



**UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DEL ESTADO DE MORELOS**

**FACULTAD DE CIENCIAS QUÍMICAS E INGENIERÍA**

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

**“MICROPINZA BASADA EN UN ACTUADOR  
ASIMÉTRICO”**

**TESIS PARA OBTENER EL GRADO DE:**

**LICENCIATURA EN INGENIERÍA MECÁNICA**

**C. JESUS ANTONIO RAMOS MARQUEZ**

**SINODALES**

**Dr. Ramón Cabello Ruíz**

**Dr. Luis Cisneros Villalobos**

**Dr. J Jesús Escobedo Alatorre**

**Dr. Pedro Vargas Chablé**

**Dra. Margarita Tecpoyotl Torres**

**CUERNAVACA, MORELOS, JUNIO 2022**

## **Resumen**

Esta tesis se enfoca en el diseño de una pinza micropinza electrotérmica accionada por un actuador asimétrico, mediante una diferencia de potencial moderada, con la finalidad de que en las puntas (mandíbulas), donde se sujetan los objetos, no tenga una temperatura elevada ya que, algunos objetos no pueden soportar grandes temperaturas

La diferencia de potencial utilizada fue de 0 – 2 V ya que con ese valor se genera una temperatura de 123.72 °C la cual está situada en las mandíbulas.

El desplazamiento que se tuvo por cada mandíbula fue de 1.6  $\mu\text{m}$ . La apertura inicial entre las puntas es de 50 $\mu\text{m}$ , cabe mencionar que esta es una pinza normalmente cerrada, que se abre hasta 53. 2  $\mu\text{m}$ , con una fuerza de sujeción de 121 mN para sujetar los microobjetos con un peso en el rango de 12.3343 gramos.

Durante la realización de esta tesis se realizaron parametrizaciones sobre el ángulo de inclinación de los brazos de sujeción, el ángulo de mandíbulas y largo del brazo de la pinza.

Se implementaron, además, soportes entre los brazos del chevrón asimétrico y el brazo Z, en cuyo extremo se ubica la mandíbula.

Se realizó un diseño preliminar y un diseño final, el cual tuvo un porcentaje de mejora del 14% para el desplazamiento y un 65% para la fuerza de sujeción.

Posteriormente, se buscó en la bibliografía una micropinza accionada por un actuador chevrón simétrico, por ser la geometría de actuador más cercana a la utilizada. En comparación se llevó a cabo con la micropinza de esta tesis, teniendo una mejora del 53% en el desplazamiento y 99% en la fuerza de sujeción.

Para la implementación de los resultados experimentales, la micropinza se escaló e implementó en Aluminio. Se realizó la comparación en este caso, de los resultados experimentales con los numéricos, generándose porcentajes de error del 12% para el desplazamiento y la distribución de temperatura, así como para la fuerza de sujeción.

## **Abstract**

This thesis focuses on the design of an electrothermal micro-tweezer activated by an asymmetric actuator, by means of a moderate potential difference, so that the tips (jaws), where objects are held, do not have a high temperature since, some objects cannot withstand high temperatures

The potential difference used was 0 – 2 V since with that value a temperature of 123.72 °C is generated, which is located in the jaws.

The displacement that was had by each mandible was 1.6 μm. The initial opening between the tips is 50 μm, it is worth mentioning that this is a normally closed forceps, opening up to 53.2 μm, with a clamping force of 121 mN to clamp micro-objects with a weight in the range of 12.334 grams.

During the realization of this thesis, parameters were made on the angle of inclination of the clamping arms, the angle of the jaws and the length of the clamp arm.

In addition, supports are implemented between the arms of the asymmetric chevron and the Z arm, at whose end the jaw is located.

A preliminary design and a final design were made, which had an improvement percentage of 14% for displacement and 65% for clamping force.

Subsequently, a microgripper actuated by a symmetrical chevron actuator was searched in the literature, as it was the closest actuator geometry to the one used. The comparison was made with the micro-clamp of this thesis, having an improvement of 53% in displacement and 99% in clamping force.

For the implementation of the experimental results, the microgripper was scaled and implemented in Aluminum. In this case, the comparison of the experimental results with the numerical ones was made, generating error percentages of 12% for the displacement and temperature distribution, as well as for the retention force.

## ***Agradecimientos***

Agradezco a la doctora Margarita Tecpoyotl Torres, la cual fue un apoyo muy grande en esta investigación, ya que, ella me brindó sus conocimientos para realizar la investigación, agradezco su paciencia y constancia, si no fuese por usted este trabajo no se hubiera logrado.

Agradezco a mis compañeros de laboratorio que siempre estuvieron conmigo cuando lo necesitaba. Al Doctor Pedro Vargas Chablé, al Maestro Josué Sandoval Reyes y a la Lic. Fernanda, gracias por brindarme de su apoyo y sus conocimientos. También al Centro de Investigación en Ingeniería y Ciencias Aplicadas (CIICAp), por brindarme el apoyo para poder desarrollar este trabajo en el laboratorio de Electrónica y dispositivos para sistemas de comunicación.

A CONACyT, por el apoyo de beca de tesis de licenciatura, Ref. 31640, obtenido como parte del proyecto de Ciencia Básica "Diseño, análisis e implementación de novedosos dispositivos MEM inerciales y electrotérmicos".

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

## ***Dedicatoria***

A mi familia y amigos, quienes siempre me dieron un apoyo emocional muy grato, en todo el tiempo que se realizó la investigación.

A mi abuelo Jesús Márquez Berdeja que en paz descansa.

## **Índice general**

Resumen.....	I
Abstract .....	II
Agradecimientos .....	III
Dedicatoria .....	IV
Índice general.....	V
Índice de Figuras .....	VIII
Índice de Tablas.....	XI
<b>CAPÍTULO 1. INTRODUCCIÓN.....</b>	<b>2</b>
1.1. Introducción .....	2
1.2. Antecedentes .....	3
1.3 Objetivo general.....	3
1.4 Objetivos específicos.....	3
1.5. Justificación .....	4
1.6, Limitaciones .....	4
1.7, Organización de la tesis.....	4
<b>CAPÍTULO 2. MARCO TEÓRICO.....</b>	<b>7</b>
2.1. Tecnología MEMS.....	7
2.1.1. Aplicación de la tecnología MEMS en la tecnología.....	7
2.1.2. Aplicación de la tecnología MEMS en la medicina .....	8
2.1.3. Aplicación de la tecnología MEMS en la mecánica .....	9
2.2. Micropinzas .....	11
2.2.1. Tipos de micropinzas .....	11
2.3. Tipos de actuadores de micropinzas .....	12
2.4. Micropinzas con actuador piezoeléctrico. ....	14
2.5. Micropinzas con actuador electromagnéticas .....	15

2.6 Micropinzas con actuador electroestático.....	16
2.7. Micropinzas con actuador electrotérmico .....	17
2.7.1. Actuador electrotérmico en forma de U.....	17
2.7.2. Actuador electrotérmico en forma de V .....	18
2.7.3. Actuador electrotérmico en forma de Z.....	19
2.8. Micropinzas con actuador de aleación con memoria de forma .....	20
2.9. Actuador chevrón asimétrico.....	24
2.10. Ley de ohm .....	25
2.11. Circuitos eléctricos .....	28
<b>CAPITULO 3 METODOLOGIA.....</b>	<b>36</b>
3.1. metodología a implementar.....	38
<b>CAPÍTULO 4. DISEÑO Y SIMULACIÓN DEL ACTUADOR CHEVRON Y LA MICROPINZA.....</b>	<b>41</b>
4.1. Características del material para el chevrón y la micropinza.....	42
4.2. Diseño del chevrón.....	43
4.2.1. Modelo numérico del chevrón.....	44
4.3. Especificaciones de la micropinza .....	52
4.4. Diseño preliminar de la micropinza. ....	53
4.4.1. Resultados de simulación del diseño preliminar de la micropinza. ....	53
4.5. Diseño preliminar de la micropinza primera modificación.....	58
4.5.1. Resultados de simulación del diseño preliminar de la micropinza con la primera modificación.....	59
4.6. Diseño preliminar de la micropinza segunda modificación. ....	62
4.6.1. Resultados de simulación del diseño preliminar de la micropinza con la segunda modificación.....	63
4.7. Diseño preliminar de la micropinza tercera modificación. ....	66
4.8. Diseño final de la micropinza .....	69
4.8.1. Resultados de la simulación del diseño final de la micropinza .....	70
4.9. Modificación de la magnitud de la resistividad del material .....	74

<b>CAPÍTULO 5. COMPARACION CON OTRA PINZA DE LA BIBLIOGRAFIA, IMPLEMENTACION EN ALUMINIO.....</b>	<b>79</b>
5.1. Simulación de la micropinza de la bibliografía.....	80
5.2. Comparación de resultados numéricos de la micropinza reportada en la literatura con la implementación en ANSYS™ .....	84
5.3. Conclusiones de la micropinza de la bibliografía .....	88
5.4. Comparación entre la micropinza del artículo con la micropinza propuesta. ....	89
5.5. Análisis eléctrico de la micropinza. ....	93
5.6. Análisis eléctrico de la micropinza en el software ANSYS.....	103
5.7, Análisis experimental de la implementación en Aluminio.....	105
5.8. Análisis numérico de la implementación en Aluminio .....	120
<b>CAPÍTULO 6. Conclusiones y mejoras a futuro.....</b>	<b>127</b>
6.1 conclusiones.....	128
6.2 Trabajo futuro .....	130
<b>Bibliografía .....</b>	<b>131</b>



## **Índice de Figuras**

Figura 2. 1 MEMS en productos electrónicos, ( Nava Jiménez & Escamilla Santana, 2015).....	8
Figura 2. 2 Relación entre áreas de aplicación en tecnologías MEMS (Fujita H. , 1998) .....	10
Figura 2. 3 Imagen de una micropinzas accionada por un actuador piezoeléctrico (Haddab, Chaillet, & Bourjault, 2000).....	12
Figura 2. 4 Imagen de una micropinzas accionada por un actuador electromagnético, ( Giouroudi, 2008) .	12
Figura 2. 5 Imagen de una micropinzas accionada por un actuador electrostático, ( Chen, Chen, Liu, Wang, & Li, 2009) .....	13
Figura 2. 6 Imagen de una micropinzas accionada por un actuador electrotérmico, (Kolahdoozan, Esfahani , & Hassani, 2017) .....	13
Figura 2. 7 imagen de una micropinzas accionada por un actuador electrotérmico en forma de U, (Kolahdoozan, Esfahani , & Hassani, 2017) .....	18
Figura 2. 8 Geometría del actuador térmico en forma de V, ( D & Ananthasuresh, 2001).....	18
Figura 2. 9 Geometría del actuador térmico en forma de Z, (D & Ananthasuresh, 2001). .....	19
Figura 2. 10 Actuador chevrón asimétrico, (Elaboración propia). .....	25
Figura 2. 11 Elementos para calcular la resistencia del material, (Matthew N. & Alexander, 2013). ....	26
Figura 2. 12 Variables de la Ley de Ohm. ....	28
Figura 2. 13 Dos resistencias conectadas en serie, ( Moreno, 2013).....	29
Figura 2. 14 Resistencia equivalente de dos resistencias en serie ( Moreno, 2013).....	29
Figura 2. 15 Dos resistencias conectadas en paralelo, ( Moreno, 2013). .....	30
Figura 2. 16 Resistencia equivalente de dos resistencias en paralelo, ( Moreno, 2013). .....	30
Figura 2. 17 Identificación de las resistencias en paralelo, ( Moreno, 2013). .....	31
Figura 2. 18 Obtención de la resistencia equivalente en paralelo, ( Moreno, 2013). .....	31
Figura 2. 19 Resistencia equivalente serie paralelo, ( Moreno, 2013). .....	31
Figura 2. 20 Circuito eléctrico, (Matthew N. & Alexander, 2013). .....	32
Figura 2. 21 (a) Red estrella y (b) equivalente resistivo, (Matthew N. & Alexander, 2013). .....	32
Figura 2. 22 (a) Red delta y (b) equivalente resistivo, (Matthew N. & Alexander, 2013). .....	33
Figura 2. 23 superposición de una red estrella en la red delta, (Matthew N. & Alexander, 2013). .....	33
Figura 2. 24 (a) Red estrella. (b) Equivalente, (Matthew N. & Alexander, 2013).....	34
Figura 3. 1 Metodología general, (Elaboración propia).....	37
Figura 3. 2 metodología del diseño y la simulación, (Elaboración Propia). .....	39
Figura 4. 1 Actuador asimétrico en $\mu\text{m}$ , (Elaboración propia). .....	43
Figura 4. 2 Página principal de ANSYS Workbench, (Elaboración propia). .....	44
Figura 4. 3 actuador chevrón diseñado en” desing modeler”, (Elaboración propia). .....	45
Figura 4. 4 asignación del nombre del material, (Elaboración propia) .....	45
Figura 4. 5 Propiedades de silicio en el software, (Elaboración propia). .....	46
Figura 4. 6 asignación del material a la geometría, (Elaboración propia).....	47
Figura 4. 7 Refinamiento en cara frontal del actuador chevrón asimétrico, (Elaboración propia). .....	47
Figura 4. 8 Condiciones de frontera del actuador asimétrico, (Elaboración propia). .....	49
Figura 4. 9 Distribución de temperatura, (Elaboración propia).....	49
Figura 4. 10 Soportes fijos para el desplazamiento, (Elaboración Propia).....	50
Figura 4. 11 Desplazamiento del chevrón asimétrico en $\mu\text{m}$ , (Elaboración propia). .....	50
Figura 4. 12 Condiciones de frontera para la fuerza de reacción, (Elaboración propia). .....	51
Figura 4. 13 Fuerza de reacción chevrón asimétrico, (Elaboración Propia). .....	51
Figura 4. 14 diseño preliminar de la micropinza en $\mu\text{m}$ (Elaboración propia). .....	53
Figura 4. 15 Refinamiento en el diseño preliminar, (Elaboración propia). .....	54

Figura 4. 16 condiciones de frontera para la temperatura, (elaboración propia). .....	55
Figura 4. 17 Distribución de temperatura, (elaboración propia).....	56
Figura 4. 18 Desplazamiento del diseño preliminar de la micropinza en $\mu\text{m}$ , (Elaboración propia). ....	56
Figura 4. 19 Condiciones de frontera para la fuerza, (Elaboración propia). .....	57
Figura 4. 20 Fuerza de reacción del diseño preliminar de la micropinza, (elaboración propia).....	57
Figura 4. 21 Dimensiones del diseño preliminar con la primera modificación en $\mu\text{m}$ , (Elaboración propia). .....	59
Figura 4. 22 Mallado del diseño preliminar con la primera modificación, (Elaboración propia).....	60
Figura 4. 23 Distribución de temperatura del diseño preliminar con la primera modificación, (Elaboración propia). .....	60
Figura 4. 24 Desplazamiento del diseño preliminar con la primera modificación, (Elaboración propia). .....	61
Figura 4. 25 Fuerza de sujeción del diseño preliminar con la primera modificación, (Elaboración propia). .....	61
Figura 4. 26 Diseño preliminar de la micropinza 2 modificación en $\mu\text{m}$ , (Elaboración propia). .....	63
Figura 4. 27 Mallado del diseño preliminar con la segunda modificación, (Elaboración Propia). .....	64
Figura 4. 28 Distribución de temperatura del diseño preliminar con la segunda modificación, (Elaboración propia). .....	64
Figura 4. 29 Desplazamiento del diseño preliminar con la segunda modificación, (Elaboración propia). .....	65
Figura 4. 30 Fuerza de sujeción del diseño preliminar con la segunda modificación, (Elaboración propia). .....	65
Figura 4. 31 Diseño preliminar de la tercera modificación (Elaboración propia).....	69
Figura 4. 32 Diseño final de la micropinza, (Elaboración propia). .....	69
Figura 4. 33 dimensiones del diseño final en $\mu\text{m}$ , (Elaboración propia). .....	70
Figura 4. 34 Condiciones de frontera para la distribución de temperatura del diseño final, (Elaboración propia). .....	71
Figura 4. 35 Resultados de la distribución de temperatura para el diseño final (Elaboración propia). .	71
Figura 4. 36 Desplazamiento del diseño final, (Elaboración propia). .....	72
Figura 4. 37 Condiciones de frontera para la fuerza de sujeción del diseño final, (Elaboración propia). .....	72
Figura 4. 38 distribución de temperatura del diseño final con la modificación del material, (Elaboración propia). .....	75
Figura 4. 39 Desplazamiento numérico del diseño final con la modificación del material, (Elaboración propia). .....	76
Figura 4. 40 Fuerza de sujeción del diseño final con la modificación del material (Elaboración propia). .....	76
Figura 4. 41 Esfuerzo último del diseño final con la modificación del material (Elaboración propia). ..	77
Figura 5. 1 micropinza de la bibliografía en software ANSYS, (Elaboración Propia). .....	81
Figura 5. 2 condiciones de frontera, (Pankaj , Uma, & Umopathy, 2015). .....	82
Figura 5. 3 Resultados de la distribución de temperatura para 2 V, (Elaboración propia). .....	83
Figura 5. 4 Resultados de desplazamiento para 2 V, (Elaboración propia).....	83
Figura 5. 5 Resultados numéricos del desplazamiento, reportados por (Pankaj , Uma, & Umopathy, 2015) .....	84
Figura 5. 6 Resultados numéricos de la distribución de temperatura, reportados por (Pankaj , Uma, & Umopathy, 2015). .....	85
Figura 5. 7 Gráfica de los resultados de en comparación del desplazamiento, (Elaboración propia)....	88
Figura 5. 8 Gráfica de los resultados de la comparación del desplazamiento, (Elaboración propia). ....	88
Figura 5. 9 Micropinza del artículo con las modificaciones, (Elaboración propia). .....	90

Figura 5. 10 Condiciones de frontera para la distribución de temperatura (Elaboración propia). .....	91
Figura 5. 11 Condiciones de frontera para el desplazamiento y fuerza de sujeción (Elaboración propia) .....	91
Figura 5. 12 primer segmento de la micropinza, (Elaboración propia).....	94
Figura 5. 13 arreglo de resistencias para la micropinza, (Elaboración propia). .....	94
Figura 5. 14 Representación gráfica del cambio delta a estrella en el análisis eléctrico. (Elaboración propia). .....	96
Figura 5. 15 Sustitución del cambio delta a estrella en las resistencias de la micropinza, (Elaboración propia). .....	97
Figura 5. 16 segunda forma de representar el cambio delta a estrella en la resistencia de las micropinzas, (Elaboración propia). .....	97
Figura 5. 17 primera simplificación del circuito de la micropinza, (Elaboración propia). .....	98
Figura 5. 18 sustitución de forma estrella delta, (Elaboración propia). .....	99
Figura 5. 19 tercera simplificación del circuito de la micropinza, (Elaboración propia). .....	100
Figura 5. 20 cuarta simplificación del circuito de la micropinza, (Elaboración propia). .....	101
Figura 5. 21 Condiciones de frontera de la intensidad de corriente con el método numérico, (Elaboración propia). .....	104
Figura 5. 22 Base de la micropinza con material aislante, (Elaboración propia). .....	105
Figura 5. 23 instrumentos para la elaboración de las pruebas experimentales, (Elaboración propia). 106	
Figura 5. 24 sujeción de la micropinza en la base del microscopio, (Elaboración propia). .....	108
Figura 5. 25 Distribución de temperatura del análisis experimental, (Elaboración propia). .....	108
Figura 5. 26 Desplazamiento de la implementación en Aluminio, (Elaboración propia). .....	109
Figura 5. 27 Distribución de temperatura de las puntas de sujeción, (Elaboración propia). .....	110
Figura 5. 28 distribución de temperatura del ancla caliente, (Elaboración propia). .....	110
Figura 5. 29 distribución de temperatura de la flecha, (Elaboración propia). .....	111
Figura 5. 30 Desplazamiento de la implementación en Aluminio, (Elaboración propia). .....	111
Figura 5. 31 rodamiento para el análisis de fuerza (Elaboración propia). .....	112
Figura 5. 32 sujeción de polea y micropinza en la base del microscopio, (Elaboración propia). .....	113
Figura 5. 33 báscula para análisis de fuerza de sujeción, (Elaboración propia) .....	114
Figura 5. 34 Condiciones de frontera para la distribución de temperatura en Aluminio, (Elaboración propia). .....	122
Figura 5. 35 Condiciones de frontera para el desplazamiento en Aluminio, (Elaboración propia). .....	123
Figura 5. 36 Resultados de la distribución de temperatura en Aluminio, (Elaboración propia). .....	123
Figura 5. 37 Resultados del desplazamiento en Aluminio, (Elaboración propia). .....	124
Figura 5. 38 Condiciones de frontera para el desplazamiento con peso, (Elaboración propia). .....	124
Figura 5. 39 Desplazamiento de la micropinza con peso, (Elaboración propia). .....	125

## Índice de Tablas

Tabla 2. 1 Tipos de actuadores (H., A. Griffiths, & Fahmy, 2020). .....	12
Tabla 2. 2 Comparación de los diferentes tipos de técnicas de actuación, (Yang & Qingsong, A review on actuation and sensing techniques for MEMS-based microgrippers, 2017). .....	13
Tabla 2. 3 Varios tipos de micropinzas y sus principales características (Yang & Qingsong, 2017). .....	21
Tabla 2. 4 Resistividad de algunos materiales comunes, (Matthew N. & Alexander, 2013).....	27
Tabla 4. 1 Propiedades del silicio .....	42
Tabla 4. 2 Dimensiones del actuador chevrón asimétrico, (Elaboración propia). .....	43
Tabla 4. 3 Resultados de la malla del chevrón asimétrico, (Elaboración propia).....	48
Tabla 4. 4 Resultados de la simulación del chevrón, (Elaboración propia).....	52
Tabla 4. 5 resultados de la simulación de la malla del diseño preliminar, (Elaboración propia).....	54
Tabla 4. 6 Resultados de simulación del diseño preliminar (Elaboración propia). .....	58
Tabla 4. 7 Parametrización del largo de los brazos, (Elaboración propia).....	59
Tabla 4. 8 Parámetros de simulación del diseño preliminar con la primera modificación, (Elaboración propia) .....	62
Tabla 4. 9 Parametrización del ángulo de inclinación de las puntas del brazo de sujeción, (Elaboración propia). .....	62
Tabla 4. 10 Resultados de la simulación del diseño preliminar con la segunda modificación. (Elaboración propia) .....	66
Tabla 4. 11 Parametrización del ángulo de los brazos de sujeción de la micropinza, (Elaboración propia). .....	67
Tabla 4. 12 Parametrización del ángulo de los brazos de sujeción de la micropinza, (Elaboración propia). .....	67
Tabla 4. 13 Parametrización del ángulo de los brazos de sujeción de la micropinza, (Elaboración propia). .....	68
Tabla 4. 14 Parámetros de la simulación del diseño final, (Elaboración propia). .....	73
Tabla 4. 15 Comparación del diseño preliminar con el diseño final, (Elaboración propia). .....	74
Tabla 4. 16 comparación de la micropinza con la resistividad actualizada, (Elaboración propia). .....	77
Tabla 5. 1 dimensiones de la micropinza de la bibliografía, (Pankaj , Uma, & Umopathy, 2015). .....	80
Tabla 5. 2 propiedades del polisilicio, (Pankaj , Uma, & Umopathy, 2015). .....	81
Tabla 5. 3 Resultados de la simulación en ANSYS a 2 V, de la pinza de la bibliografía, sin heat sinks (Elaboración propia) .....	83
Tabla 5. 4 Resultados de desplazamiento y distribución de temperatura del análisis numérico, reportados por ( (Pankaj , Uma, & Umopathy, 2015). .....	85
Tabla 5. 5 Resultados de la parametrización de la micropinza de la bibliografía, implementada en ANSYS, (Elaboración propia).....	86
Tabla 5. 6 comparación de resultados numéricos del desplazamiento, (Pankaj , Uma, & Umopathy, 2015) .....	86
Tabla 5. 7 Comparación de resultados de la distribución de temperatura.....	87
Tabla 5. 8 Comparaciones de resultados de las micropinzas (Elaboración propia). .....	92
Tabla 5. 9 Resultados de las resistencias de la micropinza escalada, (Elaboración propia).....	94
Tabla 5. 10 Resultados del mallado de la micropinza, (Elaboración propia). .....	103
Tabla 5. 11 Intensidad de corriente análisis numérico, (Elaboración propia).....	104

<b>Tabla 5. 12 Comparación de la intensidad de corriente entre el análisis analítico y simulado, (Elaboración propia). .....</b>	<b>104</b>
<b>Tabla 5. 13 simbología para la elaboración de las pruebas experimentales, (Elaboración propia). .....</b>	<b>106</b>
<b>Tabla 5. 14 Resultados del desplazamiento con masa de la implantación en Aluminio, (Elaboración propia). .....</b>	<b>114</b>
<b>Tabla 5. 15 Desplazamiento con peso de la implementación en Aluminio, (Elaboración propia). .....</b>	<b>115</b>
<b>Tabla 5. 16 Tabla de propiedades para el Aluminio 6061, (Aravind, Ramesh, Ramya, Praveenkumar, &amp; Kalaiarasi , 2016).....</b>	<b>121</b>
<b>Tabla 5. 17 Resultados numéricos de la implementación en Aluminio, (Elaboración propia).....</b>	<b>125</b>
<b>Tabla 5. 18 Comparación de los resultados de la temperatura máxima, (Elaboración propia).....</b>	<b>125</b>
<b>Tabla 5. 19 comparación de desplazamiento, (Elaboración propia).....</b>	<b>125</b>
<b>Tabla 5. 20 comparación de masa del objeto que se puede sujetar;(Elaboración propia) .....</b>	<b>126</b>



## CAPÍTULO 1. INTRODUCCIÓN

En este capítulo se muestran los objetivos generales y específicos, la introducción, antecedentes, limitaciones, así como la justificación de esta investigación, secuencialmente se presenta también la distribución de capítulos de esta tesis

# CAPÍTULO 1. INTRODUCCIÓN

## **1.1. Introducción**

En los últimos años, con el rápido desarrollo de la industria de la microelectrónica, se ha logrado un gran progreso en la investigación de micromanipulación, que se utilizan ampliamente en operación biológica, alineación de fibra óptica, precisión mecanizada, microscopio de sonda de barrido, micro / nano montaje, etc. (Marija , y otros, 2019).

La micromanipulación consiste en mover, orientar o en su caso reposicionar objetos, los cuales están expuestos a vibraciones mecánicas. Esto sucede a microescala.

Durante la última década, los investigadores han demostrado una variedad de técnicas para la manipulación mecánica de objetos en micro y nano escalas.

Una herramienta para la micromanipulación son las micropinzas las cuales son uno de los componentes de los Sistemas Electromecánicos, por sus siglas en inglés, MEMS. Estas están diseñadas para sostener diferentes piezas de microcomponentes, la cual carecen de suficiente fuerza para romper los componentes. Sus aplicaciones van desde la electrónica, tecnología de la información, óptica, medicina, etc.

La mayoría de las micropinzas actualmente disponibles son dispositivos compatibles (flexibles), generalmente compuestos por dos patas que se abren y cierran, para sujetar un microobjeto en dos lugares de contacto (Sandeep & Laxman , 2011)

Las micropinzas se clasifican básicamente en función de los principios de actuación, tales como (Sandeep & Laxman , 2011):

Piezoeléctrica

Electrostática

Electromagnética

Electrotérmica

Aleación de memoria de forma, SMA

que se describen más a detalle en esta investigación. A continuación, presentamos los antecedentes que motivan este trabajo.

### ***1.2. Antecedentes***

La investigación y el desarrollo de MEMS han progresado notablemente desde 1988 (Fujita H. , 1998). A principios de la década de 1990, los microsensores y los microactuadores se fabrican en silicio, con una tecnología de fabricación que surge a partir de los procesos de fabricación de circuitos integrados (IC). Desde entonces, se han propuesto y establecido dispositivos MEMS más complejos para el campo de aplicaciones MEMS, como aeroespacial, biomédico, automotriz, biotecnología, entre otros (Kouravand, 2011).

El microensamblaje y la micromanipulación son ampliamente aplicados en muchos campos. En estas aplicaciones, las micropinzas actúan como un elemento clave para el manejo de objetos frágiles como células vivas, partes micromecánicas, etc. Por otro lado, la tecnología MEMS permite el desarrollo de dispositivos en miniatura en el orden de milímetro, lo que permite lograr un tamaño compacto, bajo costo, alta frecuencia resonante, etc., ( Yukun & Qingsong, 2013).

En el micromecanzado surge el problema de tener que manipular los microobjetos sin afectar su estructura o su temperatura, lo que motiva la creación de nuevas micropinzas.

### ***1.3 Objetivo general***

Crear una micropinza basada en un actuador chevrón asimétrico con buenos resultados de desplazamiento y fuerza.

### ***1.4 Objetivos específicos***

- Seleccionar al material a utilizar
- Diseñar una micropinza con una fuerza de sujeción en el rango de los mN
- Obtener una micropinza con una estructura sencilla



## **1.5. Justificación**

Las micropinzas son fundamentales para mover objetos a microescalas esto a su vez aplicado a la biomédica, la medicina, la microelectrónica

Las micropinzas son ampliamente utilizadas en diferentes campos, tales como la ingeniería biomédica, la biología, la medicina y la electrónica, generalmente se utilizan para la micromanipulación de especímenes o microensamblaje.

Con la alta demanda de manipular objetos micrométricos, la implementación de nuevos dispositivos microelectromecánicos, como las micropinzas, resultan ser necesarias para múltiples aplicaciones como son en diversos campos, entre los que destaca: la manipulación de partículas en la industria mecatrónica.

## **1.6, Limitaciones**

- La contingencia sanitaria presentada SARS (COV-2), retrasa mucho el avance de esta investigación, ya que, se necesita tener el equipo adecuado y los conocimientos del uso de software adecuados.
- Alto costo de fabricación, por lo cual, se opta por hacer también la simulación e impresión en 3D con material PLA el para la validación experimental
- No se cuenta con la bibliografía que se requiere para la investigación y por limitaciones impuestas por la pandemia, la biblioteca está cerrada.
- No se cuenta con el software Coventorware™, el cual es uno de los mejores softwares para la simulación de MEMS.

## **1.7, Organización de la tesis**

La siguiente tesis está organizada por 6 capítulos, organizados como sigue.

**Capítulo 1.** En este capítulo se muestran los antecedentes, objetivos (General y específicos), la introducción, limitaciones y la justificación de esta tesis.

- Capítulo 2.** En este capítulo se proporciona el marco teórico de la investigación.
- Capítulo 3.** Se muestra la metodología utilizada en este trabajo, necesaria para obtener un desarrollo estructurado.
- Capítulo 4.** Se presentan el software que se utilizó y los parámetros del material a utilizar. Además, se muestran el diseño y la simulación del actuador chevrón y la micropinza.
- Capítulo 5.** Se presenta a una micropinza basada en un actuador chevrón simétrico, hallada en la literatura para comparar los resultados numéricos entre esa micropinza y la micropinza de esta tesis. Además, se implementará la micropinza escalada, diseñada en este trabajo, e implementada en Aluminio, con la finalidad de realizar unen comparación entre los resultados numéricos y los experimentales.
- Capítulo 6.** En este capítulo se proporcionan las conclusiones, así como una propuesta de mejora para incrementar la fuerza de sujeción, para trabajos futuros.



## 2. MARCO TEÓRICO

En este capítulo, se muestra una breve introducción acerca de los sistemas electromecánicos, por sus siglas en inglés, MEMS. Posteriormente, se mostrarán algunas micropinzas impulsadas por actuadores, las cuales también se darán conocer en este capítulo.

## CAPÍTULO 2. MARCO TEÓRICO

### **2.1. Tecnología MEMS**

La tecnología MEMS (acrónimo en inglés de “sistemas microelectromecánicos”) ha permitido que muchos tipos de sensores, actuadores y sistemas se reduzcan en tamaño en varios órdenes de magnitud, mientras que a menudo incluso se ha mejorado su rendimiento. El acrónimo MEMS se usa casi universalmente para referirse a todo el campo (es decir, todos los dispositivos microelectromecánicos producidos por microfabricación).

Los MEMS son dispositivos que tienen una longitud menor a 1mm y mayor a 1µm, que combina componentes, tanto eléctricos, como mecánicos y que son fabricados usando tecnologías de procesos heredadas de circuitos integrados. Otras definiciones sitúan a los MEMS en una escala entre los 100nm hasta el rango de los centímetros ( W Judy, 2001)

Los MEMS pueden variar en su forma, cubriendo desde estructuras sencillas, hasta muy complejas.

#### **2.1.1. Aplicación de la tecnología MEMS en la tecnología**

La tecnología vestible está emergiendo de manera tan acelerada que ya ha sido considerada como la siguiente gran tendencia para los MEMS en el mercado de consumo, después de los teléfonos inteligentes y las tabletas.

La utilización de los MEMS se aprecia en:

- 1) relojes inteligentes,
- 2) monitores cardiacos y de ejercicio,
- 3) gafas inteligentes (smart glasses)
- 4) cámaras de acción y ropa inteligente (Smart clothing)

Se destacan como aquellas aplicaciones finales, se complementan como una extensión natural de los teléfonos inteligentes, siendo la demanda más promisoría en MEMS ( Nava Jiménez & Escamilla Santana, 2015).

En la Figura 2.1 se muestra los millones de unidades en productos eléctricos, los cuales utilizan MEMS que se vendieron a través de los años 2012 a 2019.

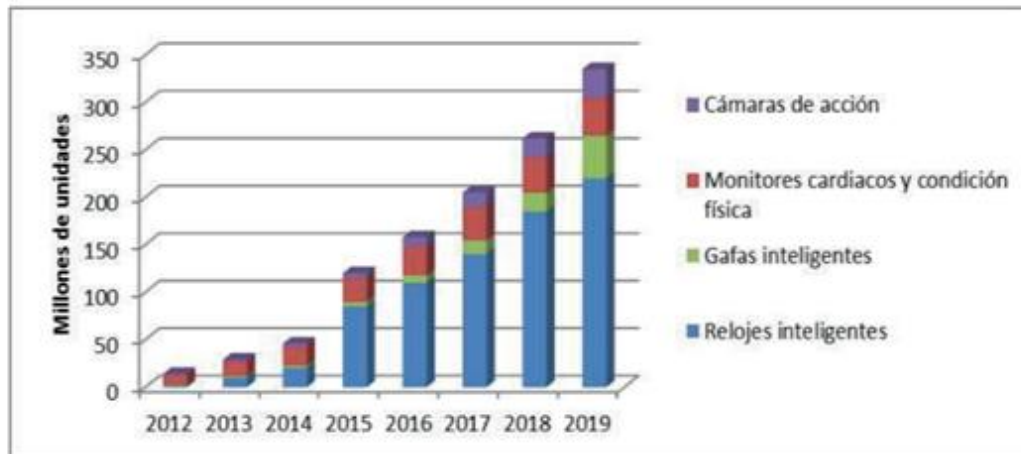


Figura 2. 1 MEMS en productos electrónicos, ( Nava Jiménez & Escamilla Santana, 2015).

### 2.1.2. Aplicación de la tecnología MEMS en la medicina

Otra de las grandes aplicaciones que tiene los MEMS es en el campo de la salud ya que, los sensores MEMS puede ayudar a que la tecnología de la salud sensible a las necesidades de los pacientes y habilidades, mejorando significativamente la experiencia del usuario.

Los sistemas basados en MEMS pueden mejorar significativamente la precisión en la alineación de los implantes de cadera y rodilla con la anatomía del paciente, reducir el malestar y la necesidad de cirugía de revisión ( Pinto Franco & Roa Prada, 2012).

En los campos de la bioquímica o cualquier aplicación médico-biológica requieren de censar, procesar e interactuar en entornos biológicos con diversidad de organismos celulares y garantizar la correcta realización de estos métodos y alcanzar confiabilidad en las mediciones requeridas, por lo que son necesarios entonces los biosensores y los biochips.

En la detección mecánica aparecen los sistemas de censado basados en cantilévers, los cuales deben su origen al desarrollo del Microscopio de Fuerza Atómica (AFM). Desde entonces, los microcantilévers de silicio y nitrato de silicio han sido usados para la medición de innumerables cantidades como, presión, temperatura y humedad. Particularmente, cuando son usados en un AFM, estos son utilizados con una punta en el extremo libre, el cual se emplea para mejorar la resolución en el censado, mientras que si se utiliza como biosensor la punta no es necesaria ( Bertel Romero, 2015).

Los sensores MEMS son de gran ayuda en el entorno médico, ya que estos ayudan a tener un desempeño adecuado para ser utilizados en los métodos que los doctores tienen para lograr una mayor precisión, lo cual se lleva a cabo en las cirugías o tratamientos de enfermedades, que requieren de un margen de error muy pequeño.

### **2.1.3. Aplicación de la tecnología MEMS en la mecánica**

Los científicos han soñado durante muchos años con hacer máquinas tan pequeñas como insectos. Tales máquinas, llamadas MEMS en los Estados Unidos y micromáquinas en Japón, son sistemas microminiatura compuestos por dispositivos mecánicos.

En la actualidad, se han implementado los micromotores que tienen un diámetro de una décima de milímetro, han girado a más de 10 000 revoluciones por minuto, y conjuntos de microactuadores y microespejos han proyectado los píxeles de alta resolución, en forma de imágenes en pantallas grandes (Fujita H. , 1998).

Para crear micromáquinas útiles como sistemas completos, es necesario el análisis y uso de materiales, mecanizado de procesos, dispositivos micromecánicos e integración de sistemas.

Se requieren materiales con funciones específicas y se utilizan en procesos de mecanizado, uno basado en semiconductores y otro basado en medios

mecánicos. Los dispositivos de interés incluyen sensores, actuadores y circuitos integrados, las herramientas de diseño de sistemas, la integración de procesos y el empaquetado también son importantes (Fujita H. , 1998). En la Figura 2.2 se muestra la relación entre estas áreas.

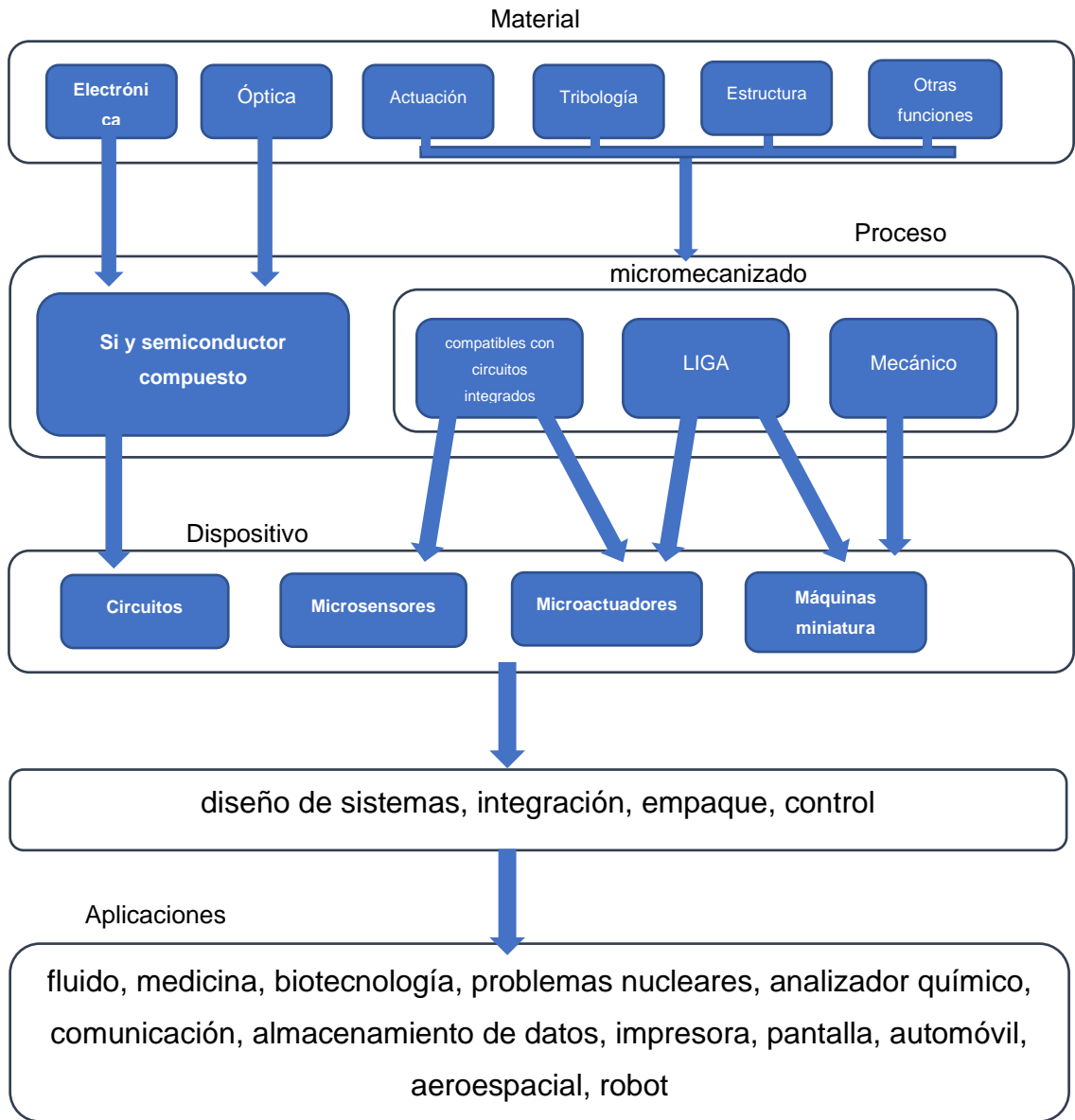


Figura 2. 2 Relación entre áreas de aplicación en tecnologías MEMS (Fujita H. , 1998)

Las tecnologías MEMS en la rama de la mecánica han tenido un gran desempeño a lo largo de los años, ya que cada vez se busca incursionar más

en el micromundo y, para esto, se necesitan MEMS específicos, los cuales son necesarios para investigar los campos requeridos.

## **2.2. Micropinzas**

Las micropinzas se desarrollan comúnmente para manipular microobjetos, como microhilos y microesferas, son a menudo la tecnología más sugerida en uso para la micromanipulación debido a su precisión, bajo costo, mandíbula ancha apertura y fuerza aplicada variable. Todas las micropinzas se desarrollan con diferentes diseños y diferentes tipos de actuadores, normalmente constan de un par de mordazas de sujeción, un mecanismo actuador y un método de amplificación (H., A. Griffiths, & Fahmy, 2020).

### **2.2.1. Tipos de micropinzas**

Existen 2 diferentes tipos de diseños estructurales para las micropinzas; Bisagra flexible o en voladizo, los cuales son métodos necesarios para garantizar que los brazos de las pinzas estén capaces de abrirse y volver a su posición original, la estructura de la micropinza depende de la forma y tamaño del objeto a sujetar (H., A. Griffiths, & Fahmy, 2020).

Las micropinzas en voladizo se construyen alrededor de cada brazo que se encuentran fijos en la base, mientras que una forma de actuador fuerza el material y se dobla para separarse o juntarse, lo que hace que la estructura se flexione. Esta forma de estructura da como resultado una tensión mecánica que se distribuye a lo largo del material cuando se le aplica una fuerza. Entonces, es el elástico de la energía potencial dentro del material del voladizo el que asegura que la estructura vuelva a su estado original (posición).

Las micropinzas con estructura de bisagra flexible son a menudo más avanzadas y contienen diseños complejos. Ellos comúnmente se desarrollan utilizando modelos informáticos y métodos de análisis matemático, se fabrican a partir de un solo material y, a menudo, se producen utilizando técnicas de microfabricación, la ventaja sobre las estructuras en voladizo, es que son



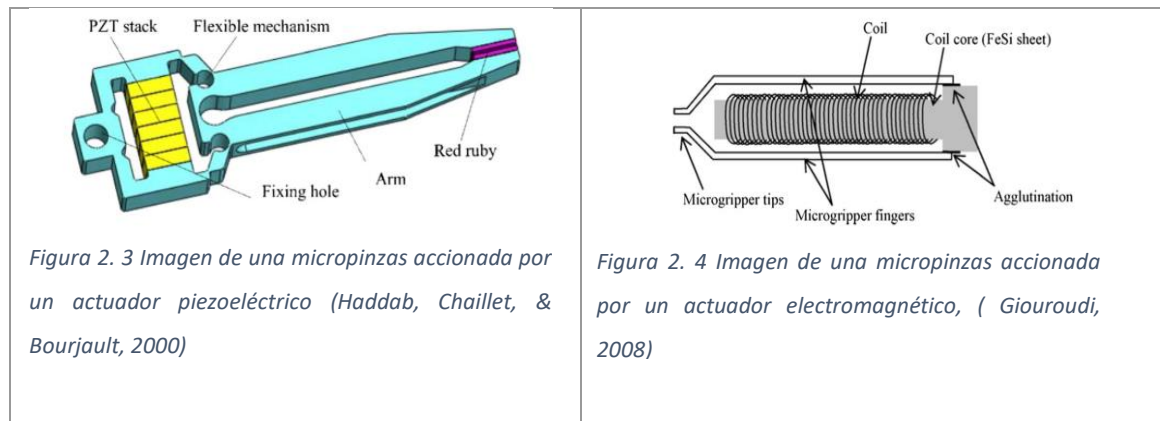
capaces de reducir su tamaño y poder manipular objetos más pequeños, mientras que las estructuras en voladizo sólo pueden ser utilizadas para manipular objetos más grandes, sin embargo, pueden aplicarse fuerza excesiva al objeto (Yang & Xu, 2017).

### 2.3. Tipos de actuadores de micropinzas

Uno de los elementos importantes en la creación de una micropinzas es el actuador, ya que, tiene como función aplicar una fuerza a la estructura y permitir que la punta de la micropinza abra y cierren.

A lo largo de los años, se han probado algunas tecnologías cuyo propósito es identificar al actuador más eficiente. Se incluyen a actuadores: piezoeléctrico (Figura 2.3), electromagnético (Figura 2.4), electrostático (Figura 2.5) y electrotérmico (Figura 2.6), presentados en la Tabla 2.1. Su comparación de ventajas y desventajas se presenta en la Tabla 2.2.

Tabla 2. 1 Tipos de actuadores (H., A. Griffiths, & Fahmy, 2020).



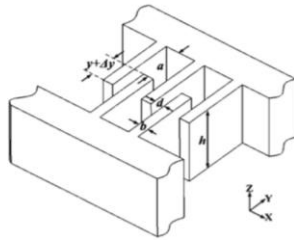


Figura 2. 5 Imagen de una micropinzas accionada por un actuador electrostático, ( Chen, Chen, Liu, Wang, & Li, 2009)

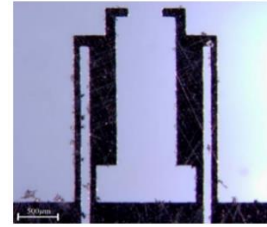


Figura 2. 6 Imagen de una micropinzas accionada por un actuador electrotérmico, (Kolahdoozan, Esfahani , & Hassani, 2017)

Tabla 2. 2 Comparación de los diferentes tipos de técnicas de actuación, (Yang & Qingsong, A review on actuation and sensing techniques for MEMS-based microgrippers, 2017).

Tipo de actuador	Ventajas	Desventajas	Principio de funcionamiento
<b>Piezoeléctrico</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Gran fuerza</li> <li>buen ancho de banda de operación</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Desplazamiento</li> </ul>	Efecto piezoeléctrico
<b>Electromagnético</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Gran desplazamiento,</li> <li>No lineal</li> <li>respuesta rápida,</li> <li>alta precisión</li> <li>fácil de controlar</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Largas dimensiones,</li> <li>difícil de manufacturar</li> </ul>	Efecto de magnetización
<b>Electrostático</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Respuesta de frecuencia rápida,</li> <li>bajo consumo de energía</li> <li>sin histéresis</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Problemas de gran desplazamiento lo que complica el circuito</li> </ul>	Fuerza electrostática
<b>Memoria de forma (SMA)</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Flexibilidad baja</li> <li>Gran respuesta de frecuencia</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Gran consumo de energía</li> <li>Tiempo de respuesta lento.</li> </ul>	Deformación de materiales

	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Bajo consumo de energía</li> </ul>		
<b>electrotérmico</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Gran desplazamiento</li> <li>• Baja dimensión de voltaje</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Alta temperatura de trabajo</li> </ul>	Expansión térmica

#### ***2.4. Micropinzas con actuador piezoeléctrico.***

Los materiales piezoeléctricos, son un tipo de material que es capaz de cambiar su forma cuando se aplica un voltaje eléctrico externo.

Los actuadores piezoeléctricos han sido investigados para diferentes campos industriales tales como: La medicina, la robótica, la exploración espacial y fabricación de semiconductores (Long, y otros, 2017).

Cuando se compara con otras tecnologías de pinzas, tienen algunas ventajas, las principales de ellas son: El diseño compacto, una estructura de peso ligero, bajo uso de energía, desplazamiento predecible, alta precisión, tiempo de respuesta alto, gran ancho de banda, sin efecto de deslizamiento, alta fuerza de sujeción y una alta relación fuerza-peso ( Xu, 2014).

Micropinzas piezoeléctricas han demostrado agarrar objetos con un tamaño tan bajo como 15  $\mu\text{m}$  (Haddab, Chaillet, & Bourjault, 2000).

Una encuesta revisó una gran cantidad de varios actuadores de micropinza y llegaron a la conclusión, que las micropinzas accionadas piezoeléctricas fueron capaces de producir desplazamientos de mandíbula entre 16 y 8800  $\mu\text{m}$  mientras que el voltaje aplicado varió de 0 a 700 V. La fuerza de las puntas varió de 1  $\mu\text{N}$  a 1,87 N, el factor de amplificación de los sistemas estudiados osciló entre 2,85 y 50 (Dochshanov, Verotti, & Belfiore, 2017) .

Esto muestra que estas micropinzas pueden utilizarse para manipular una amplia gama de objetos con diferente tamaño. A lo largo de la investigación

de este tipo de tecnología, varios han descubierto limitaciones que incluyen: histéresis, propiedades del material, discrepancias de amplificación de la apertura de las puntas y la colocación incorrecta de la posición de las puntas (Shi, y otros, 2018).

### **2.5. Micropinzas con actuador electromagnéticas**

Las micropinzas accionadas electromagnéticamente, utilizan electroimanes para abrir y cerrar las puntas de la pinza. Con este principio se puede sujetar los elementos que se requieran mediante la acción electromagnética, una gran desventaja que tienen es la limitación por la micromanipulación ya que debido a la estructura que tiene y a sus componentes, es difícil reducir la escala, otra limitación que se presenta en estas micropinzas son la fabricación debido a su estructura.

Este tipo de micropinzas se utiliza a menudo en forma de voladizo. El montaje común de este tipo de actuador es colocar el electroimán en el centro de dos brazos magnéticos y las puntas. La corriente eléctrica se conduce a través del electroimán y a medida que aumenta, los brazos magnéticos se atraen hacia él y el tamaño de la apertura de las puntas de las pinzas disminuye, como lo representa la Figura 2.4 (Evans, Griffiths, & Fahmy, 2020).

Un informe afirma que producir una micropinzas con un actuador electromagnético no es preferible debido a la complejidad de la estructura y la interferencia negativa de campos electromagnéticos externos.

La desventaja adicional fue que estos tipos de micropinzas suelen ser más pesadas que otras debido a los componentes necesarios y pueden ralentizar las maniobras. proceso y reducir la precisión de los sistemas (Haddab, Chaillet, & Bourjault, 2000).

El actuador electromagnético puede entregar un gran desplazamiento sin la influencia del efecto no lineal, al mismo tiempo, también tiene algunos méritos como, la alta precisión y es fácil de controlar. sin embargo, el tamaño físico

relativamente grande es un gran problema de este tipo de actuador (Yang & Qingsong, 2017).

### **2.6 Micropinzas con actuador electroestático**

Las micropinzas accionadas electrostáticamente son las que se aplica un voltaje positivo y negativo a dos elementos de la micropinzas que luego se atraen o se repelen entre sí debido a la fuerza electrostática creada (A. R & Thilagar S, 2012).

A medida que se aplica un voltaje a los brazos, se produce una carga electrostática, y los brazos se atraen o se repelen. Esta estructura está integrada con un juego de mordazas, que les permite abrirse o cerrarse como se muestra en la Figura 2.5. La estructura es fácil de fabricar, requiere un bajo voltaje, puede producir un gran desplazamiento de las puntas, una respuesta más rápida a un cambio de voltaje en comparación con otros métodos, como el electrotérmico (Yang & Qingsong, 2017).

Se describió que los beneficios de usar este tipo de micropinzas, son que puede obtener una gran apertura de las puntas, sin producir efectos de histéresis, lo que produce una respuesta predecible ( Jia & Xu, 2012).

Las micropinzas controladas electrostáticamente tiene la capacidad de manipular un microobjeto desde 0 a 100  $\mu\text{m}$  entre el voltaje de 0 y 33 V respectivamente, de acuerdo con ( Yuan, Yuan, Hao, & Li, 2015).

Las pinzas accionadas electrostáticamente se han integrado con mordazas, donde la fuerza aplicada se puede controlar con precisión ( Chen, Chen, Liu, Wang, & Li, 2009).

Se han utilizado en la industria médica, las cuales se han ido desarrollado a través del tiempo y se llegó a la conclusión que se pueden utilizar dispositivos microtecnológicos como micropinzas para ayudar en la cirugía mínimamente invasiva y otros escenarios relacionados con la tecnicidad y los tamaños de pequeña escala (Gaafar & Zarog, 2017).

Las micropinzas pueden lograr desplazamientos de las puntas más pequeños en comparación con las pinzas accionadas piezoeléctricamente, esto sugiere que los actuadores electrostáticos son mejores para manipular microobjetos dentro del rango de 1–100  $\mu\text{m}$  en comparación con otros tipos de micropinzas accionadas por actuadores. Las imitaciones operativas son que se requiere un voltaje de operación alto para producir un desplazamiento alto de las puntas, incapaz de lograr altas fuerzas de sujeción y estructuras de gran tamaño ( Jia & Xu, 2012).

### **2.7. Micropinzas con actuador electrotérmico**

El método detrás de los actuadores electrotérmicos se basa en el fenómeno que cuando la corriente pasa a través de un conductor, hará que aumente el calor y resulte en una expansión del material. Esto se utiliza a menudo y se utiliza para abrir y cerrar sus puntas ( Jia & Xu, 2012).

Las ventajas del uso de esta forma de actuador es la capacidad de producir una mayor fuerza de sujeción y un buen desplazamiento de la mandíbula, mientras que se aplican bajos voltajes ( Jia & Xu, 2012).

La técnica de actuación electrotérmica se ha investigado para su aplicación en MEMS por sólo unos pocos años (Yang & Qingsong, 2017).

Con respecto a materiales utilizados para la fabricación de las micropinzas, se ha dicho que el silicio, el acero inoxidable y las aleaciones de Aluminio son opciones comunes para las micropinzas accionadas electro-térmicamente ( (Nikoobin & Hassani Niaki, 2012).

Según la configuración, el actuador térmico puede clasificarse en tres tipos: Actuador térmico pseudobimorfo (actuador en forma de U) actuador térmico en forma de V y actuador térmico en forma de Z, que se mencionan a continuación.

#### **2.7.1. Actuador electrotérmico en forma de U**

La estructura se ilustra en la Figura 2.7 de un actuador en forma de U.

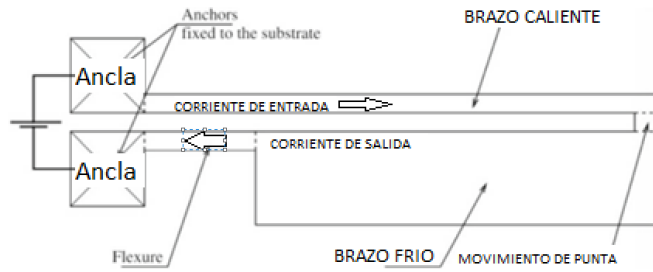


Figura 2. 7 imagen de una micropinzas accionada por un actuador electrotérmico en forma de U, (Kolahdoozan, Esfahani , & Hassani, 2017)

Consta de dos brazos uno caliente (delgado) y uno frío (ancho) con un diseño asimétrico, que está limitado por dos anclas. Cuando una corriente fluye a través de la estructura, la mayor densidad de corriente provoca más calor y expansión en brazo caliente, que en el brazo frío ancho debido a la estructura asimétrica. Luego, la punta del actuador experimenta un movimiento transversal, que resulta en una acción de arco hacia el lado del brazo frío. Sobre la base de este concepto de actuador térmico en forma de U, se han desarrollado muchas pinzas en forma de U en la literatura (Yang & Xu, 2017).

### 2.7.2. Actuador electrotérmico en forma de V

La estructura se ilustra en la Figura 2.8 de un actuador en forma de V.

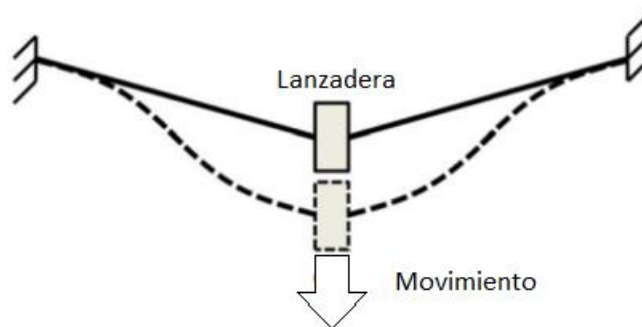


Figura 2. 8 Geometría del actuador térmico en forma de V, ( D & Ananthasuresh, 2001)

El actuador en forma de V en comparación con uno en forma de U presenta algunas ventajas, como una mayor fuerza y un menor consumo de energía. Mientras tanto, el actuador en forma de V ha sido ampliamente utilizado en nanopositionadores y sistemas de nanoensayo. Este actuador presenta una configuración simétrica, donde dos las vigas inclinadas están conectadas a una lanzadera central. Basándose en el principio de expansión térmica de los brazos, la viga central genera un desplazamiento rectilíneo. Sin embargo, tiene dos defectos principales (Yang & Qingsong, 2017).

El primero es que las dos vigas inclinadas exhiben algunos desafíos de fabricación. Por ejemplo, algunas características pequeñas deben fabricarse como superficies brillantes. Generalmente, la resolución fotolitográfica del ancho del haz normalmente se mantiene en 2 micras. Otro inconveniente del actuador en forma de V es la rigidez relativamente grande (Guan & Zhu, 2010).

### 2.7.3. Actuador electrotérmico en forma de Z

En cuanto al actuador en forma de Z, supera los problemas antes mencionados que surgen del actuador térmico en forma de V. Funciona basado en el principio del actuador térmico en forma V como se muestra en la Figura 2.9.

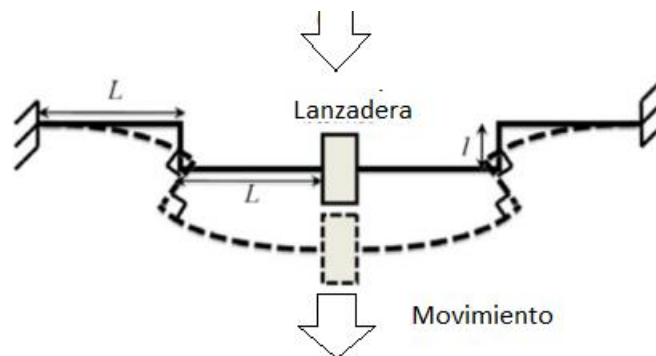


Figura 2. 9 Geometría del actuador térmico en forma de Z, (D & Ananthasuresh, 2001).



La viga en forma de Z se compone de una lanzadera central y dos vigas Z en ambos lados de la lanzadera. La viga central tiene un movimiento rectilíneo cuando la corriente pasa través de los brazos y estos se expanden como se muestra en la Figura 2.9 (Yang & Qingsong, 2017).

## **2.8. Micropinzas con actuador de aleación con memoria de forma**

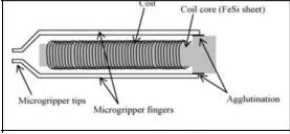
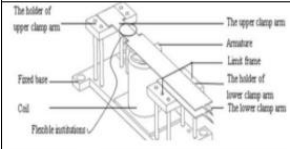
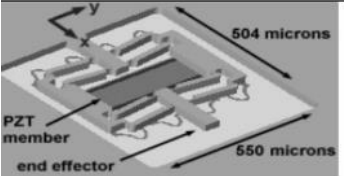
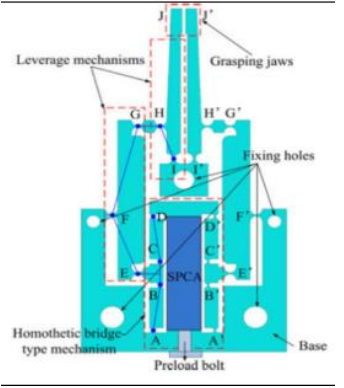
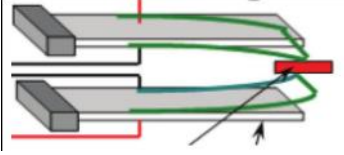
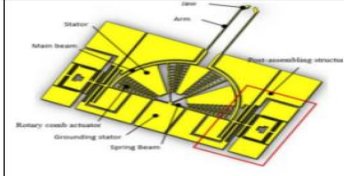
Las aleaciones con memoria de forma (SMA) pueden cambiar sus rasgos característicos cuando se les aplica calor. El material es capaz de transformar su forma y tamaño a altas temperaturas y vuelve a su posición original cuando se elimina el calor (Kawamoto H. , 2009). Pueden producir altos valores de desplazamiento de las puntas y fuerza de sujeción. Aunque la reacción se produce cuando se aplican voltajes en comparación con otros tipos de pinzas. Se ha demostrado que el material níquel-titanio para crear micropinzas accionadas por SMA es muy exitoso ya que, tiene la capacidad para producir una gran fuerza de sujeción y un desplazamiento de la punta de la mordaza a temperaturas de alrededor de 60–80 °C ( FU, Luo , Flewitt , & Milne , 2012).

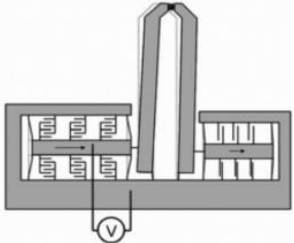
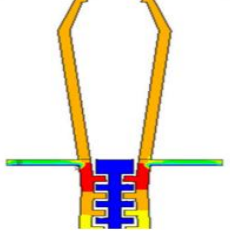

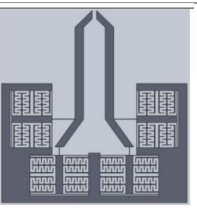
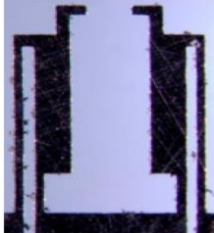
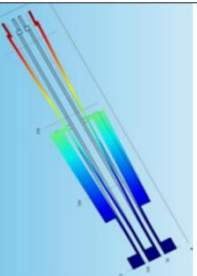
Al experimentar una deformación, la aleación con memoria de forma (SMA) tiene la capacidad de memorizar y recuperar a la forma originalmente diseñada. Este fenómeno se llama “efecto de memoria de forma” (SME). En realidad, experimenta dos fases, a saber, martensita (a baja temperatura) y austenita (a alta temperatura). Especialmente, en la fase austenita, el material puede obtener una gran deformación, del 10%, y luego recupera su estado inicial, lo que se denomina “superelasticidad” (SE).

El actuador se ha utilizado en amplias aplicaciones, como instrumentos médicos, áreas industriales, campos militares y dispositivos MEMS. Específicamente, NiTi y NiTiCu son los dos materiales SMA más usados (Yang & Qingsong, A review on actuation and sensing techniques for MEMS-based microgrippers, 2017).

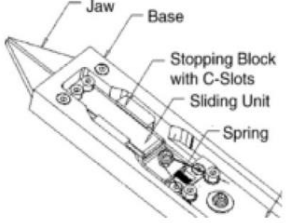
En la Tabla 2.3 se presenta micropinzas de varios tipos de actuación.

Tabla 2. 3 Varios tipos de micropinzas y sus principales características (Yang & Qingsong, 2017).

Tipo de micropinzas	Máxima fuerza aplicada	Desplazamiento de cada punta	Espacio entre puntas	Voltaje máximo aplicado	Material	Referencia	Imagen
Cantiléver electromagnético	130 $\mu$ N		250 $\mu$ m	0-60 mA		( Giouroudi, 2008)	
Cantiléver Electromagnético	280 mN	400 $\mu$ m	<50 $\mu$ m		Cobre	( Wang, Yang, & Dong, 2013)	
Monolítico piezoeléctrico de bisagra flexible	55 $\mu$ N	1.18 $\mu$ m		10 V		( J & Sang-Gook Kim., 2004)	
Monolítico piezoeléctrico de bisagra flexible	1 N	95 $\mu$ m	190 $\mu$ m	100 V	aleación de Aluminio AL7075-T651	(Wang Z. S., 2015)	
Cantiléver piezoeléctrico	200 mN	520 $\mu$ m	50 $\mu$ m	100 V		(El-Sayed , Abo-Ismael , El-Melegy , Hamzaid, & Osman, 2013)	
monolítico electrostático bisagra flexible		50 $\mu$ m	0 $\mu$ m	33 V	Si	(Yang & Qingsong, 2017)	

electrostático bisagra flexible	380 $\mu$ N	50 $\mu$ m	0 $\mu$ m	150 V	Si	( Beyeler, Neild, Oberti, J. Bell, & Sun, 2007)	
Tipo cantiléver electroestático		32.5 $\mu$ m	20 $\mu$ m	100 V	Si/SiO2 y polisilicio n/Si3N4	(Gaafar & Zarog, 2017)	
Tipo cantiléver electroestático		6.66 $\mu$ m	10 $\mu$ m	14 V		(A. R & Thilagar S, 2012)	
Monolítico electroestático	190 $\mu$ N	70 $\mu$ m		120 V	Aleación de Aluminio AL6061	(Kawamoto & Tsuji, 2011)	
Cantiléver monolítico electro térmico		10.072 $\mu$ m	20 $\mu$ m	10 V	Silicio Si<100>	(Kolahdoozan, Esfahani , & Hassani, 2017)	
Cantiléver monolítico electro térmico	80mN	55 $\mu$ m	110 $\mu$ m	8 V		(Elsen , Bharadwaj , & Ramesh, 2019)	

<b>Cantiléver SMA</b>	42.9 mN	61 $\mu\text{m}$	1 $\mu\text{m}$		Oblea de silicio	(Munasinghe, Bowatta, Abayarathne, Kumararathna, & Maduwantha, 2016)	
<b>Cantiléver monolítico electotérmico</b>		2 $\mu\text{m}$	5 $\mu\text{m}$	3 V	multicapa fabricación - PolyMUM PD	(Cauchi, Grech, Mallia, Mollicone, & Sammut, 2018)	
<b>Electotérmico actuador z</b>		36 $\mu\text{m}$		195 mV	SOI SU-8	(Zhang, Yu, Liu, & Zhang, 2015)	
<b>Electotérmico actuador v</b>		20 $\mu\text{m}$	5 $\mu\text{m}$		Silicio aislante	(Qu, Zhang, Jung, Silva-Da Cruz, & Liu, 2017)	
<b>cantiléver SMA monolítico</b>	330 mN	123 $\mu\text{m}$	125.2 $\mu\text{m}$		Acero inoxidable STS304	(Kyung, Ko, Ha, & Chung, 2008)	
<b>Cantiléver SMA</b>	490 mN	5500 $\mu\text{m}$	0.1 cm	4.4 V		(Lin, Fan, & Lan, 2009)	

Cable SMA	70 – 500 mN		500 $\mu$ m	50 mA		(Zhong & Yeong, 2006)	
-----------	----------------	--	-------------	-------	--	--------------------------	---

## 2.9. Actuador chevrón asimétrico

La caracterización de actuadores MEMS no es simple de realizar ya que, estos generan magnitudes de movimiento y fuerza en el orden de los nanómetros y micro-Newtons, respectivamente.

El actuador chevrón asimétrico (Figura 2.10) propuesto consta de un arreglo de pares brazos, denominado “ $n$ ”, que tienen un ángulo de inclinación ( $\theta$ ), con relación a las anchas, un extremo de cada brazo está sujeto al cuerpo (flecha), denominado extremo guiado, y el otro extremo al anclaje (anclas), denominado extremo fijo. Cabe mencionar que, los brazos no son de igual proporción, es decir, el largo del brazo delgado ( $L_1$ ) es menor al largo del brazo ( $L_2$ ). El ancho del brazo delgado ( $W_1$ ) es diferente al ancho brazo grueso ( $W_2$ ).

Al aplicar una diferencia de potencial en las anchas, se genera una corriente de ancla  $A_2$  hacia la ancla  $A_1$ . El incremento en la energía cinética de los portadores de carga, debido a la corriente, hace que se genere una distribución de temperatura a lo largo del dispositivo. Este incremento en la temperatura de los brazos hace su expansión térmica genere el desplazamiento de la flecha  $U_y$ , así como la fuerza  $F_y$ , debido al efecto Joule.

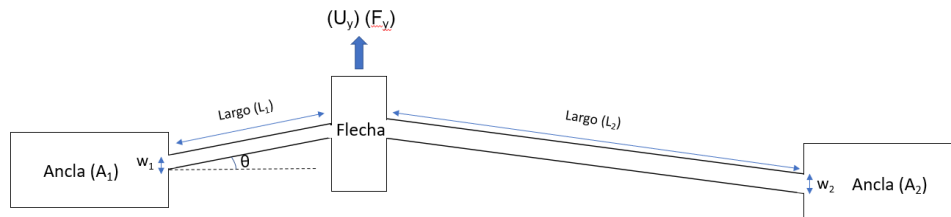


Figura 2. 10 Actuator chevrón asimétrico, (Elaboración propia).

### 2.10. Ley de ohm

La corriente eléctrica es ocasionada por el movimiento de portadores de carga. Su magnitud está dada por la cantidad de carga eléctrica, que pasa por un material, por unidad de tiempo. La unidad de corriente es el “Ampere” (nombrado así por André-Marie Ampere, quien estudió la relación entre el magnetismo y la electricidad), que también se puede expresar como Coulomb por segundo [C/s] (Rodrigo & Juárez , 2019).

El voltaje es una magnitud física, con la cual podemos cuantificar o “medir” la diferencia de potencial eléctrico o la tensión eléctrica entre dos puntos, y es medible mediante un aparato llamado voltímetro. En cada país el voltaje estándar de corriente eléctrica tiene un número específico, aunque en muchos son compartidos.

El símbolo con el cual es representado el voltaje o tensión eléctrica es  $V$ , que representa a la unidad de medida que es el Voltio o Volt. Su nombre, deriva de Alessandro Volta, físico italiano que inventó en el siglo XVII la pila eléctrica, luego denominada pila voltaica. Lo que hizo Volta fue descubrir los dos materiales que eran capaces de conducir electricidad de manera constante, un problema de la física que se acarrea desde los tiempos de Luigi Galvani, otro físico italiano que comenzó a indagar sobre las posibilidades de generar este tipo de electricidad continua. Los dos materiales propuestos por Volta fueron el zinc y la plata (Rodrigo & Juárez , 2019).

Los materiales en general tienen un comportamiento característico de resistir el flujo de carga eléctrica. Esta propiedad física, o capacidad de resistir la corriente, se conoce como resistencia y se representa con el símbolo  $R$ .

La resistencia de cualquier material con un área de sección transversal uniforme ( $A$ ) depende de su longitud ( $L$ ) y su sección transversal, como se muestra en la Figura 2.11.

Podemos representar la resistencia en forma matemática, en la ecuación 1

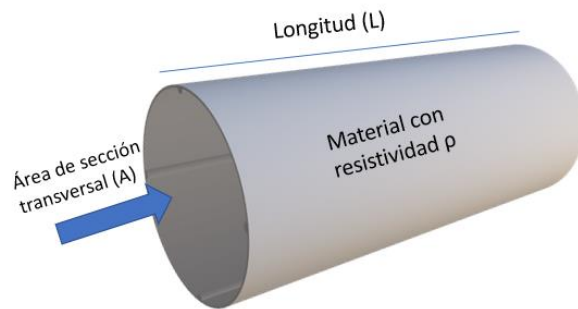


Figura 2. 11 Elementos para calcular la resistencia del material, (Matthew N. & Alexander, 2013).

$$R = \rho \frac{L}{A} \quad (1)$$

donde:

$R$ =Resistencia ( $\Omega$ )

$\rho$  =Resistividad del material ( $\Omega \cdot m$ )

$L$ =Longitud (m)

$A$ = Área de sección transversal uniforme (m<sup>2</sup>).

En la Tabla 2.4, se presentan los valores para algunos materiales comunes y muestran materiales conductores, aislantes y semiconductores.

Tabla 2. 4 Resistividad de algunos materiales comunes, (Matthew N. & Alexander, 2013)

<b>Material</b>	<b>Resistividad (<math>\Omega \cdot m</math>)</b>	<b>Tipo</b>
<b>Plata</b>	$1.64 \times 10^{-8}$	Conductor
<b>Cobre</b>	$1.72 \times 10^{-8}$	Conductor
<b>Aluminio 6061</b>	$4.0 \times 10^{-8}$	Conductor
<b>Oro</b>	$2.45 \times 10^{-8}$	Conductor
<b>Carbono</b>	$4.0 \times 10^{-5}$	Semiconductor
<b>Germanio</b>	$47 \times 10^{-2}$	Semiconductor
<b>Silicio</b>	$6.4 \times 10^2$	Semiconductor
<b>vidrio</b>	$1 \times 10^{12}$	Aislante
<b>teflón</b>	$3 \times 10^{12}$	Aislante

El símbolo de la resistencia se muestra en la Figura 2.12, donde  $R$  representa la resistencia del material.

A Georg Simon Ohm (1787–1854), físico alemán, se le atribuye la relación entre corriente y voltaje. Esta relación se conoce como ley de Ohm, la cual establece que la intensidad de corriente que atraviesa un circuito es directamente proporcional al voltaje e inversamente proporcional a la resistencia. Se puede representar de forma matemática como la ecuación 2.



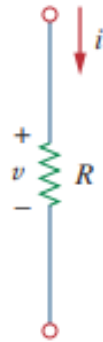


Figura 2. 12 Variables de la Ley de Ohm.

$$I = \frac{V}{R} \quad (2)$$

donde:

$V$ =Voltaje (V)

$I$ =Corriente eléctrica (A)

$R$ =Resistencia ( $\Omega$ )

## 2.11. Circuitos eléctricos

### Resistencias en serie:

La resistencia equivalente a  $n$  resistencias conectadas en serie se calcula mediante la ecuación 3:

$$R_{eq-serie} = R_1 + R_2 \dots R_n \quad (3)$$

Por lo tanto, si una resistencia  $R_1$  conectada en serie con otra de valor de  $R_2$ , como se muestra en la Figura 2.13, la resistencia total es  $R_1 + R_2$ .



Figura 2. 13 Dos resistencias conectadas en serie, ( Moreno, 2013).

Las resistencias  $R_1$  y  $R_2$ , entre las terminales A y B, se pueden sustituir por una sola resistencia equivalente con un valor de  $R_3 = R_1 + R_2$  (Figura 2.14).

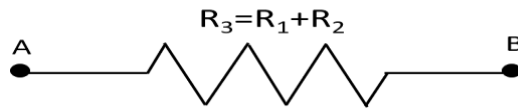


Figura 2. 14 Resistencia equivalente de dos resistencias en serie ( Moreno, 2013).

### Resistencias en paralelo:

Cuando  $n$  resistencias se conectan en paralelo entre 2 terminales, A y B. . La resistencia equivalente se obtiene mediante la ecuación 4.

$$R_{eq-paralelo} = \frac{1}{\frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} + \dots + \frac{1}{R_n}} \quad (4)$$

La Figura 2.15 muestra el caso de dos resistencias en paralelo.

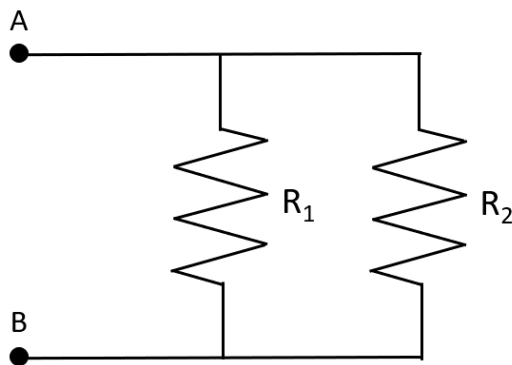


Figura 2. 15 Dos resistencias conectadas en paralelo, ( Moreno, 2013).

Cabe mencionar que, el valor de la resistencia equivalente en paralelo es siempre menor que la resistencia de valor más bajo, esto se puede comprobar mediante la ecuación 4, buscando el valor de una resistencia equivalente, para cualquier valor de resistencias en paralelo.

Una vez que encontramos el valor de una resistencia  $R_3$ , equivalente al valor de las resistencias  $R_1$  y  $R_2$  en paralelo ( $R_3 = R_1 || R_2$ ), la podemos reemplazar en los terminales A y B, como se muestra en la Figura 2.16.

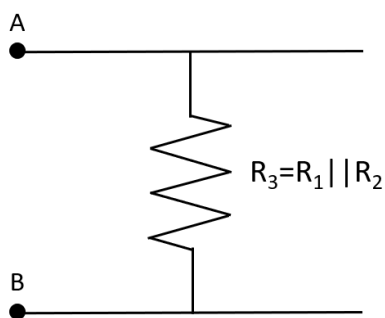


Figura 2. 16 Resistencia equivalente de dos resistencias en paralelo, ( Moreno, 2013).

### Resistencias en Serie-Paralelo:

Este caso es una combinación de los dos casos anteriores, donde se identifican los conjuntos de resistencias que se encuentren en paralelo como se muestra en la Figura 2.17, y se reducen a su equivalente como se muestra

en la Figura 2.18. Luego se hace una suma de las resistencias en serie como se ve en la Figura 2.19, para así obtener una resistencia equivalente total.

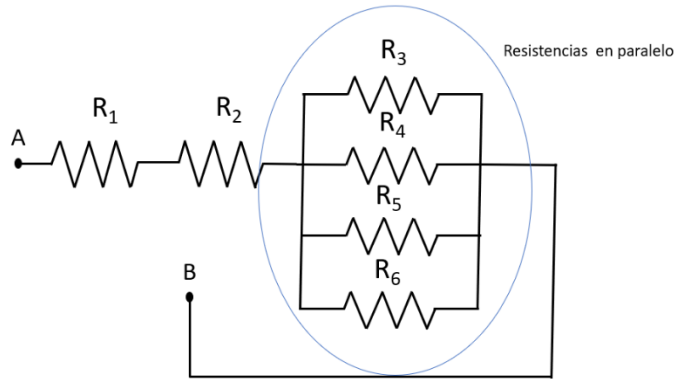


Figura 2. 17 Identificación de las resistencias en paralelo, ( Moreno, 2013).

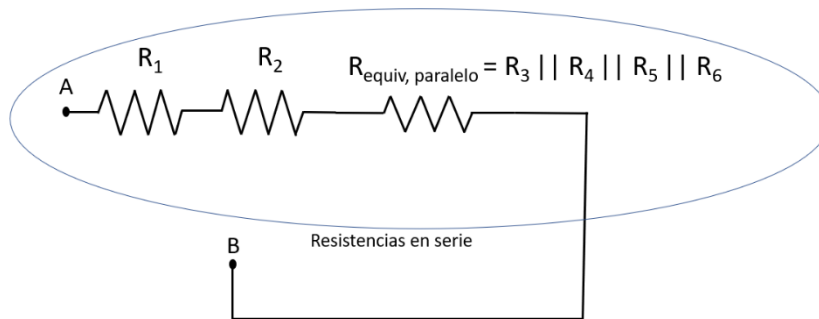


Figura 2. 18 Obtención de la resistencia equivalente en paralelo, ( Moreno, 2013).

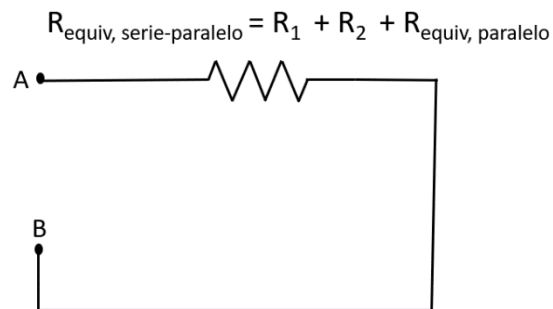


Figura 2. 19 Resistencia equivalente serie paralelo, ( Moreno, 2013).

### Transformaciones estrella-triángulo:

A menudo surgen situaciones en el análisis de circuitos cuando las resistencias no están en paralelo o en serie, como se muestra en la Figura 2.20.

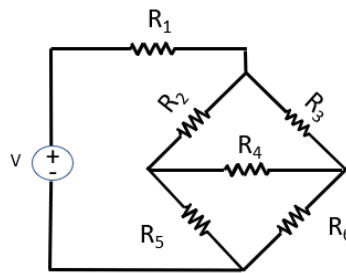


Figura 2. 20 Circuito eléctrico, (Matthew N. & Alexander, 2013).

Para calcular la resistencia equivalente en este caso, se puede simplificar al circuito resistivo utilizando redes equivalentes de tres terminales.

La red en estrella (Y), que se muestra en la Figura 2.21a, consta de 4 terminales y se puede simplificar como se observa en la Figura 2.21b.

La red delta ( $\Delta$ ) se muestra en la Fig. 2.22a, consta de 4 terminales y se simplifica como la Figura 4.22b.

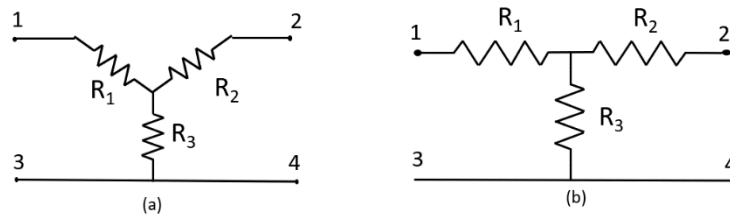


Figura 2. 21 (a) Red estrella y (b) equivalente resistivo, (Matthew N. & Alexander, 2013).

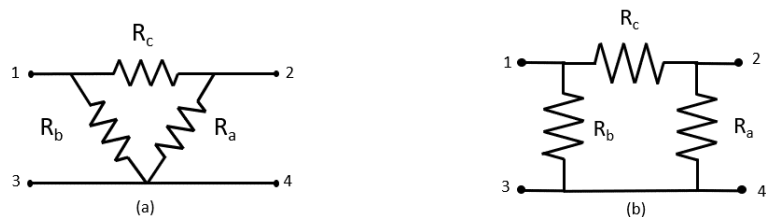


Figura 2. 22 (a) Red delta y (b) equivalente resistivo, (Matthew N. & Alexander, 2013).

### Conversión delta a estrella:

La conversión de red delta a estrella, a grandes rasgos se trata de superponer una red estrella en una red delta ya que, es más conveniente trabajar con una red estrella que con una red delta. La superposición se muestra en la Figura 2.23, para obtener las resistencias equivalentes, que en la Figura 2.23 son  $R_1$ ,  $R_2$ ,  $R_3$ , para lo cual se utilizan las ecuaciones 5-7.

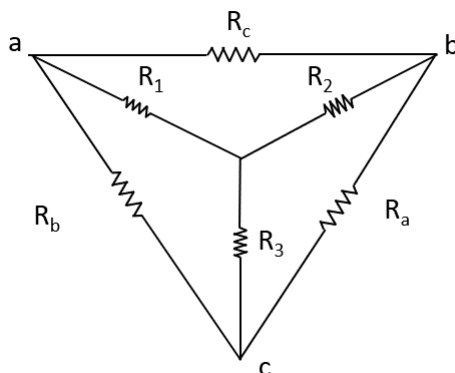


Figura 2. 23 superposición de una red estrella en la red delta, (Matthew N. & Alexander, 2013).

$$R_1 = \frac{(R_b)(R_c)}{R_a + R_b + R_c} \quad (5)$$

$$R_2 = \frac{(R_c)(R_a)}{R_a + R_b + R_c} \quad (6)$$

(7)

$$R_3 = \frac{(R_a)(R_b)}{R_a + R_b + R_c}$$

Las resistencias equivalentes obtenidas, se sustituyen en la red mostrada en la Figura 2.24a, la cual se puede sustituir como muestra la Figura 2.24b, y seguir resolviendo la red de resistencias.

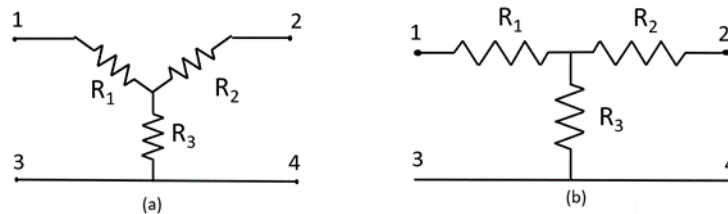


Figura 2. 24 (a) Red estrella. (b) Equivalente, (Matthew N. & Alexander, 2013).

### Conversión estrella a delta:

Supongamos que es más conveniente trabajar con una red en estrella en un lugar donde el circuito contiene una configuración delta. Superponemos una red estrella en una red delta existente (Figura 2.23)

para así encontrar las resistencias equivalentes en la red en estrella. Para obtener las resistencias equivalentes utilizamos las siguientes ecuaciones.

(8)

$$R_1 = \frac{(R_1 R_2)(R_2 R_3)(R_3 R_1)}{R_1}$$

(9)

$$R_1 = \frac{(R_1 R_2)(R_2 R_3)(R_3 R_1)}{R_2}$$

$$R_1 = \frac{(R_1 R_2)(R_2 R_3)(R_3 R_1)}{R_3} \quad (10)$$





### CAPITULO 3 METODOLOGIA

En este capítulo, se muestra la metodología en esta tesis, la cual involucra el diseño y simulación de la micropinza.

La metodología de este trabajo se muestra en la Figura 3.1.

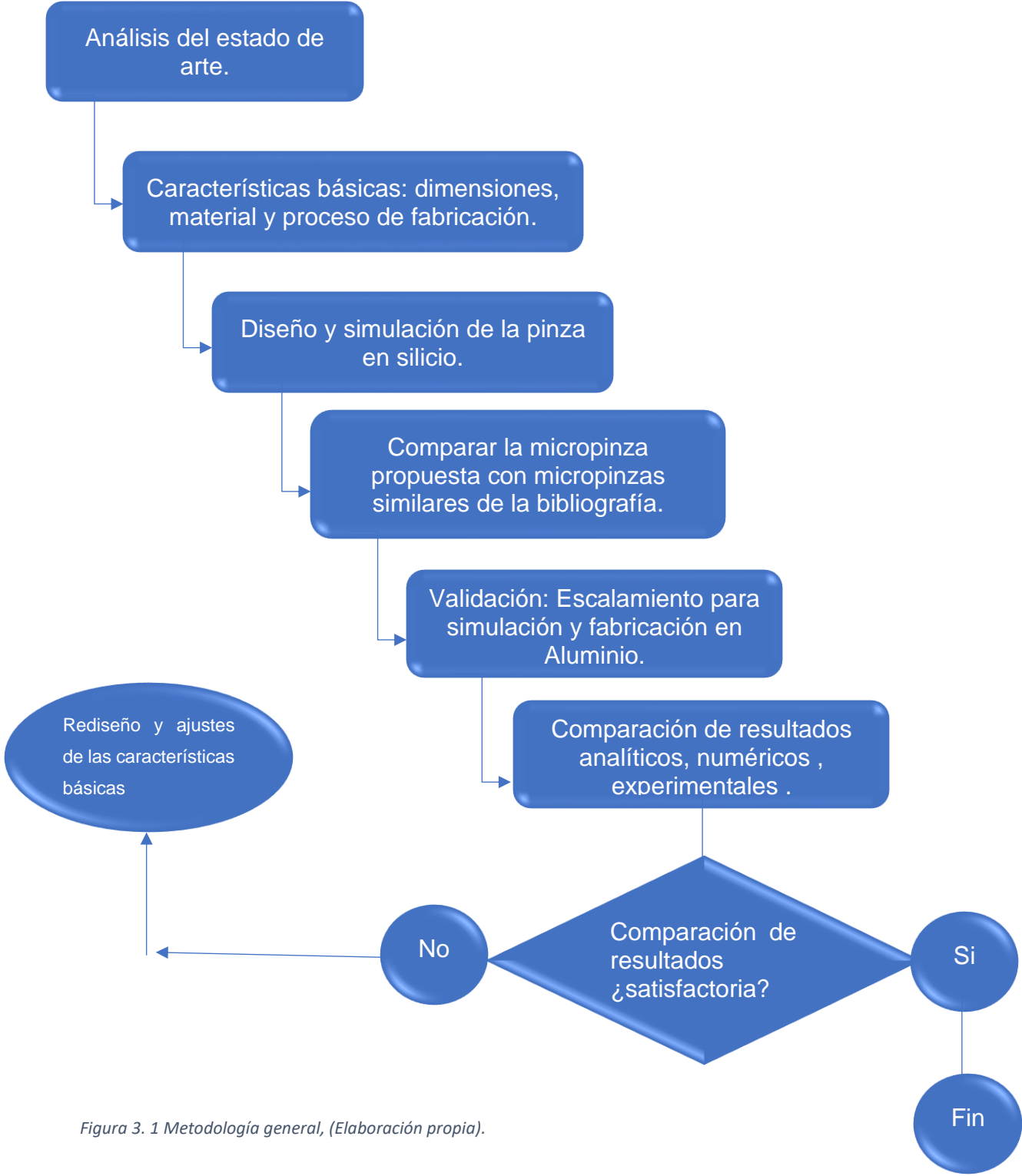


Figura 3. 1 Metodología general, (Elaboración propia).

### **3.1. metodología a implementar**

De acuerdo con la Figura 3.1:

El primer paso que se realizó en la tesis fue el análisis de algunas micropinzas electrotérmicas, impulsadas por actuadores chevrón.

Una vez determinada la oportunidad de generar un nuevo diseño de micropinza, además de la posibilidad de utilizar un nuevo actuador, recientemente propuesto por la Dra. Tecpoyotl y su grupo de trabajo. Se propusieron, además, el material y la tecnología de fabricación a utilizar.

Sobre el diseño y simulación de la micropinza: El diseño se indica en el paso anterior, realizar una adaptación del diseño propuesto. Para la simulación de la micropinza, se utilizó desing modeler en ANSYS para posteriormente se pudiera realizar la simulación en mechanical ANSYS y en caso de no tener resultados aceptables se realizan ajustes correspondientes.

Luego, Se implemento la micropinza en Aluminio para su impresión y validación con los resultados experimentales.

La metodología de la implementación y simulación se presenta en la Figura 3.2. La cual, presenta el método que se llevó a cabo en esta investigación, empezando por el modelado en ANSYS. Una vez implementada la pinza, se determinaron las condiciones de frontera del dispositivo y la fuente de alimentación.

Cabe señalar que se tomó la temperatura ambiente de (22°C), después, para obtener la mejor eficiencia posible se realizaron varias parametrizaciones, desde el ángulo de inclinación de la mandíbula, tanto como de su longitud y el ángulo de inclinación de los brazos que la soportan.

Una vez realizadas las parametrizaciones mencionadas, sobre el dispositivo mejorado se hicieron nuevas modificaciones, implementando un actuador en forma Z, para incrementar en desplazamiento y la fuerza de la micropinza.

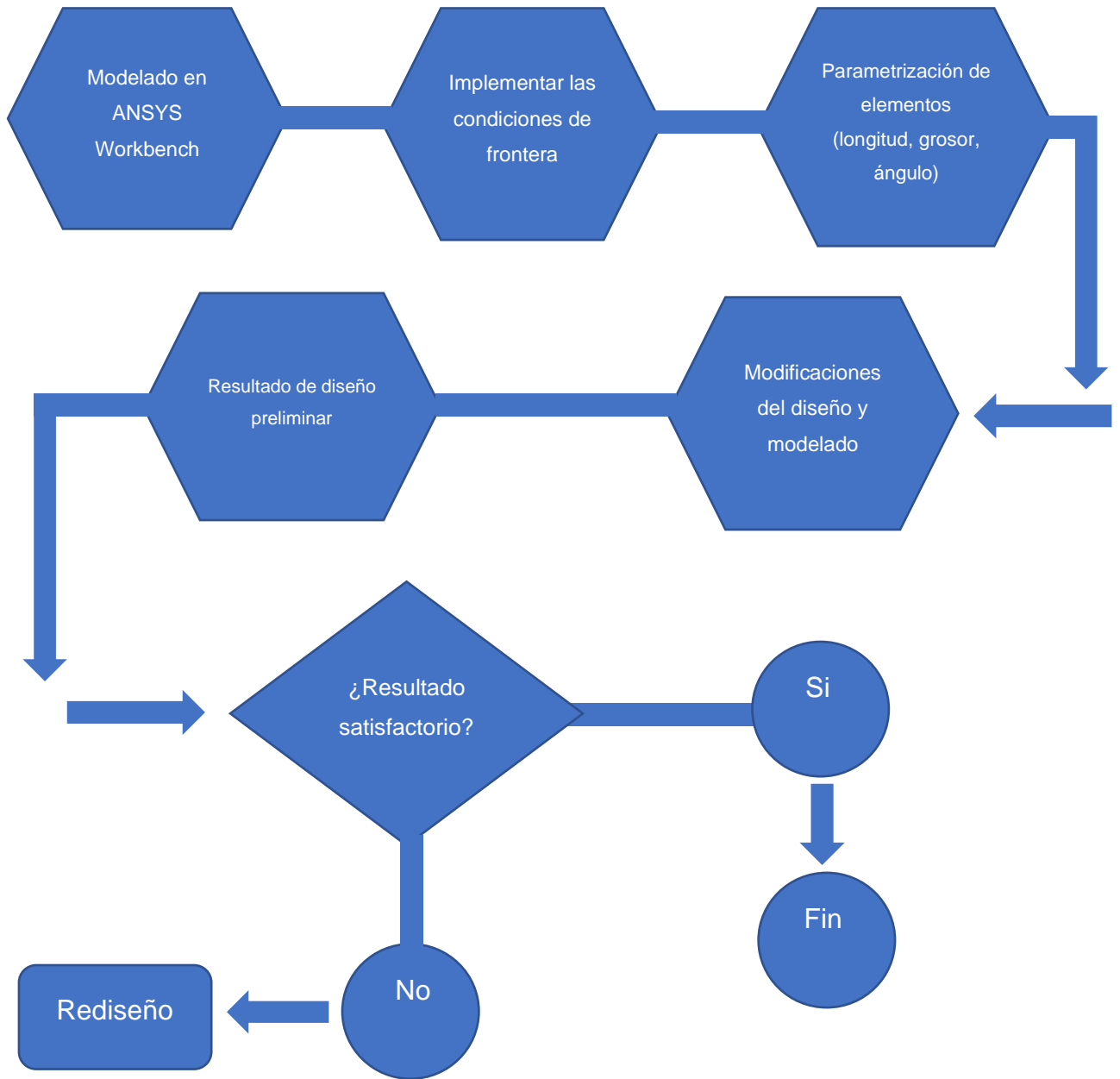


Figura 3. 2 metodología del diseño y la simulación, (Elaboración Propia).

El siguiente paso de la metodología general es comparar la micropinza propuesta con micropinzas similares de la bibliografía. Al obtenerse mejoras, se valida que nuestra propuesta es pertinente. Cabe señalar que, debido a que el microactuador es también novedoso, la micropinza seleccionada para realizar la comparación es actuada por un chevrón simétrico. Para realizar, además, en comparación se realizaron ajustes para obtener dimensiones similares.

Al observarse un desempeño adecuado de nuestro actuador en escala micrométrica, y debido a las limitaciones de llevar a cabo la microfabricación en este momento, se determinó llevar a cabo la fabricación en un modelo a escala, realizado en Aluminio, con la finalidad de realizar la validación de la geometría en escala meso.

Finalmente, se procede a realizar la comparación de resultados analíticos, numéricos y experimentales del diseño a escala. De obtenerse márgenes de error aceptables, se concluye este trabajo.



## CAPÍTULO 4. DISEÑO Y SIMULACIÓN DEL ACTUADOR CHEVRON Y LA MICROPINZA.

En este capítulo se realizarán el diseño y la simulación del actuador chevrón y la micropinza. También se muestran el material utilizado las condiciones de frontera, el software a utilizar, la comparación de los resultados analíticos con los resultados numéricos del actuador chevrón.

#### **4.1. Características del material para el chevrón y la micropinza**

Uno de los pasos principales para la deformación de la estructura, es el material que se utiliza. Ya que la deformación es muy importante para la generación de movimiento.

El silicio se usa a menudo en las micropinzas con un actuador electrotérmico. El silicio (Si) es un elemento abundante en el universo, ocupa el octavo lugar. No aparece como un elemento puro en la naturaleza; se encuentra presente en forma de: polvos, arenas, en planetoides y planetas, en varias formas de sílica (SiO<sub>2</sub>) o silicatos. El noventa por ciento de la corteza terrestre está formado de minerales tipo silicatos, por tanto, el silicio ocupa el segundo lugar como el elemento más abundante en la tierra puede llegar hasta el 28% en peso, solo después del oxígeno que es el más abundante. Las plantas usan al silicio para reforzar las paredes celulares y además nutre a los vegetales (Palacios Alquisira, 2017).

Es importante mencionar que el silicio es uno de los materiales más comunes para la producción de dispositivos MEMS. Entre sus principales características se encuentran su alto punto de fusión (1414°C), su baja expansividad, así como la alta pureza con la que puede obtenerse (Vargas-Chable, Tecpoyotl-Torres, Robles-Casolco, & Cabello-Ruiz, 2015).

Los parámetros físicos y mecánicos del silicio se muestran en la Tabla 4.1

*Tabla 4. 1 Propiedades del silicio*

<b>Descripción</b>	<b>Símbolo</b>	<b>Unidad</b>	<b>Valor</b>
<b>Densidad</b>	<b><math>\rho</math></b>	<b>[kg/m<sup>3</sup>]</b>	2329
<b>Módulo de Young</b>	<b>E</b>	<b>[GPa]</b>	130.1
<b>Coefficiente de expansión térmica</b>	<b><math>\alpha</math></b>	<b>[1/K]</b>	2.568 x10 <sup>-6</sup>
<b>Conductividad térmica</b>	<b><math>\kappa</math></b>	<b>[W/ m*K]</b>	148
<b>Razón de Poisson</b>	<b><math>\nu</math></b>		0.33

Calor específico	Cp	[J/ kg*K]	705
Resistividad	$\rho$	[ $\Omega$ *m]	1.5 x10 <sup>-4</sup>
Punto de Fusión		[°C]	1414
Esfuerzo último		[MPa]	250

## 4.2. Diseño del chevrón

Teniendo en cuenta los parámetros de la Tabla 4.1 del silicio, se realizó el diseño del actuador, el cual se le nombro actuador asimétrico, y consta de 2 brazos, uno más largo y ancho que otro como se muestra en la Figura 4.1 y en la Tabla 4.2 se muestran las dimensiones de este.

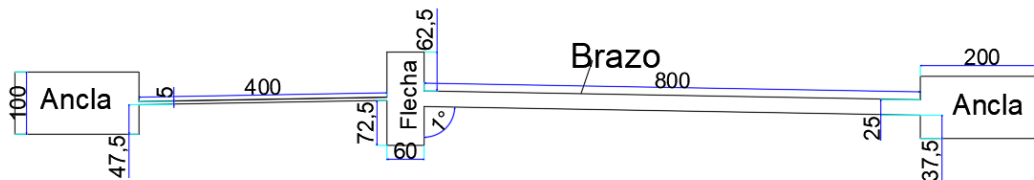


Figura 4. 1 Actuador asimétrico en  $\mu\text{m}$ , (Elaboración propia).

Tabla 4. 2 Dimensiones del actuador chevrón asimétrico, (Elaboración propia).

Descripción	Tamaño [ $\mu\text{m}$ ]	Variable
Largo del brazo 1	800	$L_b$
Largo del brazo 2	400	$L_b$
Ancho del brazo 1	25	$w_b$
Ancho del brazo 2	5	$w_b$
Ancho de la flecha	60	$w_f$
Largo de la flecha	150	$L_f$
Ángulo de inclinación del brazo	1°	$\theta$
Grosor del actuador	70	e



### 4.2.1. Modelo numérico del chevrón.

La simulación se llevó a cabo en ANSYS Workbench, donde en página principal del software en la sección de “Project”, se procedió a agregar un “geometry” continuamente un “Thermal-Electric”, en conjunto de dos “Static structural” del Toolbox como se observa en la Figura 4.2.

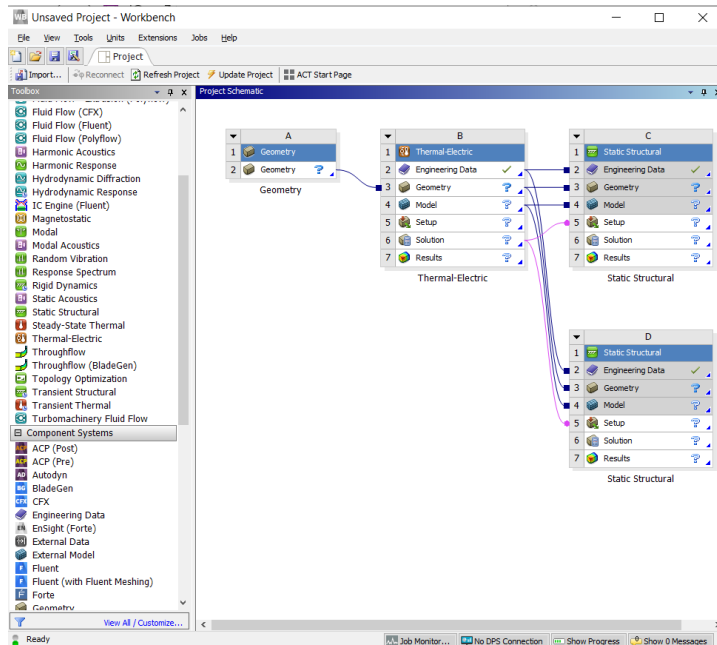


Figura 4. 2 Página principal de ANSYS Workbench, (Elaboración propia).

Para la realización del actuador chevrón que se muestran en la Figura 4.1 y las dimensiones que se muestran en la Tabla 4.2 se utilizó el “desing modeler” dentro de las opciones de “geometry”. Teniendo como resultado el actuador asimétrico que se muestra en la Figura 4.3.

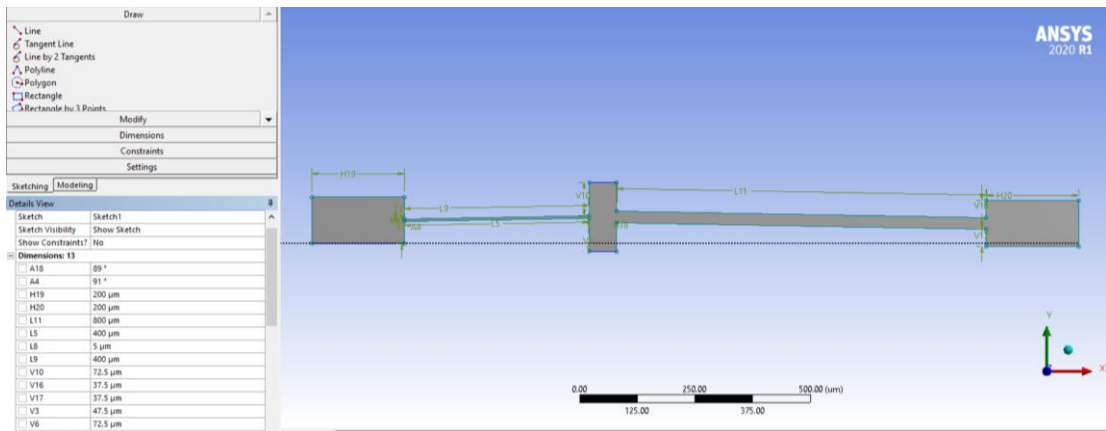


Figura 4. 3 actuador chevrón diseñado en "desing modeler", (Elaboración propia).

Para implementar el material se tuvo que desplegar el "Engineer Data" del "Thermal-Electric", después en la pestaña "Engineer Data Sources" se agregó el nombre del material el cual se nombró "siicon1.5e-4", como se muestra en la Figura 4.4. Luego en la pestaña de "Engineer Data" del "Thermal-Electric" se asignan los valores de la Tabla 4.1 de las propiedades mecánicas del silicio como lo muestra la Figura 4.5.

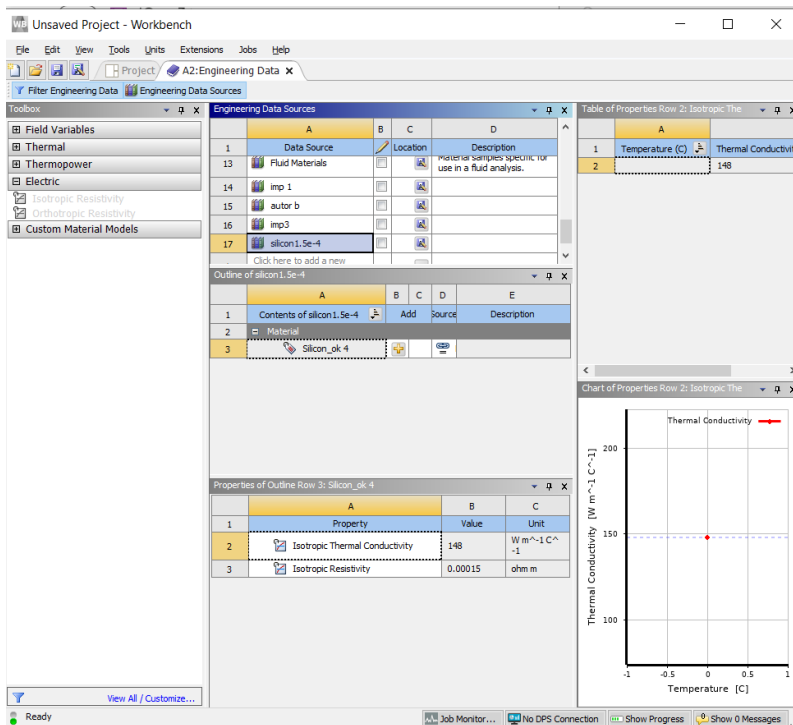


Figura 4. 4 asignación del nombre del material, (Elaboración propia)

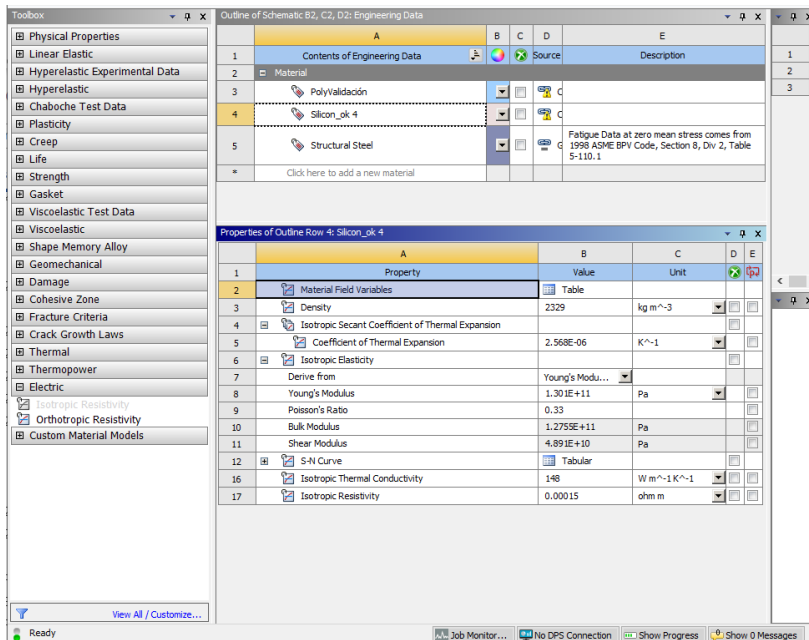


Figura 4. 5 Propiedades de silicio en el software, (Elaboración propia).

Para hacer los análisis de desplazamiento y fuerza se tuvo que realizar en el “setup” del “Thermal-Electric”, al abrir el “Mechanical”, el primer paso fue asignar el material a nuestra geometría, el cual se realizó desplegando en el árbol de operaciones en el apartado de “Solid” en la sección de “Assignment” para después elegir el material que se agregó en el “Engineer Data” del “Thermal-Electric” como se muestra en la Figura 4.6.

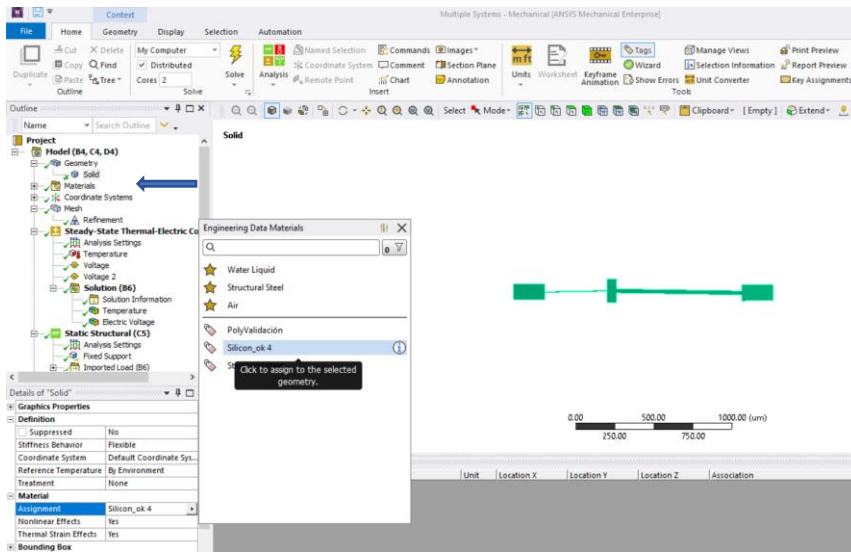


Figura 4. 6 asignación del material a la geometría, (Elaboración propia).

El segundo paso que se realizó fue el mallado, para realizar la malla se hizo un refinamiento en la cara frontal del actuador, el cual se realizó en el apartado de “Mesh” en el árbol de operaciones del “setup” del “Thermal-Electric” como se muestra en la Figura 4.7, dando como resultado un total de 3080 nodos y 1409 elementos como ilustra en Tabla 4.3.

#### Refinement

Refinement

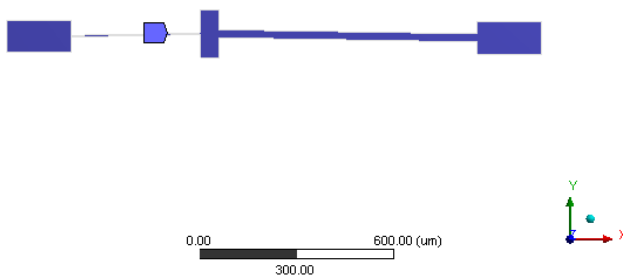
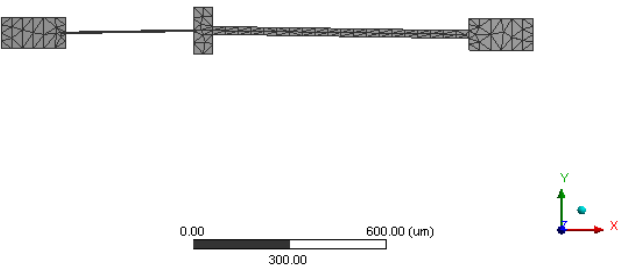


Figura 4. 7 Refinamiento en cara frontal del actuador chevrón asimétrico, (Elaboración propia).

Tabla 4. 3 Resultados de la malla del chevrón asimétrico, (Elaboración propia).

<b>Nodos</b>	<b>3080</b>	
<b>Elementos</b>	<b>1409</b>	

El tipo de actuación para el chevrón será electro-térmicamente por lo que se eligió tener un voltaje máximo de 2V en un ancla, el cual generará una temperatura máxima de 112 °C.

Se asignó la temperatura ambiente (22 °C) como se muestra por default en el software, la cual se aplicó en el ancla que está a tierra, después se aplicó un voltaje de 2 V en el ancla que no está a tierra. En la Figura 4.8 se muestran las condiciones de frontera antes mencionadas para el cálculo numérico de la temperatura, en la Figura 4.9 se muestran los resultados de la distribución de temperatura.

Para el cálculo del desplazamiento se utilizaron unos soportes fijos en cada ancla como se muestra en la Figura 4.10, y a su vez se ilustran los resultados obtenidos en la Figura 4.11.

Para el cálculo de la fuerza de reacción del actuador chevrón se utilizaron las mismas condiciones de frontera del desplazamiento y se implementó un soporte fijo en la parte de la flecha como se muestra en la Figura 4.12 y los

resultados obtenidos se pueden observar en la Figura 4.13. En la Tabla 4.4 se muestra resultados obtenidos mediante la simulación.

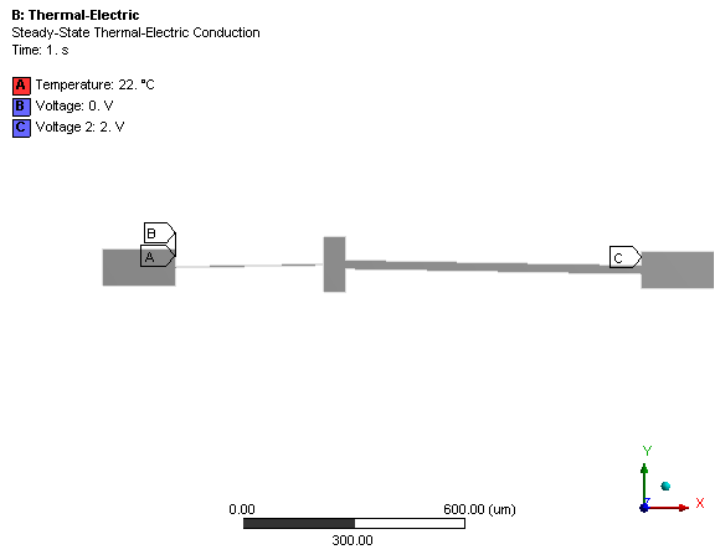


Figura 4. 8 Condiciones de frontera del actuador asimétrico, (Elaboración propia).

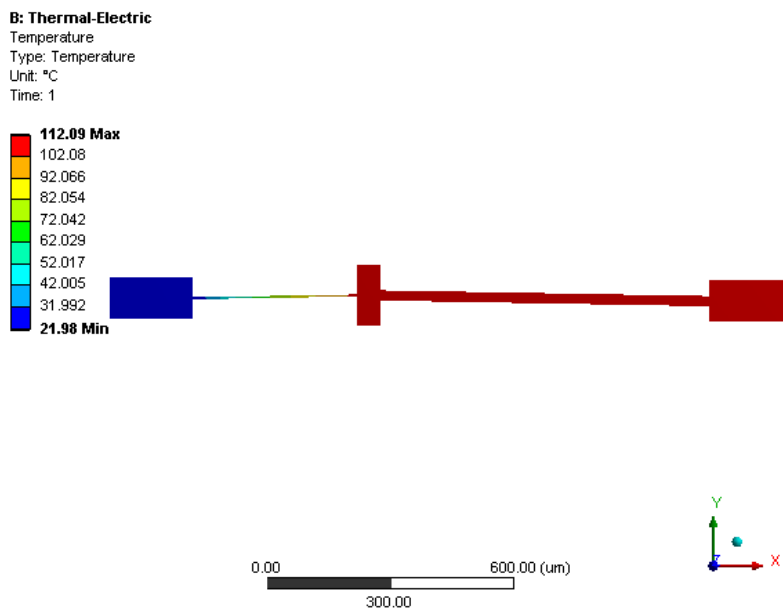


Figura 4. 9 Distribución de temperatura, (Elaboración propia).

C: Static Structural  
Fixed Support  
Time: 1. s

Fixed Support

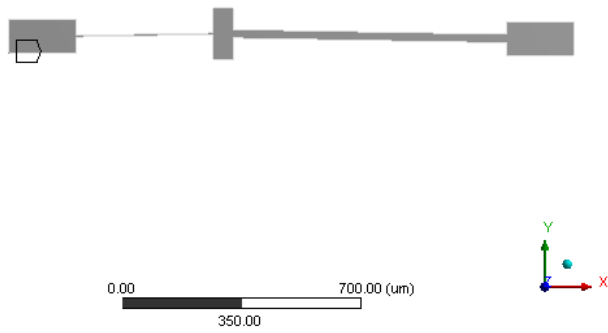


Figura 4. 10 Soportes fijos para el desplazamiento, (Elaboración Propia).

C: Static Structural  
Total Deformation  
Type: Total Deformation  
Unit:  $\mu\text{m}$   
Time: 1

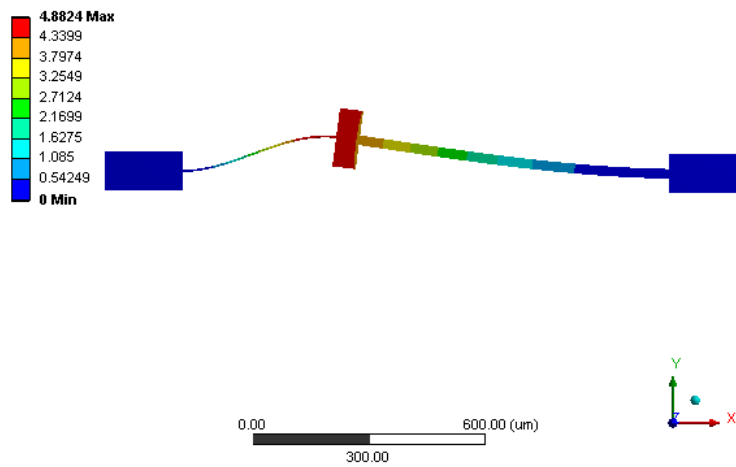


Figura 4. 11 Desplazamiento del chevrón asimétrico en  $\mu\text{m}$ , (Elaboración propia).

**D: Static Structural**  
Static Structural 2  
Time: 1. s

**A** Fixed Support  
**B** Fixed Support 2

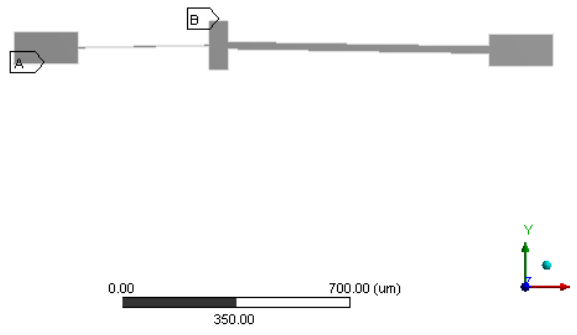


Figura 4. 12 Condiciones de frontera para la fuerza de reacción, (Elaboración propia).

**D: Static Structural**  
Force Reaction

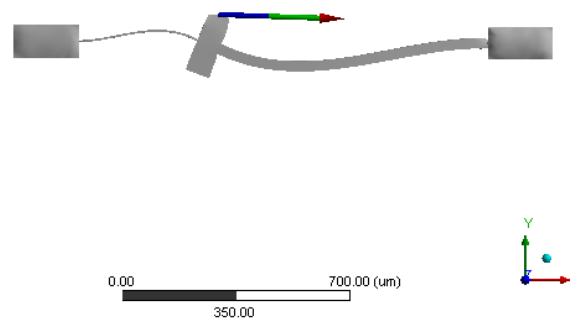


Figura 4. 13 Fuerza de reacción chevrón asimétrico, (Elaboración Propia).



Tabla 4. 4 Resultados de la simulación del chevrón, (Elaboración propia)

<b>Desplazamiento en <math>\mu\text{m}</math></b>	<b>Temperatura máxima °C</b>	<b>Fuerza en mN</b>
<b>4.8824</b>	112.09	40.117

De la Tabla 4.4 puede apreciarse que el desplazamiento máximo obtenido en la flecha del actuador corresponde a 4.88  $\mu\text{m}$ , lo que es un resultado suficiente para aplicar este desplazamiento de entrada a la micropinza. Cabe señalar, que este diseño corresponde a otra tesis de licenciatura en proceso, la cual también es dirigida por la Dra. Tecpoyotl. Aquí se reproduce, con el mismo material para familiarizarse con la geometría, posteriormente se realizará su escalamiento, para realizar el prototipo en macroescala, con el cual se realizarán las pruebas correspondientes.

Con relación a la temperatura, puede observarse que no es relativamente alta, además de que en la simulación no se utilizó conexión. Por lo que, es de esperarse que, en un prototipo real, la temperatura sea menor. Además, al impulsar a los brazos de la pinza, la temperatura se disipará aún más.

Sobre la fuerza, puede decirse que 40.11 mN es una magnitud alta, sobre todo, considerando que sólo se utiliza un par de brazos.

### **4.3. Especificaciones de la micropinza**

El actuador asimétrico está compuesto de silicio, el cual es un material semiconductor. Debido al paso de corriente que se tiene entre las anclas al aplicar una diferencia de potencial, la estructura tiende a incrementar su temperatura, por lo cual, tiende a deformarse y esto hace que la flecha tenga un movimiento direccional, el cual se aprovecha para implementar un sistema de sujeción que permita sujetar objetos en las puntas del brazo de sujeción,

haciendo referencia a una micropinza, el comportamiento que tiene la micropinza se debe a la polarización térmica o eléctrica que tienen las anclas. La alimentación que se tiene en las anclas es de 0 – 2 V con una temperatura ambiente de 22° C, la cual estará en el ancla que está a tierra, para las simulaciones iniciales las cuales se llevaran a cabo en el software ANSYS.

#### 4.4. Diseño preliminar de la micropinza.

Con los resultados obtenidos del actuador chevrón asimétrico, se procede a hacer unos arreglos estructurales y de diseño como se muestra la Figura 4.14, se utiliza silicio como material estructural, al igual que se utilizó en el actuador chevrón asimétrico, para la implementación de la geometría en ANSYS y el material en el software, se utilizó el mismo método mencionado para el actuador chevrón asimétrico.

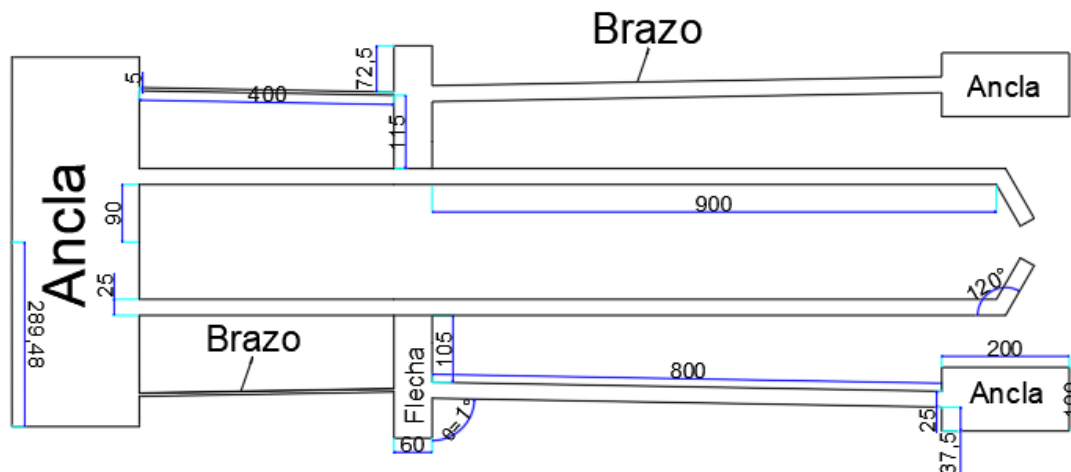


Figura 4. 14 diseño preliminar de la micropinza en  $\mu\text{m}$  (Elaboración propia).

##### 4.4.1. Resultados de simulación del diseño preliminar de la micropinza.

Para el mallado se utilizó un refinamiento en la cara frontal como se muestra en la Figura 4.15 y los resultados obtenidos se muestran en la Tabla 4.5.

**Refinement**

■ Refinement

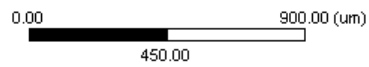
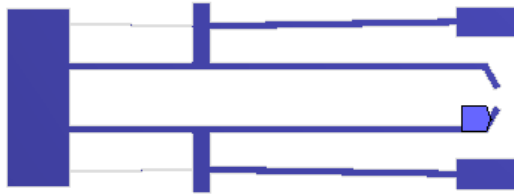
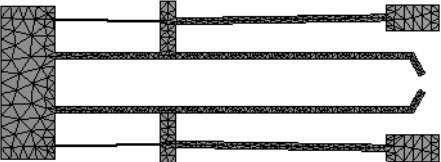
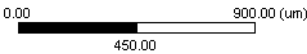



Figura 4. 15 Refinamiento en el diseño preliminar, (Elaboración propia).

Tabla 4. 5 resultados de la simulación de la malla del diseño preliminar, (Elaboración propia)

Nodos	Elementos	  
<b>11081</b>	4800	

Para el método numérico de la distribución de temperatura, se utilizaron las condiciones de frontera desarrolladas para el actuador chevrón asimétrico los

cuales se presentan en la Figura 4.16 y los resultados obtenidos se ilustran en la Figura 4.17.

**B: Thermal-Electric**

Steady-State Thermal-Electric Conduction

Time: 1. s

- A** Temperature: 22. °C
- B** Voltage: 0. V
- C** Voltage 2: 2. V

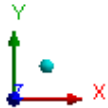
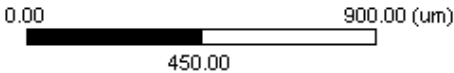
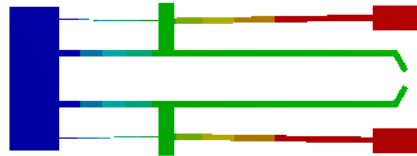


Figura 4. 16 condiciones de frontera para la temperatura, (elaboración propia).

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

**112.09 Max**  
102.08  
92.07  
82.059  
72.048  
62.037  
52.026  
42.015  
32.004  
**21.993 Min**



0.00 1000.00 (µm)  
500.00



Figura 4. 17 Distribución de temperatura, (elaboración propia).

Para la deformación se utilizaron las mismas condiciones de frontera que se utilizaron en el chevrón asimétrico las cuales fueron los soportes fijos en las anclas y en la Figura 4.18 se muestran los resultados obtenidos mediante la simulación para el desplazamiento.

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

**1.1957 Max**  
1.0628  
0.92999  
0.79714  
0.66428  
0.53142  
0.39857  
0.26571  
0.13286  
**0 Min**



0.00 1000.00 (µm)  
500.00



Figura 4. 18 Desplazamiento del diseño preliminar de la micropinza en µm, (Elaboración propia).

Las condiciones de frontera que se empleó para el cálculo numérico de la fuerza de sujeción fueron unos soportes fijos en las anclas y en las 2 puntas de los brazos de sujeción como se ilustra en la Figura 4.19, en la Figura 4.20 se muestran los resultados.

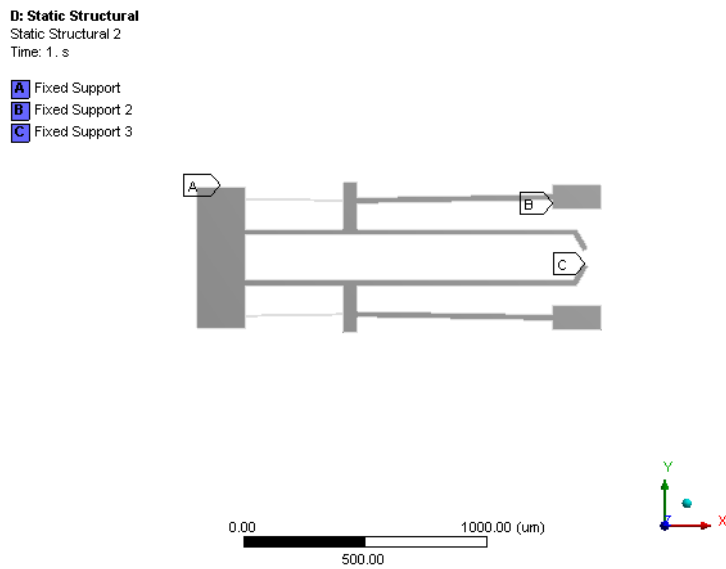


Figura 4. 19 Condiciones de frontera para la fuerza, (Elaboración propia).

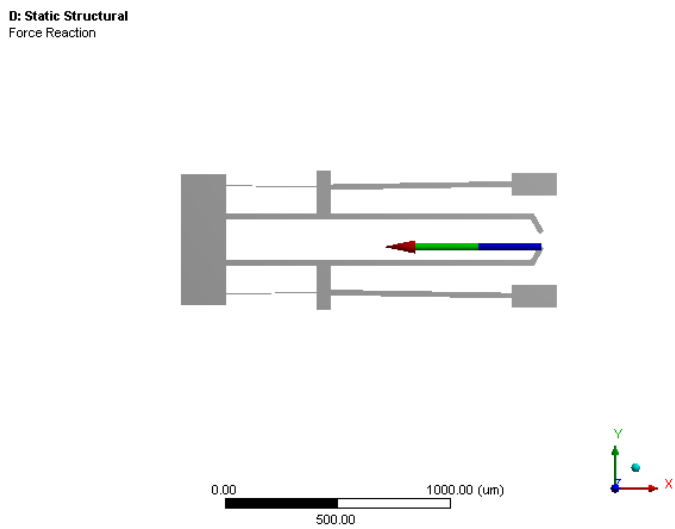


Figura 4. 20 Fuerza de reacción del diseño preliminar de la micropinza, (elaboración propia).

En la Tabla 4.6. se muestran los resultados de la simulación del diseño preliminar de la micropinza, concluyendo que el desplazamiento de la micropinzas es bajo al igual que la fuerza de reacción en comparación con la micropinza mencionada en la Tabla 2.3 de los autores Elsen, Bharadwaj, & Ramesh, la cual presenta un desplazamiento de 55  $\mu\text{m}$  por cada punta, y una fuerza de sujeción de 80 mN mencionando que esa micropinza actúa con una diferencia de potencial de con 8 V.

*Tabla 4. 6 Resultados de simulación del diseño preliminar (Elaboración propia).*

<b>Parámetros</b>	<b>Valores</b>
<b>Temperatura máxima</b>	112°C
<b>Desplazamiento de las puntas</b>	1.19 $\mu\text{m}$ por cada punta, en total son 2.38 $\mu\text{m}$
<b>Fuerza de sujeción</b>	27.4 mN

Por lo que, se decide realizar ajustes necesarios los cuales se explican en los siguientes puntos.

#### ***4.5. Diseño preliminar de la micropinza primera modificación.***

- **Ajustes en lo largo del brazo de sujeción.**

Para este ajuste se realizaron parametrizaciones, las cuales se muestran en la Tabla 4.7, teniendo en cuenta cual es la mejor opción para la fabricación y así no desperdiciar material, se optó por elegir que los brazos de sujeción tuvieran las medidas mostradas en la Figura 4.21, con la que se obtuvieron mejores resultados de desplazamiento y fuerza de sujeción.

Cabe mencionar que, se siguió utilizando como material el silicio y las mismas condiciones de frontera que el diseño preliminar.

Tabla 4. 7 Parametrización del largo de los brazos, (Elaboración propia).

largo del brazo de sujeción ( $\mu\text{m}$ )	Temperatura ( $^{\circ}\text{C}$ )	desplazamiento ( $\mu\text{m}$ )	fuerza de sujeción (mN)	Esfuerzo último (Mpa)
900	112.092232	1.19570613	27.4103059	137.500203
950	112.091789	1.26218227	27.9347783	150.126793
1000	112.090569	1.32582573	28.5516124	146.310392
1050	112.09095	1.39341079	29.0435628	148.75381
1100	112.091103	1.46288246	29.5110653	148.201925
1150	112.090919	1.52622589	30.0206667	146.358622
1200	112.09079	1.59467071	30.5527277	135.89985

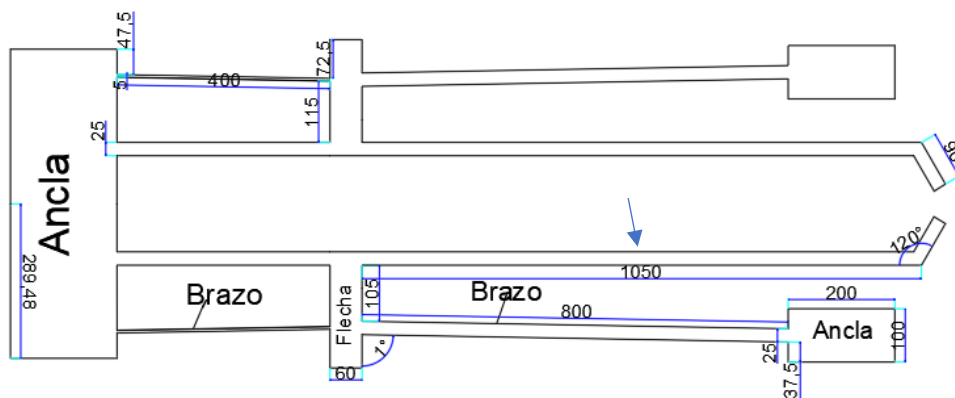


Figura 4. 21 Dimensiones del diseño preliminar con la primera modificación en  $\mu\text{m}$ , (Elaboración propia).

#### 4.5.1. Resultados de simulación del diseño preliminar de la micropinza con la primera modificación.

Se realizaron las simulaciones con las mismas condiciones de frontera mencionadas, tanto como el análisis de la malla, la distribución de temperatura, el desplazamiento y la fuerza de sujeción, los resultados se muestran en la Figura 4.22 - 4.25.



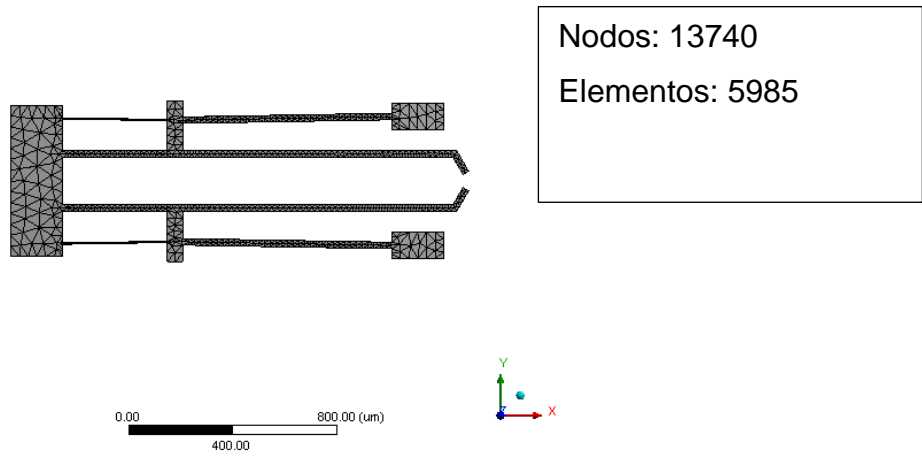


Figura 4. 22 Mallado del diseño preliminar con la primera modificación, (Elaboración propia).

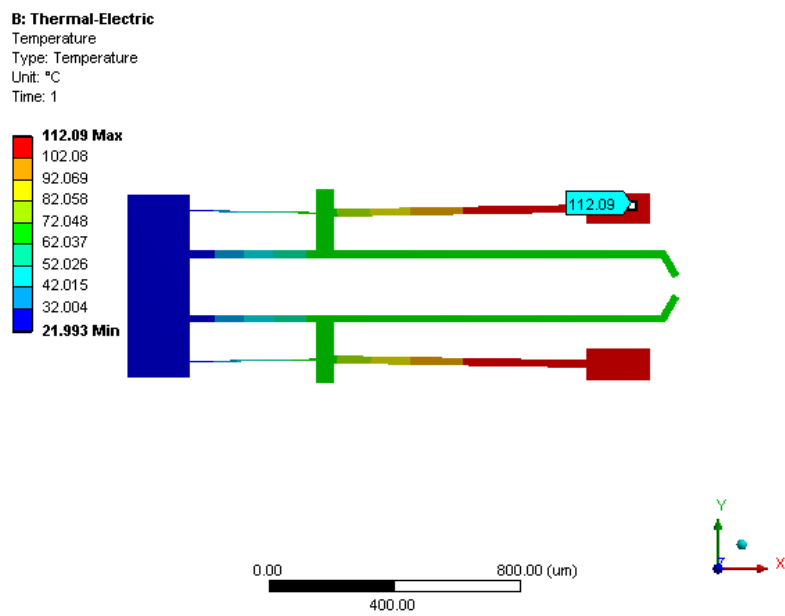


Figura 4. 23 Distribución de temperatura del diseño preliminar con la primera modificación, (Elaboración propia).

**C: Static Structural**

Total Deformation

Type: Total Deformation

Unit:  $\mu\text{m}$

Time: 1

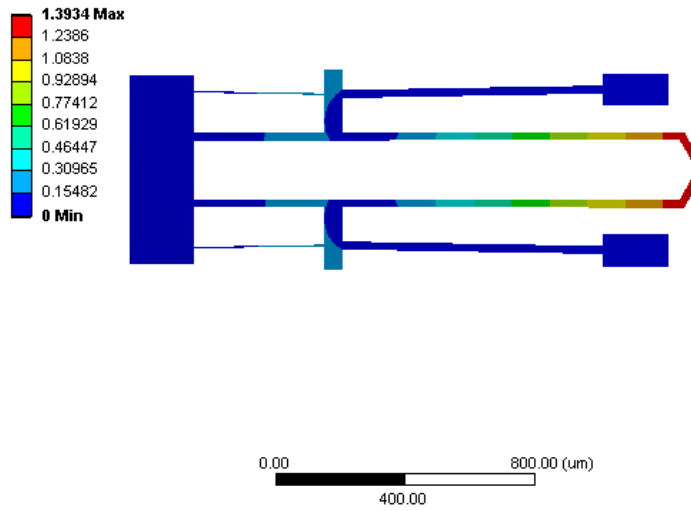


Figura 4. 24 Desplazamiento del diseño preliminar con la primera modificación, (Elaboración propia).

**D: Static Structural**

Force Reaction

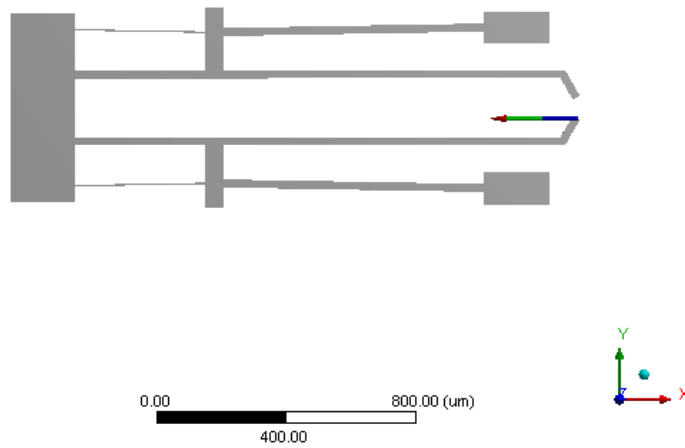


Figura 4. 25 Fuerza de sujeción del diseño preliminar con la primera modificación, (Elaboración propia).

En la Tabla 4.8 se observan los parámetros de la simulación del diseño preliminar con la primera modificación, se puede observar que la fuerza de sujeción aumentó, pero los resultados no son factibles ya que la fuerza de sujeción está por debajo del rango deseado.

Al no tener resultados favorables se optó por hacer una segunda modificación.

Tabla 4. 8 Parámetros de simulación del diseño preliminar con la primera modificación, (Elaboración propia)

<b>Parámetros</b>	<b>Valores</b>
<b>Temperatura máxima</b>	112°C
<b>Desplazamiento de las puntas</b>	1.39 μm por cada punta, en total son 2.78 μm
<b>Fuerza de sujeción</b>	29.04 mN

#### **4.6. Diseño preliminar de la micropinza segunda modificación.**

- **Ajustes en el ángulo de inclinación de las puntas del brazo de sujeción**

Esto para mejorar la fuerza de sujeción del dispositivo y la deformación que tiene las puntas, se realizó una parametrización del ángulo de inclinación de las puntas de sujeción, teniendo como resultado la Tabla 4.9 de las parametrizaciones del ángulo de inclinación, se utilizó el material y las condiciones de frontera del diseño preliminar para la parametrización.

Tabla 4. 9 Parametrización del ángulo de inclinación de las puntas del brazo de sujeción, (Elaboración propia).

<b>Ángulo de la punta del brazo de sujeción (°)</b>	<b>Temperatura (°C)</b>	<b>Desplazamiento (μm)</b>	<b>Fuerza de sujeción (mN)</b>	<b>Esfuerzo último (Mpa)</b>
<b>120</b>	112.090889	1.39223281	29.0461627	148.602861
<b>125</b>	112.090805	1.4000738	30.7310296	148.983657
<b>130</b>	112.090927	1.40804819	32.8546351	148.350358

<b>135</b>	112.090988	1.41530055	35.4467259	148.578653
<b>140</b>	112.090401	1.42255343	38.6004191	146.721632
<b>145</b>	112.09111	1.428761	42.3972601	146.878163
<b>150</b>	112.091011	1.4330138	46.800822	148.236023
<b>155</b>	112.090485	1.43773852	51.7076182	149.314604
<b>160</b>	112.090515	1.440103	57.0731781	148.48855

Al tener mejores resultados en el desplazamiento y fuerza de sujeción en comparación con el diseño preliminar con la primera modificación, se optó por cambiar el ángulo de inclinación de las puntas del brazo de sujeción a  $160^\circ$ , como se muestra en la Figura 4.26.

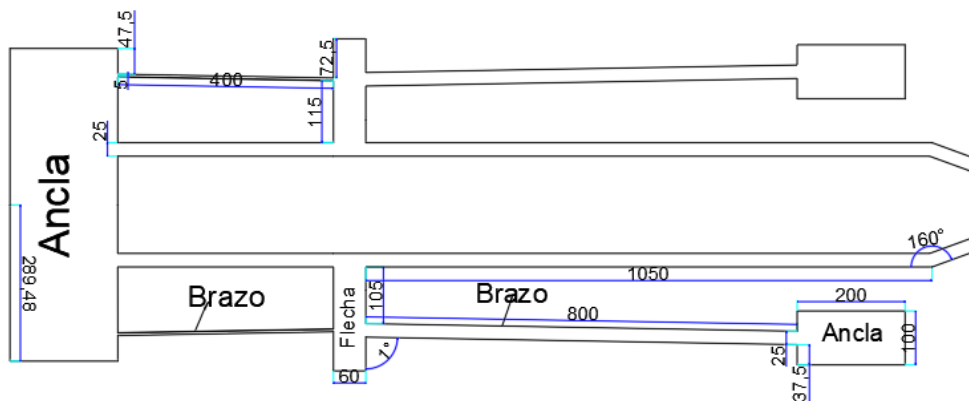


Figura 4. 26 Diseño preliminar de la micropinza 2 modificación en  $\mu\text{m}$ , (Elaboración propia).

#### 4.6.1. Resultados de simulación del diseño preliminar de la micropinza con la segunda modificación.

Para la simulación de esta segunda modificación, se utilizaron las mismas condiciones de frontera para el mallado, la distribución de temperatura, la deformación, la fuerza de sujeción al igual que el material antes mencionado. Los resultados obtenidos se muestran en la Figura 4.27 - 4.30 y se resumen en la Tabla 4.10.

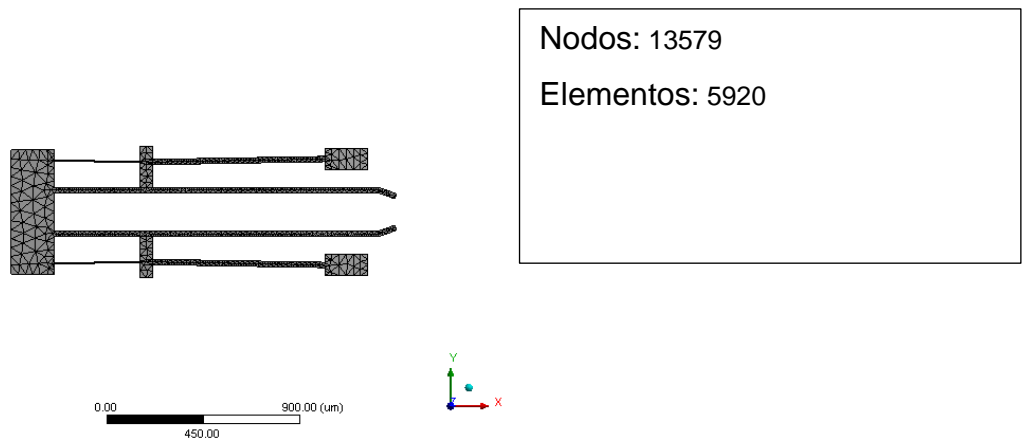


Figura 4. 27 Mallado del diseño preliminar con la segunda modificación, (Elaboración Propia).

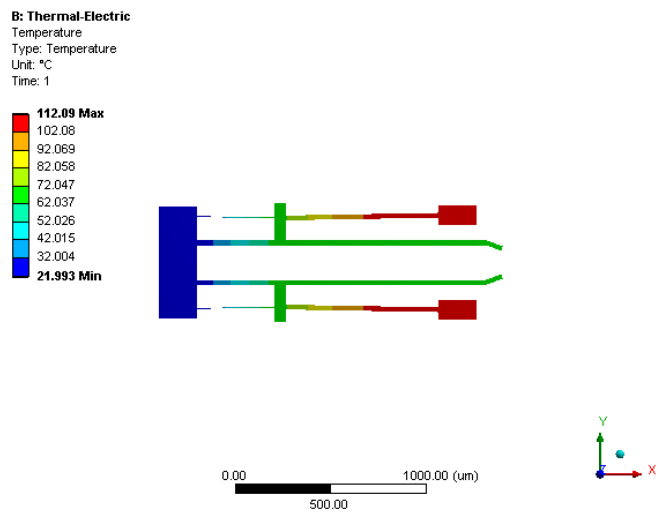


Figura 4. 28 Distribución de temperatura del diseño preliminar con la segunda modificación, (Elaboración propia).

**C: Static Structural**  
Total Deformation  
Type: Total Deformation  
Unit:  $\mu\text{m}$   
Time: 1

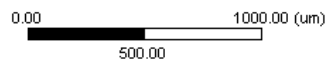
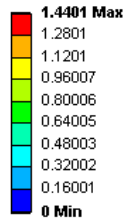


Figura 4. 29 Desplazamiento del diseño preliminar con la segunda modificación, (Elaboración propia).

**D: Static Structural**  
Force Reaction

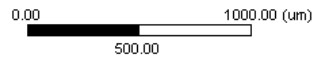
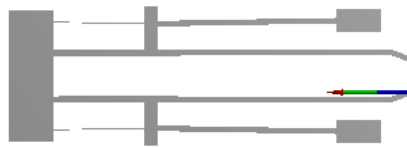


Figura 4. 30 Fuerza de sujeción del diseño preliminar con la segunda modificación, (Elaboración propia).

Tabla 4. 10 Resultados de la simulación del diseño preliminar con la segunda modificación. (Elaboración propia)

<b>Parámetros</b>	<b>Valores</b>
<b>Temperatura máxima</b>	112°C
<b>Desplazamiento de las puntas</b>	1.44 $\mu\text{m}$ por cada punta, en total son 2.88 $\mu\text{m}$
<b>Fuerza de sujeción</b>	57.07 mN

Al tener un resultado favorable en la fuerza de sujeción, pero un resultado no tan apropiado en el desplazamiento se opta por hacer una tercera modificación.

#### **4.7. Diseño preliminar de la micropinza tercera modificación.**

- **Modificación en las puntas de sujeción de la micropinza.**

Para la modificación de las puntas de la micropinza se optó por tener una separación de 50  $\mu\text{m}$  entre ellas, a su vez se seleccionaron las puntas planas, ya que son las más comunes que se utilizan en la literatura. Una de las ventajas que tienen las puntas planas es que permitirán un sujeción estable y manipulación de objetos firmes debido al hecho de que, la fuerza de sujeción actuará normal al objeto en comparación, con el sujeción angular, de modo que es susceptible al deslizamiento. ( Nashrul , Zubir , Shirinzadeh, & Tian, 2008).

La modificación de las puntas se puede apreciar en la Figura 4.31.

- **Modificación del brazo de las puntas de sujeción**

Posteriormente, se modificó el brazo de sujeción de las puntas, teniendo como resultado una forma Z, la cual está explicada en el capítulo 2, se tuvo como resultado una mayor fuerza y un mejor desplazamiento, a los mismos brazos de la punta de sujeción se consideró tener un ángulo de inclinación, para observar si mejoraban aún más la fuerza y el desplazamiento. Se hicieron las

parametrizaciones en el software ANSYS™ con las condiciones de frontera para la distribución de temperatura, desplazamiento y fuerza de sujeción antes mencionas. Lo resultados se muestran en las Tablas 4.11 - 4.13. En la Figura 4.31 se muestra los ángulos que tuvieron mejores resultados de fuerza y desplazamiento en comparación con el diseño preliminar con la segunda modificación.

Tabla 4. 11 Parametrización del ángulo de los brazos de sujeción de la micropinza, (Elaboración propia).

Ángulo del brazo corto (°)	Ángulo del brazo largo (°)	Temperatura (°C)	Desplazamiento (µm)	Fuerza de sujeción (N)	Esfuerzo último (Mpa)
90	90	112.090515	1.42904582	69.550147 3	139.44073
91	91	112.090767	1.47750748	66.727706 5	136.37607
92	92	112.09124	1.51500754	57.381058 4	137.29587 4
93	93	112.090439	1.54670749	46.582227 5	148.87783 6
94	94	112.09108	1.573912	37.083106	143.56037 1
95	95	112.090599	1.59590295	29.555552 5	140.94650 6

Tabla 4. 12 Parametrización del ángulo de los brazos de sujeción de la micropinza, (Elaboración propia).

Ángulo del brazo corto (°)	Ángulo del brazo largo (°)	Temperatura (°C)	Desplazamiento (µm)	Fuerza de sujeción (mN)	Esfuerzo último (Mpa)
90	90	112.090515	1.42904582	68.550147 3	139.44073



<b>90</b>	91	112.090477	1.43272072	69.005008 9	146.28725 6
<b>90</b>	92	112.090591	1.43281755	66.073895 3	138.65752 7
<b>90</b>	93	112.090919	1.43536874	61.447598 6	148.19244 1
<b>90</b>	94	112.091133	1.43367244	55.811401 7	149.84664 8
<b>90</b>	95	112.090317	1.43596649	49.886431 6	150.96964 6

Tabla 4. 13 Parametrización del ángulo de los brazos de sujeción de la micropinza, (Elaboración propia).

<b>Ángulo del brazo corto (°)</b>	<b>Ángulo del brazo largo (°)</b>	<b>Temperatura (°C)</b>	<b>Desplazamiento (µm)</b>	<b>Fuerza de sujeción (mN)</b>	<b>Esfuerzo último (Mpa)</b>
<b>91</b>	90	112.090408	1.47574544	69.519155 9	139.56464 1
<b>91</b>	91	112.090759	1.4789921	66.722627 8	148.14912 2
<b>91</b>	92	112.090675	1.47650318	62.187177 1	151.54570 4
<b>91</b>	93	112.09034	1.47947989	56.684164 9	139.57387
<b>91</b>	94	112.091438	1.48007386	50.781340 8	147.39903 8
<b>91</b>	95	112.090904	1.48043769	45.010496 2	150.99339 4

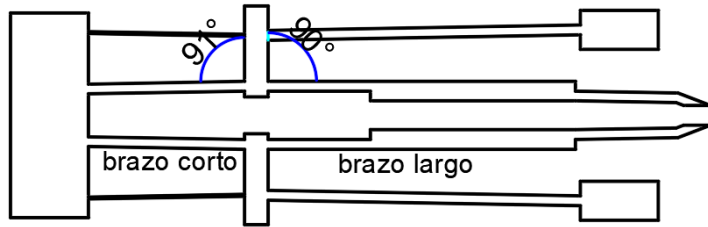


Figura 4. 31 Diseño preliminar de la tercera modificación (Elaboración propia).

Como se muestra en la Figura 4.31 se obtuvo como resultado que el brazo corto tenía un ángulo de inclinación de  $91^\circ$  y el brazo largo una inclinación de  $90^\circ$ , también se muestra que las puntas del brazo de sujeción son planas esto para facilitar al sujeción de objetos regulares e irregulares. Se tuvieron buenos resultados como se muestran en la Tabla 4.12, teniendo un desplazamiento de  $1.44 \mu\text{m}$  y una fuerza de sujeción de casi  $69 \text{ mN}$ . Posteriormente, se implementó un soporte entre el brazo largo del actuador chevrón asimétrico con el brazo largo de sujeción. En la simulación de la micropinza se implementó la convección debida a aire, lo cual se muestra en el apartado del diseño final.

#### 4.8. Diseño final de la micropinza

Para el diseño final se obtuvo un soporte entre los brazos como se muestra en la Figura 4.32, esto para tratar de mejorar la fuerza de sujeción y el desplazamiento de la micropinza. En la Figura 4.33 se muestran las dimensiones de los arreglos finales.

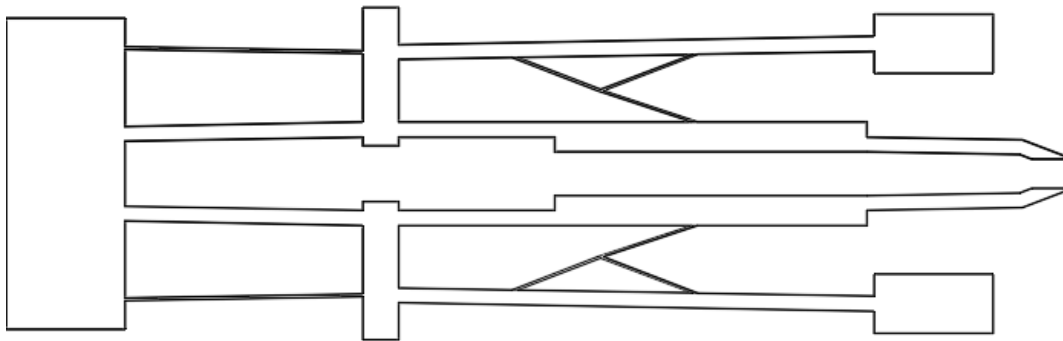


Figura 4. 32 Diseño final de la micropinza, (Elaboración propia).

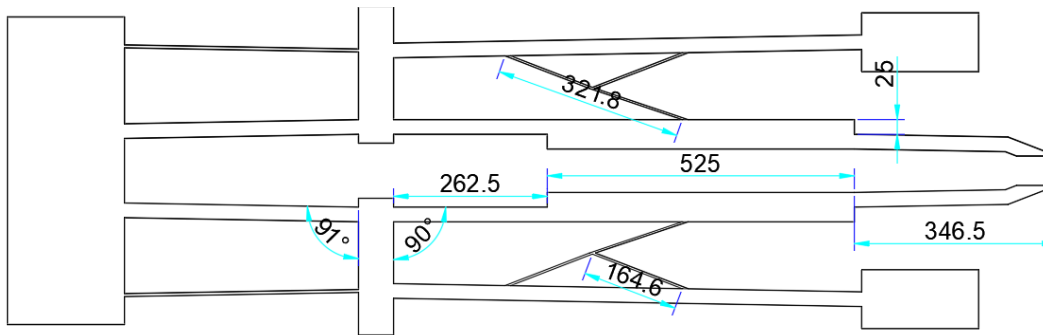


Figura 4. 33 dimensiones del diseño final en  $\mu\text{m}$ , (Elaboración propia).

#### 4.8.1. Resultados de la simulación del diseño final de la micropinza

Como se mencionó antes en la simulación se agregó el valor de la convección debida a aire en el software ANSYS, el cual tiene una magnitud de  $25 \frac{W}{m^2K}$

Para la selección del material y el mallado se utilizó el mismo método que en el caso del diseño preliminar de la micropinza, teniendo como resultados 19793 nodos y 8805 elementos con el refinado en la cara frontal de la micropinza.

Para las condiciones de frontera de la distribución de temperatura se muestran en la Figura 4.34, donde se agregó la convención debida a aire y el resultado de la distribución de temperatura se muestra en la Figura 4.35, dando como resultado una temperatura de  $111.54^\circ\text{C}$  en las puntas del brazo de sujeción.

Las condiciones de frontera para el desplazamiento fueron las mismas empleadas en el diseño preliminar, las cuales consisten en dos soportes fijos en las anclas, que se muestran en la Figura 4.36.

Para la fuerza de sujeción tenemos casi las mismas condiciones de frontera que el desplazamiento, sólo que se le agrego un soporte fijo en las puntas del brazo de sujeción, como se muestra en la Figura 4.37. En la Tabla 4.14 se muestran los parámetros de la simulación del diseño final con la convección del aire.

**B: Thermal-Electric**  
 Steady-State Thermal-Electric Conduction  
 Time: 1. s

**A** Voltage: 0. V  
**B** Voltage: 2. V  
**C** Temperature: 22. °C  
**D** Convection: 0. °C, 25.  $\mu\text{W}/\mu\text{m}^2 \cdot ^\circ\text{C}$

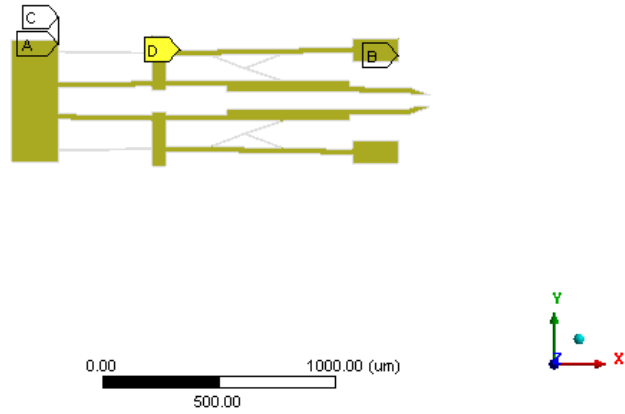


Figura 4. 34 Condiciones de frontera para la distribución de temperatura del diseño final, (Elaboración propia).

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

**111.54 Max**  
 101.59  
 91.643  
 81.693  
 71.742  
 61.792  
 51.842  
 41.891  
 31.941  
**21.991 Min**

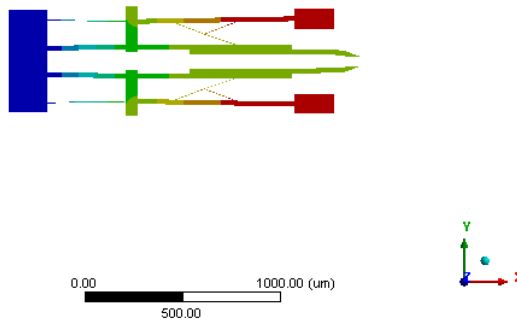


Figura 4. 35 Resultados de la distribución de temperatura para el diseño final (Elaboración propia).

**C: Static Structural**  
Total Deformation  
Type: Total Deformation  
Unit:  $\mu\text{m}$   
Time: 1 s

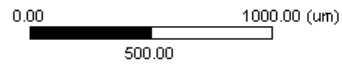
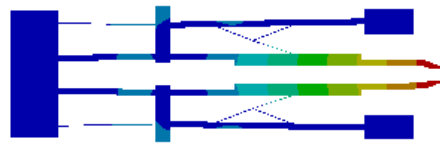
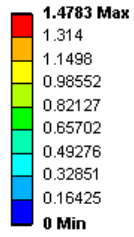


Figura 4. 36 Desplazamiento del diseño final, (Elaboración propia).

**D: Static Structural**  
Static Structural 2  
Time: 1. s

- A** Fixed Support
- B** Fixed Support 2
- C** Fixed Support 3

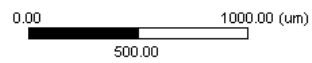


Figura 4. 37 Condiciones de frontera para la fuerza de sujeción del diseño final, (Elaboración propia).

Tabla 4. 14 Parámetros de la simulación del diseño final, (Elaboración propia).

<b>Parámetros</b>	<b>Valores</b>
<b>Temperatura</b>	111.5°C
<b>Desplazamiento de las puntas</b>	1.47 μm por cada punta, en total son 2.94 μm
<b>Fuerza de sujeción</b>	75.968 mN

Teniendo como resultado final una micropinza que tiene una fuerza de sujeción de 75.968 mN y un desplazamiento de 1.47 μm, se observa que el desplazamiento se mantuvo pero la fuerza de reacción incrementó en un 12%, comparado con el diseño preliminar con la tercera modificación. En la Tabla 4.15 se muestra la comparación de la micropinza del diseño preliminar y la micropinza del diseño final. Teniendo como resultado un porcentaje de mejora del 0% entre la temperatura de las puntas, concluyendo que, podemos sujetar algunos objetos que tengan una característica de soportar casi 112°C. En el desplazamiento, a lo largo de este capítulo, tuvimos un porcentaje de mejora del 14% dando como resultado 1.47 μm de desplazamiento por cada punta, con una apertura inicial de 50 μm entre las puntas de los brazos de sujeción, se tiene una apertura final de 52.78 μm, lo cual nos indica que podemos sujetar objetos que se encuentren en un rango de 52.78 μm de diámetro o longitud. Con relación a la fuerza de sujeción tuvimos un porcentaje de 64% de mejora a largo de este capítulo en la fuerza de sujeción teniendo como resultado 75.96 mN

Tabla 4. 15 Comparación del diseño preliminar con el diseño final, (Elaboración propia).

Temperatura del diseño preliminar (°C)	Temperatura del diseño final (°C)	Porcentaje de mejora (%)	Desplazamiento del diseño preliminar (µm)	Desplazamiento del diseño final (µm)	Porcentaje de mejora (%)	Fuerza de sujeción del diseño preliminar (mN)	Fuerza de sujeción del diseño final (mN)	Porcentaje de mejora (%)
112	111.5	0%	1.19	1.47	14%	27.4	75.968	64%

Uno de los elementos claves para las tecnologías de microensamblaje son las micropinzas ya que los objetos que miden menos de 100 µm suelen ser frágiles y puede dañarse fácilmente durante el sujeción, y, por lo tanto, se requieren técnicas especiales de sujeción en una micropinza puede ser de mucha utilidad para estos casos. Se consideró que objetos se pueden manipular, teniendo en cuenta el material forma y tamaño, buscando en la literatura se encontró a algunos microalambres de 50µm de radio. Con la micropinza que se realizó en este trabajo de investigación podemos concluir que, estos microalambres pueden ser manipulado con ayuda de estas micropinza. (Coutinho, Sombrio, & Souza, 2018).

#### **4.9. Modificación de la magnitud de la resistividad del material**

Durante la elaboración de esta tesis hubo un cambio en la resistividad del material. Actualizamos este valor, tomado de la hoja de datos proporcionada por el proveedor del material, lo cual nos generó unos cambios en la Tabla 4.1 al considerar una resistividad de  $0.003 \Omega \cdot cm$

Se realizaron nuevamente las simulaciones correspondientes, dando como resultado en la malla un total de 19758 nodos y 8813 elementos. Para las condiciones de frontera de la temperatura se utilizó el mismo método solo que

se agregó una temperatura de 0°C en el ancla fría, se obtuvo una temperatura máxima de 123 °C con una intensidad de corriente de 2.11 mA. La distribución de temperatura se muestra en la Figura 4.38.

Las condiciones de frontera para el desplazamiento y la fuerza de reacción fueron las mismas mencionadas anteriormente, dando como resultado un desplazamiento de 1.6 μm y una fuerza de sujeción de 121 mN, a su vez el esfuerzo último fue de 116.75 MPa, lo cual no supera el esfuerzo último del silicio que es de 250 MPa (Vargas-Chable, Tecpoyotl-Torres, Robles-Casolco, & Cabello-Ruiz, 2015) en las Figuras 4.39 - 4.41 podemos observar el desplazamiento numérico, la fuerza de sujeción y el esfuerzo último de esta micropinza con la magnitud actualizada de la resistividad.

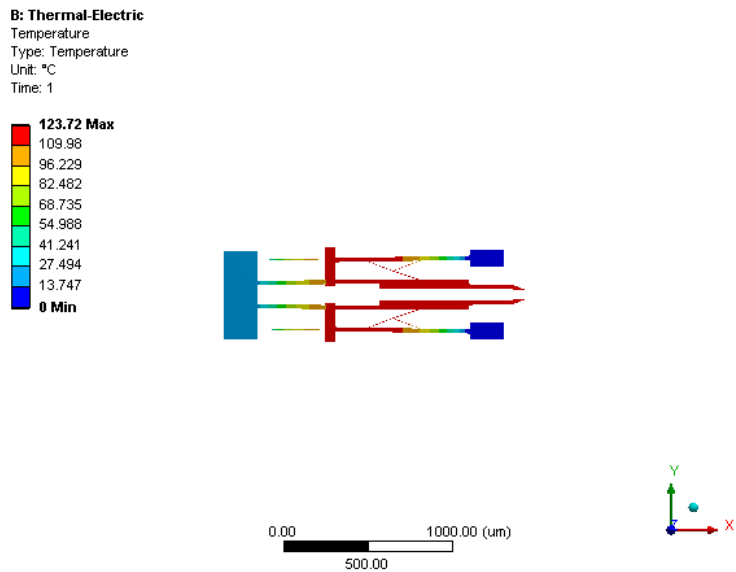


Figura 4. 38 distribución de temperatura del diseño final con la modificación del material, (Elaboración propia).



**C: Static Structural**  
Total Deformation  
Type: Total Deformation  
Unit:  $\mu\text{m}$   
Time: 1

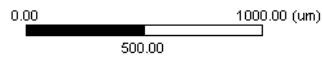
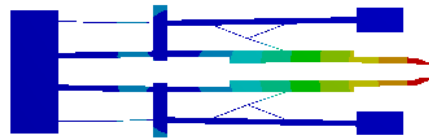
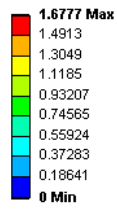


Figura 4. 39 Desplazamiento numérico del diseño final con la modificación del material, (Elaboración propia).

**D: Static Structural**  
Force Reaction

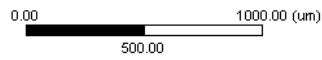


Figura 4. 40 Fuerza de sujeción del diseño final con la modificación del material (Elaboración propia).

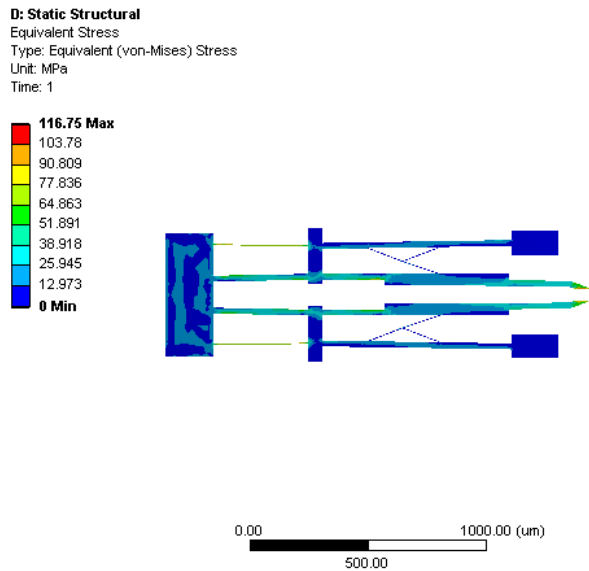


Figura 4. 41 Esfuerzo último del diseño final con la modificación del material (Elaboración propia).

En la Tabla 4.16 se muestra la comparación de las magnitudes de los parámetros de desempeño bajo consideración para el diseño final de la micropinza realizada en silicio con la resistividad anterior y actualizada.

Tabla 4. 16 comparación de la micropinza con la resistividad actualizada, (Elaboración propia).

Parámetros	Micropinza con resistividad actualizada	Micropinza con resistividad anterior	Porcentaje de mejora
Temperatura	123.72 °C	111.5°C	10%
Desplazamiento de las puntas	1.6 μm por cada punta, en total son 3.2 μm	1.47 μm por cada punta, en total son 2.78 μm	13%
Fuerza de sujeción	121 mN	75.968 mN	37%

En conclusión, podemos decir que la micropinza puede sujetar objetos con un rango de diámetro o longitud de 53.2  $\mu\text{m}$ . con un peso máximo de 12g, sin que la micropinza sobrepase el valor del esfuerzo último del silicio.

Sobre la actualización del valor de la resistividad, el porcentaje máximo de cambio corresponde a la fuerza de sujeción, y es de 37%, donde puede apreciarse la magnitud del impacto de la resistividad sobre los parámetros de desempeño.



## CAPÍTULO 5. COMPARACION CON OTRA PINZA DE LA BIBLIOGRAFIA, IMPLEMENTACION EN ALUMINIO.

En este capítulo se comparará la micropinza en silicio con otra de la literatura.

Posteriormente, se realizará su escalamiento en aluminio para comparar los resultados obtenidos mediante los métodos numéricos y experimentales.

### **5.1. Simulación de la micropinza de la bibliografía**

Para la simulación con otra micropinza de la bibliografía, se eligió la micropinza del artículo “Design enhancement of a chevron electrothermally actuated microgripper for improved gripping performance”, de los autores Pankaj Shivhare G. Uma M. Umaphthy. 2015. Esto para comparar el desempeño de la una micropinza, actuada mediante el chevrón asimétrico.

La micropinza de la literatura se implementó en Coventorware™, debido a que carecemos de esa licencia, utilizamos para su análisis a la herramienta de software ANSYS™ (Figura 5.1). Sus dimensiones se presentan en la Tabla 5.1.

El material que utilizaron en el artículo fue polisilicio, los parámetros que se utilizaron para el material se muestran en la Tabla 5.2.

*Tabla 5. 1 dimensiones de la micropinza de la bibliografía, (Pankaj , Uma, & Umaphthy, 2015).*

<b>Descripción</b>	<b>Dimensión</b>
<b>Número de brazos en una lanzadera</b>	10
<b>Ángulo de inclinación de los brazos del chevrón</b>	2.2°
<b>Longitud del brazo del chevrón</b>	400 µm
<b>Ancho del brazo del chevrón</b>	10 µm
<b>Grosor del brazo del chevrón</b>	10 µm
<b>Espacio entre los brazos del chevrón</b>	15 µm
<b>Longitud del ancla</b>	400 µm
<b>Ancho del ancla</b>	50 µm
<b>Longitud del transbordador (flecha)</b>	335 µm
<b>Ancho de la lanzadera (posterior a la flecha)</b>	50 µm
<b>Grosor de la lanzadera</b>	10 µm
<b>Longitud del brazo de sujeción</b>	870 µm
<b>Ancho del brazo de sujeción</b>	25 µm
<b>Grosor del brazo de sujeción</b>	10 µm

<b>Longitud de la punta de sujeción</b>	60 $\mu\text{m}$
<b>Ancho de la punta de sujeción</b>	25 $\mu\text{m}$
<b>Grosor de la punta de sujeción</b>	10 $\mu\text{m}$
<b>Espacio entre puntas de sujeción</b>	100 $\mu\text{m}$

**B: Thermal-Electric**  
Solution  
Time: 1. s

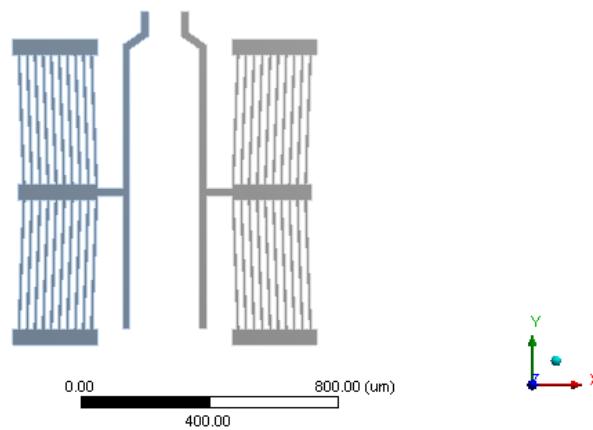


Figura 5. 1 micropinza de la bibliografía en software ANSYS, (Elaboración Propia).

Tabla 5. 2 propiedades del polisilicio, (Pankaj , Uma, & Umapathy, 2015).

<b>Propiedades del polisilicio</b>	
<b>Parámetro</b>	<b>Valor</b>
<b>Conductividad eléctrica, <math>\sigma</math>, <math>\left(\frac{\text{pS}}{\mu\text{m}}\right)</math></b>	$7.0 \times 10^{10}$
<b>Coefficiente de expansión térmica, <math>\alpha</math>, <math>\left(\frac{1}{\text{K}}\right)</math></b>	$4.7 \times 10^{-6}$
<b>Calor específico del polisilicio, <math>\left(\frac{\text{pJ}}{\text{Kg}^\circ\text{K}}\right)</math></b>	$1 \times 10^{14}$
<b>Conductividad térmica del polisilicio, <math>\kappa</math>, <math>\left(\frac{\text{pW}}{\mu\text{mK}}\right)</math></b>	$3.2 \times 10^7$
<b>Razón de Poisson, <math>\nu</math></b>	0.2

Módulo de Young, $E$ , (Pa)	160
Conductividad térmica del aire, $k$ , $\left(\frac{\text{pW}}{\mu\text{mK}}\right)$	$0.026 \times 10^6$

Considerando las condiciones de frontera del artículo, las cuales se muestran en la Figura 5.2, se procede a hacer la simulación en ANSYS, con una diferencia de potencial de 0 a 2V por similitud con nuestra aproximación. Los resultados se muestran en las Figuras 5.3 y 5.4. Los resultados se resumen en la Tabla 5.3

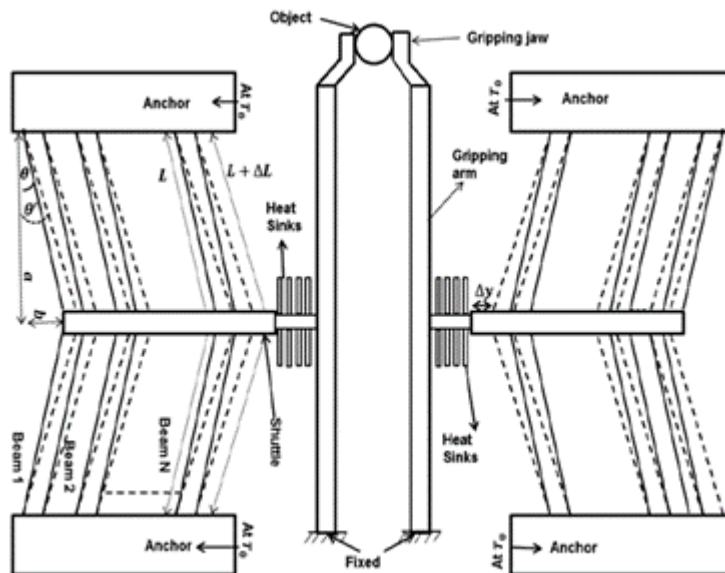


Figura 5. 2 condiciones de frontera, (Pankaj, Uma, & Umapathy, 2015).

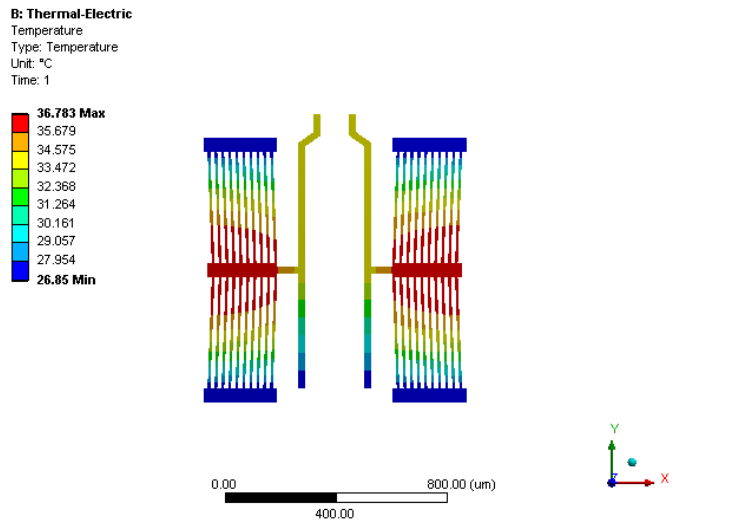


Figura 5. 3 Resultados de la distribución de temperatura para 2 V, (Elaboración propia).

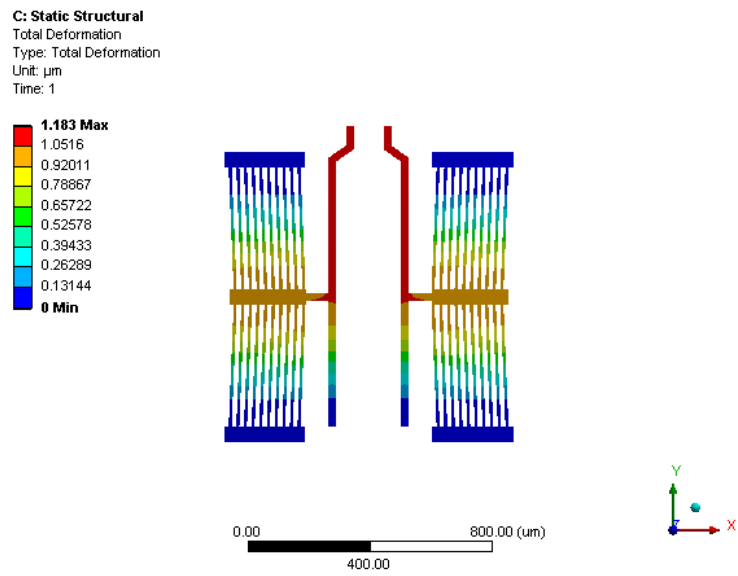


Figura 5. 4 Resultados de desplazamiento para 2 V, (Elaboración propia).

Tabla 5. 3 Resultados de la simulación en ANSYS a 2 V, de la pinza de la bibliografía, sin heat sinks (Elaboración propia)

Parámetros	Valores
Temperatura	36.72 °C



Desplazamiento en las puntas	1.183 $\mu\text{m}$
------------------------------	---------------------

## 5.2. Comparación de resultados numéricos de la micropinza reportada en la literatura con la implementación en ANSYS<sup>TM</sup>

Los autores reportan sus resultados numéricos, a los cuales, se agregaron líneas paralelas para apoyar la interpretación de la gráficas (Figuras 5.5 y 5.6). Los valores de desplazamiento y distribución de temperatura se muestran en la Tabla 5.4.

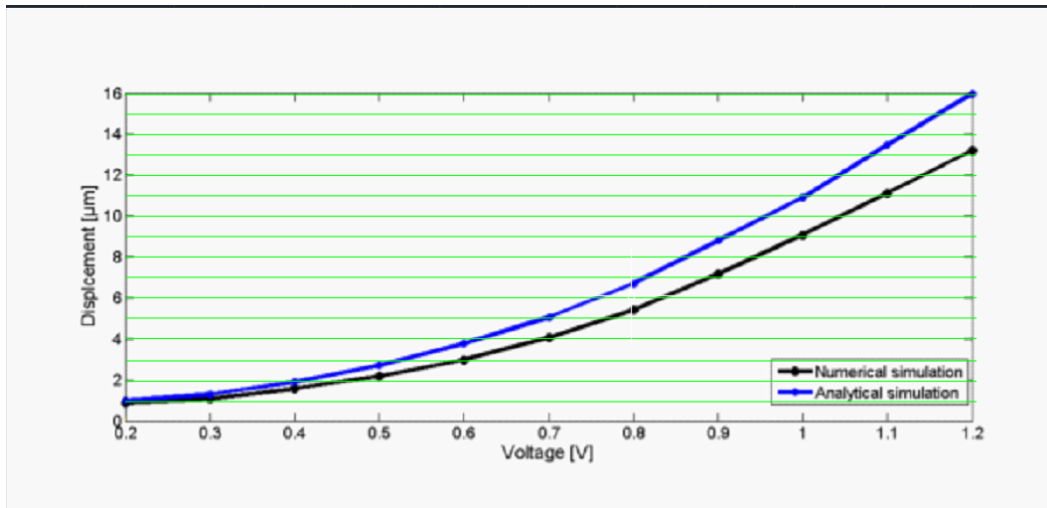


Figura 5. 5 Resultados numéricos del desplazamiento, reportados por (Pankaj , Uma, & Umapathy, 2015)

Se aprecia en la Figura 5.5, una tendencia creciente del desplazamiento con respecto al voltaje aplicado. Además, que la aproximación analítica se apega a los resultados de la simulación, con un porcentaje de error aceptable. En la Figura 5.6, se observa el incremento de la temperatura, al incrementarse los valores de voltaje, nuevamente las aproximaciones tienen la misma tendencia y un desapego aceptable.

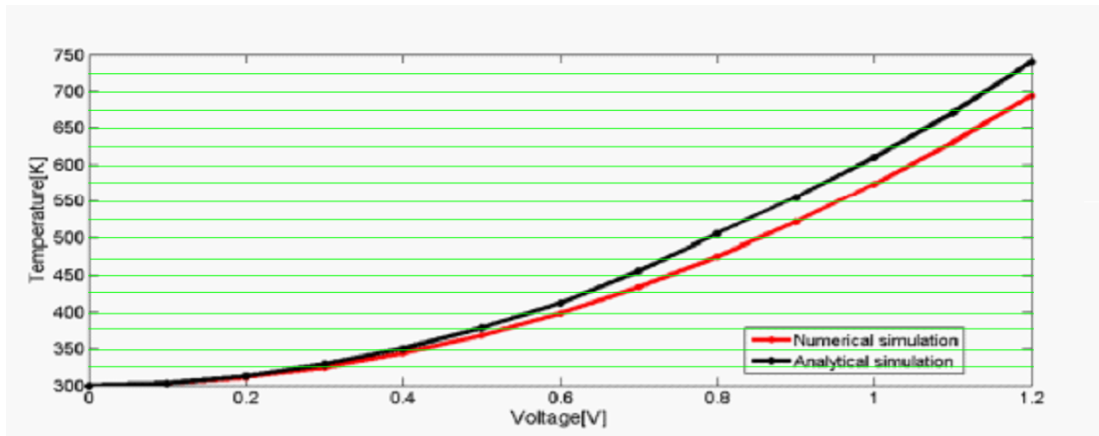


Figura 5. 6 Resultados numéricos de la distribución de temperatura, reportados por (Pankaj , Uma, & Umapathy, 2015).

Tabla 5. 4 Resultados de desplazamiento y distribución de temperatura del análisis numérico, reportados por ( Pankaj , Uma, & Umapathy, 2015).

Voltaje (V)	Desplazamiento ( $\mu\text{m}$ )	Temperatura ( $^{\circ}\text{K}$ )
0.2	1.1	308
0.3	1.4	
0.4	1.9	344
0.5	2.5	
0.6	3.5	398
0.7	4.3	
0.8	5.4	473
0.9	7.1	
1	9	573
1.1	10.5	
1.2	12.8	700

Se realizó la simulación de la micropinza mediante parametrización, desde 0.2 a 1.2 V. Los resultados se muestran en la Tabla 5.5.

Tabla 5. 5 Resultados de la parametrización de la micropinza de la bibliografía, implementada en ANSYS, (Elaboración propia).

<b>Voltaje (V)</b>	<b>Desplazamiento en <math>\mu\text{m}</math></b>	<b>Temperatura en (<math>^{\circ}\text{K}</math>)</b>
<b>0.2</b>	1.182997553	309.9325394
<b>0.3</b>	1.521518693	
<b>0.4</b>	1.995528989	340.4895691
<b>0.5</b>	2.60503362	
<b>0.6</b>	3.350027316	391.4179672
<b>0.7</b>	4.230503448	
<b>0.8</b>	5.24645731	462.7179626
<b>0.9</b>	6.397884751	
<b>1</b>	7.684783257	554.3894409
<b>1.1</b>	9.107151588	
<b>1.2</b>	10.66498809	666.4323792

El porcentaje de error entre los resultados reportados por los autores y los obtenidos en la simulación, se muestran en la Tabla 5.6 y 5.7. Se aprecia un porcentaje de error máximo para el desplazamiento del 20%. Debe mencionarse que hay algunos detalles en los valores de los parámetros repostados que pudieron contribuir a este error, además de que, en nuestro caso, se omitieron los sumideros de calor, ya que no se contó con sus dimensiones. Con relación a la distribución de temperatura, el valor del error es sólo del 5%.

La gráfica generada a partir de comparación se muestra en las Figuras 5.7 y 5.8, para desplazamiento y distribución de la temperatura, respectivamente.

Tabla 5. 6 comparación de resultados numéricos del desplazamiento, (Pankaj , Uma, & Umopathy, 2015)

<b>Voltaje (V)</b>	<b>Desplazamiento (<math>\mu\text{m}</math>) (Shivhare, Uma, &amp; M. Umapathy, 2015)</b>	<b>Desplazamiento (<math>\mu\text{m}</math>) (Elaboración propia en ANSYS™)</b>	<b>% Error</b>
<b>0.2</b>	1.1	1.182997553	7%
<b>0.3</b>	1.4	1.521518693	8%
<b>0.4</b>	1.9	1.995528989	5%
<b>0.5</b>	2.5	2.60503362	4%
<b>0.6</b>	3.5	3.350027316	4%
<b>0.7</b>	4.3	4.230503448	2%
<b>0.8</b>	5.4	5.24645731	3%
<b>0.9</b>	7.1	6.397884751	11%
<b>1</b>	9	7.684783257	17%
<b>1.1</b>	10.5	9.107151588	15%
<b>1.2</b>	12.8	10.66498809	20%

*Tabla 5. 7 Comparación de resultados de la distribución de temperatura*

<b>Voltaje (V)</b>	<b>Temperatura en (<math>^{\circ}\text{K}</math>) (Pankaj , Uma, &amp; Umapathy, 2015)</b>	<b>Temperatura en (<math>^{\circ}\text{K}</math>) (Elaboración propia)</b>	<b>% Error</b>
<b>0.2</b>	308	309.9325394	1%
<b>0.4</b>	344	340.4895691	1%
<b>0.6</b>	398	391.4179672	2%
<b>0.8</b>	473	462.7179626	2%
<b>1</b>	573	554.3894409	3%
<b>1.2</b>	700	666.4323792	5%

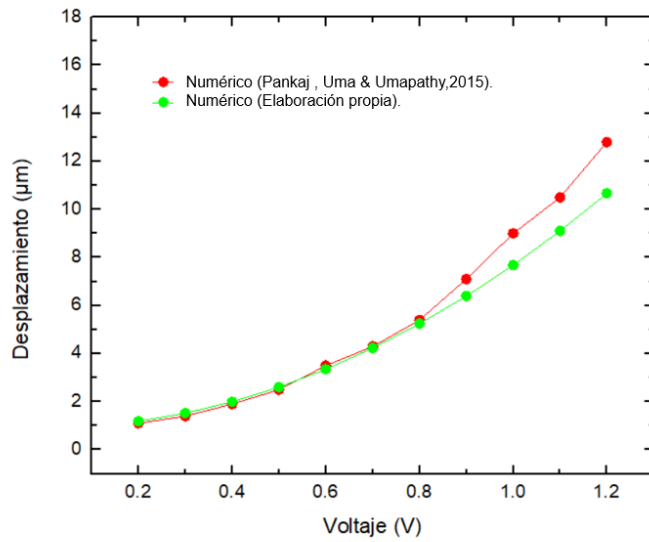


Figura 5. 7 Gráfica de los resultados de en comparación del desplazamiento, (Elaboración propia).

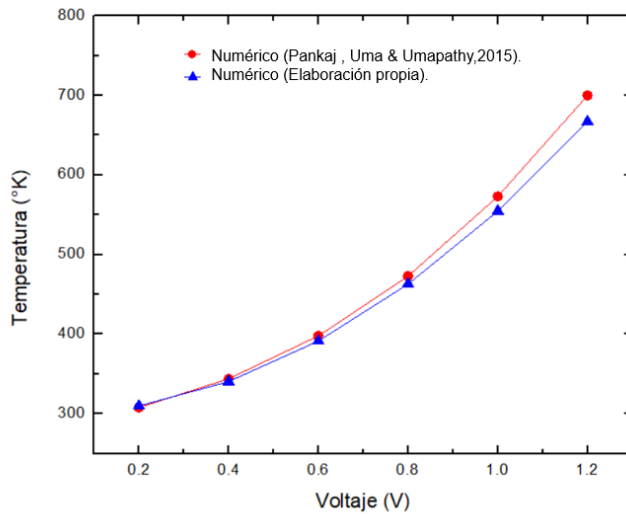


Figura 5. 8 Gráfica de los resultados de la comparación del desplazamiento, (Elaboración propia).

### 5.3. Conclusiones de la micropinza de la bibliografía

Con los resultados obtenidos, se puede observar que en comparación entre el desplazamiento tiene un porcentaje de error más grande que la

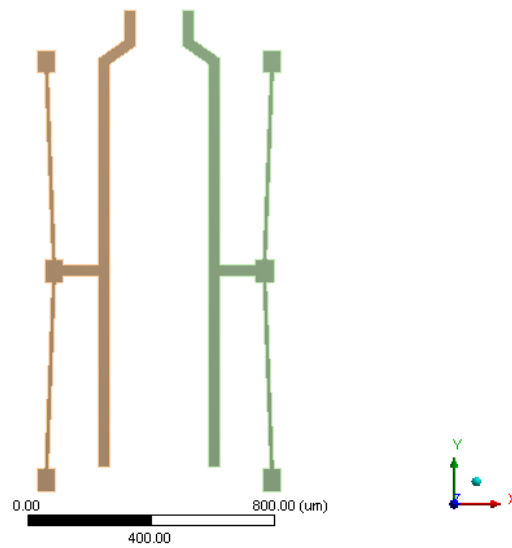
comparaciones entre la distribución de temperatura. Esto puede atribuirse a que, en el artículo se utilizó Coventorware™, el cual es otro software para análisis por elementos finitos, también influyó que los autores, no especificaron todas las dimensiones de la micropinza, por lo cual, algunas dimensiones se tuvieron que parametrizar para ver cuál era la mejor aproximación. La cercana aproximación lograda, nos permite utilizarla para poder realizar comparaciones futuras.

No se simuló la fuerza de sujeción de la micropinza por el método que utilizaron los autores, debido a que, no contamos con las características de la esfera utilizada.

#### ***5.4. Comparación entre la micropinza del artículo con la micropinza propuesta.***

Se realizó una ampliación de la micropinza de la bibliografía para tener una mayor similitud entre las dimensiones de esa micropinza, con la micropinza propuesta, también se redujo el número de brazos del chevrón para poder tener unen comparación entre el chevrón asimétrico y el chevrón simétrico. Los cambios que se hicieron a la micropinza del autor se muestran en la Figura 5.9.

**B: Thermal-Electric**  
Solution  
Time: 1. s



*Figura 5. 9 Micropinza del artículo con las modificaciones, (Elaboración propia).*

Teniendo las 2 micropinzas en condiciones adecuadas, se eligió un material y las condiciones de frontera con los cuales se compararían. Se eligió al silicio como material estructural. Las condiciones de frontera que se eligieron para la distribución de temperatura se muestran en la Figura 5.10, mientras que, para el caso del desplazamiento y la fuerza de sujeción, las condiciones de frontera se muestran en la Figura 5.11. Las simulaciones se realizaron en ANSYS™. En la Tabla 5.8 se muestra la comparación de estas 2 micropinzas.

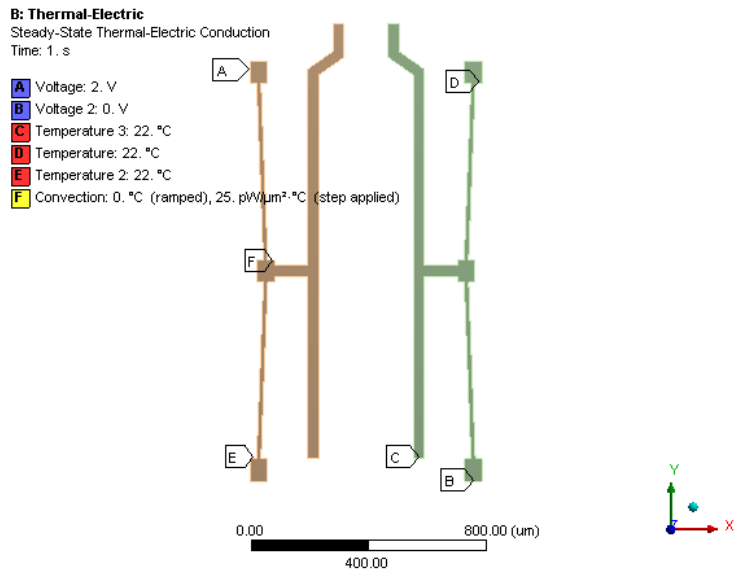


Figura 5. 10 Condiciones de frontera para la distribución de temperatura (Elaboración propia).



Figura 5. 11 Condiciones de frontera para el desplazamiento y fuerza de sujeción (Elaboración propia)



Tabla 5. 8 Comparaciones de resultados de las micropinzas (Elaboración propia).

	Micropinza basada en actuador chevrón asimétrico	Micropinza de la literatura (Pankaj, Uma, & Umapathy, 2015)	Porcentaje de mejora (%)
Temperatura (°C)	123.722	84.705	32%
Desplazamiento (µm)	1.677	0.792	53%
Fuerza de sujeción (mN)	121.728	1.445	99%
Esfuerzo último (MPa)	116.754	51.252	56%

Como se muestra en la Tabla 5.8, la temperatura de la micropinza del capítulo 4 es un 32% menor a la micropinza seleccionada en la literatura. Esto tiene mayores beneficios, ya que, al tener una temperatura más baja en las puntas de sujeción puede tenerse un rango más amplio de objetos de sujeción, ya que, algunos de ellos no se pueden sujetar si las puntas están muy calientes. El desplazamiento que tiene la micropinza de esta tesis tiene una mejora del 53%, esto debido a las modificaciones que tiene en su estructura, a su vez ayuda a ampliar el rango de dimensiones de los objetos que puede llegar a sujetar.

En la fuerza de sujeción tenemos una mejoren comparación en con la pieza del autor, casi de un 99%. Esto quiere decir que en la micropinza de esta tesis tiene la capacidad de sostener objetos más pesados.

El esfuerzo último que se tiene está dentro del rango de los parámetros del silicio, cuyo esfuerzo último es de 250 MPa.

Con los porcentajes de errores podemos decir que la micropinza impulsada por un actuador chevrón asimétrico tiene ventajas en comparación con la micropinza impulsada por un chevrón simétrico revisada.

### ***5.5. Análisis eléctrico de la micropinza.***

Se optó hacer la micropinza de la Figura 4.33 en aluminio, ya que, no se contaba con los suficientes recursos para la implementación en silicio, en el laboratorio donde se realizaron las pruebas experimentales se tuvo al alcance una lámina de aluminio 6061, con un grosor de 1.2 mm por lo cual se decidió realizar unas modificaciones de la micropinza, escalando a 100 veces su tamaño, con el grosor igual al de la lámina. La resistividad ( $\rho$ ) del Aluminio es de  $4 \times 10^{-8} \Omega \text{ m}$ .

Para el análisis eléctrico de la micropinza, se consideró a una mitad de ella (Figura 5.12), a partir de la cual, se realizó el análisis resistivo (Figura 5.13), obteniendo un circuito con 13 resistencias, con un arreglo delta ( $\Delta$ ) generado

por el arreglo de amortiguamiento, entre el brazo grueso del actuador asimétrico con el segmento de brazo Z de la punta de sujeción.

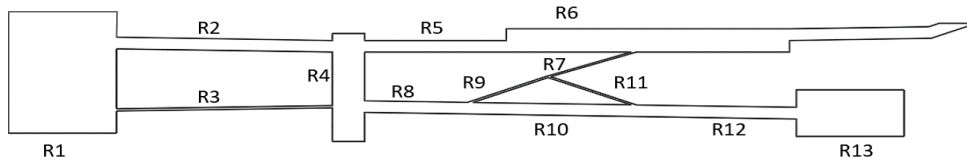


Figura 5. 12 primer segmento de la micropinza, (Elaboración propia)

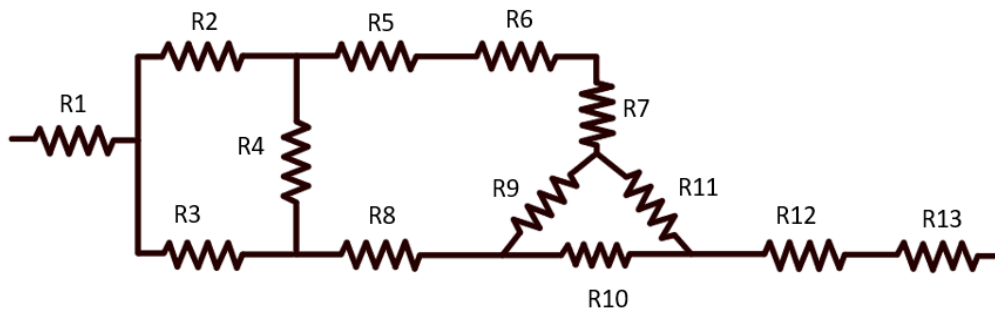


Figura 5. 13 arreglo de resistencias para la micropinza, (Elaboración propia).

Recordemos que La resistividad ( $\rho$ ) del Aluminio es de  $4 \times 10^{-8} \Omega \cdot m$ . Los valores de las 13 resistencias se muestran en la Tabla 5.9.

Tabla 5. 9 Resultados de las resistencias de la micropinza escalada, (Elaboración propia).

Resistencia	Expresión de cálculo	Valor de resistencia ( $\Omega \cdot m$ )
R1	$R = \rho \frac{0.02m}{(0.026m)(0.0012m)}$	$2.55 \times 10^{-05}$
R2	$R = \rho \frac{0.04m}{(0.0025m)(0.0012m)}$	$5.33 \times 10^{-04}$
R3		$2.67 \times 10^{-03}$

	$R = \rho \frac{0.04m}{(0.0005m)(0.0012m)}$	
<b>R4</b>	$R = \rho \frac{0.006m}{(0.02332m)(0.0012m)}$	$8.60 \times 10^{-6}$
<b>R5</b>	$R = \rho \frac{0.02625m}{(0.0025m)(0.0012m)}$	$3.50 \times 10^{-4}$
<b>R6</b>	$R = \rho \frac{0.024m}{(0.005m)(0.0012m)}$	$1.54 \times 10^{-4}$
<b>R7</b>	$R = \rho \frac{0.01673m}{(0.001m)(0.0012m)}$	$5.57 \times 10^{-4}$
<b>R8</b>	$R = \rho \frac{0.01904m}{(0.0025m)(0.0012m)}$	$2.54 \times 10^{-4}$
<b>R9</b>	$R = \rho \frac{0.01498m}{(0.001m)(0.0012m)}$	$4.99 \times 10^{-4}$
<b>R10</b>	$R = \rho \frac{0.02936m}{(0.0025m)(0.0012m)}$	$3.91 \times 10^{-4}$
<b>R11</b>	$R = \rho \frac{0.01704m}{(0.001m)(0.0012m)}$	$5.68 \times 10^{-4}$
<b>R12</b>	$R = \rho \frac{0.0269m}{(0.0025m)(0.0012m)}$	$3.95 \times 10^{-4}$
<b>R13</b>	$R = \rho \frac{0.002m}{(0.01m)(0.0012m)}$	$6.67 \times 10^{-5}$
<b>R14</b>	$R14 = \frac{(R9)(R10)}{R9 + R10 + R11}$	$1.34 \times 10^{-4}$
<b>R15</b>	$R15 = \frac{(R10)(R11)}{R9 + R10 + R11}$	$1.52 \times 10^{-4}$
<b>R16</b>	$R16 = \frac{(R9)(R11)}{R9 + R10 + R11}$	$1.94 \times 10^{-4}$
<b>R17</b>	$R17 = R5 + R6 + R7 + R16$	$1.26 \times 10^{-3}$
<b>R18</b>	$R18 = R14 + R8$	$3.88 \times 10^{-4}$
<b>R19</b>	$R19 = R12 + R13 + R15$	$6.14 \times 10^{-4}$

<b>R20</b>	$R20 = \frac{(R2 * R17) + (R2 * R4) + (R4 * R2)}{R4}$	$7.96x10^{-2}$
<b>R21</b>	$R21 = \frac{(R2 * R17) + (R2 * R4) + (R4 * R2)}{R17}$	$5.46x10^{-4}$
<b>R22</b>	$R22 = \frac{(R2 * R17) + (R2 * R4) + (R4 * R2)}{R2}$	$1.28x10^{-3}$
<b>R23</b>	$R23=R3  R21=\frac{(R3)(R21)}{R3+R21}$	$4.53x10^{-4}$
<b>R24</b>	$R24=R18  R22=\frac{(R18)(R22)}{R8+R22}$	$2.98x10^{-4}$
<b>R25</b>	$R25=R23+R4$	$7.51x10^{-4}$
<b>R26</b>	$R26=R20  R25=\frac{(R20)(R25)}{R20+R25}$	$7.44x10^{-4}$
<b>Rh</b>	$Rh=R19+R26$	$1.38x10^{-3}$
<b>RT</b>	$RT=Rh/2$	0.0006915

Teniendo los resultados de todas las resistencias, se empezó realizando el cambio del delta que se encontró en el arreglo de resistencias por el arreglo estrella, para empezar este cambio se tuvo que recurrir a las ecuaciones 5,6,7 del capítulo 2 para obtener unas resistencias resultantes las cuales son R14, R15,16 como se muestra en la Figura 5.14

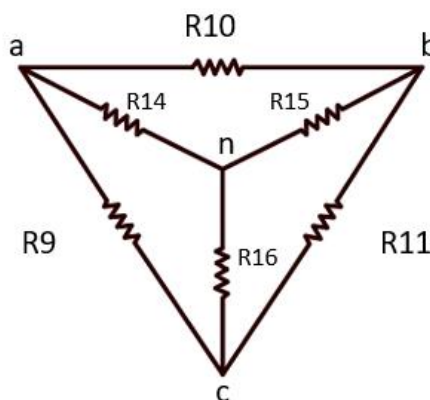


Figura 5. 14 Representación gráfica del cambio delta a estrella en el análisis eléctrico. (Elaboración propia).

$$R_{14} = \frac{(R_9)(R_{10})}{R_9 + R_{10} + R_{11}} = 1.37 \times 10^{-4} \Omega m$$

$$R_{15} = \frac{(R_{10})(R_{11})}{R_9 + R_{10} + R_{11}} = 1.51 \times 10^{-4} \Omega m$$

$$R_{16} = \frac{(R_9)(R_{11})}{R_9 + R_{10} + R_{11}} = 1.99 \times 10^{-4} \Omega m$$

Teniendo las resistencias resultantes del cambio delta a estrella podemos sustituirlo en la Figura 5.13, teniendo como resultado la Figura 5.15.

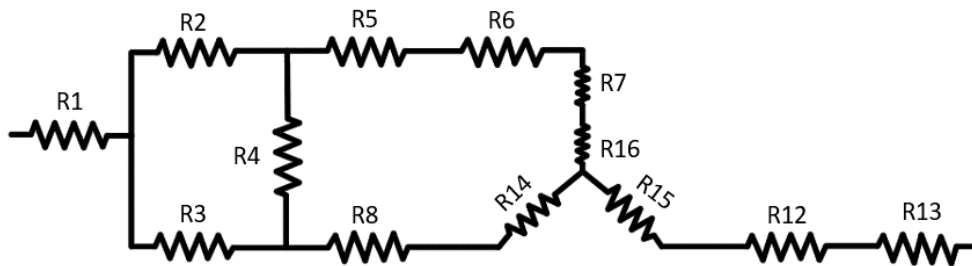


Figura 5. 15 Sustitución del cambio delta a estrella en las resistencias de la micropinza, (Elaboración propia).

La Figura 5.15 también se puede representar como la Figura 5.16.

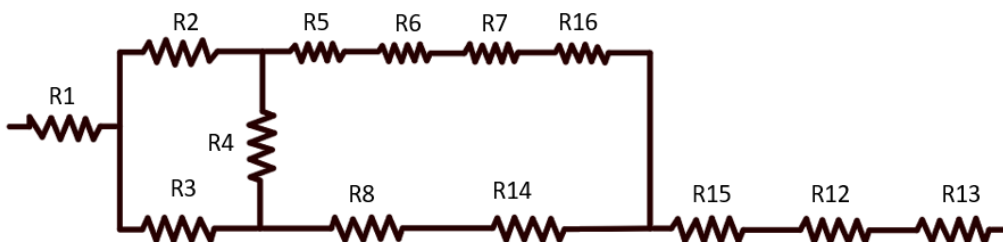


Figura 5. 16 segunda forma de representar el cambio delta a estrella en la resistencia de las micropinzas, (Elaboración propia).

Observando la Figura 5.16 podemos llegar a la conclusión que las resistencias R5, R6, R7, R16 también están en serie y su resultante le nombramos R17. Las resistencias R8, R14 están en serie y su resultante se nombra R18. Las resistencias R12, R13 y R15, están en serie, su resultante se nombra R19 con ayuda de la tabla 5.9 y la fórmula 3 del capítulo 2 se encuentran las resultantes antes mencionadas.

$$R17 = R5 + R6 + R7 + R16 = 1.26 \times 10^{-3} \Omega m$$

$$R18 = R8 + R14 = 3.88 \times 10^{-4} \Omega m$$

$$R19 = R12 + R13 + R15 = 6.14 \times 10^{-4} \Omega m$$

Teniendo las sustituciones de las resistencias que están en serie el circuito se puede simplificar a la Figura 5.17.

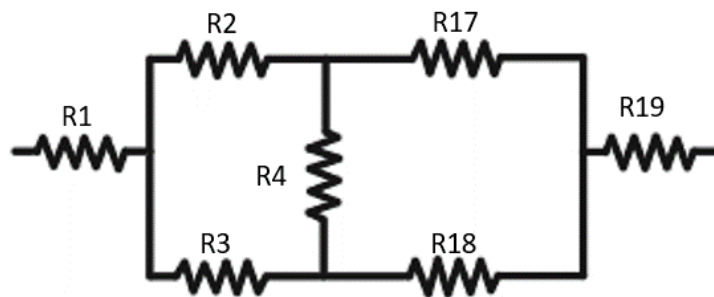


Figura 5.17 primera simplificación del circuito de la micropinza, (Elaboración propia).

1. Observando la Figura 5.17 encontramos una forma estrella entre las resistencias R2, R17 y R4, donde se sobreponen a una forma delta (Figura 5.18).

Con ayuda de las ecuaciones 9,10,11 del capítulo 2 y la tabla 5.9, podemos obtener las resistencias resultantes las cuales se nombran R20, R21, R22.

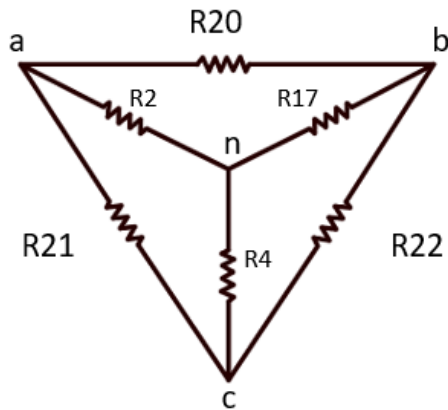


Figura 5. 18 sustitución de forma estrella delta, (Elaboración propia).

$$R_{20} = \frac{(R_2 * R_{17}) + (R_2 * R_4) + (R_4 * R_2)}{R_4} = 7.96 \times 10^{-2} \Omega * m$$

$$R_{21} = \frac{(R_2 * R_{17}) + (R_2 * R_4) + (R_4 * R_2)}{R_{17}} = 5.46 \times 10^{-4} \Omega * m$$

$$R_{22} = \frac{(R_2 * R_{17}) + (R_2 * R_4) + (R_4 * R_2)}{R_2} = 1.28 \times 10^{-3} \Omega * m$$

Simplificando el circuito obtenemos la Figura 5.19, donde se muestra el circuito ya con las resultantes del cambio estrella a delta que se realizó anteriormente.

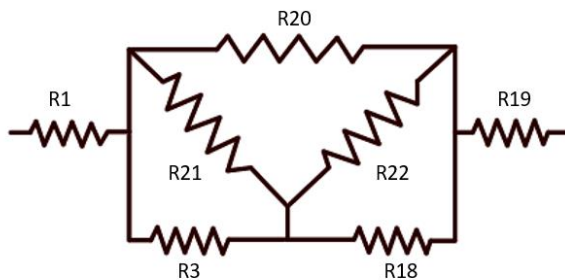




Figura 5. 19 tercera simplificación del circuito de la micropinza, (Elaboración propia).

Posteriormente en la Figura 5.19 podemos observar que R21 y R22 están en paralelo, al igual que R22 y R18, utilizando la ecuación 4 del capítulo 2, podemos deducir su resistencia equivalente, la cual la nombramos R23 y R24.

$$R23=R3||R21=\frac{(R3)(R21)}{R3+R21}=4.53x10^{-4}\Omega\cdot m$$

$$R24=R18||R22=\frac{(R8)(R22)}{R8+R22}=2.98x10^{-4}\Omega\cdot m$$

Posteriormente se observa que estas resistencias en serie entre sí y con la ecuación 3 del capítulo 2, podemos obtener su resistencia equivalente, la cual se nombra R25 como se muestra en la imagen 5.20a.

$$R25=R23+R4=7.51x10^{-4}\Omega\cdot m$$

simplificamos el circuito observa que la resistencia R25 está en paralelo con R20 (Figura 5.20a) y con la ecuación 4 del capítulo 2 se puede resolver, teniendo una resistencia resultante llamada R26 como se muestra en la figura 5.20b.

$$R26=R20||R25=\frac{(R20)(R25)}{R20+R25}=7.44x10^{-4}\Omega\cdot m$$

Teniendo como resultado una resistencia total del primer segmento (Figura 5.20c), la cual es una resistencia en serie de R1, R26 Y R19, las cuales con la ecuación 3 del capítulo 2 tenemos la resistencia total para el primer segmento y se nombra Rh.

$$Rh=R19+R26=1.38x10^{-3}\Omega\cdot m$$

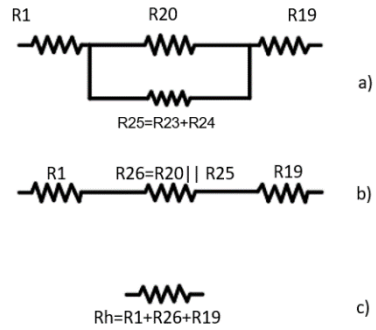


Figura 5. 20 cuarta simplificación del circuito de la micropinza, (Elaboración propia).

Para resolver el circuito completo de los dos segmentos, observamos que el primer segmento está en paralelo con el segundo segmento, por lo cual suponemos que  $R_{h1}=R_{h2}$  y a su vez la resistencia total de la micropinza se da en el paralelo de  $R_{h1}$  y  $R_{h2}$  lo cual se resuelve con la ecuación 4 del capítulo 2 y se nombra  $R_t$ .

$$R_t = \frac{1}{\frac{1}{R_{h1}} + \frac{1}{R_{h2}}} = 0.0006915 \Omega \cdot m$$

$$\begin{aligned}
R_T &= \frac{R_h}{2} = \frac{R_1 + R_{19} + R_{26}}{2} = \frac{R_1 + R_{12} + R_{13} + R_{15} + R_{20} || R_{25}}{2} \\
&= \frac{R_1 + R_{12} + R_{13} + \frac{R_{10}R_{11}}{R_9 + R_{10} + R_{11}}}{2} + \frac{\left(\frac{num1}{R_4}\right) ([R_{23} + R_{24}])}{2 \left[\frac{num1}{R_4} + R_{23} + R_{24}\right]} \\
&= \frac{R_1 + R_{12} + R_{13} + \frac{R_{10}R_{11}}{R_9 + R_{10} + R_{11}}}{2} + \frac{\left(\frac{num1}{R_4}\right) \left[\frac{R_3R_{21}}{R_3 + R_{21}} + \frac{R_{18}R_{22}}{R_{18} + R_{22}}\right]}{2 \left[\frac{num1}{R_4} + \frac{R_3R_{21}}{R_3 + R_{21}} + \frac{R_{18}R_{22}}{R_{18} + R_{22}}\right]} \\
&= \frac{R_1 + R_{12} + R_{13} + \frac{R_{10}R_{11}}{R_9 + R_{10} + R_{11}}}{2} + \frac{\left(\frac{num1}{R_4}\right) \left[\frac{R_3 \left(\frac{num1}{R_{17}}\right)}{R_3 + \frac{num1}{R_{17}}} + \frac{(R_8 + R_{14}) \frac{num1}{R_2}}{R_8 + R_{14} + \frac{num1}{R_2}}\right]}{2 \left[\frac{num1}{R_4} + \frac{R_3 \frac{num1}{R_{17}}}{R_3 + \frac{num1}{R_{17}}} + \frac{(R_8 + R_{14}) \frac{num1}{R_2}}{R_8 + R_{14} + \frac{num1}{R_2}}\right]} \\
&= \frac{R_1 + R_{12} + R_{13} + \frac{R_{10}R_{11}}{R_9 + R_{10} + R_{11}}}{2} \\
&+ \frac{\left(\frac{num1}{R_4}\right) \left[ \frac{\left(\frac{R_3}{R_5 + R_6 + R_7 + \frac{R_9R_{11}}{R_9 + R_{10} + R_{11}}}\right)}{R_3 + \frac{num1}{R_5 + R_6 + R_7 + \frac{R_9R_{11}}{R_9 + R_{10} + R_{11}}}} + \frac{\left(R_8 + \frac{R_9R_{10}}{R_9 + R_{10} + R_{11}}\right) \frac{1}{R_2}}{R_8 + \frac{R_9R_{10}}{R_9 + R_{10} + R_{11}} + \frac{num1}{R_2}} \right]}{2 \left[ \frac{1}{R_4} + \frac{\left(\frac{R_3}{R_5 + R_6 + R_7 + \frac{R_9R_{11}}{R_9 + R_{10} + R_{11}}}\right)}{R_3 + \frac{num1}{R_5 + R_6 + R_7 + \frac{R_9R_{11}}{R_9 + R_{10} + R_{11}}}} + \frac{\left(R_8 + \frac{R_9R_{10}}{R_9 + R_{10} + R_{11}}\right) \frac{1}{R_2}}{R_8 + \frac{R_9R_{10}}{R_9 + R_{10} + R_{11}} + \frac{num1}{R_2}} \right]}
\end{aligned}$$

con:

$$num1 = \frac{(R_2 + R_4) \left(R_5 + R_6 + R_7 + \frac{R_9R_{11}}{R_9 + R_{10} + R_{11}}\right) + R_2R_4}{R_4}$$

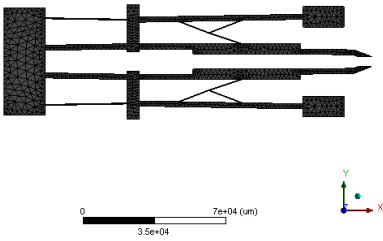
Posteriormente, se utiliza la ecuación 2 del capítulo 2, la cual es la ecuación de la Ley de Ohm para calcular la intensidad de corriente, conocemos la resistencia total de la micropinza y se elige un voltaje de 0.090 V, para calcular la intensidad de corriente:

$$I = \frac{0.090 \text{ v}}{0.0006915 \ \Omega \text{ m}} = 130.14 \text{ A}$$

### 5.6. Análisis eléctrico de la micropinza en el software ANSYS.

Para la simulación del mallado se decidió tener un refinamiento en la cara frontal de la micropinza la cual nos arrojó los resultados de la Tabla 5.10.

Tabla 5. 10 Resultados del mallado de la micropinza, (Elaboración propia).

	<b>Nodos: 24373</b>
	<b>Elementos:10625</b>

Para las condiciones de frontera de la intensidad de corriente se tuvo que poner una diferencia de temperatura, ya que el ancla que está a tierra tiene una temperatura ambiente la cual viene por default en el programa (22°C) y en el ancla que tiene la alimentación en este caso de 0.090 V, se toma como 162.1°C como se muestra en el análisis experimental de la temperatura máxima. Las condiciones de frontera para el análisis numérico de la intensidad de corriente se muestran en la Figura 5.21.

**E: Thermal-Electric**  
Steady-State Thermal-Electric Conduction  
Time: 1. s

- A** Temperature 2: 162.1 °C
- B** Temperature: 0. °C
- C** Voltage: 0. V
- D** Voltage 2: 9.e-002 V

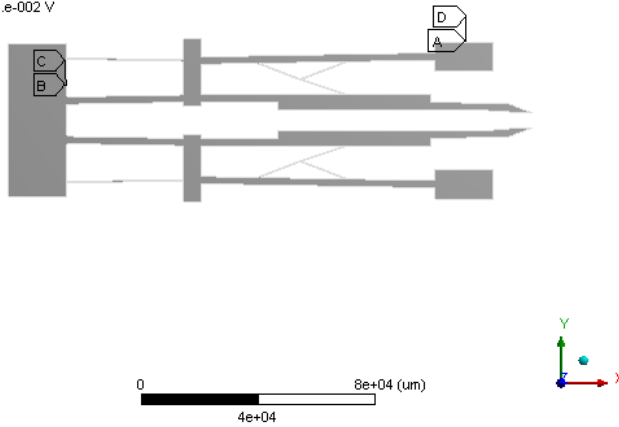


Figura 5. 21 Condiciones de frontera de la intensidad de corriente con el método numérico, (Elaboración propia).

Los resultados numéricos de la intensidad de corriente se muestran en la Tabla 5.11 y en la Tabla 5.12 se muestra en comparación con los resultados analíticos y los resultados numéricos.

Tabla 5. 11 Intensidad de corriente análisis numérico, (Elaboración propia).

<p><b>B: Thermal-Electric</b> Reaction Probe</p>	<p><b>Intensidad de corriente numérico:</b></p> <p><b>122 A.</b></p>
--	--

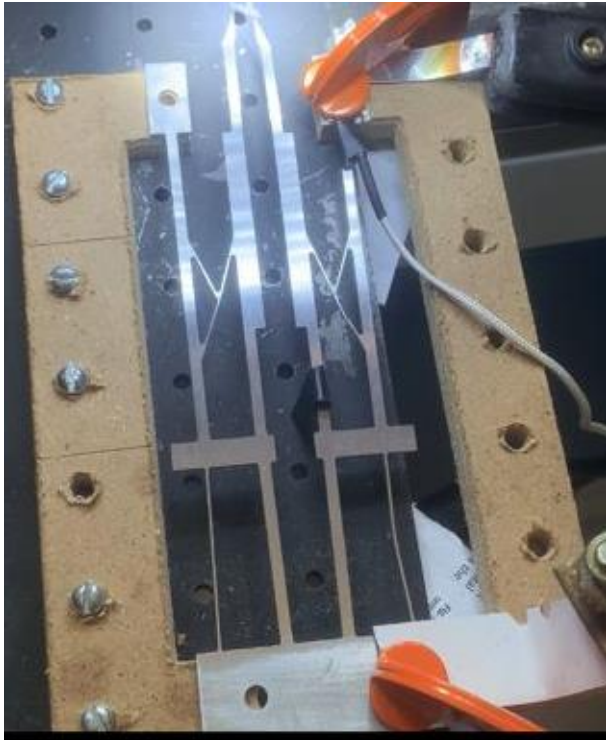
Tabla 5. 12 Comparación de la intensidad de corriente entre el análisis analítico y simulado, (Elaboración propia).

Intensidad de corriente, del cálculo analítico (A)	Intensidad de corriente, del cálculo numérico (A)	Porcentaje de error (%)
138	122	7%

los resultados de la Tabla 5.2, podemos concluir que el porcentaje de error es relativamente bajo, por lo que, se puede decir que la caracterización del análisis analítico de la intensidad de corriente es adecuada.

### **5.7, Análisis experimental de la implementación en Aluminio**

Posterior a las modificaciones que se realizaron a la micropinza para el para el cálculo analítico de la intensidad de corriente, se fabricó la pieza en un torno CNC y se realizó una base de un material aislante para poder sujetar la pinza, como se muestra en la Figura 5.22.



*Figura 5. 22 Base de la micropinza con material aislante, (Elaboración propia).*

Para la elaboración de las pruebas experimentales en el laboratorio se contaron con diferentes instrumentos, los cuales se muestran en la Figura 5.23. Los resultados se representan en la Tabla 5.13.



Figura 5. 23 instrumentos para la elaboración de las pruebas experimentales, (Elaboración propia).

Tabla 5. 13 simbología para la elaboración de las pruebas experimentales, (Elaboración propia).

Símbolo	Instrumentos
1	Alimentación (soldadora)
2	Amperímetro de gancho
3	Microscopio electrónico
4	Monitor
5	Cronometro
6	Base con la micropinza
7	Sujetadores
8	Cámara termográfica

Para el análisis experimental teniendo la base de la micropinza y la micropinza maquinada en el CNC, se procedió a colocar los sujetadores (2) con un extremo

en la base del microscopio y otro extremó en la micropinza colocada en su base de material aislante como se muestra en la Figura 5.22.

Después, se colocaron la alimentación en las anclas de la micropinza teniendo en cuenta cual era el cable de tierra y cual otro era el cable de corriente, la alimentación se colocó con la magnitud de la corriente más pequeña que se puede tener en la fuente de alimentación, la cual fue de 35 A.

Con el amperímetro de gancho y la cámara termográfica se pudo medir la temperatura en el ancla, de las puntas de sujeción y de la flecha. Con la micropinza ya colocada en su base en el microscopio, como se muestra en la Figura 5.24, se procedió a encender el microscopio y conectar el monitor al microscopio. Cuando se encendió la fuente de alimentación, se puso en marcha el cronómetro, para determinar el tiempo en que llega a su temperatura máxima y conocer el desplazamiento en las puntas de la micropinza.

Con la prueba experimental podemos concluir que la temperatura final que se alcanzó en el ancla donde tenía la alimentación, fue de 162.1°C, al igual que las puntas de sujeción, a su vez la flecha llegó a su temperatura máxima de 66.5°C, las cuales se pueden visualizar en la Figura 5.25

El desplazamiento que se alcanzó fue de 2.5 mm, en cada punta, como se muestra en la Figura 5.26. Debido a que la apertura inicial es de 5mm, y el desplazamiento entre ambas puntas es de 5mm, se obtiene una apertura final de 10mm.

Las temperaturas y el desplazamiento máximos de las puntas se alcanzaron en un tiempo de 1 min 20 segundos.



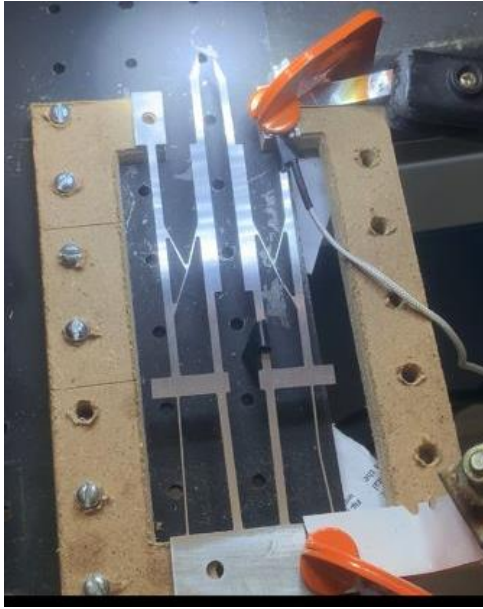


Figura 5. 24 sujeción de la micropinza en la base del microscopio, (Elaboración propia).



Figura 5. 25 Distribución de temperatura del análisis experimental, (Elaboración propia).

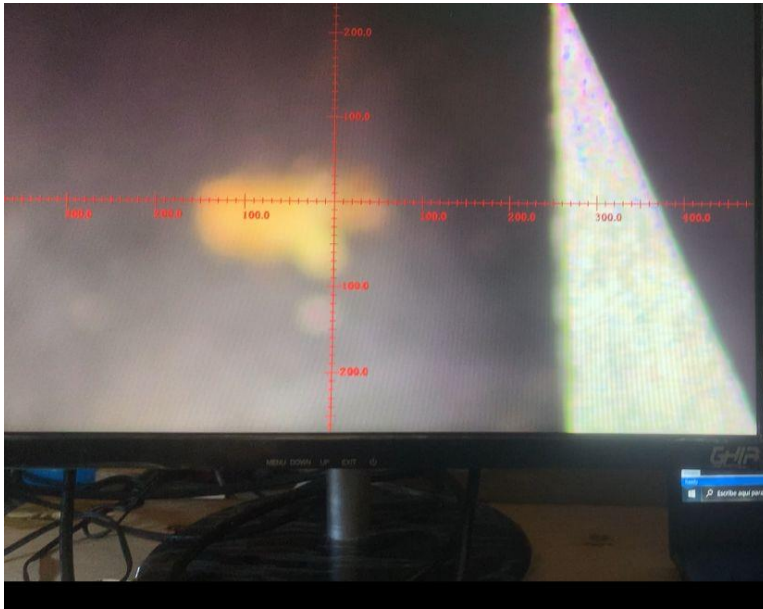


Figura 5. 26 Desplazamiento de la implementación en Aluminio, (Elaboración propia).

En la Figura 5.27 se muestra la gráfica de la distribución de temperatura de las puntas de sujeción conforme pasa el tiempo, donde puede apreciarse un comportamiento creciente cuasilineal, después de 40 s aproximadamente, lo cual se asume se debe al tiempo requerido para el calentamiento necesario. En la Figura 5.28 se muestra la distribución de temperatura en el ancla caliente en función del tiempo, donde se aprecia un comportamiento lineal a trozos, dividido claramente en tres secciones, después de 40 s, la línea muestra una pendiente más baja, pudiendo ser debido a que se tiene una distribución a lo largo de la pinza. En la Figura 5.29 se muestra la gráfica de la distribución de temperatura de la flecha través del tiempo, donde se aprecia nuevamente una linealidad a trozos, en 5 segmentos bien definidos, con un apego a la tendencia de incremento observada en el ancla. En la Figura 5.30 se muestra el desplazamiento, que se fue obteniendo también en función del tiempo, donde nuevamente se observa una gráfica lineal a trozos, con 5 segmentos definidos, donde entre 60 y 70 s se aprecia un comportamiento similar al de la flecha. En todos los casos, las gráficas muestran comportamientos crecientes.

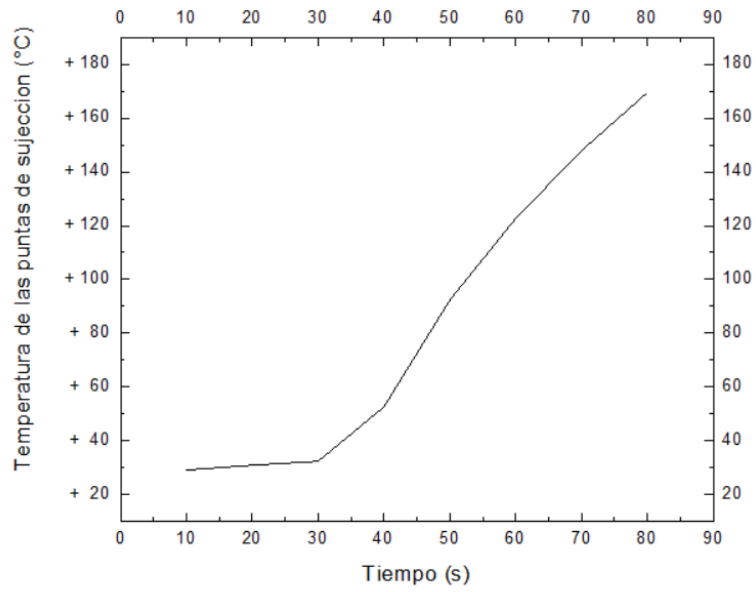


Figura 5. 27 Distribución de temperatura de las puntas de sujeción, (Elaboración propia).

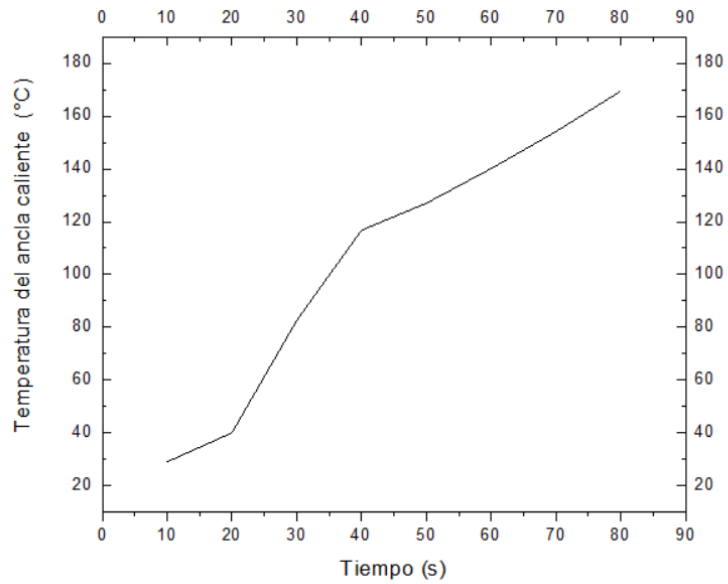


Figura 5. 28 distribución de temperatura del ancla caliente, (Elaboración propia).

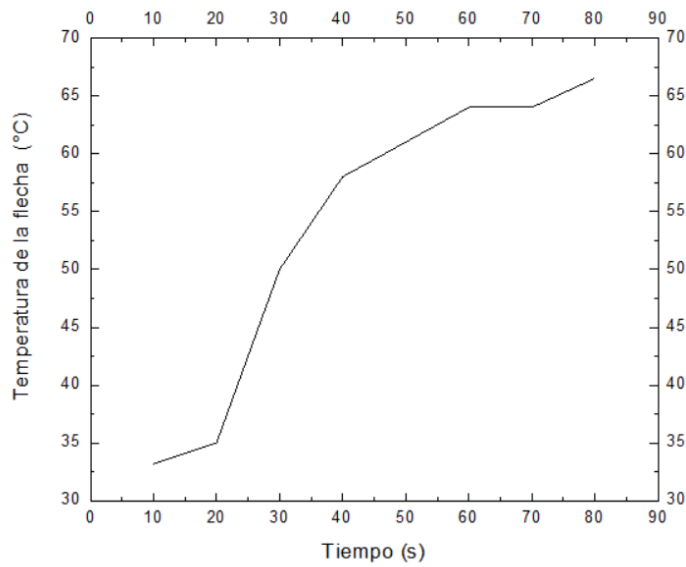


Figura 5. 29 distribución de temperatura de la flecha, (Elaboración propia).

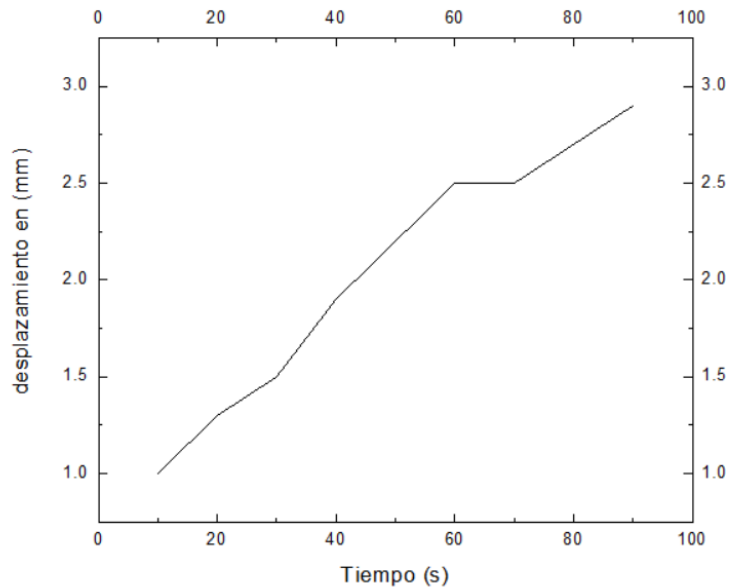
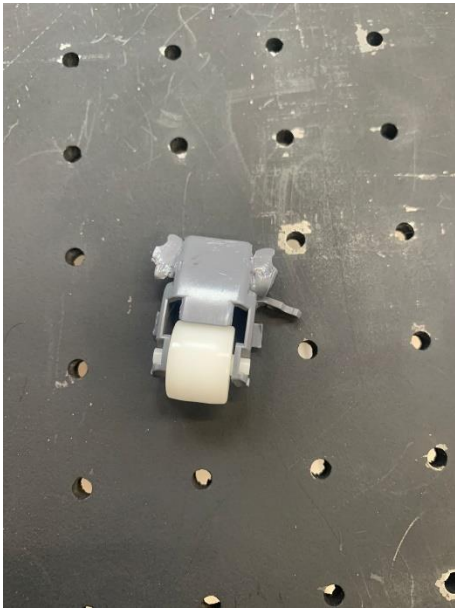


Figura 5. 30 Desplazamiento de la implementación en Aluminio, (Elaboración propia).

Los resultados experimentales nos muestran una temperatura máxima de 162.1°C, la cual está situada en las puntas del brazo de sujeción y en el ancla caliente, la flecha tuvo una temperatura máxima de 66.5°C, a su vez nos muestra un desplazamiento de 2.5 mm en la punta de sujeción analizada, y se puede apreciar en la Figura 5.26.

El análisis de la fuerza de sujeción de la micropinza se hizo con ayuda de una polea, la cual es mostrada en la Figura 5.31.



*Figura 5. 31 rodamiento para el análisis de fuerza (Elaboración propia).*

Teniendo la polea, el primer paso fue colocar la pinza sobre su base de material asistente y la polea en la base del microscopio, como se muestra en la Figura 5.32, para después colocar un hilo en una punta de la pinza, y el otro extremo del hilo la masa, para calcular la fuerza de la micropinza.



Figura 5. 32 sujeción de polea y micropinza en la base del microscopio, (Elaboración propia).

Para cálculo de la fuerza de sujeción se decidió utilizar la fórmula de la fuerza ya que la fricción se desprecia, porque es casi nula y muy difícil de calcular, la magnitud de la aceleración que se utilizó es  $9.81 \frac{N}{kg}$ , (CHAUVEAU, BLONDY, POTHIER, & CRUNTEANU, 2006) la fórmula que se utilizó está representada en la ecuación 8.

( 8)

$$F = ma$$

donde

F es la fuerza, (N), M es masa, (kg) y  $a$  es la aceleración,  $\left(\frac{N}{kg}\right)$ .

para obtener la masa de los objetos que se sostenían en el hilo se realizó pesando los objetos en una báscula, la cual es mostrada en la Figura 5.33. La masa se determina en gramos.



Figura 5. 33 báscula para análisis de fuerza de sujeción, (Elaboración propia)

Teniendo la masa de los objetos, se procede a colocarlos en el extremo del hilo, a través de la polea, para reducir fricción, y se alimenta a la pinza, lo cual se ilustra en la Figura 5.32. Los resultados se resumen en la Tabla 5.14, donde se muestra la masa en gramos, kilogramos, el desplazamiento con la masa y la fuerza de sujeción. El desplazamiento es un indicador de que la punta está soportando el peso de la masa. Puede observarse en la Tabla 5.14 que, la pinza soportó a todos los objetos analizados, el último objeto muestra que la linealidad ya tenía un crecimiento menor. No se realizaron más mediciones, debido que las condiciones de alimentación requieren de tiempos prolongados para la recuperación de las condiciones iniciales.

Tabla 5. 14 Resultados del desplazamiento con masa de la implantación en Aluminio, (Elaboración propia).


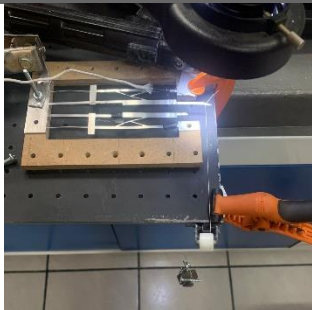
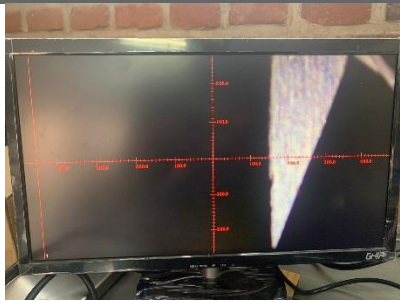



<b>Peso, (g)</b>	<b>Peso, (kg)</b>	<b>Desplazamiento con masa, (mm)</b>	<b>Fuerza, (N)</b>	
<b>0</b>	0	2.5	0	
<b>64.1</b>	0.064	1.7	0.62784	
<b>94.816</b>	0.094	1.3	0.92214	
<b>124.5</b>	0.124	1.1	1.21644	



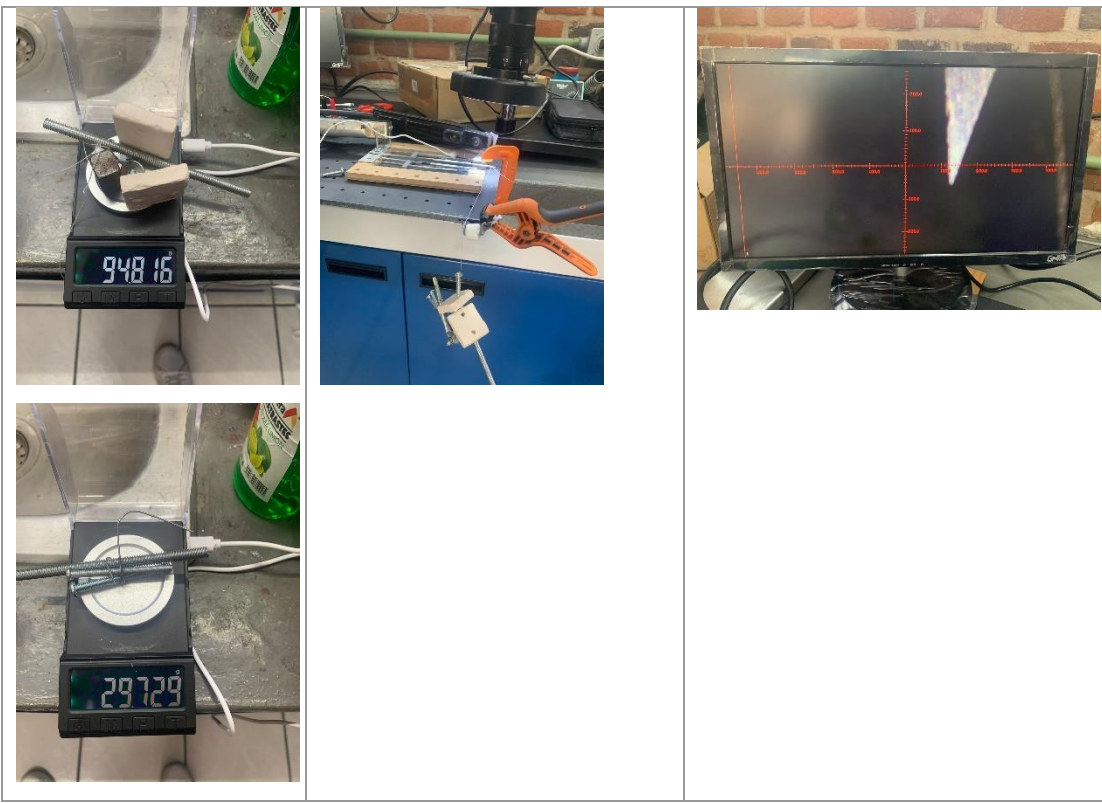
<b>154.5</b>	0.167	1	1.63827	
<b>188.2</b>	0.197	0.8	1.93257	
<b>287.9</b>	0.297	0.5	2.91357	

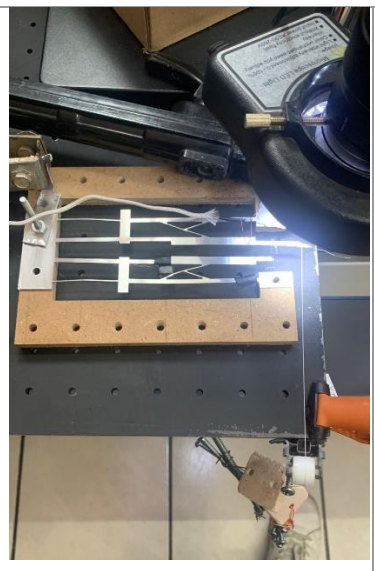
En la Tabla 5.15 se muestra la masa que se colocó en la micropinza y desplazamiento de la micropinza

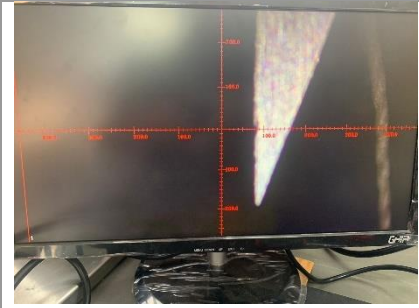
*Tabla 5. 15 Desplazamiento con peso de la implementación en Aluminio, (Elaboración propia).*

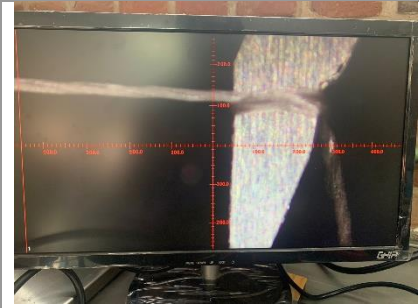
<b>Masa en gramos</b>	<b>Masa suspendida en una de las puntas de la pinza</b>	<b>Desplazamiento, (mm)</b>
		
		











En la Tabla 5.14 y 5.15, se puede observar que la pinza soporta un peso de 287.9 g, por lo cual, con la ecuación 8 del capítulo 4 podemos llegar a la conclusión que tiene una fuerza de 2.82N por cada brazo, soportando este peso, se puede observar que su desplazamiento fue de 0.5 mm como se muestra al final de la Tabla 5.15.

### **5.8. Análisis numérico de la implementación en Aluminio**

Los resultados numéricos se llevaron a cabo en el software ANSYS, para esto la micropinza de la Figura 4.33. se tuvo que hacer una ampliación a 100 veces modificando su tamaño como se realizó para el análisis de la intensidad de corriente, esto para hacer más sencillo el análisis experimental. Continuamente en el software se agregó un “Thermal-Electric” y dos “static structural” en el árbol de la página principal de ANSYS, posteriormente se implementa el material de la Tabla 5.16 en el “engineer data” del “Thermal-Electric”.

Dentro del “setup” del “Thermal-Electric” se selecciona el material implementado para su simulación, luego se seleccionó el mallado dándole un refinado en la cara frontal de la micropinza teniendo un total de 24373 nodos y 10625 elementos, para las condiciones de frontera de la distribución de temperatura se tomó en cuenta la temperatura ambiente en las dos anclas la cual viene por default en el programa y es de 22°C. También se colocó una diferencia de potencial de 0 - 0.090V, como se realizó en el análisis eléctrico. Las condiciones de frontera para el análisis de la distribución de temperatura se ilustran en la Figura 5.34.

Para las condiciones de frontera del desplazamiento, sólo fueron los soportes fijos en cada una de las anclas lo cual se muestra en la Figura 5.35. Los resultados obtenidos de la simulación para el cálculo de la distribución de temperatura y el desplazamiento se muestran en las Figuras 5.36 y 5.37,

Para la fuerza de sujeción se implementó una fuerza en ANSYS, se seleccionó a 0.26 N, dando como resultado un desplazamiento de 1.7 mm lo cual se

puede observar en la Tabla 5.15. Teniendo la fuerza se implementa en el software ANSYS para después simular el desplazamiento, ya con la fuerza ejercida y poder comparar los resultados experimentales con los numéricos. Para las condiciones de frontera para el desplazamiento con la fuerza se muestran en la Figura 5.38, en la cual se muestra los fix support en las anclas y una fuerza en una punta de sujeción en dirección Y. El resultado para el análisis numérico del desplazamiento con peso fue de 1.03 mm como se muestra en la Figura 5.39. Los resultados del cálculo numérico están representados mediante la Tabla 5.15.

En la Tabla 5.18, 5.19 y 5.20 se muestra la comparación de los resultados experimentales con los resultados numéricos realizados en ANSYS.

*Tabla 5. 16 Tabla de propiedades para el Aluminio 6061, (Aravind, Ramesh, Ramya, Praveenkumar, & Kalaiarasi, 2016).*

<b>Descripción</b>	<b>Símbolo</b>	<b>Unidad</b>	<b>Valor</b>
<b>Densidad</b>	$\rho$	(kg/m <sup>3</sup> )	2710
<b>Módulo de Young</b>	E	(GPa)	68
<b>Coefficiente de expansión térmica</b>	$\alpha$	(1/K)	$2.33 \times 10^{-5}$
<b>Conductividad térmica</b>	$\kappa$	(W/ m·K)	160
<b>Razón de Poisson</b>	$\nu$		0.33
<b>Resistividad</b>	$\rho$	( $\Omega \cdot m$ )	$4 \times 10^{-8}$

**E: Thermal-Electric**  
Steady-State Thermal-Electric Conduction  
Time: 1. s

- A** Temperature: 22. °C
- B** Voltage: 0. V
- C** Voltage 2. 9.e-002 V

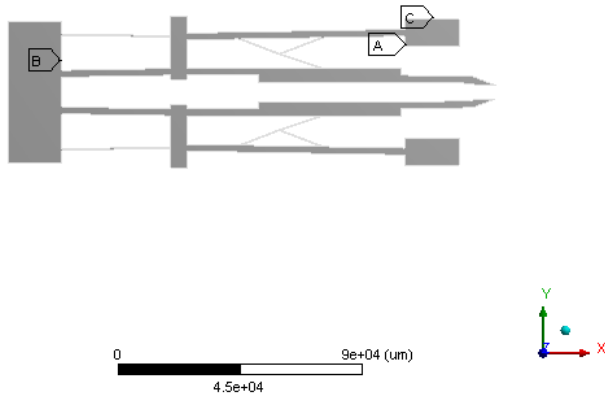


Figura 5. 34 Condiciones de frontera para la distribución de temperatura en Aluminio, (Elaboración propia).

**B: Static Structural**  
Static Structural  
Time: 1, s  
**A** Fixed Support  
**B** Fixed Support 2

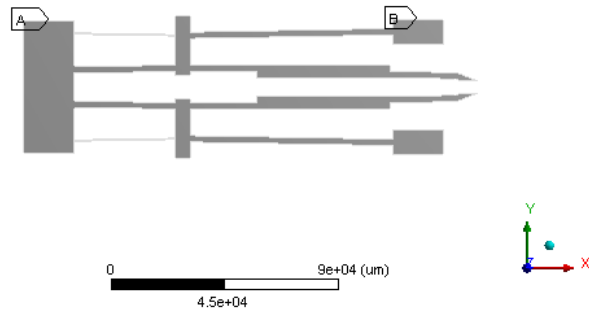


Figura 5. 35 Condiciones de frontera para el desplazamiento en Aluminio, (Elaboración propia).

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

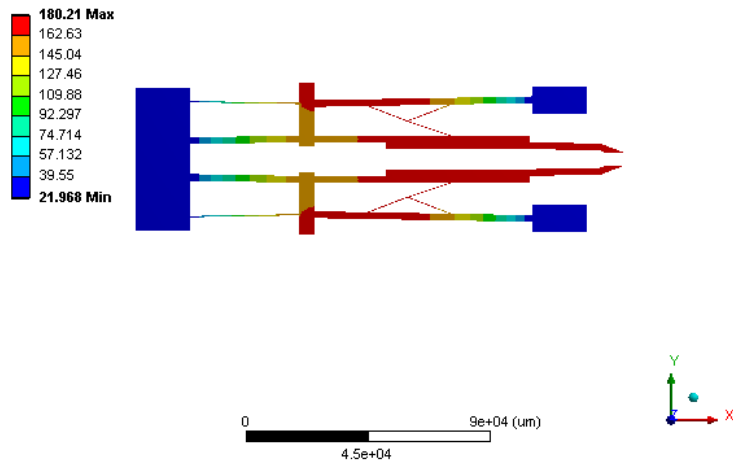


Figura 5. 36 Resultados de la distribución de temperatura en Aluminio, (Elaboración propia).



F: Static Structural  
Total Deformation  
Type: Total Deformation  
Unit:  $\mu\text{m}$   
Time: 1

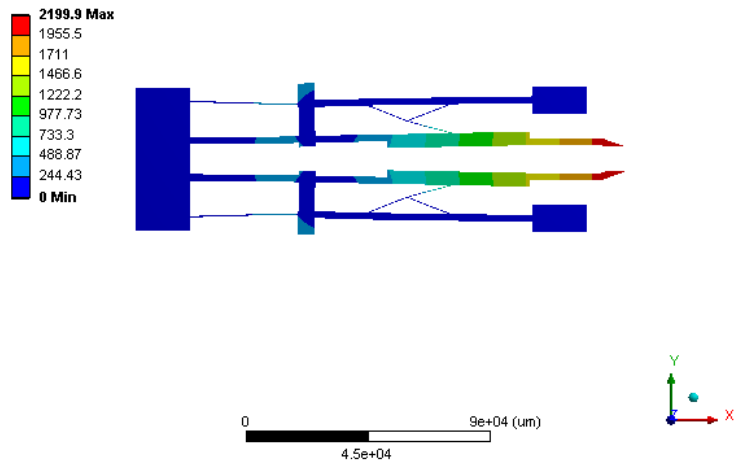


Figura 5. 37 Resultados del desplazamiento en Aluminio, (Elaboración propia).

F: Static Structural  
Static Structural  
Time: 1. s

- A Force: 0.62 N
- B Fixed Support
- C Fixed Support 2

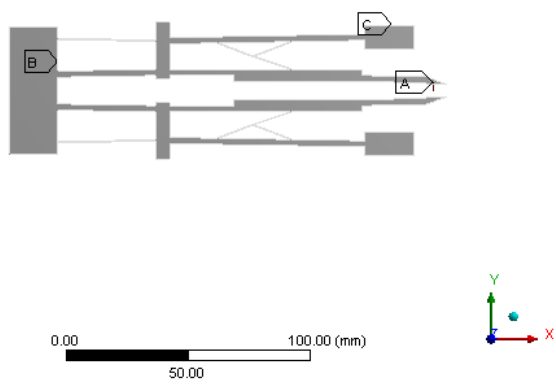


Figura 5. 38 Condiciones de frontera para el desplazamiento con peso, (Elaboración propia).

F: Static Structural  
 Directional Deformation  
 Type: Directional Deformation(Y Axis)  
 Unit:  $\mu\text{m}$   
 Global Coordinate System  
 Time: 1

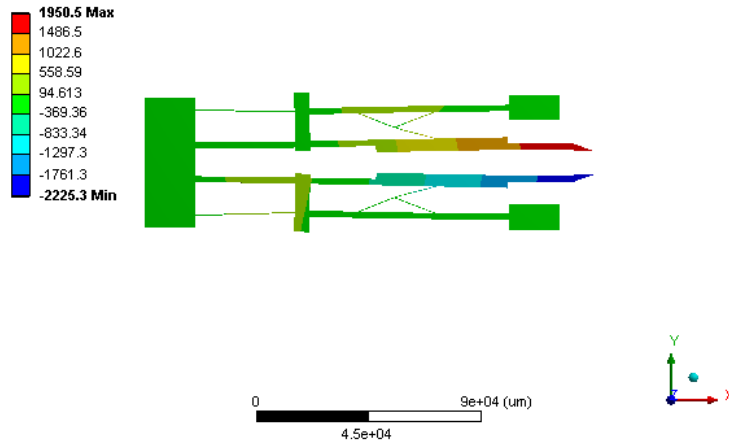


Figura 5. 39 Desplazamiento de la micropinza con peso, (Elaboración propia).

Tabla 5. 17 Resultados numéricos de la implementación en Aluminio, (Elaboración propia).

Parámetros	Magnitudes
<b>Temperatura máxima</b>	180.21°C
<b>Desplazamiento de las puntas</b>	2,199 $\mu\text{m}$ por cada punta, en total 4,398 $\mu\text{m}$ o 4.398 mm
<b>Desplazamiento de las puntas con peso</b>	1950.5 $\mu\text{m}$ o 1.9505 mm por cada punta en total son 3.9 mm

Tabla 5. 18 Comparación de los resultados de la temperatura máxima, (Elaboración propia)

Temperatura máxima del análisis experimental (°C)	Temperatura máxima del análisis numérico (°C)	Porcentaje de error (%)
162.1	182.21	12%

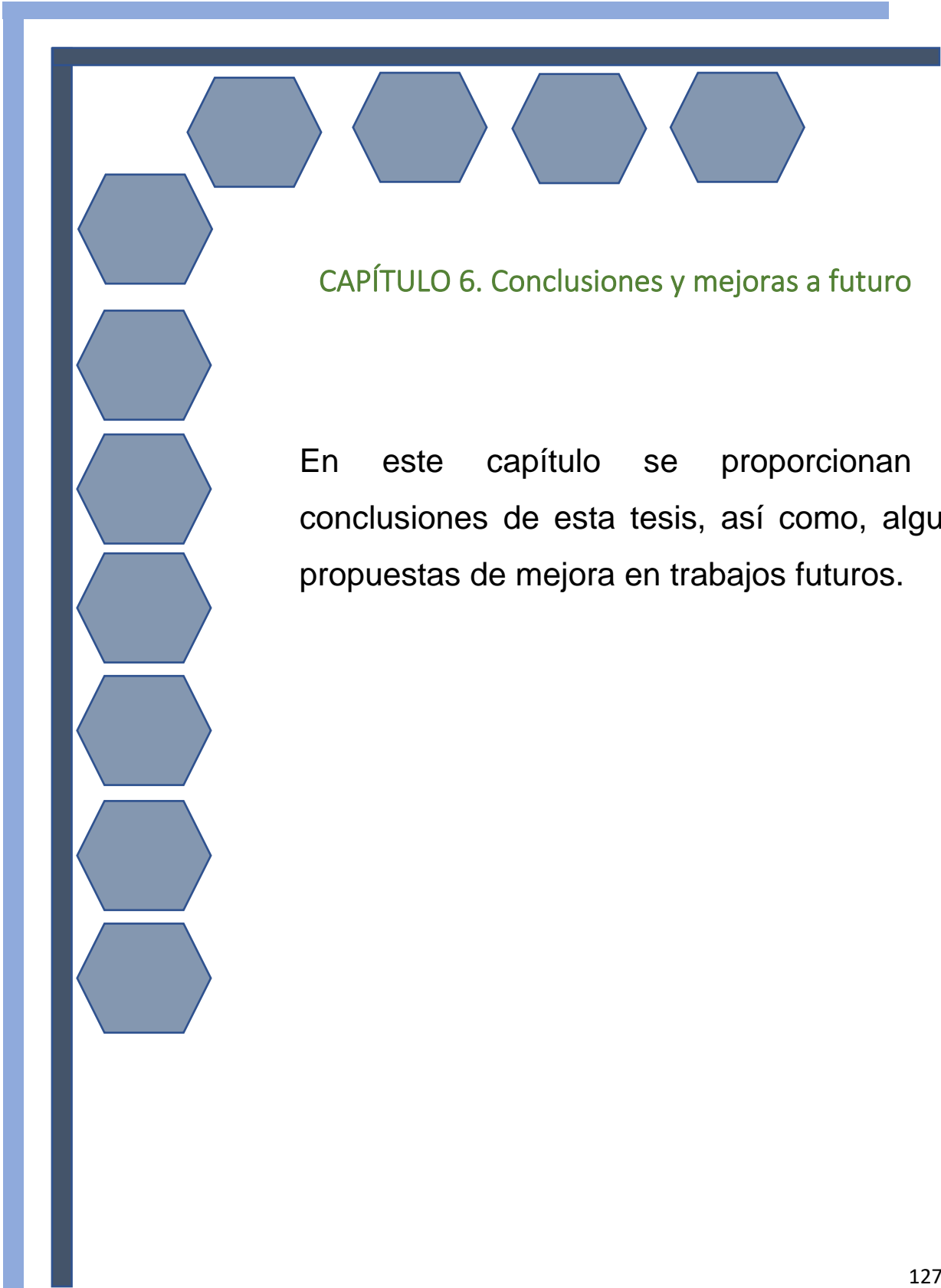
Tabla 5. 19 comparación de desplazamiento, (Elaboración propia).

Desplazamiento del análisis experimental (mm)	Desplazamiento del análisis numérico (mm)	Porcentaje de mejora (%)
---	---	--------------------------

<b>2.5</b>	2.19	12%	
------------	------	-----	--

*Tabla 5. 20 comparación de masa del objeto que se puede sujetar;(Elaboración propia)*

<b>Desplazamiento con peso del análisis experimental (mm)</b>	<b>Desplazamiento con peso del análisis numérico (mm)</b>	<b>Porcentaje de error (%)</b>	
<b>1.7</b>	1.9	12%	



## CAPÍTULO 6. Conclusiones y mejoras a futuro

En este capítulo se proporcionan las conclusiones de esta tesis, así como, algunas propuestas de mejora en trabajos futuros.

## **6.1 conclusiones.**

Al cumplir con los objetivos generales y específicos de esta tesis podemos concluir que el trabajo fue concluido.

Obtuvimos una micropinza basada en un actuador chevrón asimétrico, el cual se comparó con una micropinza similar, hallada en la literatura basada en un actuador simétrico, al comparar los resultados numéricos tuvimos una mejora del 53% en el desplazamiento y una mejora del 99% en la fuerza de sujeción. En la micropinza de esta tesis se logró un desplazamiento que permite contar con la capacidad de sostener objetos con un rango de  $50\mu\text{m}$ , y una fuerza de sujeción de 121 mN, como se muestra en el apartado 4.9. Del cálculo analítico de la fuerza, podemos observar que tiene una capacidad de sostener objetos hasta de 12.3343 g. Se considera que, los objetos que se pueden manipular con esta micropinza son microalambres, que cumplan las características mencionadas. En la literatura encontramos microalambres con radio de  $50\mu\text{m}$  y longitud considerable, con pesos en el rango que puede sujetar la micropinza (Coutinho, Sombrio, & Souza, 2018) .

Las simulaciones del diseño final de la micropinza se realizaron en el software ANSYS<sup>TM</sup> con el material seleccionado en el capítulo 4, el cual es el silicio, se realizaron algunas parametrizaciones y modificaciones en la micropinza a lo largo de este trabajo para llegar al mejor resultado, comparando el diseño final con el diseño preliminar, se obtuvo una mejora del 14% en el desplazamiento y un 65% en la fuerza de sujeción.

Posteriormente, se implementó la micropinza en Aluminio, ya que no se tuvo la oportunidad de realizar la fabricación en silicio, debido a problemas debidas a la pandemia de COVID19, que restringió el acceso a laboratorios especializados. Con el Aluminio realizaron unas modificaciones en las

dimensiones de la estructura, ya que en el laboratorio de CIICAp-UAEM, donde se realizaron las pruebas, solo se tenía el Aluminio 6061 con un grosor de 1.2mm, por lo que se optó que la micropinza se modificara el grosor de 70µm a 12µm, para después hacer una ampliación de 100 veces su tamaño, para tener un resultado en el grosor de 1.2 mm y, posteriormente, se pudiera fabricar en la CNC.

Con la micropinza ampliada a 100 veces, con relación a su tamaño original, ahora con un grosor de 1.2 mm, se procedieron a realizar las pruebas experimentales las cuales se muestran el capítulo 5. Esto para llevar a cabo la comparación de los resultados numéricos con los experimentales, llegando a la conclusión que se tuvo un porcentaje de error del 12% en la temperatura máxima, un error del 12% en el desplazamiento y de un 12 % en la fuerza de sujeción. Estos errores caben dentro del rango de aceptación según (Kaajakari, 2009).

Cabe mencionar que la temperatura ambiente donde se realizaron las pruebas fue de 29°C y las simulaciones se realizaron con una temperatura ambiente que tiene por default el programa y es de 22°C.

Otro de los objetivos que se cumplió a través de este trabajo fue optimizar las micropinzas teniendo como resultado una estructura sencilla, la cual tiene una muy fuerza de sujeción adecuada (121 mN) para diversos micro alambres, debido a que el actuador asimétrico genera una mayor fuerza que el actuador simétrico de dimensiones similares, de acuerdo con los resultados de la tesis dedicada al actuador asimétrico. Los diámetros o longitudes de los objetos de sujeción van desde 50 µm hasta 53.2 µm.

Una de las mejoras que se tiene en el actuador asimétrico es que su estructura es muy sencilla, con un reducido número de brazos, mientras que la forma de

los brazos de la pinza muestra una forma Z, que la hace novedosa, pues esta forma es común en chevrones. Además, se incluye un arreglo de elementos flexibles.

## ***6.2 Trabajo futuro***

Como trabajo futuro se buscará realizar modificaciones en el diseño de la micropinza precisamente en los soportes de los brazos, esto para generar una mayor fuerza de sujeción e implementar alguna modificación que incremente el desplazamiento. Además, es posible cambiar las puntas de los brazos de la micropinza, con la finalidad de contar con puntas de sujeción intercambiables y tener un rango más amplio de objetos que se puedan sostener.

## Bibliografía

- A. R, K., & Thilagar S, H. (2012). Design and Modeling of Electrostatically Actuated Microgripper . : *Proceedings of 2012*, 7–11.
- Bertel Romero, F. A. (2015). BioMEMS – Métodos de Detección y Tendencias de los Biosensores. *GESTIÓN, COMPETITIVIDAD E INNOVACIÓN*, 43-50.
- Beyeler, F., Neild, A., Oberti, S., J. Bell, D., & Sun, Y. (2007). Monolithically Fabricated Microgripper With Integrated Force Sensor for Manipulating Microobjects and Biological Cells Aligned in an Ultrasonic Field. *JOURNAL OF MICROELECTROMECHANICAL SYSTEMS*, 7–15.
- Cauchi, M., Grech, I., Mallia, B., Mollicone, P., & Sammut, N. (2018). Analytical, Numerical and Experimental Study of a Horizontal Electrothermal MEMS Microgripper for the Deformability Characterisation of Human Red Blood Cells. *Micromachines, Vol.9 (3), 108.*, 3-18 DOI:10.3390/mi9030108.
- Chen, T., Chen, L., Liu, B., Wang, J., & Li, X. (2009). Design of a Four-arm Structure MEMS Gripper Integrated with Sidewall Force Sensor. *IEEE Trans Ind Electron*, 996–1004.
- D , N., & Ananthasuresh, G. (2001). Comprehensive thermal modelling and characterization of an electro-thermal-compliant microactuator. *INSTITUTE OF PHYSICS PUBLISHING*, 452–462.
- FU, Y., Luo , J., Flewitt , A., & Milne , W. (2012). Smart microgrippers for bioMEMS applications. *MEMS Biomed*, 291–336.
- Giouroudi, I. (2008). Development of a microgripping system for handling of microcomponents. *Academica* , 148-152.
- J, N., & Sang-Gook Kim., d. (2004). LARGE-STRAIN, PIEZOELECTRIC, IN-PLANE MICRO-ACTUATOR. *17th IEEE international conference micro*, 138-147.
- Jia , Y., & Xu, Q. (2012). MEMS Microgripper Actuators and Sensors: The State-of-the-Art Survey . *Recent Patents Mech Eng*, 132–142.
- Lin, C,M., Fan, C,H., & Lan , C,C. (2009). A Shape Memory Alloy Actuated Microgripper with Wide Handling Ranges . *IEEE/ASME International Conference on Advanced Intelligent Mechatronics*, 12-17.
- Moreno, R. (2013). Guia1 Circuitos en serie y paralelo. *ACADEMIA*, 1-11.
- Nashrul , M., Zubir , M., Shirinzadeh, b., & Tian, Y. (2008). Development of a novel flexure-based microgripper for high precision micro-object manipulation. *ELSEVIER*, 25-266.
- Nava Jiménez, R., & Escamilla Santana, C. (2015). ESTIMACIÓN DE LA DEMANDA, APLICADA A UNA INNOVACIÓN DE TIPO MEMS MEDIANTE EL MODELO DE BASS. *Revista CEA*, 49-59.



- Palacios Alquisira, J. (2017). El silicio (Si) y la Industria Electrónica. *Elementos Químicos*, 1-5.
- Pinto Franco, J. A., & Roa Prada, S. (2012). Aplicaciones de Dispositivos MEMS en el Diagnostico de Enfermedades Tropicales en Colombia. *GENERACIÓN CREATIVA*.
- Rodrigo , A., & Juárez , R. (2019). Ley de Ohm. *Academia*, 1-9.
- W Judy, J. (2001). Microelectromechanical systems (MEMS): fabrication, design and applications. *INSTITUTE OF PHYSICS PUBLISHING*, 1115–1134.
- Wang, D., Yang, Q., & Dong, H. (2013). A Monolithic Compliant Piezoelectric-Driven Microgripper: Design, Modeling, and Testing. *IEEE/ASME Trans Mechatron*, 138–147.
- Xu, Q. (2014). Design and testing of a novel multistroke micropositioning system with variable resolutions. *Academia* , 2-12.
- Yuan, G., Yuan, W., Hao, Y., & Li, X. (2015). A Microgripper with a Post-Assembly Self-Locking Mechanism. *Sensors (Switzerland)* , :20140–20151.
- Yukun , J., & Qingsong, X. (2013). MEMS Microgripper Actuators and Sensors: The State-of-the-Art Survey Vol. 6(2). *Recent Patents on Mechanical Engineering*, 132 - 142 DOI: 10.2174/2212797611306020005.
- A. R, K., & Thilagar S , H. (2012). Design and Modeling of Electrostatically Actuated Microgripper . *Proceedings of 2012 8th IEEE/ASME international conference mechatronics*, 7-12.
- Aravind, T., Ramesh, R., Ramya, S., Praveenkumar, S., & Kalaiarasi , A. (2016). Comparison of Different Materials on Performance of Chevron Shaped Electrothermal Microgripper. *International Journal of Printing*, 2560-2566.
- CHAUVEAU, P., BLONDY, P., POTHIER, A., & CRUNTEANU, A. (2006). MEMS reliability assessment Methodology for aerospace applications. *CANEUS*, 1-5.
- Coutinho, I., Sombrio, G., & Souza, J. (2018). Surface tension driven flow forming aluminum oxide microtubes. *ELSEVIER*, 33-37.
- Dochshanov, A., Verotti, M., & Belfiore, N. (2017). A Comprehensive Survey on Microgrippers Design: Operational Strategy. *operational strategy. J Mech*, 1-18.
- El-Sayed , A., Abo-Ismael , A., El-Melegy , M., Hamzaid, N., & Osman, N. (2013). Development of a microgripper using piezoelectric bimorphs. *Sensors (Switzerland)*, 5826–5840.
- Elsen , R., Bharadwaj , K., & Ramesh, T. (2019). A parametric study on electro thermally actuated compliant microgripper. *SAE Technical Paper*.
- Evans, H., Griffiths, C., & Fahmy, A. (2020). Microgripper design and evaluation for automated I-wire assembly: a survey. *Microsystem Technologies*, 1-24.

- Fujita, H. (1998). Microactuators and micromachines. *Proceedings of the IEEE. Volumen 86, ISSUE 8.*, 1721-1732 DOI: 10.1109/5.704278.
- Fujita, H. (1998). Microactuators and Micromachines. *PROCEEDINGS OF THE IEEE, VOL. 86, NO. 8*, 1721-1732.
- Gaafar, E., & Zarog, M. (2017). A low-stress and low temperature gradient microgripper for biomedical applications. *Microsyst Technol.* :5415–5422.
- Guan, C., & Zhu, Y. (2010). An electrothermal microactuator with Z-shaped beams. *JOURNAL OF MICROMECHANICS AND MICROENGINEERING*, 1-9, DOI:10.1088/0960-1317/20/8/085014.
- H., L.E., A. Griffiths, C., & Fahmy, A. (2020). Microgripper design and evaluation for automated l-wire assembly: a survey. *Microsystem Technologies*, 1745- 1768 .
- Haddab, Y., Chaillet, N., & Bourjault, A. (2000). A Microgripper Using Smart Piezoelectric Actuators. *international conference on intelligent robots and systems*, 659-664.
- Kaajakari. (2009). *Practical MEMS*. Small Gear Publishing.
- Kawamoto, H. (2009). Manipulation of single particles by utilizing electrostatic force. *Elsevier*, 850–861.
- Kawamoto, H., & Tsuji, K. ( 2011). Manipulation of small particles utilizing electrostatic force . *Advanced Powder Technology Volume 22, Issue 5*, 602-607, DOI:<https://doi.org/10.1016/j.apm.2010.09.001>.
- Kolahdoozan, M., Esfahani , A., & Hassani, M. (2017). Experimental and Numerical Investigation of the Arms Displacement in a New Electrothermal MEMS Actuator. *Int J Adv Des Manuf*, 75-80.
- Kouravand, S. ( 2011). Design and modeling of some sensing and actuating mechanisms for MEMS applications. *Applied Mathematical Modelling. Volumen 35, Issue 10*, 5173-5181, DOI:<https://doi.org/10.1016/j.apm.2011.04.015>.
- Kyung, J., Ko , B., Ha , Y., & Chung , G. (2008). Design of a microgripper for micromanipulation of microcomponents using SMA wires and flexible hinges. *Sens Actuators A Phys*141, 144–150.
- Long, Z., Zhang, J., Liu, Y., Han, C., Li, Y., & Li, Z. (2017). Dynamics Modeling and Residual Vibration Control of a Piezoelectric Gripper During Wire Bonding. *IEEE TRANSACTIONS ON COMPONENTS, PACKAGING AND MANUFACTURING TECHNOLOGY*, 1-12.
- Marija , C., Ivan , G., Bertram , M., Pierluigi , M., Barnaby , P., & Nicholas, S. (2019). Essential design and fabrication considerations for the reliable performance of an

electrothermal MEMS microgripper. *Microsystem Technologies*, 2-16  
<https://doi.org/10.1007/>.

Matthew N., O. S., & Alexander, C. K. (2013). *Fundamentals of Electric Circuits*. Avenue of the Americas, New York: McGraw-Hill.

Munasinghe, K., Bowatta, B., Abayarathne, H., Kumararathna, N., & Maduwantha, L. (2016). New MEMS Based Micro Gripper Using SMA for Micro Level Object Manipulation and Assembling. *In: 2nd international Moratuwa engineering research conference*, 36–41.

Nikoobin, A., & Hassani Niaki, M. (2012). Deriving and analyzing the effective parameters in microgrippers performance. *Scientia Iranica. Volume 19, Issue 6.*, 1554-1563. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.scient.2012.10.020>.

Pankaj , S., Uma, G., & Umapathy, M. (2015). Design enhancement of a chevron electrothermally actuated microgripper for improved gripping performance. *Microsyst Technol*, 2623–2631 DOI 10.1007/s00542-015-2561-0.

Qu, J., Zhang, W., Jung, A., Silva-Da Cruz, S., & Liu, X. (2017). Microscale Compression and Shear Testing of Soft Materials Using an MEMS Microgripper With Two-Axis Actuators and Force Sensors. *IEEE Transactions on Automation Science and Engineering*, Vol. 14, No. 2, 834-843, DOI:10.1109/TASE.2016.2613684.

Sandeep, K., & Laxman , S. (2011). Design and development of a novel micro-clasp gripper for micromanipulation of complex-shaped objects. *Elsevier*, 111-123 .

Shi, Q., Sun , T., Huang, Q., Fukuda, T., Yu, Z., & Wang, H. (2018). Development of a Highly Compact Microgripper Capable of Online Calibration for Multi-Sized Microobject Manipulation. *IEEE Trans Nanotechnol*, 1-4.

Shivhare, P., Uma, G., & M. Umapathy. (2015). Design enhancement of a chevron electrothermally actuated. *Microsystem Technologly*, 1-9, DOI 10.1007/s00542-015-2561-0.

Vargas-Chable, P., Tecpoyotl-Torres, M., Robles-Casolco, S., & Cabello-Ruiz, R. (2015). Structural optimization of an electrothermal chevron V-shape microactuator device. *International Conference on Mechatronics, Electronics and Automotive Engineering*, 262-267.

Wang, Z. S. (2015). Design, modeling, and characterization of a MEMS electrothermal microgripper. *Microsystem Technology*, 2307-2315.

Yang, S., & Xu, Q. (2017). A review on actuation and sensing techniques for MEMS-based microgrippers. *J Micro-Bio Robot*, 1-14, DOI 10.1007/s12213-017-0098-2.

Yang, S., & Qingsong, X. (2017). A review on actuation and sensing techniques for MEMS-based microgrippers. *Journal of Micro-Bio Robot*, 3 (1-4), 1-14, DOI 10.1007/s12213-017-0098-2.

- Zhang, Z., Yu, Y., Liu, X., & Zhang, X. (2015). A Comparison Model of V- and Z-shaped Electrothermal Microactuators. *2015 IEEE International Conference on Mechatronics and Automation (ICMA)*, 1025-1030. DOI:10.1109/ICMA.2015.7237626.
- Zhong, Z., & Yeong, C. (2006). Development of a gripper using SMA wire. *ELSEVIER*, 375-381.
- Zubir, M., Shirinzadeh, B., & Tian, Y. (2009). A new design of piezoelectric driven compliant-based microgripper for micromanipulation. *Mechanism and Machine Theory, Volume 44, Issue 12,, 2248-2264*, DOI:<https://doi.org/10.1016/j.mechmachtheory.2009.07.006>.



Cuernavaca, Mor., a 24 de junio de 2022

DR. JESÚS ESCOBEDO ALATORRE  
DR. OMAR PALILLERO SANDOVAL  
DRA. MARGARITA TECPOYOTL TORRES  
DR. PEDRO VARGAS CHABLÉ  
DR. JOSÉ ANTONIO MARBÁN SALGADO

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

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

Titulado:

**MICROPINZA BASADA EN UN ACTUADOR ASIMÉTRICO**

Que presenta el **C. JESÚS ANTONIO RAMOS MÁRQUEZ**

Del programa educativo de: **INGENIERÍA MECÁNICA**

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

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

**Se anexa firma electrónica**

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

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

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

VOTO	NOMBRE	FIRMA
	DR. JESÚS ESCOBEDO ALATORRE	
	DR. OMAR PALILLERO SANDOVAL	
	DRA. MARGARITA TECPOYOTL TORRES	
	DR. PEDRO VARGAS CHABLÉ	
	DR. JOSÉ ANTONIO MARBÁN SALGADO	

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

VALH/dco

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 de 2020.

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

### Sello electrónico

VIRIDIANA AYDEE LEON HERNANDEZ | Fecha: 2022-06-25 01:27:28 | Firmante  
HNleD7hf11CEdsCRpTfj/FTYz7Ock81Dhdi6f9wOACldpu+SZFiaFniOWLJE3C9lj/3XeATknD/SgTDo2efcZECWhkNcDWijPwQKvupKj/iw06wmxnbsCeGBQ4wNr4iRT8WVEBtoOYGR/3LBx8GRpdO0WSg4oNZihoFmnRrqzqLftt0zSgLvqyhx0b8jRHF0j5Wmzu/poTvGpq3FgPpiQuMqT wzoSico+PqKc+D2UWVaVPyN07ZL6084VnOYNgXTWTw05aJ4MpOg1xW4FCnw52L6elofX/ZTIL0VdJFNntnuL2X5xbg2EcpPuVHr+av1eL7as+vcBeJR8Pc4rsfVJA==

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



[fduwT3PaY](#)

<https://efirma.uaem.mx/noRepudio/FP4eVPZ39RVgdhNvwAMc8BIVfxAsBzg7>

Se expide el presente documento firmado electrónicamente de conformidad con el ACUERDO GENERAL PA LA CONTINUIDAD DEL FUNCIONAMIENTO DE LA UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DEL ESTADO DE MOREL DURANTE LA EMERGENCIA SANITARIA PROVOCADA POR EL VIRUS SARS-COV2 (COVID-19) emitido el 27 de abril de 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:2022-06-27 19:11:35 | Firmante**

0CR7sa1XmXXoTgES+IW4QybEmAAA+NGK6+AoKwQGcXrkyExH++q/T084dppA2hlnUR/2UnaoWnNAKztstCG2HUZJtI7nFTmhmr/9Kv5QbqTIIIM9O+3PPc8zDYMSj19+n5s53L  
NZ/INS2O3snqpUhlMMKZF6JxzEilrjXFQW/JWYsVWgk6LYdhhuWxw+ISCuWnLTV2oRQHPzBzq/MEOSGIE5wolwBETty0HYUgRSBmzCfXCPIpzVquvTVO8u2RTpkysd603C  
X6LnKCMBUKjvxNh+LndppX3sG9x1tCW/PfxYX/cXJNysQUXnuwyZ+hsrJcdvVeNuh3ACTNlgyg==

**J JESUS ESCOBEDO ALATORRE | Fecha:2022-06-27 20:22:09 | Firmante**

cQvKkPWSyHHc+s6R2zMsD25EmUDrtbEclJuaT3IH5hkol+CVu5rP9ZkxGCp+s0uFv8MQm6dMaNyZ9T+TYzsPP7H6vTuyIhbJ04kag1/KyJmLzXRJgod1GfiUVOSjNUJOEZYWu  
X0PmKCbmt09z2GxCR13mOTDQ+G44k93WjQhXuOKYBUOdxYq4+HY4pgZah99PFTTPvLfJ6ewR/JBPtUhrJFg+kXF1pRmPtboJkZ7p41SKPzHzJhwq2GhIptO2T27G FpflR++  
Z5ZQhKHmM34YIro5Bqlp2S+L9G5mhSj4Jeqruie2ay+7mUkX90W35Og9AwInf9JwA8C/fK8umZSg==

**MARGARITA TECPOYOTL TORRES | Fecha:2022-06-27 21:39:03 | Firmante**

YUPLRZSFaj/q0xvheYkTzhA/P8zr9x2BBLT rwhf+9PfZ2xnlw3B+l49HLuH8naVvo9DscEWkp0+6qmq+tXXgD70a4JX+NPp7U3bhlCSS45bB49JwK5B0X7Rg8kyWjV+wEJYpQD3k  
EqnCimwk2MoPRsBLFgg29e0o+RpCLSmEUCLhVckQGtebWijhVFJi9ndXF63VOapoQ0Y4l/mstAVe34DHNfoX1HiY1+pghH/FXw51nP7dt4wR4O6bN0dKXpVNaMkJmtjUOckTu  
/BqP1XwPXAbsle/wNXL57Bc0qE8znt5+2PrtnNFuxOBouyldiIntypzCxQKlyjXAx05wdexg==

**PEDRO VARGAS CHABLE | Fecha:2022-06-29 00:05:34 | Firmante**

HVN2l4lxnlVWa1Q5Ojpcx+ZCk8n3T7upMk5jux+ww1Es0loYitKXZINOn1hYbzJjAGX3iysX7UupKkrUvN0yDKfPwJmUx7h+r/06MBuxZjdmqPwk35JtflPBMOU6FPiXs/r4inWMSgZ  
LML7ErdUTdpG4tpegKWA16XUby1kfFteahAR3+Q+/3oeTAsYTsc/aPU8Qyyk9smyORWjhNeAIXoujlaSIF4DMOMzbRePmKAp2BFg6LjIX4Dk20f1kl/JZjAhEvxxqmnPqKLXcRm  
7URBYZuaAopQOSEllin46UilZqh9vHdC8MKwGMfCDmXrmPjCzqQ+SG2VTcFSLwyA==

**JOSE ANTONIO MARBAN SALGADO | Fecha:2022-06-29 11:17:15 | Firmante**

epBeQxVulPzXJgBIZDVTe+szkasY503YN4ve5cEadq2LcizU9ZGSfmo6Sc39EDLA27K4sw0yaZf2sBdnZ90IU/Qbq9Ht1JcKZTKbi0mFRugCepOh6naKL72FLblq1j45PqITzmWK  
I1QEYN8vPCPZOghvShdgFql0TPV5VHGoeJEj5b61ATWpWkK4P9JMg54gpHx0AZf5q2VnZXuo0mTF7s4aY3cwoGmfMe8vb8GzU9K1Jn+6i3FRlBziqch5Ngz8tr3XYyX8MGY  
WslARwLrPkB1E32YZAKRjXihafD3JZ5LDXmcwR.Jebvief2Ydl5AKGdLUZxmDJxPNTFACA==

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



e9FJQyxCn

<https://efirma.uaem.mx/noRepudio/MD9YsVNqcsjDF6keyuUJsurhalDJc9N>