



UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DEL
ESTADO DE MORELOS

INSTITUTO DE INVESTIGACIÓN EN CIENCIAS BÁSICAS Y
APLICADAS (IICBA)

CENTRO DE INVESTIGACION EN INGENIERIA Y CIENCIA
APLICADAS (CIICAp)

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DEL ESTADO DE MORELOS (UEAM)

Diseño y caracterización de una micropinza basada en bioinspiración

TESIS PARA OBTENER EL GRADO DE:
MAESTRIA EN INGENIERIA Y CIENCIAS APLICADAS

ING. ALAN JESÚS ESTRADA CABRERA

DIRECTORA

DRA. MARGARITA TECPOYOTL TORRES

CODIRECTOR

DR. PEDRO VARGAS CHABLÉ

SINODALES

DR. JOSÉ ALFREDO RODRÍGUEZ RAMÍREZ

DRA. MARGARITA TECPOYOTL TORRES

DR. JOSÉ ANTONIO MARBÁN SALGADO

DR. PEDRO VARGAS CHABLÉ

DR. RAMON CABELLO RUÍZ

Resumen

Este trabajo se enfoca en el diseño de una micropinza bioinspirada, normalmente abierta, que corresponde al campo de los Sistemas Microelectromecánicos, MEMS. El novedoso diseño está inspirado en las mandíbulas de las hormigas. Su estructura se compone de un amplificador flexible de tipo M y un actuador chevrón con vigas de forma Z modificado. El diseño y la simulación se realizaron con ANSYS™.

Se llevó a cabo el modelado de los elementos de la micropinza diseñada en silicio, así como de sus parámetros básicos. Cuando se aplica un voltaje de 0 a 2 V, se genera un desplazamiento y fuerza suficientes para sujetar objetos con diámetros desde 58 μm hasta 90 μm , con pesos menores a 0.9 mg, lo que la hace una herramienta útil para tareas como sujeción, traslado y liberación de objetos con estas características. El rango de fuerza obtenido de las simulaciones es de hasta 8.85 mN.

Para validar el funcionamiento de la geometría se lleva a cabo, además, el escalamiento del dispositivo, considerando un factor de escala en la geometría de 100. Cabe señalar que, se realizó un pequeño ajuste sobre las dimensiones de las anclas, a la cuales además se les incluyó orificios para llevar a cabo una sujeción adecuada. Para el proceso de fabricación se utilizó aluminio 6053. Se calcularon la resistividad del aluminio, la resistencia equivalente de la pinza. La resistencia demás, se midió experimentalmente con un medidor LCR (Inductancia, Resistencia y Capacitancia), marca Keysight, Modelo E4980A. Cabe señalar que, los niveles de aproximación fueron muy cercanos, entre los resultados numéricos y analíticos, comparados con los resultados experimentales, obteniéndose errores de 3.35% y 3.72%, respectivamente.

La caracterización experimental de la pinza escalada se realizó aplicando un barrido de corriente eléctrica desde 5 hasta 60 A al actuador. Los Magnitudes de temperatura ambiente se registraron durante 6 días fueron registradas para obtener las condiciones de frontera que retroalimentaron a las simulaciones.

Por otro lado, mediante una cámara termográfica se registraron las temperaturas en la flecha del actuador chevrón y en las puntas de la pinza. Cabe señalar que, la temperatura en las puntas se mantuvo a la

temperatura ambiente, mientras que en el actuador es donde se registraron cambios significativos. Debido a que se trata de un dispositivo implementado en un metal, las temperaturas para el rango de alimentación aplicado se encuentran desde la temperatura ambiente, hasta un máximo de 48°C. El error promedio entre los resultados numéricos, realizado con ANSYS, y experimentales de la temperatura de la flecha del actuador es menor al 13%.

Se midió además el desplazamiento entre las puntas de pinza escalada, utilizando un microscopio industrial, obteniéndose en promedio 6 mm entre ambas mandíbulas, mientras que en la simulación se obtuvo 8 mm, generándose un error obtenido de 33.33%. Cabe señalar que, las condiciones de medición no son totalmente controladas, ya que hay variaciones de temperatura y la convección es altamente variante, incluso al hablar. Mientras que, con relación al ancla del actuador, al fijar las anclas se genera una deformación en la parte fija de los brazos, además de generarse no linealidades en el desplazamiento de la flecha debido a que no tiene un anclaje absoluto.

A partir del trabajo realizado puede concluirse que se desarrolló una nueva geometría funcional, inspirada en las mandíbulas de las hormigas. A nivel micrométrico e implementada en silicio, la micropinza es útil para objetos con diámetros hasta 88.1 mg.

El funcionamiento de la geometría es validado en escala meso, observándose un desempeño similar, en el que, se llevaron a cabo mediciones sobre las temperaturas generadas en la flecha del actuador chevrón.

Finalmente, puede decirse que, la biomimética es sumamente útil en el diseño de microdispositivos y que, por otro lado, la fabricación en escala meso es una alternativa de bajo costo para llevar a cabo la validación sobre la funcionalidad de la geometría, toda vez que, los recursos necesarios para la microfabricación, encapsulado y pruebas son muy altos.

Palabras clave: MEMS, Micropinza, Escalamiento, ANSYS, Actuación electrotérmica, Aluminio 6053, Mecanismo de amplificación.

Abstract

This work focuses on the design of a bio-inspired, normally open, microgripper, which corresponds to the field of Microelectromechanical Systems, MEMS. The novel design is inspired by ants' mandibles. Its structure consists of a flexible M-type amplifier and a modified Z-beam chevron actuator. The design and simulation were performed with ANSYS™.

The modeling of the elements of the microgripper designed in silicon, as well as its basic parameters, was carried out. When a voltage of 0 to 2 V is applied, sufficient displacement and force is generated to grip objects with diameters from 58 μm to 90 μm , with weights of less than 0.9 mg, which makes it a useful tool for tasks such as gripping, transferring and releasing objects with these characteristics. The force range obtained from the simulations is up to 8.85 mN.

To validate the operation of the geometry, the device was also scaled, considering a scale factor of 100 in the geometry. It should be noted that a small adjustment was made to the dimensions of the anchors, which were also provided with holes for proper fastening. Aluminum 6053 was used for the manufacturing process. The resistivity of the aluminum and the equivalent resistance of the clamp were calculated. The other resistance was measured experimentally with a Keysight E4980A LCR (Inductance, Resistance and Capacitance) meter. It should be noted that the levels of approximation were very close between the numerical and analytical results, compared with the experimental results, obtaining errors of 3.35% and 3.72%, respectively.

Experimental characterization of the scaled gripper was performed by applying an electric current sweep from 5 to 60 A to the actuator. Ambient temperature values were recorded for 6 days were recorded to obtain the boundary conditions that fed back to the simulations.

On the other hand, a thermographic camera was used to record the temperatures on the shaft of the chevron actuator and on the tips of the clamp. It should be noted that the temperature at the tips was maintained at room temperature, while significant changes were recorded at the actuator. Since this is a device implemented in a metal, the temperatures for the applied power supply range from room temperature to a maximum of 48°C. The average error between the numerical results, performed with ANSYS™, and experimental results of the actuator shaft temperature is less than 13%.

The displacement between the scaled gripper tips was also measured, using an industrial microscope, obtaining an average of 6 mm between both jaws, while in the simulation 8 mm was obtained, generating an error of 33.33%. It should be noted that the measurement conditions are not totally controlled, since there are temperature variations and convection is highly variable, even when speaking. Meanwhile, in relation to the actuator anchorage, when fixing the anchors, a deformation is generated in the fixed part of the arms, in addition to generating non-linearities in the displacement of the shaft because it does not have an absolute anchorage.

From the work carried out, it can be concluded that a new functional geometry was developed, inspired by the mandibles of ants. At the micrometer level and implemented in silicon, the microgripper is useful for objects with diameters up to 88.1 mg.

The operation of the geometry is validated at meso scale, observing a similar performance, in which, measurements were carried out on the temperatures generated in the shaft of the chevron actuator.

Finally, it can be said that biomimetics is extremely useful in the design of microdevices and that, on the other hand, meso-scale fabrication is a low-cost alternative to carry out the validation of the functionality of the geometry, since the resources required for microfabrication, encapsulation and testing are very high.

Keywords: MEMS, Microgripper, Scaling, ANSYS, Electrothermal actuation, Aluminum 6053, Amplification mechanism.

Agradecimientos

Agradezco principalmente al estado mexicano por el apoyo a la educación pública y a todos los mexicanos que contribuyen a nuestra nación.

Esta investigación fue financiada por Consejo Nacional de Humanidades, Ciencia y Tecnología, CONAHCyT, Número de referencia de la subvención A1-S-33433. “Proyecto Apoyado por el Fondo Sectorial de Investigación para la Educación” y por el apoyo obtenido a través de las becas Nacionales de posgrado, con número de apoyo 809964, No. CVU: 1152724.

Agradezco también a la Universidad Autónoma del Estado de Morelos (UAEM) y al Centro de Investigación en Ingeniería y Ciencias Aplicadas (CIICAp), por abrirme sus puertas para llevar a cabo mis estudios.

Agradezco con mucho cariño a la Dra. Margarita Tecpoyotl Torres quien fue mi guía durante todo el proceso de desarrollo de la tesis, la cual fue desarrollada en su laboratorio, considerándola como una gran directora y ser humano.

Agradezco con mucha estima al Dr. Pedro Vargas Chablé quien apoyó con su conocimiento y material al trabajo realizado en la Tesis, considerándolo como un estupendo codirector y ser humano.

A mis queridos compañeros de laboratorio que me brindaron su apoyo al Maestro Andrés Ferrara y la Licenciada Sahiril Fernanda Rodríguez Fuentes.

Dedicatoria

Dedico principalmente este trabajo a todas las personas que me ayudaron a crecer como persona y ser humano, destacando a mi familia, quienes me apoyaron de principio a fin en mis estudios superiores, en el desarrollo de mis valores y forma de ver la vida.

Índice general

Resumen	i
Abstract.....	iii
Agradecimientos	v
Dedicatoria.....	vi
Índice general	vii
Índice de Figuras	x
Índice de Tablas.....	xiii
CAPÍTULO 1. INTRODUCCIÓN.....	2
1.1 Introducción	2
1.2 Antecedentes	3
1.3 Planteamiento del Problema	4
1.4 Justificación	4
1.5 Hipótesis	5
1.5.1 Preguntas de investigación	5
1.6 Objetivo general.....	5
1.6.1 Objetivos específicos	5
1.7 Alcance	6
1.8 Limitaciones	6
CAPÍTULO 2. MARCO TEÓRICO.....	9
2.1 Los sistemas microelectromecánicos (MEMS)	9
2.2 Biomimética (Bioinspiración).....	9
2.2.1 Niveles de Biomimética.....	10
2.2.2 Patrones presentes en la naturaleza	11
2.2.3 Metodología de Biomimética.....	12

2.3 Obleas de Silicio sobre Aislante (SOI, por sus siglas en inglés)	14
2.4 Micropinzas.....	15
2.4.1 Mecanismo de sujeción.....	17
2.4.2 Actuador.....	17
2.4.4 Microactuador chevrón con brazos en forma de Z.....	19
2.5 Estado del Arte	20
2.5.1 Micropinzas bioinspiradas de pinzas de cangrejo.....	21
2.5.2 Micropinzas asimétricas.....	23
2.5.3 Micropinzas bioinspiradas en mandíbulas de hormigas.....	24
2.6 Morfologías basadas en pinzas de un cangrejo y mandíbulas de hormigas	24
2.6.1 Pinzas de cangrejos.....	24
2.6.2 Análisis del estado del arte de las mandíbulas de hormigas	26
CAPÍTULO 3. METODOLOGÍA.....	29
3.1 Determinación de la tecnología, tipo de actuador, actuación y material	29
3.2 Análisis de la estructura biológica.....	30
3.3 Diseño preliminar de la micropinza	31
3.4 Simulación y ajustes necesarios al diseño.....	31
3.5 Comprobación de la viabilidad del diseño.....	32
3.6 Diseño final	32
CAPÍTULO 4. DESARROLLO.....	34
4.1 Microactuador chevrón convencional.....	34
4.1.1. Comparación de resultados numéricos y analíticos del actuador chevrón V.....	35

4.2	Microactuador chevrón de brazos Z.....	38
4.3	Microactuador chevrón de brazos Z modificado	39
4.3.1.	Resultados numéricos del actuador chevrón Z modificado	41
4.3.2	Modelado eléctrico del actuador chevrón Z	43
4.4	Diseño de un boceto preliminar de la micropinza	44
4.5	Desarrollo de la estructura bioinspirada.....	50
4.6	Dimensiones de la micropinza TG modificada (DISEÑO FINAL).....	56
4.6.1	Resistencia de la micropinza (diseño final)	57
4.6.2	Resultados numéricos de la micropinza final	57
4.7	Comparación con otras micropinzas.....	58
4.8	Cumplimiento de objetivo.....	59
	CAPÍTULO 5. PRUEBAS EXPERIMENTALES (MICROPINZA ESCALADA).....	61
5.1	Determinación analítica y experimental de la resistividad del aluminio 6053.....	62
5.2	Determinación de la resistencia del actuador y la pinza, analítica y experimental.	63
5.3	Resultados experimentales de los parámetros de desempeño de la pinza escalada.....	64
5.3.1	Distribución de temperatura	65
5.3.2	Voltaje inducido.....	67
5.3.3	Desplazamiento	68
	CAPÍTULO 6. CONCLUSIONES.....	71
	ANEXO A. SIMULACIÓN Y FABRICACIÓN DE LA PINZA ESCALADA	74
A.1	Ajustes al diseño final de la micropinza	74

A.2 Dimensiones de la pinza escalada	75
A.3 Simulación de la pinza escalada	76
A.3.1 Condiciones de frontera para el análisis numérico	77
A.3.2 Resultados numéricos	78
A.4 Fabricación del diseño.....	80
ANEXO B. SIMULACIÓN DEL ACTUADOR CHEVRÓN V	82
ANEXO C. PARTICIPACIONES EN TALLERES Y EN CONGRESOS ...	88
Referencias.....	93

Índice de Figuras

Figura 1.1 Ejemplo de tecnologías MEMS (Potrich et al., 2018).....	3
Figura 2.1 Ejemplo de un sensor MEM (EUROFACH ELECTRÓNICA, 2015).....	9
Figura 2.2 Niveles de Biomímesis según Benyus. Adaptado de (Volstad, 2008).....	10
Figura 1.2 Patrones en la naturaleza (Patino & Arbelaez, 2009, p. 108). 11	
En la tabla 1.2 donde se aprecian las funciones principales y secundarias de los patrones revelando su gran utilidad, así como los mecanismos presentes y ejemplos de uso.	12
Figura 2.3 Proceso de diseño según la Espiral de Diseño Biomimético. (Biomimicry Institute, 2022).....	12
Figura 2.4 Ejemplo de un actuador micropinza (Xiao Yu, 2008).....	16
Figura 2.5 Micropinza con actuación biotérmica (Leong et al., 2009).....	16
Figura 2.6 Ejemplo de la estructura de un actuador Chevrón. (Margarita Tecpoyotl-Torres, 2015).....	19

Figura 2.7 a) Actuador en forma de V (Guan & Zhu, 2010). b) y c) Actuador en forma de Z, convencional y modificado, respectivamente (Tecpoyotl Torres et al., 2015).....	19
Figura 2.8 Diagrama del funcionamiento de la pinza de un cangrejo (Madhab et al., 2010).....	22
Figura 2.9 Micropinza bioinspirada (Madhab et al., 2010).	22
Figura 2.10 Modelo CAD de la micropinza obtenida de (Khare et al. 2007).	23
Figura 2.11 Diagrama de una micropinza piezoeléctrica asimétrica (Liang et al., 2018).....	23
Figura 2.12 (A-C) Ejemplos de morfologías divergentes encontradas en la pinza mayor del cangrejo violinista. En (A) se indican las partes de las pinzas (Swanson et al. 2013).....	25
Figura 2.13 Esquema de la garra principal de un cangrejo macho (Swanson et al. 2013).....	25
Figura 2.14 (a) Elementos de la pinza. (b) Desplazamiento de las fibras musculares durante la apertura y cerradura. (c) Mandíbula abierta y cerrada (Schenk y Wainwright 2001).	26
Figura 2.15 Organización general del aparato mandibular de la cabeza de una hormiga. (A) Vista dorsal de la cabeza. (B) Vista oblicua (Larabee et al, 2017).....	27
Figura 3.1 Metodología general.	29
Figura 5.1 a) Diseño de la micropinza final, b) pinza fabricada.....	61
Figura 5.2 a) Configuración experimental general para medir la resistencia de la probeta. b) Puntas de medición LCR que sujetan a la probeta.	62
Figura 5.3 a) Resultados de la resistencia del actuador, b) Arreglo de prueba del actuador, c) Resultados de la resistencia de la estructura completa y d) Arreglo de prueba de la estructura completa.....	63

Figura 5.4 Arreglo experimental para medir el desplazamiento, la distribución de la temperatura y la corriente eléctrica de la micropinza. . .	65
Figura 5.5 Imágenes termográficas de la temperatura en la flecha. a) Día 4, 63,1 °C, aplicando 60 A, y b) Día 6, 32,5 °C, aplicando 20 A.	66
Figura 5.6 a) Temperaturas del eje (datos numéricos y experimentales), b) error porcentual medio entre los resultados numéricos y experimentales sobre la temperatura en el eje	66
Figura 5.7 Voltaje generado en las anclas (datos experimentales).....	67
Figura 5.8 Desplazamiento entre las puntas de la pinza, datos numéricos y experimentales.....	68
Figura 5.9 Desplazamiento entre las puntas al aplicar 40 A, obteniéndose una apertura de 5.5 mm.....	69
Figura A.1 a) Diseño de la micropinza final, b) estructura con orificios de sujeción.....	74
Figura A.2 Cotas de la geometría de la mitad izquierda (a) del actuador chevrón Z y (b) de la pinza.	75
Figura A.3 Ventana gráfica que muestra la corriente máxima aplicada. . .	77
Figura A.4 Izquierda: Árbol de simulación y condiciones de frontera para obtener el desplazamiento en las puntas de la pinza. Derecha: Ventana gráfica que muestra las condiciones de frontera.....	78
Figura A.5 Temperatura de distribución de temperatura y desplazamiento de la pinza cuando se aplica 60 A. (a) y (b) el día 1, con 24°C fue la temperatura ambiente. (c) y (d) Día 2, con 23°C fue la temperatura ambiente	79
Figura A.6 Proceso de fabricación del diseño.....	80
Figura A.7 Maquinado de la estructura.	80
Figura B.1 Árbol de las operaciones de <i>Workbench</i>	82
Figura B.2 Propiedades del material definidas	83

Figura B.3 Asignación del material a la geometría en el análisis mecánico.	83
Figura B.4 Configuración del análisis <i>Thermal-Electric</i>	84
Figura B.5 Distribución de temperatura en el actuador.....	84
Figura B.6 Distribución de voltaje en el actuador.....	85
Figura B.7 Configuración de los análisis <i>Static Structural</i>	85
Figura B.8 Deformación total.	86
Figura B.9 Fuerza del desplazamiento.	86

Índice de Tablas

Tabla 2.1 Parámetros del material de silicio (Yang & Qingsong, 2017). ..	14
Tabla 2.2 Ecuaciones del modelado matemático del actuador Chevrón Z (Guan & Zhu, 2010).	20
Tabla 2.3 Variables utilizadas en la tabla 2.2.....	20
Tabla 3.1 Hoja de datos técnicos preliminar de la pinza a diseñar.	30
Tabla 4.1 Dimensiones del microactuador chevrón convencional	35
Tabla 4.2 Magnitudes de los parámetros de la ecuación 4.1	36
Tabla 4.3 Magnitudes de las variables empleadas en la ecuación (4.3)..	37
Tabla 4.4 Comparación de resultados del chevrón V.	38
Tabla 4.5 Dimensiones del microactuador chevrón Z modificado.....	40
Tabla 4.6 Comparación de resultados del chevrón convencional, chevrón Z y del Z modificado.....	42
$J = IA$ (4.10)	43
La magnitud del campo eléctrico puede obtenerse utilizando:	43
$E = Vl$ (4.11).....	43

Tabla 4.7 Patrones de pinzas y mandíbulas en la naturaleza.....	45
Tabla 4.8 Análisis de morfología.....	46
Tabla 4.9 Comparación de los parámetros de las pinzas sin convección.....	54
Tabla 4.10 Dimensiones de la geometría de la pinza (TG).....	56
Tabla 4.11 Ángulos de la geometría de la pinza (TG).....	57
Tabla 4.12 Dimensiones, desplazamiento y temperatura de la micropinza final.	57
Tabla 4.13 Desplazamientos direccionales de la micropinza final.	58
Tabla 4.14 Fuerzas de reacción direccionales de la micropinza final.	58
Tabla 4.15 Comparación de las características del diseño final con otras pinzas similares obtenidas de la literatura	58
Tabla 4.16 Respuestas a las preguntas de investigación.	59
Tabla 5.1 Dimensiones totales y apertura de la pinza fabricada.....	61
Tabla 5.2 Resultados y comparación de la resistividad del material estructural.	64
Tabla 5.3 Comparación de resultados numérico y experimentales del desplazamiento máximo de la punta.....	69
Tabla A.1 Dimensiones de los elementos de la pinza.....	75
Tabla A.2 Propiedades eléctricas de la micropinza implementada en aluminio.	76
Tabla A.3 Temperaturas y desplazamiento entre puntas.....	79

CAPÍTULO 1

INTRODUCCIÓN

En este capítulo se presentan los conceptos básicos de Bioinspiración, MEMS y micropinzas para sentar las bases del desarrollo de esta tesis. Se exponen brevemente las teorías y se presentan los objetivos de este trabajo, así como otros elementos introductorios requeridos para el desarrollo de esta investigación.



CAPÍTULO 1. INTRODUCCIÓN

1.1 Introducción

La Biomimética (Bioinspiración) es un método con el cual, los diseñadores e ingenieros hacen investigaciones biológicas para determinar la forma en que los organismos resuelven problemas complejos. En otras palabras, usan la información obtenida a través de millones de años de evolución para obtener un diseño (Benyus, 2002).

Los sistemas microelectromecánicos (MEMS, por sus siglas en inglés) son sistemas que se representan por este término acuñado hacia 1989 por el Prof. R. Howe y otros científicos, para describir un campo de investigación emergente, en el que elementos mecánicos, como vigas en voladizo o membranas, se fabricaban a una escala similar a la de los circuitos microelectrónicos. Los MEMS son la integración de elementos mecánicos, sensores, actuadores y electrónica en un sustrato común de silicio mediante la utilización de la tecnología de microfabricación. (Băjenescu, 2010).

Entre los dispositivos MEMS, se encuentran las micropinzas, las cuales están compuesta por un mecanismo actuador que se encarga de generar el movimiento necesario para su funcionamiento como se puede observar en la figura 1.1. Las micropinzas se utilizan en la manipulación celular, microensamblaje, caracterización de materiales, entre otras aplicaciones (Potrich, et al., 2018).

Dentro de las herramientas que ayudan al desarrollo de estos dispositivos MEMS, se encuentran los softwares CAD (por las siglas en inglés de Computer-Aided Design), obteniendo así, los resultados numéricos necesarios para caracterizar a la estructura. Para este trabajo se utilizará ANSYS®, software especializado en FEA (por las siglas en inglés de Finite Element Analysis, en español Análisis de Elemento Finito).

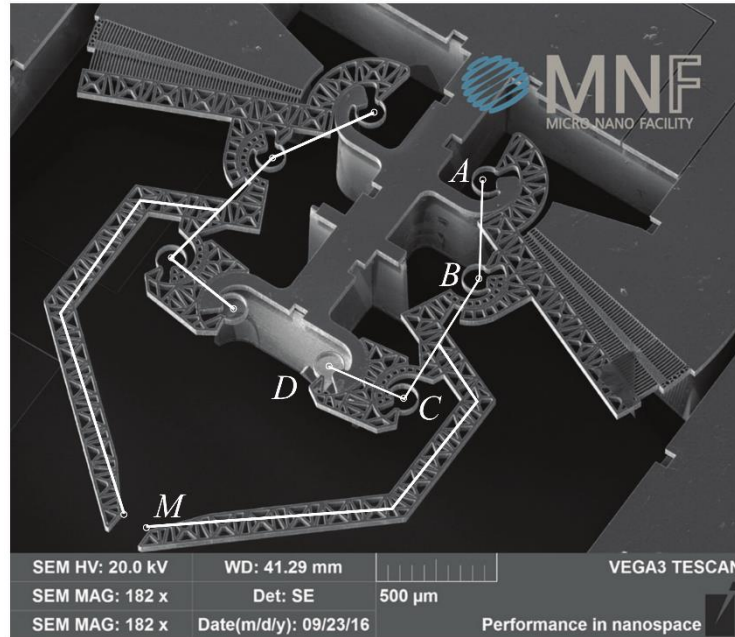


Figura 1.1 Ejemplo de tecnologías MEMS (Potrich et al., 2018).

1.2 Antecedentes

Los orígenes modernos de la Biomímica, mejor conocida como Biomimética, suelen atribuirse al ingeniero Richard Buckminster Fuller. Por su parte, el desarrollo conceptual corresponde a la científica Janine Benyus, quien en 1997 publicó el libro de mayor referencia hasta ahora; *Biomimicry: Innovation Inspired by Nature* (Benyus, 2002). La palabra Biomimética deriva de *bios*, que significa vida y *mimesis* que significa imitar, siendo esta una nueva ciencia, la que estudia las mejores ideas de la naturaleza para después imitar estos diseños y procesos para resolver problemas humanos (Mireles et al., 2014).

Los MEMS comenzaron a desarrollarse en los años 70s, del siglo pasado, aplicándose principalmente en sensores. Pasados los años 80s, las investigaciones se ampliaron a conmutadores de baja frecuencia, como simples dispositivos en miniatura que, utilizaban movimientos mecánicos. Es a finales de los 90s y principios del siglo actual, donde las aplicaciones de RF-MEMS empezaron a tener verdadero auge, con capacidades para operar más altas frecuencias, atravesando las fronteras imposibles hasta hace pocos años (Aróztegui Walter J., n.e.).

Las micropinzas ayudan a solventar la demanda de micromanipulación en aplicaciones biomédicas, que ha aumentado en las últimas décadas, dichos dispositivos son dedicados principalmente a aplicaciones médicas o biológicas (Potrich, et al., 2018). También hay en la literatura aplicaciones de microensamblaje en dispositivos de telefonía celular (Ho et al., 2018).

Existe en la literatura, la combinación de la tecnología de micropinzas y Biomimética. Esto ha generado un tipo de pinzas llamadas Pinzas blandas (inspiradas en un lirio de agua, un tipo de flor acuática), las cuales responden a estímulos térmicos. Esta característica ha atraído mucho la atención por sus prometedoras aplicaciones en la robótica blanda y la ingeniería biomédica (Yoon, 2019).

1.3 Planteamiento del Problema

Existe un escaso desarrollo de la tecnología de los MEMS, en comparación con otros campos de la investigación, esto es palpable por la cantidad de patentes que se encuentran en esta disciplina (Tecpoyotl Torres et al., 2023, p. 25). Esto es un indicador de que existe un rezago en la investigación e innovación. Esta relativa escasez podría ser un atenuante en el desarrollo de tecnologías emergentes y/o áreas previamente mencionadas en los antecedentes.

Por lo tanto, existe un nicho de oportunidad para generar nuevos modelos o mejoras en micropinzas bioinspiradas, enfocadas en la sujeción, traslación y liberación, por ejemplo, de microalambres como objetivos de sujeción.

1.4 Justificación

En la mayoría de los campos de la ciencia existe la posibilidad de mejora e innovación, debido a ello, en este trabajo de investigación se plantea usar

el método de la Bioinspiración para mejorar o crear una nueva alternativa de micropinza que satisfaga la necesidad de sujetar, trasladar y liberar micro objetos. Esta micropinza forma parte de los MEMS, los cuales son de gran importancia debido a que esta tecnología es parte fundamental para el desarrollo, de lo que hoy conocemos como internet del todo, IdT y otras aplicaciones (Gil, 2015).

1.5 Hipótesis

Si se mantiene una mandíbula fija entonces se requerirá aplicar un menor voltaje, además, una fuerza de agarre mayor, que en el caso en el que ambas mandíbulas son móviles.

1.5.1 Preguntas de investigación

- P1: ¿Es posible que, al considerar una mandíbula fija, se requerirá de menor energía para la actuación de la micropinza?
- P2: ¿La fuerza de agarre puede incrementarse al mantener a una mandíbula fija?

1.6 Objetivo general

Diseñar y caracterizar una pinza microelectromecánica (MEM), con una estructura bioinspirada, con apertura y fuerza suficientes para sujetar micro objetos, tales como microalambres.

1.6.1 Objetivos específicos

- Diseñar una pinza microelectromecánica bioinspirada, con apoyo un software de Diseño Asistido por Computadora (CAD).
- Analizar los parámetros de desempeño del diseño, con el apoyo de la herramienta ANSYS®.
- Realizar el modelo eléctrico de una sección del diseño creado.

- Verificar la hipótesis.
- Manufacturar el diseño en una escala macro para observar su comportamiento y comparar con los resultados experimentales con los numéricos.

1.7 Alcance

Se considera:

Desarrollar un dispositivo MEM, que constará de una micropinza con un nivel 1 de Biomimesis, basado en alguna morfología presente en la naturaleza, con la integración de un actuador microelectrotérmico chevrón tipo Z.

Diseñar, considerando a obleas SOI como sustrato y las reglas de fabricación de la Universidad Autónoma de Ciudad Juárez (UACJ).

Escalar a la micropinza para su fabricación en aluminio para validar la funcionalidad de la geometría y para propósitos demostrativos.

1.8 Limitaciones

- Se requiere experiencia en el uso de un software especializado en FEA, lo que hace necesaria la dedicación de tiempo para la familiarización y manejo del software.
- Se requieren computadoras con poder de procesamiento adecuado para el software a utilizar.
- Laboratorios adecuados y herramientas para la microfabricación de los dispositivos.
- Materiales necesarios para la fabricación como por ejemplo las obleas SOI y demás elementos para la manufactura de los diseños.
- Falta de licencias de software especializado en la fabricación de MEMS.
- Conocimientos previos y acceso a la información para el modelado y caracterización total del diseño.

- Implementación de otras disciplinas. Como uno de sus ejes principales este trabajo es la bioinspiración, es necesario conocer la morfología de las mandíbulas de hormigas.

CAPÍTULO 2

MARCO TEÓRICO

En este capítulo se muestran los hallazgos encontrados en la literatura con relación a pinzas bioinspiradas en particular. sobre pinzas de cangrejos y hormigas, con la finalidad de conocer su morfología, así como de identificar las bases de diseño.



CAPÍTULO 2. MARCO TEÓRICO

2.1 Los sistemas microelectromecánicos (MEMS)

Los MEMS pueden actuar como sensores, recibiendo información de su entorno, o como actuadores, respondiendo a una decisión del sistema de control para cambiar el entorno (ITRS, 2020).

Se muestra un ejemplo de sensores en la figura 2.1, donde se puede observar la complejidad y comparación en tamaño del MEM con el cabello humano.

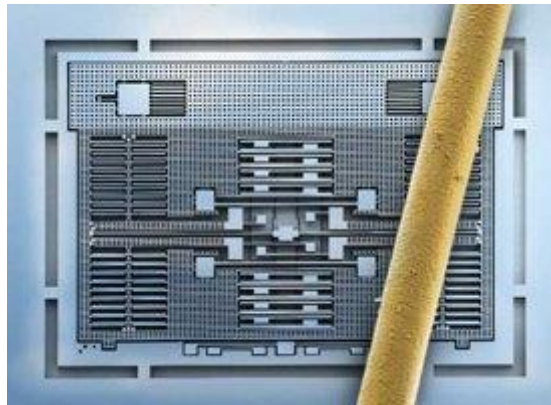


Figura 2.1 Ejemplo de un sensor MEM (EUROFACH ELECTRÓNICA, 2015).

Existen varios tipos de actuadores que pueden utilizarse para diseñar una micropinza, cada uno de ellos tienen diferente desempeño, considerando a parámetros como la fuerza de salida, desplazamiento, velocidad de respuesta, consumo de energía, etc. (Jia & Xu, 2013). La elección del tipo de actuador se realiza en función de la aplicación que se le dará a la micropinza y de la tecnología en la que se fabricará.

2.2 Biomimética (Bioinspiración)

En el libro de la bióloga Janine Benyus; *Biomimicry: Innovation Inspired by Nature* (Biomimética: Innovación Inspirada por la naturaleza, traducido al español), la autora menciona como la naturaleza es el mejor diseñador del

mundo y como los humanos podemos aprender muchas cosas de ella, si ponemos atención. Desde entonces muchos científicos, diseñadores, ingenieros, biólogos, etc., han empleado esta manera de pensar para crear un amplio rango de productos, que van desde un tren japonés de alta velocidad con un frente aerodinámico semejante al de un ave, hasta una celda solar que trabaja bajo los principios con los cuales las hojas de los árboles captan la energía solar (Volstad, 2008).

La Biomimética, no es un concepto nuevo. En la antigüedad, diversas creaciones humanas tenían tras de sí una fuerte inspiración natural. Leonardo da Vinci desarrolló varios modelos de máquinas voladoras y barcos con un claro referente biológico (Armenderiz Miréles E. N. et al., 2004).

2.2.1 Niveles de Biomimética

En la literatura también puede hallarse una clasificación sobre los niveles de Biomimética, de acuerdo con la figura 2.2 el diseño presentado en este trabajo se encuentra en el nivel 1 de Biomimesis.

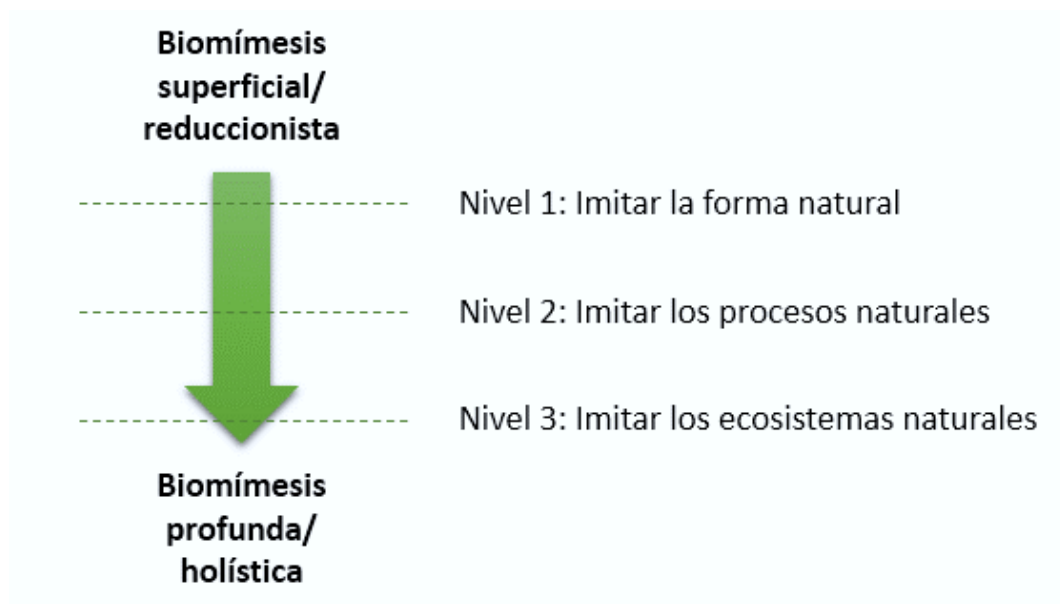


Figura 2.2 Niveles de Biomimesis según Benyus. Adaptado de (Volstad, 2008).

2.2.2 Patrones presentes en la naturaleza

En la búsqueda de posibles estructuras biológicas en las cuales nos pudiéramos inspirar, se utilizaron procesos básicos del pensamiento, en específico, el proceso de **observación** de la naturaleza, para así encontrar posibles patrones que permitan encontrar una estructura adecuada a nuestros objetivos. Dentro de la literatura, se encuentra diversas tablas de patrones presentes en la naturaleza, como la mostrada en la figura 1.2.

PATRONES en la naturaleza					
Patrón	Función Principal	Función Secundaria	Mecanismos de Emergencia	Aplicación Natural	Analogía Cultural
1 Esfera y formas esferoides	Proteger	<ul style="list-style-type: none"> - Contener - Independizar - Estabilizar estructuralmente - Desplazar - Auto defender 	<ul style="list-style-type: none"> - Isotropía - Rotación - Homogeneidad - Deterioro 		
2 Hexágono y pentágono	Pavimentar (bi y tridimensional)	<ul style="list-style-type: none"> - Auto organizar - Ocupar el espacio - Ahorrar material - Proteger (en caparazones) 	<ul style="list-style-type: none"> - Compresión de círculos - Propagación de fracturas - Cristalización de líquidos - Presión isotropa 		
3 Espiral	Empacar	<ul style="list-style-type: none"> - Guardar - Ahorrar espacio - Permitir movilidad 	<ul style="list-style-type: none"> - Crecimiento diferencial - Velocidad diferencial - Competencia por luz y agua 		
4 Hélice	Agarrar	<ul style="list-style-type: none"> - Empacar otro material - Aumentar fricción 	<ul style="list-style-type: none"> - Movimiento - Crecimiento diferencial - Competencia 		
5 Puntas y conos	Penetrar	<ul style="list-style-type: none"> - Concentrar - Permitir movilidad - Dispersar - Defender, atacar, comer, excavar. 	<ul style="list-style-type: none"> - Deformación - Concentración 		
6 Ondas y formas sinuosas y serpenteantes	Comunicar	<ul style="list-style-type: none"> - Desplazar - Mover - Ocupar el espacio 	<ul style="list-style-type: none"> - Fluctuaciones periódicas - Orden - Fuerzas contrapuestas 		
7 Fractales, ramificaciones y explosiones	Colonizar	<ul style="list-style-type: none"> - Transportar - Rellenar el espacio - Minimizar (tiempo y material) 	<ul style="list-style-type: none"> - Competencia - Orden 		

Figura 1.2 Patrones en la naturaleza (Patino & Arbelaez, 2009, p. 108).

En la tabla 1.2 donde se aprecian las funciones principales y secundarias de los patrones revelando su gran utilidad, así como los mecanismos presentes y ejemplos de uso.

2.2.3 Metodología de Biomimética

De acuerdo con (Biomimicry Institute, 2022). La espiral de diseño biomimético es una metodología que ofrece una descripción concisa de los elementos esenciales de un proceso de diseño que usa a la naturaleza como guía para crear soluciones. Esta metodología apoya a la creación de nuevos dispositivos electrónicos, en particular, MEMS, como sucede en este trabajo.

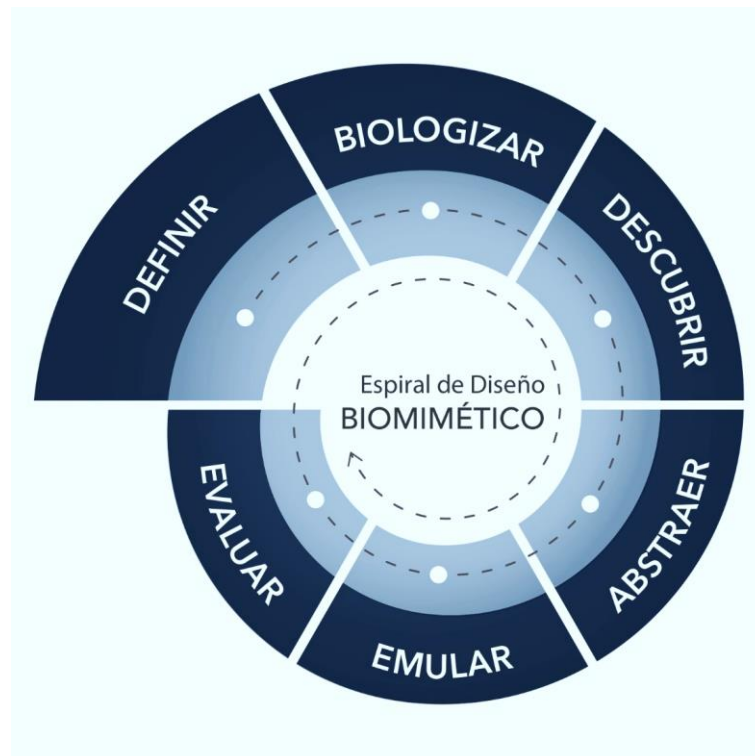


Figura 2.3 Proceso de diseño según la Espiral de Diseño Biomimético. (Biomimicry Institute, 2022).

Como se muestra en la figura 2.3, la espiral de diseño biomimético incluye seis pasos cruciales, que pueden seguirse al buscar soluciones inspiradas en la naturaleza, y por tanto, para la creación de nuevos diseños.

Los pasos se presentan originalmente en un orden secuencial. Sin embargo, frecuentemente los equipos de diseño regresan y avanzan entre diferentes pasos o los realizan de nuevo. Esto es recomendable, ya que, cada etapa tiene la tendencia de revelar información adicional que puede fortalecer o cuestionar las suposiciones realizadas en pasos previos.

A continuación, se presenta un resumen del proceso de diseño biomimético descrito por la espiral, de acuerdo con la información de (Biomimicry Institute, 2022).

- **DEFINIR:** Se trata de articular con claridad el impacto que se desea que tenga el diseño, así como los criterios y restricciones que determinarán su éxito.
- **BIOLOGIZAR:** Consiste en analizar las funciones esenciales y el contexto que el diseño debe abordar. Se recomienda replantear el problema en términos biológicos, para que puedas pedirle a la naturaleza consejo.
- **DESCUBRIR:** Buscar modelos naturales (organismos o ecosistemas) que requieran abordar las mismas funciones y contextos que se requiere tenga la solución/diseño. Además, de formular las estrategias que apoyan su supervivencia y éxito.
- **ABSTRAER:** Estudiar cuidadosamente las características o mecanismos esenciales que hacen que las estrategias biológicas sean exitosas. Replantear las características en términos no biológicos, como “estrategias de diseño”.
- **EMULAR:** Buscar patrones y relaciones entre las estrategias encontradas, concentrándose en las lecciones clave que deben aportar información a la solución. Desarrollar conceptos de diseño con base en estas estrategias.
- **EVALUAR:** Evaluar los conceptos de diseño para saber qué tan bien se cumple con los criterios y las limitantes del reto de diseño, y qué tan adecuados son para los sistemas de la Tierra. Considerar la viabilidad técnica y del modelo de negocio. Refinar y revisar los

pasos previos, según sea necesario para producir una solución viable.

2.3 Obleas de Silicio sobre Aislante (SOI, por sus siglas en inglés)

La utilización de obleas SOI como sustrato ha demostrado ser extremadamente versátil para la fabricación de dispositivos MEMS y en la tecnología CMOS, entre más aplicaciones (Alexander 1999). Sus principales características son la reducida tensión residual y la posibilidad de combinar circuitos eléctricos con elementos micromecánicos. También, se caracteriza por su gran resistencia en ambientes extremos y corrosivos, soportando altas temperaturas y niveles de radiación.

Desde el punto de vista del diseño y producción de MEMS, tiene además la gran ventaja de requerir un menor número de máscaras para el proceso de fabricación, simplificando el proceso.

Los parámetros mecánicos y eléctricos del silicio se presentan en la tabla 2.1.

Tabla 2.1 Parámetros del material de silicio (Yang & Qingsong, 2017).

Parámetro	Magnitud
Densidad, ρ (kg/m ³)	2329
Módulo de Young E (GPa)	130.1
Coefficiente de expansión térmica (1/K)	2.568×10^{-6}
Conductividad térmica isotrópica k (W/m·K)	148
Relación de Poisson, ν (dimensionales)	0.33
Calor específico, c (J/kg·K)	72
Resistividad, ρ ($\Omega \cdot m$)	$3e-5$
Punto de fusión, (°C)	1450

Esfuerzo de cedencia, (MPa)	250
-----------------------------	-----

Con base en la información presentada, se observa la oportunidad de diseñar una micropinza en tecnología SOI basada en bioinspiración.

2.4 Micropinzas

Las micropinzas son dispositivos microelectromecánicos (MEMS), que suelen estar compuestos por varios componentes, como lo pueden ser:

- **Mecanismo de sujeción:** Sistema de agarre que sostiene el objeto de sujeción.
- **Actuador:** Componente que genera fuerza para impulsar el movimiento de la micropinza. En la figura 2.4 se muestra un ejemplo de actuador integrado a una micropinza.
- **Estructura de soporte:** Estructura que sostiene los brazos de la micropinza y le permite moverse.
- **Conexiones eléctricas:** Cables o pistas que permiten la conexión eléctrica entre los componentes.
- **Sensores:** Elementos que permiten medir o detectar la posición, fuerza o temperatura de la micropinza o del objeto de sujeción.
- **Sistema de control:** Se utiliza para controlar el movimiento del actuador y garantizar que se mueva de acuerdo con las especificaciones deseadas. Puede ser un circuito electrónico, un software o un controlador lógico programable (PLC), entre otros.

Los componentes específicos pueden variar según el diseño y la aplicación de la micropinza. Cada componente puede tener un grado de complejidad tan alto que puede desarrollarse de manera individual en un trabajo de investigación. Este trabajo se enfoca en los dos primeros puntos.

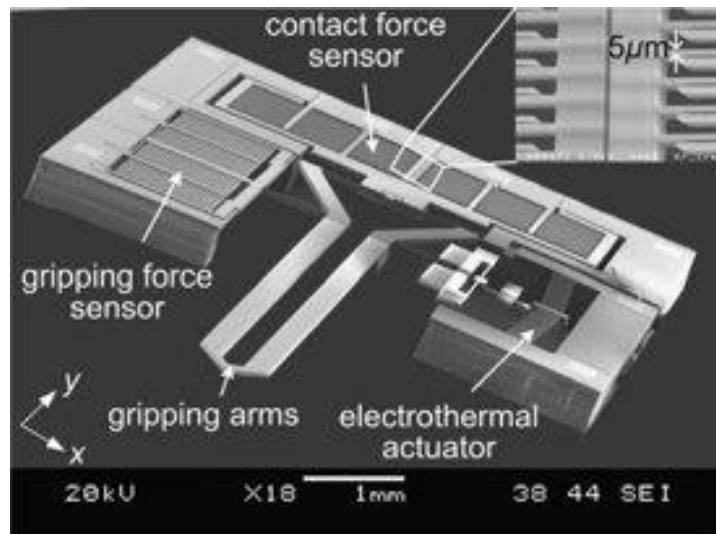


Figura 2.4 Ejemplo de un actuador micropinza (Xiao Yu, 2008).

Las micropinzas tienen una amplia variedad de aplicaciones en diferentes campos, entre los que se encuentran la microfabricación, investigación, microrrobótica, medicina, etc.

De acuerdo con la investigación realizada, el campo donde más se ha tenido relevancia es la medicina. Se encuentran reportados en la literatura varios trabajos, un ejemplo son las micropinzas para muestras de tejido biológico (Leong et al., 2009), mostradas en la figura 2.5.

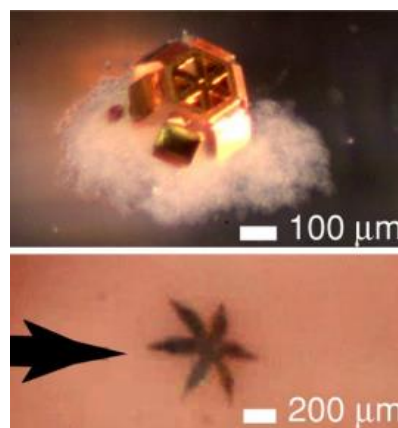


Figura 2.5 Micropinza con actuación biotérmica (Leong et al., 2009).

2.4.1 Mecanismo de sujeción

El mecanismo de sujeción está compuesto por lo general por dos brazos articulados que permiten su apertura y cierre. Las puntas de los brazos pueden tener diferentes formas y tamaños, la función principal de la pinza es la de realizar una tarea mecánica, que en este caso es sujetar objetos con sus mandíbulas, así mismo la estructura será diseñada utilizando bioinspiración.

Las micropinzas pueden ser de diferentes materiales, pero en este trabajo se realizarán con obleas SOI, debido a que su fabricación, identificada como trabajo futuro, podría realizarse en alguno de los laboratorios de nuestro país, en instituciones tales como el Instituto Nacional de Astrofísica, Óptica y Electrónica (INAOE) y el Centro de Ingeniería y Desarrollo Industrial (CIDESI).

2.4.2 Actuador

Un actuador es un dispositivo que utiliza una fuente de energía, que puede ser eléctrica, hidráulica, neumática, térmica, entre otras. Comúnmente, los actuadores MEMS usan comúnmente fuentes de energía electrotérmica, piezoeléctrica o química.

El actuador convierte la energía en movimiento o fuerza, y generalmente consta de los siguientes elementos:

- **Elemento transductor:** convierte la energía de entrada en energía mecánica que se utiliza para producir el movimiento del actuador.
- **Elemento de transmisión:** transfiere la energía mecánica desde el elemento transductor al elemento de carga o carga útil. Puede ser una varilla, un tornillo, un pistón, entre otros.

- **Elemento de carga o carga útil:** es el objeto o sistema que se mueve o actúa gracias al movimiento del actuador, que en este caso es el mecanismo de sujeción de la micropinza.
- **Sistema de control:** Este elemento controla la respuesta del dispositivo de acuerdo con su aplicación. En este trabajo no será considerado,

Hay diferentes tipos de actuadores, tales como:

- **Los actuadores lineales:** que convierten la energía en un movimiento lineal.
- **Los actuadores rotativos:** que convierten la energía en un movimiento rotativo.
- **Los actuadores de torsión:** que generan un movimiento de torsión.

Para este trabajo se seleccionó un actuador chevrón Z, el cual es un actuador lineal y consiste principalmente de un arreglo de n brazos, anclados en sus extremos exteriores, con un ángulo de inclinación (θ), y una flecha central, la cual tiene como objetivo el acoplamiento de los brazos en su extremo libre.

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, como se observa en la figura 2.6.

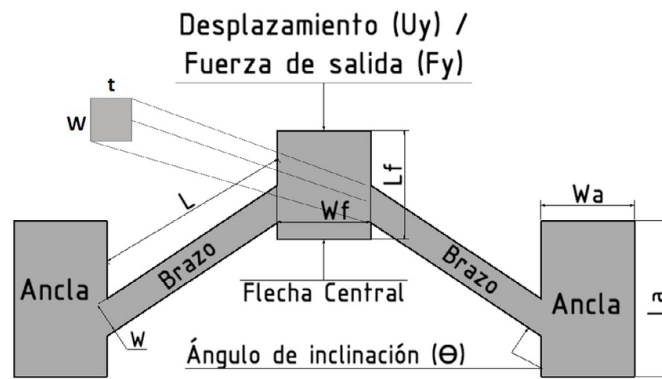


Figura 2.6 Ejemplo de la estructura de un actuador Chevrón. (Margarita Tecpoyotl-Torres, 2015).

2.4.4 Microactuador chevrón con brazos en forma de Z

Estos actuadores presentan un movimiento en el plano, que pueden superar las deficiencias de los actuadores electro-térmicos de forma V y ofrecer una amplia gama de rigidez y fuerza de salida (Guan & Zhu, 2010).

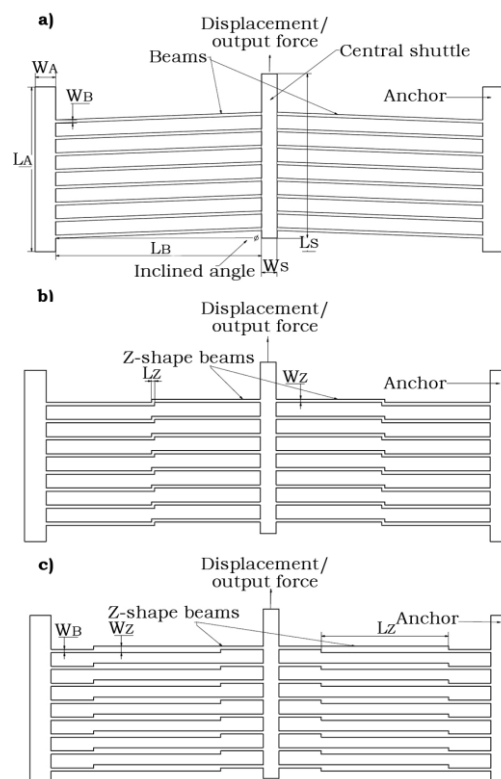


Figura 2.7 a) Actuador en forma de V (Guan & Zhu, 2010). b) y c) Actuador en forma de Z, convencional y modificado, respectivamente (Tecpoyotl Torres et al., 2015)

Las expresiones el cálculo de los parámetros básicos del actuador Z se muestran en la tabla 2.2, mientras que las variables utilizadas se encuentran en la tabla 2.3.

Para obtener la fuerza del microactuador chevrón con brazos tipo Z de forma analítica es necesario calcular el desplazamiento, la rigidez de la viga de forma Z y el número de brazos del actuador.

Tabla 2.2 Ecuaciones del modelado matemático del actuador Chevrón Z (Guan & Zhu, 2010).

Parámetros	Ecuaciones
Desplazamiento	$U = \frac{12\alpha\Delta TL^3}{l^2 + 6L(l + \frac{w^2}{3l})} \quad (2.1)$
Rigidez	$k = \frac{Ew^3h(l^3 + 2Lw^2 + 6Ll^2)}{(8L^3l^3 + w^2l^4 + 16w^2Ll^4 + 2w^4Ll + 12L^4l^2 + 6w^2Ll^3)} \quad (2.2)$
Fuerza	$f = nkU \quad (2.3)$

Tabla 2.3 Variables utilizadas en la tabla 2.2.

Variable	Descripción	Unidad
f	Fuerza del actuador	(N)
n	Número de brazos	(Adimensional)
α	Coefficiente de expansión térmica	(1/K)
A	Área de sección transversal ($A = wt$)	(m ²)
E	Módulo de Young	(GPa)
ΔT	Diferencia de temperatura ($\Delta T = t_f - t_i$)	(°C)
U	Desplazamiento	(m).
k	Rigidez de una viga en forma de Z	(GPa/m ⁴)
L	Largo de los brazos	(m)
I	Momento de inercia ($I = wt^3$)	(m ⁴)
h	Grosor de los brazos	(m)
w	Ancho de los brazos	(m)

2.5 Estado del Arte

Para poder determinar la novedad de nuestro trabajo, se planteó investigar puntos característicos clave de los diseños propuestos, de esta manera se podría descubrir si existe una posible mejora, al buscar trabajos similares en la literatura, además de encontrar más información que nos ayude a cumplir con lo establecido en los objetivos, así que se planteó la investigación de los siguientes temas:

- Micropinzas bioinspiradas de pinzas de cangrejo.
- Micropinzas asimétricas.
- Micropinzas bioinspiradas en mandíbulas de hormigas.
- Micropinzas con tipo de mecanismo de amplificación flexible tipo M.

Cabe señalar que, se inició con la investigación de pinzas de cangrejo, ya que son las que se apegan de manera inmediata a las preguntas de investigación planteadas originalmente.

2.5.1 Micropinzas bioinspiradas de pinzas de cangrejo

Se han encontrado en la literatura científica a micropinzas bioinspiradas en cangrejos, como la reportada en (Madhab et al, 2010), donde se explica el proceso de desarrollo de una micropinza con una estructura similar a un mecanismo agonista-antagonista, inspirada en la pinza de un cangrejo. En las figuras 2.8 y 2.9 se presentan los diagramas de funcionamiento esquemático y mecánico, respectivamente. En la figura 2.8, puede apreciarse que, una de las mandíbulas se mantiene fija, mientras que la otra es móvil. Esta última se encuentra ligada al eje de una bisagra, lo que facilita su desplazamiento. En la figura 2.9, se muestra la bidireccionalidad de los músculos que corresponden a la estructura agonista-antagonista, permitiendo la apertura y cerradura de la pinza.

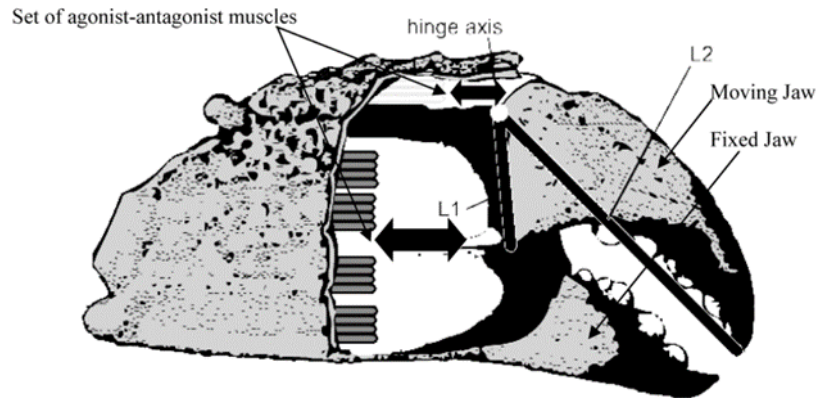


Figura 2.8 Diagrama del funcionamiento de la pinza de un cangrejo (Madhab et al., 2010).

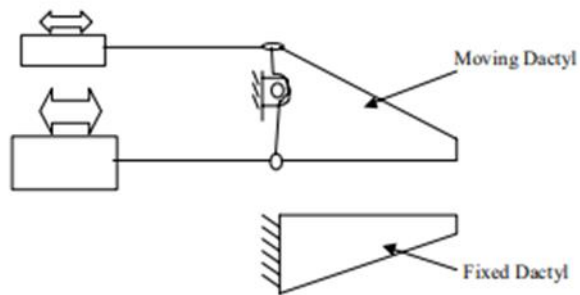


Figura 2.9 Micropinza bioinspirada (Madhab et al., 2010).

Otro ejemplo se encuentra en (Khare et al, 2007), donde se presenta una micropinza bioinspirada actuada piezoeléctricamente, la cual se muestra en la figura 2.10. En esta pinza sus cuatro actuadores piezoeléctricos actúan simultáneamente para generar la apertura y cerradura.

Con base en los ejemplos mencionados, puede observarse que existen diferentes diseños bioinspirados en pinzas de cangrejo, lo cual abre la posibilidad de explorar nuevas geometrías.

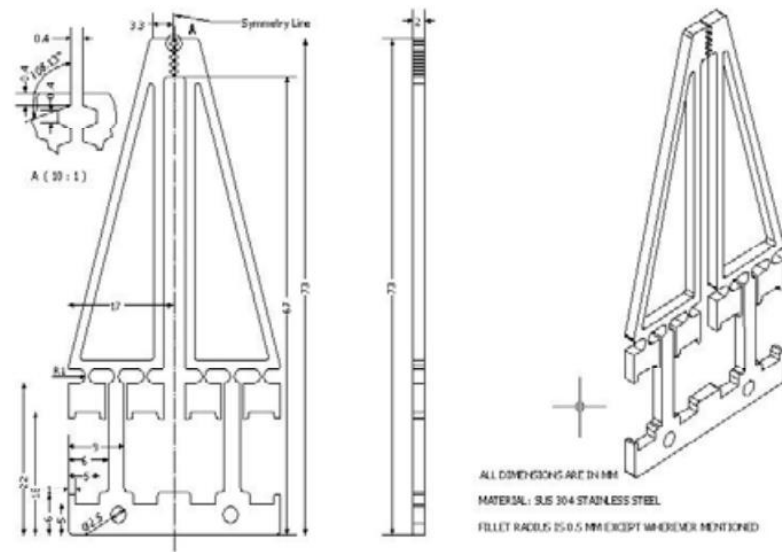


Figura 2.10 Modelo CAD de la micropinza obtenida de (Khare et al. 2007).

2.5.2 Micropinzas asimétricas

Dentro de la literatura se encuentran reportados varias publicaciones de micropinzas con una mandíbula fija, un ejemplo es reportado en (Liang et al, 2018), donde se muestra una micropinzas con una sola mandíbula fija (figura 2.11). Esta pinza es piezoeléctrica y asimétrica, cuyo brazo móvil es impulsado por un actuador chevrón.

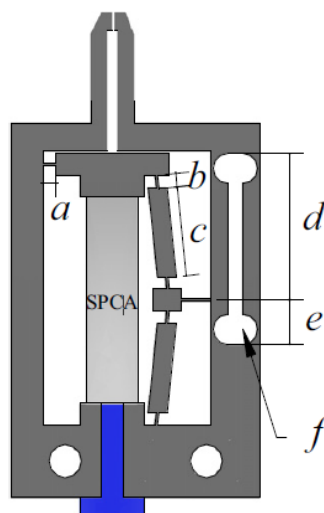


Figura 2.11 Diagrama de una micropinza piezoeléctrica asimétrica (Liang et al., 2018).

2.5.3 Micropinzas bioinspiradas en mandíbulas de hormigas

El desarrollo micropinzas bioinspiradas en mandíbulas de hormigas ha sido reportado en la bibliografía, tal es el caso de (Zhang et al, 2020), donde se muestra el proceso de diseño para la generación de una morfología similar al de mandíbulas de hormigas.

2.6 Morfologías basadas en pinzas de un cangrejo y mandíbulas de hormigas

Para la realización del diseño de la micropinza bioinspirada, se realizaron búsquedas sobre las características de la estructura y funcionamiento mecánico de estas morfologías, las cuales se presentan en las siguientes subsecciones.

2.6.1 Pinzas de cangrejos

A continuación, se muestran dos artículos relevantes:

En (Swanson et al, 2013), se presentan las partes de la pinza de un cangrejo, así como algunas de sus morfologías divergentes, las cuales se muestran en la figura 2.12. Mientras que, en la figura 2.13 se muestra el esquema de la garra principal de un cangrejo macho y se aprecia el punto de apoyo A para mover al extremo B.

En el (Schenk y Wainwright, 2001), se analiza el mecanismo de la anatomía de la pinza de un cangrejo, así como su funcionamiento mecánico. El diagrama esquemático se muestra en la figura 2.14, donde se aprecia nuevamente el elemento pivote que permite la apertura del dedo móvil (Figura 2.14a). Mientras que, el desplazamiento de las fibras musculares durante la apertura y cerradura se muestra en la figura 2.14b, puede observarse que estas fibras tienen geometrías y movimientos similares a actuadores chevrón, impulsando el movimiento del dedo en el que se encuentra el elemento pivote, por lo que, es consecuente pensar en un actuador chevrón como parte del diseño de la micropinza a desarrollar

en este trabajo. Lo que hace que, la selección del microactuador también pueda considerarse como bioinspirada.

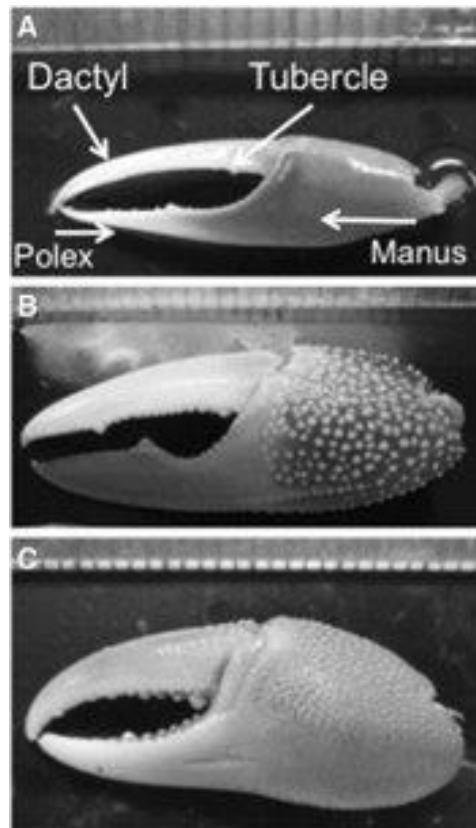


Figura 2.12 (A-C) Ejemplos de morfologías divergentes encontradas en la pinza mayor del cangrejo violinista. En (A) se indican las partes de las pinzas (Swanson et al. 2013).

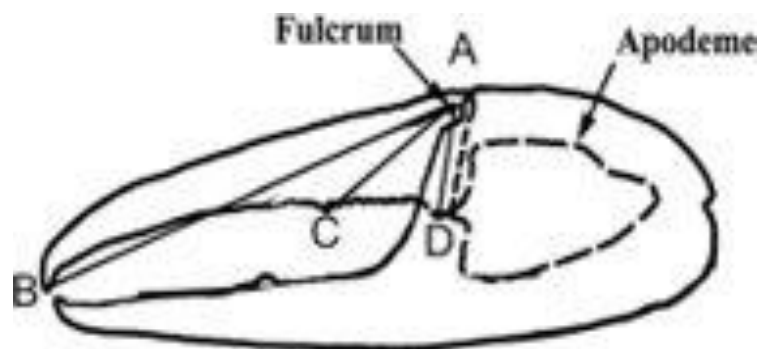


Figura 2.13 Esquema de la garra principal de un cangrejo macho (Swanson et al. 2013).

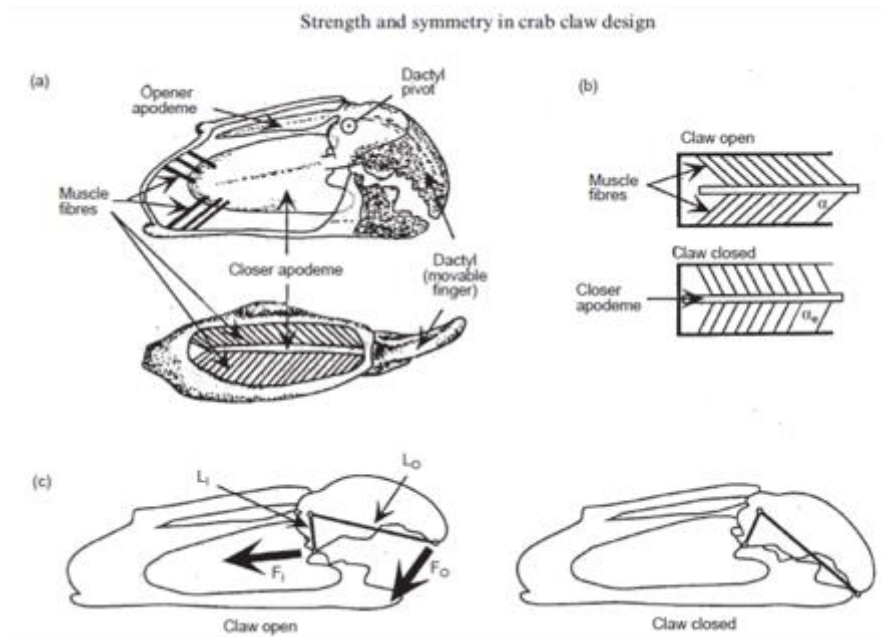


Figura 2.14 (a) Elementos de la pinza. (b) Desplazamiento de las fibras musculares durante la apertura y cerradura. (c) Mandíbula abierta y cerrada (Schenk y Wainwright 2001).

2.6.2 Análisis del estado del arte de las mandíbulas de hormigas

En la búsqueda de literatura de la morfología de las mandíbulas de hormigas, se encontró en (Larabee et al, 2017), un estudio detallado de las mandíbulas de las hormigas tramperas del género de *Myrmoteras* perteneciente a la familia Formicidae. Algunas imágenes se muestran en la figura 2.15, las cuales sirvieron de base para la realización de algunos diseños.

La figura 2.15 muestra la representación en modelo de superficie de la cabeza, los músculos y los apodemas (cada uno de los repliegues del tegumento en los cuales se insertan los músculos) con las mandíbulas en posición cerrada a partir de datos de microtomografía de rayos X. AbM es el músculo que abre la mandíbula (blanco); AdA es la apodema más cercana (dorado); AdM es el músculo que cierra lentamente a la mandíbula (rojo); fAdM es el músculo que cierra rápidamente a la mandíbula (azul); Md es la mandíbula (púrpura). Las flechas cruzadas indican la orientación del modelo: a, anterior; d, dorsal; l, izquierda; p, posterior; r, derecha; v, ventral. Barras de escala: 100 μm (Larabee et al, 2017).

Una vez analizadas las morfologías correspondientes a pinzas de cangrejo y de hormiga, en el siguiente capítulo se presentarán diseños derivados de estos estudios.

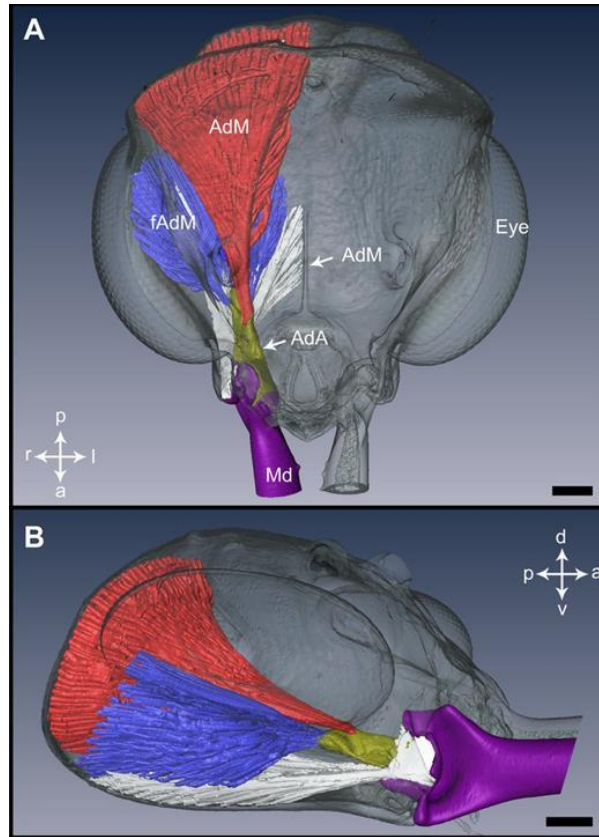
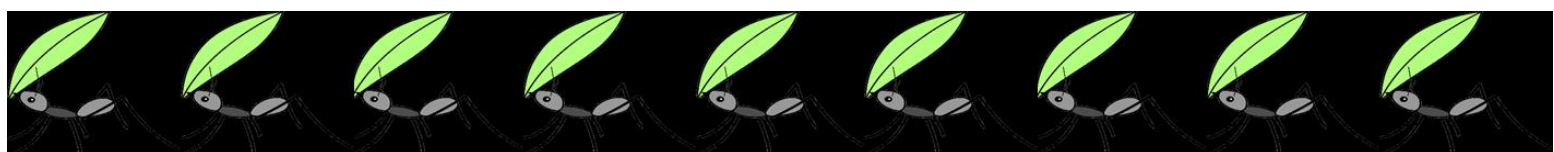


Figura 2.15 Organización general del aparato mandibular de la cabeza de una hormiga. (A) Vista dorsal de la cabeza. (B) Vista oblicua (Larabee et al, 2017).

CAPÍTULO 3

METODOLOGÍA

En este capítulo se muestra la metodología general utilizada en el desarrollo de esta tesis. Se describen además a los bloques que la constituyen, y la forma en que se implementan para lograr el objetivo de este trabajo.



CAPÍTULO 3. METODOLOGÍA

La metodología general considerada en el desarrollo de esta tesis se muestra en la figura 3.1.

Con base en esta metodología se llevó a cabo el desarrollo de los diseños mostrados en el capítulo 4.

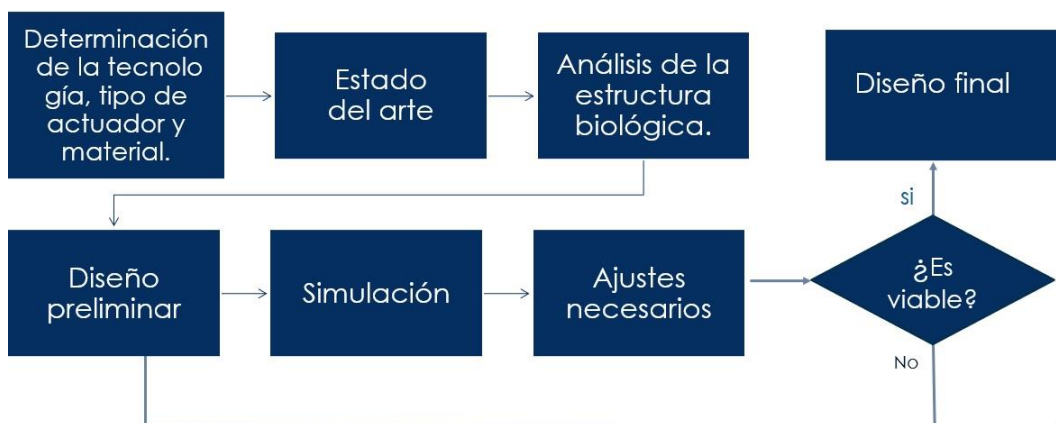


Figura 3.1 Metodología general.

A continuación, se explicará a cada uno de los procesos que constituyen a la metodología.

3.1 Determinación de la tecnología, tipo de actuador, actuación y material

Cabe señalar que, se seleccionó desde el planteamiento de este trabajo que el dispositivo se desarrollara utilizando tecnología MEMS, empleando obleas SOI, ya que se cuenta con experiencia en este tipo de tecnología, y el uso de obleas SOI facilita el proceso de diseño y fabricación ya que, solamente se requiere de la capa estructural. Además, hasta cierto punto se tiene acceso a un cuarto limpio, gracias a un convenio de colaboración vigente.

Además, se considera el fenómeno de convección, al que en general, están expuestos los dispositivos durante su funcionamiento

experimental, lo cual disminuye considerablemente a las temperaturas de operación. Esto a su vez, permite que se extienda la posibilidad de incrementar el número de los posibles objetivos de sujeción.

Para la realización de este trabajo se determinaron las características técnicas básicas a considerar con relación al diseño, las cuales se muestran en la Tabla 3.1. Esto ya que, es básico determinar las características del objeto de sujeción para los cuales se espera que la micropinza sea útil.

Tabla 3.1 Hoja de datos técnicos preliminar de la pinza a diseñar.

Característica	Chevrón Z modificado
Actuador	
Modo de actuación	Electrotérmico
Apertura inicial entre las mandíbulas	90 μm
Apertura final entre las mandíbulas	58 μm
Temperatura de las puntas con convección @ 2 V	25°C
Voltaje aplicado en el actuador	2V

El coeficiente de convección a considerar es de $20000\text{W}/\text{m}^2\text{°C}$.

3.2 Análisis de la estructura biológica

Previo al diseño de estructuras de micropinza bioinspiradas es necesario partir del análisis de morfologías biológicas, para obtener así las características mecánicas generales en las que se basarán los diseños preliminares de posibles micropinzas. Para esto, se buscó en la literatura más información.

3.3 Diseño preliminar de la micropinza

Para los diseños preliminares se utilizará el software ANSYS™, en particular *Desing Modeler* para el dibujo y extrusión de las geometrías a realizar. Las estructuras creadas son obtenidas de la interpretación y adaptación de las morfologías de la fuente de inspiración.

3.4 Simulación y ajustes necesarios al diseño

La simulación es una parte importante del diseño de MEMS y para este diseño se utilizó ANSYS™, especializado en FEA. La simulación de la geometría se realizó en WorkBench. Estas herramientas forman parte ANSYS™. En el capítulo 4 se profundizará en su uso.

En el diseño se consideraron al material y reglas de diseño utilizadas en CIDESI, lo que hace posible que en un futuro se lleve a cabo su microfabricación. También se escaló el diseño a una escala macro, para la validar experimentalmente la funcionalidad de la geometría propuesta.

Algunos de los ajustes realizados a las dimensiones propuestas fueron obtenidos a través de parametrización. Se profundiza en este tema en el siguiente capítulo. Dentro de los cambios más significativos se encuentran los siguientes:

- Cambio del actuador: de un chevrón convencional a un chevrón tipo Z.
- Cambio de inspiración: se cambió de pinza de cangrejo a mandíbulas de hormigas, toda vez que considerando uno de los brazos fijos, de acuerdo con las preguntas de investigación, mediante el uso de una geometría inspirada en pinzas de cangrejo, no se obtuvo la funcionalidad requerida en la tabla 3.1.

Cabe señalar que, el desarrollo de este trabajo se realizó también bajo la supervisión del comité tutorial.

- Implementación de un ángulo en los brazos del chevrón.
- Distancia entre las anclas y tamaño del mecanismo.

3.5 Comprobación de la viabilidad del diseño

La factibilidad en este trabajo se refiere que el diseño satisface propuesto satisfaga los objetivos y características planteados. Recordando a los objetivos de manera breve, el diseño debe tener una característica de bioinspiración y un desempeño apropiado. Las características de la tabla 3.1 se determinaron con base en los resultados de diseños previos, realizados por el equipo de trabajo del laboratorio.

3.6 Diseño final

Cabe señalar que, se implementaron varios ajustes que mejoraron a los resultados obtenidos en cada una de las propuestas realizadas, como puede observarse en el siguiente capítulo. Sin embargo, solamente un diseño logró satisfacer los requerimientos mostrados en la tabla 3.1, el cual fue considerado como diseño final.

CAPÍTULO 4

DESARROLLO

En este capítulo, se implementa a la metodología planteada, desarrollando a los procesos necesarios, además de llevar a cabo la selección del diseño de la micropinza final.



CAPÍTULO 4. DESARROLLO

Para realizar el diseño de la micropinza MEMS, iniciamos con la selección del actuador a utilizar, en el cual se consideró la resistividad de obleas SOI y un grosor de 70 μm .

4.1 Microactuador chevrón convencional

Se partió del chevrón convencional, considerando al diseño mostrado en la figura 4.1, donde se aprecia también su temperatura máxima de 112 °C al aplicar 2 V, y un desplazamiento de 3.8836 μm (figura 4.2). La fuerza de reacción se presenta en la figura 4.3, en cada uno de los ejes, correspondientes a 15.212 mN en el eje X, 11.22 mN en el eje Y, y 82.01 μN en el eje Z. Estas magnitudes serán utilizadas para comparar con otra alternativa analizada. En la tabla 4.1 se muestran las dimensiones consideradas para el chevrón convencional.

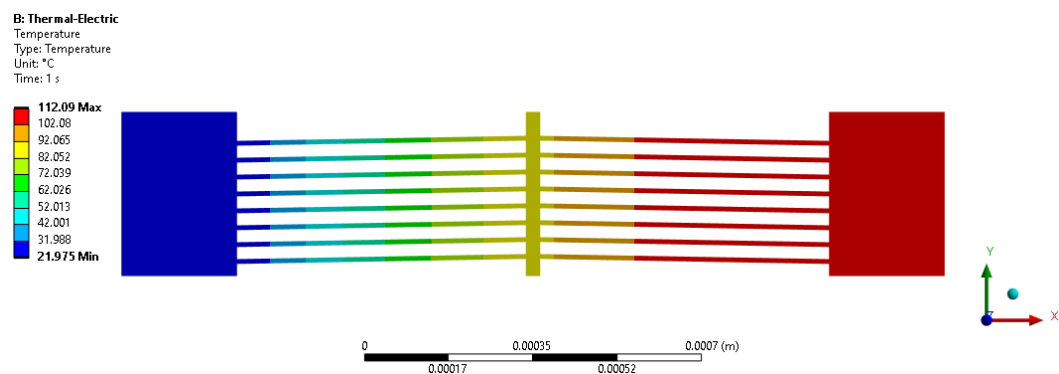


Figura 4.1 Distribución de temperatura del Actuador Chevron tipo inicial.

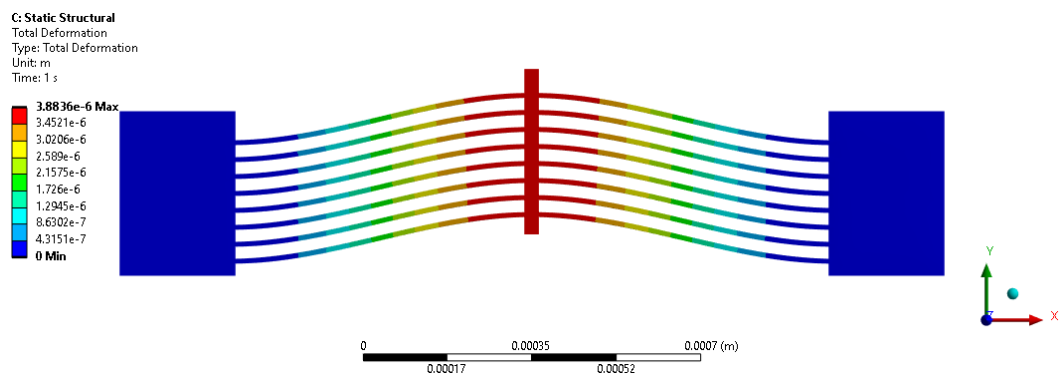


Figura 4.2 Desplazamiento del actuador chevrón V.

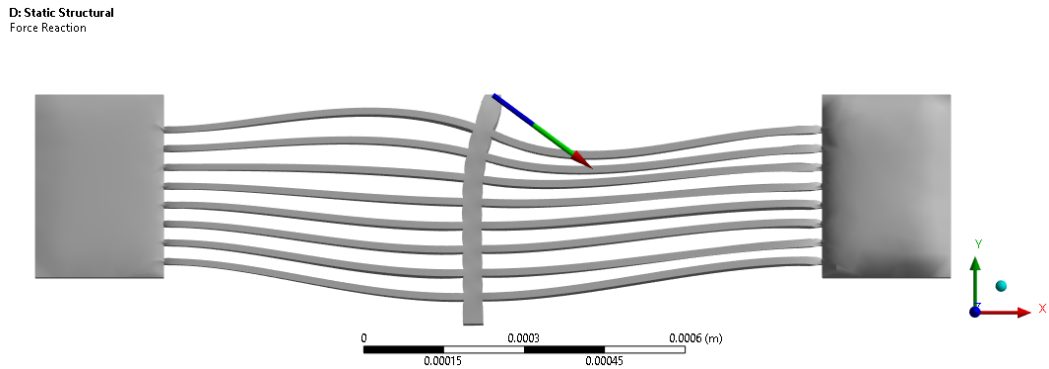


Figura 4.3 Fuerza de reacción.

Tabla 4.1 Dimensiones del microactuador chevrón convencional

Elemento	Descripción	Magnitud (μm)
L_a	Largo de ancla	350
W_a	Ancho de ancla	240
L_f	Largo de flecha	350
W_f	Ancho de flecha	30
L_b	Largo de brazo	600
W_b	Ancho de brazo	5
D_b	Distancia entre brazos	30
h	Grosor de los brazos	70
θ	Ángulo de los brazos	91°

4.1.1. Comparación de resultados numéricos y analíticos del actuador chevrón V

Para obtener la fuerza del microactuador chevrón se utilizó la ecuación 4.1 (Espinosa et al., 2007).

$$F_y = N\alpha EA\Delta T \sin \theta \quad (4.1)$$

En la tabla 4.2 se muestran las magnitudes de los parámetros utilizados en la ecuación 4.1.

Tabla 4.2 Magnitudes de los parámetros de la ecuación 4.1

Parámetro	Unidad	Magnitud
N	Adimensional	16
α	1/K	2.568×10^{-6}
A	m ²	3.5×10^{-10}
t	m	70×10^{-6}
w	m	5×10^{-6}
ΔT	°C	90
θ	°	1
E	Pa	1.301×10^9

Sustituyendo las magnitudes mostradas en la tabla 4.2 se obtiene:

$$F_y = N\alpha EA\Delta T \sin \theta = 11.936 \times 10^{-3} N$$

Para obtener el porcentaje de error se utilizó la ecuación 4.2 (Törnqvist et al., 1985).

$$\%Error = \frac{A-S}{A} 100 \quad (4.2)$$

donde A es la magnitud numérica y S corresponde a la magnitud teórica. Esto es:

$$A = 11.936 \times 10^{-3} N$$

$$S = 11.4154 \times 10^{-3} N$$

Sustituyendo A y S en la ecuación 4.2 se obtiene:

$$\frac{11.936 \times 10^{-3} \text{ N} - 11.4154 \times 10^{-3} \text{ N}}{11.4154 \times 10^{-3} \text{ N}} 100 = 4.87\%$$

Cabe señalar que, esta magnitud de error es aceptable.

Para el cálculo del desplazamiento se utilizó la ecuación 4.3 (Zhu, Corigliano, & Espinosa, 2016):

$$U_y = \frac{F_y}{N \left(S^2 \frac{EA}{L} + C^2 \frac{12EI}{L^3} \right)} \quad (4.3)$$

Substituyendo en la ecuación 4.3 a las magnitudes mostradas en la tabla 4.3 se obtiene:

$$U_y = \frac{2.793 \text{ N} \times 10^{-3}}{16(0.2311 + 1239.2)} = 3.654 \times 10^{-6} \text{ m}$$

Tabla 4.3 Magnitudes de las variables empleadas en la ecuación (4.3).

Parámetro	Unidad	Magnitudes
F_y	N	2.568×10^{-6}
N	Adimensional	16
θ	°	1
E	Pa	1.301×10^9
A	m ²	7×10^{-10}
L	m	600×10^{-6}
t	m	70×10^{-6}
w	m	10×10^{-6}
I	m ⁴	2.85×10^{-19}

Para obtener el porcentaje de error del desplazamiento se utilizó nuevamente la ecuación 4.2. Las magnitudes obtenidas de manera analítica y numérica se muestran en la tabla 4.4.

$$\frac{3.8836 \times 10^{-6} - 3.0943 \times 10^{-6}}{3.8836 \times 10^{-6}} 100 = 6.02\%$$

Nuevamente se aprecia que el porcentaje de error es aceptable.

Tabla 4.4 Comparación de resultados del chevrón V.

Parámetro	Magnitud obtenida analíticamente, (m)	Magnitud obtenida numéricamente (m)	% Error
Fuerza, F_y , (N)	11.936×10^{-3}	-11.224×10^{-3}	4.8
Desplazamiento, (m)	3.094×10^{-6}	3.8836×10^{-6}	6.02

4.2 Microactuador chevrón de brazos Z

En la búsqueda de un mejor desempeño del actuador, se consideró el análisis de un actuador chevrón Z modificado, el cual tiene como origen al actuador chevrón Z (figura 4.4).

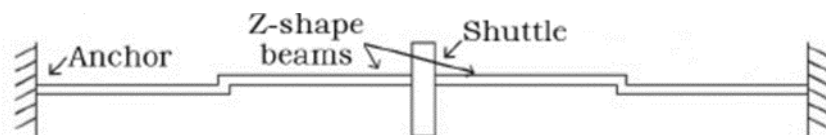


Figura 4.4 Actuador chevrón Z (Guan & Zhu, 2010).

El largo de la forma Z es igual a l , y el ancho de la forma Z es:

$$w_z = w \quad (4.4)$$

El desplazamiento en la flecha se puede obtener de la ecuación 4.5 (Guan & Zhu, 2010):

$$U_y = \frac{12\alpha\Delta TL^3}{l^2 + 6L\left(l + \frac{w^2}{3l}\right)} \quad (4.5)$$

donde: U_y es el desplazamiento en la dirección Y, α es el coeficiente de expansión térmica, ΔT es la diferencia de temperatura, L es la mitad de la longitud total de la viga, l es la longitud de la viga central y w es el ancho de la viga en todas las secciones.

La fuerza de salida se da por el producto del desplazamiento y la rigidez (Guan & Zhu, 2010), donde el caso de un par de brazos es considerado en el análisis realizado:

$$F = kU \quad (4.6)$$

La ecuación 4.6 considerando N pares de brazos puede generalizarse como:

$$F = NkU \quad (4.7)$$

La constante de rigidez k puede calcularse mediante la ecuación 4.8 (Guan & Zhu, 2010)

$$k = \frac{Ew^3h(l^3+2Lw^2+6Ll^2)}{(8L^3l^3+w^2l^4+16w^2L^4+2w^4Ll+12L^4l^2+6w^2Ll^3)} \quad (4.8)$$

donde E es el módulo de Young y h es el grosor de la viga.

4.3 Microactuador chevrón de brazos Z modificado

En (Tecpoyotl et al, 2015) se utilizó un actuador chevrón con 16 brazos de forma Z, implementado en Silicio, con $w_{Z-modificado}$ igual a $40w$, el cual mostró la mayor magnitud de desplazamiento en el rango de voltaje considerado aplicado. En este trabajo se utiliza una geometría basada en ese artículo, cuyas cotas se muestran en la figura 4.5.

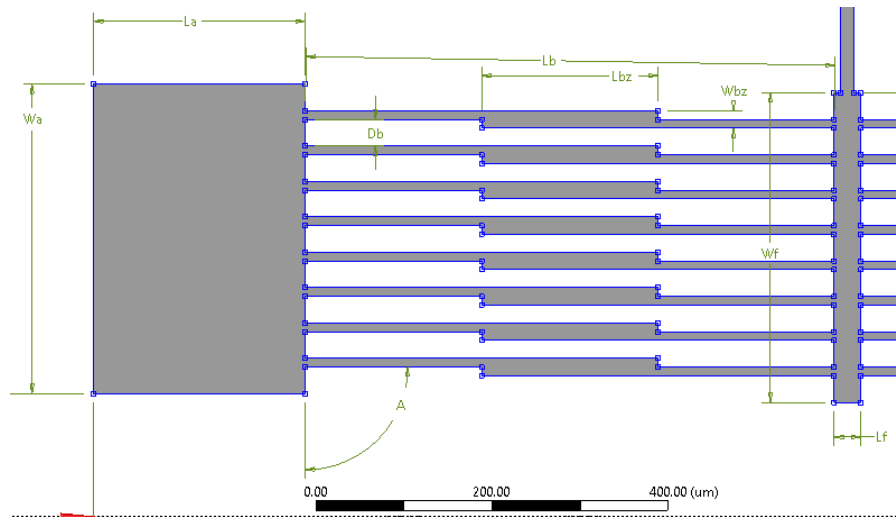


Figura 4.5 Cotas del diseño del microactuador chevrón.

En la tabla 4.6 se muestran las dimensiones correspondientes al diseño de chevrón Z modificado.

Tabla 4.5 Dimensiones del microactuador chevrón Z modificado.

Elemento	Descripción	Magnitud (μm)
L_a	Largo de ancla	350
W_a	Ancho de ancla	240
L_f	Largo de flecha	350
W_f	Ancho de flecha	30
L_b	Largo de brazo	600
W_b	Ancho de brazo	5
D_b	Distancia entre brazos	30
L_{bz}	Largo del brazo Z	200
W_{bz}	Ancho del Brazo Z	10
h	Grosor de los brazos	70
θ	Ángulo de los brazos	90°

El actuador chevrón Z modificado tiene básicamente los mismos elementos que el actuador V, se diferencia por la forma Z que se agrega en la parte central de cada brazo. En este caso, se consideran las siguientes características de la forma Z (figura 4.5):

- El ancho Z corresponde al doble del ancho de los brazos (Guang & Zhu, 2010), (Changhong & Yang, 2010)
- El largo de la forma Z es una tercera parte del largo total de los brazos, lo que corresponde a $40\mu\text{m}$.

Este es actuador que se utilizará en el diseño de la micropinza.

4.3.1. Resultados numéricos del actuador chevrón Z modificado

En la figura 4.6 se aprecia su temperatura máxima de $112\text{ }^\circ\text{C}$ al aplicar 2 V , y un desplazamiento de $3.7271\text{ }\mu\text{m}$ (figura 4.7). La fuerza de reacción se presenta en la figura 4.8, en cada uno de los ejes, correspondientes a 3.2654 mN en el eje X, 7.4154 mN en el eje Y, y $5.7515\text{ }\mu\text{N}$ en el eje Z.

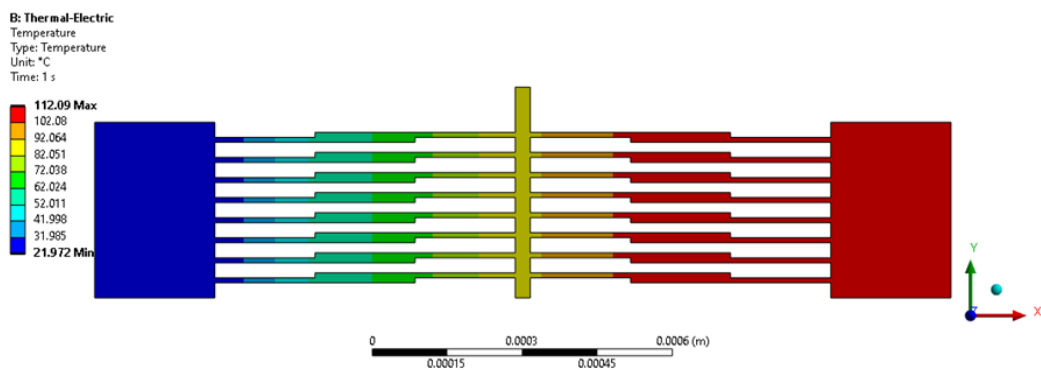


Figura 4.6 Distribución de temperatura del actuador chevrón Z modificado

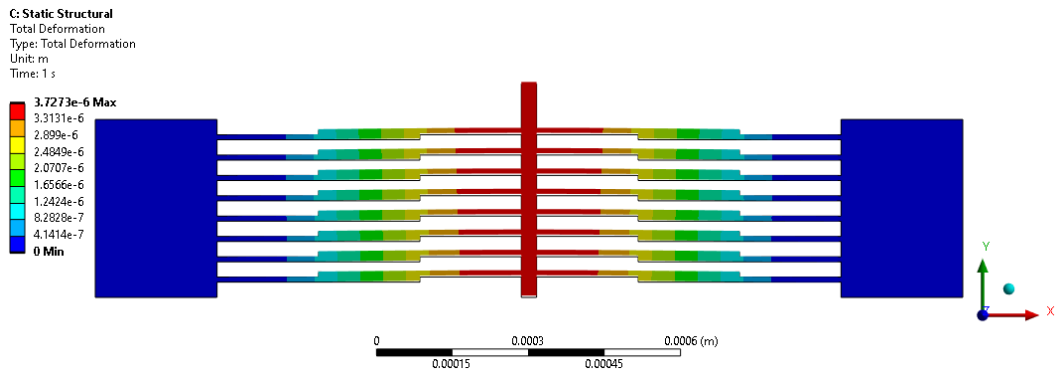


Figura 4.7 Desplazamiento del actuador chevrón Z modificado.

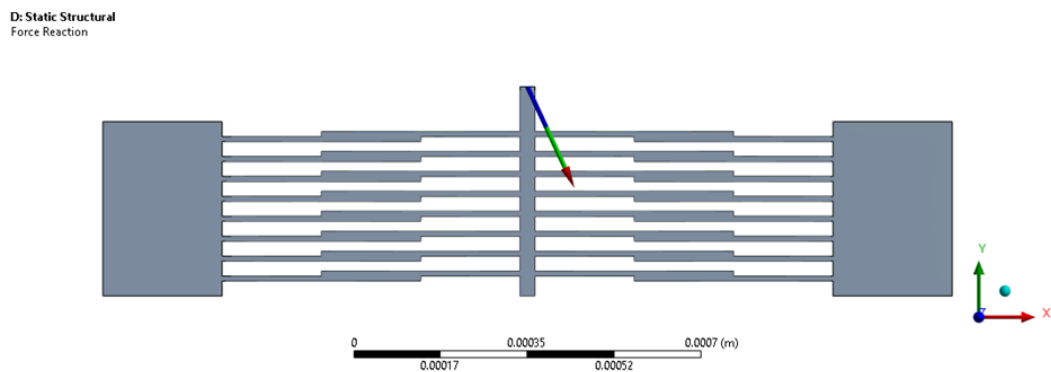


Figura 4.8 Fuerza de reacción del del actuador chevrón Z modificado.

En la tabla 4.7 se muestra la comparación de resultados del chevrón convencional, chevrón Z y del Z modificado, aunque las mayores magnitudes de desplazamiento y fuerza corresponden al actuador chevrón V, se observa una mayor estabilidad en la respuesta en fuerza en el caso del actuador chevrón Z modificado, donde además el valor de desplazamiento es prácticamente comparable. Por estas razones se selecciona al actuador chevrón Z modificado para su integración con la micropinza.

Tabla 4.6 Comparación de resultados del chevrón convencional, chevrón Z y del Z modificado.

	Desplazamiento, (μm)	Fuerza, F_y , (mN)
Chevrón V	3.8836	-11.224
Chevrón Z	3.0611	-4.8931
Chevrón Z modificado	3.7271	-7.4154

4.3.2 Modelado eléctrico del actuador chevrón Z

Para calcular la resistencia equivalente de este actuador, en principio se utilizan las ecuaciones convencionales para el cálculo la resistencia de cada segmento de los brazos mostrados en la figura 4.9, para posteriormente, obtener la resistencia equivalente de todo el arreglo resistivo, Cabe señalar que, debido a la simetría del actuador chevrón Z, para realizar este cálculo se divide en dos secciones, y finalmente se considera la serie resultante.

El voltaje puede obtenerse a partir de la Ley de Ohm:

$$V = IR \quad (4.8)$$

donde I es la Intensidad de corriente eléctrica, en (A), y R es la magnitud de la resistencia, (Ω), la cual se calcula a partir de:

$$R = \rho \frac{l}{A} \quad (4.9)$$

donde ρ es la resistividad del material, ($\Omega \cdot m$), l es la longitud del elemento considerado, (m) y A es la sección transversal de área, (m^2).

Mientras que la densidad de corriente eléctrica puede calcularse mediante:

$$J = \frac{I}{A} \quad (4.10)$$

La magnitud del campo eléctrico puede obtenerse utilizando:

$$E = \frac{V}{l} \quad (4.11)$$

El análisis resistivo del actuador completo (serie de resistencias correspondientes a cada de sus mitades) resultó en la ecuación 4.12, que proporciona la resistencia total del actuador de chevrón Z.

$$R_{TA} = \frac{1}{4W_a t} \left(\frac{\rho(8L_a W_b W_z + W_a(2L_b W_z + L_z W_b))}{W_b W_z} \right) \quad (4.12)$$

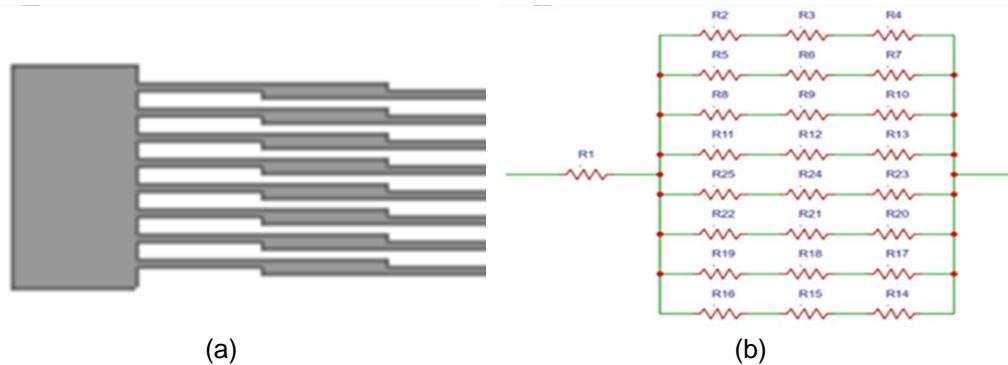


Figura 4.9 (a) Geometría, y (b) Modelo resistivo de la mitad izquierda del actuador de chevrón en forma de Z.

4.4 Diseño de un boceto preliminar de la micropinza

Se utilizó el método de la espiral Biomimética (figura 2.3), para desarrollar al diseño bioinspirado.

1. Definir: La interpretación a este primer paso fue establecer las características que se busca de un diseño y delimitaciones para lograr los objetivos, para concluir en tiempo y forma.

Características de la micropinza:

- Fuerza y desplazamiento adecuados para manipular microobjetos de 90 hasta 55 micrómetros (diámetro) y peso mayor o igual 0.88 mg,
- Estructura novedosa, realizada a partir de bioinspiración.

Delimitaciones:

- El diseño será de nivel 1 de bioinspiración.
- La morfología de la fuente de inspiración pertenecerá al reino animal.

2. Interpretar: Identificadas en la naturaleza las posibles soluciones.

Para encontrar las posibles soluciones, se observaron los patrones en las formas de la naturaleza, considerando las características y limitaciones del diseño, mostradas en la tabla 4.8. Se encontró que las

mandíbulas y pinzas de algunos animales podrían dar solución, obteniendo así una visión más amplia.

Tabla 4.7 Patrones de pinzas y mandíbulas en la naturaleza.

Patrón	Función Principal	Función secundaria	Mecanismos de Emergencia	Aplicación natural	Aplicación cultural
Pinza	Captura y manipulación (Especializada y delicada)	Sujetar, trasladar, cortar y crear sonidos	Alimentación, defensa, manipulación de objetos, comunicación y accesorios de apartamento	Animales invertebrados y, en lo general, pequeños	Herramientas de manipulación de objetos (gran variedad de pinzas y tenazas)
Mandíbulas	Captura y manipulación (Robusta y poderosa)	Sujetar, trasladar, crear sonidos y masticar.	Alimentación, defensa, manipulación de objetos y comunicación	Animales vertebrados en lo general más grandes	Herramientas de manipulación de objetos (pinza cocodrilo quirúrgica)

Las conclusiones de la tabla 4.8 son:

- Las pinzas y mandíbulas de los animales tienen muchas funciones parecidas, la diferencia está en la sofisticación y la fuerza que generan.
- El tamaño y la complejidad de las pinzas de los animales son muy significativas.
- Existe menos literatura de herramientas inspiradas en mandíbulas, pero si existen varias inspiradas en picos de aves, que no forman parte de sus mandíbulas.
- Unas de las características que se observó en la mayoría de las pinzas y mandíbulas es la presencia de un elemento fijo, que compone su morfología, excepto en los insectos, donde si existe movimiento en ambas partes.

3. Descubrir: Buscar en la naturaleza las funciones que se quieren satisfacer con el diseño.

Basándonos en las conclusiones del proceso 2, se ordenaron las posibles morfologías de animales que pueden satisfacer lo que buscamos, como se muestra en la tabla 4.9.

Tabla 4.8 Análisis de morfología.

Tamaño de las morfologías	Clasificación general	Especies de Animales
Pequeño	Pinzas y mandíbulas de insectos	En específico a familia de los de arácnidos (Alacranes, escarpines) y hormigas.
Mediano	Pinzas o tenazas de crustáceos y moluscos	Las pinzas de cangrejo (Birgus latro, Carcinus, Menipp entre otras especies)
Grande	Mandíbulas de reptiles y mamíferos	Las mandíbulas del cocodrilo que tiene la mordida con mayor fuerza del reino animal.

4. Abstraer: Paso importante para emular correctamente la solución observada de la naturaleza y aplicarla en el diseño. Para poder abstraer una buena fuente de bioinspiración, se consideró:

- En primera instancia, se enfocó el interés en animales que sobresalieran en gran medida por la fuerza de sujeción que generan con sus pinzas o mandíbulas.
- Hallar literatura sobre la forma gráfica de las morfologías del mecanismo presentes en las pinzas o mandíbulas de los animales, fue determinante y el primer filtro para encontrar una estructura biológica que se podría utilizar como fuente de inspiración.
- Debido a que el diseño que se realiza es de tamaño reducido, se decidió descartar las morfologías de animales de tamaño grande.
- Como se observó un patrón constante es la presencia de un elemento fijo en la mayoría de los mecanismos biológicos. Por lo que, se inició con la creación de un diseño así, lamentablemente, no tuvimos buenos resultados.

Se inicio con la investigación sobre las pinzas de cangrejos, para el análisis de su morfología. Como segunda opción, se consideraron las mandíbulas de hormigas.

Se obtuvieron varias fuentes de información, las que sobresalieron, fueron aquellas donde se representó de manera más completa a la morfología de sus pinzas y mandíbulas, tales como las mostradas en las figuras 2.14 y 2.15.

5. Emular: En la emulación se deben aplicar todas las lecciones aprendidas en las anteriores fases en una lluvia de ideas, en la cual, se integren las soluciones para encontrar diseños preliminares que se desarrollarán y así determinar a la geometría de la estructura.

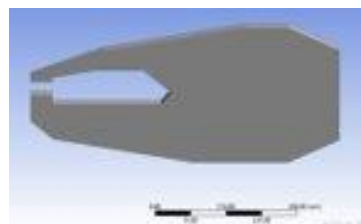
6. Evaluar: Es la fase final de la espiral, en la cual se debe evaluar la viabilidad práctica del diseño.

Como se mencionó, el diseño que se generará pertenecerá al nivel 1 de Biomímesis, con base en la representación gráfica de las morfologías para realizar los primeros bocetos.

En la figura 4.10, se muestra un boceto inicial similar a la morfología de la pinza de un cangrejo, la cual fue extruida y posteriormente, se realizó la comparación con la imagen de una pinza de cangrejo mostrada en la literatura, ver figura 4.11.



Figura 4.10 Ejemplo de Boceto inicial.



(a)



Figura 4.11 (a) Imagen del prototipo propuesto una pinza. (b) Pinza de un cangrejo macho (Brook 2013).

Posteriormente, se llevó a cabo la implementación del actuador chevrón (por el momento, representativo) dando origen a dos propuestas, ver figuras 4.12 y 4.13, donde la diferencia principal se encuentra en la posición del actuador de chevrón (Horizontal y vertical).

4.5 Desarrollo de la estructura bioinspirada

Los bocetos que se realizaron fueron inspirados de las pinzas de cangrejos. En las figuras 4.14 – 4.16, se muestra la evolución del prototipo de la propuesta 2.

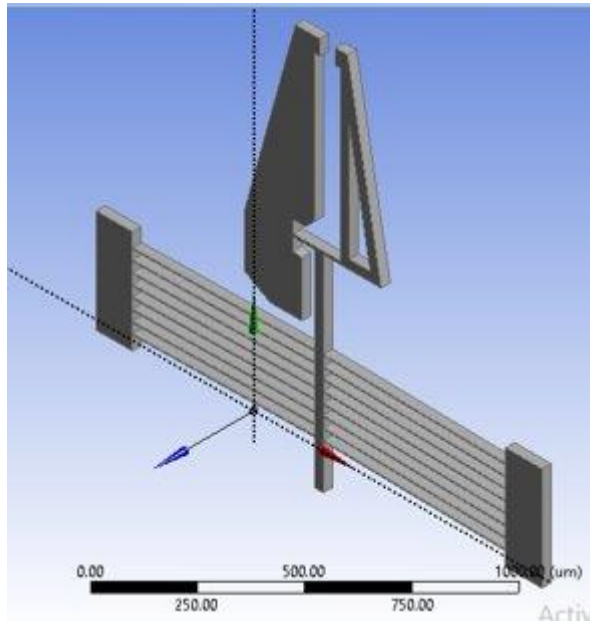


Figura 4.14 Propuesta 2.1

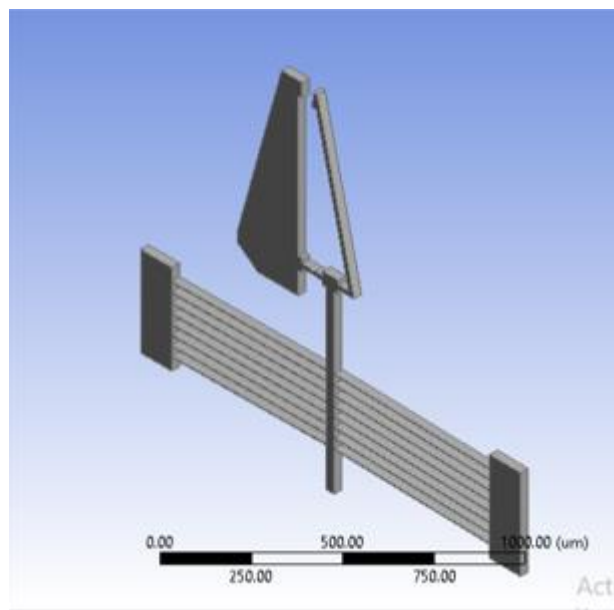


Figura 4.15 Propuesta 2.2

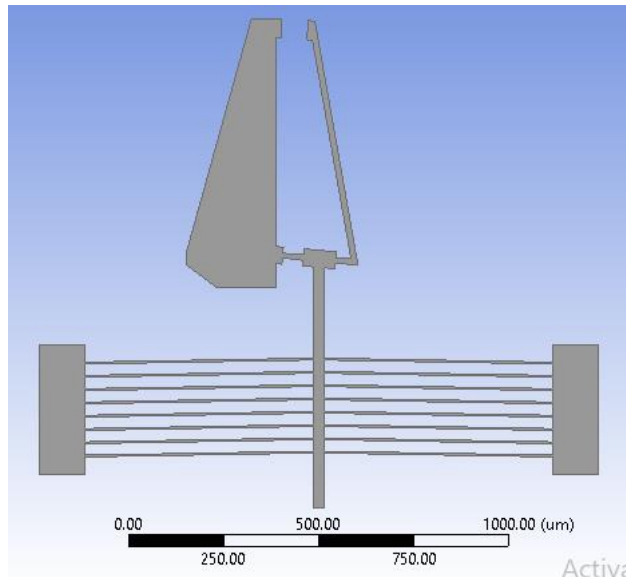
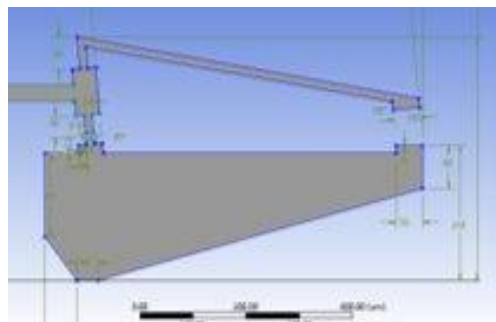
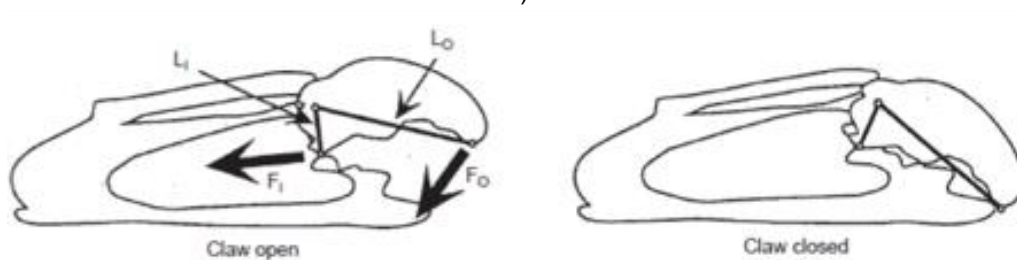


Figura 4.16 Propuesta 2.3

En la figura 4.17 se muestra el parecido entre las mandíbulas de la propuesta 3, con la garra de un cangrejo. Sin embargo, los resultados no fueron satisfactorios, ya que el movimiento generado fue mínimo, por lo que todos estos diseños fueron descartados.



a)



b)

Figura 4.17 a) Diseño del prototipo de la propuesta 2.3, b) Diagrama esquemático de la anatomía interna de la garra y su función mecánica. (Steve C. 2000).

Los siguientes diseños se realizaron tomando como fuente de inspiración a las mandíbulas de hormigas (figura 4.18). Se analizó una morfología encontrada en la literatura, donde se encontró similitud con un tipo de mecanismo de amplificación flexible tipo M, utilizado en los MEMS, el cual se utilizará en este nuevo diseño.

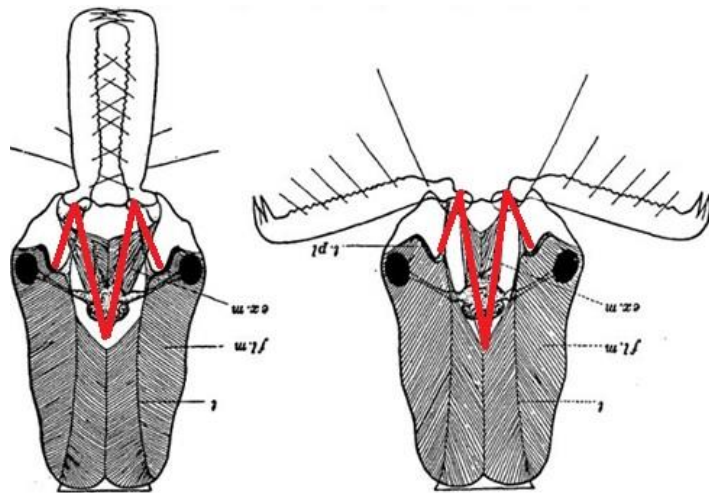


Figura 4.18 Morfología de la cabeza y mandíbulas de una hormiga (Larabee et al., 2017). Se aprecian los músculos y un tipo de mecanismo de amplificación flexible tipo M (Dibujo insertado).

Una vez descartadas los modelos de micropinzas inspirados en las pinzas de cangrejo, se realizaron una serie de propuestas inspiradas en las mandíbulas de hormigas (figuras 4.19-4.23).

Model

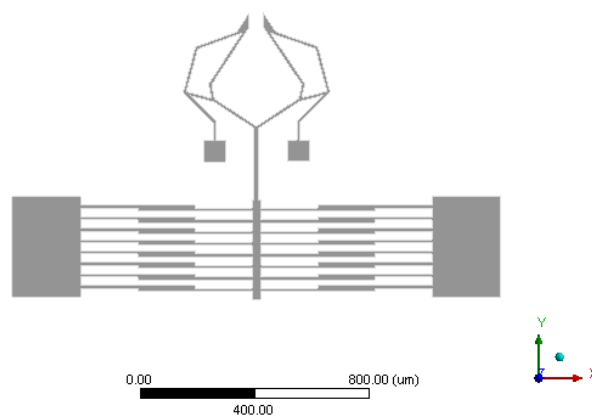


Figura 4.19 Pinza de brazos anchos (BA).

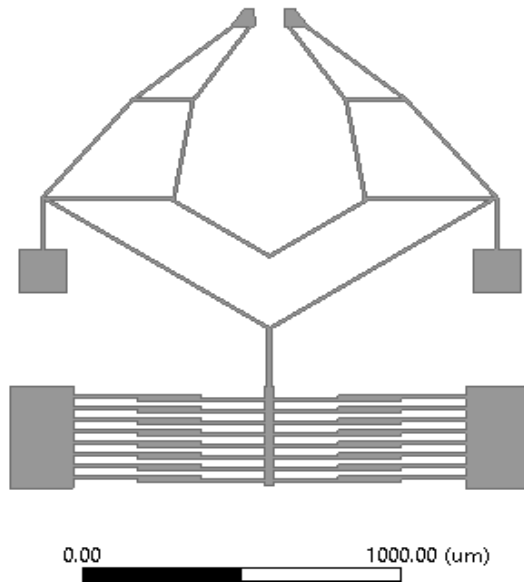


Figura 4.20 Pinza de tamaño grande (TG).

Model

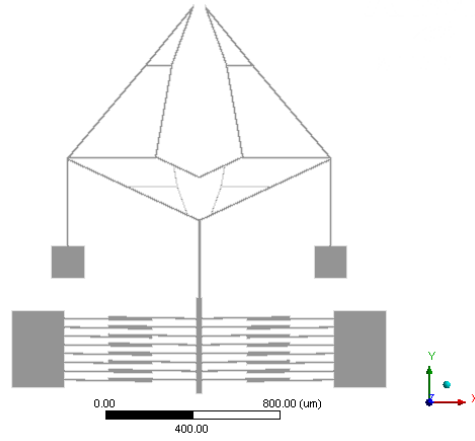


Figura 4.21 Pinza de tamaño grande modificado (TGM).

Model

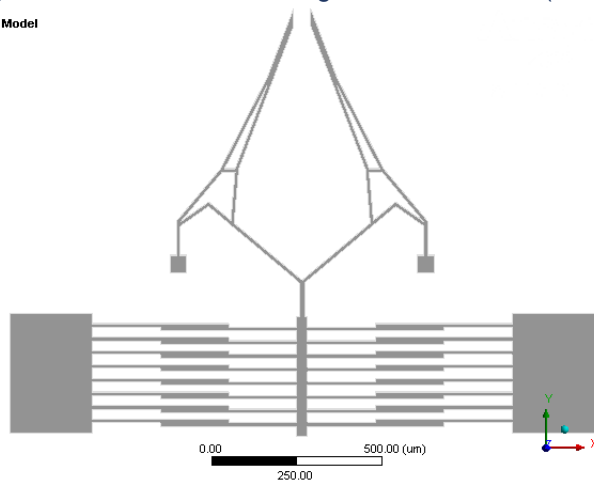


Figura 4.22 Pinza de brazos Z (BZ).

Model

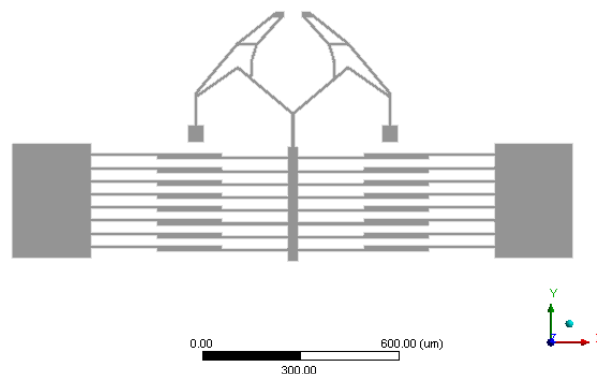


Figura 4.23 Pinza de brazos z modificado (BZM).

Estos diseños fueron evaluados a través de la comparación de sus resultados (tabla 4.10), considerando a la fuerza y el desplazamiento de las mandíbulas, obtenidos de las simulaciones correspondientes. Las estructuras se alimentaron con 2 V, sin aplicar convección.

Tabla 4.9 Comparación de los parámetros de las pinzas sin convección.

Parámetro	Temperatura en puntas(°C)	Desplazamiento en eje Y(μm)	Fuerza Total Max en mandíbulas (mN)
BA	106.43	8.267	3.078
TG	106.43	14.803	13.333
BZ	106.48	6.2691	6.370
TGM	106.43	1.4779	8.646
BZM	106.48	6.0329	6.183

El diseño TG es el que muestra las magnitudes mayores de desplazamiento y fuerza, por lo que se selecciona para continuar con las mejoras pertinentes, obteniendo así un diseño bioinspirado como punto de partida. En el análisis numérico se considera el desplazamiento en el eje Y. Este modelo tiene una apertura inicial entre las puntas de 50 μm , aplicando 2 V, sin considerar convección, se obtuvo un cierre entre las puntas de la micropinza de 29.6 μm , obteniéndose una apertura final de 20.4 μm . En las

figuras 4.24 y 4.25 se muestran las gráficas de las comparaciones de desempeño entre los modelos analizados considerando desplazamiento entre las puntas y fuerza de reacción, donde puede apreciarse de manera visual la mayor respuesta en ambos parámetros de pinza TG.

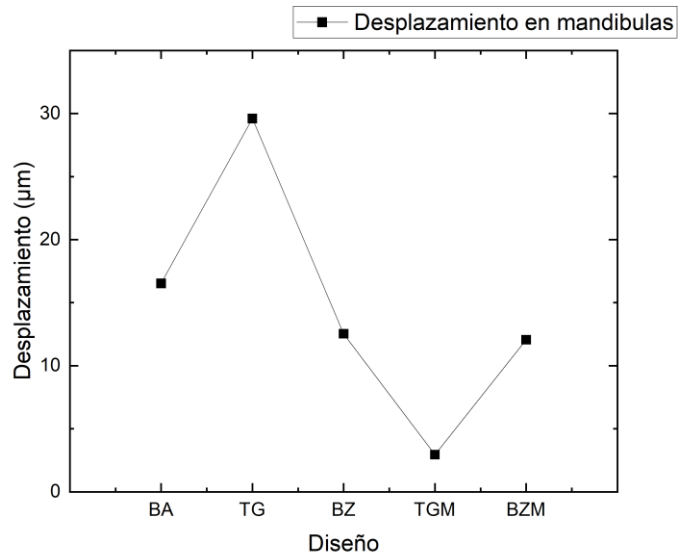


Figura 4.24 Gráfica de la comparación de desplazamientos de los 4 modelos considerados.

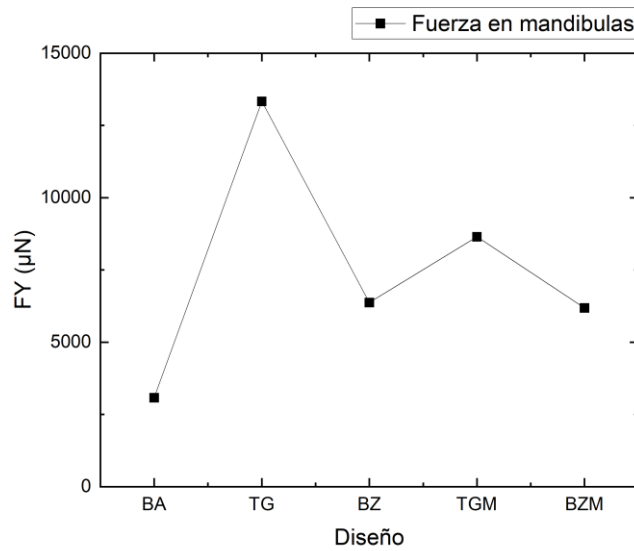


Figura 4.25 Gráfica de la comparación de desplazamientos de los 4 modelos considerados.

4.6 Dimensiones de la micropinza TG modificada (DISEÑO FINAL)

En la figura 4.26 se muestra el diseño final con las dimensiones ajustadas, que satisfacen a la tabla de requerimientos 3.1. Sus dimensiones se muestran en las tablas 4.11 y 4.12. en este diseño se consideró la resistividad de oblea SOI proporcionada en la hoja de datos del fabricante para que en un futuro pueda ser fabricada. El grosor de esta oblea es de 70 μm .

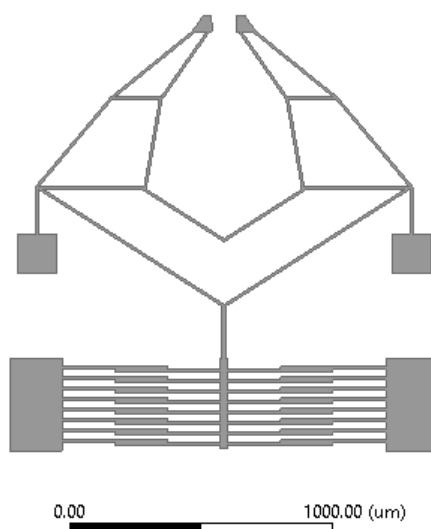


Figura 4.26 Diseño de la estructura final en silicio.

Tabla 4.10 Dimensiones de la geometría de la pinza (TG).

Elemento	Descripción	Magnitud (μm)
H109	Distancia de entre mandíbulas	90
H167	Distancia entre anclas	1350
H145	Largo del segmento grande horizontal de las mandíbulas	400
H155	Ancho de viga que conecta a la flecha del chevrón	15
H142	Ancho de las vigas de la pinza	10
V151	Longitud de las vigas que unen a los brazos con las anclas	180
V141	Largo y ancho de anclas	150

Tabla 4.11 Ángulos de la geometría de la pinza (TG).

Elemento	Descripción	Magnitud (°)
A87	Ángulo entre el segmento de brazo pequeño y la viga interna de las mandíbulas	110
A101	Ángulo entre el segmento de brazo grande y la viga interna de las mandíbulas	100
A98	Ángulo entre el brazo pequeño y la viga externa de las mandíbulas	50
A153	Ángulo entre las vigas centrales del amplificador M	115

4.6.1 Resistencia de la micropinza (diseño final)

Se encontró que la resistencia de la pinza es equivalente al del actuador chevrón Z. Esto debido a que cada brazo de la sección de manipulación se encuentra acoplado a la flecha del dispositivo tipo Z y no se une a otra sección, lo que permite observar que se trata de un elemento resistivo con una sola conexión en uno de sus extremos, esto es, cada brazo emula a una resistencia en circuito abierto, por lo que, no impacta en el valor resistivo total.

4.6.2 Resultados numéricos de la micropinza final

Las características y condiciones de operación del diseño final implementado en oblea SOI, aplicando 2 V al microactuador, y aplicando convección en toda la estructura (el coeficiente de conexión utilizado 20000 W/m² °C), se muestran en las tablas 4.13 - 4.15. Cabe señalar que, sin convección se tiene una temperatura máxima de 472.45 °C.

Tabla 4.12 Dimensiones, desplazamiento y temperatura de la micropinza final.

Dimensiones (μm x μm x μm)	Apertura inicial (μm)	Apertura final (μm)	Desplazamiento total entre mandíbulas (μm)	Temperatura en ancla (°C)	T _{puntas} (°C)
1630x1656x70	90	54	36	141	25.5

Tabla 4.13 Desplazamientos direccionales de la micropinza final.

U_x , (μm)	U_y , (μm)	U_z , (μm)	U_T , (μm)
12	0.09477	0.0213	16

Tabla 4.14 Fuerzas de reacción direccionales de la micropinza final.

F_x , (μN)	F_y , (mN)	F_z , (μN)	F_T , (mN)
19	8.851	4.1235	8.852

4.7 Comparación con otras micropinzas

La comparación del diseño final con otras micropinzas similares reportadas en la literatura, considerando la presencia de un mecanismo de amplificación tipo M. Se hallaron dos ejemplos que se muestran en las figuras 4.27.

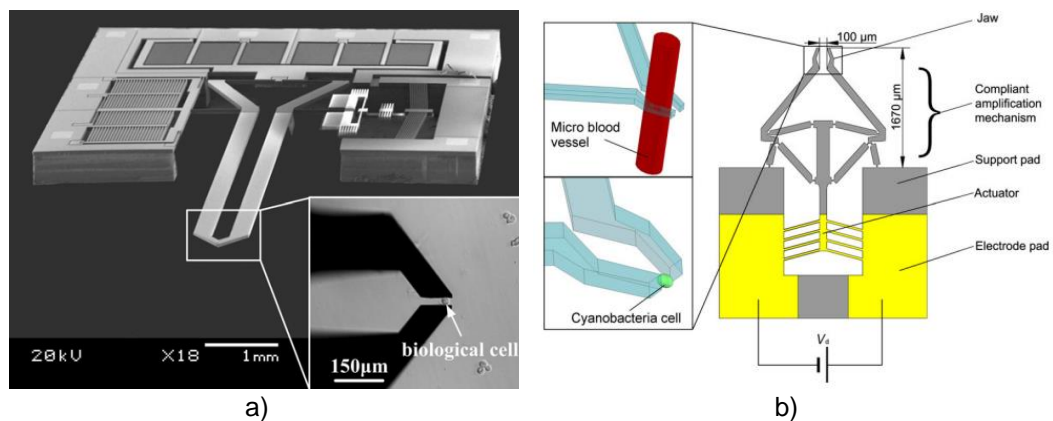


Figura 4.27 Estructuras de micropinzas comparadas con nuestro diseño final, a) (Kim et al. 2008) y b) (R. Zhang et al. 2012).

Tabla 4.15 Comparación de las características del diseño final con otras pinzas similares obtenidas de la literatura

Ref.	Material	Alimentación, (V)	N.C o N.A /apertura inicial (μm)	Objetivo de sujeción	Dimensiones	d_{salida} , (μm)	Fuerza de reacción, (mN)	f, (KHz)	T, ($^{\circ}\text{C}$)
(Kim et al. 2008)	Silicio	5 a 3.5V	N. C. 5	Células	N. D.	67	20×10^{-6}	N/A	En actuador 57
(R. Zhang et al. 2012)	Silicio	195×10^{-3}	N. C./ 101.5	Células, vasos sanguíneos	N. D.	71.5	242×10^{-3}	N/A	En puntas 47
Esta propuesta	SOI	1	N. A. 90 μm	Microesferas de cristal	1630 – 1656 μm	35.9	8.64	14.8	En puntas 25.5

NOTA:

d_{salida} : desplazamiento de salida

f: frecuencia.

T: Temperatura.

N.A: Normalmente Abierto.

D.C.: Normalmente Cerrado.

N. D: No disponible.

Podemos comprobar que nuestro diseño de micropinza tiene un desempeño aceptable, considerando básicamente a la fuerza de reacción, lo que permite sujetar a objetos más pesados. Con relación al desplazamiento, se tiene un nivel aceptable, de acuerdo con el potencial aplicado.

4.8 Cumplimiento de objetivo

Una vez que se descartó el uso de pinzas similares a las de cangrejo y preseleccionado y a la pinza TG de la figura 4.27, puede responderse satisfactoriamente a las preguntas de investigación y observar que se logra el objetivo.

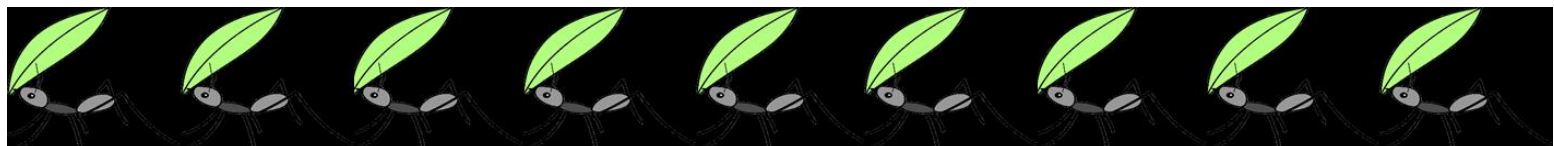
Tabla 4.16 Respuestas a las preguntas de investigación.

Pregunta de investigación	Respuesta
¿El diseño de la estructura bioinspirada de la pinza ayudará a mejorar sus características de fuerza, sujeción y apertura?	Sí, cuando se consideró a pinzas bioinspirada en mandíbulas de hormigas.
¿El uso de mecanismos de amplificación puede contribuir para mejorar el desempeño de la micropinza?	Sí, debido a la forma del actuador chevrón también puede decirse que ha sido bioinspirado.
Objetivo	Respuesta
Diseñar una pinza microelectromecánica, con una estructura bioinspirada, con apertura y fuerza suficientes para sujetar micro objetos.	El diseño cumple con las características que se mencionan en el objetivo

CAPÍTULO 5

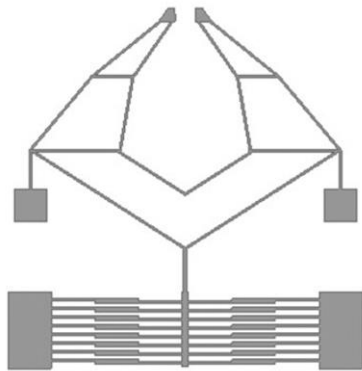
PRUEBAS EXPERIMENTALES (MICROPINZA ESCALADA)

El diseño escalado de la micropinza fue implementado en aluminio 6053, cuyo proceso de fabricación se encuentra en el Anexo A. En este capítulo se muestran los resultados experimentales de su implementación, siendo previamente calculada y medida la resistividad del material utilizado, hallándose que la aproximación lograda entre los resultados numéricos y experimentales fue muy cercana.

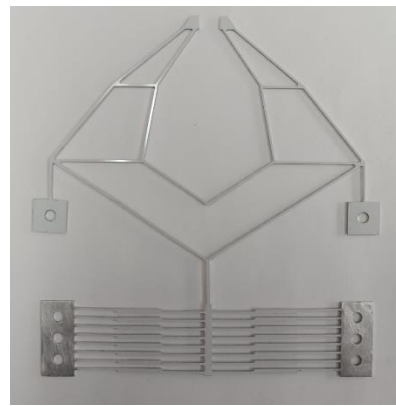


CAPÍTULO 5. PRUEBAS EXPERIMENTALES (MICROPINZA ESCALADA)

La pinza que se considera en este capítulo corresponde al diseño final mostrado en la sección 4.6, una vez que fue escalada considerando un factor de escalamiento 1:100 y fabricada en aluminio 6053, que se muestra en la figura 5.1. Las dimensiones de esta pinza se muestran en la tabla 5.1.



(a)



(b)

Figura 5.1 a) Diseño de la micropinza final, b) pinza fabricada

Tabla 5.1 Dimensiones totales y apertura de la pinza fabricada.

Elemento	Magnitud (mm)
Largo total	16.5
Ancho total	15.8
Apertura inicial	9

5.1 Determinación analítica y experimental de la resistividad del aluminio 6053

Las pruebas de resistividad experimental del aluminio 6053, material utilizado para la implementación de la pinza, se realizaron para validar las magnitudes obtenidas a partir de la simulación del dispositivo. En las pruebas experimentales se utilizó un medidor LCR (Inductancia (L), Capacitancia (C) y Resistencia (R), Keysight, Modelo E4980AL el cual es un instrumento que se utiliza para determinar estos parámetros presentes en componentes, sensores u otros dispositivos. Este equipo puede utilizarse para medir de manera indirecta a la resistividad del material del que están constituidos.

La medición de resistencia se realizó sobre una probeta rectangular de aluminio con dimensiones 40x1x1 mm, obteniéndose una resistencia de 1.83 $\mu\Omega$. La figura 5.2 muestra el esquema experimental utilizado.

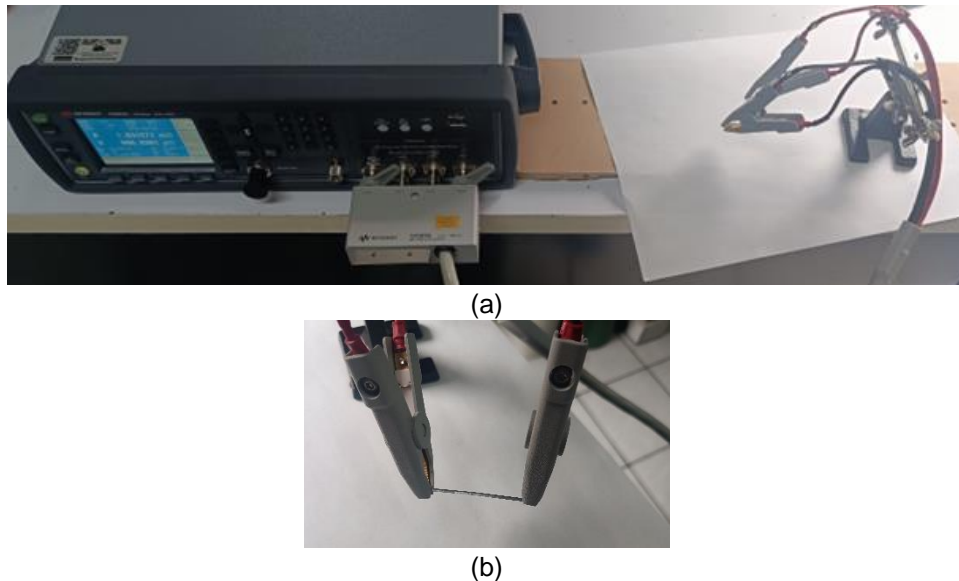


Figura 5.2 a) Configuración experimental general para medir la resistencia de la probeta.
b) Puntas de medición LCR que sujetan a la probeta.

Con la magnitud de resistencia medida y las dimensiones de la pieza de aluminio, se calculó su resistividad a partir de la ecuación 5.1:

$$R = \rho \frac{l}{A} \rightarrow \rho = R \frac{A}{l} \quad (5.1)$$

donde R es la Resistencia (Ω), ρ es la resistividad del material ($\Omega \cdot m$), l es la longitud de la pieza y A es el área de la sección transversal de la pieza.

La magnitud de la resistividad calculada es de $4.33E-8 \Omega \cdot m$.

5.2 Determinación de la resistencia del actuador y la pinza, analítica y experimental.

Posteriormente, se calculó a la resistencia de la pinza, utilizando el procedimiento descrito en la sección 4.6.1, y se comparó con el resultado experimental. Las mediciones de la resistencia de la pinza y el actuador se realizan nuevamente con el LCR (Figura 5.3).

Los porcentajes de error obtenidos del análisis teórico, numérico y experimental de la resistencia del actuador chevrón Z modificado y la pinza completa se muestran en la Tabla 5.2, donde se puede observar que los porcentajes de aproximación son aceptables. Cabe señalar que, el actuador utilizado en la medición tiene anclas ligeramente más grandes, lo que contribuye a la generación una ligera diferencia, en relación con los datos de la simulación.



Figura 5.3 a) Resultados de la resistencia del actuador, b) Arreglo de prueba del actuador, c) Resultados de la resistencia de la estructura completa y d) Arreglo de prueba de la estructura completa.

Tabla 5.2 Resultados y comparación de la resistividad del material estructural.

Dispositivo	Resistencia experimental, $\mu\Omega$	Resistencia analítica, $\mu\Omega$	Error, %	Resistencia numérica, $\mu\Omega$	Error, %
Actuador chevrón Z modificado	559.23	555	0.71	N.D.	N.D.
Pinza completa	576.45	555	3.72	595.8	3.35

5.3 Resultados experimentales de los parámetros de desempeño de la pinza escalada

La configuración experimental que se muestra en la Figura 5.4 se utilizó para medir la distribución de la temperatura, el voltaje inducido y el desplazamiento de la micropinza. El arreglo, de acuerdo con la numeración establecida en la Figura 5.4 está formado por:

1. Pinza
2. Fuente de alimentación
3. Microscopio industrial
4. Monitor
5. Voltímetro
6. Amperímetro
7. Sensor de temperatura
8. Cámara termográfica.

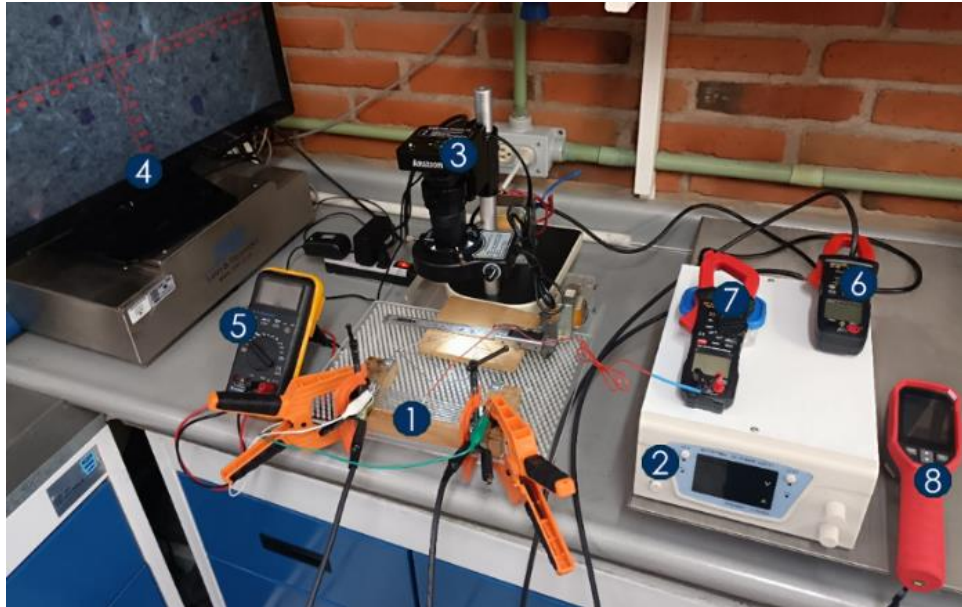


Figura 5.4 Arreglo experimental para medir el desplazamiento, la distribución de la temperatura y la corriente eléctrica de la micropinza.

5.3.1 Distribución de temperatura

Las imágenes obtenidas con la cámara termográfica permiten visualizar la distribución de la temperatura al aplicar una intensidad de corriente eléctrica donde se fijó la abrazadera aislada para evitar el contacto directo con la estructura metálica utilizada para evitar vibraciones. Posteriormente, las terminales de la fuente se acoplaron a las anclas del actuador. Los datos se utilizaron para realizar la retroalimentación y definición de las condiciones de frontera utilizadas en las simulaciones reduciendo el error entre ambos enfoques.

Los experimentos se llevaron a cabo durante 6 días entre el 16 de junio y el 21 de julio. Durante este período no hubo otras personas en el laboratorio, ya que su presencia genera altas variaciones en las mediciones, puesto que los prototipos metálicos son muy sensibles a los cambios de temperatura.

Las temperaturas en el eje Y los voltajes generados en las anclas del actuador se registraron al aplicar el barrido de corriente eléctrica de 5 a 60 A, con pasos de 5 A. La figura 5.5 muestra dos casos representativos

en los que se observan las distribuciones de temperatura observadas con una cámara termográfica.

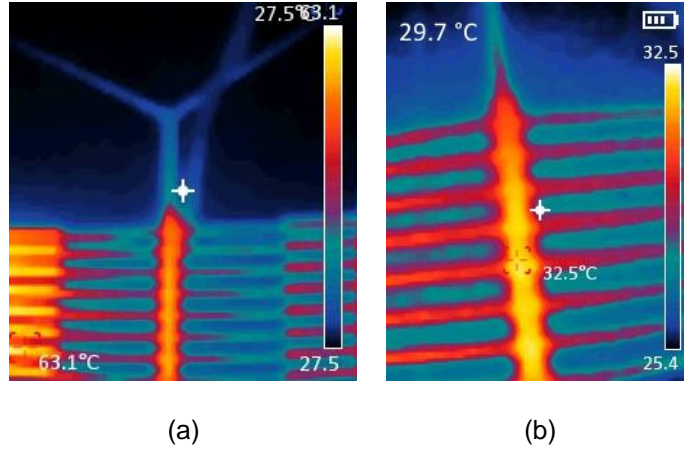


Figura 5.5 Imágenes termográficas de la temperatura en la flecha. a) Día 4, 63,1 °C, aplicando 60 A, y b) Día 6, 32,5 °C, aplicando 20 A.

Los datos experimentales fueron registrados y comparados con los numéricos como se muestra en la Figura 5.6. Donde pueden observarse, las temperaturas generadas en la flecha del actuador chevrón Z modificado son menores a los 65 grados, manteniendo una tendencia cuasilineal creciente.

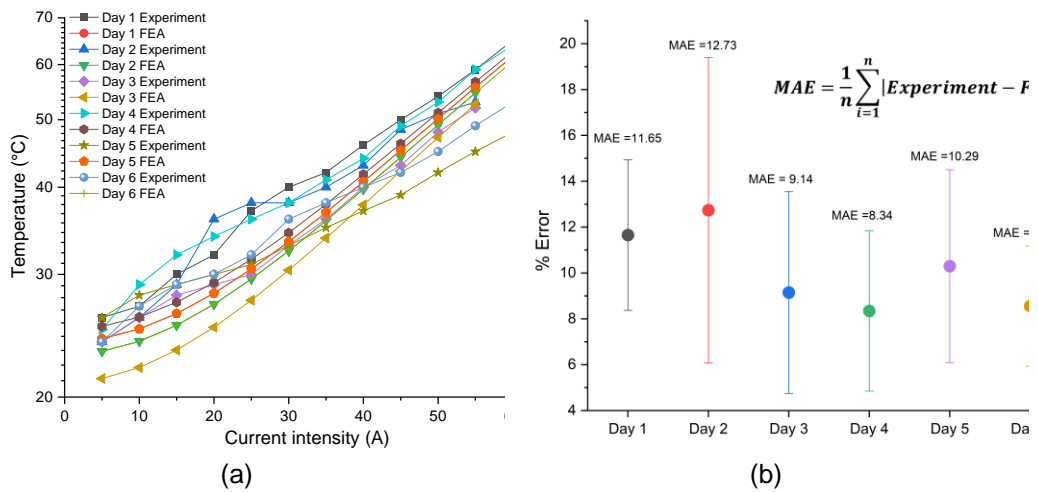


Figura 5.6 a) Temperaturas del eje (datos numéricos y experimentales), b) error porcentual medio entre los resultados numéricos y experimentales sobre la temperatura en el eje

Las condiciones de frontera definidas en el análisis numérico, obtenidas a partir de la retroalimentación con respecto a la temperatura de cada día y la corriente aplicada, permiten obtener aproximaciones muy cercanas en la temperatura de la flecha, de modo que el error porcentual promedio entre las temperaturas obtenidas numérica y experimentalmente en la flecha no supera el 13%. A pesar de algunos inconvenientes en las pruebas experimentales, fue posible acercar los porcentajes de desviación, si se evitaban las corrientes de aire y el flujo de personas.

La temperatura en las puntas no es visible en las imágenes de la cámara termográfica ya que permanecen prácticamente a temperatura ambiente. Lo cual es muy conveniente para manipular objetos de diferente naturaleza.

5.3.2 Voltaje inducido

En cuanto a la generación de voltaje en las anclas del actuador, en la Figura 5.7 se observa que a 5 A hay variaciones entre 0.1 y 0.22 V, mientras que a 60 A corresponde 0.9 y 1.3 V, por lo que se infiere que, en caso de aplicar voltaje, los niveles requeridos son bajos. Este tipo de experimentación está planeada para ser realizada como parte del trabajo futuro.

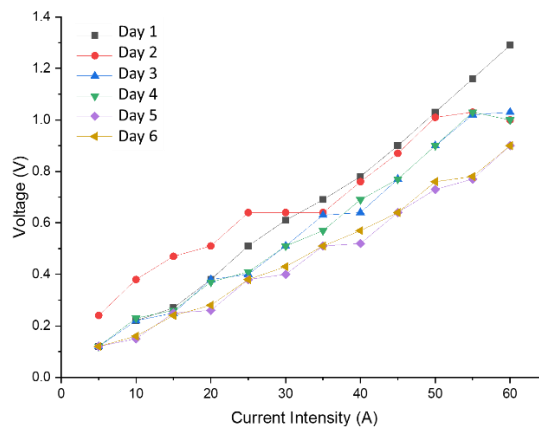


Figura 5.7 Voltaje generado en las anclas (datos experimentales).

5.3.3 Desplazamiento

Los resultados de la simulación son muy cercanos como puede apreciarse en la Figura 5.8. Sin embargo, con relación a los resultados experimentales, existe una variación significativa, este hecho se puede atribuir a efectos externos, ya que, aunque había pocas personas, las pruebas no se realizaron en una cabina de aislamiento. La tendencia, sin embargo, es similar en todos los días de medición.

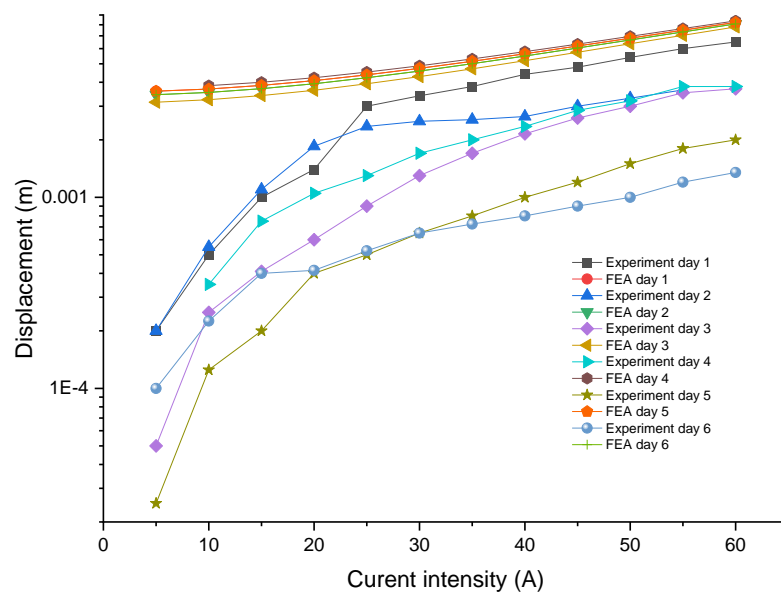


Figura 5.8 Desplazamiento entre las puntas de la pinza, datos numéricos y experimentales.

En la Figura 5.9 se muestra una imagen representativa del desplazamiento entre mandíbulas. En la tabla 5.3, se muestra una comparación entre la apertura inicial final en los casos numérico y experimental, donde puede apreciarse que, los resultados numéricos se mantienen muy cercanos generando un desplazamiento muy alto, sin embargo, en las pruebas practicas el nivel de desplazamiento es menor ya que, no se tiene un control sobre todas las variables que pueden influir en ello, tal es el caso de la temperatura, la convección, la total fijación de las anclas entre otros.

No obstante, la respuesta funcionalidad de la pinza se valida con los resultados experimentales, quedando como trabajo futuro mejorar las condiciones en las que se llevan a cabo.

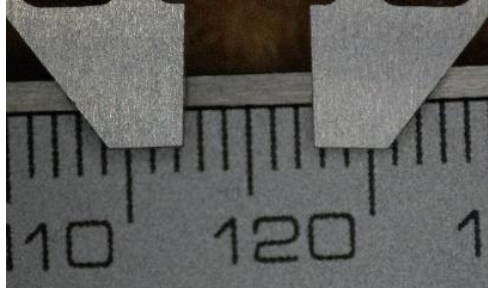


Figura 5.9 Desplazamiento entre las puntas al aplicar 40 A, obteniéndose una apertura de 5.5 mm.

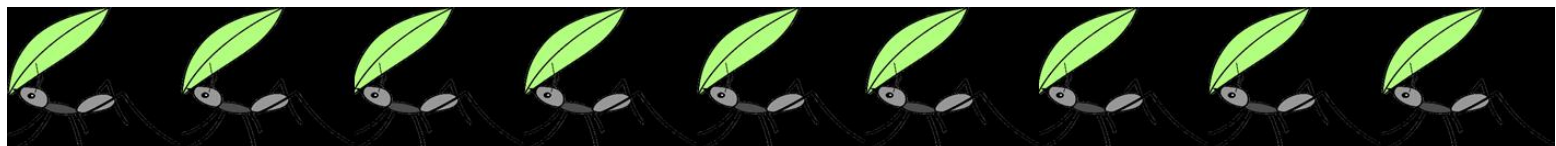
Tabla 5.3 Comparación de resultados numérico y experimentales del desplazamiento máximo de la punta.

Aproximación	Desplazamiento máximo promedio (mm)	Apertura final máxima promedio (mm)
Numérica	8.134	0.86
Experimental	2.9	6.1

CAPÍTULO 6

CONCLUSIONES

Las conclusiones que se desprenden del trabajo realizado son presentadas, identificándose además trabajo futuro.



CAPÍTULO 6. CONCLUSIONES

Esta tesis propone el diseño bio-inspirado de una micropinza considerando a silicio como material estructural. De manera adicional, posteriormente, con el propósito de validar la funcionalidad de la geometría en escala meso, se escaló para su fabricación en aluminio, realizándose también el análisis eléctrico y numérico, así como pruebas experimentales.

El diseño de la micropinza consta de dos elementos básicos, el actuador electrotérmico chevrón Z modificado y la estructura de sujeción. Los parámetros de interés para llevar a cabo el análisis numérico son la temperatura de la flecha del actuador chevrón Z modificado y el desplazamiento entre las puntas de la micropinza. Los alcances de este trabajo no incluyen la microfabricación, debido a las limitaciones inherentes, sin embargo, se diseñó considerando a obleas SOI para que, en un futuro, puedan ser fabricadas mediante un proceso relativamente sencillo.

Cabe señalar que, en las preguntas de investigación se consideró trabajar con pinzas asimétricas, en las que uno de los brazos permaneciera fijo, como es el caso de las pinzas de cangrejo, sin embargo, no se obtuvo ningún diseño que cumpliera con los requisitos de diseño establecidos, por lo que se optó por desarrollar a una pinza simétrica inspirada en las mandíbulas de hormigas. Por tanto, la hipótesis no fue validada. Sin embargo, el objetivo sí fue cumplido, ya que, no está ligado a una geometría en particular.

Con el diseño final obtenido de una micropinza simétrica, simple y funcional, inspirada en las mandíbulas de hormigas, se obtuvieron mejoras significativas sobre la fuerza de reacción, en comparación con 2 micropinzas similares halladas en la literatura.

Posteriormente, se escaló en un factor de 1:100 y se fabricó en aluminio 6053. Los resultados experimentales de la temperatura en la flecha son suficientemente cercanos a los numéricos ya que el error

promedio no supera el 13%. En cuanto a la apertura inicial y final, se observa que se pueden sujetar objetos con diámetros de 9 mm a 0.86 mm.

Por otro lado, una de las aportaciones de este trabajo es la aplicación minuciosa del proceso de bioinspiración presentado por The Biomimicry Institute para crear este novedoso diseño que cuenta con una configuración sencilla, materiales de bajo costo y fácil proceso de fabricación, ya que sólo se requiere de un único material estructural.

Por otro lado, en las pruebas se ha mostrado una forma de caracterizar dispositivos utilizando instrumentos de accesibilidad moderada.

Además, contar con los datos experimentales permitió retroalimentar a las simulaciones pertinentes, reduciendo el error entre los resultados numéricos y experimentales, aunque con cierta tolerancia, ya que no es posible, con las condiciones actuales lograr mediciones bajo condiciones completamente controladas.

Es importante señalar que, la pinza fabricada en aluminio es altamente sensible a los cambios de temperatura, a la presencia de convección, así como la total fijación de las anclas, además de los esfuerzos inducidos en los brazos al realizar el proceso de sujeción, entre otros factores.

Como trabajo futuro, se considera mejorar la técnica experimental, incluyendo una cámara de aislamiento, para hacer pruebas de caracterización experimental con un mayor grado de precisión.

ANEXO A
FABRICACIÓN DE LA MICROPINZA



ANEXO A. SIMULACIÓN Y FABRICACIÓN DE LA PINZA ESCALADA

A.1 Ajustes al diseño final de la micropinza

Para llevar a cabo el proceso de fabricación de la pinza, primero se simuló, considerando:

- **Escalamiento:** Factor 1:100.
- **Material:** Aluminio 6053
- **Orificios:** Se integraron orificios en anclas para la sujeción de la estructura en la experimentación.
- **Alimentación del actuador:** Barrido de corriente de 5 a 60 A.

Las modificaciones implementadas a partir de la micropinza del modelo final simulado en silicio y presentada en la sección 4.6 se muestra en la Figura A.1. El mayor cambio corresponde a la forma de las anclas, las cuales fueron adaptadas para lograr la mayor fijación.

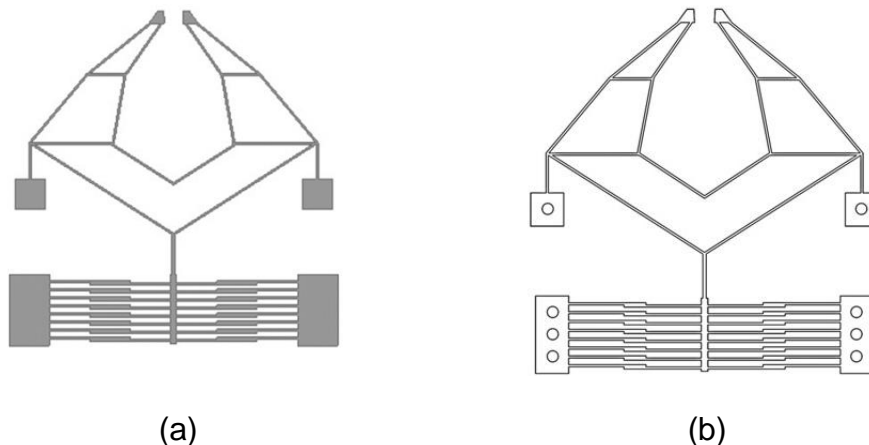


Figura A.1 a) Diseño de la micropinza final, b) estructura con orificios de sujeción.

El diseño utilizado en ANSYS® para la simulación fue modificado y exportado al software de diseño AutoCAD®, para convertir las geometrías dibujadas en polilíneas, creando así el diseño fabricado.

A.2 Dimensiones de la pinza escalada

Las dimensiones totales de la micropinza en escala micrométrica son $1630 \times 1656 \times 70 \mu\text{m}$. Después de hacer el escalado y algunos ajustes adicionales en el tamaño de las anclas, en escala meso métrica es de $153 \times 166.75 \times 1 \text{mm}$. La figura 4 muestra las dimensiones de la mitad izquierda de las dos secciones de la pinza, es decir, el actuador chevrón Z modificado y el mecanismo de sujeción. Las descripciones y dimensiones se presentan en la Tabla A1.

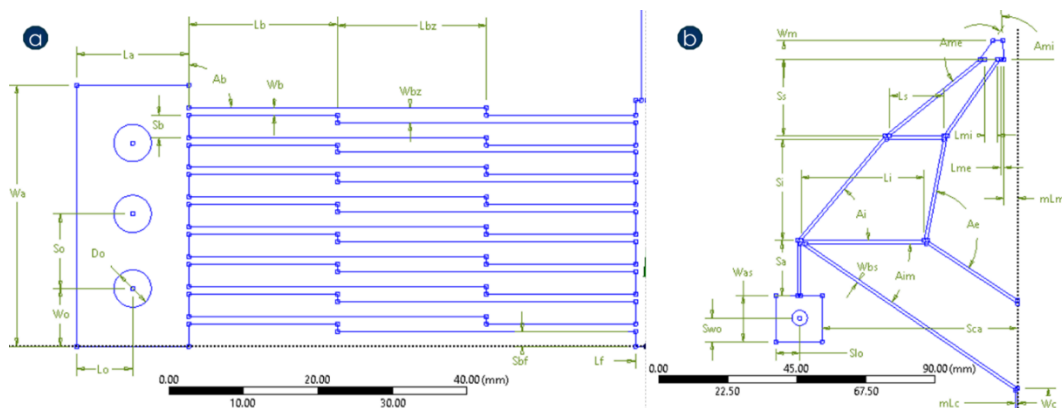


Figura A.2 Cotas de la geometría de la mitad izquierda (a) del actuador chevrón Z y (b) de la pinza.

Tabla A.1 Dimensiones de los elementos de la pinza.

ID	Descripción	Magnitud (mm)	ID	Descripción	Magnitud (mm)
La	Longitud del ancla	20	mLm	Mitad de la longitud de separación entre mandíbulas	4.5
Wa	Ancho del ancla	35	Lme	Longitud de mandíbula exterior	1
Lf	Largo de flecha	15	Lmi	Longitud de mandíbula interior	4
Wf	Ancho de flecha	35	Wm	Ancho de mandíbula	6
Lb	Largo de brazo	20	Wbs	Ancho de las vigas de toda la geometría	1
Wb	Ancho de brazo	1	Ss	Separación entre el brazo superior y las mandíbulas	25
Sb	Distancia entre brazos	3	Ls	Longitud del brazo superior	17.5
Lbz	Largo del brazo Z	20	Si	Separación entre el brazo superior y el inferior	33

<i>Wbz</i>	Ancho del Brazo Z	2	Li	Longitud del brazo inferior	40
<i>h</i>	Grosor de los brazos	1	Sa	Separación entre el brazo superior y el ancla	18
<i>Sca</i>	Separación entre el ancla superior cuadrada y el centro	63.75	Was	Ancho del ancla superior cuadrada	15
<i>Wc</i>	Ancho del brazo de conexión	20.69	Swo	Separación entre el ancho del ancla superior cuadrada y orificio	7.75
<i>mLc</i>	Media longitud del brazo de conexión	0.75	Slo	Separación entre la longitud del ancla superior cuadrada y orificio	7.75
<i>Ángulos</i>					
<i>ID</i>	Descripción			Magnitud, (°)	
<i>Ab</i>	Ángulo entre los brazos y las anclas del actuador			90	
<i>Ami</i>	Ángulo interior las mandíbulas			93	
<i>Ame</i>	Ángulo exterior las mandíbulas			165	
<i>Ae</i>	Ángulo externo			112.5	
<i>Ai</i>	Ángulo interno			50	
<i>Aim</i>	Ángulo interno del amplificador M			34.2	

A.3 Simulación de la pinza escalada

La pinza se simuló por el método de elemento finito con el software Ansys Workbench. Se aplicó una fuente de alimentación que corresponde a un barrido en la intensidad de corriente eléctrica de 5 a 60 A con pasos de 5 A en las anclas del actuador.

La temperatura ambiente con la que se realizaron las pruebas experimentales durante 6 días mostró variaciones de 21 a 24 °C, como se muestra a continuación. Cabe destacar que las simulaciones se repitieron con la magnitud medida en cada día para reducir los errores entre los resultados numéricos y experimentales. A partir de la simulación se obtuvo la distribución temperatura y el desplazamiento.

Las propiedades eléctricas del material se muestran en la tabla A.2.

Tabla A.2 Propiedades eléctricas de la micropinza implementada en aluminio.

Parámetros y unidades	Aluminio	Referencia
-----------------------	----------	------------

A.3.1 Condiciones de frontera para el análisis numérico

Para simular a la pinza, se consideró:

- Aplicar un barrido de corriente de 5 a 60 A, al actuador chevrón, mediante parametrización.
- A las anclas del actuador y de los brazos de la pinza se les asignó temperatura ambiente, que correspondía a la temperatura ambiente registrada en los diferentes días.

La figura A.3, a la izquierda, muestra el árbol de simulación y los elementos de asignación que se consideran para la estimulación eléctrica. A la derecha, se muestra la ventana correspondiente a una de las condiciones de límite aplicadas.

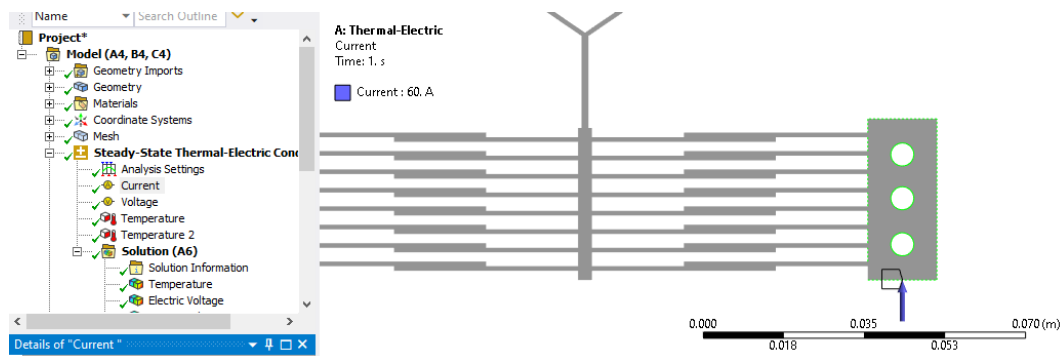


Figura A.3 Ventana gráfica que muestra la corriente máxima aplicada.

Como se muestra en la Figura A.4, se realizó *Steady state thermal electric*, vinculado a dos *Static structural*, con el que se obtiene el desplazamiento en las puntas de la pinza. Las condiciones de frontera se asignan de la siguiente manera:

Las herramientas *Static Structural* se acoplan a *thermal electric*. Posteriormente, con la herramienta *Fixed support* se seleccionan como elementos fijos todas las caras laterales de las anclas del actuador y de los brazos de pinza.

Para determinar la fuerza de reacción, se restringe el movimiento de las puntas de la pinza. Para esto en el software se asigna un segundo *Static Structural* que también se acopla al *Thermal Electric*, luego se arrastra el *Fixed support* del primer *Static Structural*, se selecciona un segundo *Fixed support* del último *Static Structural* para asignar soporte a las puntas, para mantenerlos sin movimiento y determinar la fuerza de reacción en las puntas de la pinza. Cabe señalar que, experimentalmente la determinación de la magnitud de la fuerza no se lleva a cabo.

Las asignaciones y las condiciones de frontera se pueden ver en la Figura A.4, en el árbol de simulación y en la ventana gráfica.

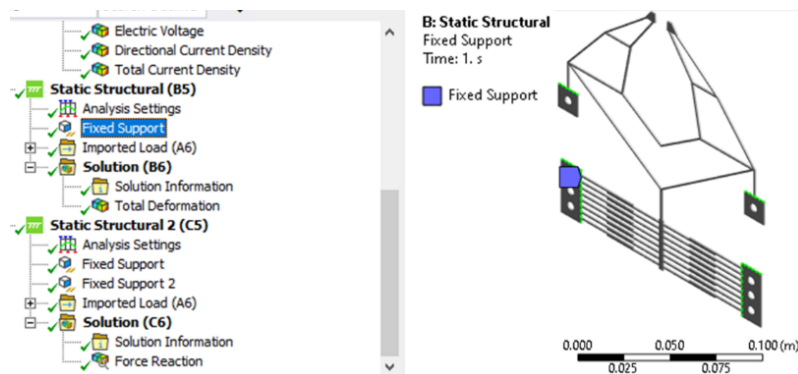


Figura A.4 Izquierda: Árbol de simulación y condiciones de frontera para obtener el desplazamiento en las puntas de la pinza. Derecha: Ventana gráfica que muestra las condiciones de frontera.

A.3.2 Resultados numéricos

Para determinar las condiciones de frontera, se llevó a cabo la experimentación y fabricación de la pinza, pues en las primeras comparaciones se observaron grandes variaciones, que posteriormente se redujeron al considerar la temperatura ambiente correspondiente, obteniendo una aproximación más cercana entre la simulación y la experimentación.

La figura A.5 muestra dos de los 6 casos analizados, donde se presenta la temperatura y la deformación total entre los brazos de la pinza. Los datos de los resultados de la simulación considerando a la temperatura ambiente de cada uno de los 6 días (entre el 16 de junio y el 21 de julio) se muestran en la Tabla A.3.

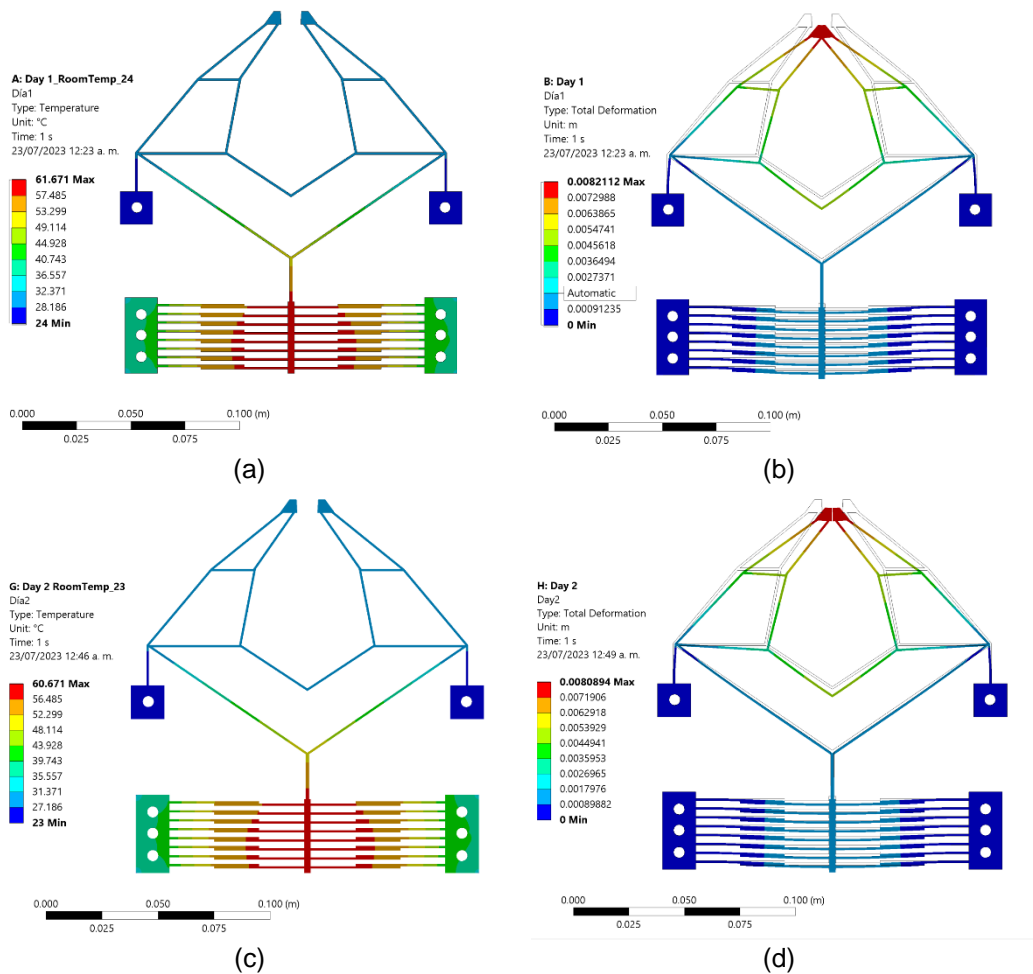


Figura A.5 Temperatura de distribución de temperatura y desplazamiento de la pinza cuando se aplica 60 A. (a) y (b) el día 1, con 24°C fue la temperatura ambiente. (c) y (d) Día 2, con 23°C fue la temperatura ambiente

Tabla A.3 Temperaturas y desplazamiento entre puntas.

Día	Temperatura ambiente, (°C)	Temperatura en la flecha del actuador, (°C)	Desplazamiento entre puntas de la pinza a @ 60 A, (mm)
1	24	61.671	8.211
2	23	60.671	8.089
3	21	58.671	7.792
4	24	62.671	8.386
5	23	61.671	8.237
6	23	60.671	8.089

De los datos mostrados en la tabla A.3, las magnitudes promedio de temperatura es 23 °C, temperatura en la flecha del actuador es 61 °C, mientras que el desplazamiento promedio es de 8.134 mm. Por lo tanto, los

objetos que pueden sujetarse de acuerdo con los resultados numéricos son de 9 mm a 0.86 mm de diámetro.

A.4 Fabricación del diseño

La geometría de la pinza se exportó en formato dxf2010. Este archivo se abrió en la herramienta de software Aspire, donde se perfilan los cortes internos y externos. La figura A.6 muestra el diagrama de bloques del proceso de fabricación de la pinza. El maquinado se ilustra en la figura A.7.

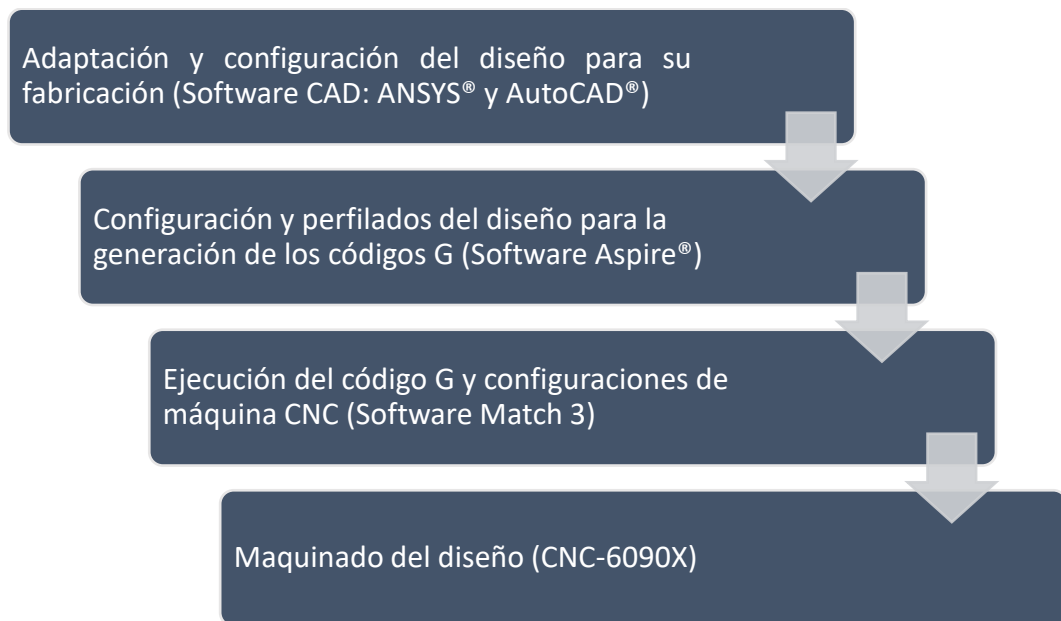


Figura A.6 Proceso de fabricación del diseño.



Figura A.7 Maquinado de la estructura.

ANEXO B

SIMULACIÓN DEL ACTUADOR CHEVRÓN

V.



ANEXO B. SIMULACIÓN DEL ACTUADOR CHEVRÓN V

En este anexo se describe el proceso de la simulación del actuador chevrón convencional.

Se construye un árbol de análisis de *Workbench*, que consta de un *Thermal-Electric* y dos *Static Structural* (Figura B.1). es importante mencionar que, se debe seleccionar las unidades correspondientes en el menú superior de la interfaz del *Desig modeler*, previo a iniciar el dibujo en *Geometry*.

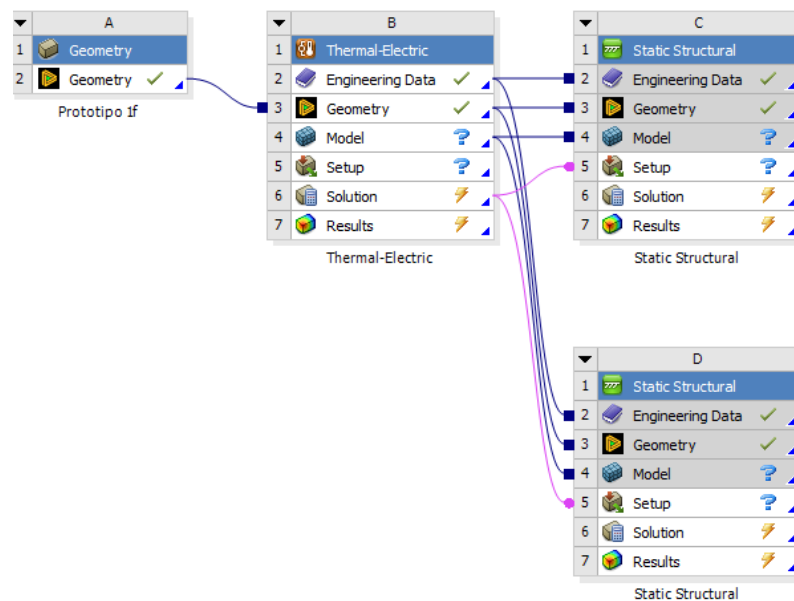


Figura B.1 Árbol de las operaciones de *Workbench*.

Posteriormente se definen las propiedades del material en *Engineering Data* (Figura B.2).

Material Field Variables	Table	
Density	2329	kg m ⁻³
Isotropic Secant Coefficient of Thermal Expansion		
Isotropic Elasticity		
Derive from	Young's Modulus and...	
Young's Modulus	1.301E+11	Pa
Poisson's Ratio	0.33	
Bulk Modulus	1.2755E+11	Pa
Shear Modulus	4.891E+10	Pa
S-N Curve	Tabular	
Isotropic Thermal Conductivity	148	W m ⁻¹ C ⁻¹
Isotropic Resistivity	0.00015	ohm m

Figura B.2 Propiedades del material definidas

Se edita cada elemento que conforma el *model*, donde se asigna el material y se asigna *Mesh* para un mallado predeterminado, en nuestro caso. Posteriormente, se asignan las condiciones de frontera en los apartados de *Steady State Thermal Electric* y *Static Structural*.

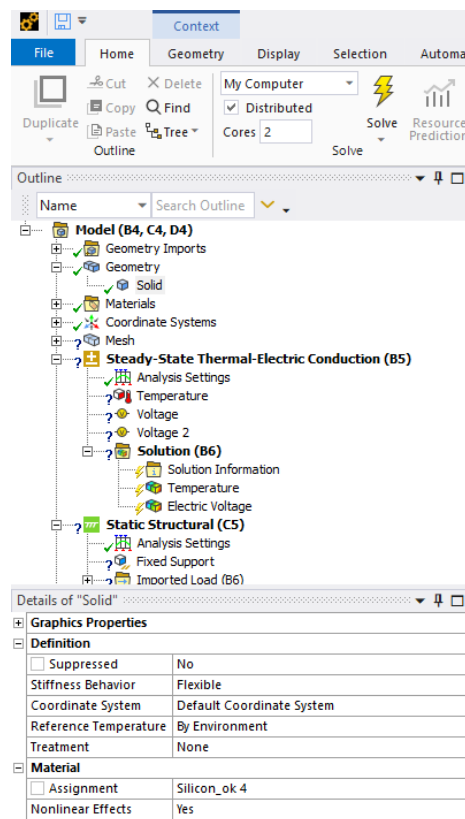


Figura B.3 Asignación del material a la geometría en el análisis mecánico.

Para el análisis de *Thermal-Electric* se asigna temperatura ambiente a una de las anclas y se aplica una diferencia de potencial de 2 V entre

ellas, considerando como tierra a la que le fue asignada temperatura ambiente. En *Solution* se inserta *Temperature* y *Electric Voltage*, para observar la distribución de temperatura y voltaje (figura B.4).

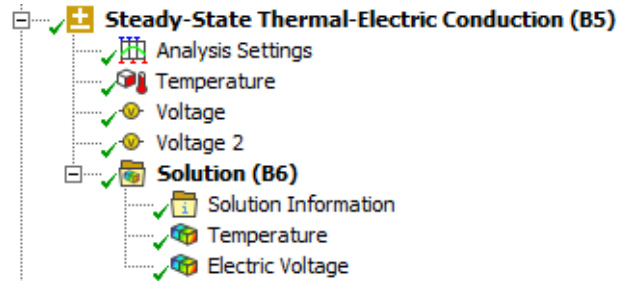


Figura B.4 Configuración del análisis *Thermal-Electric*.

Las distribuciones de temperatura y voltaje se muestran en las figuras B.5 y B.6.

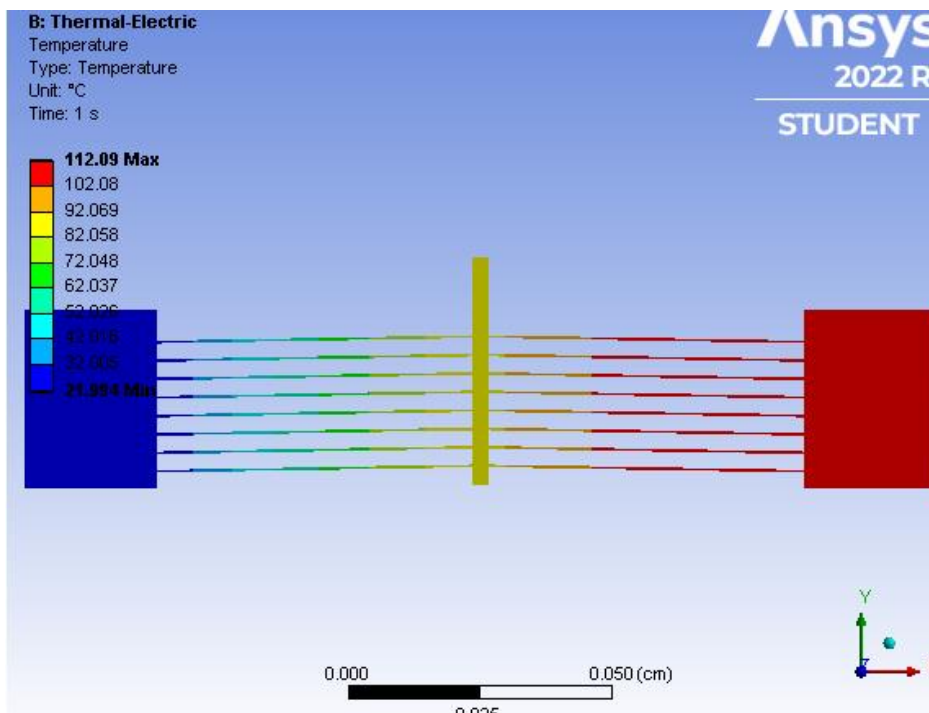


Figura B.5 Distribución de temperatura en el actuador.

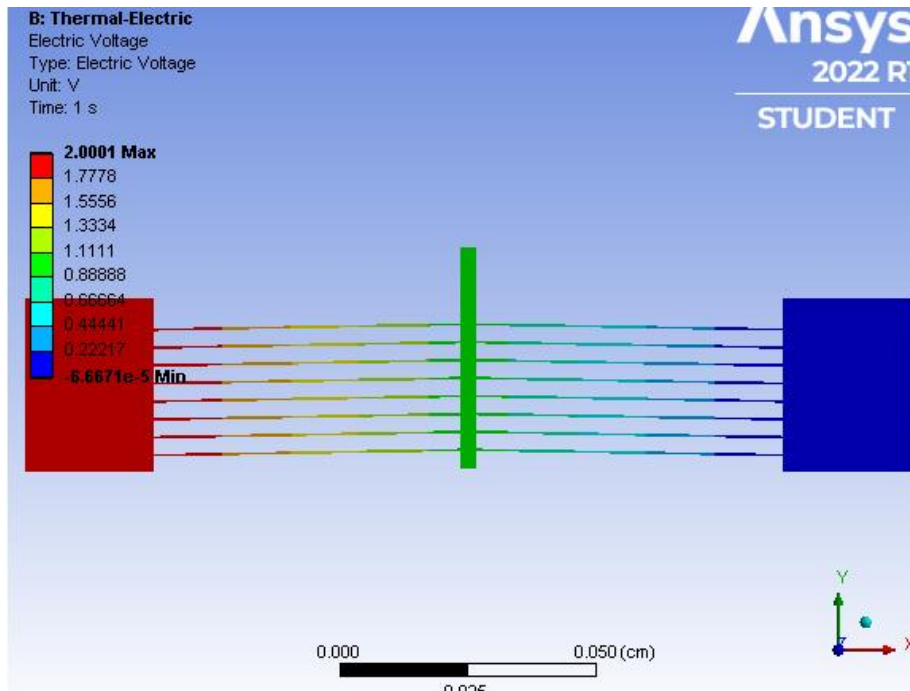


Figura B.6 Distribución de voltaje en el actuador.

Se continúa con el análisis de los *Static Structural*, se fijan las anclas con la herramienta *Fixed Support* y se procede a obtener el desplazamiento total, en el segundo *Static Structural* se fijan las anclas (*Fixed Support*) y la punta de la flecha (*Fixed Support 2*), se obtiene la fuerza a partir de insertar *Force reaction* en el *Fixed Support 2* del segundo *Static Structural*. La configuración de ambos *Static Structural* se muestra en la figura B.7.

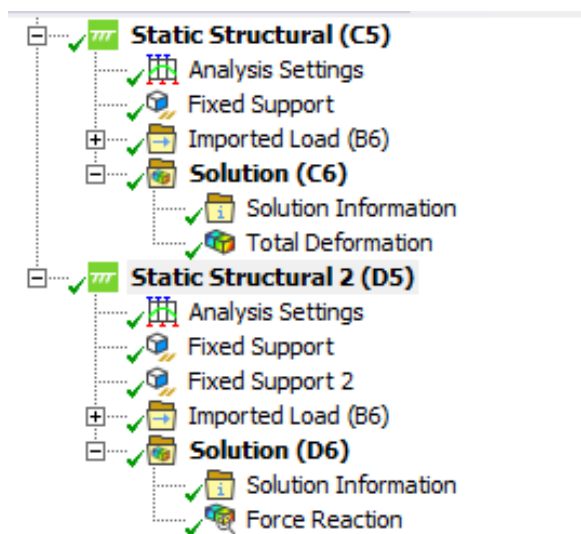


Figura B.7 Configuración de los análisis *Static Structural*.

Resolviendo los *Static Structural* se despliegan las imágenes mostradas en las figuras B.8 y B.9.

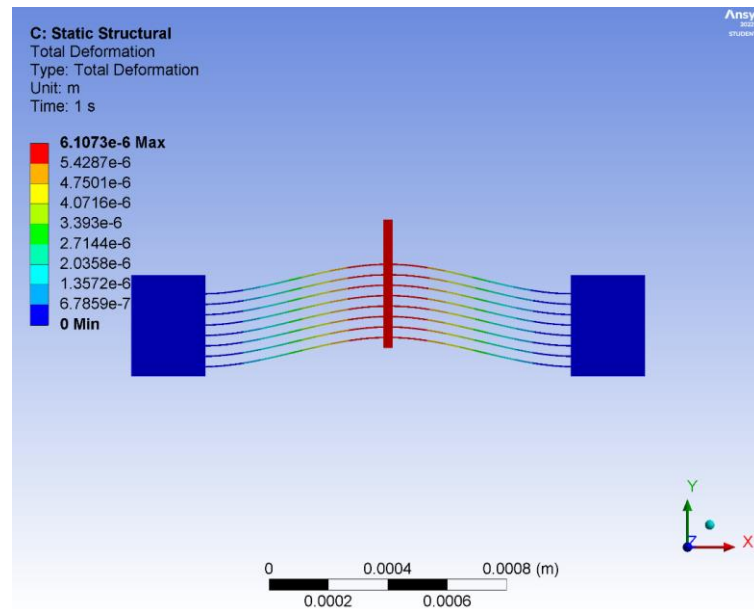


Figura B.8 Deformación total.

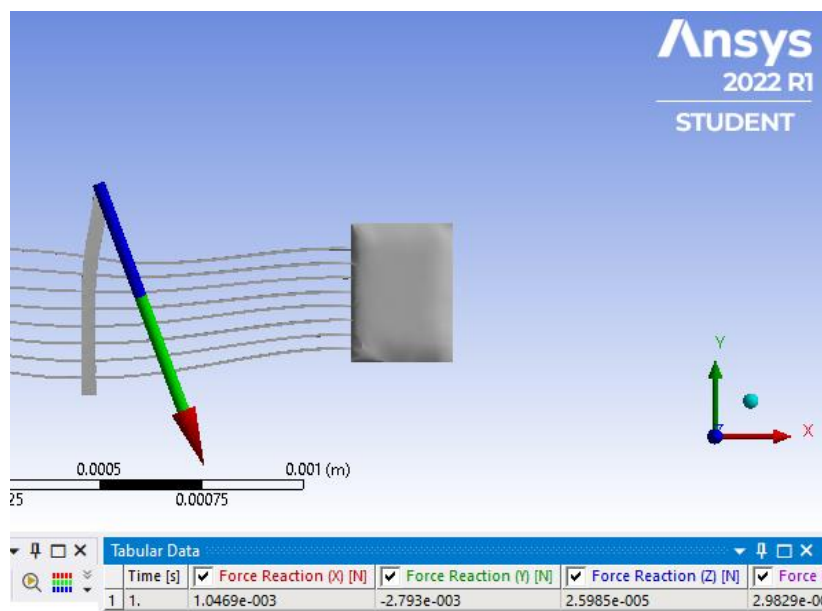


Figura B.9 Fuerza del desplazamiento.

ANEXO C
PARTICIPACIONES EN CONGRESOS
Y TALLERES



ANEXO C. PARTICIPACIONES EN TALLERES Y EN CONGRESOS



SECRETARÍA ACADÉMICA
Dirección de Publicaciones y Divulgación

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

CONSTAR

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

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



Mtra. Ana Silvia Canto Reyes
Directora de Publicaciones y Divulgación

c.i.p – Expediente.

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



Una universidad de excelencia

RECTORÍA
2017-2023



RECONOCIMIENTO

"SOY MUJER Y HAGO CIENCIA"

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

ALÁN JESÚS ESTRADA CABRERA

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

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



SECRETARÍA DE
DESARROLLO ECONÓMICO
Y DEL TRABAJO

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

CCYTEM
CONSEJO DE CIENCIA
Y TECNOLOGÍA DEL
ESTADO DE MORELOS

MUSEO
DE CIENCIAS
DE MORELOS

RECONOCIMIENTO

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

Alán Jesús Estrada Cabrera

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



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



SECRETARÍA DE
DESARROLLO ECONÓMICO
Y DEL TRABAJO

CCYTEM
CONSEJO DE CIENCIA
Y TECNOLOGÍA DEL
ESTADO DE MORELOS

MUSEO
DE CIENCIAS
DE MORELOS





SECRETARÍA DE
DESARROLLO ECONOMICO
Y DEL TRABAJO

CCyTEM
CONSEJO DE CIENCIA
Y TECNOLOGÍA DEL
ESTADO DE MORELOS

MUSEO
DE CIENCIAS
DE MORELOS



RECONOCIMIENTO

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

Ing. Alan Jesús Estrada Cabrera

Por haber impartido el taller "Dispositivos Microelectromecánicos (MEMS) y Dispositivos en meso Escala" en la "Jornada Estatal del Conocimiento" llevada a cabo el 27 de octubre de 2022.

ANDREA ANGÉLICA RAMÍREZ PAULÍN
Directora del Centro de Morelense de
Innovación y Transferencia Tecnológica y
encargada de despacho de la Dirección
General del CCyTEM

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



UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DEL
ESTADO DE MORELOS



DIRECCIÓN
DE CULTURA

LA UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DEL ESTADO DE MORELOS
A TRAVÉS DE LA SECRETARÍA ACADÉMICA
Y LA DIRECCIÓN DE CULTURA

Otorgan la presente constancia a:

Estrada Cabrera Alan Jesús

Por su valiosa participación en el taller de: **Bailes de salón**

a cargo del maestro (a) **Germán Vilchis Ortíz**

Correspondiente al semestre agosto-diciembre 2022
con un valor de 32 horas culturales, impartido de manera presencial.

Arq. Karina Castillo Sigüenza
Directora de Cultura

NOTA: Esta constancia no tiene validez sin sello oficial.

Cuernavaca, Morelos a 5 de diciembre de 2022.

FOLIO: PFA-02689



SECRETARÍA DE
DESARROLLO ECONÓMICO
Y DEL TRABAJO

CCyTEM
CONSEJO DE CIENCIA
Y TECNOLOGÍA DEL
ESTADO DE MORELOS

MUSEO
DE CIENCIAS
DE MORELOS



RECONOCIMIENTO

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

Alan Jesus Estrada Cabrera

Por haber participado el taller "Dispositivos electrónicos y electromecánicos aplicados en la detección, generación y cosecha miento de energía" en el "Día internacional de la mujer y la niña en la ciencia" llevada a cabo el 10 de Febrero de 2023.

ANDREA ANGÉLICA RAMÍREZ PAULÍN
Directora General del Consejo de Ciencia
y Tecnología del Estado de Morelos

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



ANEXO B

BIBLIOGRAFÍA



Referencias

- Aluminum 6053-T6. s. f.
<https://www.matweb.com/search/DataSheet.aspx?MatGUID=779d41ab5fc7444b8b7d965a178a5d81>, consulted 26 July, 2023.
- Băjenescu, T.-M. I. (2010, octubre). Micro-Electro-Mechanical-Systems (MEMS) and Their Reliability. <https://www.proquest.com>. Recuperado 13 de enero de 2023, de <https://www.proquest.com/openview/06d3ba00b334062473b594b91aa041af/1?cbl=406310&pq-origsite=gscholar&parentSessionId=%2BhW08BGZrps4BF4%2FO1W5xheqJ7Bh%2B3kr50wsllhiss%3D>.
- Benyus, J. M. (2002). *Biomimicry: innovation inspired by nature*.
- Benyus, J. M. (2002). *Biomimicry: Innovation Inspired by Nature*. Avon.
- Biomimicry Institute (2023, enero). El proceso de diseño biomimético. <https://biomimicry.org>. Recuperado 31 de enero de 2023, de <https://toolbox.biomimicry.org/es/metodos/el-proceso-biomimetico/>.
- Espinosa, H. D., Zhu, Y., & Moldovan, N. (2007). Design and operation of a MEMS-based material testing system for nanomechanical characterization. *Journal of Microelectromechanical Systems*, 16(5), 1219–1231. <https://doi.org/10.1109/JMEMS.2007.905739>
- Guan, C., & Zhu, Y. (2010). An electrothermal microactuator with Z-shaped beams. *Journal of Micromechanics and Microengineering*, 20(8). <https://doi.org/10.1088/0960-1317/20/8/085014>
- Ho, N. L., Dao, T. P., Le, H. G., & Chau, N. L. (2018). Optimal Design of a Compliant Microgripper for Assemble System of Cell Phone Vibration Motor Using a Hybrid Approach of ANFIS and Jaya. *Arabian Journal for Science and Engineering*, 44(2), 1205-1220. <https://doi.org/10.1007/s13369-018-3445-2>

- ITRS. International Technology Roadmap for Semiconductor: Micro-Electro-Mechanical system (MEMS). 2013 Edition. (16 de julio de 2020). Disponible en: <https://www.semiconductors.org/wp-content/uploads/2018/08/2013mems.pdf>.
- Khare, Pretty, G.B. Madhab, C. S. Kumar, y Prashant Mishra. 2007. «Optimizing Design of Piezoelectric Actuated Compliant Microgripper Mechanism». NaCoMM07, enero. <http://nacomm07.ammindia.org/Contents/papers/NaCoMM-2007-112.pdf>.
- Larabee, F. J., Gronenberg, W., & Suarez, A., V. (2017, 1 septiembre). Performance, morphology and control of power-amplified mandibles in the trap-jaw ant *Myrmoteras* (Hymenoptera: Formicidae). The Company of Biologists. <https://journals.biologists.com/jeb/article/220/17/3062/33705/Performance-morphology-and-control-of-power>
- Leong, T. G., Randall, C. L., Benson, B. L., Bassik, N., Stern, G. A., & Gracias, D. H. (2009b). Tetherless thermobiochemically actuated microgrippers. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 106(3), 703-708. <https://doi.org/10.1073/pnas.0807698106>
- Liang, C., Wang, F., Shi, B., Huo, Z., Zhou, K., Tian, Y., & Zhang, D. (2018). Design and control of a novel asymmetrical piezoelectric actuated microgripper for micromanipulation. *Sensors and Actuators A-physical*, 269, 227-237. <https://doi.org/10.1016/j.sna.2017.11.027>.
- Leong, T. G., Randall, C. L., Benson, B. R., Bassik, N., Stern, G. M., & Gracias, D. H. (2009). Tetherless thermobiochemically actuated microgrippers. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 106(3), 703–708. doi:10.1073/pnas.0807698106
- Madhab, G., Kumar, C. G., & Mishra, P. C. (2010). Modelling and control of a bio-inspired microgripper. *International Journal of Manufacturing*

Technology and Management.
<https://doi.org/10.1504/ijmtm.2010.034294>

Patino, E., & Arbelaez, E. (2009). Generación y transformación de la forma. morfología, geometría, naturaleza (biomimética) y experimentación. © Editorial Universidad Pontificia Bolivariana.

Potrich, C., Lunelli, L., Bagolini, A., Bellutti, P., Pederzoli, C., Verotti, M., & Belfiore, N. (2018). Innovative Silicon Microgrippers for Biomedical Applications: Design, Mechanical Simulation and Evaluation of Protein Fouling. *Actuators*, 7(2), 12.
<https://doi.org/10.3390/act7020012>

Redacción. (2011, August 25). Desarrollan unas micropinzas metálicas inspiradas en las de los cangrejos. *El Médico Interactivo*.
<https://elmedicointeractivo.com/desarrollan-micropinzas-metalicas-inspiradas-cangrejos-20110825211748096168/>

Schenk, Steve C., y Peter C. Wainwright. 2001. «Dimorphism and the functional basis of claw strength in six brachyuran crabs». *Journal of Zoology* 255 (1): 105-19.
<https://doi.org/10.1017/s0952836901001157>.

Swanson, Brook O., Matthew N. George, Stuart P Anderson, y John H. Christy. 2013. «Evolutionary variation in the mechanics of fiddler crab claws». *BMC Evolutionary Biology* 13 (1): 137.
<https://doi.org/10.1186/1471-2148-13-137>.

Tecpoyotl Torres, M., Cabello Ruiz, R., & Vera Dimas, J. G. (2015). Design and simulation of an optimized electrothermal microactuator with Z-shaped beams. *Acta Universitaria*, 25(3), 19–24.
<https://doi.org/10.15174/au.2015.774>

Tecpoyotl Torres, M., Pedro Vargas Chablé, Jorge Varona Salazar, José Mireles Jr. García, Rafael Vargas Bernal, Pedro Javier García Ramírez, Agustín Leobardo Herrera May & Ernesto Alberto Elvira Hernández. (2023). INTRODUCCIÓN AL ANÁLISIS Y DISEÑO DE MEMS. Universidad autónoma del estado de Morelos.

- The Biomimicry Institute — nature-inspired innovation. (2022, agosto 15). Biomimicry Institute. <https://biomimicry.org/>
- Törnqvist, L., Vartia, P., & Vartia, Y. O. (1985). How should relative changes be measured? *American Statistician*, 39(1), 43–46. <https://doi.org/10.1080/00031305.1985.10479385>
- Yoon, C. (2019). Advances in biomimetic stimuli responsive soft grippers. *Nano Convergence*, 6(1). <https://doi.org/10.1186/s40580-019-0191-4>
- Zhang, Wei, Zike He, Yu Sun, Jianing Wu, y Zhigang Wu. 2020. «A mathematical modeling method elucidating the integrated gripping performance of ant mandibles and bio-inspired grippers». *Journal of Bionic Engineering* 17 (4): 732-46. <https://doi.org/10.1007/s42235-020-0065-9>.
- Kim, Keekyoung, Xinyu Liu, Yong Zhang, y Yu Sun. 2008. «NanoNewton force-controlled manipulation of biological cells using a monolithic MEMS microgripper with two-axis force feedback». *Journal of Micromechanics and Microengineering* 18 (5): 055013. <https://doi.org/10.1088/0960-1317/18/5/055013>.
- Zhang, Ran, Jinkui Chu, Haixiang Wang, y Zhaopeng Chen. 2012. «A multipurpose electrothermal microgripper for biological micro-manipulation». *Microsystem Technologies-micro-and Nanosystems-information Storage and Processing Systems* 19 (1): 89-97. <https://doi.org/10.1007/s00542-012-1567-0>.

Cuernavaca, Morelos, 25 de septiembre de 2023.

DR. JUAN CARLOS GARCÍA CASTREJÓN
COORDINADOR DEL POSGRADO
EN INGENIERÍA Y CIENCIAS APLICADAS
P R E S E N T E

Atendiendo a la solicitud para emitir DICTAMEN sobre la revisión de la TESIS titulada: Diseño y caracterización de una micropinza basada en bioinspiración, que presenta el alumno **Alan Jesús Estrada Cabrera**, para obtener el título de **Maestría en Ingeniería y Ciencias Aplicadas**.

Nos permitimos informarle que nuestro voto es **APROBATORIO**.

Atentamente
Por una humanidad culta
Una universidad de excelencia

DR. JOSÉ ALFREDO RODRÍGUEZ RAMÍREZ

DR. JOSÉ ANTONIO MARBÁN SALGADO

DR. RAMÓN CABELLO RUÍZ

DR. PEDRO VARGAS CHABLÉ

DRA. MARGARITA TECPOYOTL TORRES

Se adiciona efirma UAEM



UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DEL
ESTADO DE MORELOS

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

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

Sello electrónico

PEDRO VARGAS CHABLE | Fecha:2023-09-26 01:49:59 | Firmante

SGESUnitXYFMLDb9IKLOCDxov79fc6bM0uYBVsu+n43EvqlnaGScaCQEGjs5poVxpaDiWHk829OQkXIU8c5EvtQ4fOd3++blQ8WG2iPnAe7op9d0HCWzc7HSzS9/XCqJ/thHjrBtyvr62ZQQPMAA8DfDEh9RTnFlh3ng+CMbdVweNXATJTsWDVf/0fdU5tCs4/pE/HZPIUw0YhEJEChwsFtan/wUAGeuT5D5QvqQsXidf8yDLiYeeb0ZuSAApXUfoFlrv47o0SDJWJy42V8Pnt0PkwlCCmG0zYcQtpPZpLiZ4sDWcW1/xZIFJ/BReu/LpHn7kRaUc6aLhHUFg==

JOSE ALFREDO RODRIGUEZ RAMIREZ | Fecha:2023-09-26 08:27:09 | Firmante

k+3F2ut5vFQ85O1JskvpzfKW3zdl+T0xAGfxrWudZxd4vxx/xybVfzklfBoun2YTxB591ybZCpKpEP2te9MXDDHns4eoY9PHMs2LDRSEKv7AIDYItkqEtL0KE5nQQycVo0sGk3qa8/HAFEFfE4IEF3LMAM3H+LqMIBfKJZ9WjAWzraR6KVSNLtrd75VvxREPF1kYH66Dzg0xkEkxxFryfBY8AdPt2ZfqqGd4/cxdwacPWE3G23U+9gcjMW8X/QrcFJ6JhKvKjKmj5IKeZHNnyKW1kGF5lqNFQjTgyHS20VfeUn3YF0+63I7BVxnlQAWx85kTDQWws4uLqVv7O/8g==

RAMON CABELLO RUIZ | Fecha:2023-09-26 09:34:19 | Firmante

eGZxXNbalw69URLHLJ9Khrqa0/6D0CMRP4ilsXLZmYTXhJ6A0SDfM2QjNSeH8bUVXfPxBTUEgVCpK7Dlv+winR5N4UQW/saqellzSRQCLkyzJ+/LzCsN6BqpCrY60Ncb0YIcMXANJPTuNs+JjcOAdvipdoBXYmSXvpctKiZd7Pt8agJc0qaliz6aj7uvT3h+NF4HRJgrgYPIy59eyLZiWmKID7nOqfGrsRrNHHTkmscgXsNif02UDW2m/XJH9w66X3FBq6Aek7rFGb3pREgVtg+CXskWTSpu8nv+1pWeDA66arUY3K9cZtK6kBSQNR5filGe2dT9iS4hPasbF2Eg==

MARGARITA TECPOYOTL TORRES | Fecha:2023-09-30 14:57:30 | Firmante

YVeaN7M1dnoA3Zf5ERqm0+jXz119kvcJc7Rj6+oLqHYi/0/eS6tstGhONCpStnhSIYbA/sTLGF3QSL/CFBEBMIJ7qp/eGUU8Y63EQplw1XUFMRGyix+OGRODIMC7gz8nAGu0oBUF5BXFjiiMgxK5ZyaWpPok9qBPt6eGI7BHzmDpG97Pt8OouQk7UUF9kfSEnzK6CFeuBv1rblyJScPMJIU+aXN++LeC8fPGHsouTnDitLq4lc7aNo5H36axAHKzm+1tyB4o1Ser3MqilKLz6UuoES2aw8E2ftpYgNQXbZ0X6127UYq+kBuQPknang66Rxo4+uinkm68L0xS1kXg==

JOSE ANTONIO MARBAN SALGADO | Fecha:2023-10-02 12:34:15 | Firmante

B4s/zRw61Sifroz+2PSVLpuGRYlhw27Pqpkn+HSBu5W61EXBSqw92eWgQiGd0smdWG/kfAfKQA0uL+BGBV22CcSrOY+vS7Ji54OfINm3DYG9mUBiH2O1pKYPyZUELvCk4OPjVo7Hq7zW3AQYU/NfWOWbEY e6PMBbYHEZFvXN6DyxRxb0QvYfXIEoH39D8IGh4yPbbYKhh0FDmgDcSLgk1KAEP7tfwFt/1ZXJqQTPxb1QjXxc6iil4ItNZjsduVRk3G5uVarOsyqzPslvIBQaWaWC1M7cAHWPndJFOMT795x+GbofHalawGzIINGto/AkkDxAhYPqMhLubRuRYnw==

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



ijQzpJTOD

<https://efirma.uaem.mx/noRepudio/7aoOcFtFHaWQYUijgu3hzXV3t6BqCqj>

