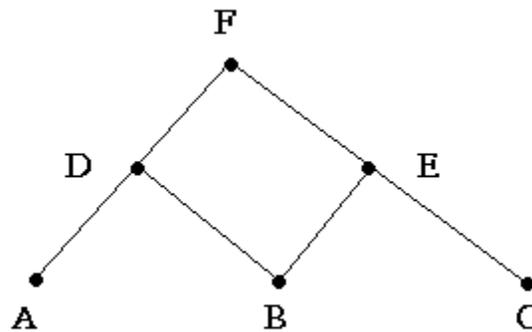


Figura 2-4 Pantógrafo (Patila, Aneraob, & Chinchankar, 2018).

## 2.8 Herramienta CAD

El Computer-aided design (CAD) es el uso de programas de computadora para crear, modificar, analizar y registrar en dos o tres dimensiones (2D o 3D) representaciones gráficas de objetos físicos como una alternativa para borradores manuales y prototipos de productos. CAD es usado ampliamente en animación por computadora y efectos especiales en medios de comunicación como también en productos y diseño industrial. CAD es usado durante el proceso de ingeniería, para el diseño conceptual del producto y el diseño gráfico a través del análisis de

ensamblaje para la definición del método de fabricación. CAD les permite a ingenieros diseñar interactivamente pruebas con prototipos físicos mínimos para obtener:

- Bajos costos de desarrollo de productos
- Mayor velocidad
- Productividad incrementada
- Garantía en calidad

## 2.8 Ansys

Existen en la actualidad numerosos programas de análisis por elementos finitos, tales como ABAQUS, COSMOS, PATRAN, etc.; de entre todos ellos hemos elegido ANSYS por tratarse de una herramienta versátil de análisis por elementos finitos, teniendo en cuenta la relación entre la calidad del producto y su coste, a la fecha de hoy (Ansys, Academia.edu, 2022). Un elemento fundamental en la selección es que, en el Centro, se cuenta con la licencia correspondiente a esta herramienta.

Ansys es un ecosistema de programas CAE para diseño, análisis y simulación de partes por elementos finitos FEA, incluye las fases de preparación de meshing o mallado, ejecución y post proceso, el programa ejecuta análisis de piezas sometidas a fenómenos físicos usadas en ingeniería y diseño mecánico, puede resolver problemas físicos sometidos a esfuerzos térmicos, fluidos, vibración y aplicaciones específicas, brevemente se describen sus módulos principales por disciplina. ANSYS Workbench es una plataforma de software desde donde se crean los proyectos de análisis CAE en diferentes disciplinas, Workbench despliega gráficamente el intento de la simulación en ingeniería y se establecen las relaciones entre fenómenos físicos y sus módulos incluyendo multifísicas (Ansys, 2018).

---

---

## CAPITULO 3: METODOLOGÍA

En este capítulo, se presenta la metodología seguida en esta tesis, en la cual se describe el proceso de diseño y simulación de la micropinza basada en arreglos flexibles y su escalamiento.

## CAPITULO 3: METODOLOGÍA

### 3.1 Metodología de la tesis.

La metodología general de este trabajo se presenta en la Figura 3.1



Figura 3-1 Metodología general.

Partimos del análisis del estado del arte, en el que se realizaron varias búsquedas del comportamiento de micropinzas impulsadas por un actuador chevrón. Posteriormente, se determinaron las especificaciones de los componentes básicos para el desarrollo de la micropinza, se establecieron sus dimensiones y el material a utilizar.

Con base en el modelo matemático, se desarrollaron los resultados teóricos. Se generó un código en el sistema de cómputo numérico Matlab para llevar a cabo los cálculos teóricos, y así compararlos con los resultados obtenidos mediante la simulación y llegar a obtener un porcentaje de error aceptable.

Siguiendo con la metodología general, procedemos a determinar los parámetros de desempeño de nuestro dispositivo mediante simulación, primero utilizando Silicio, y posteriormente en Aluminio, ya que, se cuenta con una CNC (Modelo: 6090X y sistema de control: Mach 3), por lo que, es posible realizar su fabricación y algunas pruebas.

### 3.2. Proceso de diseño y simulación de la micropinza y sus respectivos componentes en ANSYS.

La metodología por seguir en el diseño y la simulación del dispositivo en el que se enfoca esta tesis de investigación se muestra en la Figura 3-2.

De acuerdo con la Figura 3-2, se inicia con el diseño y modelado en ANSYS Workbench. Posteriormente, se determinan las condiciones iniciales y de frontera, se selecciona también a la fuente de alimentación, en este caso se considera un rango de 0 a 2 V, generando con el valor mayor una temperatura máxima de 112 °C y una diferencia de temperatura  $\Delta T$  de 90 °C, debido al efecto de Joule. Cabe señalar que, se considera como temperatura inicial a la temperatura ambiente (22 °C). Esto se obtiene con la micropinza implementada en Silicio.

Posteriormente, se realizan las parametrizaciones correspondientes, con el objetivo de optimizar las dimensiones de los elementos del actuador que proporcionan los resultados más adecuados correspondientes al desplazamiento y fuerza.

Después, de comparar nuestros resultados y que se obtenga un porcentaje de error aceptable, se procede al escalamiento de la micropinza en ANSYS. Posterior a ello, se debe realizar la simulación, en esta ocasión debemos de agregar como material a aluminio, de manera manual, y llevarlo a la simulación, como se mencionó

anteriormente, tenemos que comparar los resultados teóricos y simulados, pero ahora con aluminio.

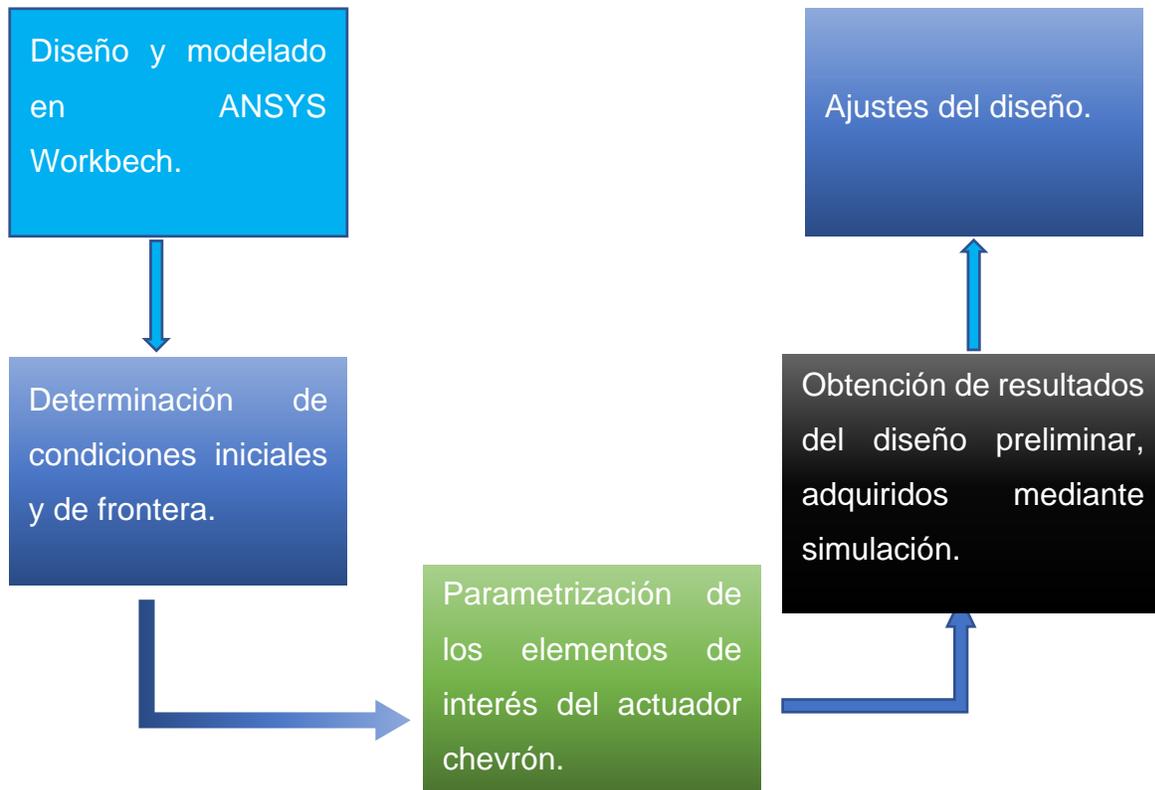


Figura 3-2: Proceso de diseño en Ansys.

En el caso de que, la corriente tenga un valor demasiado grande, que incremente el valor de la temperatura, de tal forma que pueda fundir el material, es necesario volver a calcular la corriente mediante las fórmulas con diferentes medidas (grosor, largo, ancho) de los brazos, ya sea en el simulador o de manera teórica, así como también el valor del voltaje.

### 3.3. Proceso de obtención de resultados numéricos.

Posteriormente, se realiza el modelado matemático teórico, mostrado en la Figura 3.3 desarrollando un software Matlab para obtener resultados analíticos, y compararlos con los resultados numéricos obtenidos con el software ANSYS™ Workbench, y obtener un porcentaje de error aceptable. De lo contrario, se realizarán las modificaciones y correcciones correspondientes, cuantas veces sea necesario para llegar a obtener un porcentaje de error aceptable.

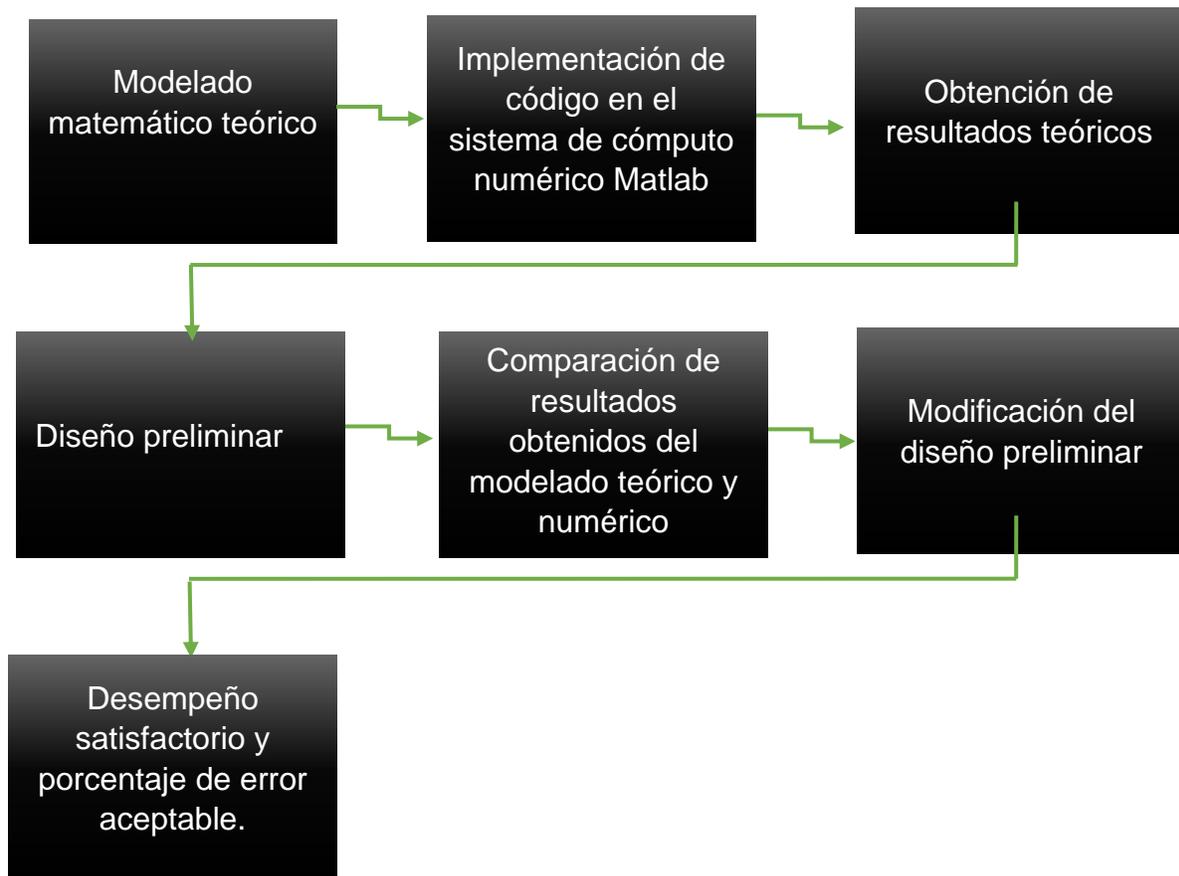


Figura 3-3: Diagrama de obtención de resultados numéricos.

En este capítulo se determinaron las metodologías a llevarse a cabo durante el desarrollo de la investigación, de acuerdo con cada procedimiento, para lograr obtener resultados satisfactorios.



---

---

## CAPITULO 4: DISEÑO, SIMULACIÓN Y CARACTERIZACIÓN DEL ACTUADOR CHEVRÓN

En este capítulo se realizarán el diseño y la simulación del actuador chevrón. Se especificará el software a utilizar, así como las características principales del material utilizado.

Se realizará, además, la comparación entre los resultados analíticos y numéricos.

## CAPITULO 4: DISEÑO, SIMULACIÓN Y CARACTERIZACIÓN DEL ACTUADOR CHEVRÓN

### 4.1. Proceso de diseño del actuador chevrón

En este capítulo se presenta el procedimiento de diseño de un actuador chevrón que será utilizado en el diseño de la micropinza. Para lo cual, se sigue la metodología planteada en el capítulo 3.

#### 4.1.1 Software utilizado en la simulación

ANSYS™ Workbench es una plataforma de software, donde se crean proyectos de análisis CAE (Computer Aided Engineering) en diferentes disciplinas, el cual será el software principal para el desarrollo de simulación del sistema formado por la micropinza y el actuador chevrón.

Ansys Multiphysics es una herramienta en la que se someten problemas a evaluar, en varias disciplinas como análisis estructural, térmicos, fluidos, y relacionados con el electromagnetismo. Además, es posible analizar y simular problemas donde intervengan estos fenómenos en conjunto, o algunos de ellos (Ansys, 3DCadPortal, 2022).

### 4.2. Características del material a utilizar en el chevrón

La generación de movimiento depende principalmente de la deformación térmica de la estructura, por lo tanto, la selección del material adecuado es uno de los pasos principales en el diseño de la micropinza. Así que, es importante usar un material con las propiedades térmicas y mecánicas deseadas.

Diferentes materiales, como silicio, aleación de aluminio, acero inoxidable, latón y algunas aleaciones superelásticas, como la aleación níquel-titanio (NiTi), se utilizan en las micropinzas. La compatibilidad entre las mordazas de agarre y los objetivos de sujeción en el área de contacto son otros factores importantes. La selección del

material también depende de condiciones de trabajo especiales como, entornos biológicos o electrónicos. Además, el tipo de microactuador puede ser determinante en el tipo de material. El silicio se usa a menudo en las micropinzas con actuador electrotérmico (Yang & Qingsong, 2017).

El silicio es el segundo elemento más abundante de la corteza terrestre, después del oxígeno. Este material semiconductor se usa ampliamente en dispositivos de estado sólido en las industrias de computadoras y microelectrónica (Bogado, 2012).

Los parámetros físicos y mecánicos del silicio y aluminio, a utilizar en el análisis se presentan en la Tabla 4.1.

Tabla 4.1 Parámetros del silicio (Si) (Yang & Qingsong, 2017) y aluminio (Thangavel, Sekar, R, & Sukumar, 2016)

<b>Parámetros</b>	<b>Silicio</b>	<b>Aluminio</b>
Densidad, $\rho$ [kg/m <sup>3</sup> ]	2329	2710
Módulo de Young, E [GPa]	130.1	68.3
Coefficiente de expansión térmica, $\alpha$ [1/°K]	$2.568 \times 10^{-6}$	$2.33 \times 10^{-5}$
Conductividad térmica $\kappa$ [W/ m°K]	148	160
Razón de Poisson	0.33	0.33
Calor específico, $C_p$ [J/ kg°K]	712	712
Resistividad, $\rho$ [ $\Omega \cdot m$ ]	$1.5 \times 10^{-4}$	$4.00 \times 10^8$
Punto de fusión, [°C]	1414	1450
Esfuerzo último, [MPa]	250	250

#### 4.2.1 Determinación de requerimientos y restricciones

Para esta prueba se utilizará como material estructural al Silicio. Cuando se tenga al dispositivo funcional, se realizarán pruebas con Aluminio (Tabla 4.1). La estructura inicialmente está a temperatura ambiente (22 °C), posteriormente las anclas o pads, serán alimentadas por una diferencia de potencial de 0.06 V (60 mV).

El microactuador Chevrón es excitado en sus anclas por un potencial eléctrico o una fuente de alimentación térmica. Esta excitación por el coeficiente de expansión térmica del material y al efecto Joule genera una deformación o desplazamiento y una fuerza direccional sobre el eje Y. Este principio de funcionamiento permite proponer las dimensiones de la estructura, así como su material estructural.

Las anclas además de funcionar como elementos de sujeción de la estructura son utilizadas para alimentarla, ya sea mediante una fuente de voltaje o una fuente de energía térmica, por lo que deben ser lo suficientemente robustas.

Las reglas de diseño proporcionan el tamaño mínimo de los elementos. Sobre el tamaño de brazos, debe cuidarse que no tengan un largo excesivo y un ancho muy delgado, puesto que tenderían a colapsarse o bien a fracturarse, respectivamente. En este caso, se consideraron las reglas de diseño del Centro de Ingeniería y Desarrollo Industrial, CIDESI, básicamente, el grosor mínimo de vigas debe ser de 5  $\mu\text{m}$ , anclas de 100 x 200  $\mu\text{m}^2$ , ya que se usan arcos.

La separación entre brazos también es importante, para evitar el traslape de los mismos, cuando el dispositivo se encuentra en funcionamiento. En estudios previamente realizados se han utilizado separaciones de 12  $\mu\text{m}$  o 13  $\mu\text{m}$  (Varona, Tecpoyotl-Torres, & Hamoui, 2007), cuando los grosores de brazo son de 5  $\mu\text{m}$ . Nuevamente, debe evitarse el uso de altas temperaturas, ya que ellas limitarían a las posibles aplicaciones.

### 4.3. Diseño y modelado del chevrón

Tomando en cuenta los parámetros de la Tabla 4.2 correspondientes al silicio, se procedió con el diseño y modelado del microactuador chevrón de 16 brazos (Figura 4.3) para el análisis de fuerza y el desplazamiento.

Tabla 4.2: Dimensiones del Microactuador Chevrón

Variable	Descripción	Tamaño( $\mu\text{m}$ )
$L_b$	Largo del brazo	600
$W_b$	Ancho del brazo	5
$t_b$	Grosor del brazo	15
$W_f$	Ancho de la flecha	30
$L_f$	Largo de la flecha	300
$\theta$	Ángulo de inclinación del brazo	$1^\circ$

Se realizaron las parametrizaciones del ángulo de inclinación y grosor de la estructura.

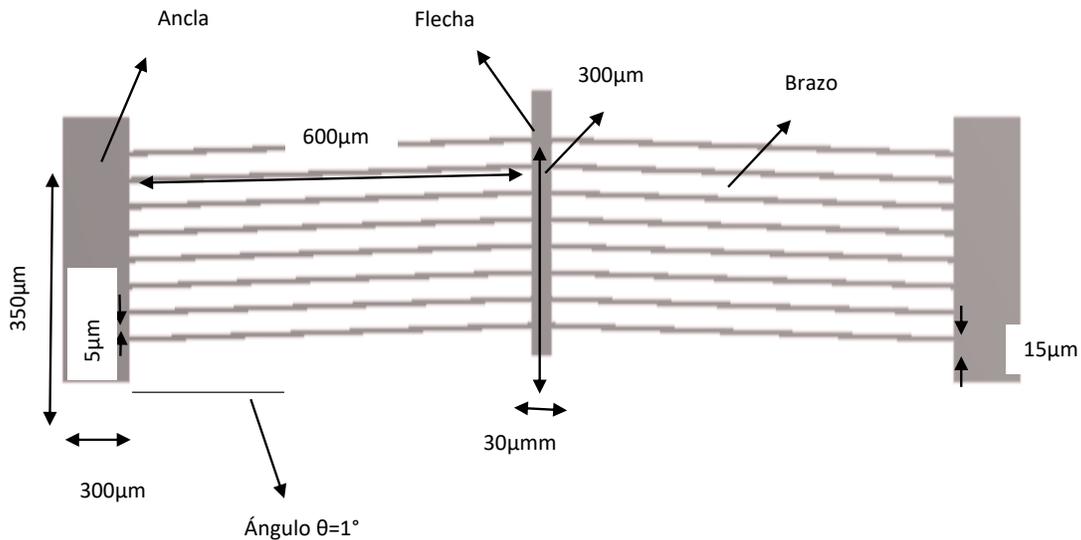


Figura 4-3 Microactuador chevrón (Elaboración propia).

#### 4.3.1 Selección de componentes

Las anclas son utilizadas para sujeción de uno de los lados de los brazos, mientras que la flecha es el elemento que se desplaza ante la deformación sufrida por los brazos. De manera simplificada, puede decirse que el Chevrón es un arreglo de cantilévers o trampolines.

#### 4.3.2 Actuación electrotérmica del chevrón

El actuador chevrón será actuado electrotérmicamente. Por lo que, se determinó que se utilizará un voltaje máximo de 2 V, el cual generará una temperatura máxima de 112 °C, cuando se considera una resistividad de 0.00015 Ohms·m, que es la que se tiene en las librerías convencionales de Silicio.

#### 4.4. Resultados de la simulación del actuador en Silicio

La simulación es desarrollada en Ansys Workbench. Se asigna como temperatura ambiente 22 °C. En la Figura 4.4 se muestra la distribución de temperatura generada por el rango de voltaje asignado. Puede observarse que la temperatura máxima corresponde a 112°C, ubicada en el ancla donde se aplica el potencial alto, mientras que, en la flecha, la etiqueta señala que se tiene una temperatura de 89.59°C.

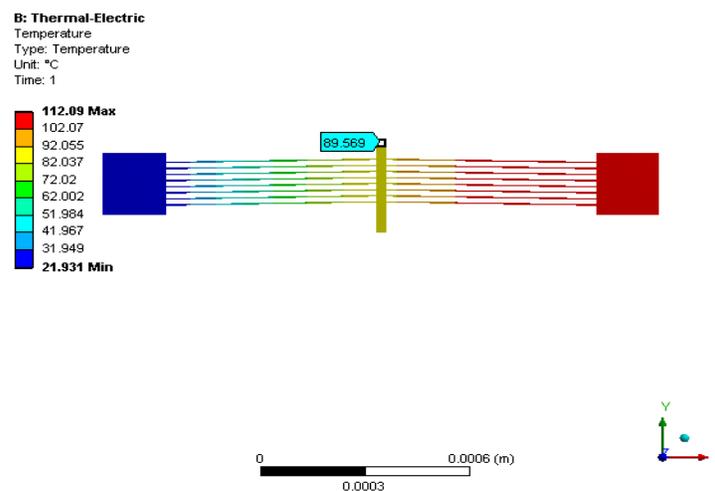


Figura 4-4 Distribución de temperatura.

La deformación total del dispositivo, considerando un ángulo de inclinación en los brazos de  $1^\circ$  y un rango de voltaje de 0 a 2 V es de  $6.07 \mu\text{m}$ , como se muestra en la Figura 4.5.

Posteriormente, en la Figura 4.6, se muestra que la fuerza de reacción es de 2.7 mN en el eje Y, nuestro eje de interés.

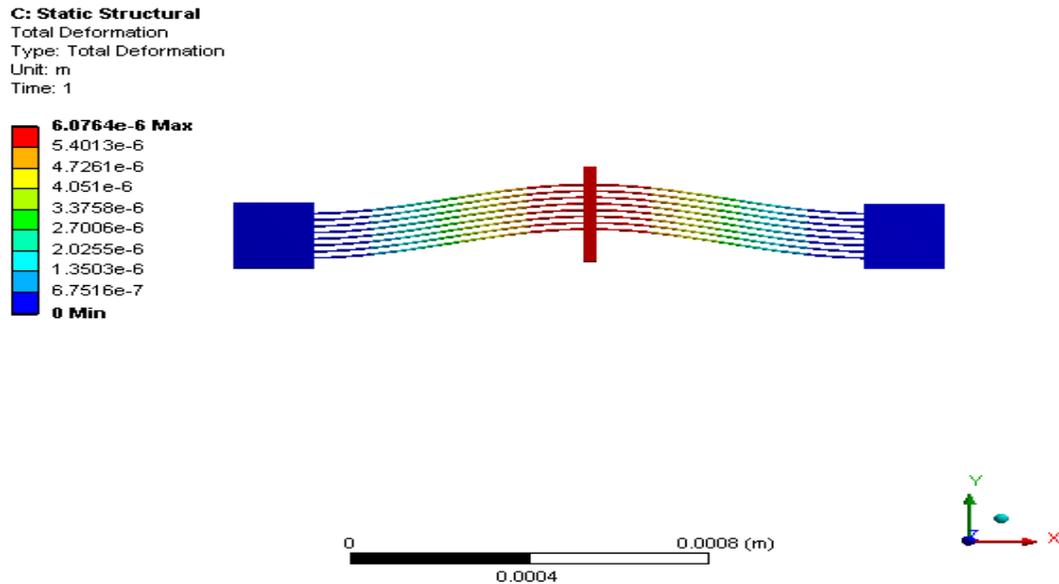


Figura 4-5 Deformación total del microactuador chevrón.

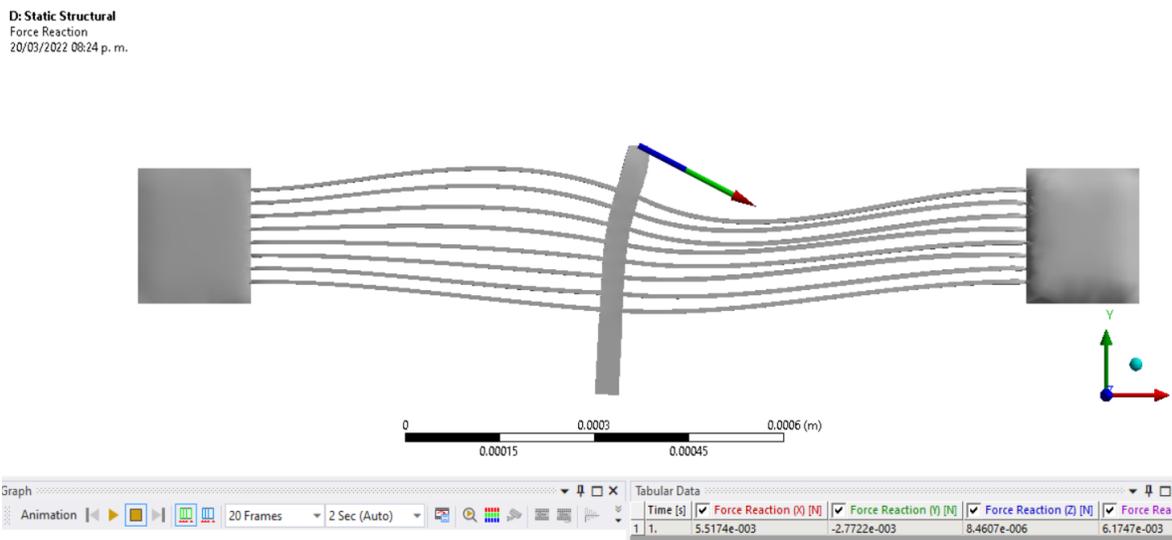


Figura 4-6 Fuerza total de reacción.

En la Figura 4.7, se observa el esfuerzo de la flecha.

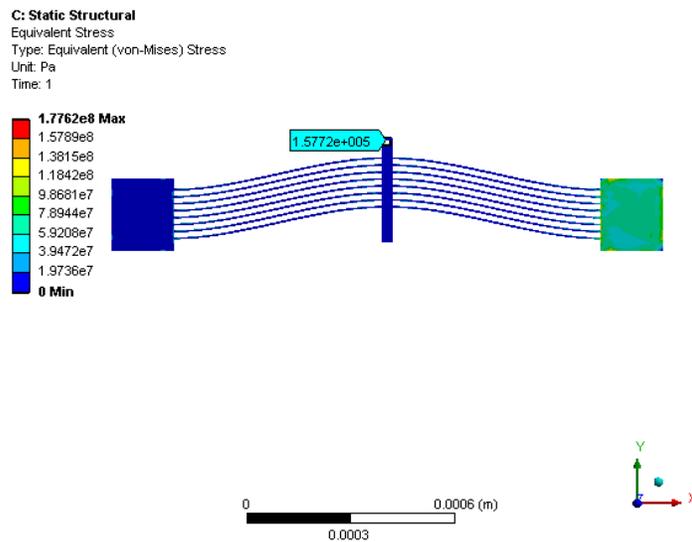


Figura 4-7 Esfuerzo en la flecha.

4.4. Comparación de resultados analíticos y numéricos, así como los porcentajes de error del chevrón implementado en Silicio

Para el diseño del microactuador chevrón, puede utilizarse la ecuación 2.7, para calcular el desplazamiento de la flecha y la fuerza de reacción mediante la ecuación 2.8.

En la Tabla 4.3, se presentan los resultados analíticos y numéricos correspondientes al desplazamiento y a la fuerza, obtenidos al parametrizar el ángulo de inclinación de los brazos del microactuador chevrón y el porcentaje de error.

Tabla 4.3 Resultados simulados y analíticos obtenidos de la parametrización del ángulo de inclinación.

Ángulo (°C)	Desplazamiento Analítico (µm)	Desplazamiento Numérico (µm)	Porcentaje De error (%)	Fuerza Analítica (N)	Fuerza Numérica (N)	Porcentaje De error (%)
1	$6.520 \times 10^{-6}$	$6.101 \times 10^{-6}$	6.4	$2.940 \times 10^{-3}$	$2.753 \times 10^{-3}$	6.3

2	$3.35 \times 10^{-6}$	$3.56 \times 10^{-6}$	6.2	$5.880 \times 10^{-3}$	$5.561 \times 10^{-3}$	5.4
3	$2.32 \times 10^{-6}$	$2.46 \times 10^{-6}$	6.0	$8.818 \times 10^{-3}$	$8.862 \times 10^{-3}$	5.1
4	$1.7 \times 10^{-6}$	$1.87 \times 10^{-6}$	5.6	$1.175 \times 10^{-2}$	$1.117 \times 10^{-2}$	4.9
5	$1.43 \times 10^{-6}$	$1.51 \times 10^{-6}$	5.4	$1.468 \times 10^{-2}$	$1.399 \times 10^{-2}$	4.7
6	$1.23 \times 10^{-6}$	$1.27 \times 10^{-6}$	3.1	$1.761 \times 10^{-2}$	$1.680 \times 10^{-2}$	4.6
7	$1.08 \times 10^{-6}$	$1.09 \times 10^{-6}$	1.2	$2.053 \times 10^{-2}$	$1.960 \times 10^{-2}$	4.5
8	$9.55 \times 10^{-7}$	$9.66 \times 10^{-7}$	1.1	$2.345 \times 10^{-2}$	$2.234 \times 10^{-2}$	4.7
9	$8.57 \times 10^{-7}$	$8.63 \times 10^{-7}$	0.6	$2.635 \times 10^{-2}$	$2.510 \times 10^{-2}$	4.7
10	$7.77 \times 10^{-7}$	$7.81 \times 10^{-7}$	0.4	$2.925 \times 10^{-2}$	$2.784 \times 10^{-2}$	4.8

Se puede observar en la Tabla 4.3 que, el porcentaje de error del desplazamiento para un ángulo de inclinación de  $1^\circ$  es de 6.4 %. Sin embargo, si se tomara en cuenta un ángulo mayor a  $1^\circ$ , su porcentaje de error con respecto a los resultados analíticos se reducirían considerablemente, esto a su vez disminuye el desplazamiento ejercido en la flecha, siendo el desplazamiento un factor importante, por lo que, al hacer el análisis paramétrico del ángulo de inclinación se determina que utilizar  $1^\circ$  es conveniente debido a el desplazamiento obtenido.

Al parametrizar el grosor, mediante los resultados obtenidos analíticamente y por simulación se puede observar que la variación en el valor del desplazamiento es poco significativa. Con respecto a la fuerza, para un grosor de  $25 \mu\text{m}$ , el porcentaje de error es de 6.9 %.

Tabla 4.4 Resultados simulados y analíticos obtenidos de la parametrización del grosor de la estructura.

Grosor de la estructura ( $\mu\text{m}$ )	Desplazamiento Analítico ( $\mu\text{m}$ )	Desplazamiento Simulado ( $\mu\text{m}$ )	Porcentaje De error (%)	Fuerza Analítica (N)	Fuerza Simulada(N)	Porcentaje De error (%)
25	$6.520 \times 10^{-6}$	$6.101 \times 10^{-6}$	6.43	$1.050 \times 10^{-3}$	$9.770 \times 10^{-4}$	6.9

30	$6.520 \times 10^{-6}$	$6.101 \times 10^{-6}$	6.43	$1.260 \times 10^{-3}$	$1.174 \times 10^{-3}$	6.8
35	$6.520 \times 10^{-6}$	$6.101 \times 10^{-6}$	6.43	$1.470 \times 10^{-3}$	$1.370 \times 10^{-3}$	6.8
40	$6.520 \times 10^{-6}$	$6.101 \times 10^{-6}$	6.43	$1.680 \times 10^{-3}$	$1.567 \times 10^{-3}$	6.7
45	$6.520 \times 10^{-6}$	$6.101 \times 10^{-6}$	6.43	$1.890 \times 10^{-3}$	$1.764 \times 10^{-3}$	6.6
50	$6.520 \times 10^{-6}$	$6.101 \times 10^{-6}$	6.43	$2.100 \times 10^{-3}$	$1.962 \times 10^{-3}$	6.5
55	$6.520 \times 10^{-6}$	$6.101 \times 10^{-6}$	6.43	$2.310 \times 10^{-3}$	$2.159 \times 10^{-3}$	6.5
60	$6.520 \times 10^{-6}$	$6.101 \times 10^{-6}$	6.43	$2.520 \times 10^{-3}$	$2.357 \times 10^{-3}$	6.4
65	$6.520 \times 10^{-6}$	$6.101 \times 10^{-6}$	6.43	$2.730 \times 10^{-3}$	$2.554 \times 10^{-3}$	6.4
70	$6.520 \times 10^{-6}$	$6.101 \times 10^{-6}$	6.43	$2.940 \times 10^{-3}$	$2.753 \times 10^{-3}$	6.3

#### 4.5. Graficas

Las gráficas mostradas en la Figura 4.8 - 4.10, muestran el desplazamiento y la fuerza, parametrizando al ángulo de inclinación y al grosor de la estructura, mostrando los resultados simulados y analíticos.

Como puede observarse de las Figuras 4.8 y 4.9, el desplazamiento es mayor para un ángulo de  $1^\circ$ , pero la fuerza de reacción resultante, es menor que en el caso de ángulos mayores.

De la Figura 4.10, puede observarse la influencia del grosor con respecto a la fuerza generada. Se considerará a  $70 \mu\text{m}$ , debido a la disponibilidad de este grosor en obleas SOI.

El desplazamiento se muestra en la Figura 4.11, como puede apreciarse, no hay cambios aparentes, con relación a la variación en el grosor.

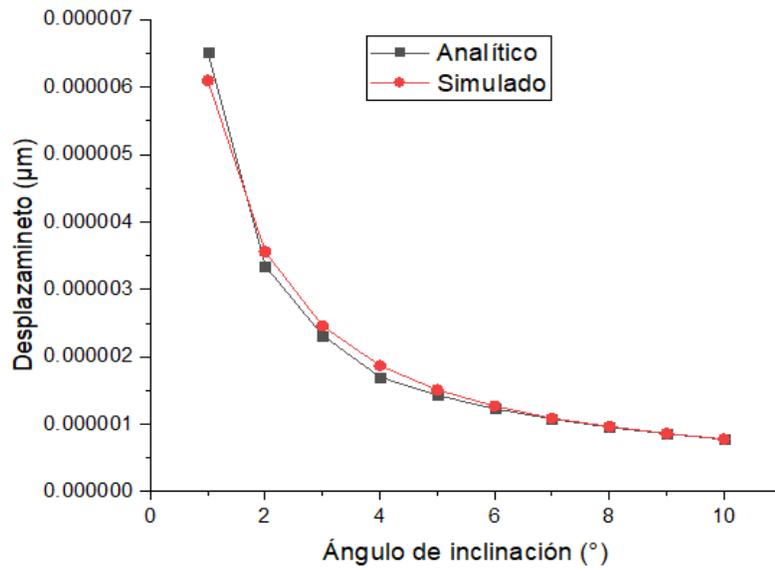


Figura 4-8 Ángulo de inclinación vs desplazamiento.

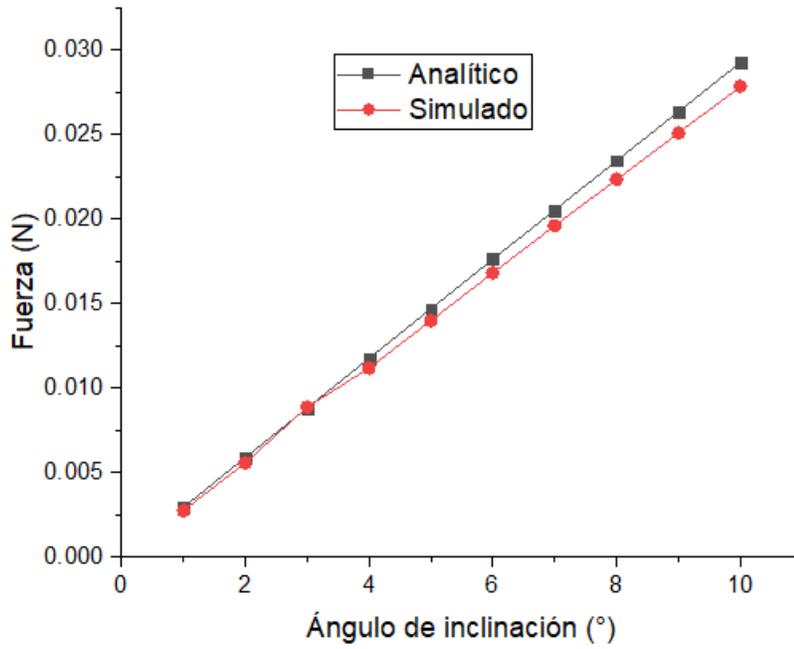


Figura 4-9 Ángulo de inclinación vs fuerza.

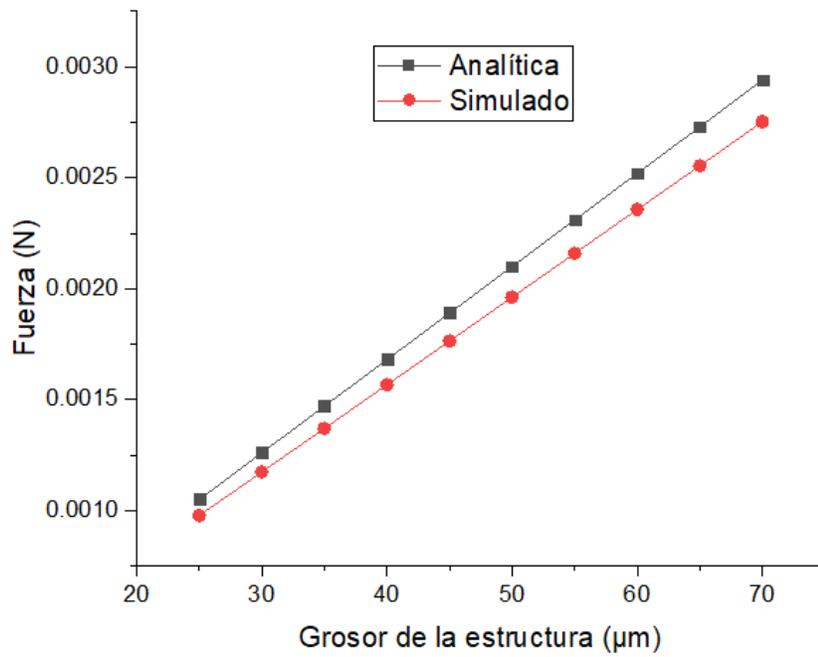


Figura 4-10 Grosor de la estructura vs fuerza.

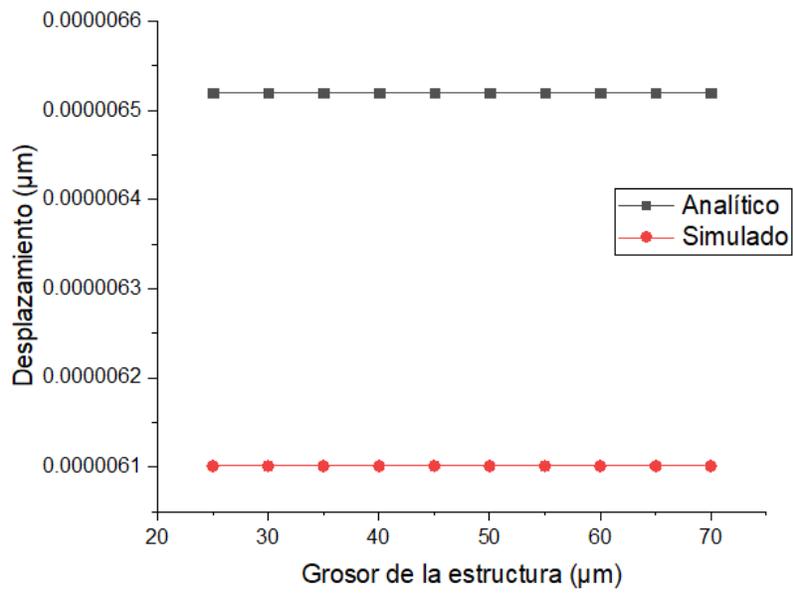


Figura 4-11 Grosor de la estructura vs desplazamiento.

#### 4.6. Diseño y modelado del chevrón en aluminio

Tomando en cuenta los parámetros de la Tabla 4.2 correspondientes al aluminio, se procedió con el diseño del microactuador chevrón de 16 brazos para el análisis de fuerza, desplazamiento y esfuerzo, con las dimensiones que se presentan en la Tabla 4.2.

#### 4.7 Resultados de la simulación en aluminio

La simulación es desarrollada en Ansys Workbench. Se asigna como temperatura ambiente 22 °C. La Figura 4.12 muestra la distribución de temperatura que se genera en el chevrón en aluminio. La temperatura en la flecha es de 232.96 °C.

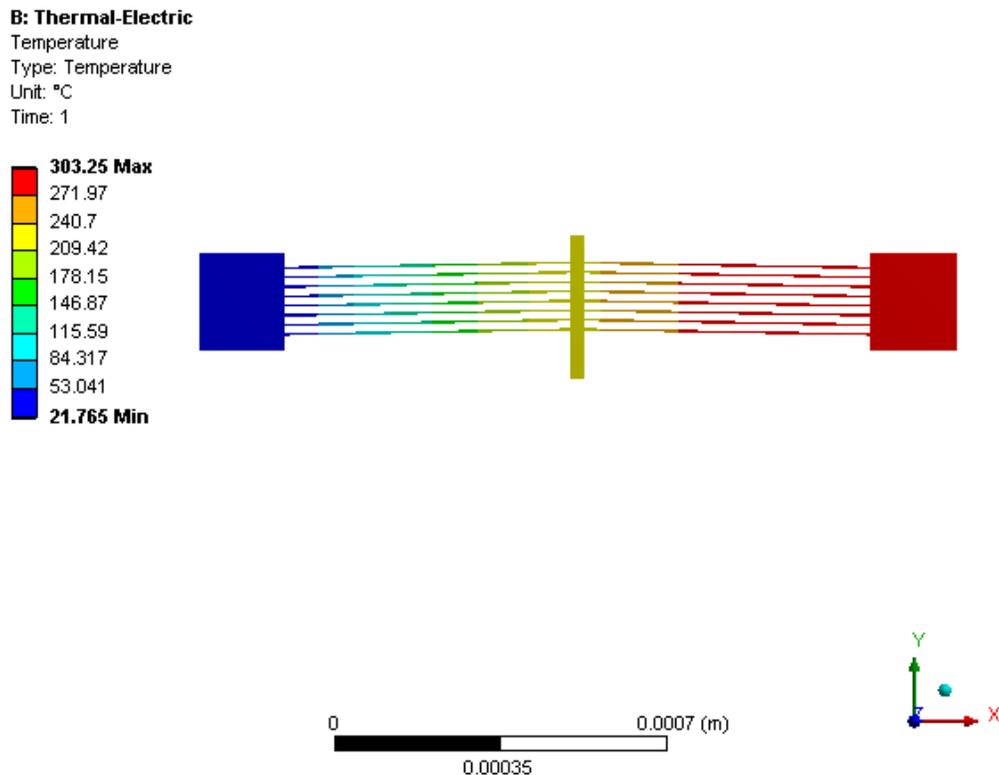


Figura 4-12 Distribución de temperatura en Aluminio.

El desplazamiento máximo corresponde a 141.11  $\mu\text{m}$ . Se utilizó nuevamente un ángulo de inclinación en los brazos de  $1^\circ$ , como se muestra en la Figura 4.13.

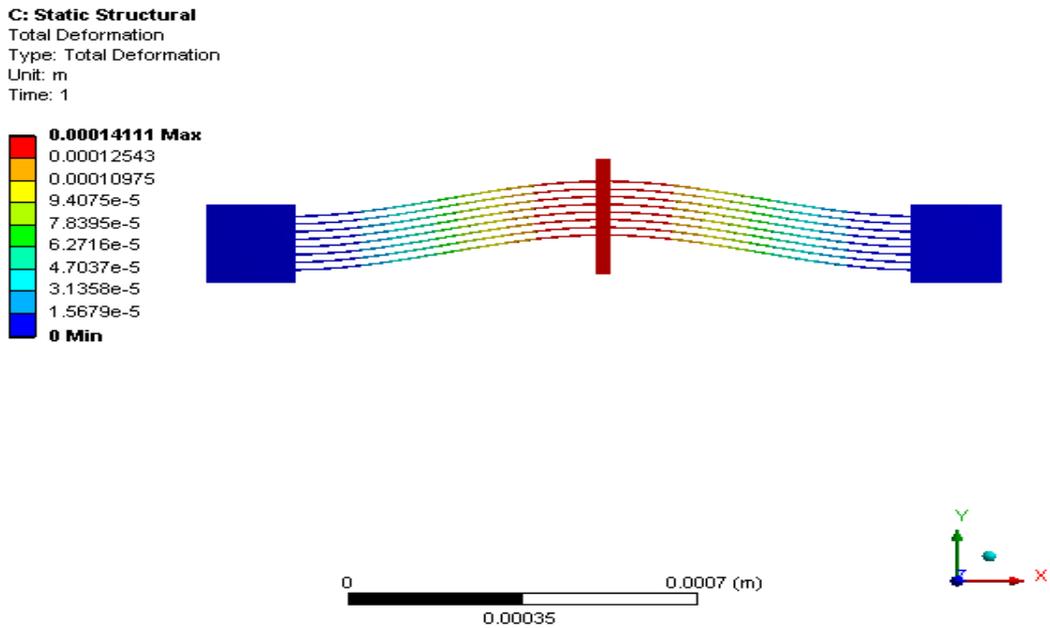


Figura 4-13 Deformación total.

En la Figura 4.14, se muestra a la fuerza de reacción resultante, con un valor de 33,480 mN.

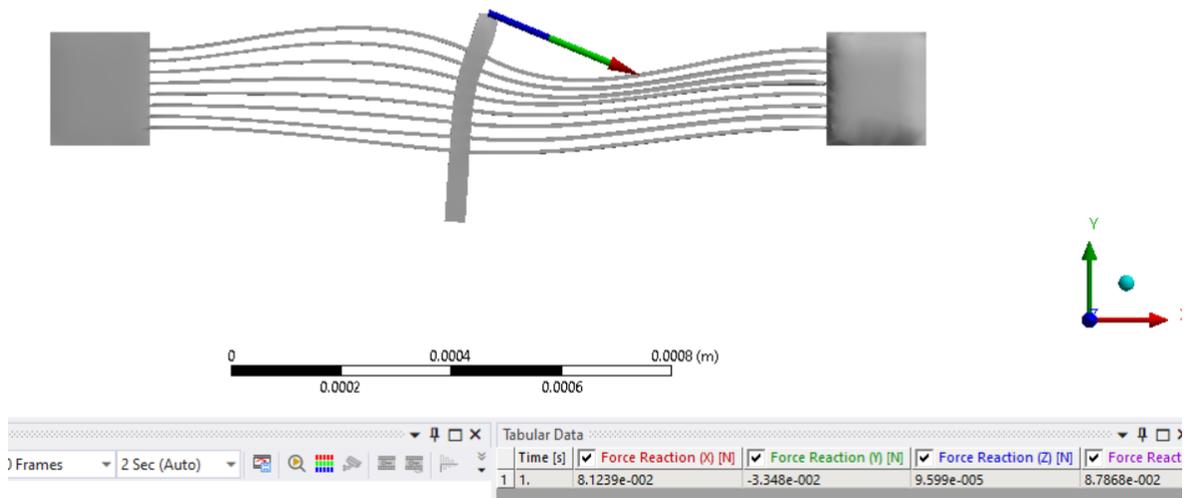


Figura 4-14 Fuerza total

En la Figura 4.15 se muestra el esfuerzo de la flecha en Aluminio.

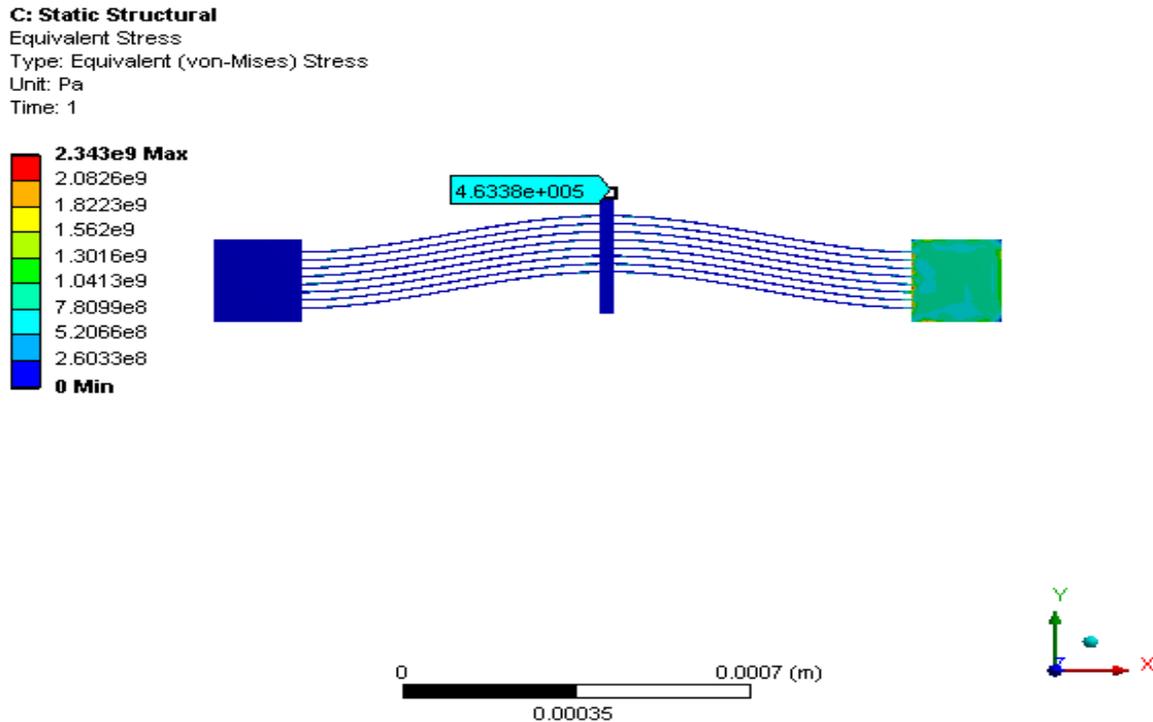


Figura 4-15 Esfuerzo de la flecha.

4.8 Comparación de resultados analíticos y numéricos, así como los porcentajes de error del actuador chevrón en aluminio.

A partir de la comparación de los resultados analíticos y numéricos, podemos observar que el cambio en el desplazamiento es poco significativo, obtenido conforme se aumenta el grosor de la estructura. Con respecto a la fuerza, para un grosor de 70  $\mu\text{m}$ , el porcentaje de error es de 23 %, el cual es aceptable, de acuerdo con los obtenidos en algunas bibliografías como (Kaajakari V. , 2009)

Tabla 4.5 Resultados analíticos y numéricos obtenidos de la parametrización del grosor de la estructura.

Grosor de la estructura ( $\mu\text{m}$ )	Desplazamiento Analítico ( $\mu\text{m}$ )	Desplazamiento Numérico ( $\mu\text{m}$ )	Porcentaje De error (%)	Fuerza Analítica (N)	Fuerza Simulada (N)	Porcentaje De error (%)
25	$1.660 \times 10^{-4}$	$1.411 \times 10^{-4}$	15	$1.561 \times 10^{-2}$	$1.189 \times 10^{-2}$	23
30	$1.660 \times 10^{-4}$	$1.411 \times 10^{-4}$	15	$1.873 \times 10^{-2}$	$1.427 \times 10^{-2}$	23
35	$1.660 \times 10^{-4}$	$1.411 \times 10^{-4}$	15	$2.185 \times 10^{-2}$	$1.667 \times 10^{-2}$	23
40	$1.660 \times 10^{-4}$	$1.411 \times 10^{-4}$	15	$2.497 \times 10^{-2}$	$1.906 \times 10^{-2}$	23
45	$1.660 \times 10^{-4}$	$1.411 \times 10^{-4}$	15	$2.810 \times 10^{-2}$	$2.146 \times 10^{-2}$	23
50	$1.660 \times 10^{-4}$	$1.411 \times 10^{-4}$	15	$3.122 \times 10^{-2}$	$2.386 \times 10^{-2}$	23
55	$1.660 \times 10^{-4}$	$1.411 \times 10^{-4}$	15	$3.434 \times 10^{-2}$	$2.626 \times 10^{-2}$	23
60	$1.660 \times 10^{-4}$	$1.411 \times 10^{-4}$	15	$3.746 \times 10^{-2}$	$2.867 \times 10^{-2}$	23
65	$1.660 \times 10^{-4}$	$1.411 \times 10^{-4}$	15	$4.059 \times 10^{-2}$	$3.106 \times 10^{-2}$	23
70	$1.660 \times 10^{-4}$	$1.411 \times 10^{-4}$	15	$4.371 \times 10^{-2}$	$3.348 \times 10^{-2}$	23

#### 4.9 Graficas del actuador chevrón en Aluminio

En la Figura 4.16 se muestra la fuerza de reacción con los resultados simulados y analíticos.

Los resultados que se muestran en la Figura 4.16, corresponden al chevrón implementado en aluminio. El valor de la fuerza aumenta conforme se incrementa el grosor de la estructura. Puede observarse un mayor error que en el caso donde el Silicio es utilizado como material estructural.

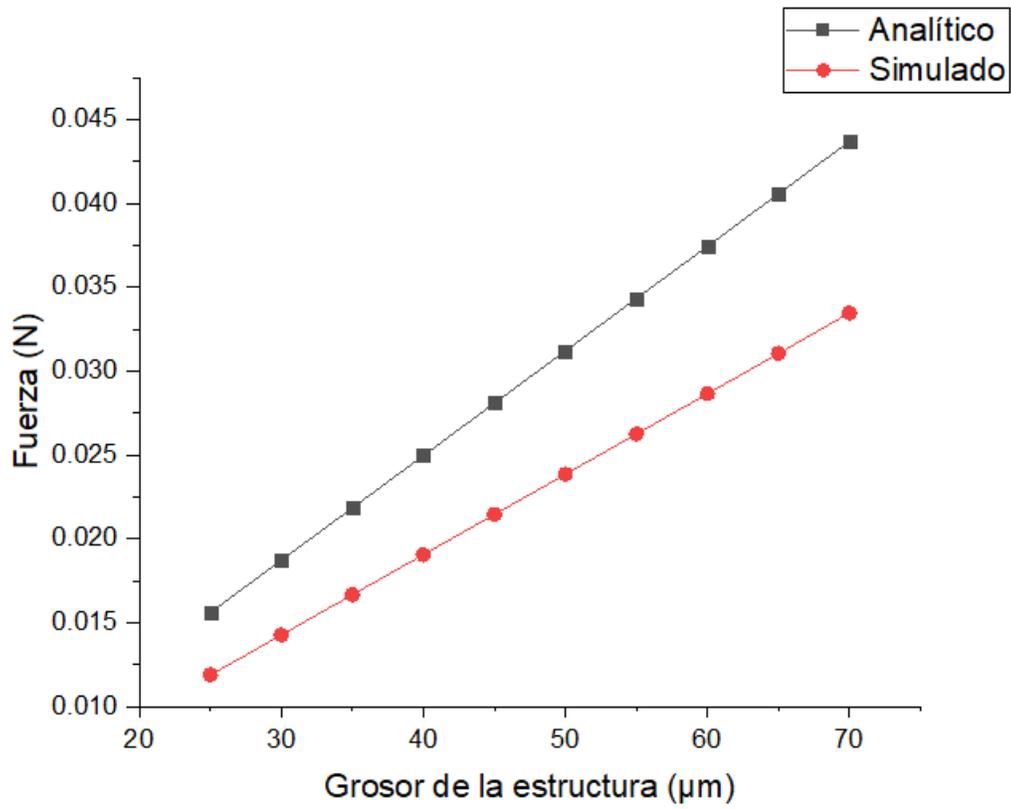


Figura 4-16 Grosor de la estructura vs fuerza del chevrón en aluminio.

El desplazamiento se muestra en la Figura 4.17, como puede apreciarse, no hay cambios aparentes, con relación a la variación en el grosor. Mientras que el valor de la fuerza sí se incrementa con el aumento en el grosor.

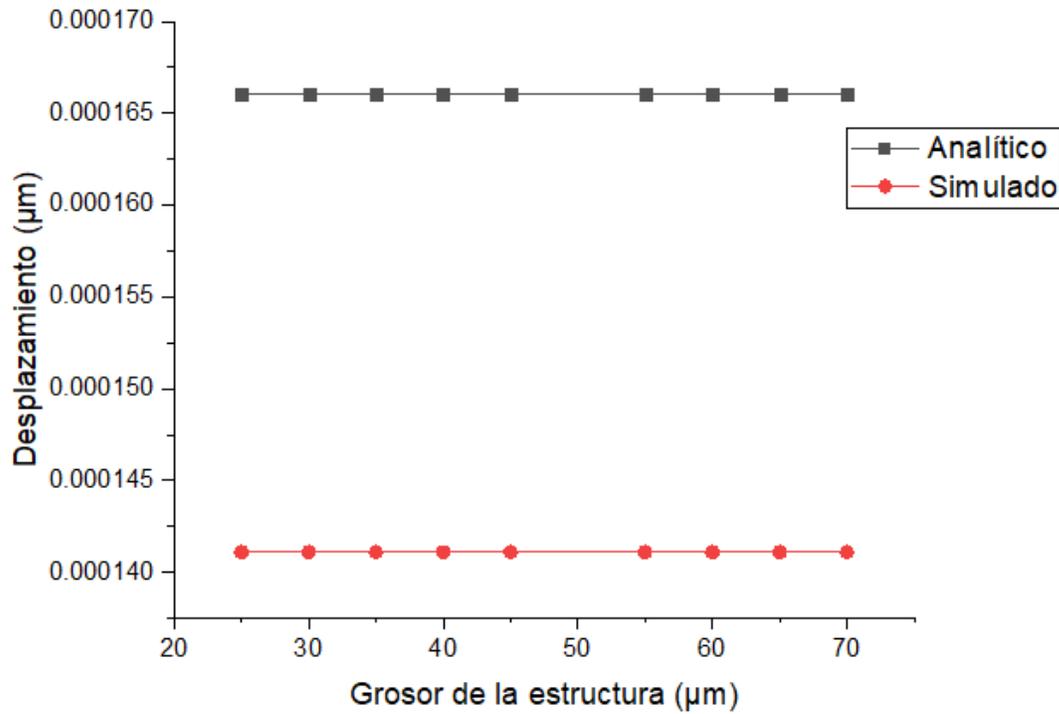


Figura 4-17 Grosor de la estructura vs desplazamiento.

En este capítulo, se llevaron a cabo los procesos de diseño y simulación del microactuador chevrón, en Silicio y Aluminio. Cabe señalar que dimensiones de ambos chevrones fueron iguales.

Se obtuvieron y compararon los resultados analíticos y numéricos del desplazamiento y la fuerza. Las tendencias mostradas son congruentes con las mostradas en la literatura sobre este bien conocido actuador.

---

---

## CAPÍTULO 5. DISEÑO, SIMULACIÓN Y FABRICACIÓN DE MICROPINZA

En este capítulo se muestran los procesos de fabricación y los resultados de las pruebas realizadas, así como el diseño y la simulación de la micropinza.

## CAPITULO 5: DISEÑO, SIMULACIÓN Y FABRICACIÓN DE MICROPINZA

### 5.1 Especificaciones de diseño

Con los resultados obtenidos en el capítulo anterior, con respecto al microactuador Chevrón, se procede a realizar su integración para generar el diseño de la micropinza en Aluminio.

### 5.2 Determinación de los materiales

Se utilizará el aluminio, como material estructural, debido a su disponibilidad, y a relativa facilidad de implementación, debido al grosor de las láminas disponibles.

### 5.3 Determinación de requerimientos y restricciones

Una de las condiciones de frontera es la alimentación y ésta se realiza en las anclas del dispositivo. La alimentación puede ser térmica, eléctrica o mecánica. En esta investigación, la alimentación se implementó mediante una actuación electrotérmica. Para las simulaciones iniciales, el material estructural seleccionado es aluminio, con un espesor total de la micropinza actuada por chevrón de 1.2 mm. La temperatura ambiente corresponde a 22 °C.

### 5.4 Diseño preliminar

La adaptación y asignación de elementos al dispositivo Chevrón en Aluminio, genera al diseño preliminar de la micropinza, el cual se puede observar en la Figura 5.1. Posteriormente, la escalaremos para su fabricación.

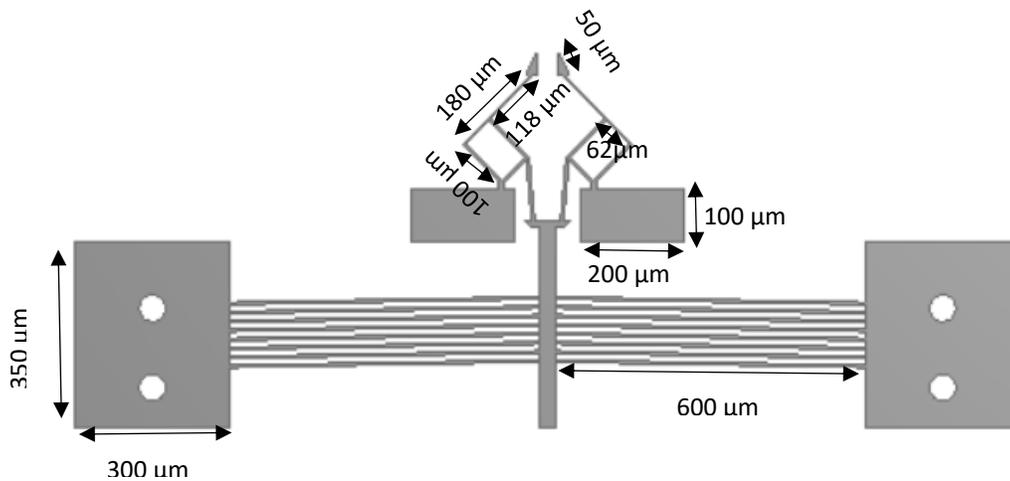


Figura 5-1 Dimensiones de la micropinza preliminar.

### 5.5 Resultados de simulación en pinza sin escala

En la Figura 5.2 se muestra el desplazamiento de la micropinza preliminar, podemos observar que el desplazamiento es de  $18.3 \mu\text{m}$ , esto es por el tipo de material que se está utilizando, ya que es un poco complicado de generar el desplazamiento con un voltaje pequeño. El voltaje aplicado no puede ser muy elevado, debido a que puede generarse una alta temperatura, pues el Aluminio es un buen conductor de calor. Su temperatura de fusión es de  $1450^\circ\text{C}$ .

En la Figura 5.3 se presenta a la fuerza de reacción, con un valor de  $243.4 \mu\text{N}$ .

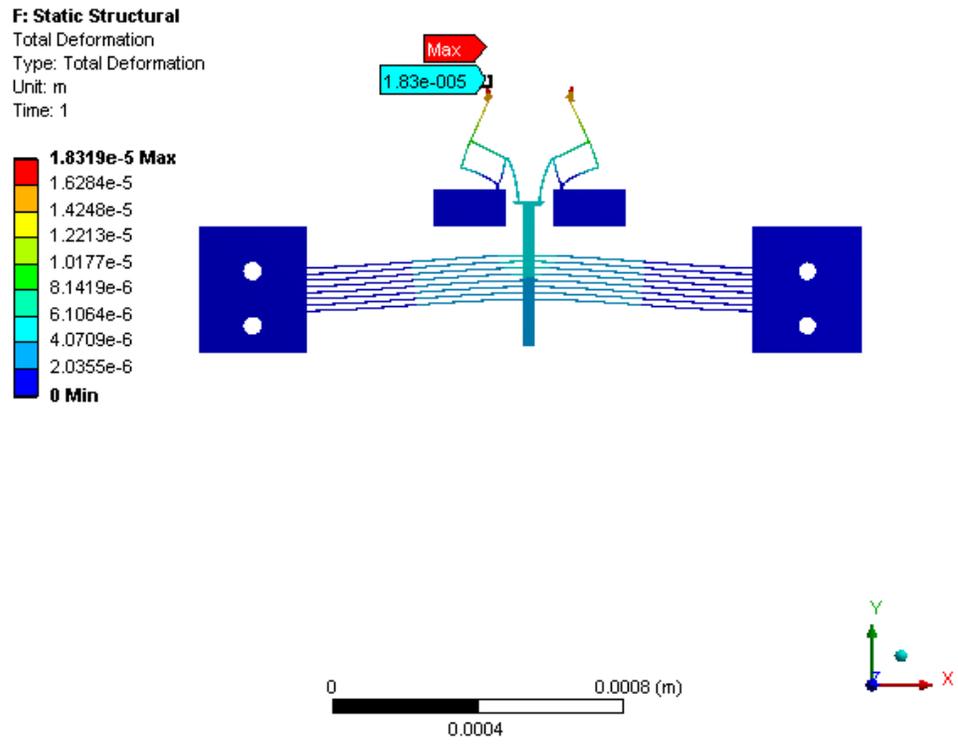


Figura 5-2 Desplazamiento total, correspondiente a 18.3  $\mu\text{m}$ , ubicado en las puntas de la pinza, obtenido al aplicar 0.6 V.

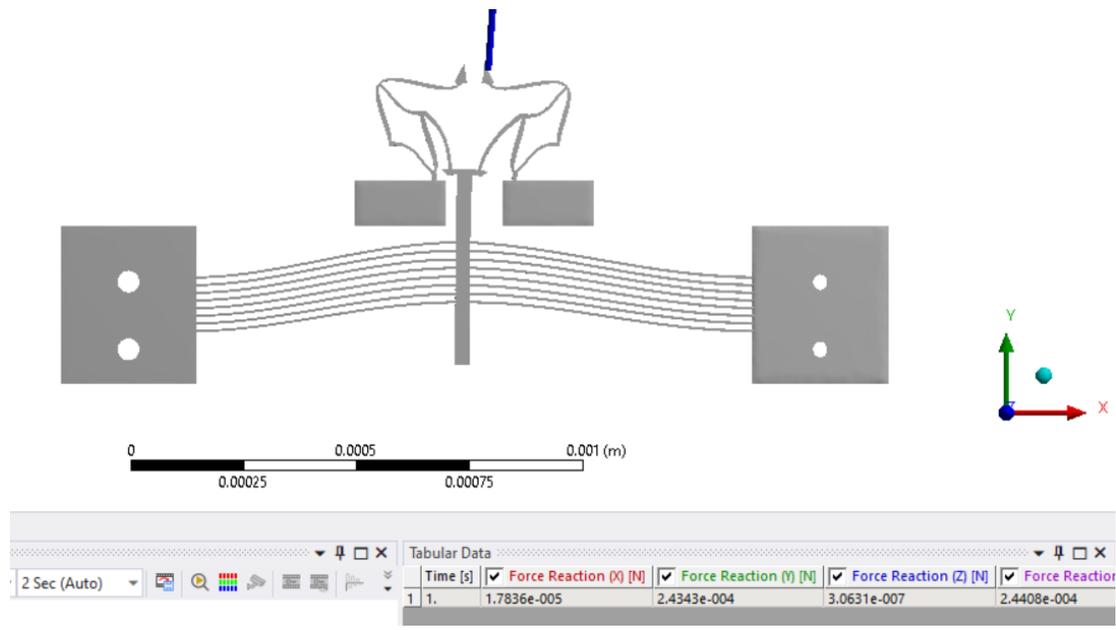


Figura 5-3 Fuerza total de reacción.

## 5.6 Resultados de simulación de pinza escalada, en Aluminio.

En la Figura 5.4 se muestran las dimensiones de la micropinza escalada con un factor de escalamiento de 100.

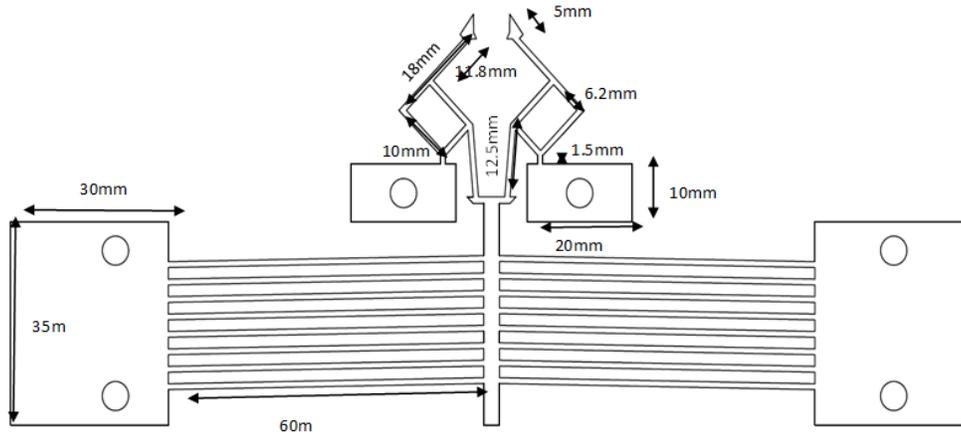


Figura 5-4 Dimensiones de la micropinza escalada.

En la Figura 5.5 se muestra el desplazamiento total de la micropinza escalada, el cual es de  $1.8161 \times 10^{-3}$  mm, aplicando una temperatura de  $180^{\circ}\text{C}$  en las anclas del chevrón.

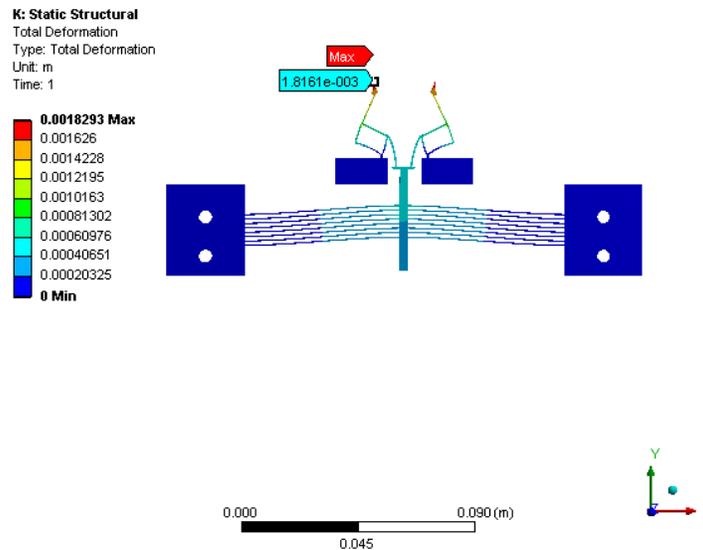


Figura 5-5 Desplazamiento total de pinza escalada, correspondiente a 1.82 mm, ubicado en las puntas de la pinza, obtenido al aplicar 0.6 V.

En la Figura 5.6 se muestra el esfuerzo máximo de la micropinza, localizado en el ancla donde se aplica el potencial alto (0.59V). El esfuerzo en el extremo de los brazos, donde el prototipo a mejorar presentaba problemas, tiene un valor de 132.9 MPa, el cual está por debajo del esfuerzo último del Aluminio (250 MPa).

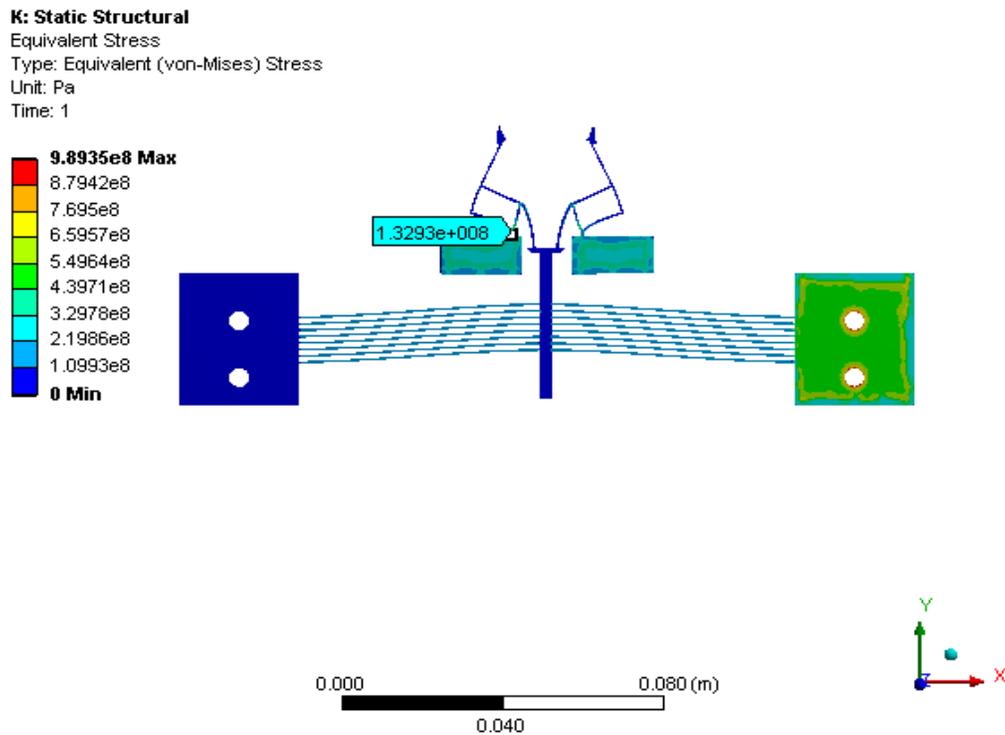


Figura 5-6 Esfuerzo total.

Por último, en la Figura 5.7 se muestra la fuerza total, con un valor de 2.462 N aplicando una temperatura de 180 °C.

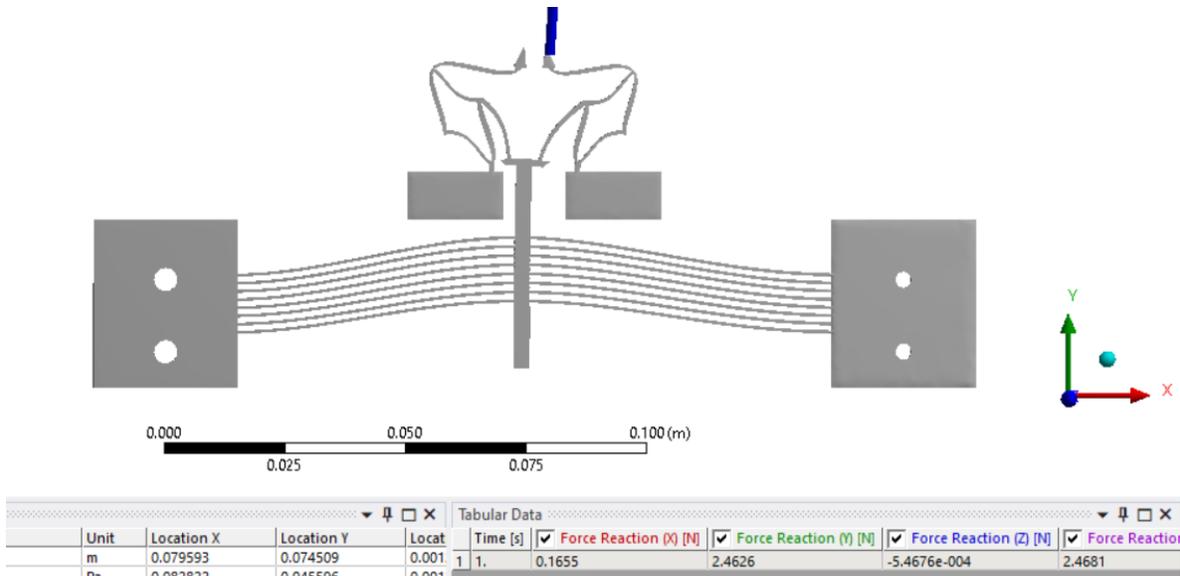


Figura 5-7 Fuerza total.

## 5.7 Comparación entre las micropinzas desarrolladas

Para observar, las mejoras generadas, se presenta la Tabla 5.1, donde pueden apreciarse, tanto las imágenes correspondientes al esfuerzo Von-Mises como los valores correspondientes. Puede observarse que solo uno de los diseños excede el valor del esfuerzo último, y se trata de la pinza sin escalamiento implementada en aluminio. Pero que, al escalarse, en un factor de 100, se resuelve este inconveniente. Es este último diseño el que, es considerado para llevar a cabo la validación de desempeño y del proceso de fabricación.

Tabla 5.1. Comparación de valores de esfuerzo Von-Mises.

<p>O: Static Structural Equivalent Stress Type: Equivalent (von-Mises) Stress Unit: Pa Time: 1</p> <p>2.8388e8 Max 2.5162e8 2.2017e8 1.8872e8 1.5726e8 1.2581e8 9.4359e7 6.2966e7 3.1453e7 0 Min</p> <p>1.7681e+008</p> <p>0 0.0005 (m) 0.00025</p>	<p>C: Static Structural Equivalent Stress Type: Equivalent (von-Mises) Stress Unit: Pa Time: 1</p> <p>1.811e8 Max 1.6125e8 1.411e8 1.2094e8 1.0079e8 8.0626e7 6.0469e7 4.0313e7 2.0156e7 0 Min</p> <p>1.0604e+008</p> <p>0 0.0007 (m) 0.00035</p>
<p>Pinza de origen</p>	<p>Pinza modificada</p>
<p>Material: Silicio</p>	<p>Material: Silicio</p>
<p>Esfuerzo Von Mises: 176 MPa en la base de los brazos.</p>	<p>Esfuerzo Von Mises: 106 MPa en la base de los brazos.</p>
<p>C: Static Structural Equivalent Stress Type: Equivalent (von-Mises) Stress Unit: Pa Time: 1</p> <p>1.4655e9 Max 1.3026e9 1.1398e9 9.7697e8 8.1414e8 6.5132e8 4.8849e8 3.2566e8 1.6283e8 0 Min</p> <p>2.9431e+008</p> <p>0 0.001 (m) 0.0005</p>	<p>K: Static Structural Equivalent Stress Type: Equivalent (von-Mises) Stress Unit: Pa Time: 1</p> <p>9.8935e8 Max 8.7942e8 7.695e8 6.5957e8 5.4964e8 4.3971e8 3.2978e8 2.1986e8 1.0993e8 0 Min</p> <p>1.3293e+008</p> <p>0.000 0.080 (m) 0.040</p>
<p>Pinza modificada implementada en Silicio (sin escalamiento)</p>	<p>Pinza modificada implementada en Silicio (con escalamiento)</p>
<p>Material: Aluminio</p>	<p>Material: Aluminio</p>
<p>Esfuerzo Von Mises: 294 MPa en la base de los brazos.</p>	<p>Esfuerzo Von Mises: 132.93 MPa en la base de los brazos.</p>

## 5.8 Proceso de fabricación

Para el proceso de fabricación se exporta la micropinza al programa de AutoCAD. En la figura 5. 8 se muestra cómo debemos de guardar el archivo, con la extensión de IGES.



Figura 5-8 Extensión de ANSYS a AutoCAD.

Abrimos el programa de AutoCAD, en un nuevo archivo, después en la parte superior izquierda, donde muestra las opciones de abrir, guardar, nuevo, etc. Vamos a la opción que dice importar. Como se muestra en la Figura 5.9.

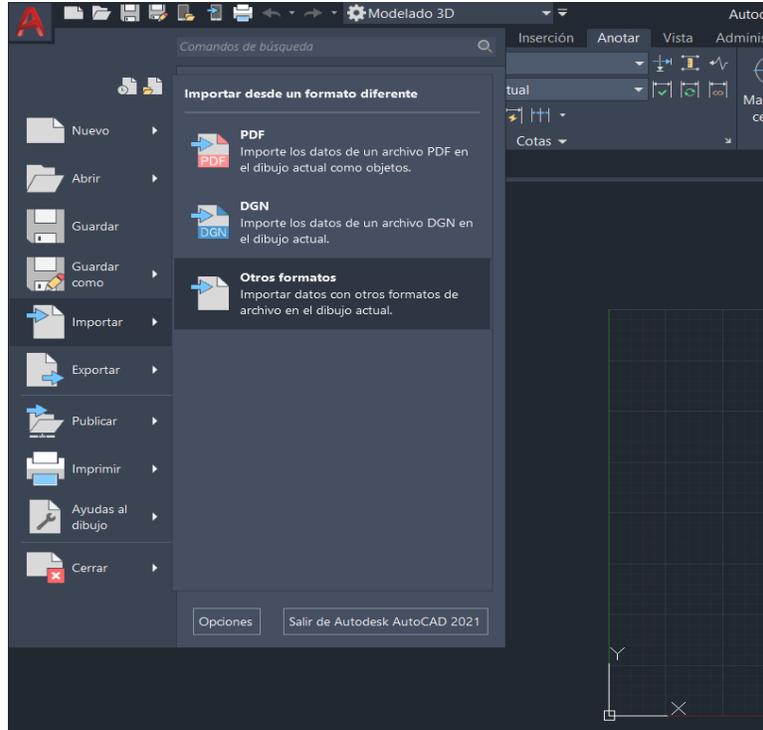


Figura 5-9 Importar la pinza en AutoCAD.

Al abrirlo, nos manda un mensaje en la parte inferior derecha, que muestra la dirección donde guardamos la micropinza en formato IGES. Damos clic sobre el mensaje azul, como se muestra en la figura 5.10.

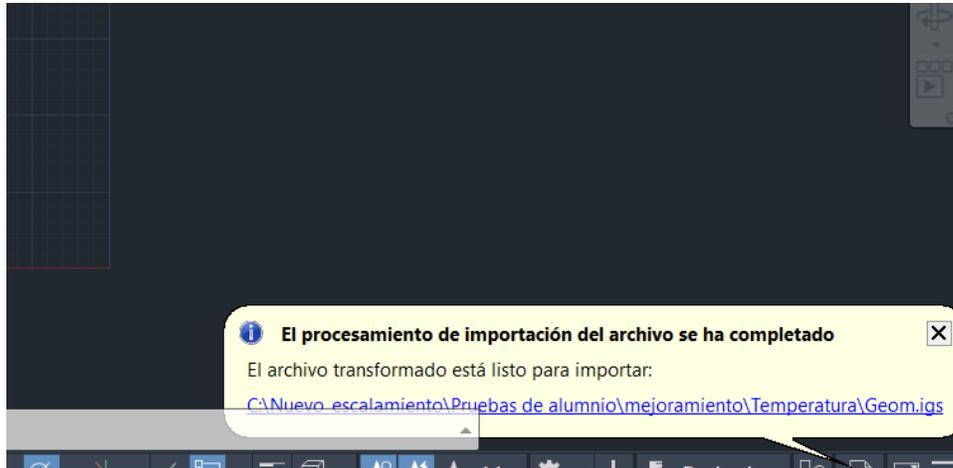


Figura 5-10 Procesamiento de importación.

En la Figura 5.11 se muestra nuestra micropinza escalada en milímetros (mm), acotamos algunas medidas para corroborar que se importó correctamente.

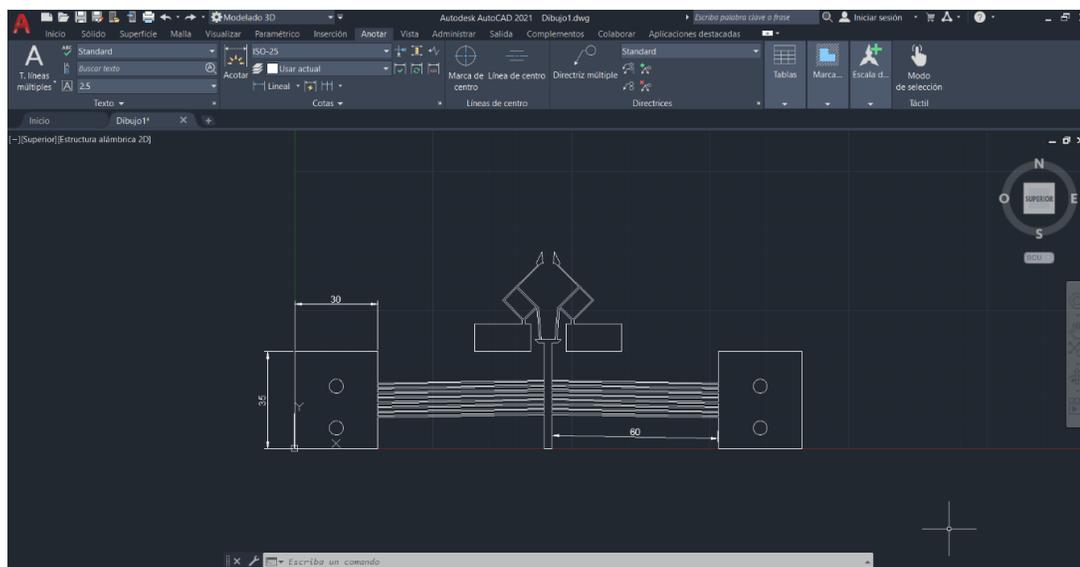


Figura 5-11 Micropinza importada en AutoCAD.

Posteriormente, guardamos el archivo con la extensión DXF, como se muestra en la Figura 5.12.

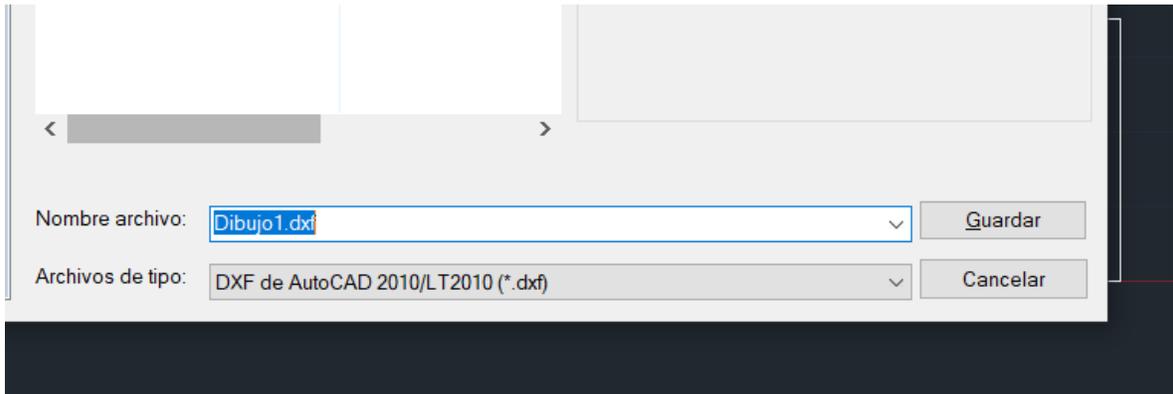


Figura 5-12 Micropinza guardada en extensión DXF.

Aspire proporciona una solución de software potente, pero intuitiva para crear y cortar piezas en un enrutador CNC. Hay herramientas para el diseño 2D y el cálculo de trayectorias 2D, como perfilado, cajera y taladrado, así como trayectorias 2.5D que incluyen; Tallado en V, tallado de prisma, trayectorias de moldeado, acanalado, trayectoria de chaflán e incluso una estrategia de texturizado decorativo.

Las exclusivas herramientas de modelado 3D de Aspire, junto con el completo conjunto de herramientas de edición y diseño 2D, facilitan la creación de sus propias piezas 2D y 3D desde cero, así como la capacidad de importar y editar datos externos 2D y 3D (Vetric Passionate About CNC, 2022).

Procedemos a importar el archivo (Micropinza) que se guardó anteriormente, en el programa de Aspire.

Cuando ya se tiene la geometría, en este caso la micropinza, se siguen una serie de pasos:

- a. Generar un código automáticamente, dependiendo del proceso a realizar para cada uno de los cortes de la geometría, y posteriormente, este código se carga a la CNC, generando las trayectorias deseadas.
- b. Seleccionar la broca adecuada para el corte.

- c. Posteriormente, colocar la lámina a utilizar como sustrato, la cual será aluminio.
- d. Verificar el funcionamiento del Spindle.
- e. Por último, abrir y ejecutar el software de Mach3 CNC Controller (Figura 5.13).

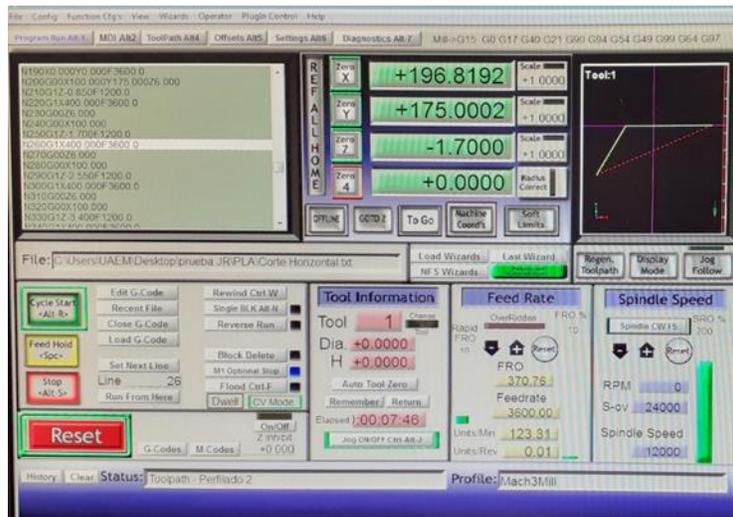


Figura 5-13 Software Mach3 CNC Controller.

En la Figura 5.14 se muestra una de las micropinzas que se fabricaron en la CNC, la cual, tuvo ligeros desfases al momento de fabricarlo, pero que nos pueden servir como modelo de pruebas al final.

Cabe señalar que, se hicieron varias fabricaciones de micropinzas en la CNC que no resultaron correctamente y tuvieron ligeros desfases en el corte de cada parte de la micropinza como en el chevrón. Esto debido a problemas de calibración y falta de mantenimiento durante el periodo de pandemia.

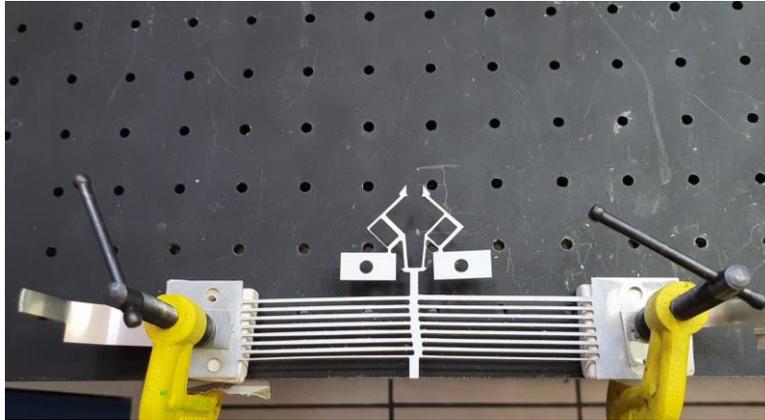


Figura 5-14 Fabricación de la micropinza con desfases en el corte.

En la última micropinza fabricada hubo imprecisiones menores, es decir, no hubo desfases significativos de corte en cada parte del chevrón y de la pinza. En la Figura 5.15 se muestra a esta micropinza.

También fue necesario hacer una base para realizar las pruebas de la micropinza, debido a que se le aplica temperatura y voltaje para su funcionamiento, no llegan a inflamar a la madera, se utilizó este material debido su disponibilidad.



Figura 5-15 Fabricación de la micropinza final y base.

## 5.7 Resultados de las pruebas físicas

Los primeros resultados de prueba fueron de la micropinza que se muestra en la Figura 5.14, aplicando diferentes temperaturas en las anclas del chevrón, con esto veremos el desplazamiento que tiene la micropinza en la flecha, ya que las anclas de la pinza no están fijas, simplemente se consideran como una carga que no afecta el desempeño intuitivo.

En la Figura 5.16 se muestra el montaje para la realización de prueba. Posteriormente, en la Figura 5.17 se presenta a la posición inicial de la micropinza antes de aplicar temperatura.



Figura 5-16 Montaje de prueba.

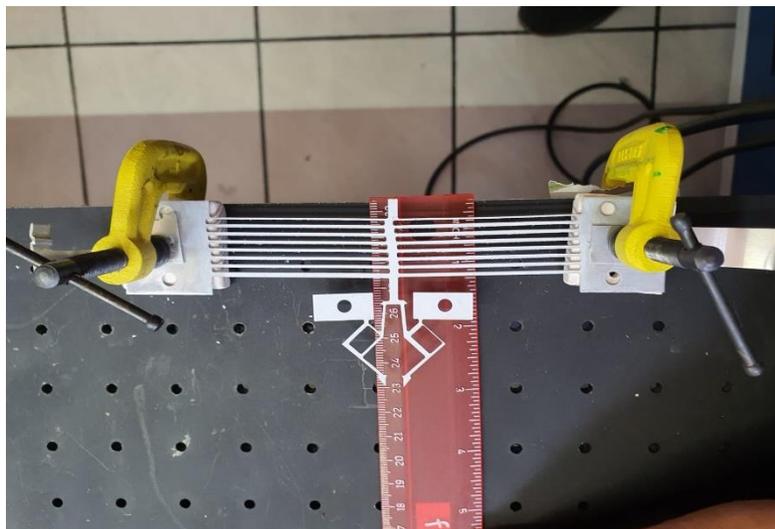


Figura 5-17 Posición inicial de la micropinza.

Al aumentar la temperatura en un rango desde 50°C hasta 100°C la flecha tiene un movimiento de 1 mm. En la Figura 5.18, se muestra la temperatura aplicada en el ancla caliente del chevrón. Posteriormente, en la Figura 5.19 se muestra el movimiento generado en la flecha.



Figura 5-18 Temperatura aplicada 75.4°C.

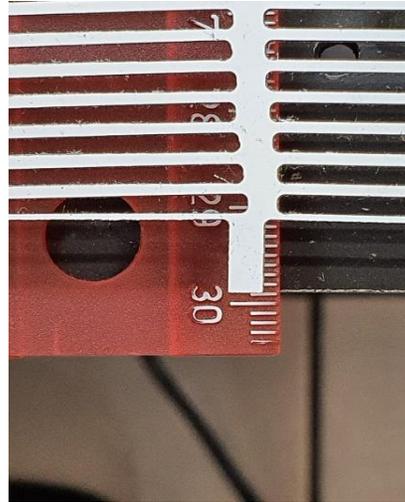


Figura 5-19 Movimiento de la flecha.

Cuando entramos en el rango de temperatura de 100°C a 180°C, el movimiento de la flecha varía de 1.2 a 1.5 mm, es la máxima temperatura que se aplica nuestra micropinza, debido a que, los elementos presentes en el sistema de medición empezaban a presentar problemas, como flameado, en particular el material de soporte.

En la Figura 5.20 se muestra la temperatura máxima aplicada, generando un desplazamiento de 1.5 mm, y en la Figura 5.21 se muestra el desplazamiento de la flecha.



Figura 5-20 Temperatura aplicada 180°C.

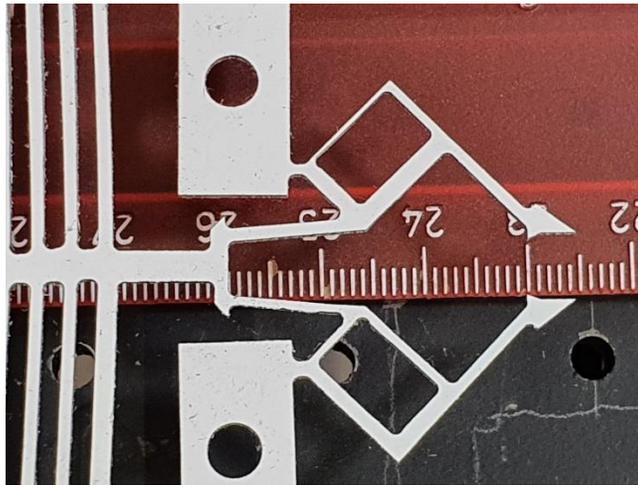


Figura 5-21 Movimiento de la flecha a 180°C.

#### 5.7.1 Resultados de las pruebas de la fabricación final de la micropinza

Los resultados de esta prueba se consideran para la comparación de los resultados numéricos de la micropinza escalada, los cuales fueron cercanos a los resultados experimentales. En la Figura 5.22 se muestra el montaje para la realización de la

prueba, en la cual se utilizará un microscopio para observar el desplazamiento de la flecha, así como para observar la apertura de las puntas de la micropinza.



Figura 5-22 Montaje de prueba final.

En la Figura 5.23 se muestra la apertura inicial de las mandíbulas de la micropinza.  
En la Figura 5.24 se muestra la posición inicial de la flecha.



Figura 5-23 Apertura inicial de la micropinza.

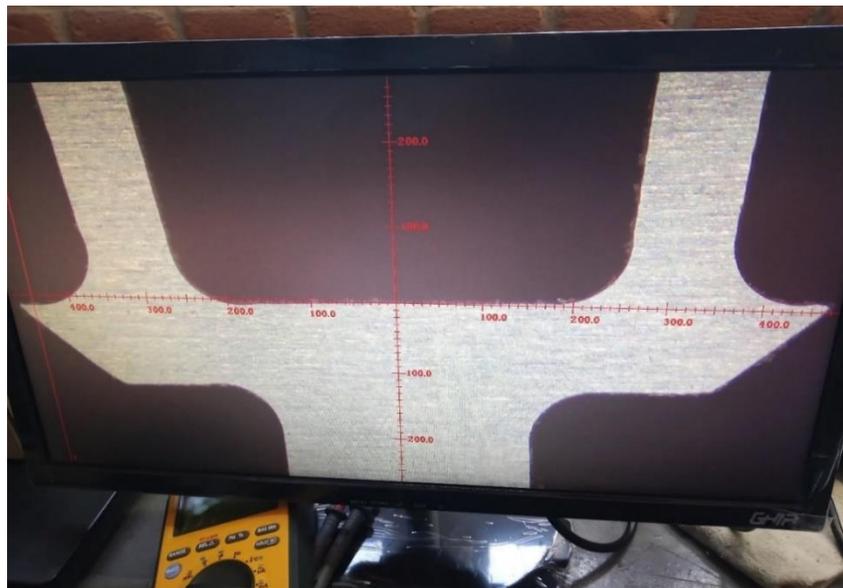


Figura 5-24 Posición inicial de la flecha.

Al aplicar una temperatura de 90 °C las mandíbulas se abren aproximadamente 10  $\mu\text{m}$  como se muestra en la Figura 2.25 y en la flecha también presenta un pequeño desplazamiento, de 50  $\mu\text{m}$ , con una temperatura de 90°C (Figura 2.26).



Figura 5-25 Apertura de las puntas.

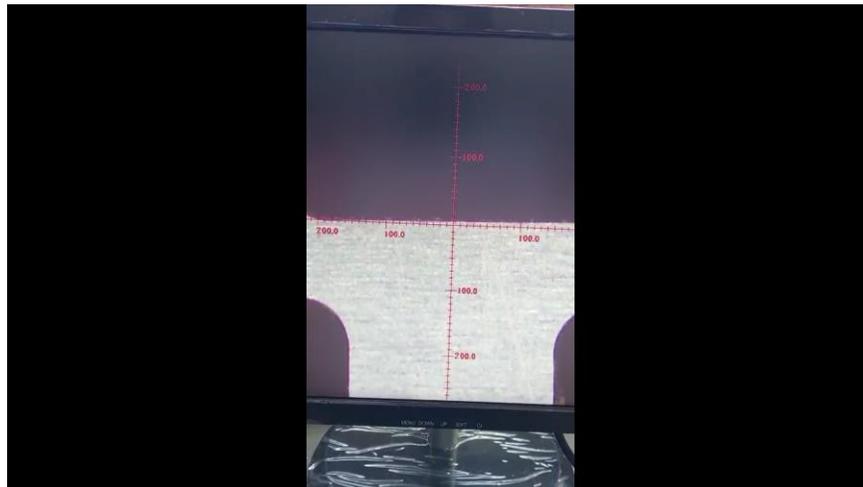


Figura 5-26 Desplazamiento de la flecha.

Quando aplicamos una temperatura de 150 °C, las mandíbulas se abren aproximadamente 25  $\mu\text{m}$ , como se muestra en la Figura 5.27. La flecha se desplaza 70  $\mu\text{m}$  como se muestra en la Figura 5.28.

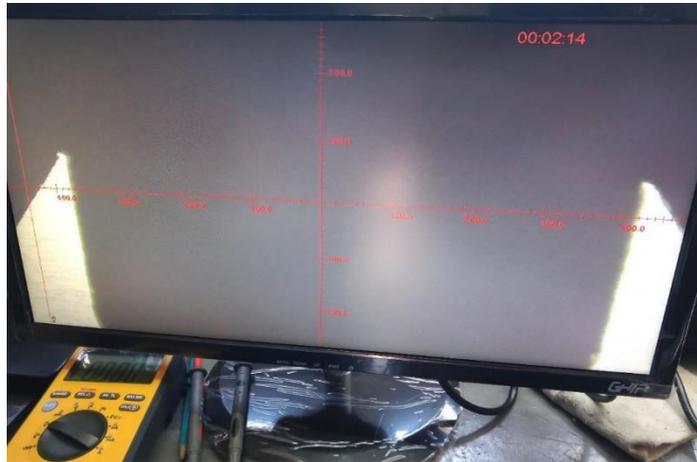


Figura 5-27 Apertura de las puntas a 150°C.

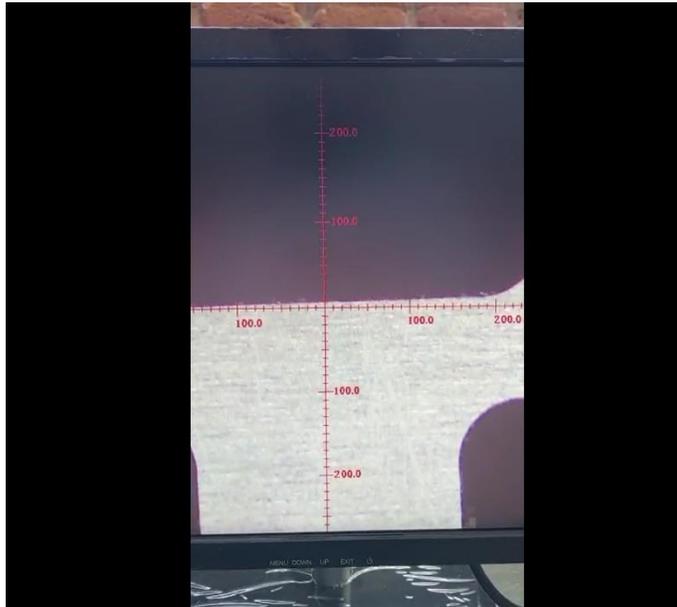


Figura 5-28 Desplazamiento de la flecha.

Al aplicar una temperatura de 173°C las puntas se abren aproximadamente 30  $\mu\text{m}$ , como se muestra en la Figura 5.29.

Posteriormente en la Figura 5.30 se muestra el desplazamiento de la flecha a 173 °C.



Figura 5-29 Apertura de las puntas a 180°C.

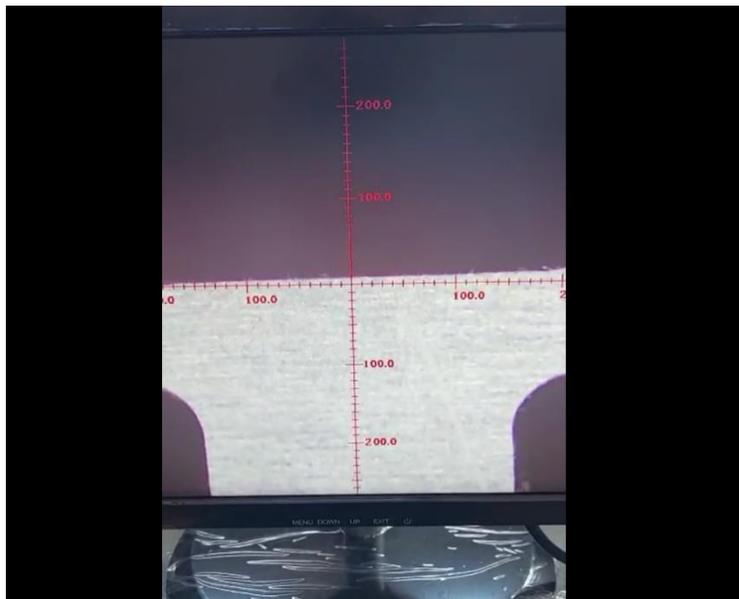


Figura 5-30 Desplazamiento de la flecha.



Figura 5-31 Temperatura.

En este capítulo se desarrolló el sistema formado por, chevrón y micropinza, y se realizaron las pruebas necesarias. Se obtuvieron resultados satisfactorios para desplazamiento y fuerza, lo cual valida tanto el desempeño, como el proceso de fabricación.

---

---

## CAPÍTULO 6. CONCLUSIONES Y TRABAJO FUTURO.

En este capítulo se presentan las conclusiones derivadas de este trabajo de tesis, así como los trabajos futuros propuestos.

## CAPÍTULO 6. CONCLUSIONES Y TRABAJO FUTURO.

### 6.1 Conclusiones

En este trabajo, el objetivo general fue logrado. Esto es, mejoramiento en el diseño de una micropinza basada en arreglos, flexibles, similares a pantógrafos, utilizando un material metálico.

El enfoque en general, de la mejora del diseño de la micropinza en silicio y aluminio fue implementar un engrosamiento en la viga que conecta a las anclas de la pinza con los brazos de forma similar a pantógrafos.

Se buscó reducir el nivel de esfuerzo en la base de los brazos de la micropinza. En Silicio, se logró obtener un valor menor de Esfuerzo Von-Mises, de 70 MPa.

Con la geometría mejorada, implementada en aluminio, el valor del esfuerzo es mayor (294 MPa), superando al último esfuerzo de este material, sin embargo, con un escalamiento de 100, se logró reducir este esfuerzo a 132 MPa. Con este último diseño, se procedió a validar su funcionamiento y fabricación, mediante pruebas de desplazamiento, aplicando calor. Esto se llevó a cabo en el laboratorio.

Posteriormente, se llevó a cabo exitosamente el escalamiento a la micropinza de aluminio para poder llevar a cabo su fabricación utilizando una CNC. El escalamiento fue determinado por las características del proceso de fabricación, así como por los materiales y recursos disponibles.

Los resultados obtenidos de la simulación, realizada en ANSYS, de la micropinza escalada fueron similares a los resultados que se obtuvieron de manera experimental. El desplazamiento simulado fue de 1.81 mm en cada brazo, dando un desplazamiento total de 3.62 mm, con una temperatura de 180°C, mientras que el desplazamiento de la micropinza fabricada fue de aproximadamente 3 mm a la misma temperatura. La diferencia se puede atribuir a la precisión del proceso de fabricación, además de que, la fijación de las anclas puede tener un cierto alejamiento de la idealidad, debido al método de sujeción empleado.

## 6.2 Trabajo futuro

Es recomendable continuar con la implementación, y en su caso mejora, de la micropinza en aluminio, la cual ha mostrado un alto potencial de desarrollo.

Cabe señalar que, es la primera vez que se implementa en nuestro laboratorio la fabricación de prototipos en metales.

Se recomienda, además, implementar un arreglo experimental de medición que permita tener fijos varios de los equipos utilizados, tal es el caso de la cámara termográfica, contar con dos microscopios para tener una vista lateral, ya que existe un ligero desplazamiento *out of plane*, que no puede determinarse con precisión desde una perspectiva del plano.

También se recomienda generar un arreglo experimental que permita la medición de la fuerza y el esfuerzo.

## Referencias

(n.d.).

- Agnus, J., Nectoux, P., & Chaillet, N. (2005). Overview of Microgrippers and Design of a Micromanipulation Station Based on a MMOC Microgripper. *2005 International Symposium on Computational Intelligence in Robotics and Automation*, 2005 International Symposium on Computational Intelligence in Robotics and Automation.
- Agnus, J., Nectoux, P., & Chaillet, N. (2005). Overview of microgrippers and design of a micromanipulation station based on a MMOC microgripper. *IEEE international symposium on computational intelligence in robotics and automation*.
- Agnus, Nectoux, & Chaillet. (2013). Overview of Microgrippers and Design of a Micromanipulation Station Based on a MMOC Microgripper.
- Ali et al. (2011). "Design, modeling and simulation of electrothermally actuated microgripper with integrated capacitive contact sensor". *Proceedings of the 14th IEEE International Conference on Multitopic*, 201-206.
- Ali et al. (2011). "Design, modeling and simulation of electrothermally actuated microgripper with integrated capacitive contact sensor". *"Design, modeling and simulation of electrothermally actuated microgripper with integrated capacitive contact sensor"*, 201-206.
- Alogla; Amalou; Balmer; Scanlan; Shu; Reuben. (2015). Micro-tweezers: design, fabrication, simulation and testing of a apneumatically actuated micro-gripper for micromanipulation and microtactile sensing. *Elsevier*.
- Álvarez, R. B. (2011). Caracterización de Microactuadores Tipo. *Inaoe*.
- Ando, Y. (1992). Microgrippers. *Journal of robotics and mechatronics*, 214-216.
- Ando, Y. (1992). Microgrippers. *Journal of robotics and mechatronics*, 214-216.
- Ansys. (2018). Retrieved from Pagina web empresa Ansys: <https://www.ansys.com/>
- Ansys. (2022, Marzo 20). *3DCadPortal*. Retrieved from 3DCadPortal: <https://www.3dcadportal.com/ansys.html#:~:text=ANSYS%20Workbench%20es%20una%20plataforma,sus%20m%C3%B3dulos%20incluyendo%20multi%20f%C3%ADsica>.
- Ansys. (2022). *Academia.edu*. Retrieved from Pagina web introducción al programa de Ansys: [https://www.academia.edu/6158449/Introducci%C3%B3n\\_al\\_Programa\\_ANSYS\\_Hoja\\_1](https://www.academia.edu/6158449/Introducci%C3%B3n_al_Programa_ANSYS_Hoja_1)
- Aravind, Ramesh, D., Ramya, S., & Kalaiarasi, S. P. (2016). Comparison of Different Materials on Performance of Chevron Shaped Electrothermal Microgripper. *ResearchGate*.
- Aravind, Ramesh, Ramya, & Kalaiarasi., P. &. (2016). Comparison of Different Materials on Performance of Chevron Shaped Electrothermal Microgripper. *ResearchGate*.
- Báez, C. R. (2011). Caracterización de Microactuadores Tipo. *INAOE*.
- Bindu, Kushal, & Potdar. (2011). Study of Piezoelectric Cantilever Energy Harvesters. *INTERNATIONAL JOURNAL OF INNOVATIVE RESEARCH AND DEVELOPMENT, Vol 3 Issue 2*.
- Bogado, M. M. (2012). Materiales y materias primas. *Guía didáctica*, 1-20.

- Breguet, J. M., Henein, S., Mericio, R., & Clave, R. (1997). Monolithic piezoceramic flexible structure for micromanipulation. *International conference on ultraprecision in manufacturing engineering*, (pp. 397-400). Braunschweig- Germany.
- Breguet, J. M., Henein, S., Mericio, R., & Clave, R. (1997). Monolithic piezoceramic flexible structure for micromanipulation. *International conference on ultraprecision in manufacturing engineering*.
- Chable, M. P. (2019). "DISEÑO Y CARACTERIZACIÓN DE MICROPINZAS". *Tesis*, 41-42.
- Colín, A. A. (2020). *Micropinza basada en un arreglo de pántografos. Reporte de estadía, Ingeniería en Mecatronica. UTEZ*. Morelos: Asesor interno Dr. Jorge Salvador Valdez Martines, asesor externo Dra. Margarita T. T.
- Deshmukh, B., & Pardeshi, S. (2012). Study of various compliant micromechanism . *International journal of mechanical engineering*, 574-582.
- Electromecánicos, S. M. (2013, 02 02). *SABERESYCIENCIAS*. Retrieved from SABERESYCIENCIAS: <http://saberesciencias.com.mx/2013/02/02/sistemas-micro-electromecanicos/>
- Espinosa, H., Zhu, Y., & Moldovan, & N. (2007). Design and Operation of a MEMS-Based Material Testing System for Nanomechanical Characterization. *Journal of Microelectromechanical System Vol. 16, No. 5*, 1219-1231.
- Ferrobotics*. (2021, Noviembre 18). Retrieved from <https://www.ferrobotics.com/en/news/what-is-an-end-effector-and-or-end-of-arm-tool-eoat/>. Consultado el 18 de noviembre de 2021
- Herserman, D. (1986). Piezoelectric polymer micromanipulator. *United state patent*.
- Herserman, D. (1986). Piezoelectric polymer micromanipulator. *United state patent*, 1-5.
- Herserman, D. (1986). Piezoelectric polymer micromanipulator. *United state patent*, 1-5.
- Joule, L. d. (2018, Diciembre 18). *StuDocu*. Retrieved from StuDocu Ley de Joule: <https://www.studocu.com/es-mx/document/servicio-nacional-de-bachillerato-en-linea-de-la-secretaria-de-educacion-publica/quimica-fisica/m12-s1-ley-de-joule-pdf/11598615>
- Kaajakari. (2009). *Practical MEMS*. Retrieved from Small Gear Publishing.
- Kaajakari, V. (2009). *Practical MEMS. Small Gear Publishing*:. Las vegas, NV, USA: ISBN 978-0-9822991-0-4.
- Lerch, P., Slimane, C., Romanowicz, B., & Ren, P. (1996). Modelization and characterization of asymmetrical thermal micro-actuators. *Journal of micromechanics and microengineering*, 134-137.
- Patila, V. S., Aneraob, P. R., & Chinchani, S. S. (2018). Design and analysis of compliant mechanical amplifier. *ScienceDirect*.
- Power, M., Thompson, A. J., Anastasova, S., & Yang, G.-Z. (2018). A monolithic force sensitive 3D microgripper fabricated on the tip of an optical fiber using photon polymerization. *Science new*, 1-10.
- Ramírez, F. J. (2014). Diseño óptimo de micromecanismos tridimensionales con actuación electrotérmica utilizando optimización topológica y unidades de procesamiento gráfico (GPU). *ResearchGate*.
- Tecpoyotl, M., Cabello, R., & Vera, J. G. (2015). Design and simulation of an optimized electrothermal. *Redalyc*.
- Thangavel, A., Sekar, R., R. D., & Sukumar, P. (2016). Comparison of Different Materials on Performance of Chevron Shaped. *ResearchGate*.

- Vargas-Chable, P., Ferrara-Bello, C., Sandoval- Reyes, J., & Tecpoyotl-Torres, M. (2019). A novel electrothermal compliance microgripper. *International conference on mechatronics, electronics and automotive engineering (ICMEAE)*, 1-5.
- Varona et al. (2009). "Design and fabrication of a novel microgripper based on electrostatic actuation". *Proceedings of the IEEE International Midwest*, 827-832.
- Varona, J., Tecpoyotl-Torres, M., & Hamoui, A. (2007). Modeling of MEMS Thermal Actuation with External Heat Source. Electronics, Robotics and Automotive. *IEEE Xplore*.
- Vetric Passionate About CNC*. (2022, abril 04). Retrieved from Vetric Passionate About CNC: [https://www.vetric.com/products/aspire?gclid=CjwKCAjwi6WSBhA-EiwA6NioK7H4mO2fOXWtbo5cC2LbQLIo4hBv\\_RyICBAumyPa0-NmPY5IhAqmOBoCNTIQAvD\\_BwE](https://www.vetric.com/products/aspire?gclid=CjwKCAjwi6WSBhA-EiwA6NioK7H4mO2fOXWtbo5cC2LbQLIo4hBv_RyICBAumyPa0-NmPY5IhAqmOBoCNTIQAvD_BwE)
- Yang, & Qingsong, &. (2017). A review on actuation and sensing techniques for MEMS-based. *J Micro-Bio Rob.*
- Yang, S., & Qingsong, &. (2017). A review on actuation and sensing techniques. *REVIEW*.
- Zhu, Y., Corigliano, A., & Espino, &. H. (2016). A thermal actuator for nanoscale in situ microscopy testing: design and characterization. *J. Micromech. Microeng.* 16, 242-253.
- Zubir, M., Shirinzadeh, & Tian. (2009). A new design of piezoelectric driven compliant-based microgripper. *Elsevier*.