



UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DEL ESTADO DE MORELOS

**INSTITUTO DE INVESTIGACIÓN EN CIENCIAS BÁSICAS Y
APLICADAS**

CENTRO DE INVESTIGACIÓN EN INGENIERÍA Y CIENCIAS APLICADAS

**“DISEÑO DE UNA PINZA MICROELECTROTÉRMICA IMPULSADA POR
UN ACTUADOR CHEVRÓN”**

TESIS PARA OBTENER EL GRADO DE:

**LICENCIATURA EN TECNOLOGÍA CON ÁREA TERMINAL EN FÍSICA
APLICADA**

C. SAHIRIL FERNANDA RODRIGUEZ FUENTES

DIRECTOR

DRA. MARGARITA TECPOYOTL TORRES

CO-DIRECTOR

DR. PEDRO VARGAS CHABLÉ

SINODALES

Dr. Omar Palillero Sandoval

Dr. José Antonio Marbán Salgado

Dr. J Jesús Escobedo Alatorre

Dr. Pedro Vargas Chablé

Dra. Margarita Tecpoyotl Torres

Cuernavaca, Morelos 2020



UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DEL ESTADO DE MORELOS



INSTITUTO DE INVESTIGACIÓN EN CIENCIAS BÁSICAS Y APLICADAS

Control Escolar de Licenciatura



VOTOS DE APROBATORIOS

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

Por medio de la presente le informamos que después de revisar la versión escrita de la tesis que realizó la C. **RODRÍGUEZ FUENTES SAHIRIL FERNANDA** con número de matrícula **20144009513** cuyo título es:

“DISEÑO DE UNA PINZA MICROELECTROTÉRMICA IMPULSADA POR UN ACTUADOR CHEVRÓN”

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

Cuernavaca, Mor a 17 de marzo del 2021

Atentamente
Por una universidad culta

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

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

PRESIDENTE
SECRETARIO
VOCAL
PRIMER SUPLENTE
SEGUNDO SUPLENTE

Av. Universidad 1001 Col. Chamilpa, Cuernavaca Morelos, México, 62209.
Tel. (777) 329 70 00, Ext. 3270 / correo ICBA@uaem.mx



Una universidad de excelencia

RECTORÍA
2017-2023



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

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

Sello electrónico

JOSE ANTONIO MARBAN SALGADO | Fecha:2021-03-17 15:33:09 | Firmante
 YBJVu026pEKR5F+PCnblh2HpZ4HO96GwvpPxrQ8zXMT1yy98AvAykrtwGqPHFPw5adKGIvegEo9EYMEWJgWTVxTYJE9MqjSKYXZofu+AgOz8LF4Nfe97OT8XfdBLp498Wl
 eccKqPvK5aYd116XfghpVxIB833WfMsPMDLAYGJNEZLXhwv61tZD5YUeQmFEWh23b+yeZdxXwsJiOxMSDovVRPvgXxzSRU3rgVJODDzrqTisOlv2QKBblLbKutVJseZqP+Roz
 35G6l88a++YyKqZD6vbDgSlNgFZ3SUVqC5NTWNA19nLBJ21Po7zEEeXoKo7atT+wroEsXeQDhrlaw==

PEDRO VARGAS CHABLE | Fecha:2021-03-17 20:59:37 | Firmante
 IDpVkp5Hw8bN6SdVvd3wZWy24oASxbWQf3f83SuccUjD1C8vc3vWQqcZc11aeN5JZpgUbJhuc7UVzh/n1a7Cj36dcoFX3f+ZYCmDP6uBGrfSljguIW2KeG0yn3rfuIAPAcLrSLxk
 G6248/IS+SLkd5csz581cqJshXrcf61wP9oMwiI+vbBwuoXnE1nQKzV2D6eMgwMEJqmoPF7hZ2HQ5V+uPChGERK848IP3f7P8eNkQCkuCnHQRamWW3C2V1YF2sxQ68T
 sMhL/bbpX7zFRik2KFJBS1A4qGzv5NkkDObVfAVIE3Cb5+21LLgSK4ZjeMHEseYgkQ==

MARGARITA TECPOYOTL TORRES | Fecha:2021-03-17 23:04:52 | Firmante
 DeUmyKOrZQ2NglYasS5h0ayzP3z+IbXNvR6UxtAIMh4WQ400z6Y8DsgIGgzvukMLbLR47ZpqQEMMVz+1ZQJ8AsyAhZIFu+Yoxd5B7STQ3KJN5FT1Mbitpka7Wv9wf+2BbJBJS
 /qMv3e9C07WREFruTXDYDQ0mV5mu+RjQoEBwBmriptpOKN6OaggVno1KZNXj61p4aWF7PhEoERXpO4S35TjGCIe/w1PvEthPgDXcUazMeG1Cd1K5Mk+kC8q9EIRkyaS
 O089AXp9ML7p6f8Yjd7O5w7W2cdNP9Y5ITauYpg7QllvXbLle1QaJZYBZ5XGMXzH3YzCv0FA==

OMAR PALILLERO SANDOVAL | Fecha:2021-03-19 11:12:26 | Firmante
 wOgisOnSgCEmLs1BZCISUGseYy3YUUV+ASD+oqDXsDfrwHnsTdA8klRSJ6WMyta4cMGHP6Wtma9ByBCDFDNTZUj4qxsK3jlgYLxsHlNn/xjJPSH9CzEXHktka04o/qGGUUrU+
 OUW+XZa/1EsDYCOFS10BsJSHGvc9arIVzKsVsalSBc5u77LEoHz7dH4VcooPLaOwMBXsXe4iu0Dc7YgOBMeitfSyvU035BS9JrWgQ8ftOuwISueZgQHA/b8PRwz8exS9h7Re8
 FzRG1Lmg+GY1XKJlIdhvtWJQD6i2aj9Pq6+nZkHlkn1sznlqMcn+Qae3d/xbrUd3RzmZow==

J JESUS ESCOBEDO ALATORRE | Fecha:2021-03-22 12:13:40 | Firmante
 DaHJEf00pcTRlqvell0pB4Yy905KXg2KWOmF7+HxlSVNLyW2ypoxaLlie34jCwn+HlPrzcb0w33N2qB7zJz8/OAbA+mqTb04WgicVWIEWGw5HUJy9EqmbjJQgk8SQNxDdDvA
 8pO57jJa/adTDok+kk1c3ppR4hZ6HY2uc5k+01f2xKnDYNtn0A8NkNun66jxk4JszgVu5zcpQ79UBZVluhq1kaMkiPOWEcAae5Lna6FDkif+oCWwUvKqg/NY7GPIJkcvHaU5QvM
 ZPIEAu9Ew7wdiuFgloovUoBlyAMk1rSG/M9no7a4r4r8tcu1UGT3dWU0+HqQkn7w==

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



E0nXRZ

<https://efirma.uaem.mx/noRepudio/1SszqGJOjgZYPaJsjAQij9zksBLFKH6>



Una universidad de excelencia

RECTORÍA
2017-2023

Resumen

Esta tesis se enfoca en el diseño de una micropinza impulsada por un actuador chevrón, basada en arreglos flexibles. Con la finalidad de que no se genere una alta temperatura en sus mandíbulas, e incrementar con ello el potencial de su uso, para su funcionamiento, se utiliza una fuente de alimentación de 2 V. Con este valor de voltaje, se genera una temperatura máxima de 112 °C en una de las anclas del actuador chevrón, y una temperatura máxima en las puntas de la pinza de 89.5 °C.

Cabe señalar que, el desplazamiento total entre las mandíbulas de la micropinza, cuando se aplica el voltaje máximo, es de 20.00 μm . A este valor de voltaje, se obtiene una fuerza de reacción en la punta de las mandíbulas de 343.84 μN . Esta apertura permite sujetar microobjetos en un rango de dimensiones entre 161 μm y 181 μm , mientras que la fuerza obtenida, permite la sujeción de objetos un peso no mayor a 33.41 μg . En este rango de dimensiones y peso, se encuentran microobjetos tales como microtubos de óxido de aluminio.

Durante el proceso de diseño, con el propósito de optimizar al microactuador chevrón, se realizaron parametrizaciones considerando a sus elementos principales como: grosor de la estructura, ángulo de inclinación, ancho y largo de brazo. Para realizar las parametrizaciones, se utilizó la herramienta de software ANSYSTM. Los resultados de las simulaciones fueron comparados con los resultados analíticos, Cabe señalar que, el actuador chevrón ha sido ampliamente analizado, por lo que cuenta con modelos matemáticos establecidos. La comparación de resultados permitió obtener porcentajes de error reducidos, siendo el máximo obtenido del 5 %.

Con relación a la estructura propia de la micropinza, debe señalarse que se trata de una configuración original y novedosa, basada en un arreglo de

elementos flexibles, donde la distribución angular de la base es fundamental en su respuesta. Además, su tamaño es compacto y relativamente menor, con relación a las que fue comparada. Puede mencionarse, además, que es competitiva tanto en fuerza, como en desplazamiento, dentro del margen de voltaje aplicado.

Abstrac

This thesis focuses on the design of a micro-gripper driven by a chevron actuator, based on flexible arrangements. In order to not generate a high temperature in their jaws, and thereby increase the potential of its use, for its operation, a 2 V power supply is used. With this voltage value, a maximum temperature is generated. of 112 ° C in one of the anchors of the chevron actuator, and a maximum temperature on the tips of the jaws of 89.5 ° C.

It should be noted that the total displacement between the jaws of the micro-clamp, when the maximum voltage is applied, is 20.00 μm . At this voltage value, a reaction force at the tip of the jaws of 343.84 μN is obtained. This opening allows to hold microobjects in a range of dimensions between 161 μm and 181 μm , while the force obtained allows the holding of objects weighing no more than 33.14 μg . In this range dimensions and weight, you will find microobjects such as aluminum oxide microtubes.

During the design process, in order to optimize the chevron microactuator, parameters were made considering its own main elements such as: structure thickness, inclination angle, arm width and length. To carry out the parameterizations, the ANSYSTM software tool was used. The results of the simulations were compared with the analytical results. It should be noted that the chevron actuator has been extensively analyzed, so it has established mathematical models. The comparison of results allowed obtaining reduced error percentages, the maximum obtained being 5%.

Regarding the structure of the microgripper, it should be noted that it is an original and novel configuration, based on an arrangement of flexible elements, where the angular distribution of the base is fundamental in its response. In addition, its size is compact and relatively smaller, in relation which it was compared. It can also be mentioned that it is competitive both in force and displacement, within the range of applied voltage.

Agradecimientos

Agradezco principalmente a la Dra. Margarita Tecpoyotl Torres quien fue mi guía durante todo el proceso de la Tesis. Además de haber sido mi profesora en varias asignaturas durante mi carrera universitaria, por darme la oportunidad de crecer junto a ella. Por ser mi amiga siempre. Gracias, mi eterna admiración.

Agradezco también al Centro de Investigación en Ingeniería y Ciencias Aplicadas (CIICAp), por permitirme ser parte de su equipo.

A mis queridos compañeros de laboratorio que siempre me brindaron su apoyo, el Doctor Pedro Vargas Chablé, el, Maestro Josué Sandoval Reyes, a el Maestro Andrés Ferrara y a mi compañero Juan Gerardo Castro.

Agradezco la oportunidad de haber participado en el desarrollo del:

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

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

Dedicatoria

A la memoria de mi padre, quien siempre fue una guía espiritual para mí, y a
mi familia en general.

Índice general

Resumen	iv
Abstrac.....	vi
Agradecimientos.....	vii
Dedicatoria	viii
Índice general	x
Índice de figuras	xiv
Índice de tablas.....	xv
CAPÍTULO 1.- INTRODUCCIÓN	xvii
1.1.- Introducción.....	xvii
1.2.- Antecedentes	xviii
1.5.- Objetivo general	xix
1.5.1 Objetivos particulares	xix
1.6.- Justificación.....	xx
1.7.- Limitaciones	xx
1.8.- Organización de la tesis.....	xxi
CAPÍTULO 2. MARCO TEÓRICO	xxiii
2.1.- Sistemas Microelectromecánicos	xxiii
2.2.- Micropinza	xxvi
2.3.-Microactuador cantiléver	xxxii
2.3.1.- Modelado del microactuador cantiléver	xxxiii
2.4.- Microactuador chevrón.....	xxxvi
2.4.1.- Ecuaciones para el modelado matemático del microactuador chevrón	xxxvi
2.5.- Actuador tipo U.....	xl
2.6.- Actuador Z-Beam	xli

2.7.- Principios de actuación	xli
2.7.1.- Electrostático	xlii
2.7.2.- Electromagnética	xlii
2.7.3.- Electrotérmico	xliii
2.7.4.- Piezoeléctrico.....	xliii
2.7.5.- Aleación por memoria de forma (SMA).....	xliv
CAPÍTULO 3. METODOLOGÍA.....	xlvii
3.1.- Metodología de la tesis	xlvii
3.1.2.- Proceso de diseño y simulación de la micropinza y sus respectivos componentes en ANSYS.....	xlviii
3.1.3.- Proceso de obtención de resultados numéricos	xliv
CAPÍTULO 4. DISEÑO, SIMULACIÓN Y CARACTERIZACIÓN DEL CANTILIVER Y EL ACTUADOR CHEVRÓN.....	li
4.1.- Proceso de diseño del cantiléver.....	li
4.1.1.- Software utilizado.....	li
4.2.- Características del material a utilizar	li
4.2.1 Especificación de material	li
4.3.- Diseño y modelado del cantiléver.....	liii
4.3.1.- Características del cantiléver.....	liii
4.3.2 Selección del tipo de actuación del cantiléver.....	liv
4.3.3.- Resultados de simulación	liv
4.3.4.- Comparación de resultados analíticos y simulados.....	lvii
4.3.4.- Gráficas	lviii
4.4.- Diseño y modelado del chevrón.....	lix
4.4.1.- Selección de componentes	lxi
4.4.2.- Selección del tipo de actuación del microactuador chevrón.....	lxi
4.4.3.- Resultados de simulación y parametrización	lxi
4.4.4.- Comparación de resultados del modelado matemático analítico, simulado y porcentajes de error	lxiii
4.4.5- Gráficas	lxv

.....	lxvi
.....	lxvii
CAPÍTULO 5. DISEÑO, SIMULACIÓN Y CARACTERIZACIÓN DE MICROPINZA	lxix
.....	lxix
5.1.- Especificaciones de diseño	lxix
5.1.2- Determinación de los materiales.....	lxix
5.1.3.- Selección de componentes de la micropinza.....	lxix
5.1.4.- Determinación de requerimientos y restricciones	lxx
5.2.- Importancia de la forma de las pinzas de sujeción.....	lxx
5.3.-Diseño preliminar	lxxii
5.4.-Resultados de simulación	lxxiii
5.5.-Comportamiento de la temperatura con relación al voltaje aplicado.	lxxxiv
5.6. -Análisis de parámetros de desempeño	lxxxvi
5.7. -Diseño final	lxxxvii
CAPÍTULO 6.- CONCLUSIONES Y TRABAJO FUTURO.....	xc
6.1.- Conclusiones	xc
6.2.- Trabajo futuro.....	xcii
Bibliografía.....	xciii
Anexo A. PUBLICACIONES.....	99
A1. Capítulo en libro	99
A2. Artículo enviado a congreso.	100
A3. Artículo aceptado “ACTUATORS”	101
A4. Artículo aceptado “ACTUATORS”	102
1. Introduction.....	¡Error! Marcador no definido.
Anexo B. TALLERES.....	104
B.1 Taller “Conociendo el micro-mundo con micro-herramientas.....	104
B.2 Taller “Introducción al Diseño de Sistemas Micro-electo-mecánicos”	105

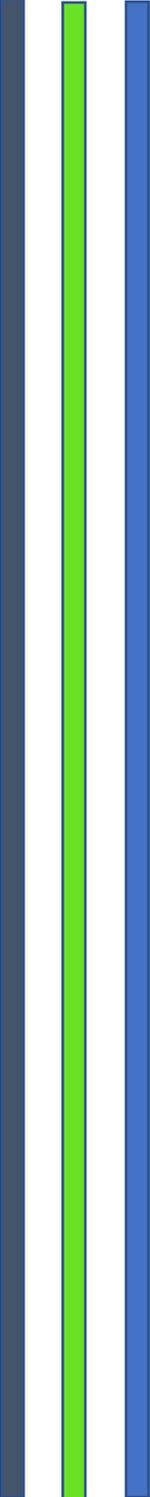
B.3 Participación en la feria de la ciencia llevada a cabo en la preparatoria por Cooperación Andrés Quina Roo “Introducción al Diseño de Sistemas Micro-electro-mecánicos” 106

Índice de figuras

Figura 2-1 Microactuador cantiléver. Elaboración propia	xxxiii
Figura 2-2 Microactuador Chevrón. Elaboración propia.	xxxvi
Figura 2-3 Microactuador tipo U (Qiu, Lang, Slocum, & Weber, 2005)	xl
Figura 2-4 Microactuador tipo Z (Guan & Zhu, 2010)	xli
Figura 3-1 Metodología general	xlvii
Figura 3-2 Proceso de diseño en ANSYS	xlviii
Figura 3-3 Diagrama de obtención de resultados numéricos	xliv
Figura 4-1 Diseño preliminar del cantiléver	liii
Figura 4-2 Árbol principal de simulación en el espacio de trabajo de Workbench	liv
Figura 4-3 Resultados de la simulación correspondientes a) al desplazamiento, y b) a la fuerza.	lvi
Figura 4-4 Área de trabajo de Parameter Set	lvi
Figura 4-5 Largo del cantiléver vs desplazamiento	lviii
Figura 4-6 Temperatura vs desplazamiento	lix
Figura 4-7 Temperatura vs fuerza	lix
Figura 4-8 Diseño final del microactuador chevrón	lx
Figura 4-9 Distribución de temperatura	lxii
Figura 4-10 Deformación total del microactuador chevrón	lxiii
Figura 4-11 Fuerza de reacción	lxiii
Figura 4-12 Ángulo de inclinación vs desplazamiento	lxvi
Figura 4-13 Ángulo de inclinación vs fuerza	lxvi
Figura 4-14 Grosor de la estructura vs fuerza.....	lxvii
Figura 5-1 Dimensiones de la micropinza preliminar	lxxii
Figura 5-2 Distribución de temperatura aplicando un voltaje máximo de 2 V.	lxxiii
Figura 5-3 Desplazamiento obtenido mediante simulación en ANSYS	lxxiv
Figura 5-4 Fuerza de reacción	lxxiv
Figura 5-5 Relación de Temperatura con respecto al voltaje	lxxxiv
Figura 5-6 Voltaje contra desplazamiento	lxxxv
Figura 5-7 Voltaje contra fuerza	lxxxvi
Figura 5-8 Dimensiones de micropinza final	lxxxviii

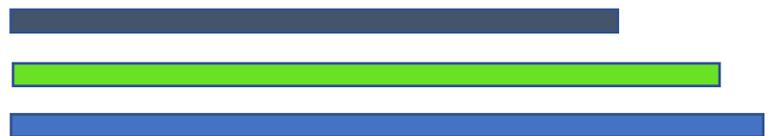
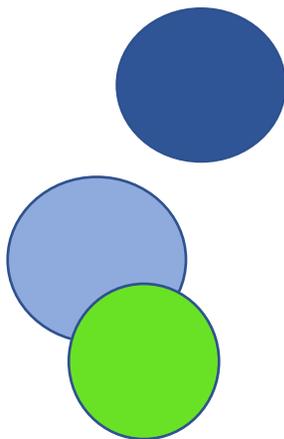
Índice de tablas

Tabla 2-1 Historia de los MEMS de algunas áreas de investigación (Fujita H. , 1998).....	xxiv
Tabla 2-2 Descripción de parámetros fundamentales de algunas micropinzas electro térmicas impulsadas por un actuador chevrón.....	xxvii
Tabla 2-3 Imágenes de las micropinzas descritas en la tabla 2-2.....	xxix
Tabla 2-4 Descripción de parámetros fundamentales de algunas micropinzas electro térmicas con actuador tipo U.....	xxx
Tabla 2-5 Imágenes de las micropinzas descritas en la tabla 2-4.....	xxxii
Tabla 2-6 Ventajas y desventajas de los diferentes tipos de actuación. (Yang & Xu, 2017), (Llewellyn-Evans, Griffiths, & Fahmy, 2020).....	xliv
Tabla 4-1 Parámetros del silicio (Si) (Yang & Qingsong, 2017), (Ghatkesar, y otros, 2007).	lii
Tabla 4-2 Dimensiones del cantiléver	liii
Tabla 4-3 Resultados simulados y analíticos obtenidos parametrizando el largo del cantiléver	lvii
Tabla 4-4 Desplazamiento y fuerza variando la temperatura	lvii
Tabla 4-5 Dimensiones del Microactuador chevrón.....	lx
Tabla 4-6 Resultados simulados y analíticos obtenidos de la parametrización del ángulo de inclinación.	lxiii
Tabla 4-7 Resultados simulados y analíticos obtenidos de la parametrización del grosor de la estructura	lxv
Tabla 5-1 Formas comunes de puntas de micropinzas (Nikoobin & Hassani Niaki, 2012)	lxxi
Tabla 5-2 Resultados de simulación de la micropinza preliminar	lxxv
Tabla 5-3 Resultados de simulación de modificaciones de micropinzas.....	lxxvii
Tabla 5-4 Resultados de simulación de la micropinza optimizada	lxxxii
Tabla 5-5 Comparación con otras micropinzas.	lxxxvii
Tabla 5-6 Comparación con otras micropinzas.	lxxxviii



CAPÍTULO 1.- INTRODUCCIÓN

En este capítulo se presentan los objetivos particulares y general, así como la justificación de esta investigación, posteriormente se presenta también la distribución de los capítulos de esta Tesis.



CAPÍTULO 1.- INTRODUCCIÓN

1.1.- Introducción

En los últimos años, los Sistemas Microelectromecánicos (MEMS por sus siglas en inglés), se han convertido en un componente vital dentro de una amplia gama de tecnologías, lo que hace que el estudio de su rendimiento y fiabilidad operativa sea un aspecto muy crítico para su correcta funcionalidad (Cauchi, Grech, Mallia, Mollicone, & Portelli, 2019). El progreso en la tecnología MEMS estimula continuamente nuevos desarrollos en la estructura mecánica de los microsistemas.

Las micropinzas forman parte de los MEMS. Ellas son ampliamente requeridas para la manipulación de entidades en escala micro y nanométricas. Gracias al rápido desarrollo de la ciencia y la tecnología en las últimas dos décadas, estos dispositivos han sido ampliamente estudiados.

Las aplicaciones clave de las micropinzas son: la manipulación de microobjetos en la ingeniería de tejidos o en procesos biológicos, el microensamblaje, etc., por lo que se han fabricado con diferentes especificaciones y capacidades por parte de los investigadores.

Las micropinzas accionadas por actuadores piezoeléctricos se han aplicado ampliamente en varios campos que requieren alta precisión.

A continuación, presentamos los antecedentes que motivan este trabajo.

1.2.- Antecedentes

En las últimas décadas, las micropinzas se han desarrollado ampliamente debido a su gran demanda en diversos campos en industria tecnológica. Esto, debido a las ventajas que representan su tamaño compacto y bajo costo. Tienen un papel importante en microensamblaje y micromanipulación, para elementos microelectromecánicos, células biológicas, etc. (Yukun & Qingsong, 2013).

La necesidad de manipulación de micro objetos, sin afectar su estructura o temperatura, motiva la creación de nuevas micropinzas, las cuales pueden ser accionadas por actuadores MEM.

La tecnología MEMS permite la fabricación de una amplia variedad de dispositivos de detección y actuación en miniatura, útiles en nuestra vida diaria. Los microdispositivos se aplican en varias áreas, entre ellas, la industria automotriz, periféricos de computadoras, impresoras, cámaras, video juegos, robótica, automatización, monitoreo ambiental, recursos energéticos, biológicos, tratamientos médicos, etc.

1.5.- Objetivo general

Diseñar una micro pinza basada en un actuador chevrón para sujeción de micro objetos, en un rango de amplitud entre 160 y 180 μm , mediante elementos flexibles.

1.5.1 Objetivos particulares

1. Seleccionar al material para la realización del diseño.
2. Diseñar el actuador chevrón que impulsará el movimiento de la pinza.
3. Diseñar a la micropinza basada en elementos flexibles.
4. Acoplar al chevrón con los brazos de la micropinza.
5. Realizar los ajustes correspondientes.

1.6.- Justificación

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.

1.7.- Limitaciones

- Se requiere un conocimiento profundo en el software Ansys™ Workbench, lo que hace necesaria la dedicación de tiempo para la familiarización y manejo de este mismo.
- La fabricación nivel micrométrico requiere de un alto costo de inversión, por lo que se prevé solo la simulación e impresión 3D para su validación experimental.
- No se cuenta con beca para la elaboración de la tesis.
- La contingencia sanitaria presentada SARS (COV-2), retrasa notablemente el avance de la investigación.

1.8.- Organización de la tesis

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

Capítulo 1. Este capítulo presenta como punto de partida la introducción, objetivo general, objetivos particulares la justificación y limitaciones de este trabajo de investigación.

Capítulo 2. En este capítulo se da una breve introducción sobre los MEMS. Se describen las geometrías y los principios de actuación del cantiléver y el chevrón, los cuales serán considerados como elementos básicos de la micropinza. Se presenta una breve descripción de las micropinzas, cuyo funcionamiento se basa en un actuador chevrón.

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

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

Capítulo 5. Se presenta el diseño completo y la simulación de la micropinza. Se lleva a cabo la comparación entre los resultados teóricos y los resultados de la simulación.

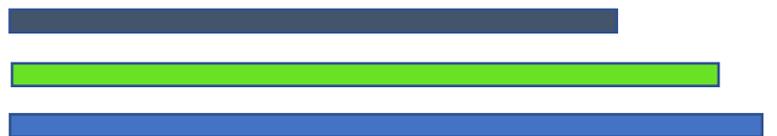
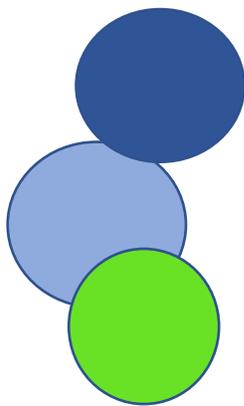
Capítulo 6. Se presentan las conclusiones y el trabajo futuro.

En este capítulo se establecieron principalmente los objetivos particulares y el objetivo general de esta investigación, así como una breve introducción, antecedentes justificación de la Tesis, limitaciones y finalmente la distribución de capítulos por desarrollar.

Three vertical bars of equal height are positioned on the left side of the page. From left to right, they are dark blue, light green, and medium blue.

CAPÍTULO 2. MARCO TEÓRICO

En este capítulo, se presenta una breve introducción acerca de los Sistemas Microelectromecánicos. Se muestran algunas micropinzas impulsadas por actuadores chevrón, los cuales se conforman por un arreglo de cantilévers.



CAPÍTULO 2. MARCO TEÓRICO

2.1.- Sistemas Microelectromecánicos

La investigación y el desarrollo de MEMS han progresado notablemente desde 1988 (Fujita, 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). Los MEMS combinan la función mecánica y eléctrica en dispositivos a escalas muy pequeñas. Los MEMS pueden actuar como sensores, recibiendo información de su entorno o como actuadores, respondiendo a una decisión del sistema de control de cambiar el entorno (ITRS. International technology roadmad for semiconductor: Micro-Electro-Mechanical System (MEMS). 2013 Edition., 2020)

Los actuadores MEM más comunes y utilizados son: micropinzas, acelerómetros, sensores de presión, interruptores, dispositivos micro-ópticos, giroscopios, etc. Sus aplicaciones son muy variadas. Los dispositivos y sistemas MEM pueden formar parte de sistemas médicos, computacionales y de comunicaciones, entre otros.

Se presenta una línea del tiempo de la evolución, uso, y aplicaciones de los MEMS en algunas áreas de investigación como son Mecánica, Electrónica, Sensores, Equipo médico, Óptica y Materiales.

Tabla 2-1 Historia de los MEMS de algunas áreas de investigación (Fujita H. , 1998).

Año	Materiales	Mecánica	Electrónica	Sensores	Óptica	Equipo medico
1948			Inención del transistor de germanio en los laboratorios Bell. (William Shockley)			
1954	Efecto piezoresistivo en germanio y silicio (C.S. Smith)					
1958			Primer circuito integrado (IC) (J.S. Kilby 1958 / Robert Noyce 1959)			
1959				Primer sensor de presión de silicio demostrado (Kulite)		
1968			Transistor de puerta resonante patentado (proceso de micromaquinado de superficie) (H. Nathanson)			
1970	Obleas de silicio grabadas a granel son utilizadas como sensores de presión.					
1971			Se inventa el microprocesador.			
1982	"El silicio como material estructural", K. Petersen		El proceso LIGA es un proceso utilizado para la fabricación de microsistemas (KfK, Germany)			Transductor de presión arterial

1983				Sensor de presión integrado (Honeywell)		
1985				Sensor o sensor de choque (Bolsa de aire)		
1986	Unión de obleas de silicio (M. Shimbo)					
1987	Se implementa el polisilicio			Servo acelerómetro de retroalimentación		
1988	Se implementa la deposición de vapores químicos (CVD) de tungsteno	Motores de accionamiento lateral electrostáticos rotativos (Fan, Tai, Muller)		<ul style="list-style-type: none"> • Batch fabricó sensores de presión mediante unión de obleas (Nova Sensor) • Interruptor de aceleración de presión 		Sistema de fusión y manejo de células
1989	<ul style="list-style-type: none"> • ZnO 				Interruptor de fibra óptica con SMA	
1990	<ul style="list-style-type: none"> • GaAs • TiNi (SMA) 			Sensor de tuneado electrónico		
1991	<p>Bisagra de polisilicio (Pister, Judy, Burgett, Miedo)</p> <p>Diamante como película de carbono</p> <p>Se descubre el nanotubo de carbono</p>	Se implementan las micropinzas y el teleoperador para nano escala	Propuesta de MEMS integrados		<ul style="list-style-type: none"> • Codificador óptico • Interruptor de fibra óptica electromagnética 	
1992		Micromaquina do a granel	<ul style="list-style-type: none"> • Unión para integrar sensor • Modulador de luz de rejilla 			
1993	MCNC crea el servicio de fundición MUMPS		Batería recargable de película delgada	<ul style="list-style-type: none"> • Giroscopio • Motor electromagnético • Distribución electrostática • Primer acelerómetro micromecanizado de superficie en producción de alto volumen. 		

1994	<ul style="list-style-type: none"> • Película de flourocarbono • Película magneto magnetostriectivo 		Conjunto de células solares	Actuador/circuito integrado	Manipulación laser	
1995		Mecanizado de auto alineador				<ul style="list-style-type: none"> • Micro óptica de espacio libre • Láser de cavidad externa sintonizable • Escáner de rejilla
1996	Película de imán permanente Richard Smalley desarrolla una técnica para producir nanotubos de carbono uniformes	Micro dispositivo para pruebas de material	Motor controlado ASIC	Oscilador microfluidico		<ul style="list-style-type: none"> • Micro disco óptico • Escáner por estructura de bisagra
1997			IC/sensor adelgazado Bobina integrada para alimentación inductiva	Microposicionador angular	Alineador xyz	
1999					Conmutador de red óptica	
2000	<ul style="list-style-type: none"> • El número de dispositivos y aplicaciones MEMS aumenta continuamente • Auge de MEMS óptico de los años 2000 • Las aplicaciones y la tecnología NEMS crecen 					

2.2.- Micropinza

En los últimos años, las micropinzas han sido aplicadas ampliamente en funciones de microensamblaje y micromanipulación. Actúan como un elemento clave para manipular objetos frágiles, como células vivas, piezas micromecánicas, entre otros objetos, con alta precisión (Yukun, Nimping, & Qingsong, 2014). Permiten la sujeción, el traslado, el posicionamiento y

colocación de distintos microobjetos. Los principios de actuación de las micropinzas son básicamente: electrostático, térmico, aleaciones por memoria de forma, electrotérmica, piezoeléctrico entre otras (Khazaai, 2013).

Todas las micropinzas se desarrollan con diferentes diseños y diferentes tipos de actuadores para controlar la pinza (Evans, Griffiths, & Fahmy, 2020). Una micropinza estándar normalmente consiste en un par de mordazas de agarre, un mecanismo actuador y un método de amplificación.

Las micropinzas pueden ser actuadas por diferentes tipos de actuadores, entre ellos el actuador tipo U y el actuador chevrón, siendo más común este último. Con relación a micropinzas actuadas por chevrón, se presenta un resumen de las más representativas halladas, en la Tabla 2-2 y 2-4.

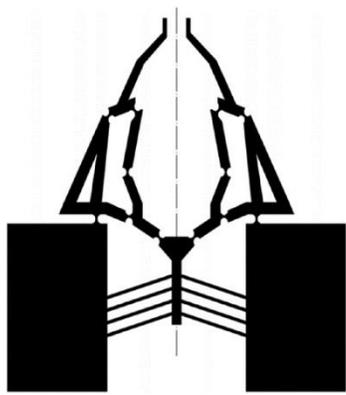
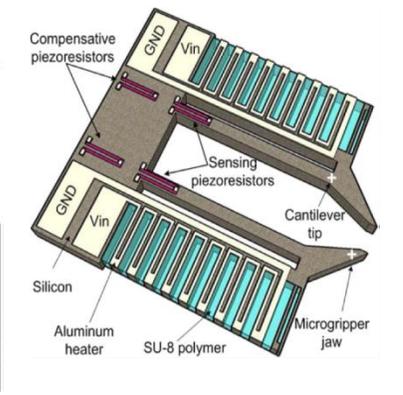
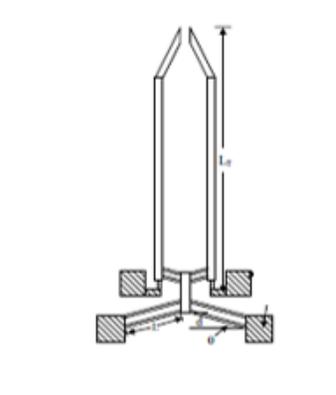
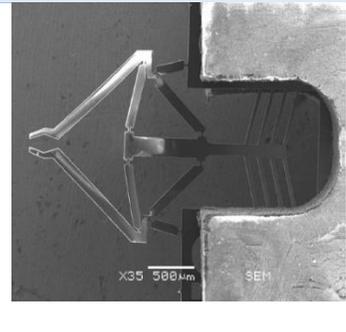
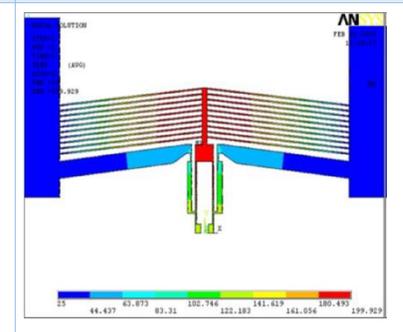
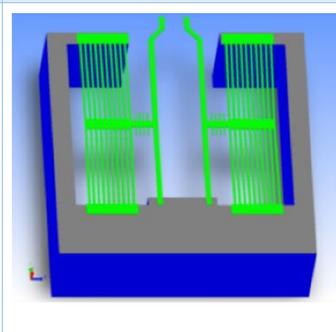
Tabla 2-2 Descripción de parámetros fundamentales de algunas micropinzas electrotérmicas impulsadas por un actuador chevrón

	Nombre	Desplazamiento total (μm)	Fuerza (μN)	Dimensiones	Apertura entre mandíbulas (μm)	Material	Alimentación	Referencia
1	Micropinza electrotérmica impulsada por un actuador chevrón.	80	~200	2900 x 3500 x 45	20-137.5	SU-8	53 mV	(Chu, Zhang, & Chen, 2011)
2	Micropinza electrotérmica con mandíbula grande y sensores de fuerza integrados.	32	135		8-40	Si	4.5 V	(Chu Duc, Lau, & Creemer, 2008)
3	Micropinza electrotérmica con dos actuadores	38		1100x400x150	1-20	Ni	0.4 V	(Luo, Flewitt, Spearing, Fleck, & Milne, 2005)

	chevrón invertidos							
4	Micropinza SU-8 electrotérmica impulsada por actuado chevrón.	143	242	1670x500	30-101.5	SU-8	195 mV	(Zhang, Chu, Wang, & Chen, 2013)
5	Micropinza electrotérmica con microactuador chevrón	1.39		102 x 35 x 1		SU-8	28 mA	(Won, y otros, 2009)
6	Micropinza con dos chevrónes laterales	19.2	17	870x500x25		Polisilicio	1 V	(Shivhare, Uma, & M. Umapathy, 2015)
7	Micropinza electrotérmica con sensor de contacto capacitivo integrado	39.46		4.58mmx2.233mm	21-100	Ni	0.7 V	(Ali, Shakoor, & Hassan, 2011)
8	Micropinza SU-8 basada en actuadores electrotérmicos chevrón	70.5		1130x650	10-70.5	S-8	0.74	(Voicu, Tibeica, Müller, & Dinescu, 2017)
9	Micropinza metálica utilizando vibración para liberar nano objetos activamente	2.26	12.9	300x220x150		Ni	1.4	(Demaghsi, Mirzajani, & Ghavifekr, 2013)
10	Micropinza electrotérmica en celda de microensamblaje	110-160		1240x800x20	110	Si	25 V	(Vatan & Hamedi, 2020)
11	Micropinza electrotérmica de diferentes materiales sobre el rendimiento de Chevrón.	16.2		1015x520x10		Aluminio	0.2 V	(Aravind, Ramesh, Ramya, Praveenkumar, & Kalaiarasi, 2016)

12	Micropinza basada en SU-8 accionada electrotérmica mente para aplicaciones biomédicas.	30		1112 x 759 x 20	3-10	SU-8	50 mV	(Abbas, Masood, Saleem, & Sheikh, 2018)
13	Micropinza electrotérmica con actuadores de dos ejes y sensores de fuerza.	19.2	17 mN		5-22.07	Silicio sobre aislante	1.2 V	(Qu, Zhang, Jung, Silva-Da Cruz, & Liu, 2017)

Tabla 2-3 Imágenes de las micropinzas descritas en la tabla 2-2

		
<p>1 (Chu, Zhang, & Chen, 2011)</p>	<p>2 (Chu Duc, Lau, & Creemer, 2008)</p>	<p>3 (Luo, Flewitt, Spearing, Fleck, & Milne, 2005)</p>
		
<p>4 (Zhang, Chu, Wang, & Chen, 2013)</p>	<p>5 (Won, y otros, 2009)</p>	<p>6 (Shivhare, Uma, & M. Umopathy, 2015)</p>

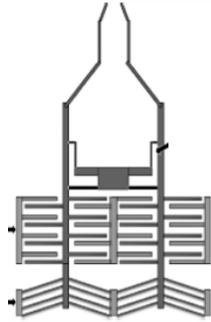
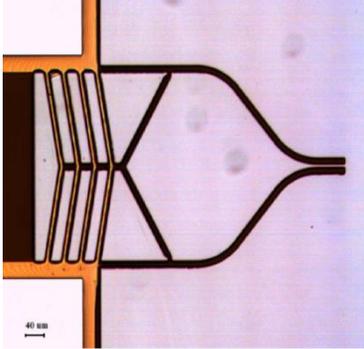
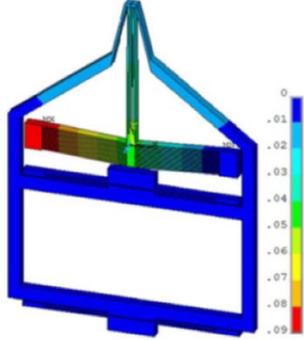
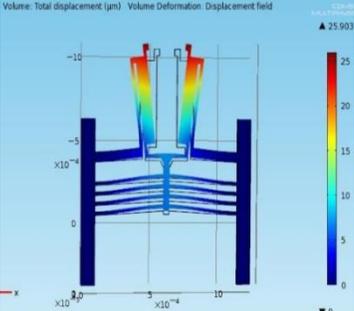
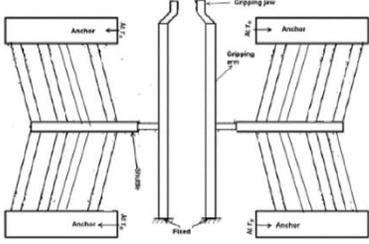
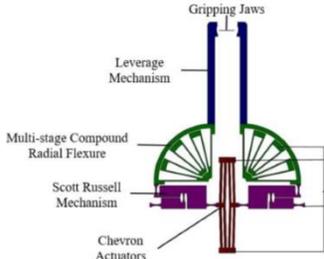
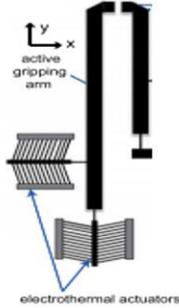
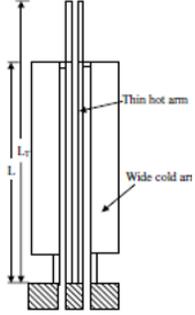
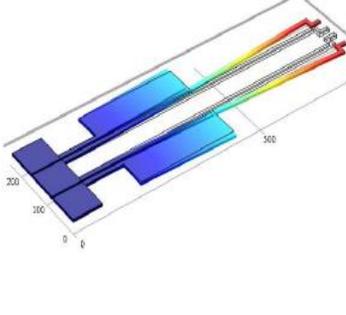
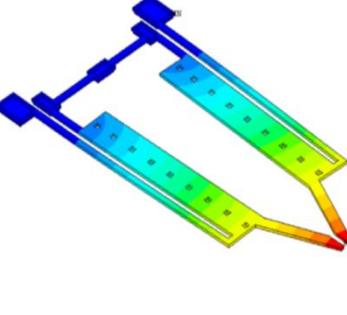
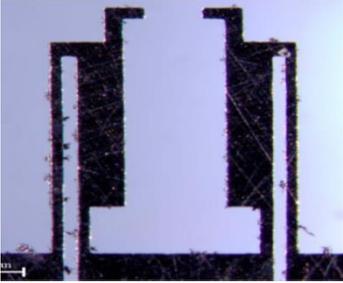
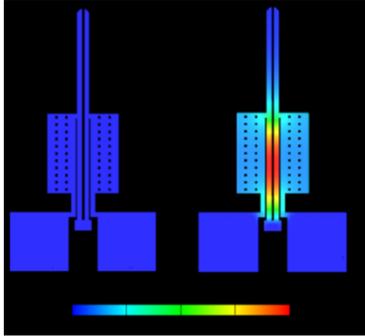
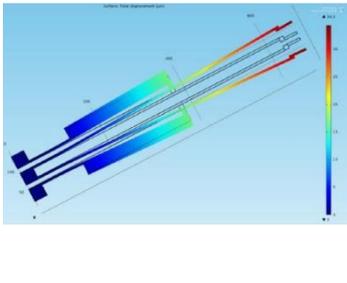
		
<p align="center">7 (Ali, Shakoor, & Hassan, 2011)</p>	<p align="center">8 (Voicu, Tibeica, Müller, & Dinescu, 2017)</p>	<p align="center">9 (Demaghsi, Mirzajani, & Ghavifekr, 2013)</p>
		
<p align="center">10 (Vatan & Hamedi, 2020)</p>	<p align="center">11 (Aravind, Ramesh, Ramya, Praveenkumar, & Kalaiarasi, 2016)</p>	<p align="center">12 (Abbas, Masood, Saleem, & Sheikh , 2018)</p>
	<p align="center">13 (Qu, Zhang, Jung, Silva-Da Cruz, & Liu, 2017)</p>	

Tabla 2-4 Descripción de parámetros fundamentales de algunas micropinzas electro térmicas con actuador tipo U

	Nombre	Desplazamiento (μm)	Fuerza (mN)	Dimensiones (μm)	Apertura entre mandíbulas (μm)	Materiales	Alimentación	Referencia
1	Micropinza electotérmica con actuador tipo U.	60		400x12x10	20	Ni	1 V	(Luo, Flewitt, Spearing, Fleck, & Milne, 2005)
2	Micropinza electotérmica de polisilicio para Manipulación de microobjetos	11.08		705x235x5	15	Polisilicio	3 V	(Pahwa, Gupta, Bansal, Prasad, & Kumar, 2012)
3	Micropinza electotérmica	9.1	36	277x100	10.9-20	SU-8	14 V	(Wang, Shen, & Chen, 2014)
4	Micropinza electotérmica	10.072		480x25	20	Silicio	10 V	(Kolahdoozan , Rouhani, & Hassani, 2017)
5	Micropinza electotérmica con viga voladiza	2		200x67	5-9	Multilayer fabrication - PolyMUMPs	3V	(Cauchi, Grech, Mallia, Mollicone, & Sammut, 2018)
6	Micropinza electotérmica con viga voladiza	34.3 55			110	Structural Steel Ti beta 21S	8 V	(Bharadwaj & Ramesh, 2019)

Tabla 2-5 Imágenes de las micropinzas descritas en la tabla 2-4

		
<p style="text-align: center;">1 (Luo, Flewitt, Spearing, Fleck, & Milne, 2005)</p>	<p style="text-align: center;">2 (Pahwa, Gupta, Bansal, Prasad, & Kumar, 2012)</p>	<p style="text-align: center;">3 (Wang, Shen, & Chen, 2014)</p>
		
<p style="text-align: center;">4 (Kolahdoozan , Rouhani, & Hassani, 2017)</p>	<p style="text-align: center;">5 (Cauchi, Grech, Mallia, Mollicone, & Sammut, 2018)</p>	<p style="text-align: center;">6 (Bharadwaj & Ramesh, 2019)</p>

2.3.-Microactuador cantiléver

Se inicia desde la comprensión del funcionamiento de un cantiléver hasta la integración de varios elementos estructurales o dispositivos microactuadores para formar un chevrón y posteriormente una micropinza.

Un cantiléver es una viga anclada en una base, en cualquiera de sus extremos, denominada frecuentemente viga en voladizo. (Bindu, Kushal, & Potdar, 2011).

El microactuador cantiléver está conformado por una barra con una determinada longitud (L_b), así como un ancho (w_b) y un grosor (t) específico.

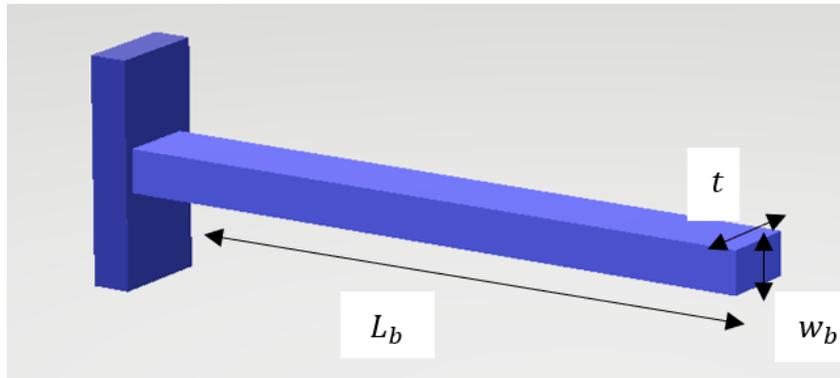


Figura 2-1 Microactuador cantiléver. Elaboración propia

2.3.1.- Modelado del microactuador cantiléver

La ley de Hooke da una relación entre la fuerza aplicada al desplazamiento. Así, la cantidad de la masa extra ejerce una fuerza sobre la viga en voladizo, por lo que aumenta el desplazamiento de la viga considerablemente (Jithendra Prasad & Shameem, 2016). La ley de Hooke se puede representar matemáticamente como:

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

Donde:

F = Fuerza [N].

k = Constante de rigidez [N/m].

x = Desplazamiento unidireccional [m].

La rigidez es un parámetro que involucra propiedades del material y de la geometría del dispositivo, puede obtenerse utilizando la ecuación 2.2 (Kaajakari, 2009):

$$k = \frac{EA}{L} \quad (2.2).$$

Donde:

E = Módulo de Young [GPa].

A = Área de sección transversal [μm^2].

L = Longitud del brazo [μm].

La tensión máxima está dada por la ecuación 2.3.

$$T_{MAX} = \frac{FLt}{2I} = \frac{3Et}{2L^2}x \quad (2.3).$$

Donde:

F = Fuerza [N].

L = Longitud del brazo [μm].

t = Grosor del brazo [μm].

E = Módulo de Young [GPa].

I = Momento de Inercia [m^4].

x = Desplazamiento [μm].

El momento de inercia, para el caso de un haz de ancho w y grosor t , se considera al grosor con dirección de la flexión, por lo tanto, se calcula de acuerdo con la ecuación 2.4 (Kaajakari, 2009):

$$I = \frac{wt^3}{12} \quad (2.4).$$

El desplazamiento del cantiléver es directamente proporcional al coeficiente de expansión térmica en relación con el cambio de temperatura que se produce.

$$U_{\Delta T} = \alpha L \Delta T \quad (2.5).$$

Donde:

α = Coeficiente de expansión térmica [$1/K$].

ΔT = Gradiente de temperatura [$^{\circ}C$].

L = Longitud del brazo [μm].

El valor resultante de la fuerza está relacionado directamente con el cambio de temperatura.

$$F = EA\alpha\Delta T \quad (2.6).$$

Donde dichas variables ya fueron descritas anteriormente.

2.4.- Microactuador chevrón

Un actuador chevrón consiste principalmente de un arreglo de “n” de brazos, anclados en sus extremos exteriores, con un ángulo de inclinación (θ), y una flecha, la cual tiene como objetivo el acoplamiento de los brazos. El actuador se calienta por el Efecto de Joule, debido al paso de corriente a través de la estructura, generada al aplicar una diferencia de potencial en los contactos anclados al substrato (anclas). Cuando los brazos se calientan, se expanden y tienden a deformarse para generar un movimiento lineal uniforme en la flecha. El ángulo predefinido de los brazos direcciona al movimiento de la flecha.

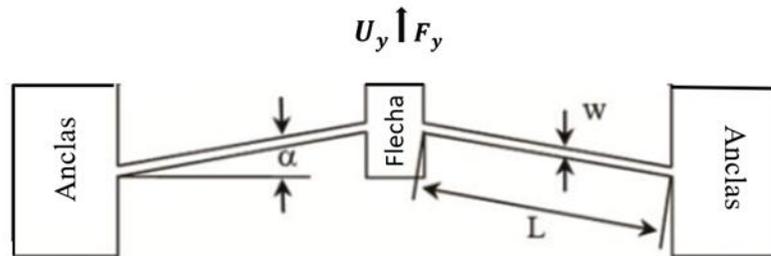


Figura 2-2 Microactuador Chevrón. Elaboración propia.

2.4.1.- Ecuaciones para el modelado matemático del microactuador chevrón

Las ecuaciones involucradas para el modelado matemático del dispositivo microactuador Chevrón Figura 2-2, son las que se describen a continuación:

Para el desplazamiento del chevrón de dos brazos, con un gradiente de temperatura ΔT se utilizaron las ecuaciones 2.6 y 2.7 (Yong, Corigliano, & D Espinosa, 2006).

$$U^{\Delta T} = \alpha \Delta T L \frac{s}{(s^2 + c^2 \frac{12I}{AL^2})} \quad (2.7).$$

$$U^{\Delta T} = \alpha \Delta T L \frac{s}{s^2 + \frac{c^2}{\psi}} = \frac{Fl}{EA} \frac{1}{2(s^2 + \frac{c^2}{\psi})} \quad (2.8).$$

Donde ψ , es el parámetro adimensional y se define como:

$$\psi = \frac{Al^2}{12I} \quad (2.9).$$

Donde:

α : Coeficiente de expansión térmica [1/K].

s : Seno del ángulo de apertura de cada brazo.

c : Coseno del Angulo de apertura de cada brazo.

I : Momento de inercia [m^4].

ΔT : Gradiente de temperatura [$^{\circ}C$].

E : Módulo de Young [GPa].

$U^{\Delta T}$: Desplazamiento con un gradiente de temperatura [μm].

ψ : Relación de rigidez axial sobre flexión.

L : Longitud del brazo [μm].

Para obtener la fuerza del microactuador chevrón se utilizó la ecuación 2.10.

(Espinosa, Zhu, & Moldovan, 2007)

$$F_y = N\alpha EA\Delta T \sin(\theta) \quad (2.10).$$

Donde:

N : Número de brazos [Adimensional].

α : Coeficiente de expansión térmica [1/K].

A : Área de sección transversal [μm^2].

ΔT : Gradiente de temperatura [$^{\circ}\text{C}$].

Θ : Ángulo de inclinación [$^{\circ}$].

E : Módulo de Young [GPa].

Para el análisis del desplazamiento para un actuador chevrón de “N” brazos se presenta la ecuación 2.11 (Vargas-Chable, Tecpoyotl-Torres, Robles-Casolco, & Cabello-Ruiz, 2015)

$$U_y = \frac{F_y}{N\left(s^2 \frac{EA}{L} + c^2 \frac{12EI}{L^3}\right)} \quad (2.11).$$

Donde:

α : Coeficiente de expansión térmica [1/K].

ΔT : Gradiente de temperatura [$^{\circ}\text{C}$].

L : Longitud del brazo [μm].

E : Módulo de Young [GPa].

A : Área de sección transversal [μm^2].

N : Número de brazos [Adimensional].

F_y = Fuerza del microactuador chevrón [N].

La relación K_{tb} representa la rigidez del haz térmico y está dado por la ecuación 2.12 (Yong, Corigliano, & D Espinosa, 2006).

$$K_{tb} \equiv \frac{F}{U^F} = 2\left(s^2 + \frac{c^2}{\psi}\right) \frac{EA}{L} \quad (2.12).$$

Para obtener el factor de amplificación de desplazamiento se presenta la ecuación 2.13, (Verotii & Belfiore, 2017), (Nikoobin & Hassani Niaki, 2012):

$$DAF = \frac{d_2}{d_1} \quad (2.13).$$

Donde d_1 corresponde al desplazamiento del microactuador y d_2 al desplazamiento total entre las puntas.

Una manera alternativa de obtener el factor de amplificación de desplazamiento es utilizando la ecuación 2.14 (Mohd Zubir, Shirinzadeh, & Tian, 2009).

$$K = \frac{S}{X_p} \quad (2.14).$$

Donde S corresponde al desplazamiento de salida y X_p es la tensión máxima permitida para el mecanismo.

Con relación al estado del arte, se reportan factores de amplificación en un rango de 2.85 y 50 (Verotii & Belfiore, 2017), (Evans, Griffiths, & Fahmy, 2020), para pinzas

piezoeléctricas aplicando voltajes de 0 a 700 V, obteniéndose fuerzas resultantes en un rango de $1\mu\text{N}$ a 1.87 N.

2.5.- Actuador tipo U

El actuador en forma de U es un dispositivo microelectromecánico (MEM), se ha utilizado para diseñar y construir distintas micropinzas, consiste principalmente en dos vigas unidas en forma de línea, donde una de ellas es delgada (brazo caliente) y la otra es ancha (brazo frío) (Qiu, Lang, Slocum, & Weber, 2005). Están restringidos por dos anclas: Una viga más pequeña, llamada flexión, se encuentra entre la viga ancha y su ancla correspondiente, cuando fluye la corriente eléctrica, la mayor densidad de corriente eléctrica es debido a las dimensiones reducidas del actuador, provoca una disipación de calor, y la expansión térmica del brazo caliente reduce la brecha entre ambos brazos, a través del movimiento transversal que es producido por una acción de arqueo mecánico del brazo caliente hacia el brazo frío.

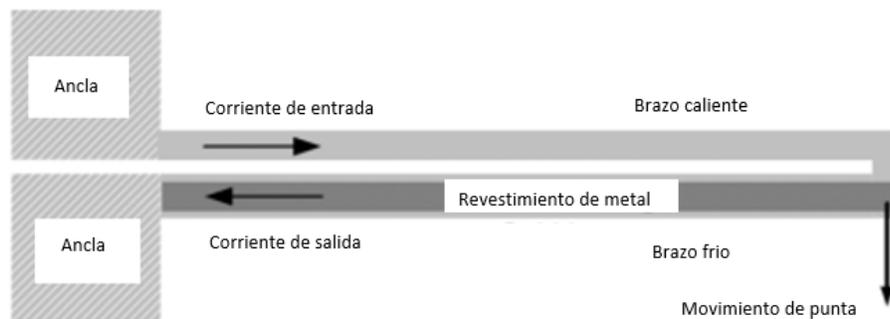


Figura 2-3 Microactuador tipo U (Qiu, Lang, Slocum, & Weber, 2005)

2.6.- Actuador Z-Beam

Los actuadores en forma de V y Z comparten características comunes entre sí, ambos están configurados simétricamente y son capaces de producir movimiento rectilíneo. Por otro lado, los actuadores en forma de V se basan principalmente en la extensión del haz, mientras que los actuadores en forma de Z se basan principalmente en la flexión del haz para lograr un movimiento rectilíneo (Zhang, Yu, Liu, & Zhang, 2015). Esto lleva a las diferencias tanto en la operación como en el rendimiento. Sin embargo, pocos estudios han abordado el problema de comparación de rendimiento de las dos configuraciones de actuadores.

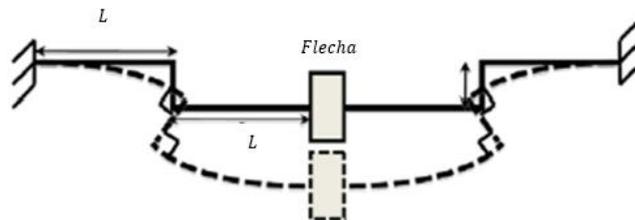


Figura 2-4 Microactuador tipo Z (Guan & Zhu, 2010)

2.7.- Principios de actuación

Cuando se desarrolla una nueva micropinza, la elección del actuador es una parte fundamental del proceso de diseño. El actuador es el componente de la micropinza que aplica la fuerza a la estructura y ejerce el impulso para permitir que las mandíbulas se abran y cierren.

A lo largo del desarrollo de las micropinzas, se han probado varias tecnologías para encontrar el más eficiente tipo de actuación, tales tipos de actuación son los siguientes; piezoeléctrico, electromagnético,

electrostático, electrotérmico, y aleaciones con memoria de forma (SMA). Por lo tanto, a continuación, se describen cada una de ellas y finalmente se implementará una tabla con sus respectivas ventajas y desventajas.

2.7.1.- Electrostático

Las micropinzas accionadas electrostáticamente se utilizan aplicando un voltaje positivo y negativo a dos elementos de la micropinza que posteriormente se atraen o repelen entre sí, esto debido a la fuerza electrostática creada.

Normalmente se requieren grandes separaciones de electrodos y altos voltajes de accionamiento para lograr grandes movimientos del actuador (Conrad, y otros, 2015). Ofrecen la respuesta de frecuencia más alta con el consumo de energía más bajo. Sin embargo, requieren un voltaje de funcionamiento alto y sus formas para micropinza son muy complicadas ya que tiene muchos accionamientos de peine para aumentar la fuerza (Wang, 2015).

La actuación electrostática genera una cantidad satisfactoria de fuerza de salida, pero es difícil de operar en líquidos ricos en iones (Alogla, y otros, 2018), confían en fuerzas atractivas entre conductores con carga opuesta en proximidad.

2.7.2.- Electromagnética

Las micropinzas accionadas por electromagnetismo utilizan electroimanes para abrir y cerrar la mandíbula de la pinza. El ensamblaje más común de este tipo de actuador es colocar en el centro, dos brazos y mandíbulas magnéticas. La corriente eléctrica es conducida a través del electroimán y a medida que se incrementa, los brazos magnéticos son atraídos hacia ella y el tamaño de la apertura de las puntas de la pinza disminuye (Llewellyn-Evans, Griffiths, & Fahmy, 2020). Las limitaciones de los actuadores electromagnéticos están relacionadas con las pequeñas dimensiones de los microaccionadores electromagnéticos que implican un calentamiento

rápido de la bobina debido al efecto Joule y las bajas corrientes permitidas, el resultado del campo magnético es generalmente débil y está sujeto a fugas relevantes, dando una pequeña potencia por unidad de volumen (Iamoni & Somà, 2014).

2.7.3.- Electrotérmico

El actuador electrotérmico se basa en la expansión térmica de los brazos de agarre debido al efecto Joule en presencia de corrientes eléctricas, que tienen muchas ventajas, como una gran deformación, una gran fuerza de recuperación, un bajo voltaje de conducción y una estructura compacta y con estas ventajas, se han desarrollado muchas micropinzas térmicas (Wang, 2015).

Las limitaciones de los actuadores electrotérmicos están relacionadas con la alta temperatura en la región cercana a los objetos de agarre, por lo que deben usarse brazos de agarre largos que disipan el calor producido por los actuadores. Se estudian ampliamente para la manipulación celular, aunque muestran muchas dificultades cuando se usan, ya que la temperatura máxima permitida para la manipulación de células humanas en muchas aplicaciones es de alrededor de 37 ° C (Iamoni & Somà, 2014).

Los actuadores electrotérmicos tienen aplicaciones prometedoras en MEMS, ya que se ha demostrado que son aparatos de accionamiento compactos, estables y de alta fuerza. Se han desarrollado en una variedad de configuraciones para movimientos dentro o fuera del plano (Zhang, Yu, Liu, & Zhang, 2015).

2.7.4.- Piezoeléctrico

Los actuadores piezoeléctricos tienen una fuerte salida no lineal, alto voltaje de suministro, rango de movimiento pequeño, baja resistencia a los fenómenos de fluencia y fatiga mecánica, histéresis (tendencia de un material a conservar una de sus propiedades, en ausencia del estímulo que la ha generado) y problemas de biocompatibilidad.

La actuación piezoeléctrica ofrece alta velocidad y buena resolución de movimiento, pero los desplazamientos de actuación son limitados y los voltajes aplicados necesarios pueden dañar los sistemas biológicos (Alogla, y otros, 2018).

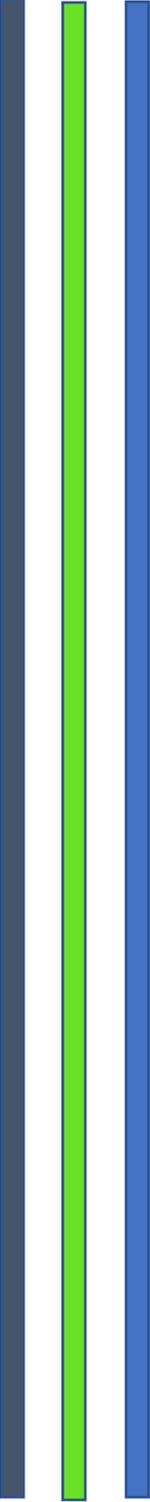
2.7.5.- Aleación por memoria de forma (SMA)

Se ha demostrado que las micropinzas accionadas por SMA pueden producir grandes valores de desplazamiento de la mandíbula y fuerza de agarre (Llewellyn-Evans, Griffiths, & Fahmy, 2020). Las aleaciones con memoria de forma (SMA) pueden cambiar sus características cuando se aplica calor. El material es capaz de modificar su forma y tamaño a elevadas temperaturas y vuelve a su posición original cuando se elimina el calor (Kawamoto & Tsuji, 2011).

Tabla 2-6 Ventajas y desventajas de los diferentes tipos de actuación. (Yang & Xu, 2017), (Llewellyn-Evans, Griffiths, & Fahmy, 2020)

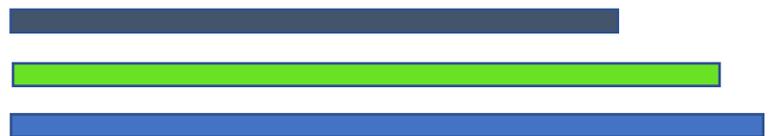
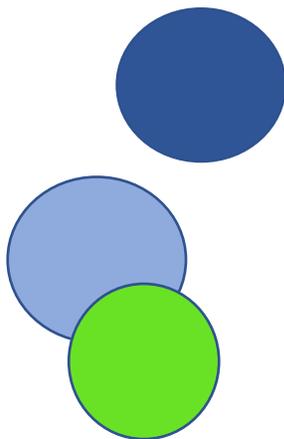
<i>Tipo de actuación</i>	<i>Ventajas</i>	<i>Desventajas</i>	<i>Principio de funcionamiento</i>
<i>Electromagnético</i>	<ul style="list-style-type: none"> • Desplazamiento alto • Alta precisión • Fácil de controlar • Gran desplazamiento de la mandíbula • Respuesta rápida • Respuesta lineal 	<ul style="list-style-type: none"> • Dimensión relativamente grande • Difícil de fabricar • Se requieren componentes grades • Alta temperatura de funcionamiento • Impacto de campos magnéticos externos. 	Efecto de magnetización
<i>Piezoeléctrico</i>	<ul style="list-style-type: none"> • Buen ancho de banda de operación • Gran fuerza aplicada 	<ul style="list-style-type: none"> • Bajo desplazamiento 	Efecto piezoeléctrico

	<ul style="list-style-type: none"> • Buen relación potencia/peso • Alta precisión de desplazamiento • Bajo consumo de energía • Desplazamiento predecible • Respuesta rápida. 		
<i>Electrostático</i>	<ul style="list-style-type: none"> • Respuesta de frecuencia rápida • Bajo consumo de energía 	<ul style="list-style-type: none"> • Circuito complicado • Gran dimensión • Alto voltaje • Baja fuerza de agarre 	Fuerza electrostática
<i>Electrotérmico</i>	<ul style="list-style-type: none"> • Desplazamiento grande • Baja dimensión de voltaje 	<ul style="list-style-type: none"> • Alta temperatura de trabajo • Tiempo de respuesta lento • Respuesta no lineal 	Expansión térmica
<i>Aleación de memoria de forma</i>	<ul style="list-style-type: none"> • Respuesta de frecuencia rápida • Bajo consumo de energía • Desplazamiento de las mandíbulas alta • Alta fuerza de agarre 	<ul style="list-style-type: none"> • Gran consumo de energía • Tiempo de respuesta lento. 	Deformación de materiales



CAPÍTULO 3. METODOLOGÍA

En este capítulo, se presentará la metodología seguida en esta tesis, la cual involucra al proceso de diseño y simulación del sistema formado por la micropinza.



CAPÍTULO 3. METODOLOGÍA

3.1.- Metodología de la tesis

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

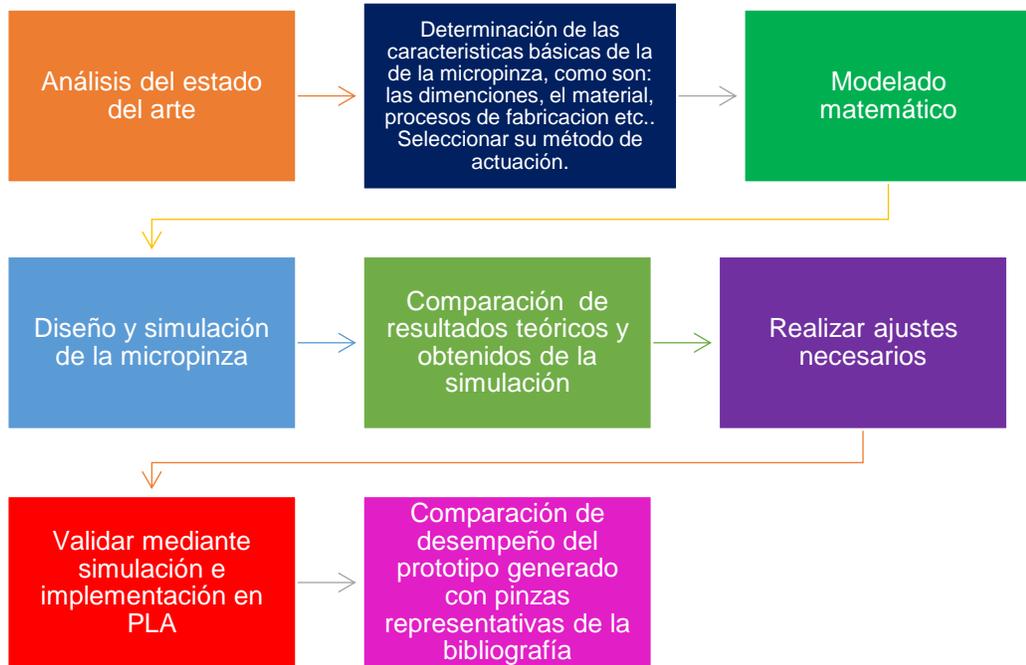


Figura 3-1 Metodología general

De acuerdo con la Figura 3-1, se puede observar el proceso general que se llevó a cabo en esta investigación, partiendo del análisis del estado del arte, en donde se realizó una búsqueda del comportamiento de varias micropinzas electro térmicas impulsadas por un actuador chevrón. Posteriormente, en la determinación de los componentes básicos para el desarrollo de la micropinza se especificaron sus dimensiones, el material a utilizar, el principio de actuación y su proceso de fabricación.

El modelado matemático, consistió principalmente en obtener resultados analíticos y simulados, donde se realizó un código en el sistema de cómputo

numérico Matlab para los cálculos teóricos, y compararlos con los resultados obtenidos mediante simulación y, así obtener un porcentaje de error aceptable. En caso de no tener un porcentaje de error aceptable, se realizan los ajustes correspondientes.

En el caso de la validación por simulación e implementación de impresión 3D, se realizan las pruebas necesarias a escala por impresión 3D.

3.1.2.- Proceso de diseño y simulación de la micropinza y sus respectivos componentes en ANSYS.

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

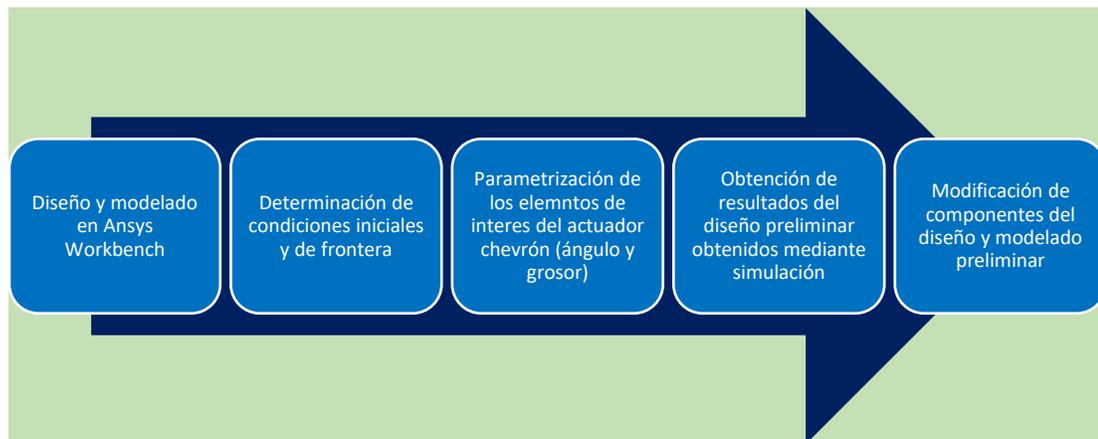


Figura 3-2 Proceso de diseño en ANSYS

De acuerdo con la figura 3-2, se inicia con el diseño y modelado en ANSYS Workbench. Posteriormente, se determinan las condiciones iniciales y de frontera, se selecciona también a la fuente de alimentación, que en este caso es de 0 a 2 Volts, generando una temperatura máxima de 112 °C y un gradiente de temperatura ΔT de 90 °C, debido al efecto de Joule. Cabe señalar que, se considera como temperatura inicial a la temperatura ambiente (22 °C).

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

3.1.3.- Proceso de obtención de resultados numéricos

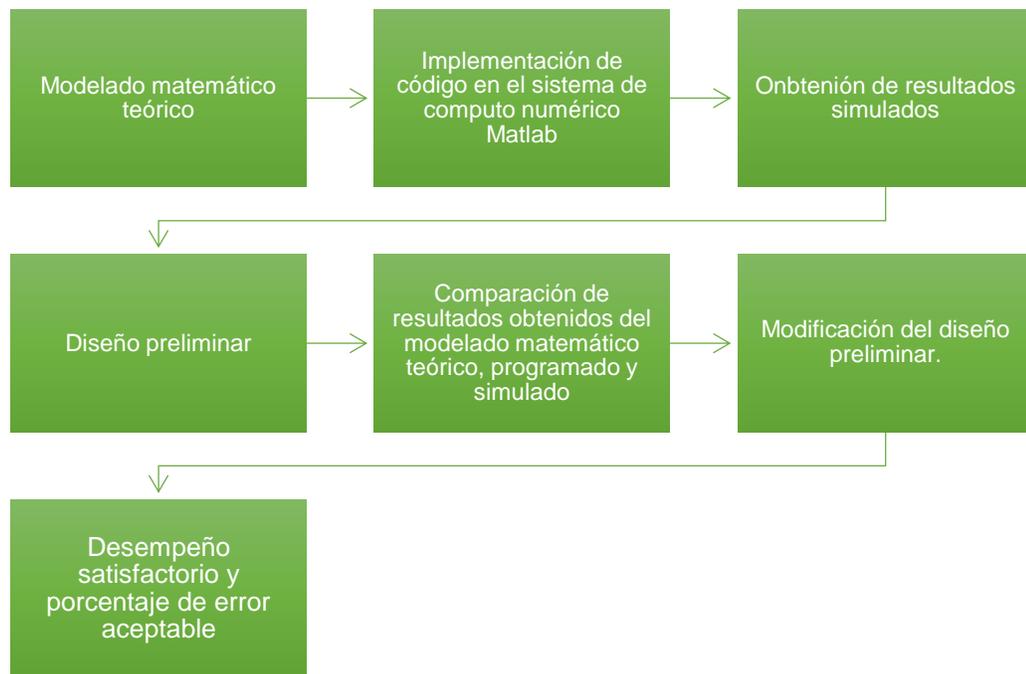


Figura 3-3 Diagrama de obtención de resultados numéricos

Posteriormente, se realiza el modelado matemático teórico, desarrollando un programa en el software Matlab para obtener resultados analíticos, y compararlos con los resultados obtenidos al término de la simulación del software ANSYS™ Workbench, y obtener un porcentaje de error aceptable. De lo contrario, se realizarán las modificaciones y correcciones correspondientes.

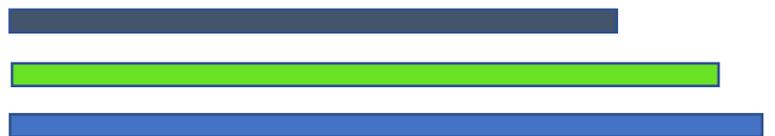
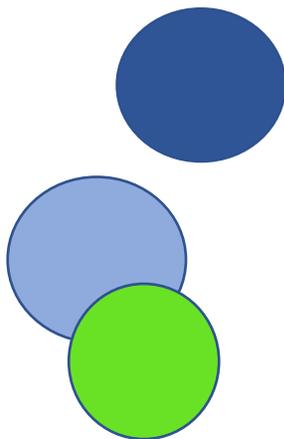
En este capítulo se determinaron las metodologías a llevar a cabo durante el desarrollo de la investigación de acuerdo con cada procedimiento.



CAPÍTULO 4. DISEÑO, SIMULACIÓN Y CARACTERIZACIÓN DEL CANTILIVER Y EL ACTUADOR CHEVRÓN

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

Se realizará la comparación entre los resultados obtenidos de manera analítica, con los resultados obtenidos mediante programación y simulación.



CAPÍTULO 4. DISEÑO, SIMULACIÓN Y CARACTERIZACIÓN DEL CANTILIVER Y EL ACTUADOR CHEVRÓN

4.1.- Proceso de diseño del cantiléver

4.1.1.- Software utilizado

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

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

4.2.- Características del material a utilizar

4.2.1 Especificación de material

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

Diferentes materiales, como silicio, aleación de aluminio, acero inoxidable, latón y algunas aleaciones superelásticas, como el níquel-titanio (NiTi), se utilizan en las micropinzas. La compatibilidad entre las mordazas de agarre y los objetivos de sujeción en el área de contacto es otro factor importante. La selección del material adecuado también depende de condiciones de trabajo

especiales como, entornos biológicos o electrónicos. Además, el tipo de microaccionador puede ser determinante en el tipo de material de agarre. El silicio se usa a menudo en las micropinzas con un actuador electro térmico.

Para el diseño y simulación de la micropinza se utilizará silicio. El silicio es el segundo elemento más abundante de la corteza terrestre, después del oxígeno. Este material semiconductor se usa ampliamente en dispositivos de estado sólido en las industrias de computadoras y microelectrónica.

Los parámetros físicos y mecánicos del silicio, a utilizar en el análisis se presentan en la Tabla 4-1.

Tabla 4-1 Parámetros del silicio (Si) (Yang & Qingsong, 2017), (Ghatkesar, y otros, 2007).

Parámetro [unidad]	Descripción	Valor
ρ [kg/m³]	Densidad	2329
E [GPa]	Módulo de Young	130.1
α [1/K]	Coeficiente de expansión térmica	2.568 e-6
κ [W/ m*K]	Conductividad térmica	148
ν	Razón de Poisson	0.33
C_p [J/ kg*K]	Calor específico	712
ρ [Ω*m]	Resistividad	1.5 e-4
[°C]	Punto de Fusión	1414
[MPa]	Esfuerzo último	250

4.3.- Diseño y modelado del cantiléver

Para describir el proceso de diseño y modelado del cantiléver, se utilizó el software Ansys™ Workbench, donde se realizará dicho dibujo, utilizando las dimensiones de la Tabla 4-2 y los parámetros del material mostrados en la Tabla 4-1. Se obtendrán las simulaciones de fuerza y desplazamiento, para hacer la comparación de resultados analíticos y obtenidos de la simulación.

4.3.1.- Características del cantiléver

En seguimiento al diseño y modelado del cantiléver, se utilizaron las dimensiones mostradas en la Figura 4-1.

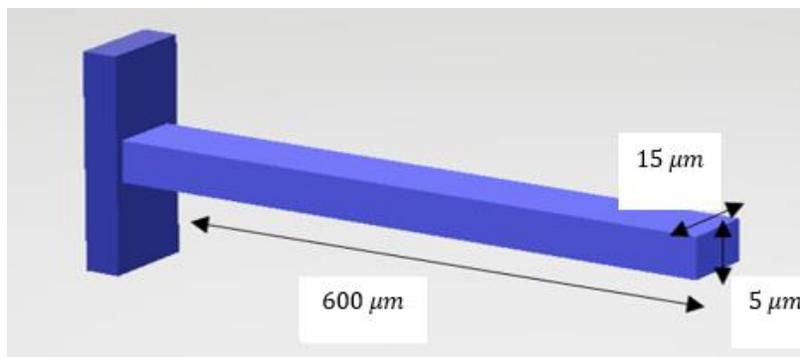


Figura 4-1 Diseño preliminar del cantiléver

La Figura 4-1, será el modelo de referencia para llevar a cabo la simulación del dispositivo.

Tabla 4-2 Dimensiones del cantiléver

Variable	Descripción	Tamaño [μm]
L_b	Largo del brazo	600
w_b	Ancho del brazo	5
t_b	Grosor del brazo	15

4.3.2 Selección del tipo de actuación del cantiléver

Debido a que el cantiléver a diseñar formará parte del actuador chevrón, sabemos que no será directamente alimentado por voltaje si no que será actuado por energía térmica. Por lo que, de pruebas previas se determinó que para un voltaje máximo de 2 V en su extremo fijo se genera una temperatura de 112 °C, por lo que, se utilizará este valor como el de la fuente térmica correspondiente a aplicar.

4.3.3.- Resultados de simulación

Se procede a realizar un nuevo diseño en Ansys Workbench, donde se utilizarán las dimensiones de la Tabla 4-2, donde posteriormente en el área de trabajo de Project de la página principal del software se agregará un Steady-state-thermal, en conjunto de dos Static structural, para simular y obtener el desplazamiento y fuerza, respectivamente mostada en la figura 4-2.

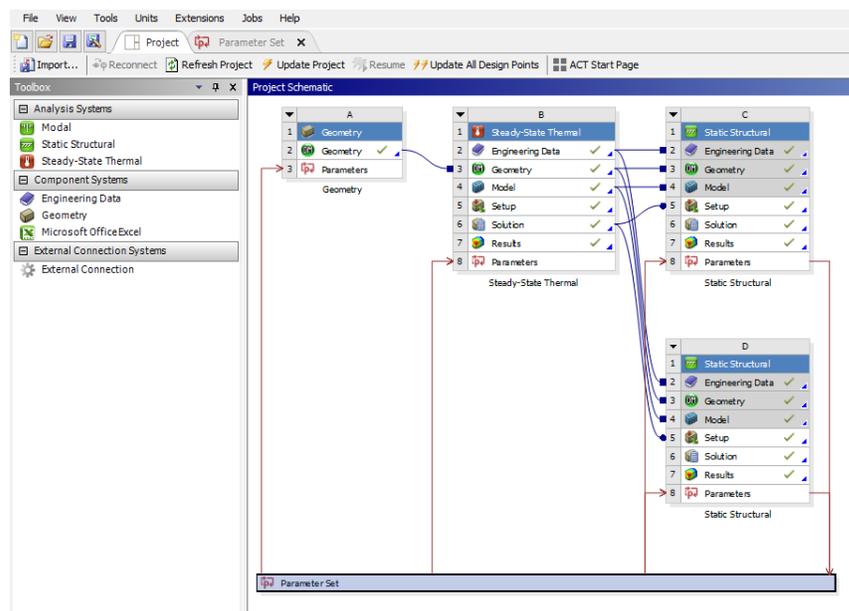


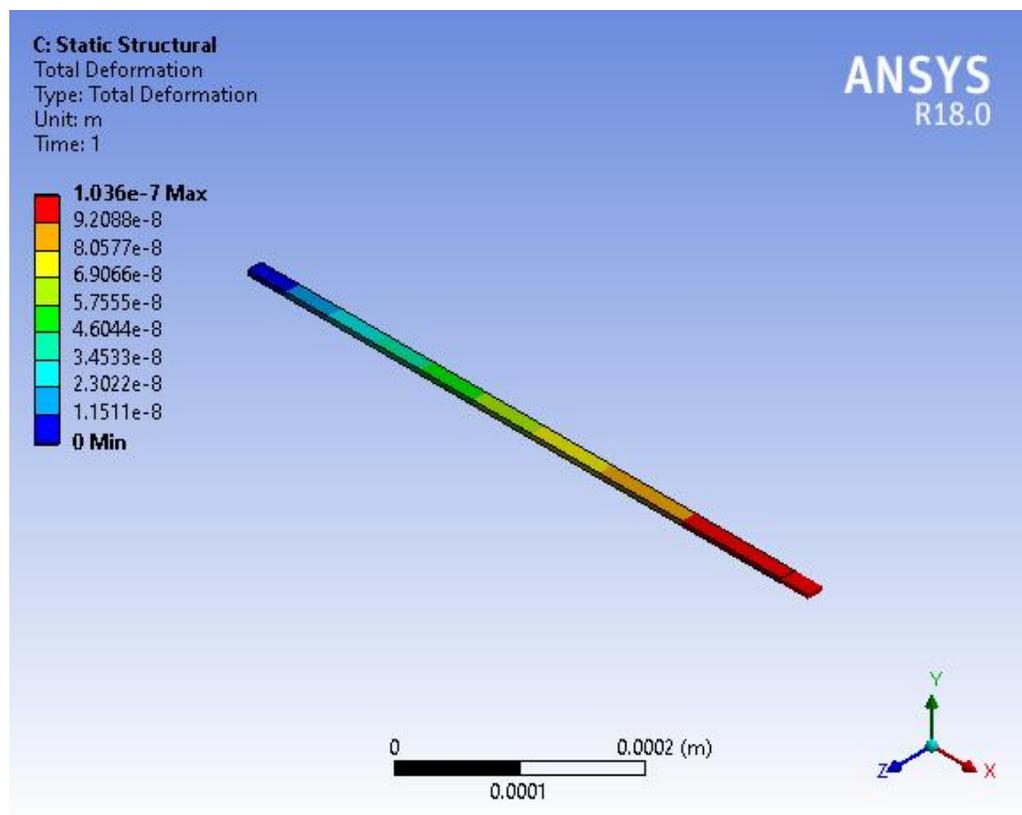
Figura 4-2 Árbol principal de simulación en el espacio de trabajo de Workbench

Posteriormente, se asignan las condiciones de frontera fijando los extremos del cantiléver.

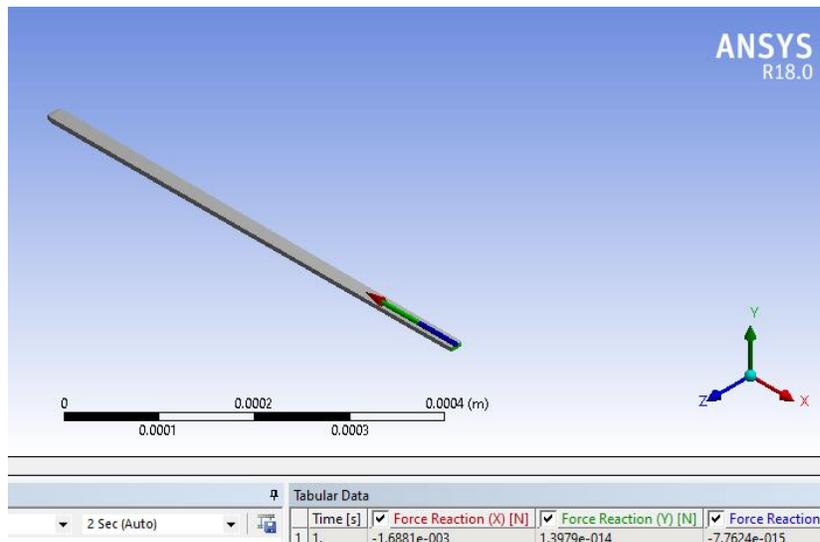
Se asigna un gradiente de temperatura ΔT ($112^{\circ}\text{C} - 22^{\circ}\text{C}$) = 90°C , como condición inicial.

Bajo las condiciones de frontera y con el gradiente de temperatura se obtienen la fuerza y el desplazamiento del dispositivo.

Posteriormente, se implementan dos parametrizaciones para conocer el comportamiento variando, el rango correspondiente al largo del brazo del cantiléver y a la variación de la temperatura.



a)



b)

Figura 4-3 Resultados de la simulación correspondientes al desplazamiento a), y b) a la fuerza.

Implementando la parametrización al largo del actuador, se obtienen los resultados para desplazamiento y fuerza, mostrados en la Figura 4-3, y en el área de trabajo de Parameter set (Figura 4-4).

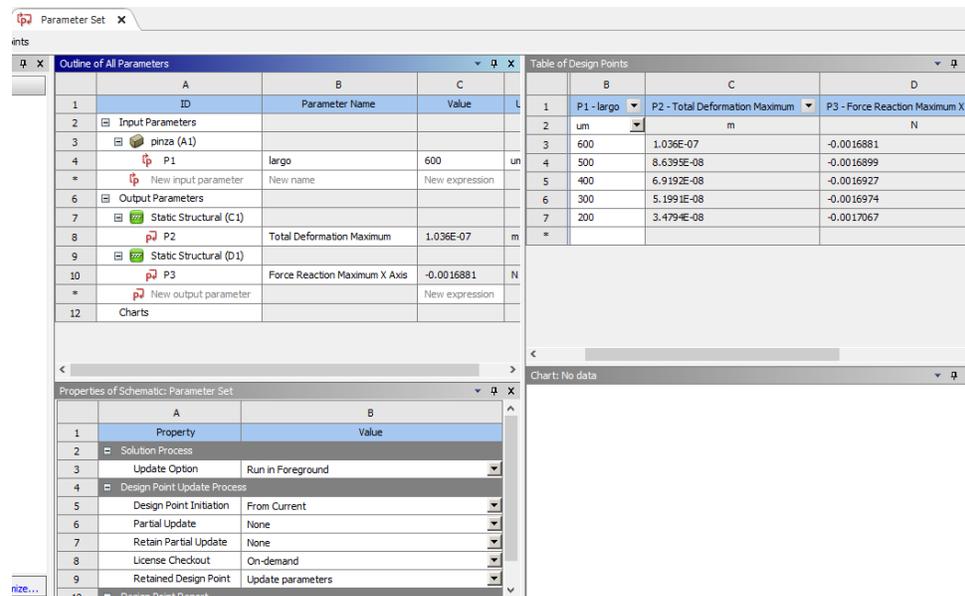


Figura 4-4 Área de trabajo de Parameter Set

4.3.4.- Comparación de resultados analíticos y simulados.

Al término de las simulaciones, se presentan los resultados obtenidos, y se comparan con los resultados analíticos. Esto con relación a la parametrización de la longitud del cantiléver y a la temperatura. Se obtiene también el porcentaje de error. Todos los valores se presentan en la Tabla 4-3 y 4-4.

Tabla 4-3 Resultados simulados y analíticos obtenidos parametrizando el largo del cantiléver

Largo del cantiléver (µm)	Desplazamiento simulado (µm)	Desplazamiento analítico (µm)	Porcentaje de error (%)
100	1.74E-08	2.31E-8	24.6
200	3.48E-8	4.62E-8	26.4
300	5.20E-8	6.93E-8	24.9
400	6.92E-8	9.24E-8	25.1
500	8.64E-8	1.15E-7	24.8
600	1.04E-7	1.38E-7	24.6
700	1.21E-07	1.61E-7	24.8
800	1.38E-07	1.84E-7	25
900	1.55E-07	2.08E-7	33

Para el desplazamiento calculado analíticamente se utilizó la ecuación 2.5 y para la fuerza se utilizó la ecuación 2.6.

Tabla 4-4 Desplazamiento y fuerza variando la temperatura

Temperatura	Desplazamiento (µm)	Fuerza (N)
112	1.04E-7	0.00168809
122	1.11E-7	0.001814067

132	1.19E-7	0.001940044
142	1.27E-7	0.002066021

4.3.4.- Gráficas

En la Figura 4-5, 4-6 y 4-7 se muestran las gráficas correspondientes a la parametrización del largo del cantiléver y la temperatura.

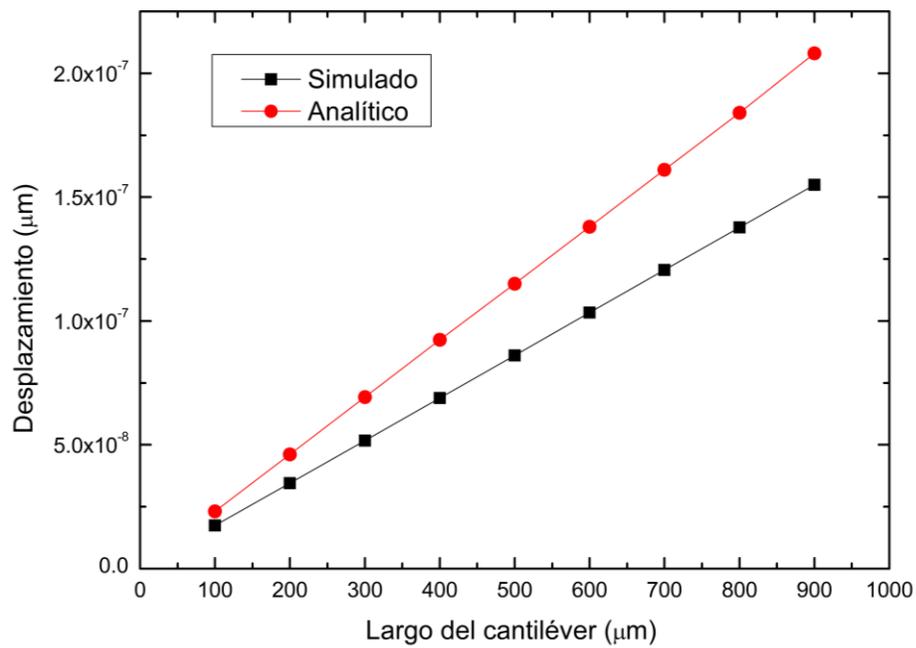


Figura 4-5 Largo del cantiléver vs desplazamiento

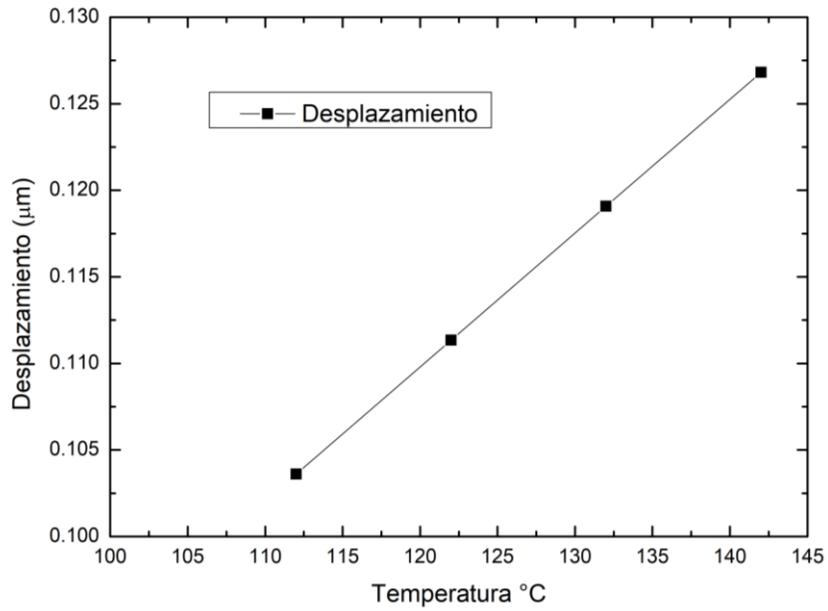


Figura 4-6 Temperatura vs desplazamiento

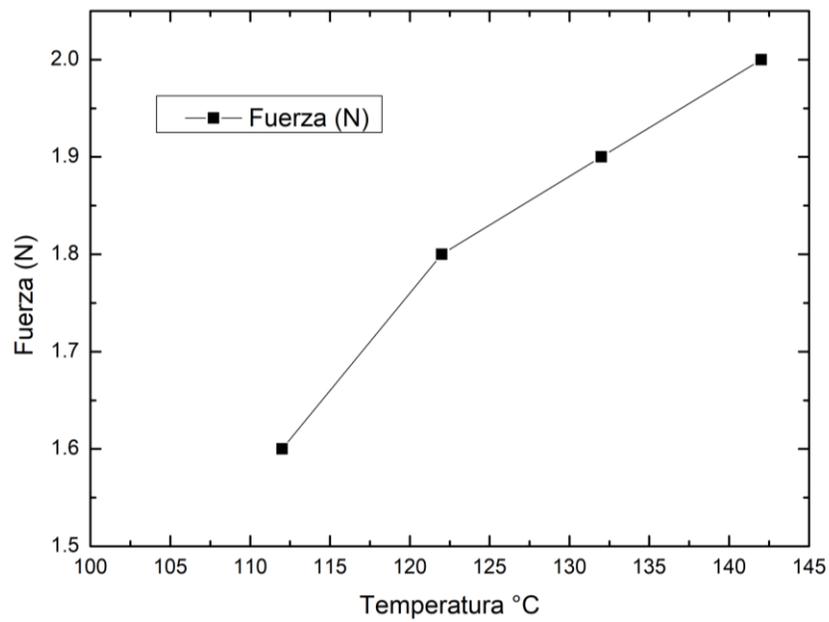


Figura 4-7 Temperatura vs fuerza

4.4.- Diseño y modelado del chevrón

Tomando en cuenta los parámetros de la Tabla 4-2 correspondientes al silicio.

Se procedió con el diseño y modelado del microactuador chevrón de 16 brazos para el análisis de fuerza y el desplazamiento.

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

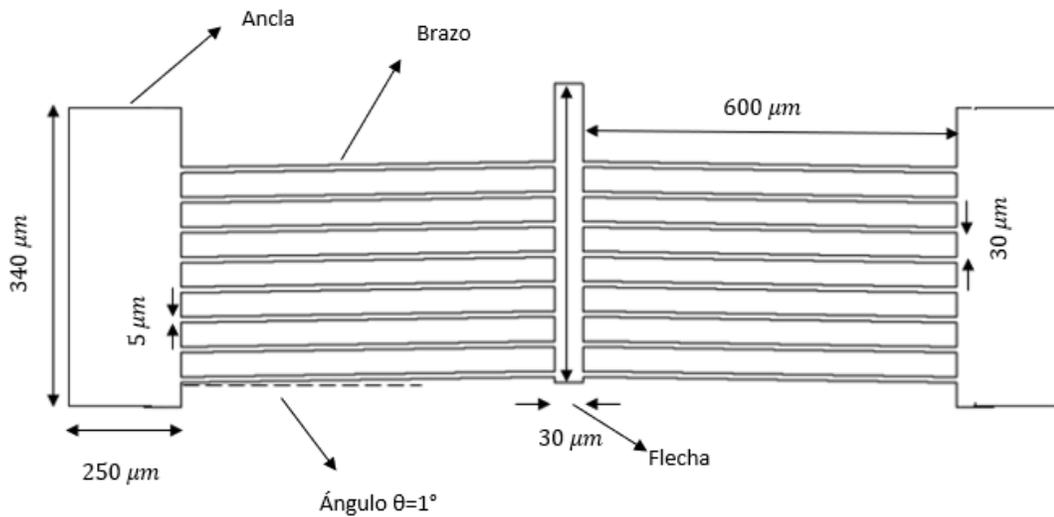


Figura 4-8 Diseño final del microactuador chevrón

En la Tabla 4-5 se muestran las características de diseño y en la Figura 4-8 el diseño final del microactuador chevrón.

Tabla 4-5 Dimensiones del Microactuador chevrón

Variable	Descripción	Tamaño [μm]
L_b	Largo del brazo	600
w_b	Ancho del brazo	5
t_b	Grosor del brazo	15
w_f	Ancho de la flecha	30
L_f	Largo de la flecha	65
θ	Ángulo de inclinación del brazo	1°

4.4.1.- Selección de componentes

Los componentes por utilizar son los convencionales de este tipo de microactuador: Anclas, brazos y flecha.

Las anclas son utilizadas para sujeción de uno de los lados de los brazos, mientras que la flecha es el elemento que se desplaza ante la deformación sufrida por los brazos.

De manera simplificada, puede decirse que el Chevrón es un arreglo de cantilévers, mediante el cual, se incrementa tanto la fuerza, como el desplazamiento.

4.4.2.- Selección del tipo de actuación del microactuador chevrón

El actuador chevrón será actuado electro térmicamente. Por lo que, se determinó que se utilizará un voltaje máximo de 2 V en su extremo fijo, el cual generará una temperatura máxima de 112 °C.

4.4.3.- Resultados de simulación y parametrización

La simulación es desarrollada en Ansys Workbench, se asigna como temperatura ambiente 22 °C, la misma que por default establece el programa. En la Figura 4-9 se muestra la distribución de temperatura generada por el rango de voltaje asignado.

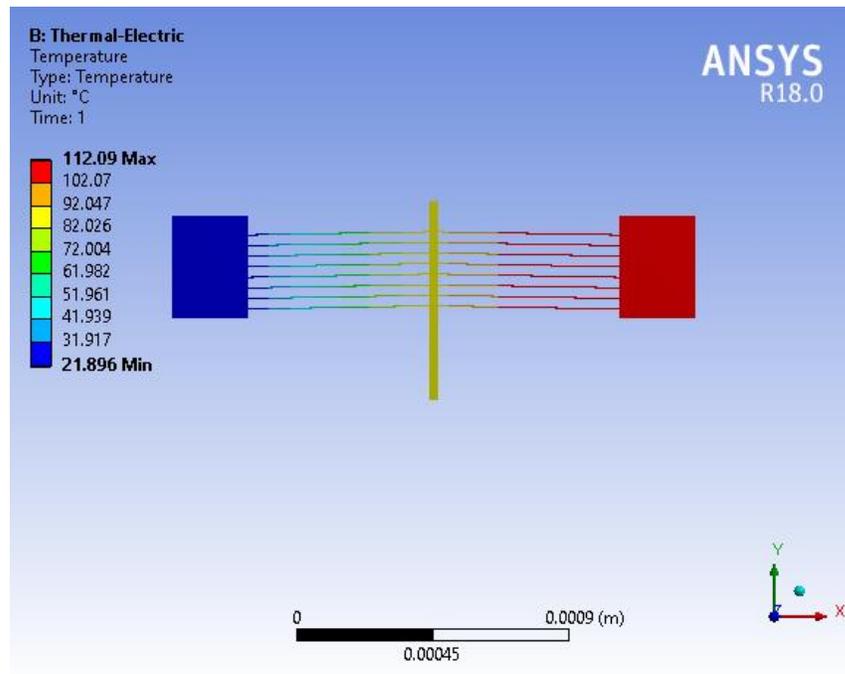


Figura 4-9 Distribución de temperatura

La deformación total del dispositivo, considerando un ángulo de inclinación en los brazos de 1° y un rango de voltaje de 0 a 2 V se muestra en la Figura 4-10. Posteriormente, en la Figura 4-11, se muestra el resultado de la fuerza de reacción.

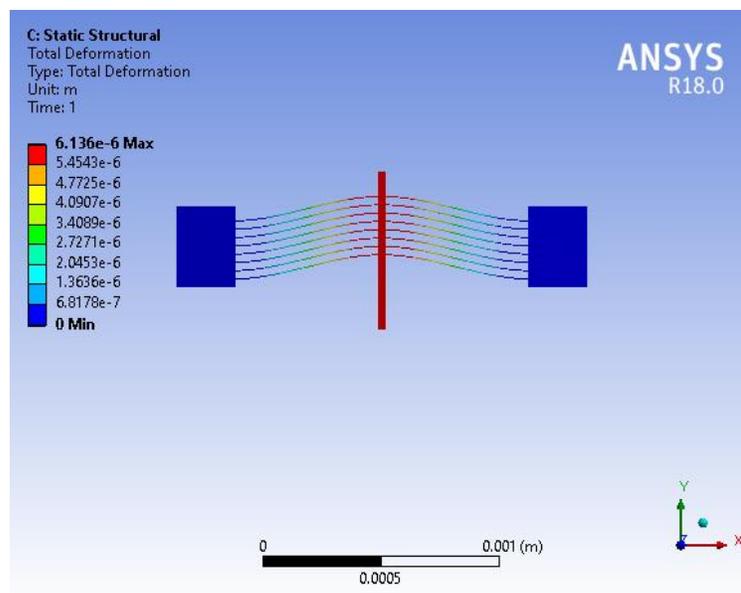


Figura 4-10 Deformación total del microactuador chevrón

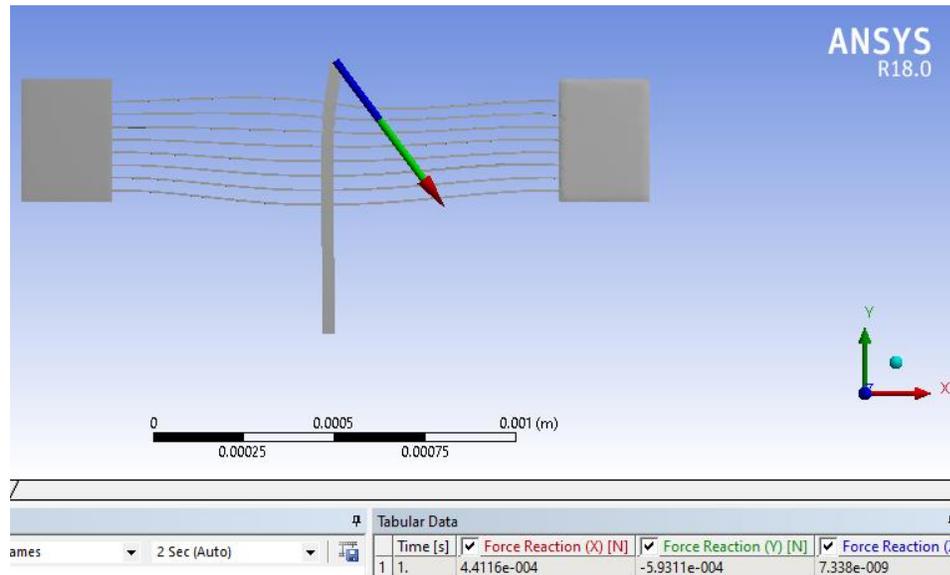


Figura 4-11 Fuerza de reacción

4.4.4.- Comparación de resultados del modelado matemático analítico, simulado y porcentajes de error

Para el diseño del microactuador chevrón, puede utilizarse la ecuación 2.7, para calcular el desplazamiento de la flecha, la fuerza de actuación mediante la ecuación 2.10 con el que se desplaza la flecha del microactuador.

En la tabla 4-6 se presentan los resultados analíticos y simulados correspondientes al desplazamiento y a la fuerza obtenidos al parametrizar el ángulo de inclinación de los brazos del microactuador chevrón y el porcentaje de error.

Tabla 4-6 Resultados simulados y analíticos obtenidos de la parametrización del ángulo de inclinación.

Ángulo de inclinación	Desplazamiento Simulado (m μ)	Desplazamiento Analítico (m μ)	Porcentaje de error (%)	Fuerza Simulada (N)	Fuerza Analítica (N)	Porcentaje de error (%)
1°	6.13E-6	6.47E-6	5.2	0.00059318	6.30E-4	5.8
2°	3.59E-6	3.76E-6	4.5	0.00119234	0.001259259	4.8

3°	2.49E-6	2.58E-6	3.4	0.001796584	0.00188841	4.7
4°	1.90E-6	1.96E-6	3.0	0.002404135	0.002516985	4.3
5°	1.54E-6	1.58E-6	2.5	0.003015052	0.003144793	4.1
6°	1.30E-6	1.32E-6	1.5	0.003625196	0.003771644	3.1
7°	1.12E-6	1.13E-6	0.8	0.004226047	0.004397345	3.8
8°	9.88E-7	9.93E-7	0.5	0.004832113	0.005021707	3.4
9°	8.85E-7	8.84E-7	0.1	0.00543338	0.005644539	3.7
10°	8.03E-7	7.97E-7	0.7	0.006029203	0.006265652	3.8

Se puede observar en la Tabla 4-6 que el porcentaje de error para un ángulo de inclinación de 1° es de 5.2 %. Sin embargo, si se tomara en cuenta un ángulo mayor a 1°, su porcentaje de error con respecto a los resultados analíticos se reducirían considerablemente, esto a su vez disminuye el desplazamiento ejercido en la flecha, siendo el desplazamiento un factor importante, por lo que al hacer el análisis paramétrico del ángulo de inclinación se determina que utilizar 1° es conveniente debido a el desplazamiento obtenido.

Al parametrizar el grosor, mediante los resultados obtenidos analíticamente y por simulación se puede observar que el valor del desplazamiento es poco significativo ya que varía muy poco. Con respecto a la fuerza, para un grosor de 15 micrómetros, el porcentaje de error es de 5.8 %, se considera este grosor debió a que es ampliamente utilizado en la literatura.

Tabla 4-7 Resultados simulados y analíticos obtenidos de la parametrización del grosor de la estructura

Grosor de la estructura (μm)	Desplazamiento Simulado ($\text{m}\mu$)	Desplazamiento Analítico ($\text{m}\mu$)	Fuerza Simulada (N)	Fuerza Analítica (N)	Porcentaje De error (%)
5	6.14E-06	6.47E-06	0.00019676	2.10E-04	6.6
10	6.14E-06	6.47E-06	0.000394161	4.20E-04	6.1
15	6.14E-06	6.47E-06	0.000593104	6.30E-04	5.8
20	6.14E-06	6.47E-06	0.000790065	8.40E-04	5.9
25	6.14E-06	6.47E-06	0.000989773	0.001049543	4.8
30	6.14E-06	6.47E-06	0.001189231	0.001259451	5.6

4.4.5- Gráficas

Las gráficas mostradas en la Figura 4-12, 4-13 y 4-14, muestran el desplazamiento y la fuerza parametrizando ángulo de inclinación y grosor de la estructura, mostrando los resultados simulados y analíticos.

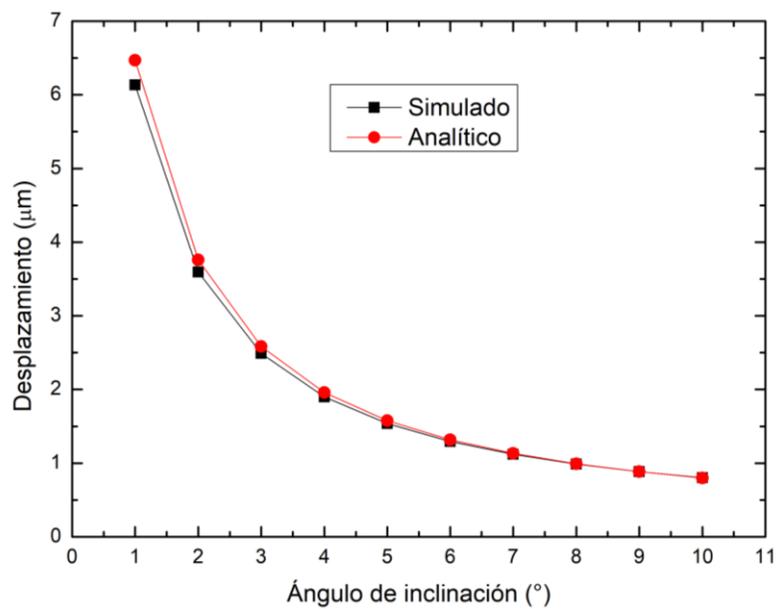


Figura 4-12 Ángulo de inclinación vs desplazamiento

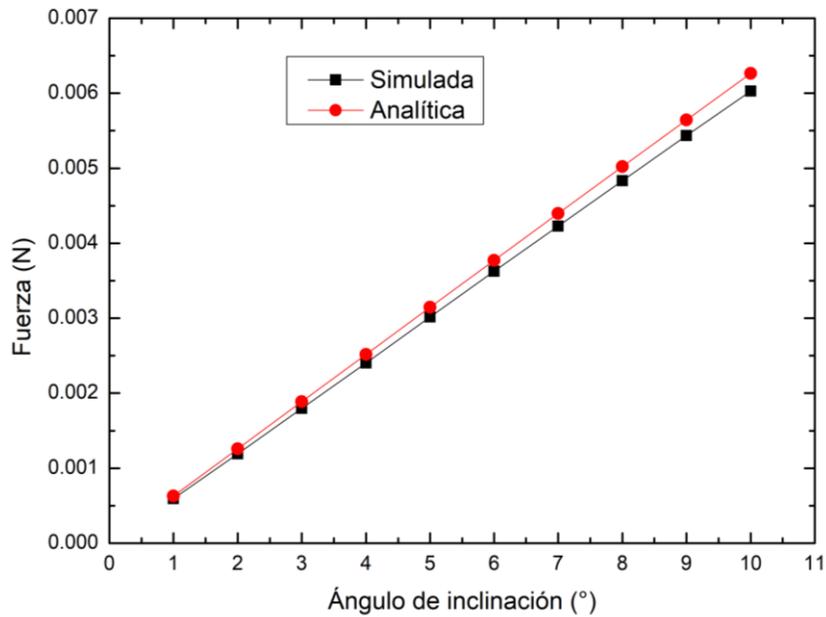


Figura 4-13 Ángulo de inclinación vs fuerza

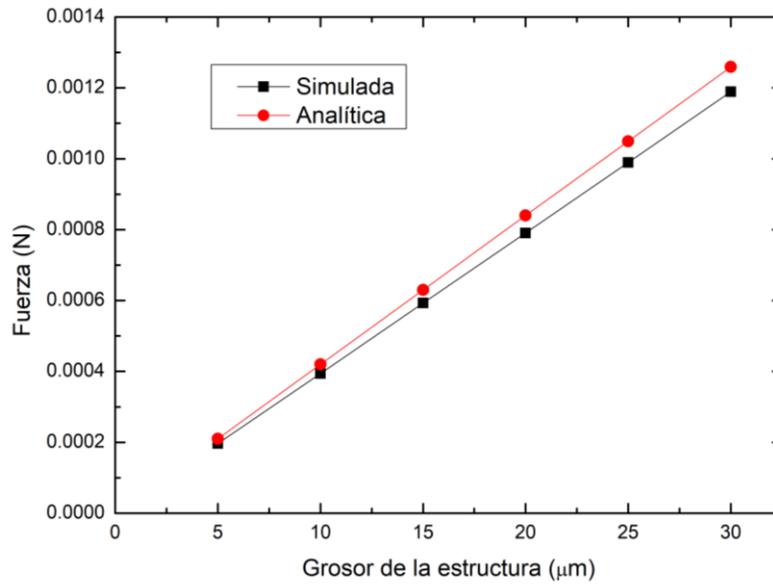


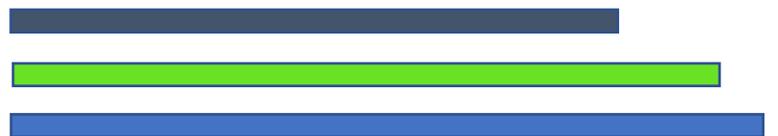
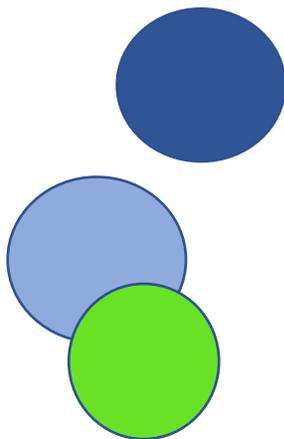
Figura 4-14 Grosor de la estructura vs fuerza

Para el capítulo 4, se llevaron a cabo los procesos de diseño y simulación del microactuador cantiléver y microactuador chevrón, se especificaron los diseños en particular, sus respectivas dimensiones y posteriormente los resultados obtenidos mediante simulación y los obtenidos analíticamente.



CAPÍTULO 5. DISEÑO, SIMULACIÓN Y CARACTERIZACIÓN DE MICROPINZA

En este capítulo se presenta el
diseño completo, la simulación y
caracterización de la micropinza.



CAPÍTULO 5. DISEÑO, SIMULACIÓN Y CARACTERIZACIÓN DE MICROPINZA

5.1.- Especificaciones de diseño

Con los resultados obtenidos en capítulos anteriores con respecto al microactuador cantiléver y al microactuador Chevrón, se procede a realizar los ajustes correspondientes estructurales y de diseño para ser implementados al dispositivo final de la micropinza. Estas especificaciones de diseño están descritas en las Figuras 4.1 y 4.5, respectivamente.

5.1.2- Determinación de los materiales

Se utilizará el silicio, como material estructural. Al igual que en el análisis del microactuador cantiléver y el microactuador chevrón.

5.1.3.- Selección de componentes de la micropinza

Para la implementación de la micropinza, se utilizará al microactuador Chevrón analizado en el capítulo 4.

El actuador Chevrón tiene un movimiento direccional, definido por los ángulos de inclinación con los que están diseñados los brazos. Este comportamiento se puede aprovechar para implementar elementos de soporte y amplificación, que permitan colocar estructuras en la parte inferior y superior del microactuador, haciendo analogía a una micropinza.

Este comportamiento es posible debido a la polarización térmica o eléctrica del microactuador Chevrón en sus anclas, que, por el efecto de las propiedades mecánicas del material, como son: el coeficiente de expansión térmica, el módulo de Young y la razón de Poisson principalmente, permiten el desplazamiento de la flecha.

El movimiento de la flecha en la parte central del microactuador da lugar a la idea de aprovechar dicho desplazamiento y colocar elementos estructurales que propicien al cierre y apertura de estos elementos implementados.

5.1.4.- Determinación de requerimientos y restricciones

Una de las condiciones de frontera es la alimentación y ésta se realiza en las anclas del dispositivo. La alimentación puede ser térmica, eléctrica o mecánica. En esta investigación, la alimentación se implementó mediante un potencial eléctrico de 2 V. Para las simulaciones iniciales, el material estructural seleccionado es Silicio, con un espesor total del dispositivo micromanipulador de 15 μm . La temperatura ambiente es de 22 °C, la cual es asignada por default en ANSYS.

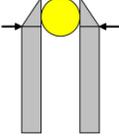
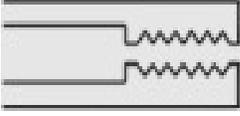
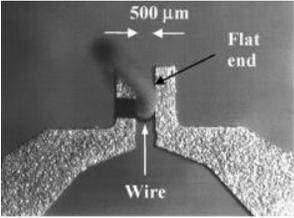
5.2.- Importancia de la forma de las pinzas de sujeción

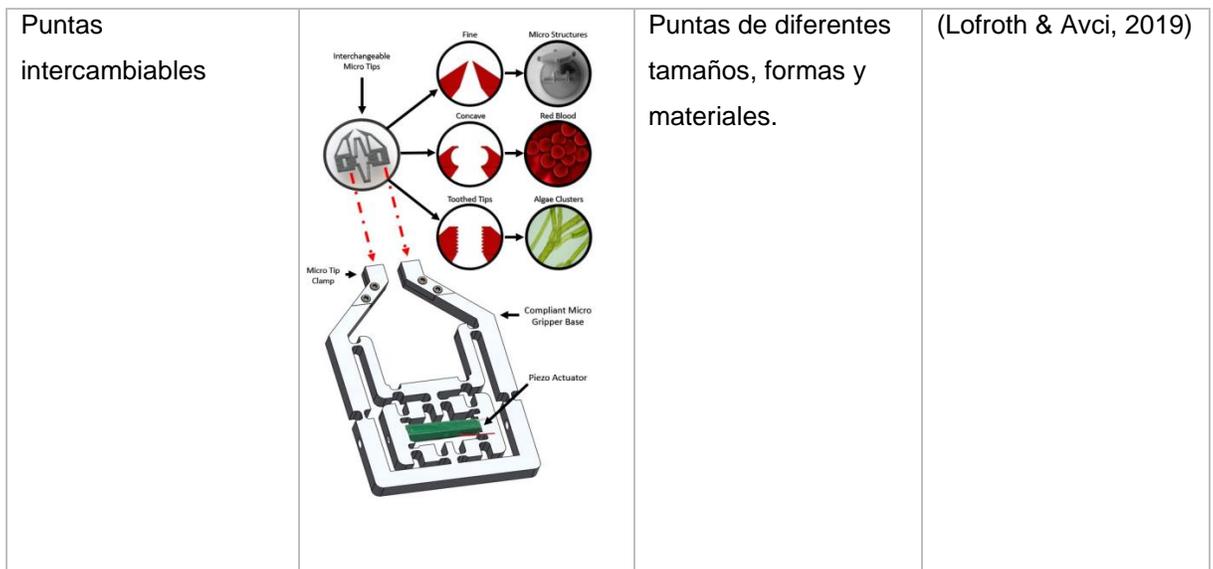
Muchas micropinzas se han fabricado con puntas de superficie plana, que se pueden utilizar en la manipulación de objetos de forma uniforme e irregular. El diseño de las puntas con formas especiales para aplicaciones específicas hace que la manipulación sea más fácil de lo habitual.

La micropinza puede manipular objetos con diferentes formas, tamaños y materiales. Para diseñar la forma de las puntas, también se deben considerar diferentes parámetros, como la capacidad de sujetar objetos con diferentes formas, la reducción de la probabilidad de deslizamiento y la disminución de la fuerza adhesiva entre objetos y puntas.

Algunas formas comunes de puntas de micropinzas se muestran la Tabla 5-1.

Tabla 5-1 Formas comunes de puntas de micropinzas (Nikoobin & Hassani Niaki, 2012)

Puntas de agarre	Diagrama de muestra	Descripción	Referencia
Puntas de superficie plana	 <p>A schematic diagram showing two vertical grey bars representing the jaws of a micrograsper. A yellow circle is positioned between the tips of the bars, with two horizontal arrows pointing outwards from the circle, indicating the contact area.</p>	Sujeción de formas curvas o circulares	(Zubir, Shirinzadeh, & Tian, 2009)
Puntas de superficie rugosa	 <p>A schematic diagram showing two horizontal grey bars representing the jaws of a micrograsper. The right ends of the bars are jagged and irregular, representing a rough surface.</p>	Sujeción de formas uniformes e irregulares	(Kim, Park, Moon, Jeong, & Ahn, 2009)
Forma especial para aplicaciones específicas	 <p>A schematic diagram of a micrograsper tip with a hook-like shape. It has a long, thin stem that curves into a hook with a small circular opening at the end.</p>	Manipulación celular	(Nah & Zhong, 2009)
	 <p>A scanning electron micrograph (SEM) showing a wire tip. A scale bar at the top indicates 500 μm. Labels include 'Flat end' pointing to the tip and 'Wire' pointing to the stem.</p>	Manipulación de alambre de teflón	



5.3.-Diseño preliminar

La adaptación y asignación de elementos al dispositivo Chevrón, genera al diseño preliminar de la micropinza, la cual se puede observar en la Figura 5-1.

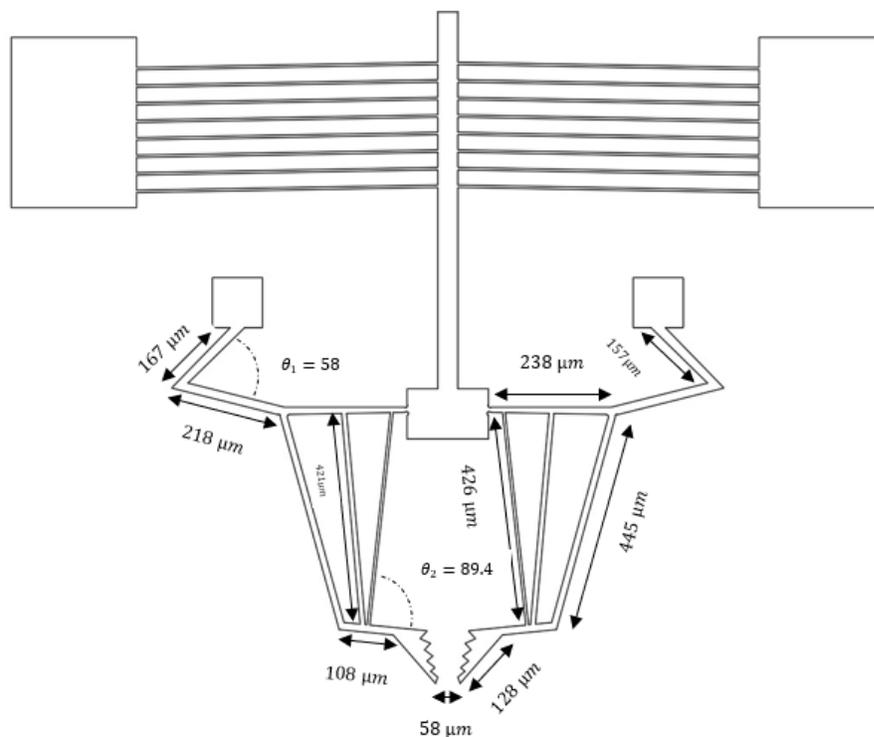


Figura 5-1 Dimensiones de la micropinza preliminar

5.4.-Resultados de simulación

En la simulación realizada en ANSYS Workbench, se asignó una temperatura máxima de 150 °C. obteniendo así un cambio de temperatura de 128 °C. Se puede observar la distribución de temperatura en la Figura 5-2, para el diseño preliminar de la micropinza.

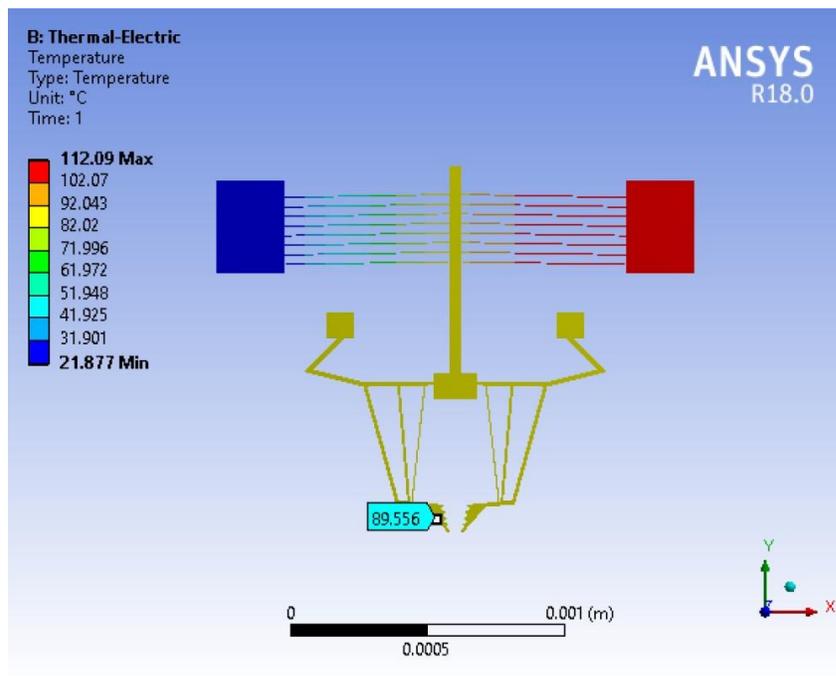


Figura 5-2 Distribución de temperatura aplicando un voltaje máximo de 2 V.

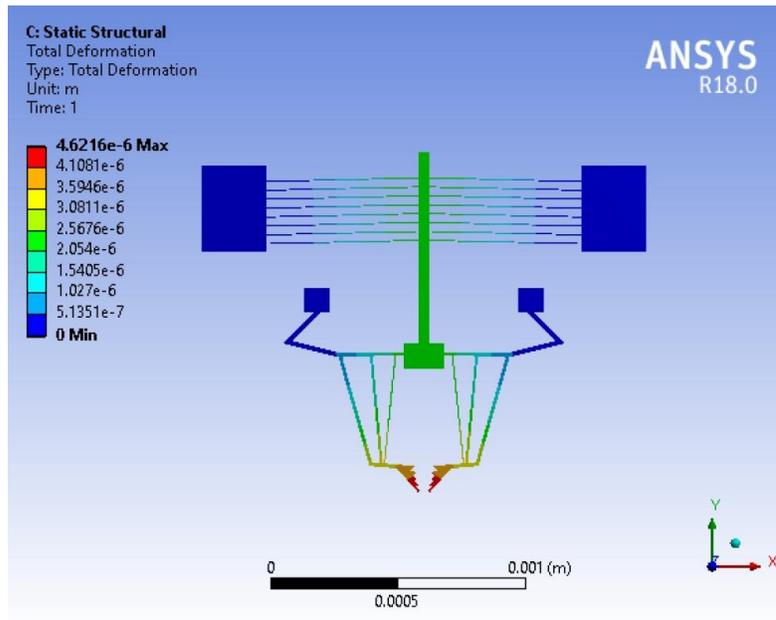


Figura 5-3 Desplazamiento obtenido mediante simulación en ANSYS

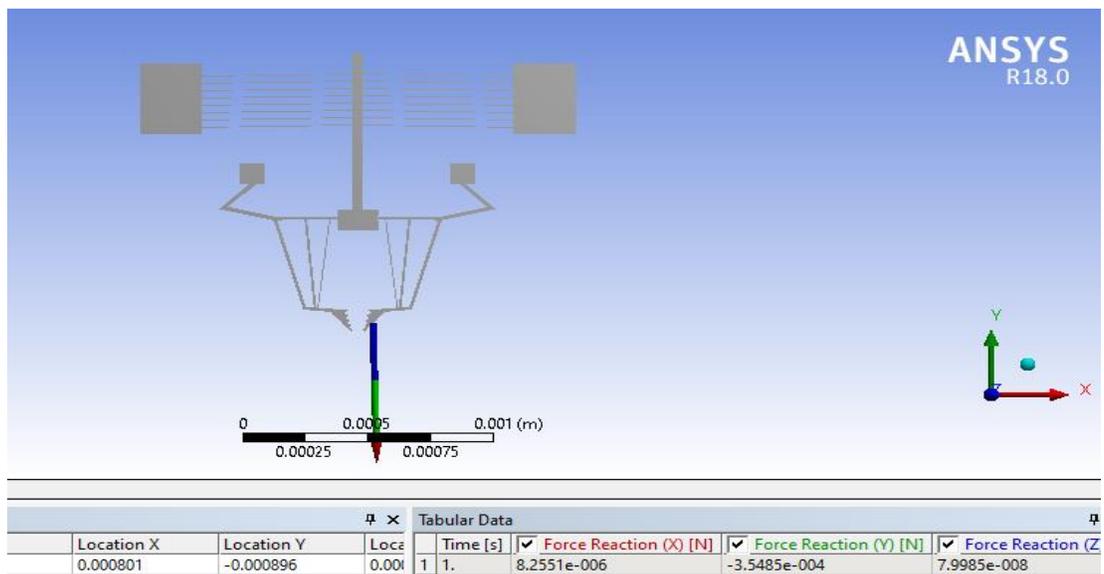


Figura 5-4 Fuerza de reacción

Como puede observarse en los resultados preliminares de la micropinza, mostradas en la Figura 5-3. y 5-4, el desplazamiento obtenido es muy bajo.

Tabla 5-2 Resultados de simulación de la micropinza preliminar

Parámetros de operación	Valores
Desplazamiento de las pinzas	4.87 x 2= 9.74 μm
Fuerza de sujeción	386.8 μN
Temperatura en las puntas	89.5 $^{\circ}\text{C}$

En la Tabla 5-2, se muestran las formas modales que el dispositivo presenta al ser sometido a una temperatura máxima de 112 $^{\circ}\text{C}$. Se presentan los resultados preliminares de la micropinza de sus parámetros importantes de operación tales como, el desplazamiento, la fuerza de reacción y la temperatura que se origina en las puntas.

Estos resultados preliminares indican que es necesario realizar ajustes importantes, sobre todo estructurales, para mejorar el comportamiento de la micropinza y su operatividad.

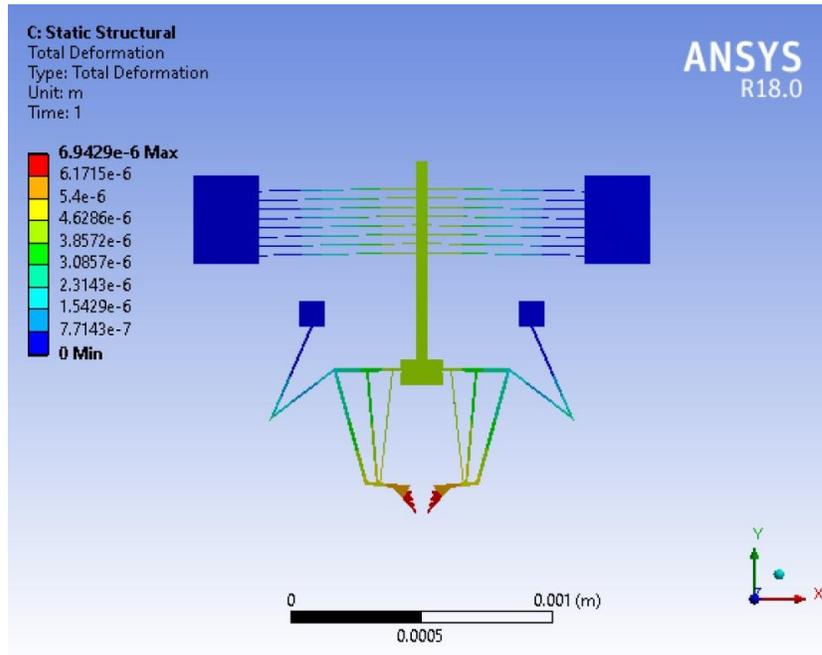
Se analiza como una solución apropiada y de acuerdo con la revisión del estado del arte, optimizar los elementos estructurales del dispositivo micromanipulador para mejorar los parámetros de interés como son el desplazamiento, la temperatura y la fuerza de reacción.

Se realizaron varias modificaciones para mejorar principalmente el desplazamiento. Se agregaron, por ejemplo:

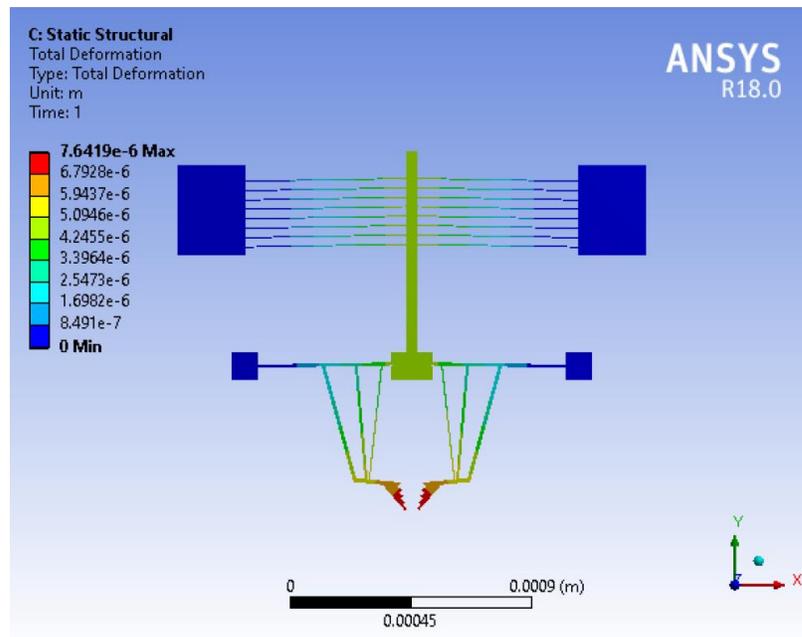
- Se realizaron ajustes en el sistema de agarre de la micropinza para una mejor sujeción.
- Se modifico el tipo de actuación
- Se utilizaron diferentes ángulos de inclinación de los brazos del actuador chevrón.
- Se implementaron dos pad's adicionales, para evitar un posible colapso.

Las modificaciones en la micropinza preliminar se muestran a continuación. Se asigno un voltaje máximo de 2 V, obteniendo así una temperatura máxima de 112 °C, y esto a su vez un cambio de temperatura de 90 ° C ($\Delta T=112-22$ °C), siendo 22 °C la temperatura ambiente que asigna ANSYS por default.

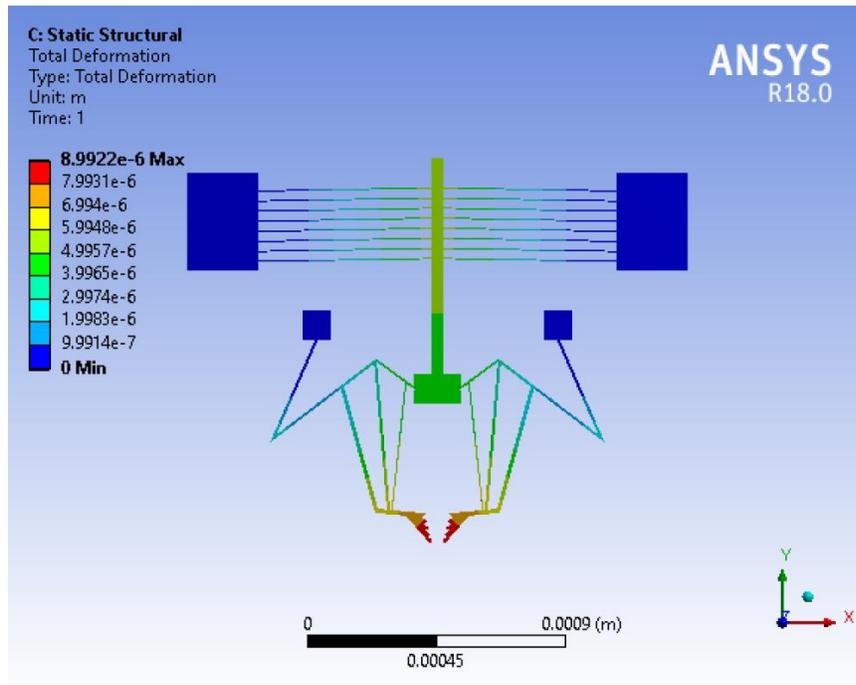
Tabla 5-3 Resultados de simulación de modificaciones de micropinzas



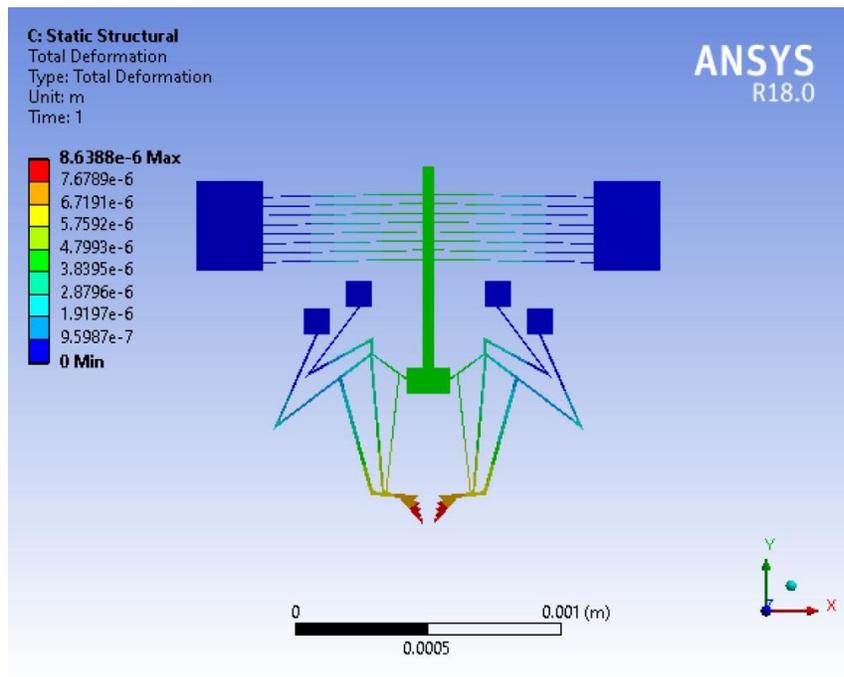
Desplazamiento total= 13.88 μm , Fuerza= 550.5 μN



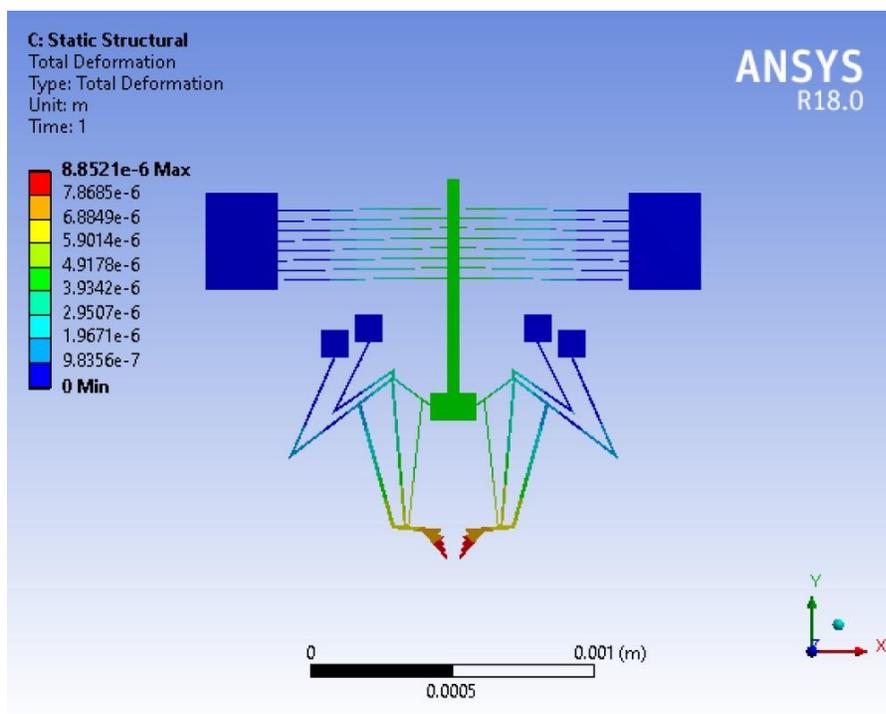
Desplazamiento total= 15.28 μm , Fuerza= 711.7 μN



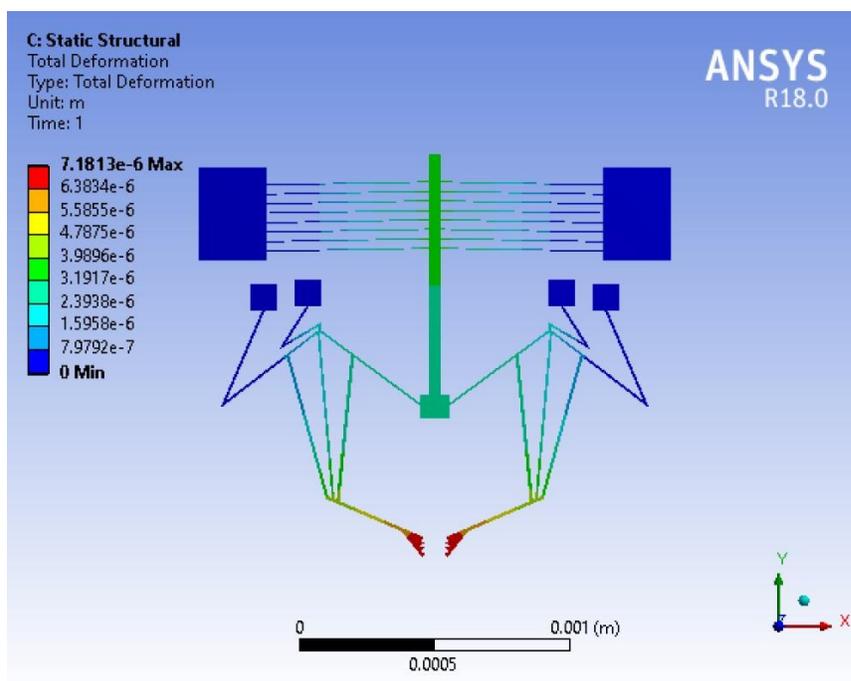
Desplazamiento total= 17.98 μ m, Fuerza= 555.0 μ N



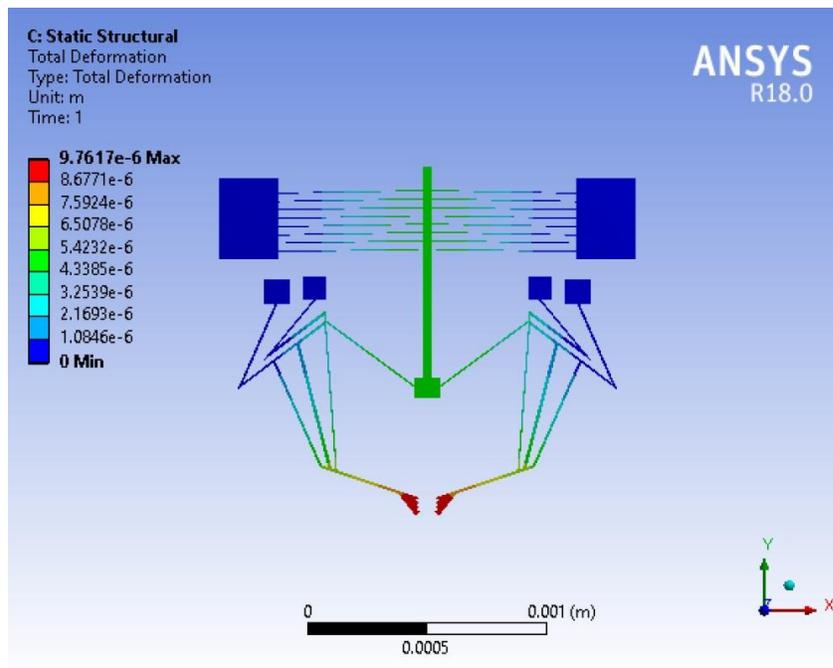
Desplazamiento total= 17.2 μ m, Fuerza= 536.4 μ N



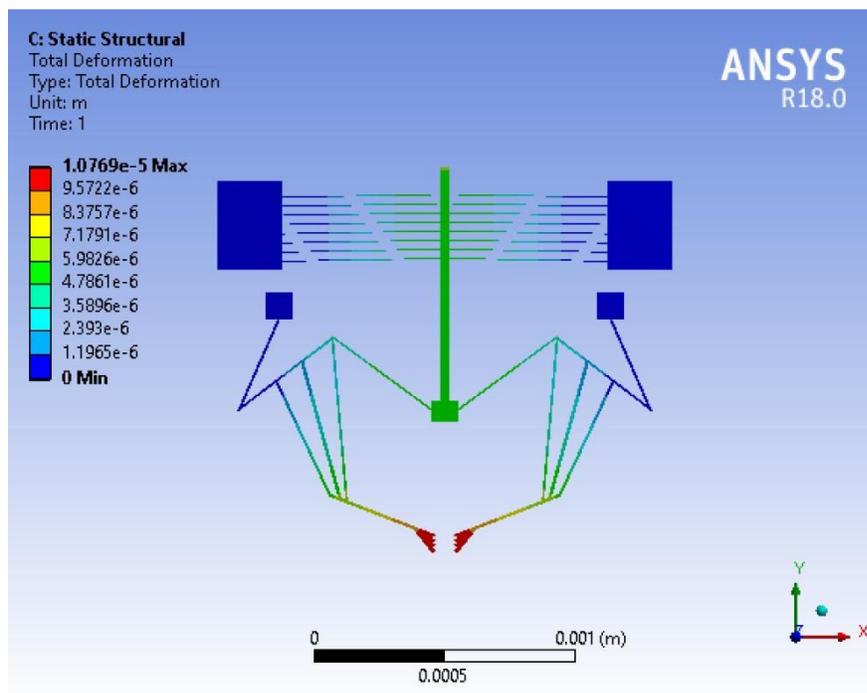
Desplazamiento total= 17.6 μm , Fuerza= 532.2 μN



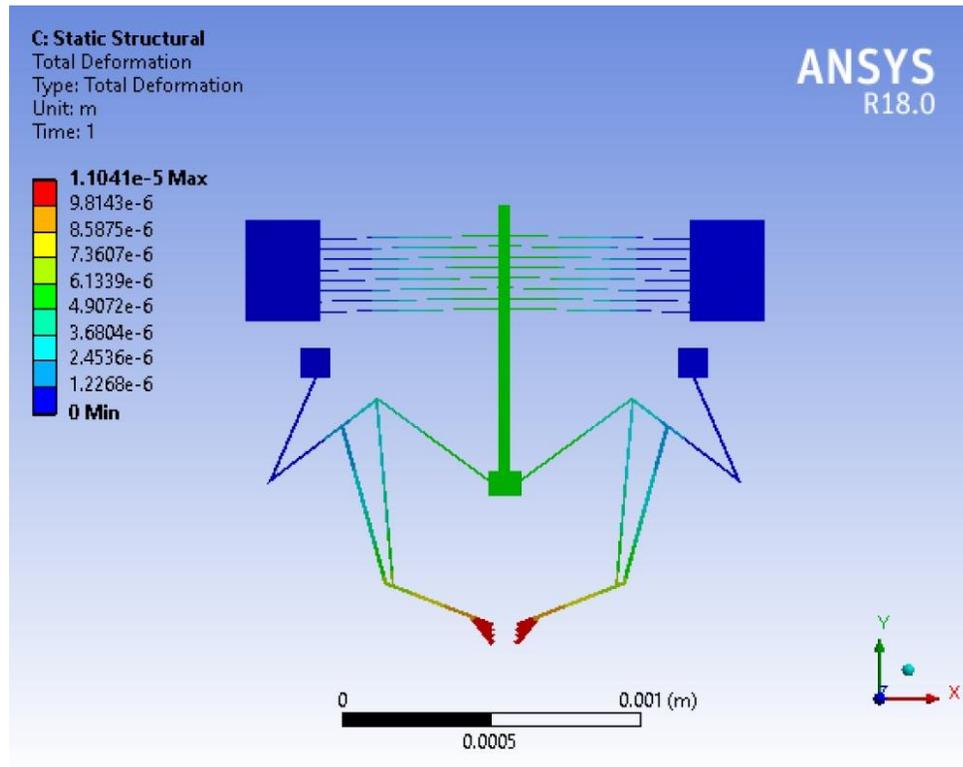
**Desplazamiento total = 14.2 μm ,
 Fuerza= 262.8 μN**



Desplazamiento total= 19.4 μ m, Fuerza= 336.6 μ N



Desplazamiento total= 21.4 μ m, Fuerza= 302.4 μ N

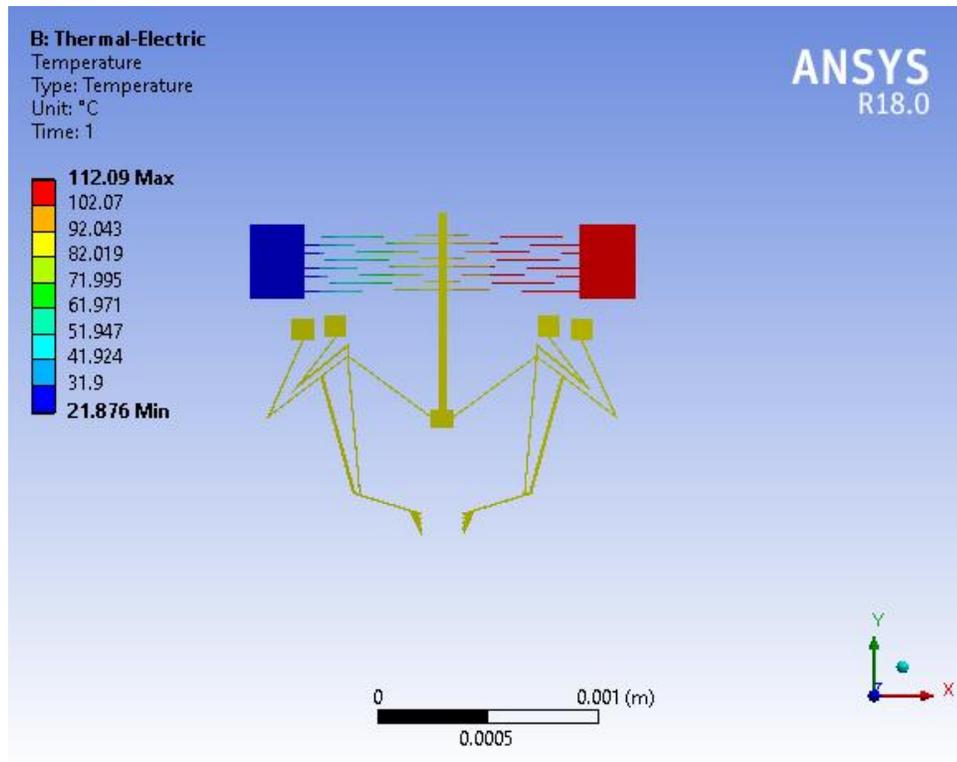


Desplazamiento total= 22 μm , Fuerza= 325.9 μN

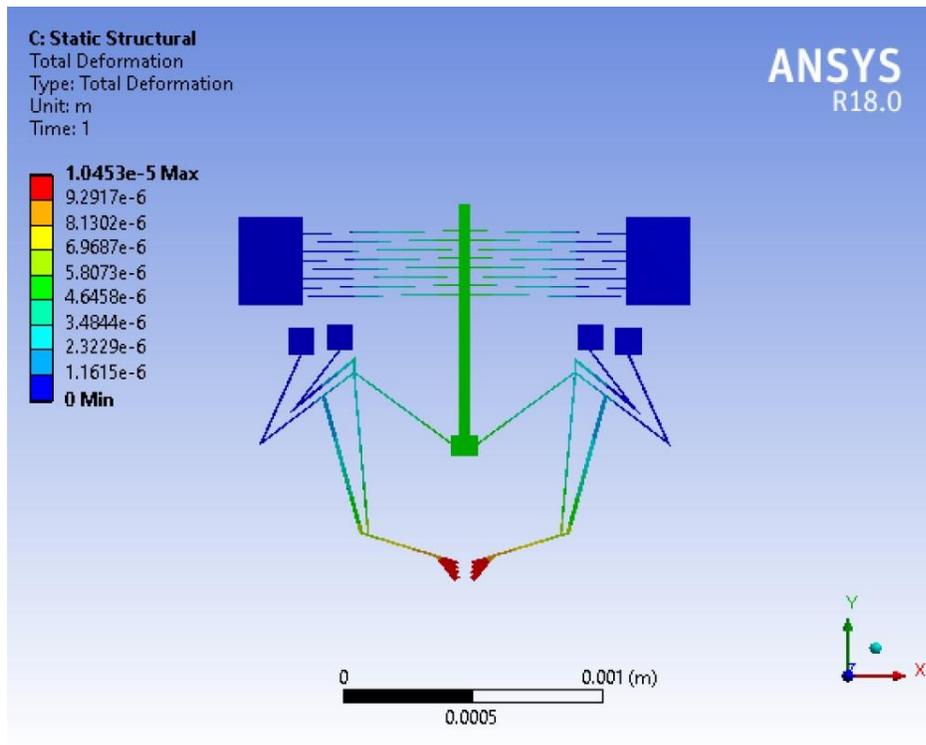
Después de llevar a cabo una exhaustiva búsqueda en el estado del arte para mejorar el desempeño de la micropinza, se llegó a un dispositivo mejorado con parámetros de desempeño aceptables. Los resultados de las simulaciones se muestran en la Tabla 5-4.

Tabla 5-4 Resultados de simulación de la micropinza optimizada

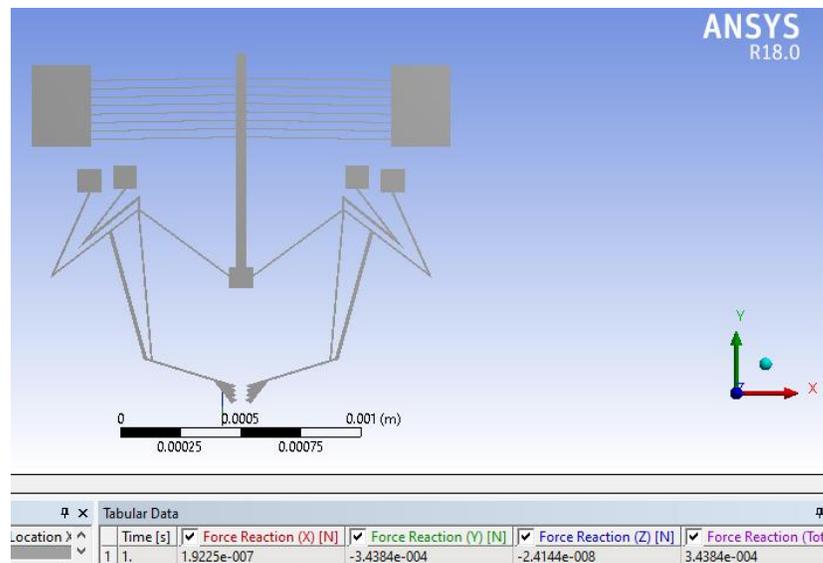
Material: Silicio, voltaje de alimentación = 2 V



Distribución de temperatura aplicando un voltaje de 2 V



Desplazamiento total= 21 μm



Fuerza= 343.84 μN

A partir del resultado del desplazamiento total obtenido a 2 V, en las puntas de la micropinza, y considerando además al desplazamiento del actuador chevrón

(6.13 μ m) obtenido de la Figura 4-10, puede obtenerse el factor de amplificación de desplazamiento a partir de las ecuaciones 2.13 ó 2.14. En ambos casos obtenemos un DAF= 3.33.

5.5.-Comportamiento de la temperatura con relación al voltaje aplicado.

A continuación, se presentan las gráficas (Figura 5-5, 5-6, 5-7) en donde se muestra el comportamiento de la temperatura con relación al voltaje aplicado y como varia el desplazamiento y la fuerza al disminuir o aumentar el voltaje.

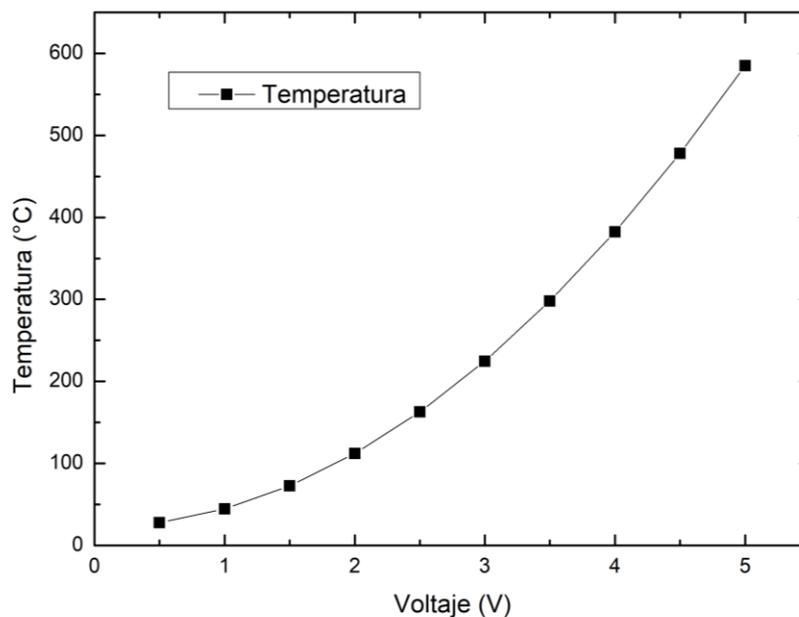


Figura 5-5 Relación de Temperatura con respecto al voltaje

En la figura 5-5, se puede observar cómo aumenta la temperatura con respecto al voltaje, cabe señalar que, la micropinza esta alimentada con un voltaje máximo de 2 V, por lo tanto, genera una temperatura máxima de 112 °C, y conforme aumenta el voltaje aumentara considerablemente la temperatura.

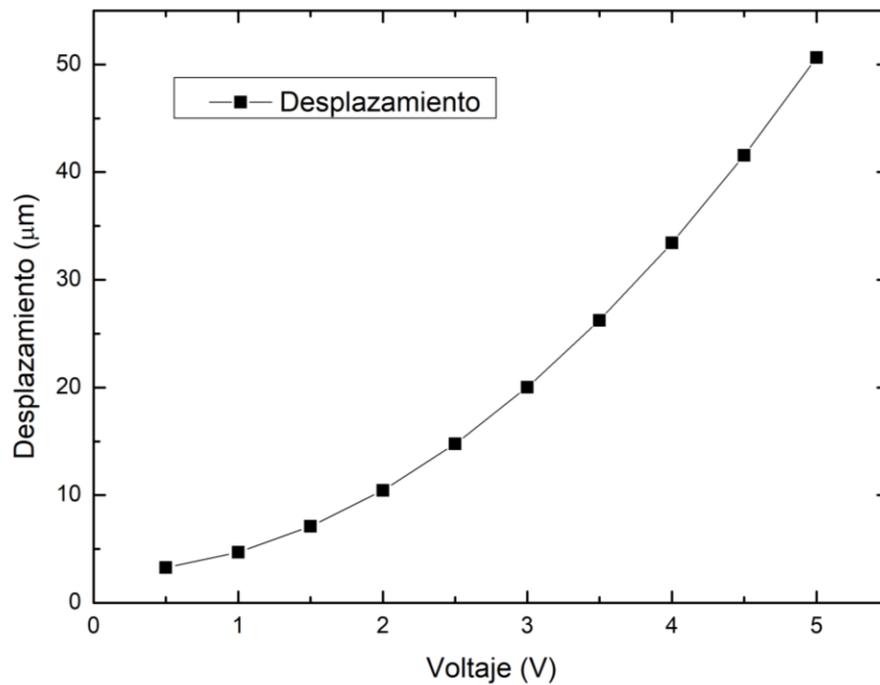


Figura 5-6 Voltaje contra desplazamiento

La Figura 5-6, muestra el voltaje contra desplazamiento, se puede observar cómo al aumentar el voltaje aumentara el desplazamiento, es debido a que aumenta la temperatura y genera un mayor desplazamiento. Posteriormente, la Figura 5-7 presenta el aumento de la fuerza con el cambio de voltaje, donde también se puede observar una mayor fuerza de reacción al aumentar el voltaje aplicado.

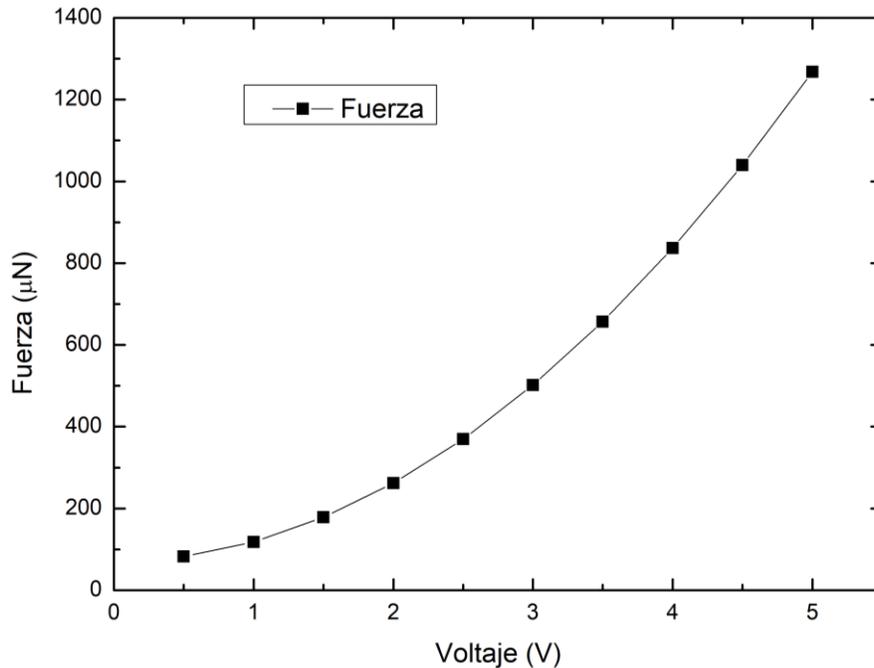


Figura 5-7 Voltaje contra fuerza

5.6. -Análisis de parámetros de desempeño

En el diseño mejorado, fue analizado considerando como material estructural Silicio. Los diseños preliminares fueron analizados de igual forma con Silicio y con un voltaje de 2 V, en todos los casos el desplazamiento va en aumento por lo que, esto determina además a las posibles aplicaciones de la estructura final.

Como se aplica un potencial de 2 V, en el caso de Silicio la temperatura de operación llega a ser 112°C, y la temperatura en las puntas es de 89.5 ° C, sin embargo, para un voltaje máximo de 5 V la temperatura aumenta a 585.9 °C, y en las puntas 444.5 °C, por lo que, se sugiere limitar la alimentación, esto dependerá del tipo de elemento de sujeción a considerar.

5.7. -Diseño final

De acuerdo con el funcionamiento de la micropinza mejorada, se obtiene el diseño final, utilizando Silicio, debido a que es el material más común en la fabricación, y a los resultados de desplazamiento y fuerza que son aceptables debido que el desplazamiento se encuentra en el rango reportado por (Won, y otros, 2009), (Shivhare, Uma, & M. Umopathy, 2015), (Lofroth & Avci, 2019) y (Aravind, Ramesh, Ramya, Praveenkumar, & Kalaiarasi, 2016). Con relación a la fuerza también se encuentra dentro del rango reportado por (Chu, Zhang, & Chen, 2011), y (Zhang, Chu, Wang, & Chen, 2013).

Tomando en cuenta el desplazamiento y la fuerza de sujeción obtenida de la micropinza puede tener múltiples aplicaciones como la sujeción de microtubos de óxido de aluminio que se implementa en (Coutinho, Neves, Sombrio, & Souza, 2018), y tomando en cuenta la apertura inicial de 181.3 μm y la apertura final de 201.3 μm de la micropinza se puede considerar en el rango de sujeción de estos microtubos.

En la Tabla 5-6 se muestra una comparación de desempeño con otras micropinzas de la literatura.

Tabla 5-6 Comparación con otras micropinzas.

Ref.	Actuación	Actuador	Material	Desplazamiento total [μm]	Fuerza	Temp [$^{\circ}\text{C}$]	Voltaje aplicado [V]
(Chu, Zhang, & Chen, 2011)	Electrotérmico	Chevrón	SU-8	90	125 μN aprox.	Total 44.87 En las puntas 1.47	0.065
(Zhang, Chu, Wang, & Chen, 2013)	Electrotérmico	Chevrón	SU-8	143	142 μN	Total 74.03	0.195

						En las puntas 3.75	
Este trabajo	Electrotérmico	Chevrón (Longitud y ancho, 600 μm y 5 μm , respectivamente)	Silicon	20	327.16 μN	89.5	2

En la Figura 5-8, se muestra la micropinza mejorada con sus respectivas dimensiones.

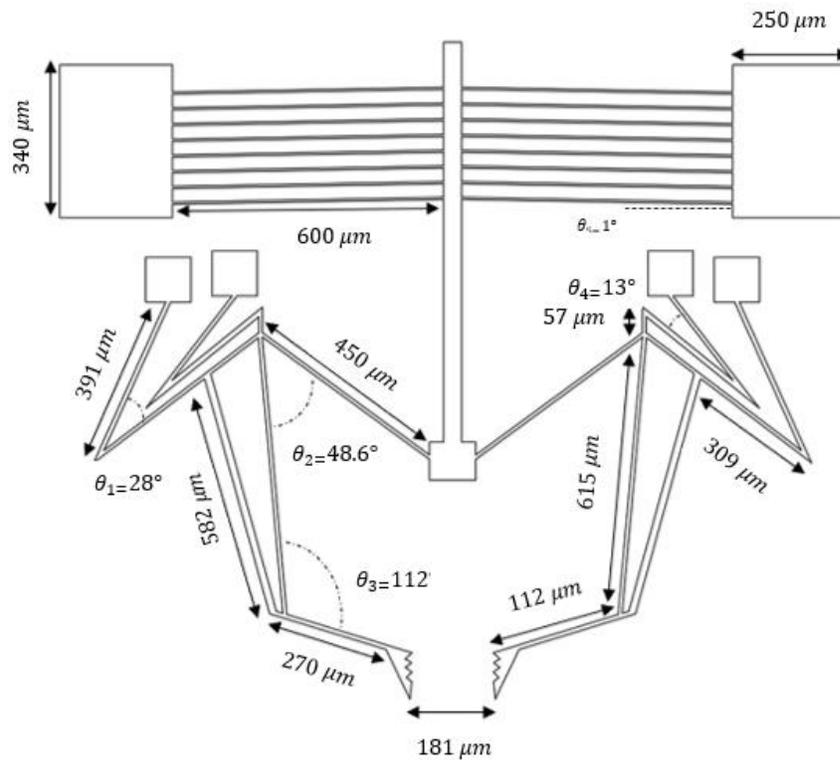
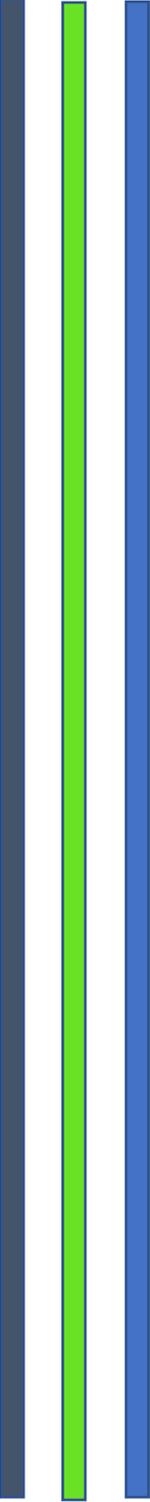


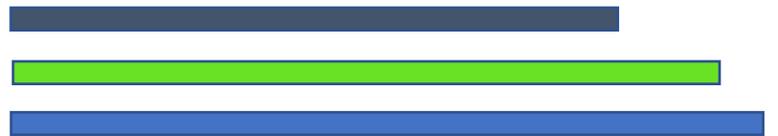
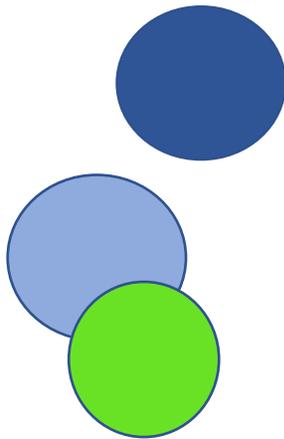
Figura 5-8 Dimensiones de micropinza final

En este capítulo se desarrolló el sistema formado por, chevrón y micropinza, obteniendo resultados satisfactorios para desplazamiento y fuerza.



CAPÍTULO 6.- CONCLUSIONES Y TRABAJO FUTURO

En este capítulo se presentan las conclusiones derivadas de este trabajo de tesis, así como los trabajos futuros que se originaron y que se proponen.



CAPÍTULO 6.- CONCLUSIONES Y TRABAJO FUTURO

6.1.- Conclusiones

Una vez que, cada uno de los objetivos específicos ha sido logrado, puede concluirse que el objetivo de esta tesis fue alcanzado, el cual es diseñar una micropinza con elementos flexibles basada en un actuador chevrón, para sujeción de micro objetos, en un rango de amplitud entre 160 y 180 μm la cual se presenta como la Figura 5-8, la micropinza final, que mostro los resultados más favorecedores.

Con el fin de optimizar la micropinza, se analizó individualmente a cada uno de sus elementos. Uno de los elementos básicos es el actuador chevrón, el cual ha sido ampliamente analizado en la literatura científica. Sin embargo, el enfoque en general es sobre cada uno de sus elementos aislados, por lo que, se encontró como un desafío realizar la optimización de todos sus elementos mediante parametrización, utilizando ANSYS.

Con base en lo anterior, se determinaron los elementos del actuador chevrón optimizado (longitud del brazo, ángulo de inclinación, ancho y grosor): 16 brazos, con un largo 600 μm y ancho de 5 μm , un ángulo de inclinación de 1° y un grosor de 15 μm . Las características de la flecha son: largo de 550 μm y ancho de 30 μm .

La respuesta que se obtiene con este actuador es un desplazamiento total de 6.13 μm y una fuerza de 592.6 μN .

La comparación entre los resultados obtenidos de la simulación y los analíticos del actuador chevrón optimizado, genera un margen de error del 5 %. Por lo que, puede concluirse que el modelo físico es sumamente preciso.

Considerando que los objetivos de sujeción que requieren ser micromanipulados con precisión pueden ser microalambres, dispositivos microelectrónicos, etc., esto hace necesario conocer la distribución de la temperatura en la micropinza. A partir de la parametrización, con un rango de potencial de 0.5 a 5 V, se observó que, para 5 V la temperatura en las puntas de la micropinza se incrementó hasta 444.21 ° C en las puntas, por lo que, se eligió una diferencia de potencial no mayor a 2 V, como rango de trabajo, puesto que, con este rango, la máxima temperatura que se alcanza en las puntas es de 89.5 °C.

Con relación a la apertura en las puntas, al aplicar 2 V, se genera en cada una de las puntas un desplazamiento de 10.00 μm , lo que hace que, aunado a la apertura inicial establecida entre ambas de 181 μm , se genera una apertura total de hasta 161 μm . Por lo que, los objetos de sujeción que pueden ser manipulados pueden encontrarse en el rango mayor a 161 μm y menor a 181 μm .

Cabe señalar que, el factor de amplificación correspondiente es de 3.33 y, de acuerdo con lo establecido en el estado del arte considerado, puede concluirse que el desempeño de esta micropinza es aceptable.

Por otro lado, al aplicar 2 V a las anclas del actuador chevrón se obtiene una fuerza de 343.84 μN en las puntas de la micropinza, lo cual nos permite conocer el peso de los objetos de sujeción que en este caso corresponde a un máximo de 33.41 μg .

6.2.- Trabajo futuro

Como trabajo futuro se propone caracterizar la micropinza, se podría aumentar o disminuir la apertura inicial para diferentes objetivos de sujeción y tener una amplitud más grande o chica.

Actualmente se cuenta con dispositivos electrónicos como cámaras de dimensiones aproximadamente de 650 μm , tan diminuta como un grano de arena, la cámara mide 0.65 x 0.65 mm, con una altura de 1.158 milímetros. Su nombre formal es OV6948 y es capaz de entregar imágenes en color de 200 x 200 píxeles con hasta 30 cuadros por segundo. Por separado, el sensor mide 0.575 x 0.575 milímetros. Es el más pequeño disponible a nivel comercial.

Bibliografía

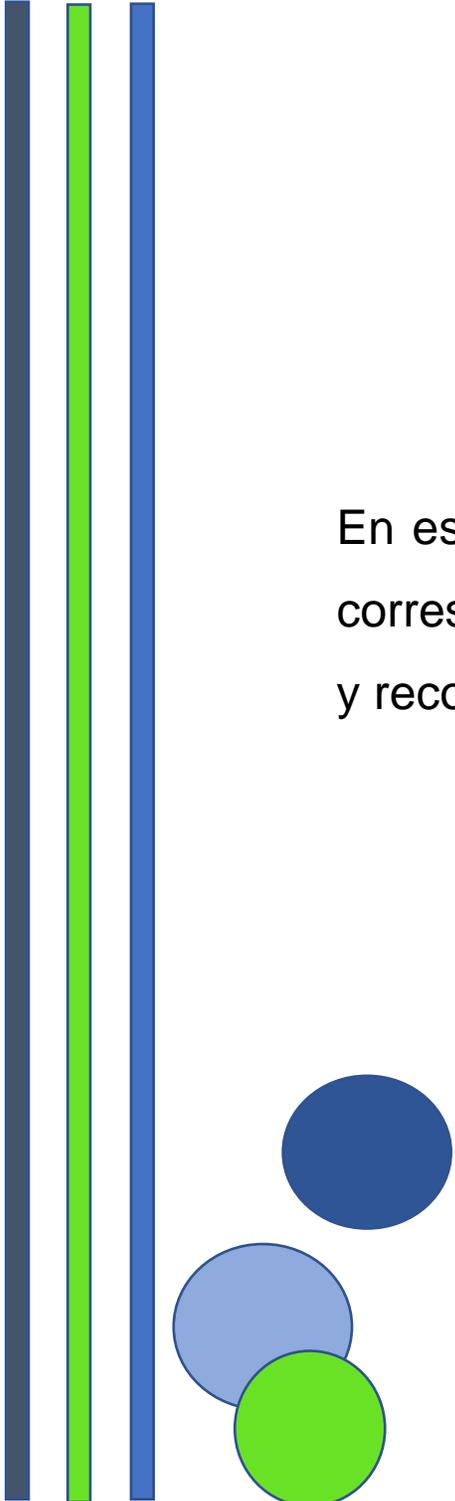
- Alogla, A., Amalou, F., Balmer, C., Scanlan, P., Shu, W., & Reuben, R. (2018). Micro-tweezers: Design, fabrication, simulation and testing of a pneumatically actuated micro-gripper for micromanipulation and microtactile sensing. *Sensors and Actuator A: Physical*. Volume 236, 1, 394-404. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.sna.2015.06.032>.
- Cauchi, M., Grech, I., Mallia, B., Mollicone, P., & Portelli, B. (2019). Essential design and fabrication considerations for the reliable performance of an electrothermal MEMS microgripper. *Microsyst Technology*, 1-16.
- 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.
- Chu Duc, T., Lau, G.-K., & Creemer, J. (2008). Electrothermal Microgripper With Large Jaw Displacement and Integrated Force Sensors. *JOURNAL OF MICROELECTROMECHANICAL SYSTEMS*, VOL. 17, NO. 6, 1546-1555.
- Chu, J., Zhang, R., & Chen, Z. (2011). A novel SU-8 electrothermal microgripper based on the type synthesis of the kinematic chain method and the stiffness matrix method. *JOURNAL OF MICROMECHANICS AND MICROENGINEERING*, 1-15, DOI:10.1088/0960-1317/21/5/054030.
- Demaghsi, H., Mirzajani, H., & Ghavifekr, H. (2013). Design and simulation of a novel metallic microgripper using vibration to release nano objects actively. *Microsystem Technololy*, 65–72, DOI 10.1007/s00542-013-1888-7.
- Luo, J., Flewitt, A., Spearing, S., Fleck, N., & Milne, W. (2005). Comparison of microtweezers based on three lateral thermal actuator configurations. *JOURNAL OF MICROMECHANICS AND MICROENGINEERING* , 1294–1302, DOI:10.1088/0960-1317/15/6/022.
- Qiu, J., Lang, J., Slocum, A., & Weber, A. (2005). A bulk-micromachined bistable relay with U-shaped thermal actuators. in *Journal of Microelectromechanical Systems*, vol. 14, no. 5, 1099-1109, DOI: 10.1109/JMEMS.2005.856676.
- Vatan, H., & Hamedi, M. (2020). Design, analysis and fabrication of a novel hybrid electrothermal microgripper in microassembly cell. *Microelectronic Engineering*, 1-12, DOI:<https://doi.org/10.1016/j.mee.2020.111374>.

- 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.
- Abbas, M., Masood, M., Saleem, M., & Sheikh, M. (2018). Design of an Electrothermally Actuated SU-8 Based Microgripper for Biomedical Applications. *Asia-Pacific Conference on Intelligent Robot Systems*, 97-102.
- Ali, N., Shakoor, R., & Hassan, M. (2011). Design, modeling and simulation of electrothermally actuated Microgripper with integrated capacitive contact sensor. *EEE 14th International Multitopic Conference*, (págs. 201-206, DOI: 10.1109/INMIC.2011.6151473.). Karachi.
- 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, Packaging & Allied Sciences*, Vol. 4, No. 4, 2560-2566, DOI:https://www.researchgate.net/publication/321097911.
- Bharadwaj, K., & Ramesh, T. (2019). A Parametric Study on Electrothermally Actuated Compliant Microgripper. *Excerpt from the Proceedings of the 2016 COMSOL Conference in Bangalore*, (págs. 1-4). Bangalore.
- Bindu, R., Kushal, & Potdar, M. (2011). Study of Piezoelectric Cantilever Energy Harvesters. *INTERNATIONAL JOURNAL OF INNOVATIVE RESEARCH AND DEVELOPMENT*, Vol 3 Issue 2, 39-42.
- Conrad, H., Schenk, H., Kaiser, B., Langa, S., Gaudet, M., Schimmanz, K., . . . Lenz, M. (2015). A small-gap electrostatic micro-actuator for large. *Nat Commun* 6, 10078, 1-7 pages. DOI: https://doi.org/10.1038/ncomms10078.
- Coutinho, I., Neves, A., Sombrio, G., & Souza, J. (4 de May de 2018). Surface tension driven flow forming aluminum oxide microtubes. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 126, 32–38.
- Espinosa, H., Zhu, Y., & Moldovan, N. (october de 2007). Desing and Operation of a MEMS-Based Material Testing System for Nanomechanical Characterization. *Journal of Microelectromechanical System*, 16(5), 1219-1231.
- 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.

- Ghatkesar, M., Barwich, V., Braun, T., Ramseyer, J.-P., Gerber, C., Hegner, M., . . . Despont, M. (2007). Higher modes of vibration increase mass sensitivity in nanomechanical microcantilevers. *IOP Publishing*, 1-8, DOI:10.1088/0957-4484/18/44/445502.
- 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.
- Iamoni, S., & Somà, A. (2014). Design of an electro-thermally actuated cell microgripper. *Microsystem Technologies* 20, 869–877. DOI: 10.1007/s00542-013-2065-8.
- ITRS. International technology roadmap for semiconductor: Micro-Electro-Mechanical System (MEMS). 2013 Edition.* (16 de Juilo de 2020). Obtenido de <https://www.semiconductors.org/wp-content/uploads/2018/08/2013MEMS.pdf>
- Jithendra Prasad, M., & Shameem, S. (2016). Design and Analysis of Micro-Cantilever Based Biosensor for Swine Flu Detection. *International Journal of Electrical and Computer Engineering (IJECE)*, Vol. 6, No. 3, 1190 -1196, DOI: 10.11591/ijece.v6i3.9446.
- Kaajakari. (2009). *Practical MEMS*. Small Gear Publishing.
- Kaajakari, V. (2009). *Practical MEMS*. Las Vegas, NV 89107: Small Gear Publishing.
- 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.appt.2010.09.001>.
- Khazaai, J. (2013). *Design, fabrication, and characterization of electro-thermal micro devices based on MEMS actuators*. Rochester, Michigan: ProQuest.
- Kim, B., Park, J., Moon, C., Jeong, G., & Ahn, H. (2009). A precision robot system with modular actuators and MEMS micro gripper for micro system assembly. *J. Mech. Sci. Technol.*, 22 (1), 70-76.
- Kolahdoozan , M., Rouhani, E., & Hassani, M. (2017). Experimental and Numerical Investigation of the Arms Displacement in a New Electrothermal MEMS Actuator. *International Journal of Advanced Design and Manufacturing Technology Vol. 10 (2)*, 71-81.
- 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>.
- Llewellyn-Evans, H., Griffiths, C., & Fahmy, A. (2020). Microgripper design and evaluation for automated I-wire assembly: a survey. *Microsyst Technol (26)*, 1745–1768 DOI:<https://doi.org/10.1007/s00542-019-04741-4>.

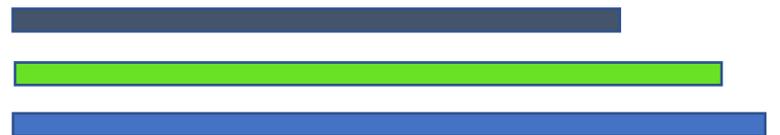
- Lofroth, M., & Avci, E. (2019). Development of a Novel Modular Compliant Gripper for Manipulation of Micro Objects. *Micromachines*, Vol:10, 313, 1-22, DOI:10.3390/mi10050313.
- Mohd Zubir, M., Shirinzadeh, B., & Tian, Y. (2009). A new design of piezoelectric driven compliant-based microgripper for micromanipulation. *Mechanism and Machine Theory*, 2248–2264.
- Nah, S., & Zhong, Z. (2009). A microgripper using piezoelectric actuation for micro-object manipulation. *J. Sens. Actuators*, A133, 218–224, DOI:10.1016/j.sna.2006.03.014.
- 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>.
- Pahwa, T., Gupta, S., Bansal, V., Prasad, B., & Kumar, D. (2012). Analysis & design optimization of laterally driven poly-silicon electro-thermal micro-gripper for micro-objects manipulation. *COMSOL Conf. in Bangalore*, (págs. 1-5). Electronic Science Department, Kurukshetra University, Kurukshetra.
- 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.
- Shivhare, P., Uma, G., & M. Umapathy. (2015). Design enhancement of a chevron electrothermally actuated. *Microsystem Technololy*, 1-9, DOI 10.1007/s00542-015-2561-0.
- Vargas Chable, P., Ferrara Bello, C. A., Sandoval Reyes, J., Tecpoyotl Torres, M., & Varona, J. (2019). A novel electrothermal compliance microgripper. *2019 International Conference on Mechatronics, Electronics and Automotive Engineering (ICMEAE)* (págs. 74-78). Cuernavaca, Morelos: IEEE. DOI 10.1109/ICMEAE.2019.00021.
- 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.
- Verotii, M., & Belfiore, N. (2017). A Comprehensive Survey on Microgrippers Design: Operational Strategy. *Journal of Mechanical Design*, Vol. 139, 1-18, DOI: 10.1115/1.4036352.
- Voicu, R.-C., Tibeica, C., Müller, R., & Dinescu, A. (2017). An SU-8 micro-tweezer based on the chevron electro-thermal actuators with a large in-plane displacement. *International Semiconductor Conference (CAS)*, (págs. 11-14, DOI: 10.1109/SMICND.2017.8101169). Sinaia, Romania.

- Wang, Z. S. (2015). Design, modeling, and characterization of a MEMS electrothermal microgripper. *Microsystem Technology*, 2307-2315.
- Wang, Z., Shen, X., & Chen, X. (2014). Design, modeling, and characterization of a MEMS electrothermal microgripper. *Microsystem Technololy*, 1-8, DOI 10.1007/s00542-014-2404-4.
- Won, D. S., Nallani, A. K., D. C., G.-S. L., Kim, M. J., G. S., & J.-B. L. (2009). A sub-micron metallic electrothermal gripper. *Microsyst. Technol.*, 367-373, DOI 10.1007/s00542-009-0939-6.
- 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.
- Yong, Z., Corigliano, A., & D Espinosa, H. (2006). A thermal actuator for nanoscale in situ microscopy testing: design and characterization. *Institute of Physics Publishing*, 12.
- Yukun, J., Nimping, J., & Qingsong, X. (2014). A Dual-Axis Electrostatically Driven MEMS Microgripper. *INTERNATIONAL JOURNAL OF ADVANCED ROBOTIC SYSTEM* 11:187., 9 pages. <https://doi.org/10.5772/59677>.
- Zhang, R., Chu, J., Wang, H., & Chen, Z. (2013). A multipurpose electrothermal microgripper for biological micro-manipulation. *Microsystem Technology*, 89-97, DOI 10.1007/s00542-012-1567-0.
- 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.
- 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>.

Three vertical bars of different colors (dark blue, light blue, and green) are positioned on the left side of the page. Below them are three circles of different colors (dark blue, light blue, and green) arranged in a cluster.

ANEXOS

En esta sección se presentan los anexos correspondientes a publicaciones, talleres y reconocimientos.



Anexo A. PUBLICACIONES

A1. Capítulo en libro



San Juan del Río, Qro. Jueves 16 de julio de 2020.

Distinguida: *TECPOYOTL-TORRES Margarita, RODRIGUEZ-FUENTES Sahiril Fernanda, KOSHEVAYA Svetlana y VARGAS-CHABLE Pedro.*

**CENTRO DE INVESTIGACIÓN EN INGENIERÍA Y CIENCIAS APLICADAS, UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DEL ESTADO DE MORELOS (UAEM)
LICENCIATURA EN TECNOLOGÍA CON ÁREAS TERMINALES EN FÍSICA APLICADA Y ELECTRÓNICA,
INSTITUTO DE INVESTIGACIÓN EN CIENCIAS BÁSICAS Y APLICADAS, UAEM
FACULTAD DE CIENCIAS QUÍMICAS E INGENIERÍA, UAEM**

Por este medio me es grato informar a ustedes que el **CAPÍTULO DE LIBRO**, titulado:

Código	Título
MniC-028	"Análisis paramétrico de los elementos del actuador chevrón"

Ha sido para **ACEPTADO PARA PUBLICACIÓN**, en los Handbook's Collections que edita la empresa ECORFAN MÉXICO S.C, se le invita cordialmente a realizar las correcciones indicadas en el dictamen y preparar su capítulo en extenso corregido en conformidad con el formato del Handbook Téemplate, la fecha para enviar su capítulo corregido, inicia a partir de la fecha de la presente carta de aceptación y culminará el día **17 de agosto de 2020**.

La publicación de su capítulo de libro se realizará, si y solo si, se cumplen con los trámites administrativos indicados por el comité organizador del CIERMMI 2020.

Sin otro particular de momento, aprovecho la ocasión para enviarles un saludo cordial y expresarles mi reconocimiento y gratitud por participar en la 2da edición de la convocatoria Mujeres en la Ciencia 2020., el cual tiene como principal motivo impulsar el desarrollo académico de todas nuestra Profesoras-Investigadoras de nuestro país.

ATENTAMENTE

Ing. Luis Eduardo Cruz Carpio
Coordinador de Mujeres en la Ciencia 2020.

COLEGIO DE INGENIEROS EN ENERGÍAS RENOVABLES DE QUERÉTARO A.C.
cierqro@gmail.com , Tel.+52 01 (427) 272 2991 www.cierqueretaro.org.mx

Novel Microgripper based on a Chevron Actuator and a Simple Compliance Arrangement

M. Tecpoyotl-Torres, S. F. Rodríguez-Fuentes
 Centro de Investigación en Ingeniería y Ciencias Aplicadas,
 CHCAp-IICBA
 Universidad Autónoma del Estado de Morelos, UAEM
 Av. Universidad No. 1001, Morelos, México
 tecpoyotl@uaem.mx, 20144009513@alumnos.uaem.mx

J. G. Vera-Dimas, R. Cabello-Ruiz, P. Vargas-Chable
 Facultad de Ciencias Químicas e Ingeniería
 FCQeI-UAEM
 Universidad Autónoma del Estado de Morelos, UAEM
 Av. Universidad No. 1001, Morelos, Mexico
 {gvera, ramon.cabello&pedro.vargas}@uaem.mx

Abstract – In this paper a novel microgripper device is shown. It is based on a chevron type actuator, and a simple configuration of compliance beams. It is also considered a source of thermal energy, which in this case is 2 V, which generates a temperature of 92.7 °C at the jaw's tips. Its main advantage is given by the simplicity and the reduced number of beams, which composed the compliance arrangement of the microgrippers jaws. It is response competitive with other ones, more complex, found in literature, both in displacement and force. The structural material is Silicon. The effect on the microgripper performance due to its thickness is also analyzed. Some applications of the microgripper are detected, for example, subsection of microwires and manipulation of micro objects with diameters smaller than 85µm, and weights lower than 38.63 µg. All microgrippers simulations were done on Ansys software.

Keywords –displacement, temperature, force, silicon, Ansys.

I. INTRODUCTION

The term Microelectromechanical Systems (MEMS) refers to a set of microsensors and microactuators that can perceive environments and have the ability of reacting to change in those environment, using the control microcircuits [1]. Microcomponents make the system faster, more reliable, cheaper, and capable of incorporating more complex functions. Microelectronics technology has developed rapidly since 1960. In the early 1990s, microelectromechanics (MEMS) emerged with help of the development of integrated circuit (IC) manufacturing processes, where sensors, actuators, and control functions are co-fabricated in silicon. Since then, remarkable progress has been made in MEMS research. In addition to the commercialization of some MEMS devices, such as microaccelerometers, inkjet printer tips, and micromirrors for projection, the concept and feasibility of more complex MEMS devices have been proposed and demonstrated for applications in fields as varied such as aerospace, biomedical, biological, wireless communications, etc.

Microgripper is and other MEM device with a wide application spectrum, such as biological, medical and electronics applications [2].

This paper focuses on a novel microgripper's design, based on a chevron actuator. The content of this work is organized as follows. In section 2, design of the elements of the microgripper are provided. Section 3 shows the conventional mathematical model of chevron actuator and the basis of the subsection force of the microgripper. Simulation results are

provided in section 4, about the main parameters of the microgripper. Finally, in section 5, some concluding remarks are given.

II. MICROGRIPPER DESIGN

Silicon is used as structural material for the microgripper design, its parameters are shown in Table I.

TABLE I
 PHYSICAL AND MECHANICAL
 PROPERTIES OF SILICON [3], [4].

Silicon	
Parameters	Value
Density, [kg/m ³]	2330
Thermal expansion coefficient, α [1/°C]	2.5 e-6
Young's Modulus, E [Pa]	1.301e11
Poisson's ratio, ν [Pa]	0.33
Thermal conductivity, [W/(m ² °C)]	148
Resistivity, ρ [Ω^*m]	1.5e-4
Melting point [°C]	1414

Microgripper is actuated by an electrothermic chevron. This actuator has been extensively studied. The schematic diagram of this actuator, used in this work, is given in Fig. 1. Its characteristics has been chosen, with the aid of an optimization process based on parametric analysis, which will be reported in other work. Its dimensions are given in Table II.

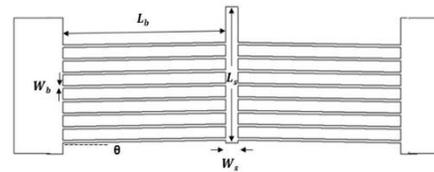


Fig. 1 Schematic diagram of the chevron actuator.

The properly microgripper section was designed considering as the base two structures based on modified pantograph sections, to obtain an additional displacement amplification. Jaws tips the tip was designed to favor grip. The schematic diagram of the jaws' section is shown in Fig. 2.

A3. Artículo aceptado “ACTUATORS”

 **actuators**
an Open Access Journal by MDPI

CERTIFICATE OF PUBLICATION

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

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

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

 Academic Open Access Publishing
since 1996

Basel, October 2020



Article

Microgripper Based on Simple Compliance Configurations, Improved by Using Parameterization

Pedro Vargas-Chable ^{1,2}, Jose Mireles Jr-Garcia ³, Sahiril Fernanda Rodriguez-Fuentes ⁴, Samuel Isai Valle-Morales ⁵ and Margarita Tecpoyotl-Torres ^{2, *}

- ¹ Facultad de Ciencias Químicas e Ingenierías (FCQel), Universidad Autónoma del Estado de Morelos, Cuernavaca, Morelos 62209, Mexico; pedro.vargas@uaem.mx
 - ² Instituto de Investigación en Ciencias Básicas y Aplicadas-Centro de Investigación en Ingeniería y Ciencias Aplicadas (IICBA-CIICAp), Universidad Autónoma del Estado de Morelos, Cuernavaca, Morelos 62209, Mexico
 - ³ Centro de Investigación en Ciencia y Tecnología Aplicada, Universidad Autónoma de Ciudad Juárez, Av. Plutarco Elías Calles #1210, Fovissste Chamizal, Ciudad Juárez, Chihuahua C.P. 32310, Mexico; jmireles@uacj.mx
 - ⁴ Licenciatura en Tecnología con áreas terminales en Física Aplicada y Electrónica, Universidad Autónoma del Estado de Morelos, Cuernavaca, Morelos 62209, Mexico; 20144009513@alumnos.uaem.mx
 - ⁵ Posgrado en Ingeniería y Ciencias Aplicadas, Universidad Autónoma del Estado de Morelos, Cuernavaca, Morelos 62209, Mexico; samuel.valle@uaem.edu.mx
- * Correspondence: tecpoyotl@uaem.mx

Received: 19 November 2020; Accepted: 10 December 2020; Published: 15 December 2020



check for

Abstract: The design of a novel electrothermal microgripper device is shown, which is based on an improved chevron type actuator developed considering their elements parameterization, whose resistive model is also provided. The performance of the microgripper's parameters, such as displacement, force, and temperature distribution, with convection for the voltage range from 0 upto 5 V, is evaluated through numerical and analytical simulation. Microgripper design was also improved with aid of parameterization. The effect on the microgripper performance due to its thickness is also analyzed, finding a considerable increment in force, when thickness increases. Its main advantage is given by the simplicity of the compliance arrangement of the microgrippers jaws. Considering convection, when 5 V are applied, 37.72 °C was generated at the jaw's tips of the Improved Microgripper 2 (IMG2), implemented with silicon, this relatively low

temperature increases its capabilities of application. When the IMG2 is implemented with polysilicon, its response is competitive comparing with a more complex microgripper, increase of displacement (50%) is shown, but a decrement of force (30%). The diameters allowed for the subjection objects are found between 84.64 μm and 108 μm , with weights lower than 612.2 μg . Some tests of subjection were performed using microcylinders of Au, glass ceramic, polycarbonate, and carbon fiber, showing a permissible stress on them, considering its Young's modulus, as well as the total reaction force induced. All simulations were done on Ansys software. The results demonstrate the feasibility of the future microgripper fabrication.

Keywords: parameterization; compliance arrangement; displacement; temperature distribution; force; silicon; polysilicon; microparticles subjection; Ansys

Anexo B. TALLERES

B.1 Taller "Conociendo el micro-mundo con micro-herramientas"

 UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DEL ESTADO DE MORELOS  PUBLICACIONES Y DIVULGACIÓN	SECRETARÍA ACADÉMICA Dirección de Publicaciones y Divulgación
<p>La que suscribe, maestra Ana Silvia Canto Reyes, directora de Publicaciones y Divulgación de la Universidad Autónoma del Estado de Morelos hace:</p>	
CONSTAR	
<p>Que la C. Sahiril Fernanda Rodríguez Fuentes apoyó durante el desarrollo del Club de Ciencias para niños, actividad de divulgación de las ciencias organizada por esta dirección, que se realizó el día 31 de enero de 2020, y cuyo tema fue "Conociendo el micro-mundo con micro-herramientas".</p>	
<p>Se extiende la presente constancia para los fines que a la interesada convengan, a los treinta y un días del mes de enero de dos mil veinte.</p>	
<p>Atentamente <i>Por ma humanidad culta</i></p>  UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DEL ESTADO DE MORELOS Mtra. Ana Silvia Canto Reyes Directora de Publicaciones y Divulgación	
<p>c.i.p. – Expediente. Av. Universidad 1001 Col. Chamilpa, Cuernavaca Morelos, México. 62209 Tel. (777) 329 70 00, Ext. 3415 y 3416 / divulgacion@uaem.mx</p>	
 UA EM RECTORIA 2017-2023	
<i>Una universidad de excelencia</i>	

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

otorga el presente

RECONOCIMIENTO

A la: C. Sahiril Fernanda Rodríguez Fuentes

Por el apoyo brindado en el Taller:
“Introducción al Diseño de Sistemas Micro-Electro-Mecánicos”
llevado a cabo en las instalaciones de esta Universidad Tecnológica,
el día 13 de noviembre del presente año.

Emiliano Zapata, Mor., noviembre de 2019



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



B.3 Participación en la feria de la ciencia llevada a cabo en la preparatoria por Cooperación Andrés Quina Roo "Introducción al Diseño de Sistemas Micro-electro-mecánicos"



The certificate is a white document with a black border. At the top left, there is a logo for 'COMITÉ DE COOPERACIÓN Y TERCERIZACIÓN DEL ESTADO DE MORELOS'. At the top center, there is a cartoon illustration of a red dragon-like creature with a white body, holding a stack of colorful boxes labeled 'MEMS'. At the top right, there is a circular logo for 'PREPARATORIA ANDRÉS QUINA ROO' and a logo for 'ACADEMIA DE CIENCIAS DE MORELOS, A.C.' with the website 'WWW.ACMOR.COM'. The main text is centered and reads: 'LA PREPARATORIA FEDERAL POR COOPERACIÓN ANDRÉS QUINTANA ROO EN COORDINACIÓN CON EL CONSEJO DE CIENCIA Y TECNOLOGÍA DEL ESTADO DE MORELOS Y LA ACADEMIA DE CIENCIAS DE MORELOS. En el marco de la Celebración de la 19ª Semana de la Ciencia y Tecnología. "Año Internacional de la Tabla Periódica de los Elementos Químicos"'. Below this is the large word 'RECONOCIMIENTO' in bold capital letters. Underneath is the name 'A: Sahril Fernanda Rodríguez Fuentes'. The text continues: 'Por su valiosa participación como Ponentes en el taller "Introducción al Diseño de Sistemas Micro-Electro-Mecánicos (MEMS)", en la 19ª Semana de la Ciencia y Tecnología. Celebrada en las Instalaciones de nuestra Institución, los días 23 al 25 de octubre del 2019.' At the bottom right, there is a signature and the name 'MTRO. FERNANDO MENDOZA VERGARA' with the title 'DIRECTOR DE PREPARATORIA'.

COMITÉ DE COOPERACIÓN Y TERCERIZACIÓN DEL ESTADO DE MORELOS

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

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

RECONOCIMIENTO

A: Sahril Fernanda Rodríguez Fuentes

Por su valiosa participación como Ponentes en el taller "Introducción al Diseño de Sistemas Micro-Electro-Mecánicos (MEMS)", en la 19ª Semana de la Ciencia y Tecnología. Celebrada en las Instalaciones de nuestra Institución, los días 23 al 25 de octubre del 2019.


MTRO. FERNANDO MENDOZA VERGARA
DIRECTOR DE PREPARATORIA

PREPARATORIA ANDRÉS QUINA ROO

ACADEMIA DE CIENCIAS DE MORELOS, A.C.
WWW.ACMOR.COM