



UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DEL ESTADO DE MORELOS

INSTITUTO DE INVESTIGACIÓN EN CIENCIAS BÁSICAS Y APLICADAS

CENTRO DE INVESTIGACIÓN EN INGENIERÍA Y CIENCIAS APLICADAS

**DISEÑO Y CARACTERIZACIÓN DE UNA MICROPINZA
DE BAJO COSTO, BASADA EN UN ARREGLO DE
ACTUADORES PIEZOELÉCTRICOS**

**TESIS PARA OBTENER EL GRADO DE:
MAESTRÍA EN INGENIERÍA Y CIENCIAS APLICADAS**

PRESENTA:

ING. CARLOS ANDRÉS FERRARA BELLO

ASESORA:

Dra. Margarita Tecpoyotl Torres

SINODALES:

Dra. Svitlana Koshova

Dr. José Alfredo Rodríguez Ramírez

Dr. J Jesús Escobedo Alatorre

Dr. Ramón Cabello Ruíz

Dra. Margarita Tecpoyotl Torres

CUERNAVACA, MORELOS

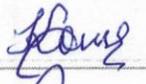
NOVIEMBRE, 2019

Cuernavaca, Morelos, a 08 de noviembre de 2019.

DR. ROSENBERG JAVIER ROMERO DOMÍNGUEZ
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 DE BAJO COSTO, BASADA EN UN ARREGLO DE ACTUADORES PIEZOELECTRÍCOS" que presenta el alumno **CARLOS ANDRÉS FERRARA BELLO**, para obtener el título de **MAESTRÍA EN INGENIERÍA Y CIENCIAS APLICADAS**.

Nos permitimos informarle que nuestro voto es:

NOMBRE	DICTAMEN	FIRMA
DR. J JESÚS ESCOBEDO ALATORRE	Aprobado	
DR. JOSÉ ALFREDO RODRÍGUEZ RAMÍREZ	Aprobado	
DRA. SVITLANA KOSHOVA	Aprobado	
DR. RAMÓN CABELLO RUÍZ (UTEZ)	Aprobado	
DRA. MARGARITA TECPOYOTL TORRES	Aprobado	

PLAZO PARA LA REVISIÓN 20 DÍAS HÁBILES (A PARTIR DE LA FECHA DE RECEPCIÓN DEL DOCUMENTO)

NOTA. POR CUESTION DE REGLAMENTACIÓN LE SOLICITAMOS NO EXCEDER EL PLAZO SEÑALADO, DE LO CONTRARIO LE AGRADECEMOS SU ATENCIÓN Y NUESTRA INVITACIÓN SERÁ CANCELADA.

RJRD*RSU/nmc

Av. Universidad 1001 Col. Chamilpa, Cuernavaca Morelos, México, 62209
 Tel. (777) 329 70 00, ext. 6208 / raquel.sotelo@uaem.mx

RESUMEN

Esta tesis presenta el diseño e implementación de una micropinza normalmente abierta, accionada por un arreglo de actuadores piezoeléctricos. Para reducir los costos de fabricación, se utilizan zumbadores piezoeléctricos convencionales que se encuentran fácilmente en el mercado a un costo muy bajo.

Se eligió para la fabricación de la micropinza al ácido poliláctico (PLA, por sus siglas en inglés), como material estructural. La elección de este material reduce considerablemente el costo total de implementación. Al utilizar las puntas metálicas se elimina el inconveniente generado por los defectos inherentes a la tecnología de fabricación FDM.

Se diseñó al arreglo experimental de pruebas de la micropinza. Este arreglo consta básicamente de los bloques de medición y control. La medición en escala micrométrica de forma óptica, no contactiva e invasiva, es compleja, debido que se tiene la restricción de bajo costo. La solución a esto fue el uso de un cabezal lector de unidades de CD ROM conocido como Pick-Up. El rango de medición es de 0 a 650 μm , con una resolución de 0.1 μm . Mientras que, con relación a la etapa de control, uno de los obstáculos mayores fue hallar componentes de bajo costo, que satisficieran las necesidades requeridas por el sistema, tal como alta resolución en la conversión análoga a digital, alta velocidad de operación, múltiples puertos de comunicación serial, entre otros. No obstante, se concluyó esta etapa satisfactoriamente utilizando dispositivos de bajo costo.

La originalidad de este trabajo reside en el material utilizado para la fabricación de la micropinza, así como en diseño del actuador piezoeléctrico apilado y su uso.

La contribución principal es la demostración de una metodología de diseño que implementa mecanismos flexibles de prototipos a escala

milimétrica para fines de validación, antes de proceder a la fabricación en escala micrométrica.

El sistema en escala milimétrica se puede usar para micromanipulación debido al rango máximo de apertura de las mandíbulas, 365 μm , con una fuerza máxima de 8.841 mN. Cabe señalar que, su agarre puede mantenerse durante el lapso que sea necesario. ANSYS [™] se utilizó como herramienta de software para diseño y simulación.

ABSTRACT

This thesis presents the design and implementation of a microgripper device, normally open, actuated by a piezoelectric stack. In order to reduce fabrication costs, conventional piezoelectric buzzers are used that are easily found in the market at very low cost.

Polylactic Acid (PLA) was chosen as the structural material for the design of the mechanisms of the microgripper. The choice of this material considerably reduces the total implementation cost. Metallic tips were added to the jaws, reducing the inherent defects of the 3D fabrication.

The experimental set-up was designed for the microgripper performance tests. This arrange has basically two blocks: measurement and control. The first one is performed using low cost optical device CD ROM pick-up, with a measurement range from 0 up to 650 μm , with a resolution of 0.1 μm .

A big outcome in the control stage was again to find low cost components, which satisfy the established requirements, such as: high resolution in the Analog to Digital Conversion (ADC), high operation velocity, several serial ports of communication, etc. All devices were found and successfully implemented.

The originality of this work resides in the material used, as well as the design of the stacked piezoelectric actuator and its application.

The main contribution is the demonstration of a design methodology that implements prototype compliance mechanisms at millimeter scale for validation purposes before proceeding to the fabrication in micrometric scale.

The system in mm scale can also be used for micromanipulation due to the range of its microgripper jaws' aperture, with a maximum value of 365 μm . The maximum applied force is of 8.841 mN. It is necessary to mention, the object could be hold during the required periods of time. ANSYS™ was used as the software tool for design and simulation.

Agradecimientos

Manifiesto mi más sincero agradecimiento al Centro de Investigación en Ingeniería y Ciencias Aplicadas (CIICAp) y a la Universidad Autónoma del Estado de Morelos (UAEM) por permitirme realizar mi formación académica en sus instalaciones.

Agradezco al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (CONACyT) por la beca otorgada.

Agradezco a los miembros comité tutorial por sus correcciones y recomendaciones emitidas para lograr este trabajo de tesis.

Miembros del Comité tutorial:

Dra. Margarita Tecpoyotl Torres

Dr. J Jesús Escobedo Alatorre

Dra. Svitlana Koshova

Dr. José Alfredo Rodríguez Ramírez

Dr. Ramón Cabello Ruíz

Expreso también, mi más sincero agradecimiento a la Dra. Margarita Tecpoyotl Torres por su continuo apoyo, su paciencia al compartirme su conocimiento y sus consejos que me motivaron a cumplir mis metas.

Dedicatoria

A mis padres Edith Bello Diaz y René Sergio Ferrara Rojas, sin su apoyo incondicional no hubiera podido llegar a esta etapa de mi vida.

Contenido

RESUMEN	I
ABSTRACT	III
Agradecimientos	IV
Dedicatoria.....	V
Contenido.....	VI
Lista de tablas	IX
Lista de figuras	XI
1. Introducción	1
1.1. Antecedentes.....	2
1.2. Planteamiento del problema	6
1.3. Justificación	7
1.4. Hipótesis	8
1.5. Objetivo general.....	9
1.6. Objetivos específicos	9
1.7. Alcance	9
1.8. Limitaciones.....	10
1.9. Organización de la tesis.....	10
2. Marco teórico.....	13
2.1 Sistemas Microelectromecánicos (MEMS)	13
2.1.1 Tecnologías de fabricación.....	14
2.1.2 Actuadores básicos	15
2.1.3 Micromanipuladores	17
2.2 Mecanismos flexibles.....	20
2.2.1 Conceptos básicos para crear flexibilidad	21
2.2.2 Ventajas y desventajas de las uniones flexibles.....	26
2.2.3 Tipo de uniones flexibles	28
2.3 Actuadores piezoeléctricos.....	30

2.3.1 Efecto piezoeléctrico	30
2.3.2 Estructura del PZT.....	31
2.3.3 Ecuaciones constitutivas de los piezoeléctricos	33
2.3.4 Fuerza y desplazamiento de los actuadores piezoeléctricos.....	35
3. Desarrollo teórico y experimental	38
3.1 Metodología.....	38
3.2 Arreglo experimental.....	40
3.3 Controlador del actuador piezoeléctrico	42
3.4 Actuador piezoeléctrico	44
3.5 Plataforma de desplazamiento	47
3.6 Sensor óptico de desplazamiento.....	49
3.7 Diseño de la micropinza	55
4. Resultados y discusión.....	61
4.1 Desplazamiento del actuador piezoeléctrico	61
4.1.1 Método manual de medición	61
4.1.2 Método de medición de desplazamiento con el sensor óptico	64
4.2 Fuerza del actuador piezoeléctrico	67
4.2.1. Modelado del resorte.....	68
4.2.2. Determinación de la fuerza del actuador	73
4.3 Simulación de la micropinza en ANSYS™	75
4.4 Determinación de los desplazamientos de entrada y salida de la micropinza	79
4.4.1. Desplazamiento de entrada de la micropinza.....	80
4.4.2. Desplazamiento de salida de la micropinza (mandíbulas).....	82
4.5 Prueba de sujeción de objetos micrométricos	85
4.6 Cálculo de fuerza en las mandíbulas de la micropinza	87
4.7 Discusión de resultados.....	89
4.7.1. Desempeño del actuador piezoeléctrico.....	89
4.7.2. Desempeño de la micropinza	92
5. Conclusiones y trabajo futuro	97
5.1 Conclusiones	97

5.2 Trabajo futuro	99
Bibliografía.....	101
ANEXO A.....	107
Artículo aceptado en: International Conference on Mechatronics, Electronics and Automation Engineering, ICMEAE 2019.	107
ANEXO B.....	108
Código de programación del sensor de desplazamiento lineal.....	108
ANEXO C.....	112
Circuito electrónico del sensor de desplazamiento lineal	112
ANEXO D.....	113
Constancias recibidas por divulgación de la ciencia.....	113

Lista de tablas

Tabla 1.1 A novel flexure-based microgripper with double amplification mechanisms for micro/nano manipulation (Sun, et al., 2013).	3
Tabla 1.2 A novel piezo-driven microgripper with a large jaw displacement (Sun, et al., 2015).	3
Tabla 1.3 Design and control of a novel asymmetrical piezoelectric actuated microgripper for micromanipulation (Liang, et al., 2018).	4
Tabla 1.4 Design of a Piezoelectric-Actuated Microgripper With a Three-Stage Flexure-Based Amplification (Wang, Liang, Tian, Zhao, & Zhang, 2015).	4
Tabla 1.5 A new piezo-driven microgripper based on the double-rocker mechanism (Yang, et al., 2015).	5
Tabla 2.1. Características de actuadores más comunes. (Ghosh & Corves, 2015).....	17
Tabla 2.2 Rigidez y estrés desarrollado para diferentes geometrías con adelgazamiento (Ghosh & Corves, 2015).	29
Tabla 2.3 Correlación entre los índices de la matriz y los índices dobles del tensor. (Ballas, 2007).	33
Tabla 3.1 Especificaciones plataforma de desplazamiento. (AliExpress, Industrial Precision Mechanism Store, s.f.).....	48
Tabla 4.1 Cambio de longitud del resorte de compresión, sometido a dos masas. Los valores resaltados son los valores más altos y bajos, por lo cual no se consideraron en el cálculo del promedio.	71
Tabla 4.2 Cálculo teórico de la constante de proporcionalidad de resorte, k.	72
Tabla 4.3 Cálculo teórico del valor de Δl para confirmar la constante de proporcionalidad de resorte, k.....	72
Tabla 4.4 Comparación entre el cálculo teórico y el cálculo experimental de Δl	72
Tabla 4.5 Parámetros del PLA.	76
Tabla 4.6 Parámetros de la micropinza, obtenidos de la simulación.	76

Tabla 4.7. Comparación entre los desplazamientos en las mandíbulas.	85
Tabla 4.8. Peso del objeto sujetado por la micropinza y fuerza ejercida por las mandíbulas de la micropinza.....	89
Tabla 4.9 Comparación entre diferentes modelos de actuadores piezoeléctricos comerciales y el actuador piezoeléctrico que implementamos. (THORLABS, Piezoelectric Actuators, s.f.).....	91
Tabla 4.10 Comparación de los resultados obtenidos de forma experimental y simulado.....	93
Tabla 4.11 Comparación de diferentes micropinzas reportadas en la literatura.....	95

Lista de figuras

Figura 2.1. Proceso fotolitográfico empleado en la fabricación de los circuitos integrados y en los MEMS. Adaptada de (A. KUBBY, 2011).	14
Figura 2.2. Clasificación de los microactuadores más comunes. (Ghosh & Corves, 2015).	16
Figura 2.3. Comparación de dos pinzas que cierran para agarrar un objeto. (a) Con movimiento rotacional y (b) con movimiento paralelo. Adaptada de (Nikoobin & Niaki, 2012).	19
Figura 2.4 (a) Mecanismo de cuerpo rígido que emplea rodamientos para transmitir movimiento, representados como círculos en la imagen. (b) Mecanismo flexible con adelgazamientos que hacen la función de un rodamiento convencional. Las líneas punteadas representan la deformación del mecanismo. Adaptada de (Xianmin & Benliang, 2018).	21
Figura 2.5 Tres varillas de diferente material, pero con la misma geometría experimentan diferente estiramiento con el mismo peso tirando de ellas. (L. Howell, P. Magleby, & M. Olsen, 2013).	23
Figura 2.6 Viga sosteniendo un peso constante en dos escenarios. Orientada con el lado más largo en posición vertical (a) y posición horizontal (b). Adaptada de (L. Howell, P. Magleby, & M. Olsen, 2013).	24
Figura 2.7 Tres barras de acero con la misma geometría y sosteniendo el mismo peso en diferente posición y diferentes condiciones de frontera. (L. Howell, P. Magleby, & M. Olsen, 2013).....	26
Figura 2.8 Ejemplo de unión flexible tipo circular que rota en un eje. Elaboración propia.	26
Figura 2.9 Celda unitaria del PZT. (a) Con estructura tipo Perovskita por arriba de la temperatura de Curie. (b) Distorsión a una celda unitaria tipo tetragonal por debajo de la temperatura de Curie. Adaptada de (Ballas, 2007).	32
Figura 2.10 Elemento individual de un actuador piezoeléctrico tipo pila. (Chaillet & Régnier, 2010).....	35
Figura 2.11. Ejemplo de la gráfica de trabajo de un actuador piezoeléctrico. (THORLABS, Piezoelectric Tutorial, s.f.).	36
Figura 3.1 Montaje experimental para caracterizar la micropinza. Elaboración propia.....	41

Figura 3.2 Diagrama eléctrico del controlador del actuador piezoeléctrico. Elaboración propia.	44
Figura 3.3 Piezoeléctrico de propósito general, popularmente llamado “Buzzer”. (MicroOhmElectronics, s.f.).	45
Figura 3.4 Vista longitudinal del piezoeléctrico cuando se somete a una diferencia de potencial. Elaboración propia.	45
Figura 3.5 (a) Dimensiones de los piezoeléctricos empleados. (b) Arreglo de cuatro piezoeléctricos apilados, para un mayor alargamiento. Elaboración propia.....	47
Figura 3.6. Plataforma de desplazamiento micrométrico. (AliExpress, Industrial Precision Mechanism Store, s.f.).....	48
Figura 3.7 Estructura básica de una unidad lectora de CD, Pickup. Modificada de (Hwu & Boisen, 2018).....	51
Figura 3.8 Comportamiento de la señal de error de enfoque conforme varía la distancia de la superficie a enfocar. A cada sección dividida de la señal le corresponde una forma de luz que es proyectada sobre el arreglo de fotodiodos. Modificada de (Hwu & Boisen, 2018).	53
Figura 3.9 Pickup modelo SF-P151 utilizado como sensor de desplazamiento lineal. (AliExpress, Optical pick-up Store, s.f.).	54
Figura 3.10 Componentes que integran al sensor de desplazamiento lineal implementado. Elaboración propia.	54
Figura 3.11 (a) Diagrama esquemático de la micropinza basada en mecanismos flexibles. Las dimensiones están en milímetros. (b) Diagrama esquemático de la descripción funcional. Elaboración propia.....	56
Figura 4.1 Arreglo experimental empleado para registrar el desplazamiento del actuador piezoeléctrico, por el método manual. Elaboración propia.....	62
Figura 4.2 (a) Posición de referencia de la aguja, con una tensión de alimentación de 0 V. (b) Desplazamiento máximo generado por los piezoeléctricos a 150 V. La distancia de cada franja negra es de 100 μm . Elaboración propia.....	63
Figura 4.3. Desplazamiento sin carga del actuador piezoeléctrico sometido a diferentes niveles de tensión eléctrica en el rango de 0 V a 150 V. Procedimiento manual. Elaboración propia.....	63

Figura 4.4 Arreglo experimental para registrar el desplazamiento del actuador piezoeléctrico, utilizando el sensor de desplazamiento implementado. Elaboración propia.	64
Figura 4.5. Desplazamiento sin carga del actuador piezoeléctrico sometido a diferentes niveles de tensión eléctrica en el rango de 0 V a 150 V. Procedimiento con el sensor óptico. Elaboración propia.....	65
Figura 4.6 Comparación de los datos obtenidos por el método manual y utilizando el sensor óptico en el rango de 0 V a 150 V. Elaboración propia.	66
Figura 4.7. Error de desplazamiento que presenta el actuador piezoeléctrico.	67
Figura 4.8 Arreglo experimental montado para calcular la constante elástica k del resorte.....	69
Figura 4.9 Diferentes objetos utilizados para calcular la constante de proporcionalidad del resorte. (a) Tuerca de hierro de 40.4387 gr y (b) rotor de un motor brushless con una mordaza con masa total de 77.3620 gr. Elaboración propia.	70
Figura 4.10 Arreglo experimental utilizado para medir la fuerza de bloqueo del actuador piezoeléctrico. Elaboración propia.	73
Figura 4.11 Gráfica de trabajo del actuador piezoeléctrico desarrollado. Elaboración propia.	75
Figura 4.12. (a) Comportamiento de la deformación en las partes flexibles de la pinza. (b) Distribución de la tensión mecánica en la pinza. Elaboración propia.....	78
Figura 4.13 Implementación física del arreglo experimental para medir el desplazamiento de las mandíbulas de la micropinza. Elaboración propia. ...	80
Figura 4.14 Medición del desplazamiento en la entrada de la micropinza. Elaboración propia.	81
Figura 4.15 Desplazamiento del mecanismo flexible tipo puente generado por el actuador piezoeléctrico en la entrada.	82
Figura 4.16 Acercamiento de sistema de medición de desplazamiento en las mandíbulas de la micropinza. Elaboración propia.....	83
Figura 4.17 Desplazamiento de la mandíbula derecha de la micropinza. Elaboración propia.	84

Figura 4.18 Desplazamiento de la mandíbula izquierda de la pinza. Elaboración propia.	84
Figura 4.19 Comparación del error de desplazamiento entre la mandíbula izquierda y derecha de la micropinza.	85
Figura 4.20 Operación de la micropinza sosteniendo diferentes muestras: (a) cabello de 20 μm de espesor, (b) cabello de 70 μm de espesor, (c) alambre de cobre de 130 μm de espesor y (d) un grano de azúcar. Elaboración propia.	86
Figura 4.21 Micropinza sujetando una tuerca para estimar la fuerza de salida presente en las mandíbulas. Elaboración propia.	88
Figura A1.1 Circuito electrónico diseñado e implementado para el sensor de desplazamiento lineal. Elaboración propia.	112

INTRODUCCIÓN

A continuación, se presentan los argumentos que dar origen a la realización de esta tesis. Se comienza con los antecedentes sobre los diferentes diseños de micropinzas que se han reportado en la literatura reciente, en seguida se expone el problema en el contexto del tema y se procede a plantear los temas necesarios para la realización de esta tesis.

1.1. Antecedentes

Los sistemas microelectromecánicos (MEMS) son mecanismos que pueden funcionar como actuadores o sensores, sus dimensiones rondan desde 1 μm hasta 1 mm. A pesar de su tamaño, sus partes pueden llegar a ser muy resistentes; por esta razón los MEMS son ideales para ser usados en tareas rigurosas, por ejemplo, los acelerómetros son sensores que usan esta tecnología para detectar la colisión de un automóvil y activar las bolsas de aire. Actualmente, los MEMS tienen aplicaciones en diferentes áreas como son: la biomedicina, la óptica, la biología, la robótica, entre otras (Yang, Wang, Dai, & Liu, 2015), (YU, et al., 2011), (Mansoor, Bhatti, Bhatti, & Dildar Ali, 2018).

Entre los dispositivos MEMS, se encuentran las micropinzas, las cuales tienen gran potencial, ya sea en el sector médico o en los procesos de producción en donde la precisión es fundamental (Nachippan, Venkatesh, & Muniyappan, 2018). Una micropinza está compuesta por un mecanismo actuador que se encarga de generar el movimiento necesario para su funcionamiento. Su propósito es manipular objetos frágiles de escala micrométrica, que pueden ser: células vivas, partes micromecánicas, tejido orgánico, etc. (Potrich, et al., 2018). Existen varios tipos de actuadores que pueden utilizarse para diseñar una micropinza, cada uno de ellos tiene diferente desempeño a parámetros como la fuerza de salida, precisión de desplazamiento, velocidad de respuesta, consumo de energía, etc. (Jia & Xu, 2013). La elección del tipo de actuador depende de la aplicación que se le dará a la micropinza.

En la literatura reciente, podemos encontrar diversos diseños de micropinzas que se han desarrollado empleando diferentes tecnologías y con una variedad de actuadores. A continuación, presentamos algunas micropinzas de dimensiones milimétricas y que emplean actuadores piezoeléctricos.

Tabla 1.1 A novel flexure-based microgripper with double amplification mechanisms for micro/nano manipulation (Sun, et al., 2013).

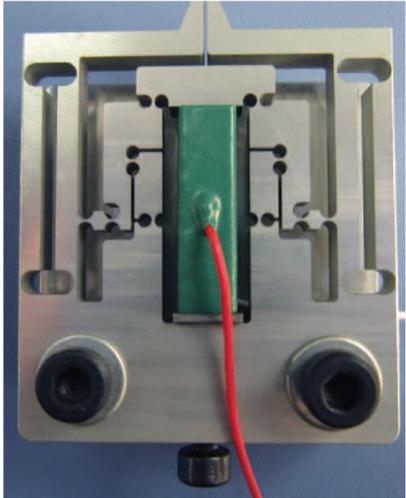
Material	Aluminio AL7075T651	
Proceso de fabricación	Maquinado por descarga eléctrica con alambre (WEDM)	
Apertura	134 μm	
Dimensiones	25 X 20 mm	
Fuerza	850 N	
Operación	2467.5 Hz, 0-100 V	
Actuador	Piezoeléctrico modelo AE0505D16F de Thorlabs	

Tabla 1.2 A novel piezo-driven microgripper with a large jaw displacement (Sun, et al., 2015).

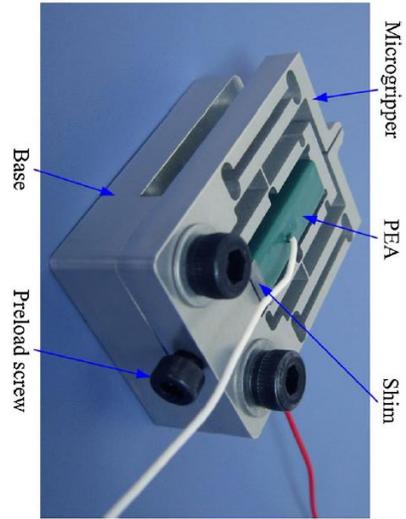
Material	Aluminio AL7075T651	
Proceso de fabricación	Maquinado por descarga eléctrica con alambre (WEDM)	
Apertura	150.8 μm	
Dimensiones	30 X 25 mm	
Fuerza	1.87 N	
Operación	2467.5 Hz, 0-100 V	
Actuador	Piezoeléctrico modelo: AE0505D16F de Thorlabs	

Tabla 1.3 Design and control of a novel asymmetrical piezoelectric actuated microgripper for micromanipulation (Liang, et al., 2018).

Material	Aluminio AL7075T651	
Proceso de fabricación	Maquinado por descarga eléctrica con alambre (WEDM)	
Apertura	≈121 μm	
Dimensiones	≈ 40 x 20 μm	
Fuerza	50 mN	
Operación	531 Hz,	
Actuador	Piezoeléctrico PZT	

Tabla 1.4 Design of a Piezoelectric-Actuated Microgripper With a Three-Stage Flexure-Based Amplification (Wang, Liang, Tian, Zhao, & Zhang, 2015).

Material	Aluminio AL7075T651	
Proceso de fabricación	Maquinado por descarga eléctrica con alambre (WEDM)	
Apertura	≈190 μm	
Dimensiones	≈ 50 x 30 μm	
Fuerza	1000 mN	
Operación	953 Hz, 0-100V	
Actuador	Piezoeléctrico PZT modelo: XP 5 x 5/18,	

Tabla 1.5 A new piezo-driven microgripper based on the double-rocker mechanism (Yang, et al., 2015).

Material	Aluminio AL7075	
Proceso de fabricación	Maquinado por descarga eléctrica con alambre (WEDM)	
Apertura	≈427 μm	
Dimensiones	-----	
Fuerza	-----	
Operación	0-150V	
Actuador	Piezoeléctrico modelo: SZBS150/5 × 5/20, de Bsrobot Corporation	

Cabe señalar que, el desarrollo de nuevos materiales y la investigación de diferentes tecnologías permiten que la fabricación e implementación del dispositivo sean posibles. Por ejemplo, la micropinzas comercial modelo FT-G32/62/102 está diseñada para manipular objetos de tamaños micro y nanométrico, pero su característica única es un sensor de retroalimentación de fuerza de agarre de alta resolución integrado. La medición y control de las fuerzas de manipulación y agarre incrementa de manera trascendente la confiabilidad de los procesos de ensamble y manipulación (Nikoobin & Niaki, 2012).

1.2. Planteamiento del problema

La tecnología fotolitográfica empleada en la industria de los semiconductores, basada en Silicio, es la más empleada en tareas de micromanufactura, es decir, la fabricación de micropiezas y diversos dispositivos, entre ellos las micropinzas. Dos motivos de este amplio uso son la capacidad de producción en masa y la alta exactitud en las piezas manufacturadas (Liow, 2009). Sin embargo, los productos basados en Silicio tienen limitaciones intrínsecas (Baidyk & Kussul, 2009), (Yan, Sun, Liang, & Dong, 2007), algunos ejemplos son:

- Las geometrías están restringidas a diseños en 2.5 dimensiones, es decir geometrías en 2D extruidas para formar un sólido en 3D, por lo que es muy difícil crear formas complejas que involucren curvas en dirección perpendicular al plano base.
- Los materiales empleados tienen que ser compatibles con el Silicio.
- El desempeño mecánico es regido por los materiales usados en la tecnología de los circuitos integrados.
- Elevado costo de manufactura a nivel prototipo.

Cuando no se dispone de los recursos para tener acceso a la tecnología fotolitográfica para fabricar micropinzas, es común recurrir a tecnologías alternativas como el maquinado por técnicas láser o al maquinado por descarga eléctrica (EDM). Sin embargo, las dimensiones de los dispositivos fabricados suelen ser más grandes que los producidos por el método fotolitográfico. Esta situación no es favorable, porque a una dimensión más grande, algunos actuadores dejan de ser prácticos, como es el caso de los electrotérmicos y los electrostáticos. No obstante, los actuadores piezoeléctricos son adecuados para ser utilizados en una escala milimétrica

por sus características intrínsecas como: gran cantidad de fuerzas generada, respuesta rápida, resolución nanométrica en los movimientos, etc.

1.3. Justificación

Una tendencia que viene desde varios años atrás es la miniaturización de dispositivos tanto electrónicos como mecánicos, cuya combinación da origen a los MEMS y los sistemas nanoelectromecánicos (NEMS) que, como es ampliamente conocido, son usados en varios sectores, desde la industria de los teléfonos móviles hasta la industria automotriz.

Esta tendencia ha provocado una amplia investigación por el desarrollo de procesos de micromanipulación automatizada y técnicas de montaje de microobjetos (Li & Xu, 2012), (Qin, Shirinzadeh, Tian, Zhang, & Bhagat, 2014), (Gu, Zhu, Su, & Ding, 2013); para ser aplicados en el área de microelectrónica, la ciencia de los materiales, la biología, la medicina, la óptica y en general a cualquier área con interés de manipular elementos a escala micrométrica.

Con base en lo anterior, es necesario desarrollar nuevas pinzas capaces de manipular objetos a una escala micrométrica, con mucha precisión y un desempeño que satisfaga las necesidades de los actuales procesos de micromanipulación y microensamblaje.

No obstante, la mayoría de las micropinzas actualmente son creadas con tecnologías costosas, a las que no toda la comunidad científica tiene acceso. Por lo tanto, con base en las geometrías desarrolladas en el grupo de trabajo, se propone una novedosa geometría basada en un amplificador de movimiento, sobre arreglos de palancas y un arreglo de actuadores piezoeléctricos, como primera aproximación.

Una de las ventajas del diseño de la micropinza propuesta es la sencillez de su estructura, así como su desempeño competitivo, comparable al de geometrías complejas. Además, se buscará una alternativa de fabricación que reduzca su costo.

1.4. Hipótesis

En escala micrométrica, los actuadores electrostáticos requieren de una diferencia de potencial alta para poder realizar un trabajo, mientras que los actuadores electotérmicos, requieren también de una energía considerablemente alta para llevar a cabo su funcionamiento. Por lo que, para realizar estructuras milimétricas, con alguno de estos dos principios de funcionamiento, es necesario de un muy alto nivel de potencial, o bien, de energía, lo que representa una limitante.

Por otro lado, los actuadores piezoeléctricos pueden usarse en escala milimétrica, con un mecanismo flexible de apoyo y pueden generar amplios movimientos micrométricos.

Por lo tanto, el anterior argumento da origen a la hipótesis:

“Es posible diseñar y fabricar una micropinza con dimensiones milimétricas, e implementarla utilizando maquinado aditivo, basada en un arreglo de componentes piezoeléctricos de bajo costo.

La validación experimental puede diseñarse y realizarse también, con componentes precisos de bajo costo”.

1.5. Objetivo general

Diseñar, caracterizar e implementar una micropinza, en escala milimétrica, usando un arreglo de actuadores piezoeléctricos y un arreglo de elementos flexibles.

1.6. Objetivos específicos

- Realizar el diseño de la micropinza.
- Obtener el valor del desplazamiento y la fuerza que la pinza proporciona.
- Diseñar el esquema experimental de medición de parámetros de desempeño del actuador.
- Medir al desplazamiento y la fuerza del arreglo de actuadores piezoeléctricos, en adelante mencionado como actuador piezoeléctrico, por simplicidad.
- Optimizar los elementos de la micropinza, de tal forma que se reduzcan tanto el tamaño, como la complejidad del dispositivo.
- Implementar los materiales necesarios para la elaboración del dispositivo, con la finalidad de mejorar su desempeño.

1.7. Alcance

Las simulaciones se realizarán utilizando al software ANSYS™, así como otros softwares de dibujo con los que cuenta la institución.

Debido a que no se cuenta con presupuesto para la fabricación de la micropinza mediante algún método fotolitográfico, se plantea su fabricación de utilizando PLA. El prototipo desarrollado de esta forma permitirá llevar a cabo las pruebas experimentales, necesarias para validar su funcionamiento. El bajo presupuesto, también condiciona al tipo de actuador a implementar, de acuerdo también con las facilidades de adquisición.

Para la realización de este trabajo, se ha contado con equipos de medición y prueba de otros laboratorios de CIICAp.

1.8. Limitaciones

Las principales limitaciones para llevar a cabo esta tesis, las constituye el bajo presupuesto disponible para la adquisición de materiales de fabricación, así como componentes para llevar a cabo a la etapa de control.

1.9. Organización de la tesis

Este trabajo se compone de 6 capítulos, bajo la siguiente estructura:

Capítulo 1: Se presenta la introducción y la descripción de la tesis.

Capítulo 2: Se muestra al marco teórico en el área de MEMS.

Capítulo 3: Se presenta el diseño y desarrollo, tanto del arreglo experimental, como de la micropinza.

Capítulo 4: En este capítulo se presentan los resultados de las pruebas realizadas y la discusión correspondiente.

Capítulo 6: Se proporcionarán las conclusiones generales del trabajo desarrollado y se plantea trabajo futuro, derivado de su desarrollo.

MARCO TEÓRICO

En este capítulo se proporcionan las bases teóricas sobre el funcionamiento de la micropinza (propuesta en el capítulo 3) y de los elementos principales que la componen. Se inicia con información sobre los Sistemas Microelectromécanicos (MEMS), específicamente los métodos de actuación y los micromanipuladores. Posteriormente, se mencionan a los mecanismos flexibles, sus características sobresalientes, y las uniones flexibles más populares. Una vez familiarizados con los temas anteriores se hace énfasis en los actuadores piezoeléctricos, su principio de funcionamiento, la estructura del material Titanato Zirconato de Plomo (PZT) y su comportamiento de trabajo.

2. Marco teórico

2.1 Sistemas Microelectromecánicos (MEMS)

Anteriormente, se ha mencionado a los dispositivos MEMS, sin embargo, hasta ahora no hemos analizado, tanto por separado, como en su conjunto, el significado de cada una de las palabras que componen al acrónimo.

MEMS son las siglas en inglés para “*Micro-Electro-Mechanical Systems*” lo que se traduce en español como “Sistemas Micro-Electro-Mecánicos”. Por lo tanto, la palabra “Sistemas” se refiere al hecho que los dispositivos funcionan, son diseñados y fabricados como sistemas integrados y no como componentes individuales. La palabra “Micro” se refiere a que son dispositivos en los cuales, una o más de sus dimensiones se encuentran en la escala micrométrica. “Electro” indica que los dispositivos usan potencial eléctrico para diversos propósitos, por ejemplo: actuación, detección, alimentación de su sistema electrónico, etc. “Mecánicos”, se refiere a que tales dispositivos dependen de un movimiento o de cierto tipo de mecanismo (Younis, 2011).

Además de las características anteriores, hay algunos aspectos básicos de los MEMS que no se establecen en el acrónimo, estos se establecen con una definición del conjunto de las anteriores palabras. Los MEMS es la combinación de estructuras mecánicas y eléctricas, con un tamaño en la escala micrométrica de sus elementos, que funcionan como sensores o actuadores, integrados con electrónica de procesamiento de señal en el mismo dispositivo o con cables externos para diseño híbrido; fabricado a través de tecnologías de microfabricación (Ozevin, 2014).

2.1.1 Tecnologías de fabricación

La tecnología más utilizada para fabricación de semiconductores es la fotolitografía, la cual se realiza por procesos cíclicos. A continuación, se describen con apoyo de la Figura 2.1.

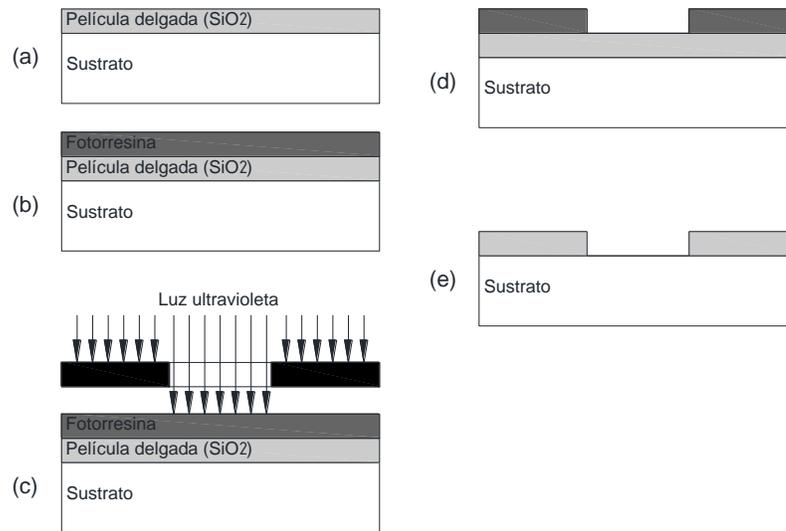


Figura 2.1. Proceso fotolitográfico empleado en la fabricación de los circuitos integrados y en los MEMS. Adaptada de (A. KUBBY, 2011).

- (a) Depósito de una película delgada de SiO₂ en la superficie de la oblea, usando técnicas de deposición de películas delgadas.
- (b) Depósito de una capa uniforme de un polímero fotosensible o fotorresina.
- (c) Exposición de luz a través de una máscara, que contiene al patrón que se desea transferir a la película delgada de SiO₂.
- (d) Transferencia de patrón a la película delgada, usando una técnica de grabado en la zona sensibilizada en (c).
- (e) Posteriormente, el polímero fotosensible removido.

Este proceso se repite para cada nueva capa. Algunos procesos requieren de 20 a 30 ciclos (A. KUBBY, 2011).

Muchos de los procesos de microfabricación y materiales usados para producir MEMS han sido proporcionados por la industria de los circuitos integrados (CI's), con la tecnología planar y Silicio. Sin embargo, el campo de los MEMS también ha conducido al desarrollo y refinamiento de otros procesos de fabricación y materiales no tradicionales usados en la industria de CI's (Jack W, 2001). Algunos de estos procesos son: micromaquinado a granel, micromaquinado superficial, LIGA, unión de obleas, entre otras. La mayoría de los dispositivos se fabrican usando alguna combinación de las anteriores tecnologías (Zhou, Wang, & Lin, 2012).

2.1.2 Actuadores básicos

Para realizar funciones físicas, un micromecanismo necesita tener la capacidad de realizar movimientos mecánicos de forma controlada. Intrínsecamente, un micromecanismo no posee esta capacidad, por ende, son necesarios microactuadores para ejecutar movimientos físicos.

Un microactuador es un dispositivo, con dimensiones micrométricas, que convierte un tipo de energía, tal como: eléctrica, mecánica, térmica, magnética, química y energía radiante; en energía mecánica. En algunos casos, un microactuador puede convertir energía en una forma intermedia antes de obtener la salida mecánica, por ejemplo: en un actuador formado por elementos térmicos accionados por inducción, primero transforma la energía eléctrica en energía magnética antes de resultar en energía térmica, la cual se aprovecha para doblar un microelemento (Korvink & Paul, 2006). El desempeño de un microactuador, al igual que un actuador, usualmente se

examina a través de la evaluación y medición de cantidades mecánicas tales como desplazamiento (lineal o angular), fuerza y momento o par (Baglio, Castorina, & Savalli, 2007).

Los microactuadores son diseñados y creados usando una amplia variedad de fenómenos físicos. Por lo tanto, es difícil desarrollar un sistema de clasificación de todos los microactuadores reportados. Sin embargo, un sistema de clasificación puede ayudar al estudio de estos dispositivos en el campo de la tecnología de microsistemas. En la Figura 2.2 se presenta una forma de clasificar a los microactuadores, basada en el tipo de energía que requieren y la fuerza de actuación, mientras que en Tabla 2.1 se presentan algunas características relevantes.

Cuando se busca un microactuador para una aplicación en específico, además de tener en cuenta las características de la Tabla 2.1, es esencial considerar otros factores como: la tecnología de fabricación, biocompatibilidad, materiales, voltaje de trabajo, etc. (Ghosh & Corves, 2015).

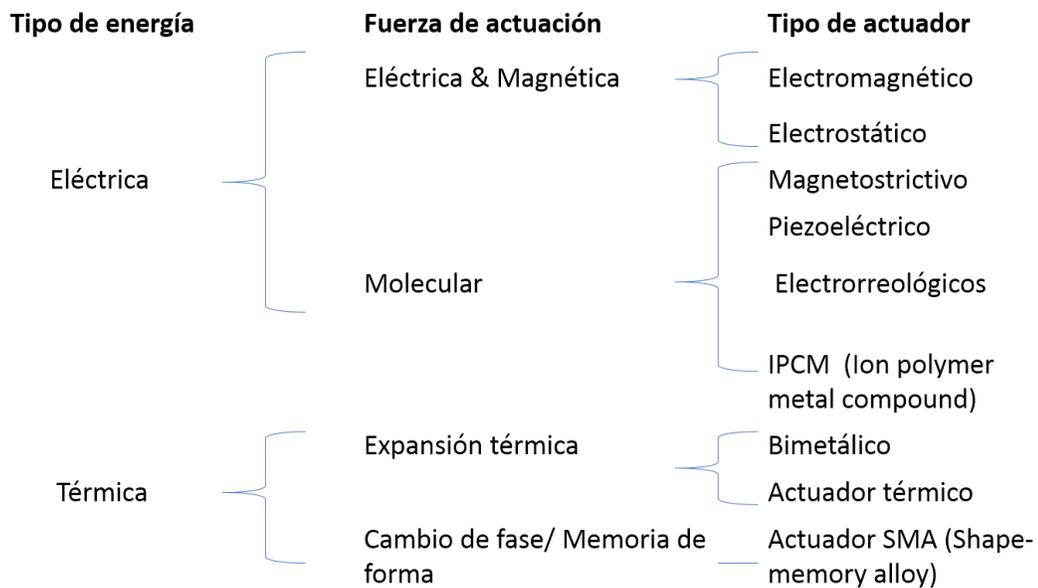


Figura 2.2. Clasificación de los microactuadores más comunes. (Ghosh & Corves, 2015).

Tabla 2.1. Características de actuadores más comunes. (Ghosh & Corves, 2015).

Principio de actuación	Transformación	Características importantes
Electromagnético y electrostático	Electricidad/Magnetismo → Fuerza mecánica	El tamaño del motor varía entre 10 μm y 100 μm.
Piezoeléctrico	Electricidad → Tensión/ fuerza mecánica	Respuesta rápida, fuerza grande, desplazamientos pequeños.
SMA	Calor → Tensión/ fuerza mecánica	Deformación grande y respuesta lenta.
Electrorreológico	Electricidad → Cambio de viscosidad	Operación con válvulas, control de flujo,
Térmico	Calor → Tensión/ deformación	Respuesta lenta, fuerza baja.
Electroquímico	Electricidad → Deformación mecánica	Formas complejas, entornos líquidos, desplazamiento elevado.
Fotomecánico	Luz → Fuerza	Base polimérica

2.1.3 Micromanipuladores

Para realizar una tarea de manipulación robótica convencional, se debe seleccionar un tipo de brazo robótico y una estrategia de manejo (manejo de pinzas, manejo de vacío, etc.). Del brazo robótico dependerá la repetibilidad de posicionamiento del objeto, la cual es independiente de la estrategia de manejo. Por lo general, se selecciona el brazo y la estrategia de manejo en

función de las propiedades de los objetos a manipular (forma, fragilidad, propiedades físicas específicas).

Aunque un micromanipulador no tiene necesariamente un cuerpo de tamaño micrométrico, generalmente es preferible que sea pequeño, en particular, por razones de rigidez estructural y resolución de los movimientos. No obstante, es necesario que los movimientos del micromanipulador tengan una resolución micro o nanométrica, para que pueda manipular y colocar objetos de tamaño micrométrico, lo que establece restricciones en el tamaño de la sección de sujeción del micromanipulador.

En la escala convencional, la fase de manipulación más difícil de ejecutar es la fase de agarre, pero en la escala micrométrica, la fase de liberación es particularmente sensible a los efectos adhesivos. En consecuencia, la función de manejo debe ser completamente rediseñada para adaptarla a la manipulación de microobjetos. Esto ha llevado a dos enfoques metodológicos principales, que pueden explotar fenómenos físicos específicos del micromundo o buscar minimizar efectos no deseados (Chaillet & Régnier, 2010).

- Manipuladores sin contacto. Pinzas ópticas, sistemas dielectroforéticos o pinzas magnéticas (Garza-García & Lapizco-Encinas, 2010). Las cuales, tienen la ventaja de no presentar efectos adhesivos, ya que nunca tienen contacto directo con la muestra a manipular.
- Manipuladores de contacto. Micropinzas capilares, micropinzas de contacto, son capaces de manipular microobjetos hechos de una amplia gama de materiales y formas. Además, son capaces de producir fuerzas considerables, que pueden ser útiles, por ejemplo, durante las operaciones de inserción para el microensamblaje. Estos métodos generalmente sufren efectos

adhesivos, y se deben desarrollar estrategias innovadoras de liberación para asegurar una liberación controlada y precisa del objeto.

Una característica importante que se tiene que considerar en el diseño de una micropinza de contacto, en la cual está enfocada esta tesis, es el tipo de movimiento que tendrán los brazos que sujetan el objeto de prueba.

En la Figura 2.3 (a) se muestran los brazos de una micropinza que exhiben un movimiento con rotación cuando se cierran. En este caso hay dos componentes de fuerza de reacción (R_x y R_y), de los cuales el componente R_y empuja el objeto de prueba fuera de las puntas de agarre. Para evitar que el objeto de prueba se deslice, es conveniente utilizar un mecanismo con movimiento paralelo en las mordazas, de modo que se omita el componente R_y de la fuerza de reacción, como se muestra en la Figura 2.3 (b).

El movimiento paralelo de las mordazas de la pinza asegurará el agarre preciso de los objetos, la distribución uniforme del estrés, por lo tanto, es el método de manipulación más preciso y confiable (Nikoobin & Niaki, 2012).

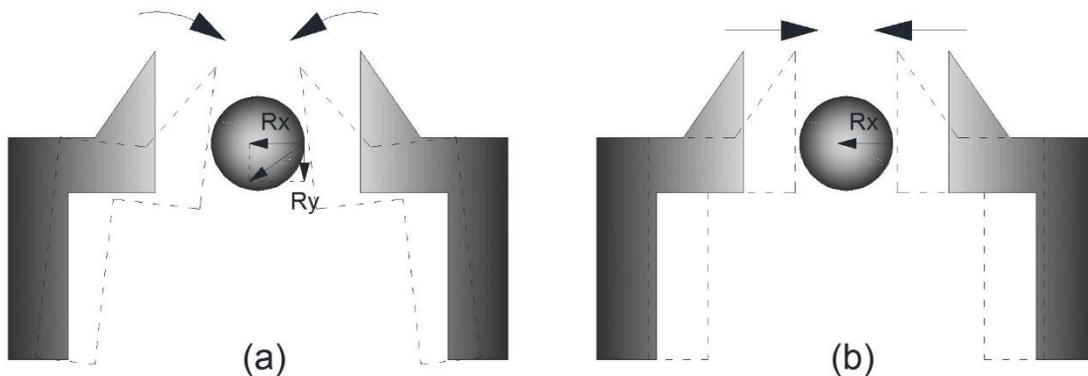


Figura 2.3. Comparación de dos pinzas que cierran para agarrar un objeto. (a) Con movimiento rotacional y (b) con movimiento paralelo.

Adaptada de (Nikoobin & Niaki, 2012).

2.2 Mecanismos flexibles

Los mecanismos flexibles, o compatibles, tienen un rol muy importante en el diseño de dispositivos micrométricos o incluso nanométricos. Sin embargo, su aplicación no es exclusiva para dichos fines, los podemos encontrar en diferentes objetos comunes, por ejemplo: los broches de una mochila, pinzas sujetapapeles, un arco de flechas, etc.

Los mecanismos flexibles no son nuevos, basta con observar nuestro propio cuerpo para darnos cuenta que la mayoría de los movimientos que realizamos no son por causa de un mecanismo rígido con rodamientos, por ejemplo, el movimiento de un brazo se logra gracias a la acción en conjunto del cartílago, tendones y músculos.

La naturaleza no utiliza uniones con rodamientos rígidos, en cambio la mayoría de los elementos naturales que ostentan movimiento son provocados por mecanismos flexibles.

Basados en su forma intrínseca de transmitir movimiento y fuerza, los mecanismos pueden clasificarse en dos grupos: mecanismos con cuerpo rígido y mecanismos flexibles (Xianmin & Benliang, 2018).

- **Un mecanismo flexible** es un arreglo de elementos sólidos y flexibles que se mueven por la deformación de uniones flexibles para transmitir un movimiento de entrada hacia otra posición, Figura 2.4 (b).
- **Un mecanismo de cuerpo rígido** está formado por componentes rígidos móviles, uniones con baja fricción, rodamientos, componentes estructurales y una variedad de elementos

especializados que se encargan de transmitir el movimiento, Figura 2.4 (a).

2.2.1 Conceptos básicos para crear flexibilidad

El funcionamiento de los mecanismos flexibles depende de sus elementos diseñados con un alto grado de flexibilidad, es decir, partes que son capaces de doblarse en un determinado rango angular sin quebrarse o agrietarse, con el propósito de transmitir un desplazamiento, una fuerza o almacenar energía en forma de energía de flexión (P.R., K.P., & F.A., 2014). Por lo tanto, para poder diseñar un dispositivo flexible es importante conocer los factores que intervienen en la creación de flexibilidad de un elemento móvil.

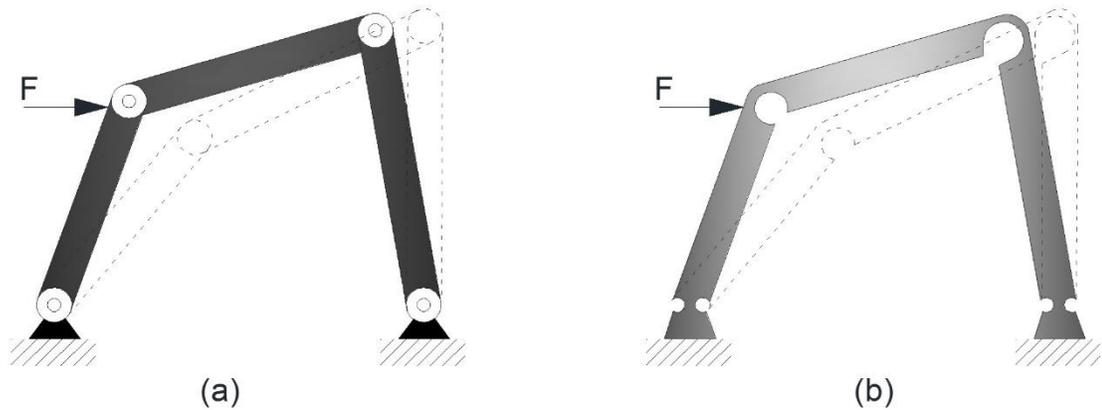


Figura 2.4 (a) Mecanismo de cuerpo rígido que emplea rodamientos para transmitir movimiento, representados como círculos en la imagen. (b) Mecanismo flexible con adelgazamientos que hacen la función de un rodamiento convencional. Las líneas punteadas representan la deformación del mecanismo. Adaptada de (Xianmin & Benliang, 2018).

Según (L. Howell, P. Magleby, & M. Olsen, 2013) hay tres formas principales que influyen en la creación de flexibilidad, estas son: propiedades del material, la geometría, la carga y las condiciones de frontera.

- ***Propiedades del material***

Cada material tiene diferente rigidez (resistencia del material a doblarse) según el módulo de Young (E , o módulo de elasticidad).

En la Figura 2.5, se da un ejemplo para entender el concepto del módulo de Young propio de cada material, se consideran 3 varillas con la misma forma, pero diferente material: acero ($E = 207 \text{ GPa}$), aluminio ($E = 70 \text{ GPa}$) y polipropileno ($E = 1.4 \text{ GPa}$); cada varilla está sometida a una carga del mismo valor. El resultado es que cada varilla se estira en diferente proporción a causa de las diferencias respecto al módulo de Young.

Por lo tanto, si se planea diseñar un mecanismo flexible en el que se requiere que su estructura sea fuerte y a la vez flexible, se tiene que optar por usar materiales con un alto valor de su límite elástico, S_y , y un bajo valor de su módulo de Young.

Una forma válida para comparar diferentes materiales es comparar la razón del módulo de Young y el límite elástico, esto es: S_y/E . Mientras mayor sea el valor de la razón obtenida, será un buen indicador de las características deseadas del material. Una aproximación similar es comparar la resiliencia de los materiales, la cual es una mitad del límite elástico al cuadrado dividido por el módulo de Young, esto es (L. Howell, P. Magleby, & M. Olsen, 2013):

$$\text{Resiliencia} = (S_y^2 / 2E) \quad (2.1)$$

El módulo de la resiliencia es una medida de cuanta energía por unidad de volumen el material puede soportar sin un cambio permanente.

- **Geometría**

La forma y tamaño de un elemento tiene un gran efecto sobre la flexibilidad. Por ejemplo, en la Figura 2.6 se muestran dos piezas con forma rectangular que están fabricadas con el mismo material, tienen la misma forma y masa colgada de sus extremos libres, no obstante, una de ellas está colocada en diferente orientación lo que provoca un gran cambio en la flexibilidad. El elemento con la carga colocada en el lado más delgado es más flexible Figura 2.6 (b); suponiendo que esa parte es tres veces menor que la parte más amplia, entonces la flexibilidad de la pieza en esa orientación es nueve veces mayor que en orientación del lado más amplio, Figura 2.6 (a).

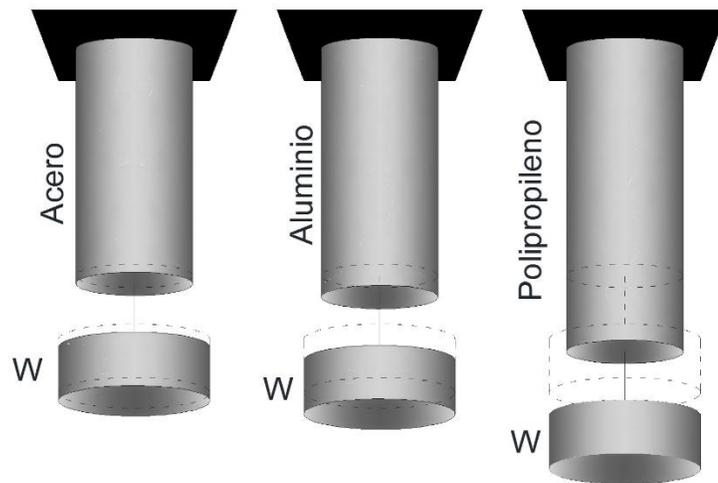


Figura 2.5 Tres varillas de diferente material, pero con la misma geometría experimentan diferente estiramiento con el mismo peso tirando de ellas. (L. Howell, P. Magleby, & M. Olsen, 2013).

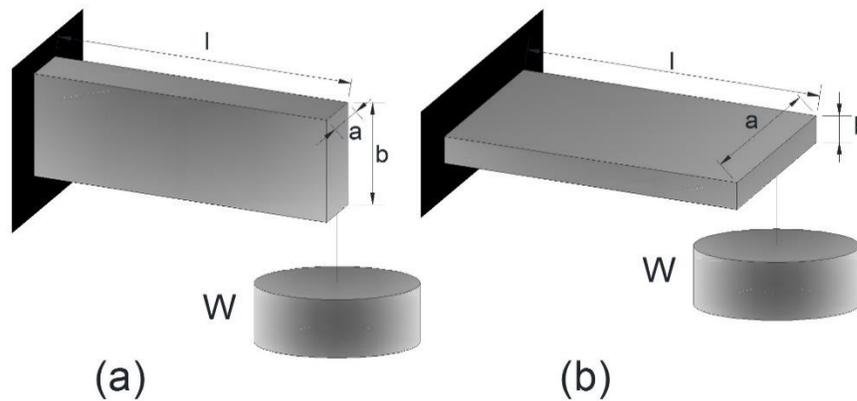


Figura 2.6 Viga sosteniendo un peso constante en dos escenarios. Orientada con el lado más largo en posición vertical (a) y posición horizontal (b).

Adaptada de (L. Howell, P. Magleby, & M. Olsen, 2013).

Para comprobar lo anteriormente mencionado, es necesario calcular la rigidez de la viga en sus dos posiciones (OpenLearn, 2019). La rigidez a la flexión, k , se obtiene a partir de la siguiente expresión fuerza /deflexión:

$$k = \frac{F}{z} \quad (2.2)$$

Donde F es la fuerza generada por la carga y z es la deflexión de la viga, la cual es:

$$z = \frac{Fl^3}{3EI} \quad (2.3)$$

Donde:

l es la longitud de la viga.

E es el módulo de Young

I es el momento de inercia del área de la sección transversal de la viga,

esto es:

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

En términos de la ecuación (3) y (4), la rigidez está dada por:

$$k = \frac{Eab^3}{4l^3} \quad (2.5)$$

Donde los términos a y b son los valores del espesor y la altura de la viga rectangular.

Por lo tanto, al calcular la rigidez de la viga en la posición de la Figura 2.6 (a) con $a=1$ y $b=3$, y para el caso de la Figura 2.6 (b) $a=3$ y $b=1$, obtenemos:

$$k_a = 27 \left(\frac{E}{4l^3} \right) \quad k_b = 3 \left(\frac{E}{4l^3} \right)$$

Podemos concluir que, la rigidez de la viga de la Figura 2.6 (a) es 9 veces mayor que la rigidez de la misma viga orientada en la forma que muestra la Figura 2.6 (b). Con base a este resultado, podemos afirmar que, a menor rigidez, la viga será capaz de flexionarse una mayor magnitud y por lo tanto será más flexible.

- **La carga y las condiciones de frontera**

Las condiciones de frontera (se refieren a que partes de un elemento están afianzadas) y la forma en que es aplicada una carga, provocan diferentes valores en la flexibilidad. En la Figura 2.7 se representan tres piezas con la misma geometría, forma y material de fabricación; de igual forma la carga que es aplicada a cada pieza tiene el mismo valor, aun así, las tres piezas tienen diferente deflexión.

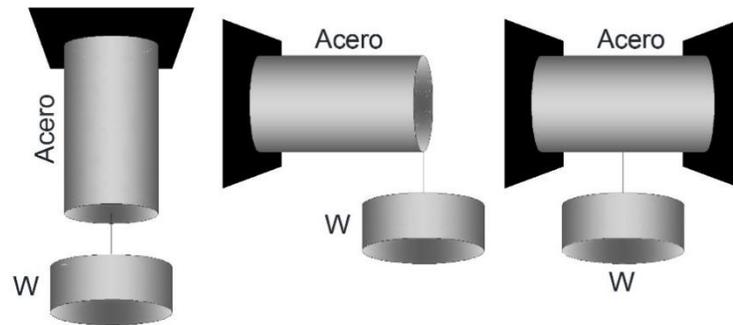


Figura 2.7 Tres barras de acero con la misma geometría y sosteniendo el mismo peso en diferente posición y diferentes condiciones de frontera. (L. Howell, P. Magleby, & M. Olsen, 2013).

2.2.2 Ventajas y desventajas de las uniones flexibles

Una unión flexible, o adelgazamiento flexible, es un elemento importante que integra un mecanismo flexible, el cual es análogo a un rodamiento en un mecanismo de cuerpo rígido, de tal forma que está compuesto por una zona delgada de material que se dobla para generar una delimitada rotación entre dos cuerpos rígidos adyacentes, tal como se observa en la Figura 2.8. A diferencia de un rodamiento convencional, la unión flexible puede flexionarse en una determinada región angular de forma segura (de acuerdo con las características del material), pues si la flexión supera dicha región, el elemento se fractura.



Figura 2.8 Ejemplo de unión flexible tipo circular que rota en un eje. Elaboración propia.

En la mayoría de las aplicaciones el adelgazamiento flexible y el resto del mecanismo está construido en una sola pieza, esta característica es la fuente de muchas ventajas respecto a las uniones por medio de rodamientos convencionales. Algunas características favorables de los adelgazamientos flexibles son:

- No hay pérdidas por fricción.
- No necesitan lubricación.
- No hay presencia de histéresis.
- Algunos mecanismos pueden fabricarse a partir de un material moldeable por inyección y construirse de una sola pieza
- Son compactos, por lo cual son ampliamente utilizados en aplicaciones de micro dispositivos.
- Virtualmente no necesitan de mantenimiento.
- Facilidad de fabricación y escalabilidad, debido a que algunos mecanismos pueden fabricarse a partir de un material moldeable por inyección y construirse de una sola pieza (M. Gouker, K. Gupta, A. Bruck, & Holzschuh, 2006), (Arumugam & Kumar, 2016).

Los mecanismos flexibles al estar contruidos en una sola pieza junto con los adelgazamientos flexibles no necesitan mantenimiento y operan hasta que algún elemento fallé, el cual suele ser algún punto de un adelgazamiento, que se fractura debido a la fatiga o alguna sobrecarga.

Si bien los dispositivos en cuestión tienen muchas ventajas respecto a las uniones mecánicas convencionales, también ostentan ciertas desventajas (Lobontiu, 2002):

- Los adelgazamientos flexibles no permiten lograr niveles de rotación relativamente altos
- La rotación lograda por los adelgazamientos no es totalmente pura, debido a la uniformidad de la deformación en el material delgado, pudiendo presentarse torsiones no deseadas.
- Si el elemento adyacente al adelgazamiento flexible que permanecerá fijo no está bien sujeto, este se desplazará por la acción de la carga que genera el movimiento rotacional.
- Los adelgazamientos flexibles son sensibles a los cambios de temperatura, ya que sus dimensiones cambian como resultado de la expansión y contracción térmica, lo que conduce a la modificación de los valores originales.

2.2.3 Tipo de uniones flexibles

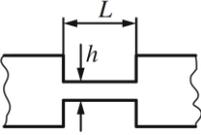
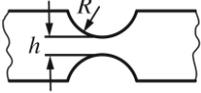
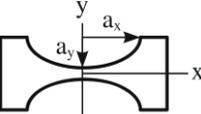
El estudio y análisis de uniones flexibles es muy importante para diseñar micro mecanismos flexibles eficientes. Los objetivos principales que se desean al diseñar una unión flexible son:

- Proveer una larga flexibilidad
- Desarrollar tan bajo estrés como sea posible
- Causar mínima desviación como si se tratara de un rodamiento convencional.

La forma del adelgazamiento es un factor que decide si se cumplirán los objetivos ya planteados para un material dado. Ya que la forma del adelgazamiento afecta la rigidez del material y este a su vez determina la deformación elástica que podrá lograr el mecanismo flexible (Patil, Anerao, & Chinchankar, 2018). En la Tabla 2.2, se presentan algunas de las formas

simétricas de uniones flexibles más utilizadas en mecanismos flexibles, la magnitud de la rigidez rotacional y el máximo estrés desarrollado en el material.

Tabla 2.2 Rigidez y estrés desarrollado para diferentes geometrías con adelgazamiento (Ghosh & Corves, 2015).

Geometría del adelgazamiento	Rigidez rotacional	Relación rotación-estrés
Rectangular 	$K_z = \frac{M_z}{\theta_z} = \frac{Eb h^3}{12L} \quad (2.6)$	$\sigma_{max} = \frac{Eh}{2L} \theta_{max} \quad (2.10)$
Circular 	$K_z = \frac{M_z}{\theta_z} = \frac{2Eb h^{5/2}}{9\pi R^{1/2}} \quad (2.7)$	$\sigma_{max} = \frac{2\sqrt{2E} \sqrt{\frac{h}{R} \left(1 + \frac{h}{4R}\right)^{9/20}}}{2L} \theta_{max} \quad (2.11)$
Elíptico 	$K_z = \frac{M_z}{\theta_z} = \frac{2Eba_y^2}{3} \frac{e}{f(\beta_y)} \quad (2.8)$ $\beta_x = \frac{h}{2a_x}; \beta_y = \frac{h}{2a_y}$ $e = \frac{a_x}{a_y} = \frac{\beta_y}{\beta_x}; f(\beta) = \frac{3\pi}{(2\beta)^{5/2}}$ <p>Para un valor pequeño de β</p> $K_z = \frac{2Eb a_x^2}{3e^3 f(e\beta_x)} \quad (2.9)$	<p>-----</p>

Con base a los datos de la Tabla 2.2 se puede afirmar que para valores iguales de E , b , h y L :

$$K_{z-Rect} < K_{z-Elip} < K_{z-Circ}$$

Y para un rango de rotación dado θ :

$$\sigma_{Rect} > \sigma_{Elip} > \sigma_{Circ}$$

Por lo tanto, cuando una alta rigidez y una pequeña rotación sea requerida, un adelgazamiento circular flexible puede ser elegido. Adelgazamientos con forma rectangular son más adecuados para una baja rigidez y un alto rango de rotación.

2.3 Actuadores piezoeléctricos

Desde el descubrimiento del efecto piezoeléctrico en los cristales logrado por Pierre y Jacques in 1880, ha ocurrido un importante progreso, en términos de materiales y sus aplicaciones (Seung-Bok & Young-Min, 2010).

En el pasado los actuadores piezoeléctricos fueron usados preferentemente para tareas cuasi estáticas como lo es el posicionamiento de alta precisión, pero en la actualidad se ha incrementado su interés en campos de aplicación totalmente nuevos, como mecanismo de actuación dinámica (por ejemplo, válvulas o dispositivos de inyección de combustible) o en estructuras inteligentes adaptativas (ajuste de forma, generación y cancelación de vibraciones, ajuste de modo). Hoy día existen diferentes modelos de actuadores para satisfacer la amplia variedad de características requeridas para diferentes aplicaciones (APC, 2018).

2.3.1 Efecto piezoeléctrico

El efecto piezoeléctrico es un fenómeno electromecánico que involucra la interacción entre el comportamiento mecánico (elástico) y eléctrico de un

material. En un material que es propenso al efecto piezoeléctrico pueden suceder dos situaciones (Nechibvute, Chawanda, & Luhanga, 2012):

- Cuando una fuerza o un estrés es aplicado al material, se genera una diferencia de potencial en la superficie del material. Esta situación se conoce como **efecto piezoeléctrico directo**.
- Cuando un campo eléctrico es aplicado al material, en este caso el material reacciona con una deformación mecánica y el fenómeno es llamado **efecto piezoeléctrico indirecto**.

*El efecto piezoeléctrico se presenta en estructuras cristalinas, las cuales **no tienen un centro simétrico** respecto a los iones positivos y negativos de la red cristalina.*

Por lo tanto, **la condición para que ocurra el efecto piezoeléctrico es la existencia de ejes polares dentro de la red cristalina**. Polar significa, que hay un momento dipolar eléctrico en la dirección de los ejes, causado por la distribución de las cargas eléctricas en los enlaces químicos **Fuente especificada no válida..**

2.3.2 Estructura del PZT

Actualmente, los cerámicos poli-cristalinos como el Titanato de Bario ($BaTiO_3$) y el Titanato Zirconato de Plomo (PZT) son los materiales mas usados para aplicaciones de sensores o actuadores piezoeléctricos, debido a su bajo costo de manufactura y sus posibilidades respecto a las casi formas arbitrarias comparadas con los piezoeléctricos cristalinos (Ballas, 2007).

El PZT tiene una estructura tipo Perovskita de cristales ferroeléctricos de tipo ABO_3 . Dentro de la estructura Perovskita, A representa a una carga

positiva dobles (el ion plomo), B y O representa una carga cuádruple positiva (ion titanio y zirconio) y una carga negativa (ion oxígeno), respectivamente. Por encima de una determinada temperatura T_C , llamada temperatura de Curie, la celda elemental del PZT exhibe una forma cubica, como se aprecia en la Figura 2.9 (a).

Con esta forma de la celda del PZT no se presenta el efecto piezoeléctrico debido a la existencia de un centro de simetría. A temperaturas debajo de T_C , la forma de la estructura cristalina del PZT se deforma y cambia a una geometría tetragonal, como se observa en la Figura 2.9 (b), este efecto se le conoce como una **deformación espontanea** (Ballas, 2007).

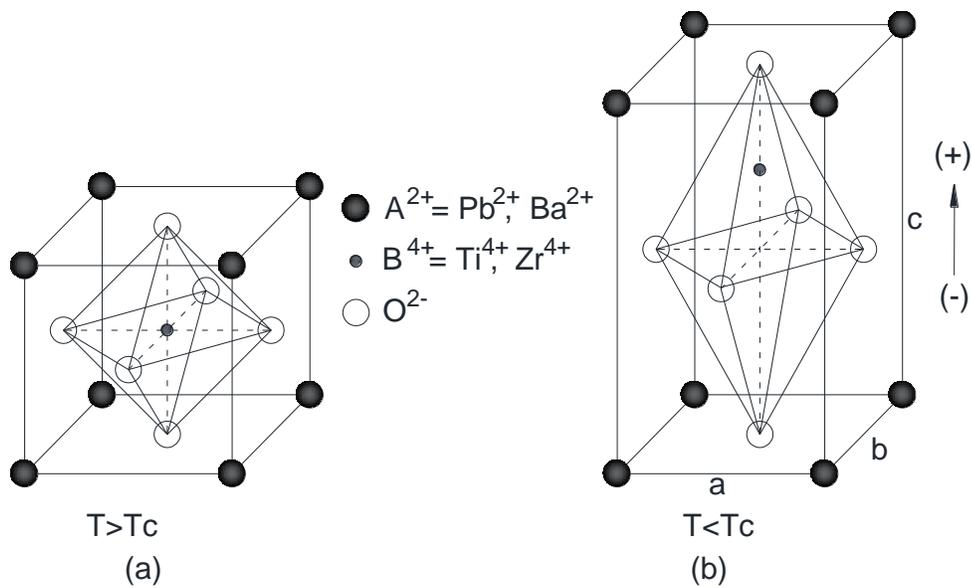


Figura 2.9 Celda unitaria del PZT. (a) Con estructura tipo Perovskita por arriba de la temperatura de Curie. (b) Distorsión a una celda unitaria tipo tetragonal por debajo de la temperatura de Curie. Adaptada de (Ballas, 2007).

Con la deformación espontánea un momento dipolar aparece, resultado del centro de asimetría de la celda unitaria tetragonal. La cantidad del momento dipolar relacionada al volumen de la celda unitaria es llamada polarización espontánea P_s , la cual es paralela o antiparalela con el eje c . Un efecto de la polarización espontánea es que los cristales discretos del PZT se vuelven piezoeléctricos (Physik Instrumente , 2011).

2.3.3 Ecuaciones constitutivas de los piezoeléctricos

En términos generales, es posible describir el comportamiento de un piezoeléctrico empleando un conjunto de ecuaciones matemáticas que expresan la dependencia de magnitudes mecánicas y eléctricas. La temperatura también es un factor que afectar el comportamiento de los piezoeléctricos, sin embargo, aquí no la contemplamos.

En la literatura relacionada a la teoría de la piezoelectricidad, la notación con índices de matrices es, en general más aceptada que la notación referente a tensores; la razón es la simetría del tensor de tensión y estrés (Ballas, 2007). Para comprender la notación, los subíndices dobles del tensor ij y kl son remplazados por los índices p y q . Esta correlación es especificada en la Tabla 2.3.

Tabla 2.3 Correlación entre los índices de la matriz y los índices dobles del tensor. (Ballas, 2007).

$ij \text{ o } kl$	11	22	33	23 o 32	31 o 13	12 o 21
$p \text{ o } q$	1	2	3	4	5	6

La interacción entre dos variables, eléctrica y mecánica de un material cerámico piezoeléctrico de tres dimensiones; ha sido aproximada con las siguientes ecuaciones lineales:

$$S_p = s^E_{pq} T_q + d_{pk} E_k \quad (2.12)$$

$$D_i = d_{iq} T_q + \epsilon^T_{ik} E_k \quad (2.13)$$

Donde S es el tensor de deformación mecánica, s^E es el tensor de flexibilidad cuando el campo eléctrico aplicado es constante (el superíndice E denota que el campo eléctrico es constante), T es el tensor de tensión mecánica, d es el tensor de constantes piezoeléctricas, E es el vector de campo eléctrico, D es el vector de desplazamiento eléctrico y ϵ^T es el tensor de permitividad cuando la tensión mecánica es constante (el superíndice T denota que la tensión mecánica es constante).

El sistema de ecuaciones anterior puede ser simplificado de acuerdo con la geometría del actuador, por ejemplo, en la Figura 2.10 se presenta un elemento de un actuador piezoeléctrico tipo pila (elementos piezoeléctricos apilados uno tras otro), entonces se puede asumir que (Chaillet & Régnier, 2010):

1. A excepción de S_3 , las otras deformaciones pueden ser ignoradas.
2. A excepción de T_3 , las demás tensiones mecánicas pueden ser ignoradas
3. Se considera solo el campo eléctrico a la dirección 3
4. La única densidad de carga diferente de cero es D_3 .

Considerando estos supuestos, las ecuaciones (12) y (13) se reducen

a:

$$S_3 = s^E_{33} T_3 + d_{33} E_3 \quad (2.14)$$

$$D_3 = d_{33} T_3 + \epsilon^T_{33} E_3 \quad (2.15)$$

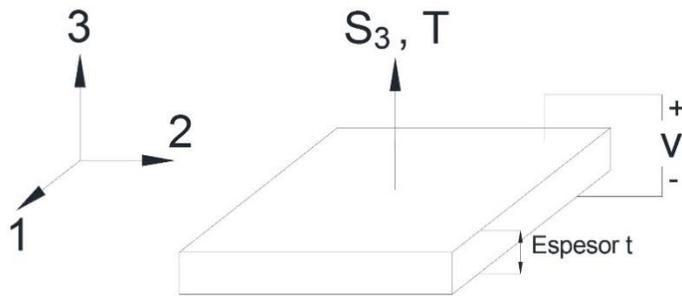


Figura 2.10 Elemento individual de un actuador piezoeléctrico tipo pila.
(Chaillet & Régnier, 2010).

2.3.4 Fuerza y desplazamiento de los actuadores piezoeléctricos

Dos características importantes de los actuadores piezoeléctricos son:

1. La cantidad de desplazamiento mecánico y
2. La fuerza que es capaz de generar.

La cantidad de fuerza que un actuador piezoeléctrico puede generar depende de la carga se le aplique y como ésta cambia conforme aumenta la carrera o elongación del actuador.

Por ejemplo, si se aplica una carga con fuerza constante a un actuador piezoeléctrico, este ejerce una fuerza neta igual a cero y se presenta la máxima carrera. Por lo contrario, si se aplica una carga que exhibe una fuerte dependencia al desplazamiento (por ejemplo, un resorte) al actuador piezoeléctrico, este necesita generar una elevada fuerza para desplazar a la carga mecánica y en esta situación la carrera del actuador es reducida. En la Figura 2.11 se muestra la relación de la carrera y fuerza de un actuador piezoeléctrico, con dos importantes parámetros: la carrera libre (ΔL_{FS}) y la fuerza de bloqueo (F_{Block}).

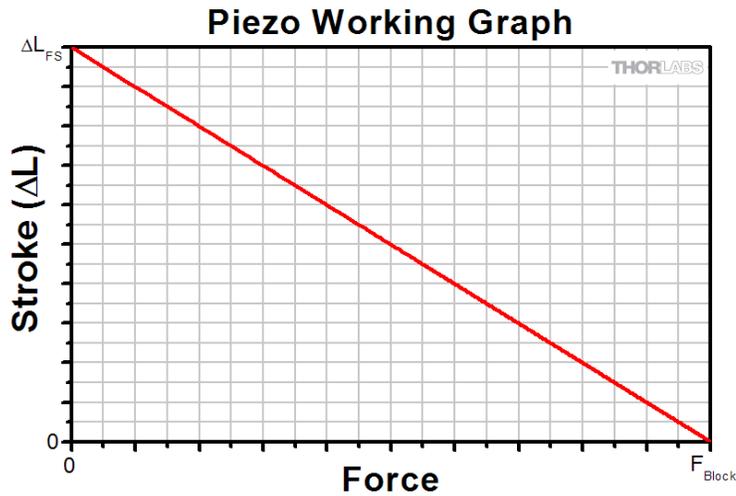


Figura 2.11. Ejemplo de la gráfica de trabajo de un actuador piezoeléctrico. (THORLABS, Piezoelectric Tutorial, s.f.).

La carrera libre del actuador se define como el desplazamiento que produce el actuador en la ausencia de una carga o precarga. Ésta se obtiene aplicándole una diferencia de potencial sin presencia de alguna carga, el desplazamiento logrado es la carrera libre. En cuanto a la fuerza de bloqueo, se define como la fuerza máxima que puede ser generada por el actuador piezoeléctrico. Para medir dicho parámetro, primero se tiene que aplicar una diferencia de potencial al actuador para obtener su carrera libre, una vez hecho esto, se somete al actuador a una fuerza externa hasta que éste regrese a su longitud original. La cantidad de fuerza requerida es equivalente a la fuerza de bloqueo (THORLABS, Piezoelectric Tutorial, s.f.).

DESARROLLO TEÓRICO Y EXPERIMENTAL

En este capítulo, se presenta la metodología para llevar a cabo la caracterización de la micropinza, así como el arreglo experimental diseñado e implementado para esta caracterización; específicamente en el desplazamiento de las mandíbulas, con respecto a la magnitud de la diferencia de potencial de entrada.

Posteriormente, se explica el funcionamiento de los elementos o dispositivos relevantes que se utilizaron en el arreglo experimental, tales como el sensor de desplazamiento micrométrico y el arreglo de actuadores piezoeléctricos, entre otros.

3. Desarrollo teórico y experimental

3.1 Metodología

Los pasos que constituyen a la metodología para lograr los objetivos son:

ANÁLISIS DE GEOMETRÍAS

Analizar geometrías de micropinzas con actuación piezoeléctrica reportadas en la bibliografía, especialmente las que usan un actuador piezoeléctrico, para desarrollar una nueva geometría con amplificadores de movimiento.



DISEÑO DEL ARREGLO EXPERIMENTAL

Diseño de arreglo experimental el cual será empleado para la caracterización y pruebas de la micropinza.



IMPLEMENTACIÓN DE LA ETAPA DE MEDICIÓN

Implementar un sensor óptico capaz de registrar desplazamientos micrométricos, así como una interfaz con la computadora para facilitar la adquisición de datos y la operación de la micropinza.



SELECCIÓN Y CARACTERIZACIÓN DEL ACTUADOR

Elegir al actuador piezoeléctrico conveniente y proceder a caracterizarlo para obtener datos como:

La curva de histéresis y la fuerza máxima que será capaz de generar cuando esté alimentado, con la máxima tensión eléctrica soportada.

Estos parámetros son necesarios para desarrollar la estructura mecánica de la micropinza.



IMPLEMENTACIÓN DE LA ETAPA DE CONTROL

Desarrollar a los circuitos electrónicos necesarios para operar al actuador, en el proceso de caracterización, así como la programación de la tarjeta de control del sistema.



DISEÑO DE LA MICROPINZA

Diseñar la geometría con los amplificadores de movimiento, con base en las características de los elementos diseñados previamente, y que permiten su operación.

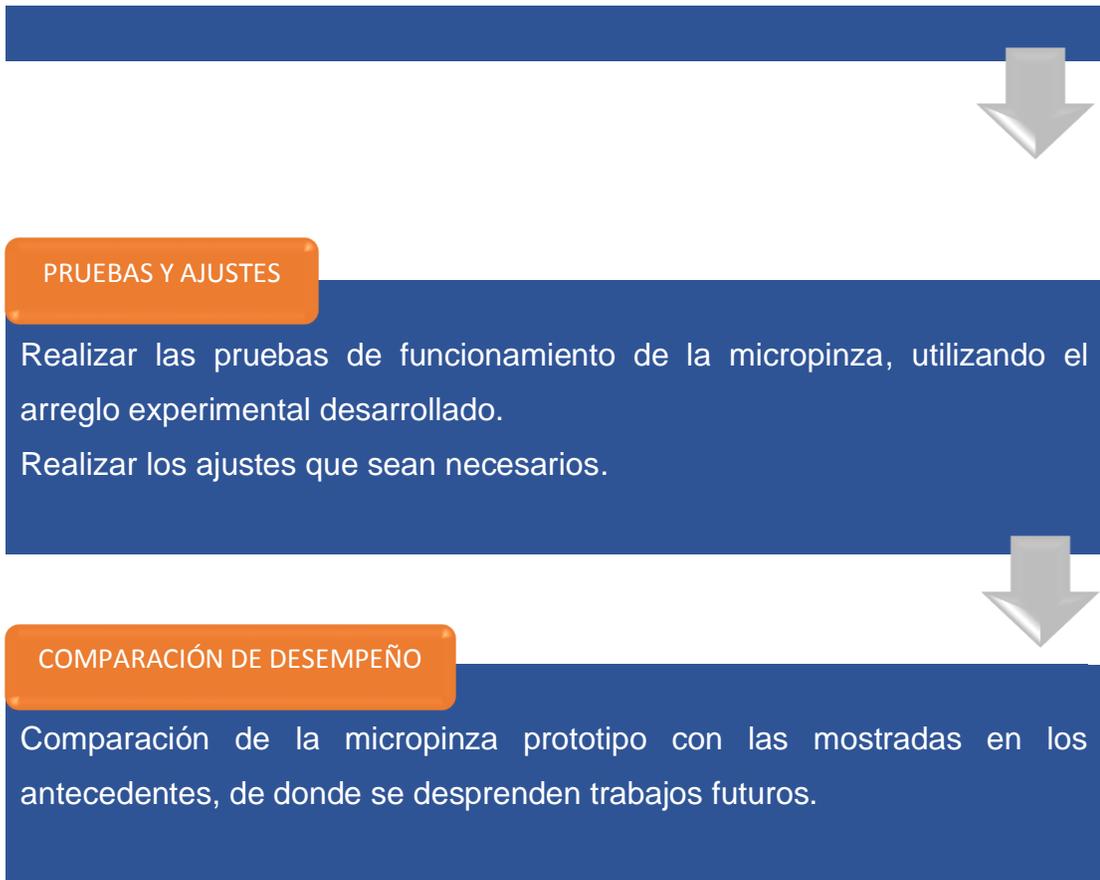
Realizar las simulaciones correspondientes para determinar los parámetros de desempeño básicos de la micropinza.



FABRICACIÓN DE LA MICROPINZA

Fabricar a la micropinza de dimensiones milimétricas.

Comparar los resultados teóricos y experimentales.



Cabe señalar que el desplazamiento en las puntas de la pinza es de orden micrométrico, lo cual es la justificación de llamarla “micropinza”.

3.2 Arreglo experimental

El arreglo esquemático experimental que se utilizará para caracterizar a la micropinza se muestra de forma general en la Figura 3.1. Los componentes que intervienen en el montaje son:

- Computadora.
- Tarjeta de adquisición de datos.

- Circuito controlador del actuador piezoeléctrico.
- Sensor óptico de desplazamiento.
- Plataforma de desplazamiento micrométrico.
- Fuente de alimentación.
- Actuador piezoeléctrico
- Micropinza a caracterizar.
- Microscopio óptico industrial

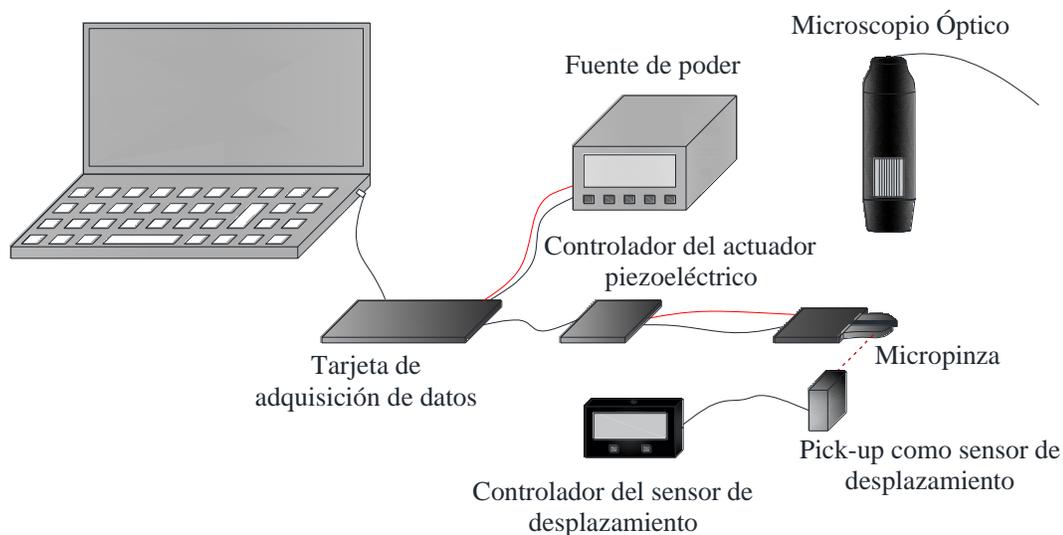


Figura 3.1 Montaje experimental para caracterizar la micropinza. Elaboración propia.

Para lograr que el montaje experimental opere como se desea, es importante que los elementos de medición y control sean elegidos o diseñados apropiadamente, para cubrir los requerimientos de la caracterización. Por ejemplo, el medidor de desplazamiento debe tener una escala de medición en el orden de los micrómetros, con una precisión y exactitud adecuados para registrar los desplazamientos que el actuador piezoeléctrico generará. Además, es importante que el sensor no sea invasivo para evitar alguna alteración al comportamiento del sistema de la micropinza. El controlador del

piezoeléctrico deberá entregar a la salida rangos de tensión eléctrica y corriente apropiados para operar al actuador.

También es importante controlar otros parámetros que pueden causar mediciones erróneas, tales como las vibraciones en la mesa de trabajo o movimientos accidentales, que alteren la posición de la micropinza y el medidor de desplazamiento.

3.3 Controlador del actuador piezoeléctrico

El controlador para el actuador piezoeléctrico, que es uno de los elementos fundamentales del montaje experimental, fue diseñado con las siguientes características:

- Tensión de alimentación de 12 V.
- Rango tensión de salida de 0 a 150 V.
- Corriente de salida de 25 mA.
- Posibilidad de cambiar el modo de salida ya sea fija o en modo de frecuencia.
- Una salida analógica de 0 a 5 V proporcional a la tensión de salida de 0 V a 150 V.
- Entrada analógica de 0 a 5 V para controlar a la tensión de salida.
- Bajo costo de fabricación.

En la Figura 3.2 se presenta el esquema del circuito eléctrico diseñado. El circuito se puede clasificar como un convertidor conmutable de corriente directa a corriente directa (convertidor DC-DC) debido a que transforma una tensión de entrada de 12 V a una mayor o menor tensión de salida.

El diseño del circuito se basa en el circuito integrado TL494, que frecuentemente se utiliza para fuentes conmutadas. La ventaja de usar a este circuito integrado es que incorpora a dos comparadores que pueden ser usados para controlar a la corriente y la tensión de salida.

El funcionamiento del circuito es el siguiente:

- El TL494 genera una salida con modulación de ancho de pulso (PWM) a una frecuencia de aproximadamente 100 kHz, para controlar al transistor MOSFET Q1, el cual hace funcionar al transformador.
- En el devanado secundario, se induce una diferencia de potencial que es proporcional al valor de la señal PWM que inmediatamente se rectifica por medio del diodo D1 y los capacitores C1 y C5.
- El control de tensión de salida se realiza por medio de un comparador que integra el circuito TL494, que por una entrada ingresa el valor proveniente del divisor resistivo que se forma por el potenciómetro R6 (configurado para generar una tensión de salida de 0 a 5 V proporcional a una tensión de 0 a 150 V) y por la otra entrada, ingresa una tensión análoga variable de 0 a 5 V, generada por la tarjeta de adquisición de datos.
- Cabe aclarar que, la señal de entrada analógica se genera con una salida PWM de la tarjeta de adquisición de datos, un arreglo de dos resistencias y un capacitor (R8, R7 y C6). De esta forma, se puede variar la tensión de salida, con incrementos que dependerán de la resolución de la salida PWM de la tarjeta.
- En la salida del circuito, se colocó un arreglo de transistores NPN y PNP para obtener una salida conmutable de ser necesaria.

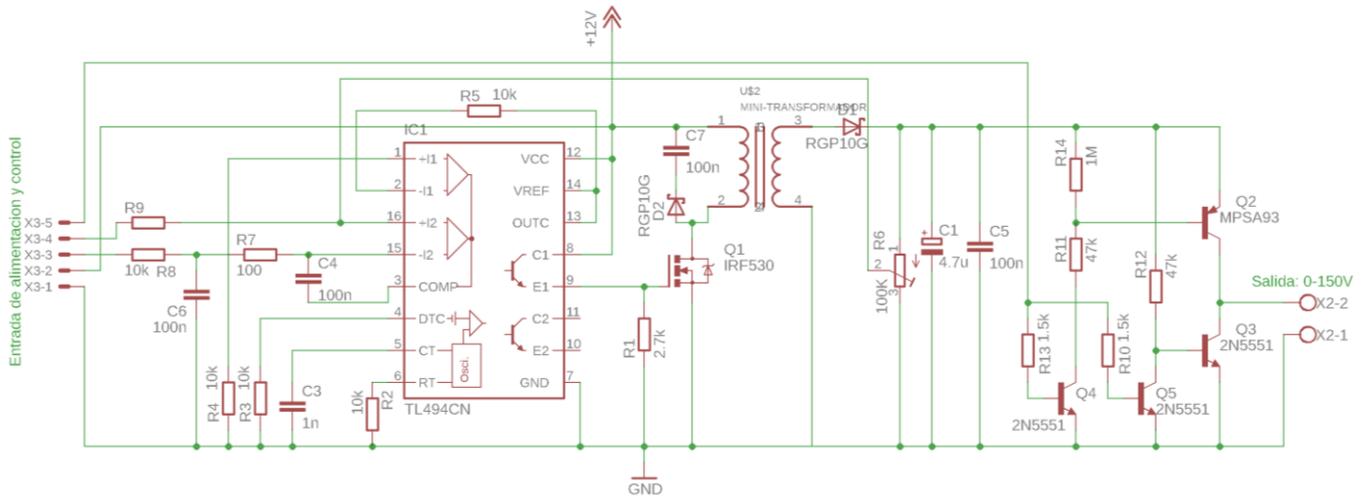


Figura 3.2 Diagrama eléctrico del controlador del actuador piezoeléctrico.

Elaboración propia.

3.4 Actuador piezoeléctrico

Los actuadores piezoeléctricos comerciales tienen un precio elevado, que se incrementa mientras mayor sea su carrera y fuerza producida, lo cual representa un inconveniente para utilizar este tipo de actuadores en el diseño de la micropinza, ya que la propuesta es implementarla con un bajo costo.

La solución a este obstáculo fue utilizar piezoeléctricos de diafragma cerámicos de propósito general, comúnmente conocidos como “buzzers”, los cuales son muy económicos (costo menor a 1 dólar). Para lograr una mayor longitud en el desplazamiento, se propuso realizar un apilamiento con algunos de estos elementos.

Estos dispositivos están compuestos por una pieza plana redonda de cerámica piezoeléctrica, adherida a un disco plano de latón de mayor diámetro, como se muestra en la Figura 3.3. El cerámico está constituido por Titanato Zirconato de Plomo (PZT), material muy utilizado en diferentes campos.



Figura 3.3 Piezoeléctrico de propósito general, popularmente llamado “Buzzer”. (MicroOhmElectronics, s.f.).

El dispositivo piezoeléctrico propuesto, no está diseñado para operar exclusivamente como actuador, por lo que, supusimos que al aplicar una diferencia de potencial su deformación sería de una magnitud inferior al de cualquier otro actuador piezoeléctrico comercial. No obstante, el diseño de este elemento piezoeléctrico genera un efecto de amplificación de movimiento, donde la máxima deformación se presenta en el centro del disco de latón, como se observa en la Figura 3.4. Cabe mencionar que, es conveniente que el grosor del disco de latón sea lo más fino posible para no restar fuerza al piezoeléctrico. Aun así, es evidente que la fuerza generada será de menor magnitud que la de un actuador piezoeléctrico comercial, debido a que no incorporan una carga anexa en su diseño.

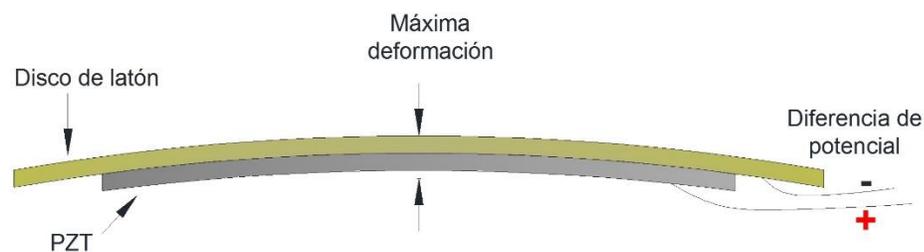
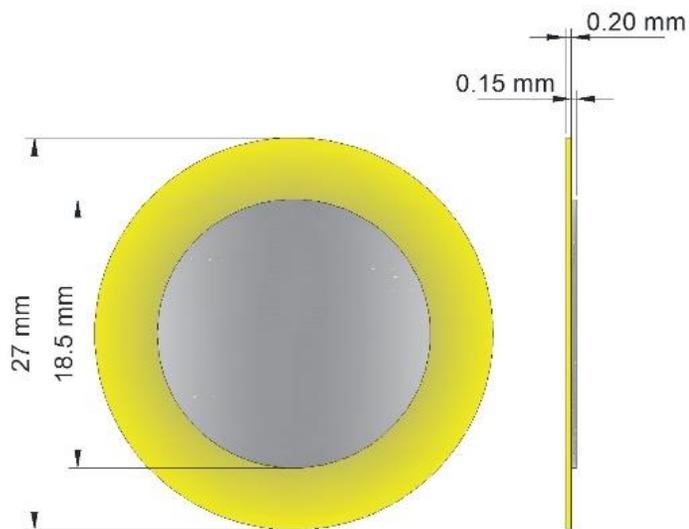


Figura 3.4 Vista longitudinal del piezoeléctrico cuando se somete a una diferencia de potencial. Elaboración propia.

En la Figura 3.5 (a), se muestran las dimensiones del piezoeléctrico empleado, mientras que en la Figura 3.5 (b) se presenta el arreglo de 4 piezoeléctricos apilados en diferente posición, para lograr una sumatoria de desplazamientos individuales.

Cabe mencionar que, en algunos de los piezoeléctricos el material cerámico PZT no se encuentra totalmente en el centro del disco de latón. Por consecuencia, es posible que existan componentes de desplazamiento no perpendiculares al centro del disco de latón. También, es posible que se manifiesten diferencias en los máximos desplazamientos logrados por cada piezoeléctrico. Sin embargo, no es un inconveniente relevante que interfiera con el funcionamiento de la micropinza a desarrollar.



(a)

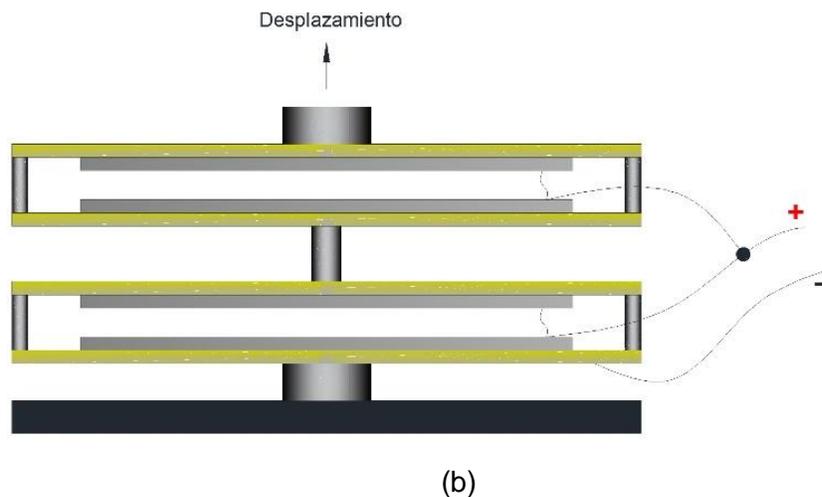


Figura 3.5 (a) Dimensiones de los piezoeléctricos empleados. (b) Arreglo de cuatro piezoeléctricos apilados, para un mayor alargamiento. Elaboración propia.

Algunas consideraciones que se tomaron en cuenta al construir el arreglo de cuatro actuadores piezoeléctricos son:

- Realizar las uniones eléctricas con un pegamento conductor para evitar usar el soldador eléctrico, dado que el calor generado podría disminuir el efecto piezoeléctrico.
- Elegir los elementos cuyo material cerámico esté lo más centrado posible en cada disco de latón.
- Los alambres que conectan a los piezoeléctricos tienen que ser muy flexibles, para no restringir el movimiento que se genera en el actuador.

3.5 Plataforma de desplazamiento

Para facilitar los ajustes de posicionamiento tanto de la pinza, como del sensor óptico de desplazamiento, se incluyó una plataforma de desplazamiento micrométrica modelo “LGX40-C”, cuyo material de

construcción en su mayoría es aluminio y los carriles de guía son de acero pulido para mayor precisión. La plataforma se muestra en la Figura 3.6 y sus especificaciones se presentan en la Tabla 3.1.

Esta plataforma también se utilizará para facilitar la caracterización del actuado piezoeléctrico y puede ser utilizada para calibrar al sensor óptico de desplazamiento.



Figura 3.6. Plataforma de desplazamiento micrométrico. (AliExpress, Industrial Precision Mechanism Store, s.f.).

Tabla 3.1 Especificaciones plataforma de desplazamiento. (AliExpress, Industrial Precision Mechanism Store, s.f.).

Especificación	Valor
Carrera	40 mm \pm 6.5 mm
Carga	19.6 N
Escala mínima	0.01 mm
Precisión	0.01 mm
Paralelismo	0.02 mm
Peso	0.13 kg

3.6 Sensor óptico de desplazamiento

Actualmente, existen diferentes métodos para medir desplazamientos lineales en la escala micrométrica o incluso nanométrica, para diversas aplicaciones en campos de la ingeniería, la biotecnología, la nanotecnología, la biología, etc. Algunos métodos de medición no invasiva, comúnmente implementados hacen uso de la interferometría láser, otros aplican el principio de funcionamiento de un capacitor, o bien, las reflexiones de un láser para triangular el haz de luz, mientras que otros miden la atenuación de la reflexión que provoca la variación de la distancia de medición. También existen sensores de desplazamiento lineal invasivos o de contacto, como los que emplean una resistencia variable o los sensores de desplazamiento inductivos LVDT (por sus siglas en inglés, Linear Variable Differential Transformer).

A pesar de que los métodos de medición invasivos son menos costosos en su implementación, al tener contacto con la superficie a medir, introducen una pequeña carga mecánica, que puede alterar la medición, especialmente cuando el desplazamiento es generado por una fuerza de poca magnitud.

Considerando la posibilidad de que el actuador a utilizar genere poca fuerza para impulsar al sistema mecánico, se decidió emplear un sensor de desplazamiento lineal no invasivo y de tipo óptico, para facilitar la colocación del instrumento en diferentes partes del sistema mecánico de la micropinza y no alterar los resultados.

Después de investigar los instrumentos de medición de desplazamiento, disponibles en el mercado, que cumplen con el rango y la escala de medición requerida para nuestro sistema, se llegó a la conclusión de que la mayoría de los instrumentos son costoso y relativamente grandes. El elevado costo del instrumento de medición es un problema, ya que, su incorporación en el

sistema de la micropinza haría menos atractiva su implementación. Además, si el tamaño del sensor es muy grande, no se podrá colocar en el cuerpo de la pinza.

Debido a los anteriores inconvenientes, se optó por diseñar un sensor de desplazamiento con las siguientes características: escala de medición mínima de 1 μm , rango de medición mínimo de 500 μm , dimensiones del sensor acorde con las dimensiones de la pinza, medición no invasiva y costo de implementación bajo.

Para lograr cumplir con los anteriores requerimientos, los únicos dispositivos hallados con la capacidad de llevar a cabo esta acción son las cabezas lectoras de una unidad de CD-ROM (por sus siglas en inglés *Compact Disc Read-Only Memory*). Estos dispositivos también son conocidos como lector "Pick-up Láser".

En la Figura 3.7, se aprecia la estructura básica de un pick-up. Su funcionamiento consiste en que, por medio de un rayo láser dirigido a la superficie de disco, donde se encuentra la información grabada en forma de huecos, se recupera la información en forma de reflejos pulsantes que serán trasladados hasta un arreglo de 4 fotodiodos, que se encargará de transformar a la señal luminosa en una señal eléctrica pulsante, con la información codificada.

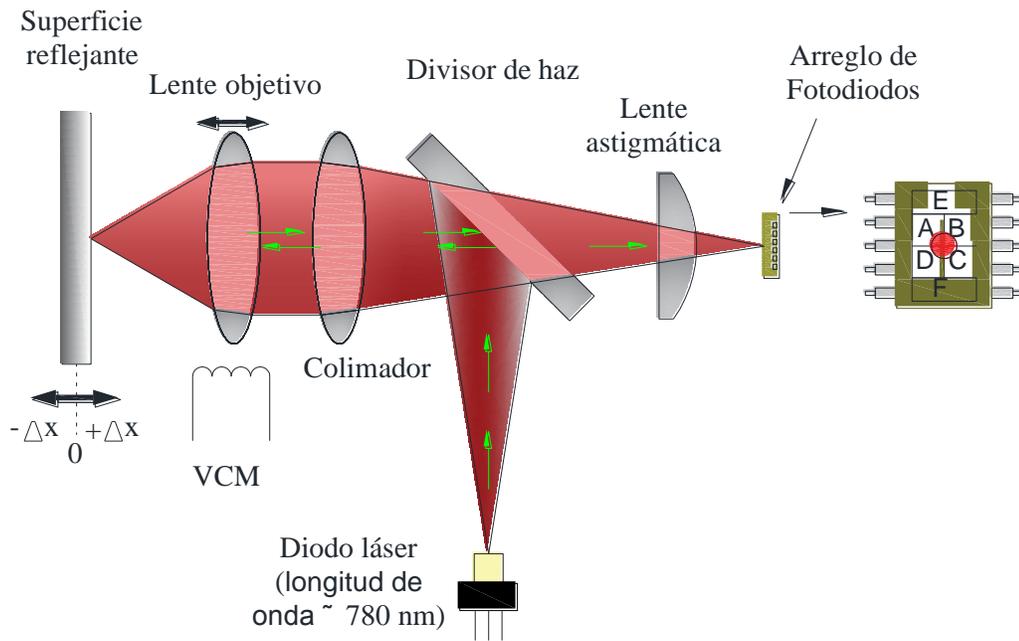


Figura 3.7 Estructura básica de una unidad lectora de CD, Pickup. Modificada de (Hwu & Boisen, 2018).

Un componente importante dentro de la estructura de un dispositivo pickup es el lente astigmático, el cual deforma el haz de luz reflejado conforme varía la distancia de la superficie a enfocar. Por ejemplo, si la emisión del láser se encuentra perfectamente enfocada en la superficie de reflexión, la forma de la luz reflejada hacia los fotodiodos será circular; en cambio si la superficie del objeto se encuentra más abajo o más arriba del punto de enfoque, la forma de la luz en los fotodiodos será más alargada, como se aprecia en la Figura 3.8. El trabajo de enfoque se realiza por medio de un motor lineal formado por una bobina, VCM (Voice Coil Motor). El dispositivo también incorpora un actuador VCM para corregir las inclinaciones que pudieran suceder.

Un cambio pequeño en la distancia de enfoque puede ser detectado por medio de la señal de error de enfoque S_{FE} , la cual se define como la suma de

los valores de los fotodiodos A y C, menos la suma de los valores en los fotodiodos B y D, esto es:

$$S_{FE} = (A + C) - (B + D) \quad (3.1)$$

Por consiguiente, dependiendo de la posición del objeto a enfocar, pueden ocurrir cuatro situaciones:

- Cuando la superficie se encuentra a una distancia en la que la emisión del láser se encuentra enfocada, la señal de error de enfoque es cero, $S_{FE} = 0$.
- Cuando la superficie se mueve fuera del punto de enfoque, al alejarla ligeramente del pickup, la señal de error de enfoque es $S_{FE} < 0$.
- Cuando la superficie se mueve fuera del punto de enfoque, al acerca ligeramente hacia el pickup, la señal de error de enfoque es $S_{FE} > 0$.
- Finalmente, cuando la superficie se aleja bastante del pickup el error de enfoque es $S_{FE} = 0$. Lo mismo ocurre si la superficie de enfoque se acerca mucho al pickup.

En la Figura 3.8, se presentan los casos anteriores. Se puede observar que la señal de error de enfoque tiene una forma de tipo S, al graficarla con respecto a la distancia de desenfoque de la superficie del objeto.

La parte interesante de esta señal es que presenta una zona con un comportamiento lineal, la cual puede ser usada para medir microdesplazamientos (Hwu E.-T. , Hung, Yang, & Hwang, 2007). Sin embargo, el rango de medición que se ha reportado no supera los 10 μm . Aun así, se ha utilizado en diferentes aplicaciones, ya que, su resolución de

medición es del orden de los nanómetros (Hwu E.-T. , Hung, Yang, Huang, & Hwang, 2008).

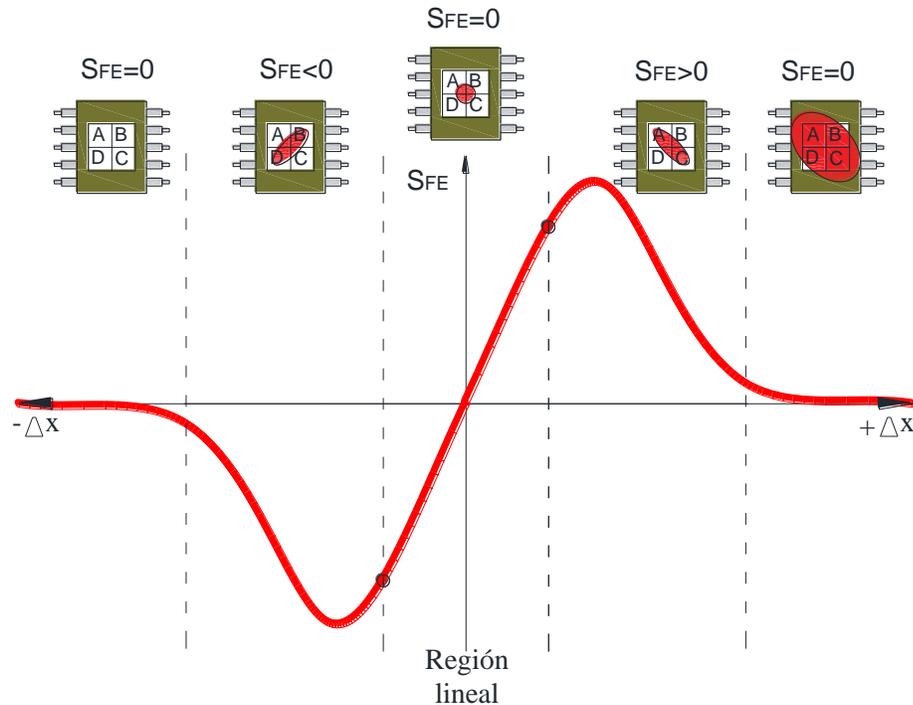


Figura 3.8 Comportamiento de la señal de error de enfoque conforme varía la distancia de la superficie a enfocar. A cada sección dividida de la señal le corresponde una forma de luz que es proyectada sobre el arreglo de fotodiodos. Modificada de (Hwu & Boisen, 2018).

Para aumentar el rango de medición, utilizamos el motor VCM, encargado de mover la lente de objetivo linealmente, hasta el punto de enfoque. De esta forma, conseguimos que el desplazamiento del objeto se mueva en igual magnitud que la lente de objetivo. La longitud recorrida será proporcional a la diferencia de potencial aplicada al actuador VCM.

Después de probar diferentes modelos de pickup, se decidió utilizar el Modelo SF-P151 (Figura 3.9), de la empresa SANYO™, para implementar el

sensor de desplazamiento lineal, debido a que presentó un rango de medición amplio y sobre todo, un comportamiento lineal.

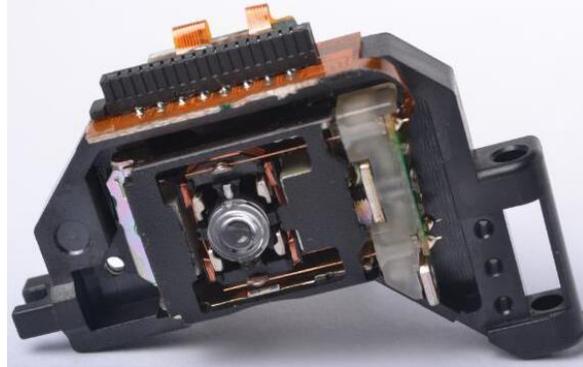


Figura 3.9 Pickup modelo SF-P151 utilizado como sensor de desplazamiento lineal. (AliExpress, Optical pick-up Store, s.f.).

Utilizando la técnica anteriormente descrita, hemos conseguido un rango de medición de alrededor de $650\ \mu\text{m}$, con una resolución de $0.1\ \mu\text{m}$, superando a las mínimas necesidades requeridas para el mecanismo de la micropinza. En la Figura 3.10 se presenta un diagrama de bloques, que indica el proceso de control del sensor de desplazamiento lineal implementado.

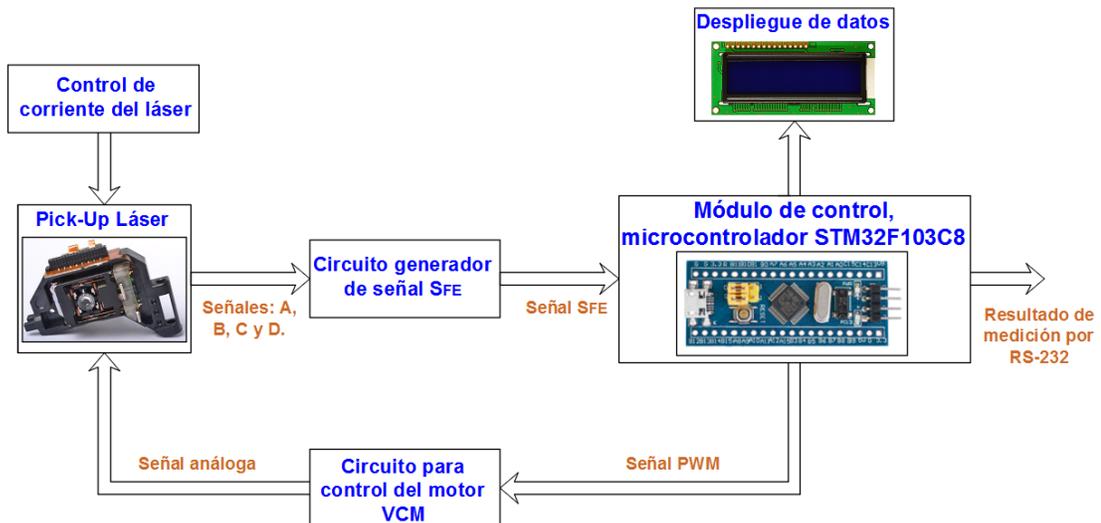


Figura 3.10 Componentes que integran al sensor de desplazamiento lineal implementado. *Elaboración propia.*

Una ventaja añadida al utilizar los dispositivos en cuestión es que existen circuitos integrados con todos los elementos necesarios para operar al dispositivo, por consiguiente, las dimensiones del circuito electrónico se reducen. Así que, aprovechamos esta ventaja y empleamos el circuito TA2157F que incorpora todos los amplificadores operacionales para generar a la señal de error de enfoque y para controlar la corriente suministrada al láser. También se utilizó al circuito integrado SA1469PH para controlar el motor VCM, encargado de mover el lente de objetivo.

El microcontrolador encargado de realizar el sistema de control en lazo cerrado fue el STM32F103C8 de la compañía STMicroelectronics, debido a su alta velocidad de operación de 72 MHz y a su capacidad de generar una señal con modulación de ancho de pulso (PWM) con una resolución de 16 bit, que se utiliza para crear una señal analógica, por medio de un capacitor y una resistencia.

3.7 Diseño de la micropinza

La mayoría de los prototipos comunes de micropinzas utilizan como principal material un tipo de aluminio con un alto valor del límite elástico, mismo que favorece un incremento de la elasticidad del material (L. Howell, P. Magleby, & M. Olsen, 2013). Además, fabrican la geometría de la micropinza por medio de la técnica de Wire Electrical Discharge Machining (WEDM). Todo este proceso aumenta significativamente el costo del prototipo.

El diseño de la micropinza que proponemos fue fabricado por la técnica de manufactura aditiva usando el proceso de Modelado por Deposición Fundida (FDM) y optamos por usar al material poliácido láctico (PLA), que se

clasifica como un polímero con propiedades semejantes al Tereftalato de Polietileno (PET), pero con la diferencia de que el PLA es biodegradable (Farah, Anderson, & Langer, 2016). En consecuencia, el costo de implementación es bajo, en comparación con los diseños convencionales.

El diseño esquemático de la micropinza se muestra en la Figura 3.11 (a).

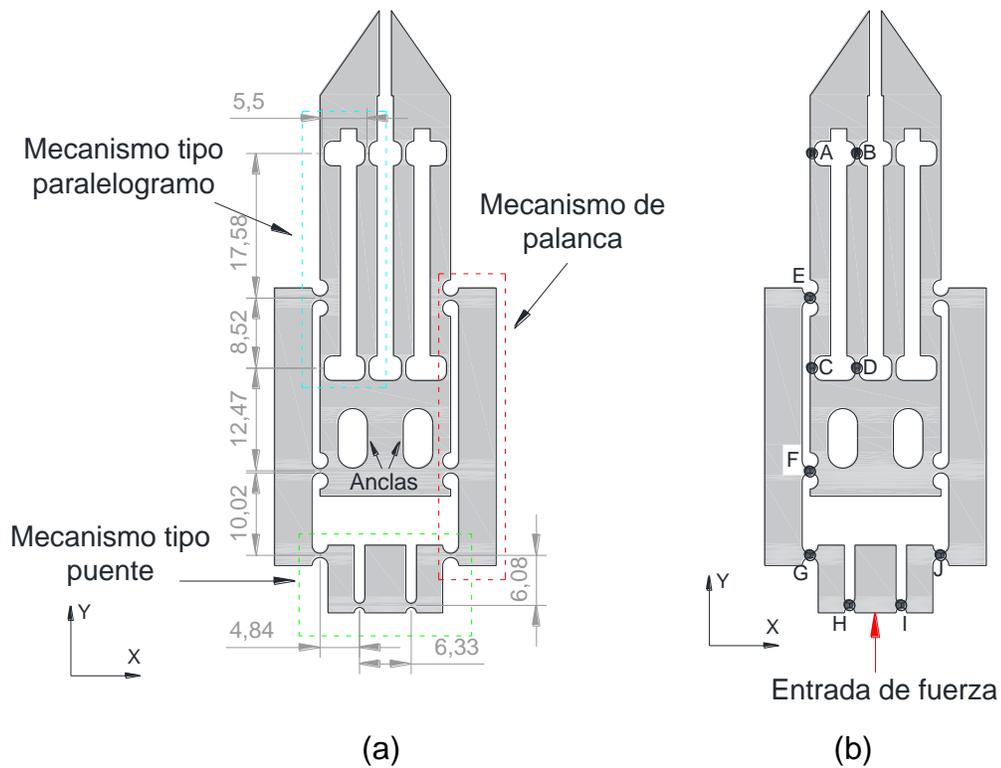


Figura 3.11 (a) Diagrama esquemático de la micropinza basada en mecanismos flexibles. Las dimensiones están en milímetros. (b) Diagrama esquemático de la descripción funcional. Elaboración propia.

El diseño de la micropinza es simétrico y está compuesta por:

- Tres grupos de mecanismos flexibles.

1. Mecanismo tipo puente: Situado en la entrada de fuerza que proporciona el arreglo de actuadores piezoeléctricos.
2. Mecanismo de palanca: Localizado en la parte media.
3. Mecanismo tipo paralelogramo: Se encuentra en el soporte de las mandíbulas de la micropinza.
 - Mandíbulas de la micropinza: Son las que tienen contacto directo con el objeto a manipular.
 - Las anclas: Permiten fijar la micropinza a una base.
Los orificios ovalados permiten sujetar y ajustar la posición de la micropinza a una base por medio de tornillos.

Con este diseño, el movimiento es transmitido desde el mecanismo tipo puente, hasta las mandíbulas de la micropinza.

Acerca de la funcionalidad de los bloques, la Figura 3.11 (b) muestra detalles de referencia. El mecanismo tipo puente, donde fuerza de entrada es aplicada, es un mecanismo de amplificación, formado por las uniones flexibles GHIJ, el cual mueve el mecanismo de palanca GFE, y de forma simétrica, al mecanismo del lado derecho.

Cabe mencionar que, el mecanismo de palanca es la principal forma de amplificación de movimiento de la micropinza, el cual mueve el mecanismo tipo paralelogramo por medio de la unión flexible E. Sobre este último mecanismo se ubican las mandíbulas. Tal configuración garantiza el desplazamiento de las mandíbulas en una dirección (de la operación de apertura o cierre) sobre el eje X. La importancia de este movimiento beneficia el agarre preciso de un objeto, como ya se mencionó en el marco teórico.

Los anclajes permiten establecer la apertura de las mandíbulas del micropinza, en el estado inicial. Para hacer eso, los agujeros de anclaje sirven para ubicar el mecanismo del puente, cerca de la punta del actuador piezoeléctrico, creando una precarga, que permite el restablecimiento del

actuador piezoeléctrico a su posición inicial (mínimo alargamiento, equivalente a la apertura máxima de las mandíbulas de la micropinza).

Una desventaja intrínseca al proceso de fabricación empleado para la construcción de la micropinza es la alta rugosidad en la superficie de la micropinza, asociado a las capas formadas al depositar el material fundido. Estas imperfecciones son especialmente importantes en las paredes laterales de las mandíbulas, ya que proporcionan un cierre no uniforme. Una posible solución es realizar un micropulido para alisar las paredes de las mandíbulas, que beneficiaría su desempeño al manipular microobjetos sin dañarlos, debido a que el PLA es un material de baja rigidez.

Una segunda solución, que decidimos implementar, fue adaptar puntas de aluminio en las mandíbulas de la micropinza, debido al bajo costo del material y la facilidad de moldear al aluminio. Sin embargo, también es posible fabricar puntas intercambiables precisas por el método fotolitográfico (Lofroth & Avci, 2019).

Puede concluirse, se diseñó e implementó a los bloques de medición y control. La medición en escala micrométrica de forma óptica, contactiva e invasiva, es compleja, debido que se tiene la restricción de bajo costo, la solución a esto fue el uso de un cabezal lector de unidades de CD ROM conocido como Pick-Up. Mientras que, con relación a la etapa de control, uno de los obstáculos mayores fue hallar componentes de bajo costo, que satisficieran las necesidades requeridas por el sistema, tal como alta resolución en la conversión análoga a digital, alta velocidad de operación, múltiples puertos de comunicación serial, entre otros.

Además, se llevó a cabo el diseño de la micropinza. Al utilizar las puntas metálicas se elimina el inconveniente generado por los defectos inherentes a la tecnología de fabricación FDM.

Ambos diseños del sistema de control y la micropinza satisfacen el requerimiento básico de bajo costo de implementación, para poder ser utilizado en labores de micromanipulación, en áreas de investigación u otras que lo requieran.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

En el presente capítulo se reportan y discuten los resultados logrados respecto a la caracterización de la micropinza. Se comienza con la caracterización del actuador piezoeléctrico desarrollado, del cual se determinó el máximo desplazamiento a una máxima diferencia de potencial de alimentación y sin carga mecánica, además de la fuerza que es capaz de generar; datos esenciales que sirvieron para conocer la gráfica de trabajo del actuador. Posteriormente realiza un análisis por elemento finito del desplazamiento de la micropinza, haciendo uso del software ANSYS™ y finalmente se comparan estos resultados con los resultados conseguidos experimentalmente

4. Resultados y discusión

4.1 Desplazamiento del actuador piezoeléctrico

El primer paso de la caracterización del actuador piezoeléctrico, construido a base de discos tipo “buzzer”, consistió en registrar su respuesta al desplazamiento, cuando se le aplican valores de tensión eléctrica en un determinado rango.

El desplazamiento del actuador es importante debido a que, permite deducir el máximo desplazamiento de las mandíbulas de la micropinza. Además, con esta caracterización se puede obtener la curva de histéresis que presenta el actuador piezoeléctrico, con la cual es posible realizar un sistema de control que reduce el error de posicionamiento.

El proceso de medición de desplazamiento del actuador piezoeléctrico se llevó a cabo de dos maneras:

- Manual
- Utilizando un sensor óptico

4.1.1 Método manual de medición

La medición manual se lleva a cabo con un Microscopio USB, una regla de calibración con una división de 100 μm , una plataforma de desplazamiento micrométrico y el controlador del piezoeléctrico.

El procedimiento consistió en colocar la regla sobre la plataforma de desplazamiento, sobre ella una aguja conectada a la parte central del actuador, a su vez, sobre estos se posiciono al microscopio USB, tal como se aprecia en la Figura 4.1. Por medio de la plataforma de traslación, se acomodó a la aguja en una posición inicial, siendo este el punto el de referencia.

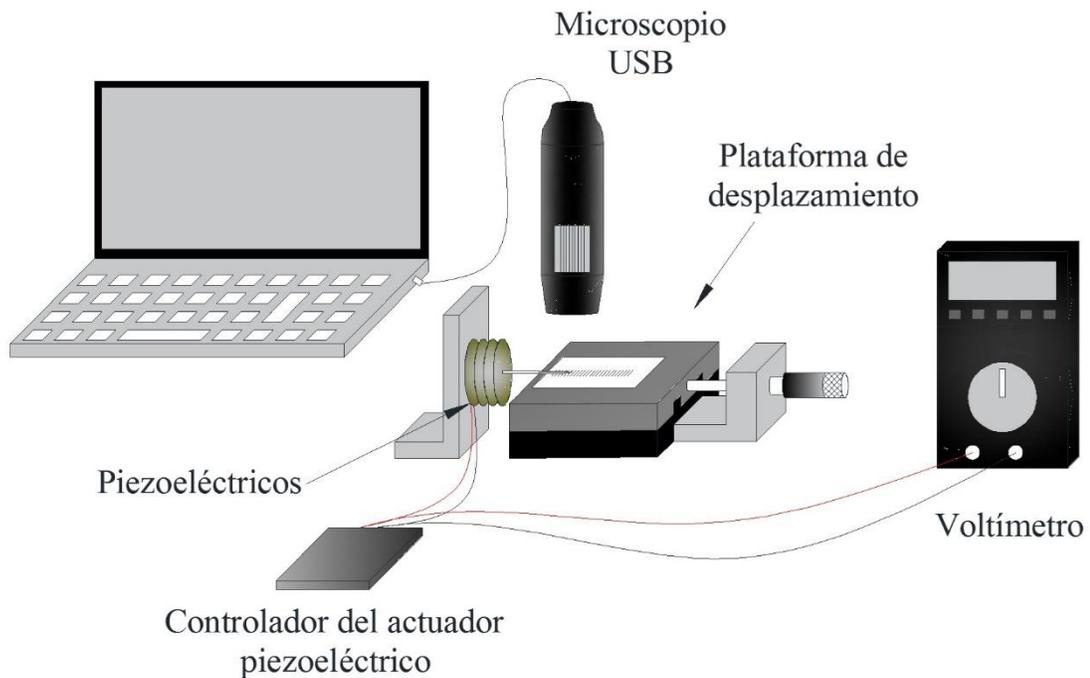
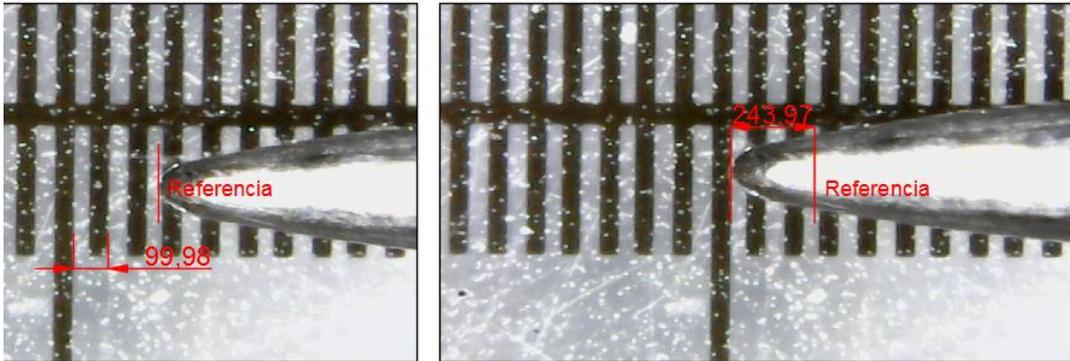


Figura 4.1 Arreglo experimental empleado para registrar el desplazamiento del actuador piezoeléctrico, por el método manual. Elaboración propia.

Realizado el montaje experimental, se procedió a alimentar a los piezoeléctricos con niveles de tensión eléctrica en el rango de 0 V hasta 150 V con incrementos de 10 V. Con incrementos menores, se complica visualizar el desplazamiento generado. En la Figura 4.2, se distingue el desplazamiento de la aguja, generado por el actuador. Una vez alcanzado el valor de 150 V y registrados los valores de desplazamiento obtenidos se procedió a disminuir el valor del potencial hasta los 0 V, con decrementos de 10 V. Nuevamente, se registraron los valores observados.

Los datos conseguidos se presentan en la Figura 4.3. En estas curvas se aprecia claramente un comportamiento con histéresis, puesto que la respuesta del actuador al disminuir el potencial es diferente, con respecto a la respuesta cuando se incrementa. También, se observan pequeñas variaciones en las

tendencias, las cuales se deben al error de medición, ya que al ser un método manual el error puede llegar a ser significativo.



(a)

(b)

Figura 4.2 (a) Posición de referencia de la aguja, con una tensión de alimentación de 0 V. (b) Desplazamiento máximo generado por los piezoeléctricos a 150 V. La distancia de cada franja negra es de 100 μm . Elaboración propia.

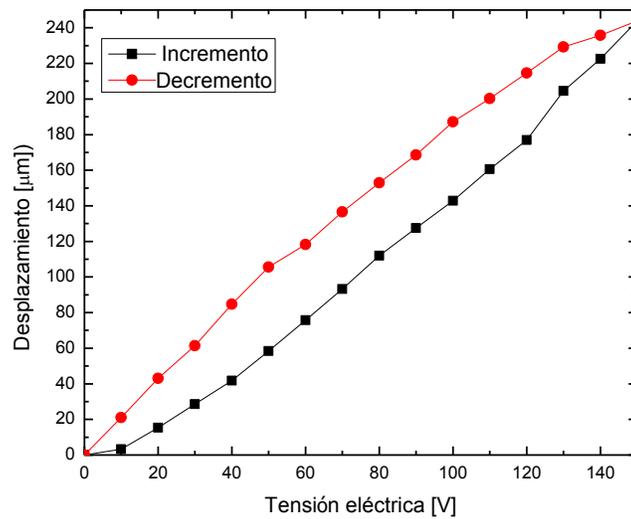


Figura 4.3. Desplazamiento sin carga del actuador piezoeléctrico sometido a diferentes niveles de tensión eléctrica en el rango de 0 V a 150 V. Procedimiento manual. Elaboración propia.

4.1.2 Método de medición de desplazamiento con el sensor óptico

Se procedió a realizar la medición con el sensor óptico de desplazamiento que desarrollamos, con el fin de comparar los resultados y asegurarnos de que, tanto el método de medición manual como el de medición con el sensor son válidos y se obtienen resultados similares.

El arreglo utilizado se presenta en la Figura 4.4, el cual es similar al anterior, pero excluyendo a la regla de calibración y al microscopio USB. Nuevamente, la plataforma de traslación posicionó al actuador en el rango de medición del sensor y se repitió el proceso, pero ahora los valores se desplegaron directamente en la pantalla del sensor, eliminado el error de apreciación del observador, que se manifiesta con el método manual.

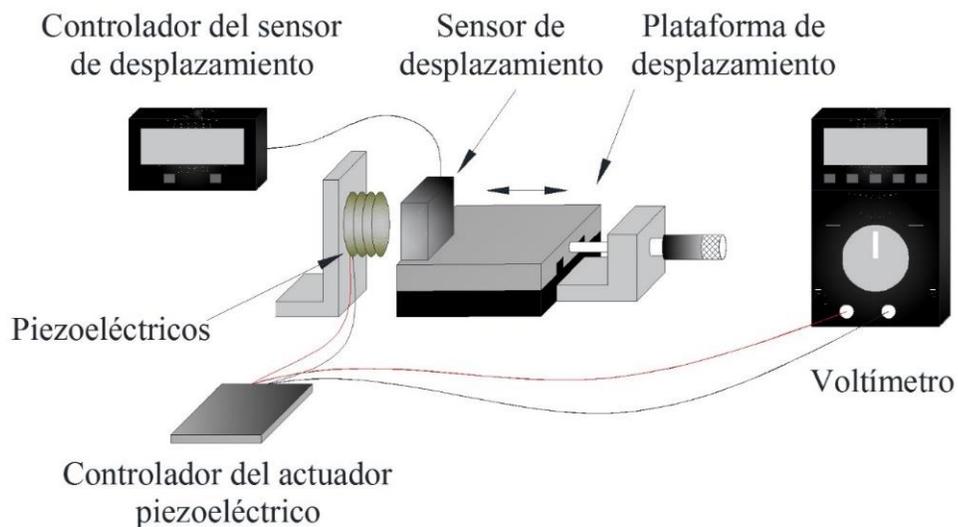


Figura 4.4 Arreglo experimental para registrar el desplazamiento del actuador piezoeléctrico, utilizando el sensor de desplazamiento implementado. Elaboración propia.

Los resultados registrados se muestran en la Figura 4.5. Es notable la diferencia entre los datos recabados por el método manual y el que emplea el

sensor. En esta gráfica formada utilizando el sensor, las pendientes son uniformes, a diferencia de las obtenidas por el procedimiento manual. No obstante, no significa que los datos anteriores sean erróneos, sino que existe un mayor error en ellos.

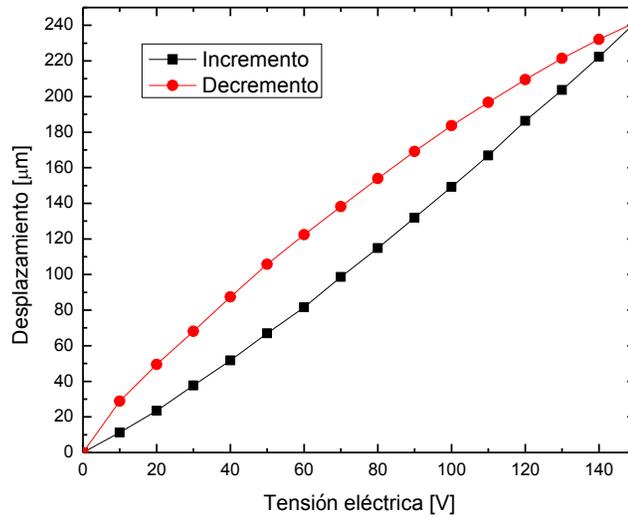


Figura 4.5. Desplazamiento sin carga del actuador piezoeléctrico sometido a diferentes niveles de tensión eléctrica en el rango de 0 V a 150 V. Procedimiento con el sensor óptico. Elaboración propia.

En la Figura 4.6 se comparan los datos registrados de los dos métodos empleados para medir el desplazamiento. A pesar de que los datos no concuerdan en su totalidad, se puede deducir que el método manual ostenta un mayor error de medición. Sin embargo, el coeficiente de correlación indica un comportamiento similar entre los datos.

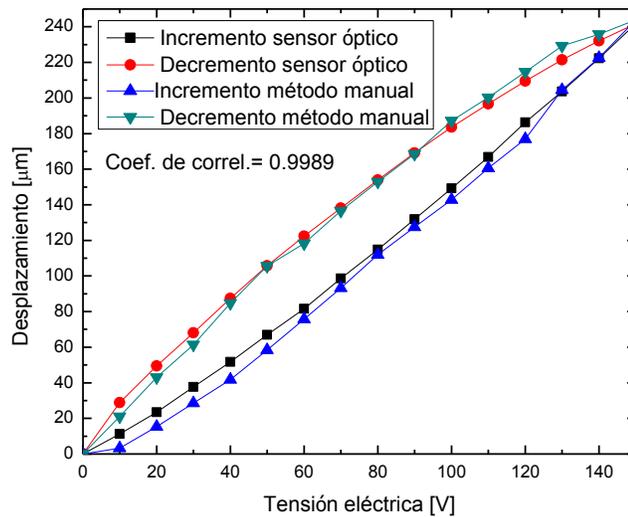


Figura 4.6 Comparación de los datos obtenidos por el método manual y utilizando el sensor óptico en el rango de 0 V a 150 V. Elaboración propia.

Para terminar con esta parte de la caracterización del actuador piezoeléctrico, se determinaron los valores que describen el comportamiento de la histéresis, los cuales son considerados errores en el desplazamiento del actuador piezoeléctrico. Estos se obtienen de la diferencia de los valores observados en el incremento y el decremento de tensión eléctrica; en la Figura 4.7 se exponen dichos valores. En esta figura se observa una curva que se aproxima a una función cuadrática, la cual representa la relación del error de desplazamiento, respecto a la entrada de tensión eléctrica, en donde el error máximo ocurre a 60 V con un valor de 40.8 μm. Cabe mencionar que, estos valores fueron calculados a partir de los datos registrados con el sensor óptico, debido a su mayor exactitud.

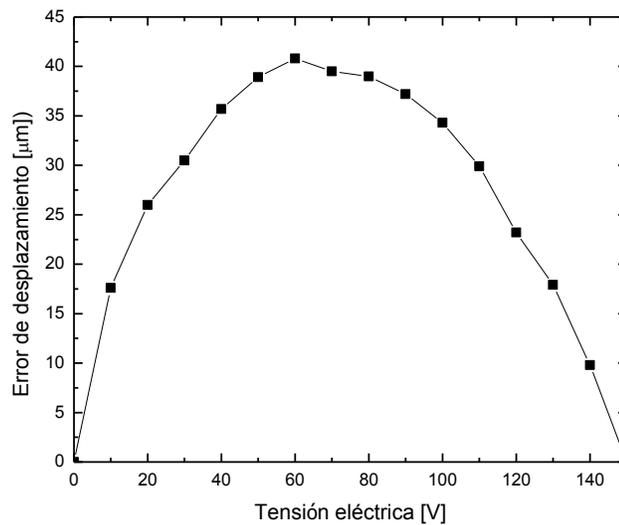


Figura 4.7. Error de desplazamiento que presenta el actuador piezoeléctrico.

4.2 Fuerza del actuador piezoeléctrico

La caracterización del actuador piezoeléctrico desarrollado consistió en calcular experimentalmente la fuerza que es capaz de generar. La técnica que se basó en la aplicación de la ley de Hooke (también conocida como ley de elasticidad Hooke), con la cual es posible calcular la fuerza que se ejerce sobre un resorte, al ser comprimido cierta distancia. Si bien existen instrumentos que miden directamente la fuerza, como los dinamómetros, estos instrumentos de medición manejan diferentes escalas de medición, al desconocer la fuerza del actuador, decidimos utilizar esta técnica que es confiable y, sobre todo, económica.

Una vez seleccionado el resorte de compresión con el tamaño apropiado, se procedió a construir un mecanismo para calcular su constante de proporcionalidad, descrita en la ley de Hooke como constante elástica k .

$$F = -k\Delta l \quad (4.1)$$

Donde F es la de la fuerza y Δl es la variación de la longitud el resorte, k es la constante de proporcionalidad.

4.2.1. Modelado del resorte

El arreglo experimental que se montó se muestra en la Figura 4.8, el cual consiste en una base con un buje que soporta un eje en posición vertical, al cual esta fijo el resorte de compresión. De tal forma que, el eje presione al resorte al aplicarle una fuerza de valor conocido en la parte superior, mientras que, en la parte inferior, se colocó una regla para medir el desplazamiento que el peso provocará.

En este caso, la fuerza se calcula a partir de la segunda ley de Newton la cual establece que la aceleración (a) de un cuerpo es directamente proporcional a la fuerza resultante ($\sum F$) que actúa sobre él, en dirección paralela a esta fuerza. Además, la aceleración generada al aplicar una fuerza neta es inversamente proporcional a la masa del cuerpo (m) (Resnick, Halliday, & Krane, 1993, p. 92), esto es:

$$a = \frac{\sum F}{m} \quad (4.2)$$

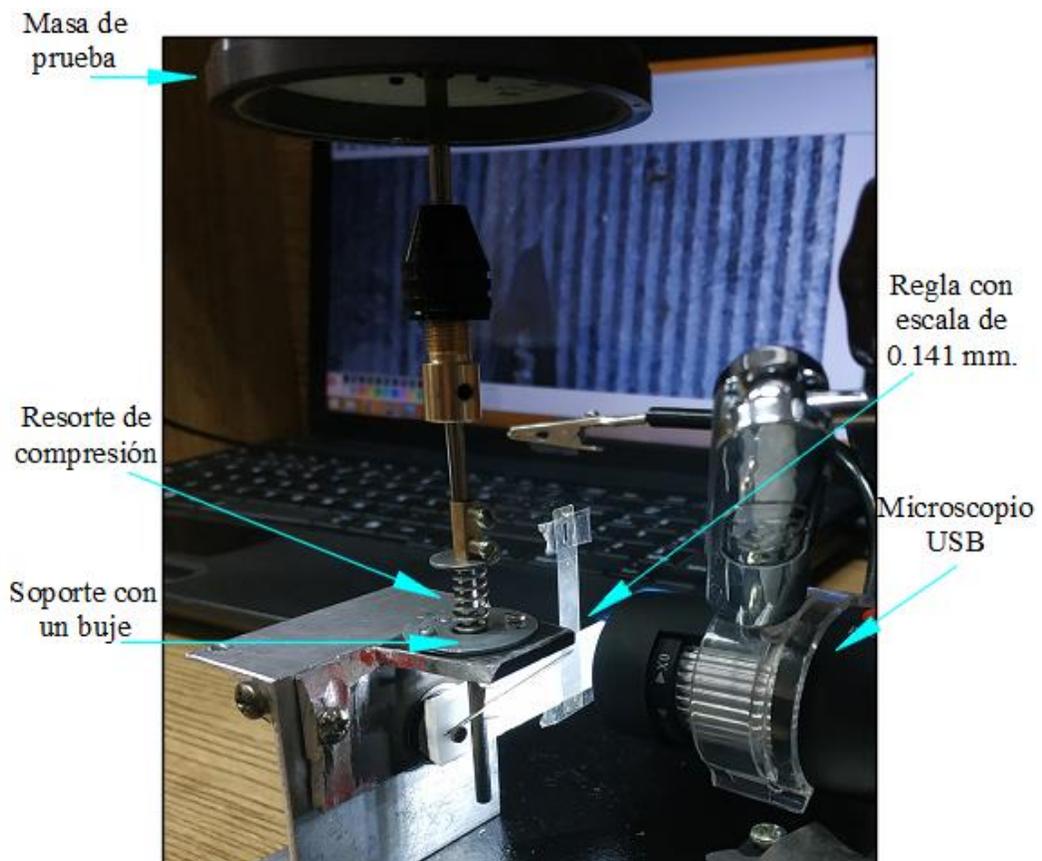


Figura 4.8 Arreglo experimental montado para calcular la constante elástica k del resorte.

Sin embargo, en este caso se está utilizando la fuerza de gravedad que actúa sobre una masa con valor conocido para comprimir el resorte. Por lo tanto, la fuerza que se ejerce en el resorte es el peso W de la masa y la ecuación 4.2, se cambia por:

$$W = mg \quad (4.3)$$

Donde g es valor de la aceleración que la gravedad ejerce sobre un cuerpo y m es la masa del cuerpo.

Relacionado a la ecuación 4.3 con la ecuación de la ley de Hooke (4.1), la ecuación resultante es ahora:

$$W = mg = -k\Delta l \quad (4.4)$$

Debido a que solo nos interesa calcular el valor de la constante de proporcionalidad, la ecuación 4.4. se puede expresar como:

$$k = -\frac{mg}{\Delta l} \quad (4.5)$$

Por consiguiente, solo es necesario conocer el cambio en la longitud del resorte, al aplicar una masa de valor conocido.



(a)

(b)

Figura 4.9 Diferentes objetos utilizados para calcular la constante de proporcionalidad del resorte. (a) Tuerca de hierro de 40.4387 gr y (b) rotor de un motor brushless con una mordaza con masa total de 77.3620 gr. Elaboración propia.

En la Figura 4.9 se muestran las masas de prueba que se utilizaron para calcular la constante de proporcionalidad del resorte. El procedimiento consistió en colocar el segundo objeto, Figura 4.9 (b) en el eje del resorte y registrar el desplazamiento en dicho eje. Este proceso se repitió 12 veces.

Para disminuir el error de medición se descartaron los valores más bajo y alto, de los 12 datos registrados. Con los restantes, se realizó un promedio.

Con el valor obtenido en esta prueba es suficiente para calcular la constante de proporcionalidad del resorte. Sin embargo, para comprobar dicha constante se realizó otra prueba, ahora con dos objetos juntos de la Figura 4.9 (a) y (b). Nuevamente, se tomaron 12 mediciones. Los resultados se presentan en la Tabla 4.1 donde se resaltan los valores excluidos.

Tabla 4.1 Cambio de longitud del resorte de compresión, sometido a dos masas.

Los valores resaltados son los valores más altos y bajos, por lo cual no se consideraron en el cálculo del promedio.

Medición	Δl , [mm] (Masa de 0.077362 kg)	Δl , [mm] (Masa de 0.1178007 kg)
1	0.6926	1.2682
2	0.6716	1.2291
3	0.8008	1.2432
4	0.8583	1.1969
5	0.8567	1.2926
6	0.8714	1.2380
7	0.8222	1.1681
8	0.7908	1.0500
9	0.8438	1.2834
10	0.8288	1.2958
11	0.7977	1.1909
12	0.8328	1.1964
Promedio	0.81245	1.23068

Ahora bien, empleando la ecuación 4.5 con el valor promedio del cambio de la longitud del resorte de 0.00081245 m, al ser sometido a una masa de

0.077362 kg y un valor de g de -9.8 m/s^2 , obtenemos la constante de proporcionalidad del resorte, $k = 934.1143701 \text{ N/m}$. Para confirmar el valor de k , se aplica este valor al cálculo teórico de la variación en la longitud, y se compara con el resultado experimental, obteniéndose un error entre ambos valores de 0.521368 %, el cual es sumamente bajo. Se presenta un resumen de los valores obtenidos en la Tabla 4.2.

Tabla 4.2 Cálculo teórico de la constante de proporcionalidad de resorte, k .

<i>Valor promedio de</i> $\Delta l, [\text{m}]$	Masa, [kg]	Ecuación 4.5	$k, [\text{N/m}]$
0.00081245	0.077362	$k = -\frac{mg}{\Delta l}$	934.1143701

Tabla 4.3 Cálculo teórico del valor de Δl para confirmar la constante de proporcionalidad de resorte, k .

$k, [\text{N/m}]$	Masa, [kg]	Ecuación 4.6, obtenida de la ec, 4.5	<i>Valor de</i> $\Delta l, [\text{m}]$
934.1143701	0.1178007	$\Delta l = -\frac{mg}{k}$	0.00123713

Tabla 4.4 Comparación entre el cálculo teórico y el cálculo experimental de Δl .

$k, [\text{N/m}]$	Cálculo teórico de $\Delta l, [\text{m}]$	Cálculo experimental de $\Delta l, [\text{m}]$	Error %
934.1143701	0.00123713	0.00123068	0.521368 %.

Cabe mencionar que, para tener un resultado confiable, el eje del resorte se colocó lo más cercano posible a una posición vertical. Así mismo, los

objetos de prueba se situaron en el centro del eje del resorte, esto para evitar componentes de fuerza no deseados. También, se despreció la masa del eje, pues al ser de un bajo valor, comparado con las masas de prueba, su influencia en los resultados es mínima, lo cual se aprecia con el pequeño valor del error conseguido.

4.2.2. Determinación de la fuerza del actuador

Para medir la fuerza que el actuador piezoeléctrico es capaz de producir y el desplazamiento que logrará, se montó el arreglo experimental, que se ilustra en la Figura 4.10. Se puede observar que, el mecanismo del resorte se encuentra en posición horizontal y alineado con el centro del actuador piezoeléctrico. También, se colocó una regla de calibración (1) para registrar la carrera del actuador piezoeléctrico y otra regla (2) para registra el valor del cambio de longitud del resorte.

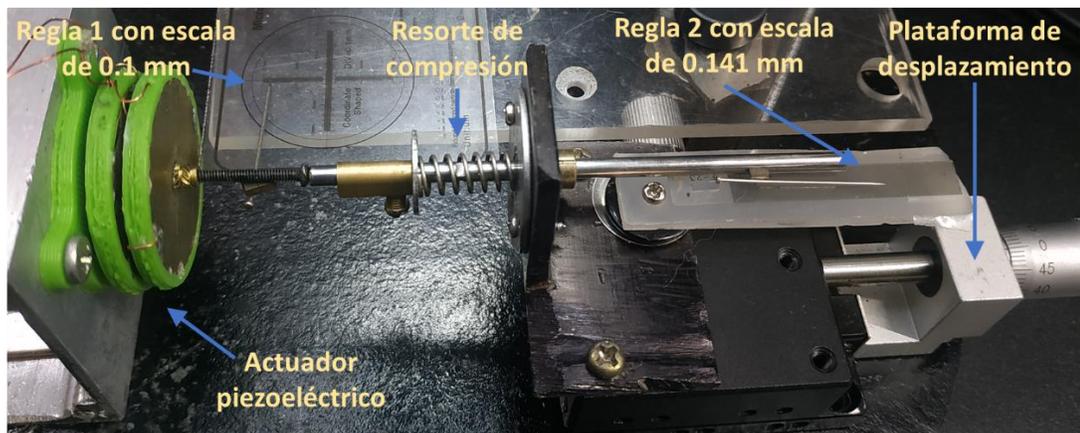


Figura 4.10 Arreglo experimental utilizado para medir la fuerza de bloqueo del actuador piezoeléctrico. Elaboración propia.

El procedimiento consistió, en energizar al actuador piezoeléctrico con la máxima tensión eléctrica de alimentación permitida, 150 V, permitiendo que se

elongue libremente, es decir sin ninguna carga mecánica aplicada. Lo siguiente, fue poner en contacto al eje del resorte con el centro del actuador, con ayuda de la plataforma de desplazamiento, teniendo cuidado de no ejercer presión en la unión de las piezas, solo asegurando un ligero contacto entre ellas. En este punto, se registró la posición inicial tanto del resorte como la carrera del actuador, considerando ambos valores como de referencia. En seguida, se comenzó a desplazar al mecanismo, que alberga al resorte, por medio de la plataforma de traslación, hasta que el actuador piezoeléctrico fue comprimido a su posición original.

Se monitoreó a este proceso con el microscopio. La carrera del actuador se midió mediante la regla de calibración. Finalmente, se registró la **compresión del resorte de 2.045 mm**. Este valor es importante para calcular la fuerza del actuador piezoeléctrico.

El cambio de la longitud del resorte que fue causada al conseguir regresar al actuador piezoeléctrico a su posición original se debe a la fuerza aplicada al actuador, la cual fue calculada usando a la ecuación 4.1, su valor es de 1.9102 N. A esta fuerza se le conoce como *fuerza de bloqueo del actuador piezoeléctrico* y se define como la máxima fuerza que puede ser generada por el piezoeléctrico.

Conociendo la magnitud de la fuerza de bloqueo y el máximo desplazamiento libre del actuador piezoeléctrico, es posible construir la gráfica de trabajo del actuador piezoeléctrico, como se muestra en la Figura 4.11.

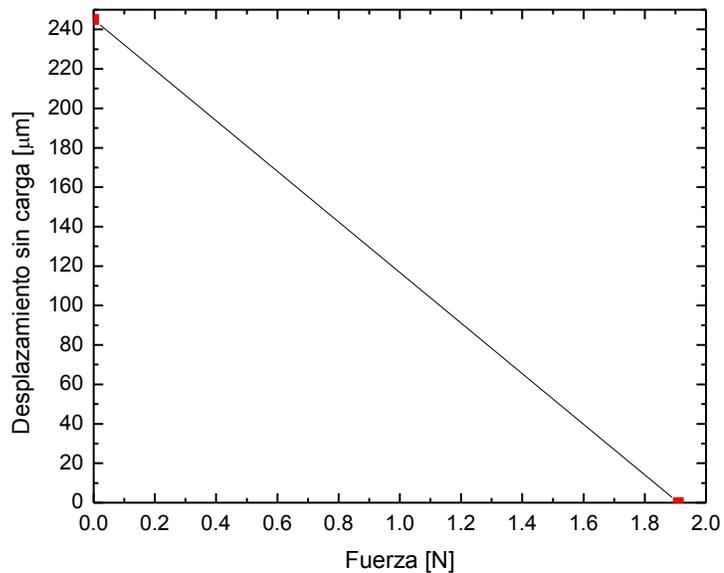


Figura 4.11 Gráfica de trabajo del actuador piezoeléctrico desarrollado.
Elaboración propia.

4.3 Simulación de la micropinza en ANSYS™

Se utilizó el software ANSYS™ para optimizar los elementos del diseño de la micropinza por el método de Análisis por Elemento Finito (FEA), en el entorno de Workbench 16.1. Los parámetros bajo análisis fueron: desplazamiento de las mandíbulas (relacionada con entrada de desplazamiento generada por el actuador piezoeléctrico) y el estrés máximo en las uniones flexibles.

Como ya se mencionó, el material utilizado para fabricar la pinza es PLA. Para poder llevar a cabo la simulación del comportamiento de la micropinza es necesario conocer ciertos parámetros del material como: el coeficiente de Poisson, el módulo de Young y la densidad. Estos parámetros rigen el comportamiento del material al ser sometido a una fuerza. También es

importante conocer al valor de la tensión de rotura, puesto que de este parámetro dependerán las mínimas dimensiones de las uniones flexibles de la micropinza. En la Tabla 4.5 se presentan los valores de dichos parámetros.

Tabla 4.5 Parámetros del PLA.

Parámetros	Valores (Farah, Anderson, & Langer, 2016) (Mariaca-Beltrán, et al., 2017)
Coeficiente de Poisson	0.36
Módulo de Young	3500 MPa
Densidad	1250 kg/m ³
Tensión de rotura	59 MPa

En la Figura 4.12 (a), se exhiben los resultados de la deformación de la pinza al aplicar un desplazamiento de entrada de 50 μm con una fuerza de 1.88 N. Estos resultados se resumen en la Tabla 4.6, junto con el valor obtenido para la tensión máxima, a partir de la simulación, Figura 4.12 (b).

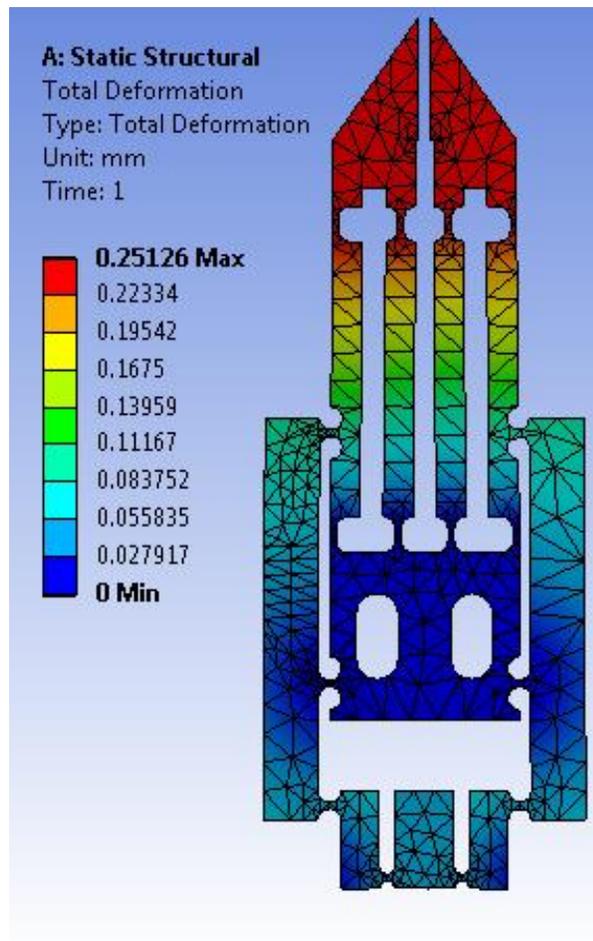
Tabla 4.6 Parámetros de la micropinza, obtenidos de la simulación.

Parámetros	Valores
Desplazamiento de entrada	50 μm
Fuerza de entrada	1.88 N
Desplazamiento producido en cada mandíbula	251 μm
Factor de amplificación	~ 5.
Tensión mecánica máxima obtenida	11.813 MPa

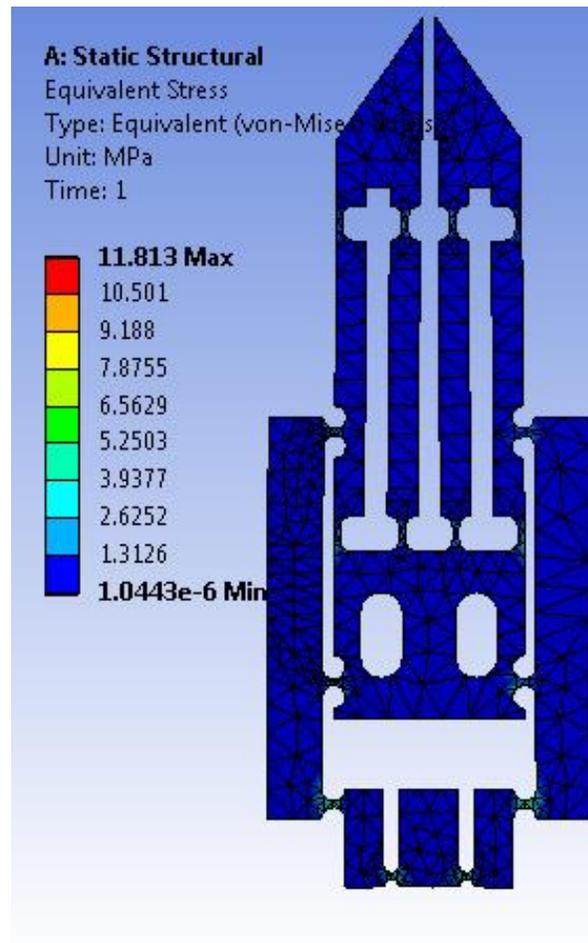
Es importante señalar que, el desplazamiento de las mandíbulas se mantiene paralelo a la dirección de cierre y apertura, es decir, no se genera un

movimiento en dirección perpendicular al cierre de las mandíbulas. Lo anterior, favorece al proceso de manipulación de microobjetos.

En la Figura 4.12 (b) se muestra la distribución de la tensión mecánica en el cuerpo de la micropinzza cuando es accionada, es notable que la tensión mecánica es mayor en las partes con adelgazamientos que actúan como uniones mecánicas. Sin embargo, la tensión mecánica máxima fue de 11.813 MPa, valor por debajo de la tensión de ruptura del material PLA (59 MPa).



(a)



(b)

Figura 4.12. (a) Comportamiento de la deformación en las partes flexibles de la pinza. (b) Distribución de la tensión mecánica en la pinza. Elaboración propia.

De los resultados de la simulación, se observa que las condiciones del diseño de las mandíbulas de la micropinza tienen una apertura apropiada para manipular objetos en un amplio rango de tamaños. Además, las dimensiones de las uniones flexibles son adecuadas, ya que fueron establecidas después de varias simulaciones con diferentes dimensiones, por lo que no se tiene riesgo de superar la tensión de ruptura al aplicar desplazamientos del orden de 50 μm en la entrada de la micropinza.

4.4 Determinación de los desplazamientos de entrada y salida de la micropinza

En la Figura 4.13 se proporciona una fotografía de la implementación física del esquema de medición.

El arreglo experimental está compuesto principalmente por:

- Un circuito controlador de voltaje: desarrollado para alimentar al actuador piezoeléctrico, que genera el desplazamiento en la entrada de la micropinza
- El sensor de desplazamiento lineal: El mismo sensor pick-up, usado para medir el desplazamiento del actuador piezoeléctrico, mide el desplazamiento de la micropinza.
- Un microscopio óptico genérico tipo industrial: Usado para capturar el movimiento de las mandíbulas de la micropinza.
- Una plataforma de desplazamiento micrométrico: Útil para posicionar el sensor pick-up a una distancia adecuada para enfocar al objeto, que permite realizar la medición.

El sensor de desplazamiento implementado requiere de una superficie altamente reflejante, para poder registrar el desplazamiento. Estas superficies fueron implementadas con piezas de un disco duro de almacenamiento, en los puntos de medición. La plataforma de desplazamiento micrométrica se usó para posicionar al sensor de desplazamiento a la distancia de detección de ~2 mm, donde el rango de detección está presente.

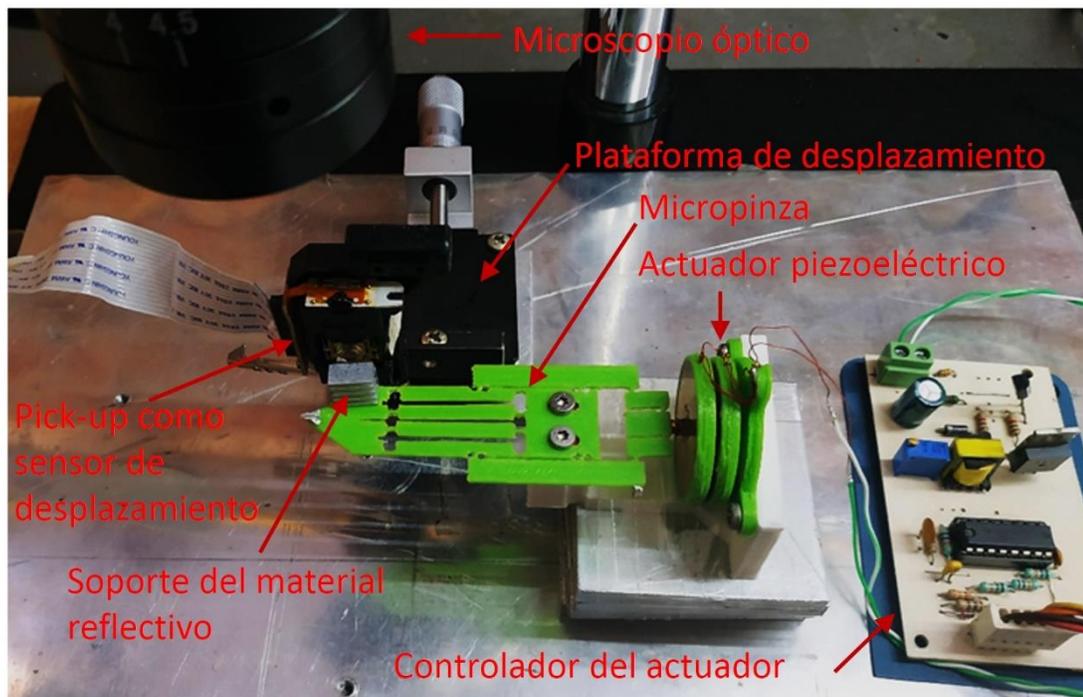


Figura 4.13 Implementación física del arreglo experimental para medir el desplazamiento de las mandíbulas de la micropinza. Elaboración propia.

4.4.1. Desplazamiento de entrada de la micropinza

El primer paso para estudiar el desempeño de la micropinza fue registrar el desplazamiento en la entrada, esto es, en el mecanismo flexible tipo puente; equivalente al movimiento que el actuador piezoeléctrico es capaz de generar cuando se acopla la estructura de la micropinza como carga mecánica.

La Figura 4.14, muestra la medición del desplazamiento en la entrada de la micropinza. Los resultados de este experimento se muestran en la Figura 4.15. Como era de esperarse el efecto de histéresis del actuador piezoeléctrico persiste de forma similar al caso de desplazamiento sin carga. También se observa una reducción en el máximo desplazamiento del actuador piezoeléctrico sin carga, mostrado en la Figura 4.6, que cambia de 241.7 μm

a 150 V hasta 58.6 μm con la misma diferencia de potencial aplicado, pero ahora con la carga mecánica que ostenta la micropinza.

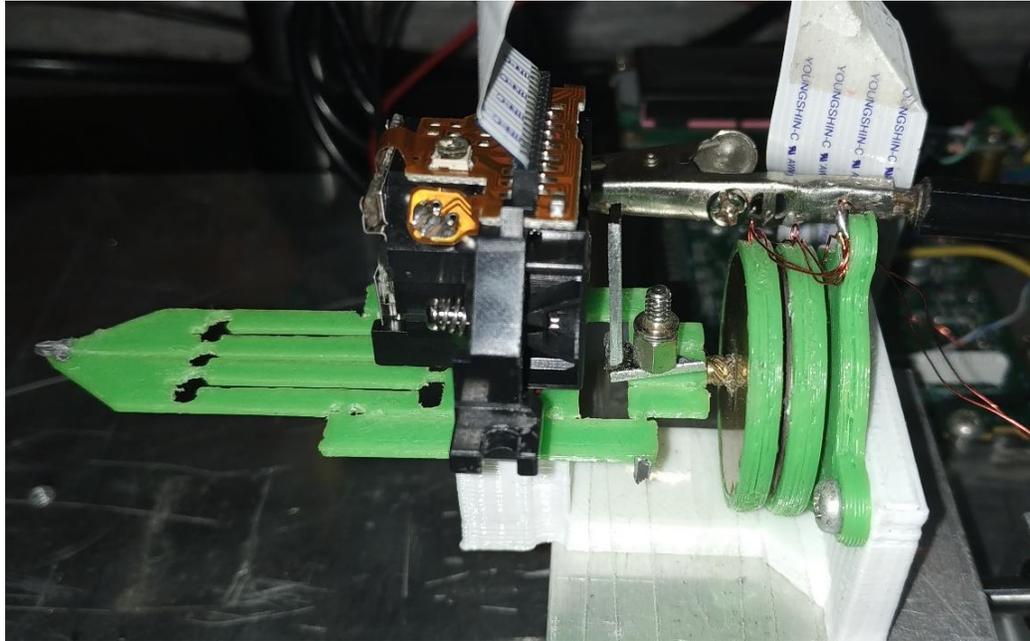


Figura 4.14 Medición del desplazamiento en la entrada de la micropinza.
Elaboración propia.

Los resultados de este experimento se muestran en la Figura 4.15. Como era de esperarse el efecto de histéresis del actuador piezoeléctrico persiste de forma similar al caso de desplazamiento sin carga. También se observa una reducción en el máximo desplazamiento del actuador piezoeléctrico sin carga, mostrado en la Figura 4.6, que cambia de 241.7 μm a 150 V hasta 58.6 μm con la misma diferencia de potencial aplicado, pero ahora con la carga mecánica que ostenta la micropinza.

Tal reducción es causada principalmente por la poca fuerza del actuador piezoeléctrico, la rigidez en las uniones flexibles que crean un efecto de carga tipo resorte, y el efecto de la precarga creada al acoplar la micropinza

con el actuador. Por lo tanto, es importante un correcto diseño de las uniones flexibles, para lograr una transmisión del movimiento con mínima fuerza, pero a la vez que no se comprometa la integridad estructural del mecanismo.

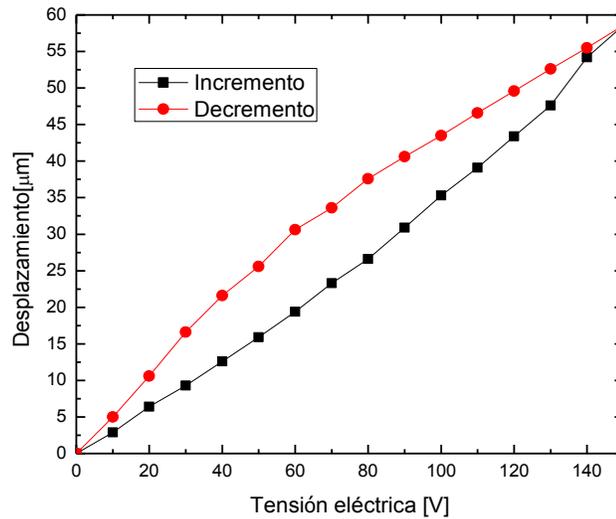


Figura 4.15 Desplazamiento del mecanismo flexible tipo puente generado por el actuador piezoeléctrico en la entrada.

4.4.2. Desplazamiento de salida de la micropinza (mandíbulas)

Para caracterizar el desplazamiento de las mandíbulas de la micropinza, producido cuando se aplica el desplazamiento en la entrada del mecanismo flexible, debido al actuador piezoeléctrico, se usó el arreglo experimental mostrado en la Figura 3.1, del capítulo 3. Se muestra un acercamiento del esquema de medición en la Figura 4.16.

El comportamiento del desplazamiento en la mandíbula derecha de la micropinza se muestra en la Figura 4.17, el cual es similar al desplazamiento registrado en la entrada de la micropinza, presentando de igual forma el efecto de histéresis. En este caso, el desplazamiento de la mandíbula alcanza un

valor 191 μm a 150 V. Por lo tanto, el valor experimental del factor de amplificación es de 3.25.



Figura 4.16 Acercamiento de sistema de medición de desplazamiento en las mandíbulas de la micropinza. Elaboración propia.

Con el propósito de analizar el comportamiento simétrico en la micropinza se realizó la medición del desplazamiento de la mandíbula izquierda, los resultados se muestran en la Figura 4.18. Los resultados indican que efectivamente, existe cierta simetría en el comportamiento de las mandíbulas. Esto se aprecia al comparar a las Figuras 4.17 y 4.18. Sin embargo, si observamos detalladamente ambas figuras, encontramos diferencias significativas, tales como el valor máximo alcanzado en el desplazamiento de cada mandíbula. Estas diferencias se resumen en la Tabla 4.7.

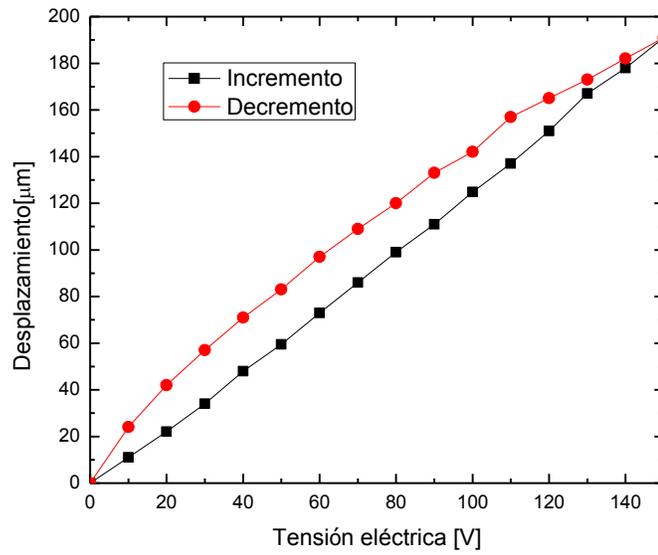


Figura 4.17 Desplazamiento de la mandíbula derecha de la micropinza.
Elaboración propia.

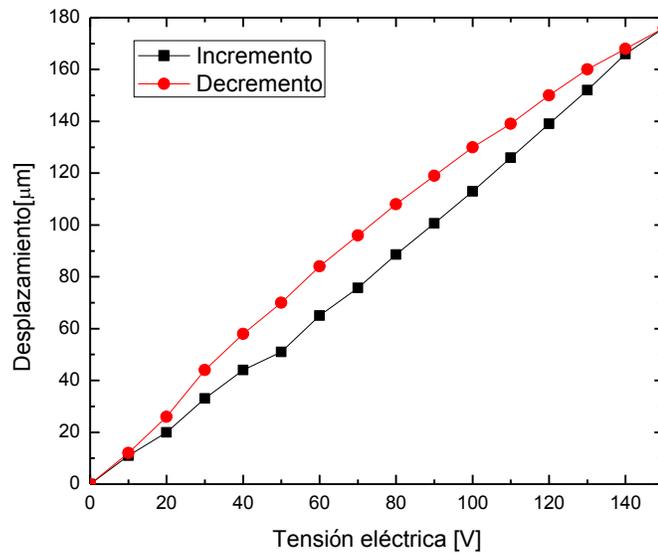


Figura 4.18 Desplazamiento de la mandíbula izquierda de la pinza.
Elaboración propia.

Tabla 4.7. Comparación entre los desplazamientos en las mandíbulas.

Desplazamiento mandíbula derecha	Desplazamiento mandíbula izquierda	Error %
191 μm	176 μm	7.85 %

Por otro lado, el error en el desplazamiento que causa el efecto de histéresis se aprecia en la Figura 4.19. En el caso de la mandíbula derecha, el error de desplazamiento es mayor, alcanzando un valor de 24 μm a 60 V, mientras que el error en el desplazamiento de la mandíbula izquierda es de 20.3 μm a 70 V.

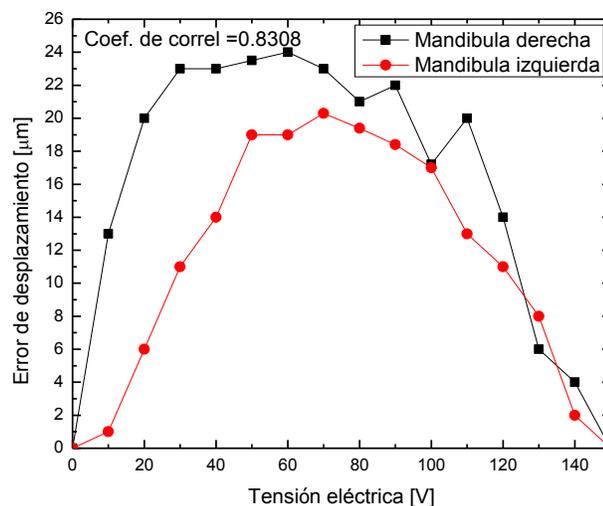


Figura 4.19 Comparación del error de desplazamiento entre la mandíbula izquierda y derecha de la micropinza.

4.5 Prueba de sujeción de objetos micrométricos

La prueba el funcionamiento de la micropinza consistió en, sostener diversos objetos comunes de diferente dimensión, pero dentro del rango de

agarre de la micropinza, es decir, objetos con dimensiones menores a $365\ \mu\text{m}$ (suma del desplazamiento de ambos brazos de la micropinza).

El procedimiento consistió, primero en mantener la micropinza en una posición fija y estable. Posteriormente, se acercaron diferentes elementos en la zona de cierre de las mandíbulas. Una vez posicionados se procedió a alimentar a la micropinza para cerrar las mandíbulas y sujetar los elementos. Cabe mencionar que, cada elemento requirió una diferencia de potencial diferente. En la Figura 4.20 se muestran las capturas de los diferentes elementos atrapados firmemente por la micropinza.

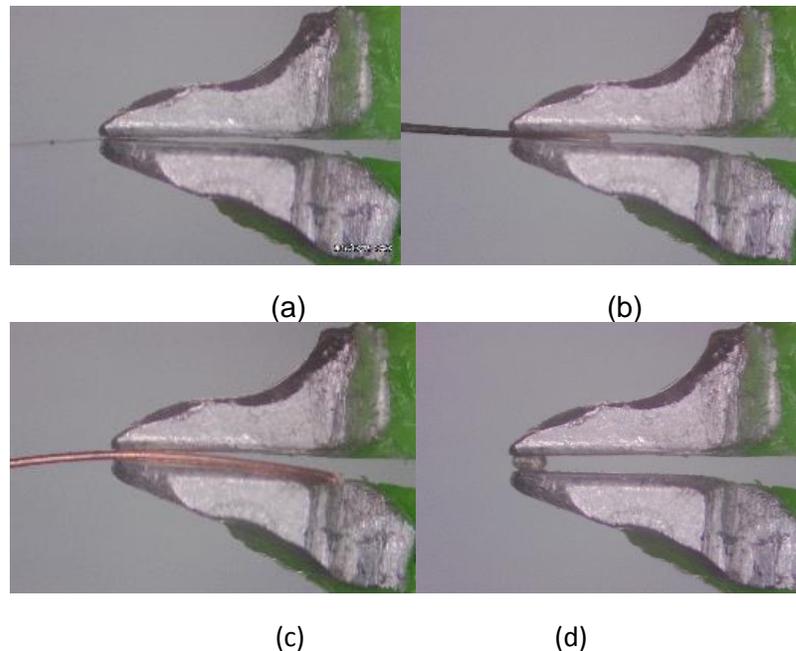


Figura 4.20 Operación de la micropinza sosteniendo diferentes muestras:

- (a) cabello de $20\ \mu\text{m}$ de espesor, (b) cabello de $70\ \mu\text{m}$ de espesor,
- (c) alambre de cobre de $130\ \mu\text{m}$ de espesor y (d) un grano de azúcar.

Elaboración propia.

Estas pruebas validan el rendimiento de la micropinza para la operación de sujeción. Se comprobó que las mandíbulas sostienen firmemente todos los

elementos bajo prueba, a pesar de la aparente pequeña fuerza del actuador piezoeléctrico (menor a 1.91 N) y el material estructural de la micropinza.

Se aprecian las siguientes características favorables en el uso de la micropinza:

- La estabilidad temporal de la retención: porque en el caso de la observación de la muestra u objeto, durante un período prolongado, podría realizarse sin problema.
- La temperatura en las mandíbulas no cambia considerablemente. Se sugiere realizar la operación a temperatura ambiente.
- La posibilidad de establecer la apertura inicial del micropinza. La separación inicial más grande permite contener muestras u objetos de mayores dimensiones, mientras que una separación inicial más pequeña podría ser útil para sujetar con mayor fuerza los objetos bajo prueba.

4.6 Cálculo de fuerza en las mandíbulas de la micropinza

Para calcular la fuerza que las mandíbulas de la micropinza pueden ejercer sobre los objetos a manipular se recurrió a un método sencillo. Sujetar con la micropinza varios objetos de diferente masa.

El procedimiento que se siguió se presenta continuación.

- Se escogieron varios objetos de masa menor a 1 gr,
- Se ordenaron de menor a mayor, de acuerdo el valor de su masa.
- Por medio de un alambre de cobre, de longitud pequeña (≈ 2 cm), se ataron individualmente cada objeto, dejando una sección del alambre libre. El grosor del alambre fue cercano a la máxima separación de las mandíbulas de la micropinza.

- Se procedió a sujetar con la micropinza el objeto de menor masa, por medio del alambre unido previamente.
- El paso anterior se repitió con los objetos siguientes, de mayor masa, hasta que la pinza no fue capaz de sostener un objeto de mayor masa. Cabe mencionar que, la sujeción de cada objeto requirió de diferente potencial de alimentación, incrementándose con los objetos de mayor masa.

Por consiguiente, el objeto de mayor peso que la micropinza logró sostener corresponde a la suma de la máxima fuerza que las mandíbulas pueden ejercer y a la fuerza de fricción estática entre las paredes de las mandíbulas y el alambre. Considerado un área de contacto mínimo entre el alambre de cobre y las puntas de la micropinza, debido a la geometría cilíndrica del alambre, podemos asumir que la fuerza de fricción estática es mínima y, por lo tanto, despreciarla.

En la Figura 4.21 se muestra a la micropinza con el objeto de mayor masa que fue capaz de sostener y, en la Tabla 4.8, se presentan el valor de la fuerza en las mandíbulas de la micropinza.

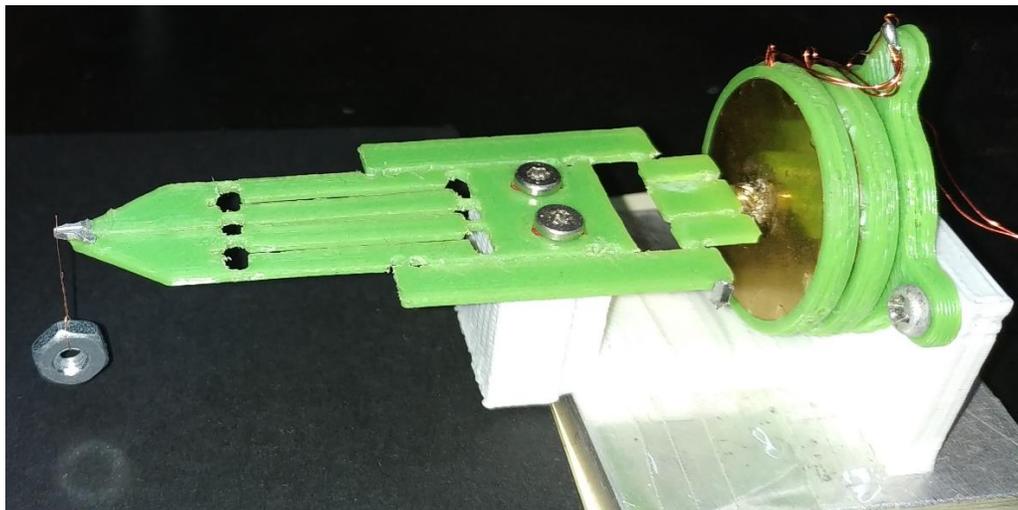


Figura 4.21 Micropinza sujetando una tuerca para estimar la fuerza de salida presente en las mandíbulas. Elaboración propia.

Tabla 4.8. Peso del objeto sujetado por la micropinza y fuerza ejercida por las mandíbulas de la micropinza.

Masa del objeto sujetado	Peso del objeto sujetado. Ecuación 4.3	Fuerza en las mandíbulas
902.24 mg	-8.84 mN	8.84 mN

4.7 Discusión de resultados

En esta sección analizaremos los resultados obtenidos de la caracterización del actuador piezoeléctrico, conformado por un arreglo de 4 piezoeléctricos tipo zumbadores, y los resultados tanto simulados como experimentales, respecto al comportamiento de los movimientos de la micropinza.

4.7.1. Desempeño del actuador piezoeléctrico

Sobre el comportamiento del actuador piezoeléctrico respecto a su desplazamiento en el rango de 0 V a 150 V, mostrado en la Figuras 4.6, podemos afirmar que el comportamiento cumple con la característica de un material piezoeléctrico, al manifestarse el efecto de histéresis.

Una observación interesante del comportamiento del actuador piezoeléctrico es que no necesita de una precarga externa que lo ayude a regresar a su posición de inicio, cuando se disminuye la alimentación a 0 V. Generalmente, la mayoría de los actuadores piezoeléctricos comerciales recomiendan colocar una precarga. Eso se debe a que ellos no tienen la misma fuerza de tracción y empuje, la fuerza de empuje es mucho mayor a la fuerza

de tracción, por lo es necesario colocar una precarga para obtener un rendimiento simétrico (APC, 2018). La razón del anterior comportamiento se debe a que, cada elemento piezoeléctrico tipo zumbador incorpora una precarga en su diseño, la cual es el disco de latón. Cuando el material piezoeléctrico trata de deformarse, la rigidez del disco de latón lo impide, sin embargo, la fuerza que genera el disco piezoeléctrico es suficiente para deformar el disco de latón.

Como se mencionó en la sección de diseño del actuador piezoeléctrico, la deformación del disco de latón crea un efecto de amplificación. Esto lo podemos comprobar con el valor máximo obtenido del desplazamiento de cada piezoeléctrico tipo zumbador, el valor máximo en la Figura 4.5 indica que fue de 241.7 μm , lo que significa que cada elemento piezoeléctrico aportó en promedio un desplazamiento de 60.4 μm . Tal valor es grande, comparado con el desplazamiento de algunos actuadores piezoeléctricos comerciales.

En la Tabla 4.9, se muestran las características de operación relevantes de algunos actuadores piezoeléctricos de la marca THORLABS™, cuyos productos son de alta calidad. Se observa que, los desplazamientos de los actuadores comerciales no alcanzan ni la mitad del valor registrado por el actuador que desarrollamos. El actuador que más movimiento lineal genera alcanza un valor de 100 μm . Así pues, es válido afirmar que el actuador piezoeléctrico que implementamos supera en desplazamiento a la mayoría de los actuadores piezoeléctricos del mercado.

Tabla 4.9 Comparación entre diferentes modelos de actuadores piezoeléctricos comerciales y el actuador piezoeléctrico que implementamos. (THORLABS, Piezoelectric Actuators, s.f.).

Modelo (THORLABS)	Desplazamiento, [μm]	Dimensiones [mm]	Alimentación [V]	Fuerza de bloqueo [N]	Precio [USD]
Actuador con 4 zumbadores	241.7	Diámetro: 30 Longitud: 15	150	1.91	≈ 5.00
PK44RB5P2	9.5 ± 15 %	Diámetro externo: 6.0 ± 0.1 Diámetro interno: 2.5 ± 0.1 Longitud: 13.0 ± 0.1	150	930	109.04
PC4QR	20.0 ± 11%	6.5 x 6.5 x 20.0	150	1000	169.89
PK2FVP2	44.8	5.0 x 5.0 x 39.8	75	1000	216.42
PK4GA7P1	100.0	7.0 x 7.0 x 93.5	150	1960	581.10

Con respecto a la fuerza que nuestro actuador piezoeléctrico genera es indiscutibles que es superado ampliamente por los actuadores mostrados en la Tabla 4.9 y, posiblemente por actuadores de otras marcas. A pesar de la poca fuerza que genera el actuador piezoeléctrico desarrollado, su ventaja con respecto a los señalados es su elevado desplazamiento.

Generalmente, se diseñan mecanismos flexibles que amplifican el movimiento de los actuadores piezoeléctricos, sin embargo, estos mecanismos de amplificación de movimiento necesitan una fuerza para realizar su función y la fuerza requerida es mayor, cuanto mayor sea el factor de amplificación del mecanismo. Esto es, se dedica gran parte de la fuerza en el mecanismo de amplificación. Por lo tanto, en ciertas aplicaciones es una ventaja que un actuador piezoeléctrico genere un amplio desplazamiento,

pues se puede omitir el mecanismo de amplificación de movimiento y utilizar el movimiento lineal directamente, en consecuencia, se reduce tanto el costo como las dimensiones del sistema.

Por otro lado, se ha demostrado que la fuerza que genera es capaz de mover un mecanismo flexible de un material con baja rigidez como el PLA. Lo que significa que, el actuador piezoeléctrico implementado tiene altas posibilidades de ser utilizado en mecanismo flexibles que requieran poca fuerza o mover objetos directamente.

Una característica adicional que hace más atractivo al actuador piezoeléctrico desarrollado es su bajo costo de fabricación, tan solo de 5 dólares. Además, es posible reducir más su costo, si se adquieren los materiales por mayoreo.

4.7.2. Desempeño de la micropinza

El comportamiento de la micropinza reveló una diferencia entre los resultados experimentales y los simulados en ANSYS™. En la Tabla 4.10 se presenta una comparación de ambos resultados. En la simulación de la micropinza, se indujo un desplazamiento de 50 μm en la entrada. Este valor se eligió considerando el desplazamiento real de un actuador piezoeléctrico comercial y sin tener en cuenta el desplazamiento que provocaría el actuador piezoeléctrico, que se desarrolló, en la entrada de la micropinza. La decisión de inducir dicho valor de desplazamiento en la entrada se debe al interés de obtener el factor de amplificación de los mecanismos flexibles de la micropinza.

El factor de amplificación y los resultados de la distribución del estrés en la micropinza fueron suficientes para considerar como funcional al diseño de la micropinza.

Como se observa en la Tabla 4.10, existe una discrepancia entre el factor de amplificación obtenido experimentalmente y el obtenido de la simulación, el valor del error es de 37.64 %. Algunas posibles causas de la diferencia notable entre los resultados son:

- Los errores en las dimensiones de la micropinza, atribuidos a la técnica de fabricación FDM y la precisión de la impresora.
- Es posible que existan doblamientos no deseados en los elementos de amplificación que influyen en la disminución del factor de amplificación de la micropinza.

Tabla 4.10 Comparación de los resultados obtenidos de forma experimental y simulado.

Medición	Resultado experimental	Resultado simulado
Desplazamiento en la entrada	58.6 μm	50 μm
Mandíbula derecha	191 μm	251 μm
Mandíbula izquierda	176 μm	251 μm
Apertura total de las mandíbulas	367 μm	502 μm
Factor de amplificación	6.26	10.04

Otra observación importante del comportamiento de la micropinza, que resalta de la Tabla 4.10, es el diferente desplazamiento que mostró cada mandíbula de la micropinza. La diferencia corresponde a un 7.85 %, este valor indica que la transmisión de movimiento por los mecanismos flexibles no se fue simétrico. Por lo tanto, hay dos posibilidades:

- Los mecanismos flexibles no son totalmente simétricos o

- La entrada de movimiento no fue aplicada exactamente en el punto medio del mecanismo flexible tipo puente de la micropinza.

No obstante, cual sea la razón que genere esta desviación, es posible corregir este comportamiento, una vez determinada la diferencia de desplazamientos en las mandíbulas, con una solución sencilla pero laboriosa, desplazando ligeramente el punto de contacto del actuador con la entrada de la micropinza hacia el lado de la mandíbula con menor desplazamiento.

Para terminar con este análisis, comparamos el desplazamiento de la micropinza de bajo costo con algunas micropinzas con actuación similar, reportadas en la literatura reciente, algunas de ellas se mencionan en los antecedentes de esta tesis. En la Tabla 4.11, se incluyen las micropinzas que emplean actuadores piezoeléctricos y que están fabricadas en una escala milimétrica.

Como se muestra en la Tabla 4.11, el desplazamiento de la micropinza fabricada en PLA tiene una apertura de las mandíbulas superior a la mayoría de las micropinzas, a excepción del diseño de Yang, et al. Tal particularidad se debe al amplio desplazamiento del actuador piezoeléctrico implementado y a la alta flexibilidad del material de construcción.

El bajo factor de amplificación de la micropinza implementada también hace contraste con los valores de las demás micropinzas. Una ventaja de un actuador piezoeléctrico capaz de generar un amplio desplazamiento en la entrada del mecanismo de una micropinza es que no necesita sofisticados mecanismos de amplificación de movimiento, pues como se mencionó anteriormente, un elevado factor de amplificación resta fuerza al actuador piezoeléctrico, además de ocupar más espacio.

Tabla 4.11 Comparación de diferentes micropinzas reportadas en la literatura.

Micropinza	Material	Factor de amplificación	Apertura total en las mandíbulas [μm]	Fuerza de salida [mN]
Micropinza desarrollada	PLA	6.26	367	8.84
(Sun, et al., 2013)	Aluminio AL7075T651	15.5	134	----
(Sun, et al., 2015)	Aluminio AL7075T651	16.4	150.8	1870
(Liang, et al., 2018).	Aluminio AL7075T651	13.94	121	50
(Wang, Liang, Tian, Zhao, & Zhang, 2015)	Aluminio AL7075T651	22.8	190	1000
(Yang, et al., 2015).	Aluminio AL7075	21.4	427.8	50
(Lofroth & Avci, 2019)	Aluminio 7075-T6	8.1	154	----

Los altos valores de amplificación de movimiento que se aprecian en la Tabla 4.11, son posibles ya que los actuadores piezoeléctricos que utilizan son capaces de generar fuerzas de varios cientos de N en un rango de desplazamiento menor a 20 μm . En el caso de la micropinza fabricada en PLA, el actuador genera menos de 1.91 N, por consiguiente, es normal que el factor de amplificación sea bajo. Aun así, debido al uso de un material flexible, se logró un amplio desplazamiento en la salida.

CONCLUSIONES Y TRABAJO FUTURO

En el presente capítulo se presentan las conclusiones con base en los resultados presentados en el capítulo anterior. Además, se mencionan los posibles trabajos futuros que derivaron del actual trabajo de tesis.

5. Conclusiones y trabajo futuro

5.1 Conclusiones

Con base en el desempeño de la micropinza, podemos afirmar que es posible fabricar un sistema de manipulación de microobjetos, de bajo costo, con un amplio rango de desplazamiento en las mandíbulas y fuerza de sujeción suficiente para manipular microobjetos con una masa hasta de 904 mg. Estas características se lograron con la integración de un sistema novedoso, en el que varios componentes fueron diseñados considerando como limitante el bajo costo de implementación y, por tanto, las restricciones asociadas.

En resumen:

- ✓ Se desarrollo un actuador piezoeléctrico formado por un arreglo de zumbadores piezoeléctricos, cuyas características principales son: bajo costo (\approx \$5 dólares), un amplio desplazamiento (241.7 μm a 150 V) y poca fuerza generada ($<$ 1.91 N). Por lo tanto, su aplicación está limitada por dichas características.
- ✓ Se demostró que al emplear un material con baja rigidez (en consecuencia, alta flexibilidad) como el PLA, es posible implementar diversos mecanismos flexibles con movimientos micrométricos.
- ✓ Con el actuador piezoeléctrico desarrollado es factible mover objetos directamente, es decir, sin la intervención de un mecanismo flexible de por medio, debido a su amplio desplazamiento, lo que hace posible su uso sin la necesidad de amplificadores. Esto, para aplicaciones que solamente requieran movimiento lineal.

- ✓ A pesar de que la técnica de fabricación, FDM, empleada para crear al prototipo de la micropinza basada en mecanismos flexibles, no es la más precisa para dicha aplicación; se confirmó la sección de la hipótesis relacionada con su uso para la fabricación de la micropinza. Ya que, con un diseño y dimensiones adecuadas es posible fabricar una micropinza funcional, de bajo costo, empleando tecnología de maquinado aditivo, cuyo mecanismo flexible es capaz de amplificar un movimiento en su entrada y transmitirlo hasta el mecanismo de cierre/apertura de mandíbulas.
- ✓ Con el diseño propuesto para fabricación de la micropinza se logró un factor de amplificación de 6.26 unidades, en el desplazamiento total de ambas mandíbulas. El desplazamiento aplicado a la entrada fue de 58.6 μm . Se obtuvo un desplazamiento total de 365 μm entre ambas mandíbulas, cuando al actuador piezoeléctrico se le aplica una diferencia de potencial de 150 V.
- ✓ La fuerza de la micropinza en su salida es menor a otros producidos por otras micropinzas. Afortunadamente, el valor máximo de fuerza, con un valor de 8.84 mN, es suficiente para sostener varios microobjetos de pequeñas masas, hasta de 902.24 mg. Por lo que, la fuerza en general es más que suficiente, considerando que los microobjetos son de menor peso.
- ✓ Se desarrolló la electrónica de control de la micropinza, cumpliendo con la expectativa de ser de bajo costo, de acuerdo con la sección de la hipótesis restante. Además, de que cada uno de los elementos desarrollados mostró un alto desempeño (circuito controlador, actuador piezoeléctrico y sensor óptico de desplazamiento lineal).

Por lo tanto, puede afirmarse que se logró cumplir con los objetivos de este trabajo. Incluso, se obtuvieron resultados comparables con diseños de micropinzas de escala milimétrica que emplean materiales, elementos y equipos de alto costo.

5.2 Trabajo futuro

Como trabajo futuro se realizarán los modelos cinemático y dinámico de la micropinza, para mejorar el rendimiento. Este modelo puede ayudar a identificar los elementos que causaron el error entre los resultados simulados y experimentales.

También proyectamos realizar un sistema de control en lazo cerrado para corregir el error de salida en el desplazamiento causado por el efecto de histéresis y así ampliar las aplicaciones de la micropinza.

Una vez minimizado el error por el efecto de histéresis, es factible implementar un sistema de control automatizado para el posicionamiento de la micropinza en un sistema de coordenadas X, Y y Z. Este sistema permitiría la manipulación de microobjetos, trasladarlos a una nueva posición o incluso ensamblar una estructura con partes micrométricas.

BIBLIOGRAFÍA

Bibliografía

- M. Gouker, R., K. Gupta, S., A. Bruck, H., & Holzschuh, T. (2006). Manufacturing of multi-material compliant mechanisms using multi-material molding. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 1049-1075.
- Patil, V., Anerao, P., & Chinchankar, S. (2018). Design and Analysis of Compliant Mechanical Amplifier. *Materials Today: Proceedings 5*, 12409–12418.
- A. KUBBY, J. (2011). *A Guide to Hands-on MEMS Design and Prototyping*. New York: Cambridge University Press.
- AliExpress. (s.f.). *Industrial Precision Mechanism Store*. Retrieved 11 02, 2019, from AliExpress:
<https://es.aliexpress.com/item/32969475747.html?spm=a2g0s.9042311.0.0.5d6463c04cXcsU>
- AliExpress. (s.f.). *Optical pick-up Store*. Retrieved 22 02, 2019, from AliExpress:
<https://es.aliexpress.com/item/32823631297.html>
- APC. (2018). *Piezo-Mechanics: An Introduction*. Mackeyville, Pennsylvania.
- Arumugam, P., & Kumar, A. (2016). DESIGN METHODS FOR COMPLIANT MECHANISMS USED IN NEW AGE INDUSTRIES – A REVIEW. *Journal of Applied Engineering Science*, 374, 223-232.
- Ashraf, M. W., Tayyaba, S., & Afzulpurkar, N. (2011). Micro Electromechanical Systems (MEMS) Based Microfluidic Devices for Biomedical Applications. *Molecular Sciences*, 3648-3704.
- Baglio, S., Castorina, S., & Savalli, N. (2007). *Scaling Issues and Design of MEMS*. Chichester, England: John Wiley & Sons.
- Baidyk, T., & Kussul, E. (2009). *Redes neuronales, visión computacional y micromecánica*. Mexico, D.F.: Itaca.
- Ballas, R. G. (2007). *Piezoelectric Multilayer Beam Bending Actuators*. New York: Springer.
- Chaillet, N., & Régnier, S. (2010). *Microrobotics for Micromanipulation*. London UK y United States: ISTE Ltd y John Wiley & Sons.
- Farah, S., Anderson, D., & Langer, R. (2016). Physical and mechanical properties of PLA, and their functions in widespread applications — A comprehensive review. *Advanced Drug Delivery Reviews*, 367–392.

- Garza-García, L., & Lapizco-Encinas, B. (2010). Estado del arte en la manipulación de proteínas empleando dielectroforesis. *Revista Mexicana de Ingeniería Química*, 125-137.
- Ghosh, A., & Corves, B. (2015). *Introduction to Micromechanisms and Microactuators*. New Delhi: Springer (India).
- Gu, G.-Y., Zhu, L.-M., Su, C.-Y., & Ding, H. (2013). Motion Control of Piezoelectric Positioning Stages: Modeling, Controller Design, and Experimental Evaluation. *IEEE/ASME TRANSACTIONS ON MECHATRONICS, VOL. 18, NO. 5*, 1459-1471.
- Hwu, E. E.-T., & Boisen, A. (2018). Hacking CD/DVD/Blu-ray for Biosensing. *ACS Sensors*, 1222-1232.
- Hwu, E.-T., Hung, S.-K., Yang, C.-W., & Hwang, I.-S. (2007). Simultaneous detection of translational and angular displacements of. *Applied Physics Letters* 91, 221908.
- Hwu, E.-T., Hung, S.-K., Yang, C.-W., Huang, K.-Y., & Hwang, I.-S. (2008). Real-time detection of linear and angular displacements with a modified DVD optical head. *Nanotechnology* 19, 115501.
- Jack W, J. (2001). Microelectromechanical systems (MEMS): fabrication, design and applications. *SMART MATERIALS AND STRUCTURES*, 1115–1134.
- Jia, Y., & Xu, Q. (2013). MEMS Microgripper Actuators and Sensors: The State-of-the-Art Survey. *Recent Patents on Mechanical Engineering*, 6, 1-11.
- Korvink, J., & Paul, O. (2006). *MEMS: A Practical Guide to Design, Analysis, and Applications*. New York, USA: William Andrew.
- L. Howell, L., P. Magleby, S., & M. Olsen, B. (2013). *Handbook of Compliant Mechanisms*. United Kingdom: Wiley.
- Li, Y., & Xu, Q. (2012). Design and Robust Repetitive Control of a New Parallel-Kinematic XY Piezostage for Micro/Nanomanipulation. *IEEE/ASME Transactions on Mechatronics, Vol. 17,6*, 1120-1132.
- 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* 269, 227-237.
- Lobontiu, N. (2002). COMPLIANT MECHANISMS Design of Flexure Hinges. In N. Lobontiu, *COMPLIANT MECHANISMS Design of Flexure Hinges* (pp. 1- 6). Boca Raton, Florida, USA: CRC PRESS.

- Lofroth, M., & Avci, E. (2019). Development of a Novel Modular Compliant Gripper for Manipulation of Micro Objects. *Micromachines*, 1-22.
- Mansoor, S., Bhatti, U. I., Bhatti, A. I., & Dildar Ali, S. M. (2018). Improved attitude determination by compensation of gyroscopic drift by use of accelerometers and magnetometers. *Measurement* 131, 582- 589.
- Mariaca-Beltrán, Y.-d.-J., García-Salmon, I.-A., Clemente-Mirafuente, C.-M., Rodríguez-Ramírez, J.-A., García-Castrejón, J.-C., & Acosta-Flores, M. (2017). Nueva metodología para el análisis de sistemas mecánicos utilizando modelos a escala y leyes de similitud. *Revista DYNA*, 59-66.
- MicroOhmElectronics. (s.f.). *Piezo Element Piezoelectric Sensor Detect Vibration or a Knock 50mm*. Retrieved 11 02, 2019, from Micro Ohm Electronics: <https://www.microohmelectronics.com/product/piezo-element-detect-vibration/>
- Nachippan, N. M., Venkatesh, A. P., & Muniyappan, M. (2018). Modelling and Analysis of Piezoelectric Microgripper for Unmanned Aerial Vehicle. *Materials Today: Proceedings* 5, 19456-19462.
- Nechibvute, A., Chawanda, A., & Luhanga, P. (2012). Piezoelectric Energy Harvesting Devices: An Alternative Energy Source for Wireless Sensors. *Smart Materials Research*, 1-13.
- Nikoobin, A., & Niaki, M. (2012). Deriving and analyzing the effective parameters in microgrippers performance. *Scientia Iranica B*, 1554–1563.
- Nikoobin, A., & Niaki, M. H. (2012). Deriving and analyzing the effective parameters in microgrippers performance. *Scientia Iranica B, Vol. 19, No. 6*, 1554-1563.
- OpenLearn. (2019). Stiffness. In OpenLearn, *Structural devices* (pp. 28-30). Margate: Thanet Press Ltd.
- Özel, T., Liu, X., & Dhanorker, A. (2009). Modelling and Simulation of Micro-Milling Process. *Materials and Manufacturing Processes*, 1-7.
- Ozevin, D. (2014). Micro-electro-mechanical-systems (MEMS) for assessing and monitoring civil infrastructures. In M. Wang, J. Lynch, & H. Sohn, *Sensor Technologies for Civil Infrastructures* (pp. 265-302). Massachusetts, USA: Woodhead Publishing.
- P.R., L., K.P., T., & F.A., P. (2014). Study of Compliant Mechanism. *International Journal of Innovative Research in Science, Engineering and Technology*, Volume 3, Special Issue 4, pages 53-60.

- Physik Instrumente . (2011). *Piezo Ceramic Materials & Products*. Germany: Physik Instrumente.
- Potrich, C., Lunelli, L., Bagolini, A., Bellutti, P., Pederzoli, C., Verotti, M., & Belfiore, N. P. (2018). Innovative Silicon Microgrippers for Biomedical Applications: Design, Mechanical Simulation and Evaluation of Protein Fouling. *Actuators, Vol 7, No. 12*, 1-16.
- Qin, Y. (2015). *Micromanufacturing Engineering and Technology*. Massachusetts, USA: William Andrew.
- Qin, Y., Shirinzadeh, B., Tian, Y., Zhang, D., & Bhagat, U. (2014). Design and Computational Optimization of a Decoupled 2-DOF Monolithic Mechanism. *IEEE/ASME TRANSACTIONS ON MECHATRONICS, VOL. 19, NO. 3*, 872-881.
- Resnick, R., Halliday, D., & Krane, K. S. (1993). *Fisica Vol. 1*. Continental.
- Seung-Bok, C., & Young-Min, H. (2010). Piezoelectric Effect. In *Piezoelectric Actuators Control Applications of Smart Materials* (pp. 1-3). Boca Raton, FL: CRC Press.
- Solouk, M. R., Shojaeefard, M. H., & Dahmardeh, M. (2019). Parametric topology optimization of a MEMS gyroscope for automotive applications. *Mechanical Systems and Signal Processing 128*, 389-404.
- Sun, X., Chen, W., Fatikow, S., Tian, Y., Zhou, R., Zhang, J., & Mikczinski, M. (2015). A novel piezo-driven microgripper with a large jaw displacement. *Microsyst Technol 21*, 931-942.
- Sun, X., Chen, W., Tian, Y., Fatikow, S., Zhou, R., Zhang, J., & Mikczinski, M. (2013). A novel flexure-based microgripper with double amplification mechanisms. *REVIEW OF SCIENTIFIC INSTRUMENTS 84*.
- THORLABS. (s.f.). *Piezoelectric Actuators*. Retrieved 11 06, 2019, from THORLABS: https://www.thorlabs.com/navigation.cfm?guide_id=82
- THORLABS. (s.f.). *Piezoelectric Tutorial*. Retrieved 11 02, 2019, from THORLABS: https://www.thorlabs.com/newgrouppage9.cfm?objectgroup_id=5030
- Wang, F., Liang, C., Tian, Y., Zhao, X., & Zhang, D. (2015). Design of a Piezoelectric-Actuated Microgripper With a Three-Stage Flexure-Based Amplification. *IEEE/ASME TRANSACTIONS ON MECHATRONICS, VOL. 20, NO. 5*, 2205-2213.
- Xianmin, Z., & Benliang, Z. (2018). *Topology Optimization of Compliant Mechanisms*. Singapore: Springer Nature.

- Yang, B., Wang, X., Dai, B., & Liu, X. (2015). A New Z-axis Resonant Micro-Accelerometer Based on Electrostatic Stiffness. *Sensors, Vol. 15.*, 687-702.
- Yang, Y.-l., Wei, Y.-d., Lou, J.-q., Tian, G., Zhao, X.-w., & Fu, L. (2015). A new piezo-driven microgripper based on the double-rocker mechanism. *Smart Mater. Struct.* 24.
- Younis, M. I. (2011). *MEMS Linear and Nonlinear Statics and Dynamics*. New York,USA: Springer Science+Business Media.
- YU, F., AI, L., DAI, W., ROZENGURT, N., YU, H., & HSAI, T. K. (2011). MEMS Thermal Sensors to Detect Changes in Heat Transfer in the Pre-Atherosclerotic Regions of Fat-Fed New Zealand White Rabbits. *Annals of Biomedical Engineering, Vol. 39, No. 6*, 1736-1744.
- Zhou, Z., Wang, Z., & Lin, L. (2012). *Microsystems and Nanotechnology*. Beijing & New York: Tsinghua University Press & Springer.

ANEXOS

ANEXO A

Artículo aceptado en: International Conference on Mechatronics, Electronics and Automation Engineering, ICMEAE 2019.

Design and 3D printed implementation of a microgripper actuated by a piezoelectric stack

C. A. Ferrara-Bello, J. O. Sandoval-Reyes, P. Vargas-Chable¹

*Posgrado en Ingeniería y Ciencias Aplicadas
Centro de Investigación en Ingeniería y Ciencias Aplicadas,
CIICAp-IICBA*

¹*Facultad de Ciencias Químicas e Ingenierías, FCQeI
Universidad Autónoma del Estado de Morelos, UAEM*

Av. Universidad No. 1001, Morelos, MX

{carlos.ferrarabl & josue.sandovalrey}@uaem.edu.mx,
pedro.vargas@uaem.mx

M. Tecpoyotl-Torres

*Centro de Investigación en Ingeniería y Ciencias Aplicadas,
CIICAp-IICBA*

*Universidad Autónoma del Estado de Morelos, UAEM
Av. Universidad No. 1001, Morelos, MX
tecpoyotl@uaem.mx*

Jorge Varona

*Facultad de Ingeniería, Universidad Panamericana
Aguascalientes 20290, México;
jvarona@up.edu.mx*

Abstract – This article presents the design and implementation of a microgripper device actuated by a piezoelectric stack. In order to reduce fabrication costs, conventional piezoelectric buzzers are used that are easily found in the market at very low cost. Polylactic Acid (PLA) was chosen as the structural material for the design of the mechanisms of the microgripper, the choice of this material considerably reduces the total implementation cost. The originality of this work resides in the material used and in the stacked piezoelectric actuator. The main contribution is the demonstration of a design methodology that implements prototype compliance mechanisms at millimeter scale for validation purposes before proceeding to the fabrication in micrometric scale. Even so, the system in mm scale can also be used for micromanipulation due to the range of its microgripper jaws' aperture and its reliability. ANSYS™ was used as the software tool for simulation.

Index Terms – Compliance mechanisms, MEMS, PLA, buzzer.

I. INTRODUCTION

In many fields, industrial processes require specialized tools for the manipulation of objects, either for molding, cutting, changing its position, etc. This need for object's manipulation also occurs at micro and nanoscale, that is called micro and nanomanipulation.

Among the multiple applications of micro and nanomanipulation, stand out their use in medicine [1], micro assembling systems [2], microelectromechanical systems (MEMS) [3], and others.

Microgrippers are devices widely used in micro and nanomanipulation [4], which are generally designed with compliance mechanisms, which can transmit displacement and have other appropriate characteristics [5].

There are several types of commonly used actuators [6]. In the case of grippers of millimeter scale, piezoelectric actuation type is frequently preferred. Piezoactuators of Lead Zirconate Titanate (PZT) are widely used, due to its high force, fast response, small volume, etc. [7]. However, they have some disadvantages, such as, small displacements and hysteresis effect, which affects the precision of the performed movements [8].

Several techniques are used for the fabrication of micro and nanogrippers, among them are wire electrical discharge machining (WEDM) [9], laser machining [10], and photolithography [11]. These technologies have high precision and costs.

ANEXO B

Código de programación del sensor de desplazamiento lineal

```
// PROMOCION DEL SENSOR OPTICO DE DESPLAZAMIENTO LINEAL DESARROLLADO
#include <LiquidCrystal.h>

const byte rs = PA15, en = PA8, d4 = PB15, d5 = PB14, d6 = PB13, d7 =
PB12;//Pines de conexión con el LCD
const byte analoginput = PA4;// Ingreso de la señal del Pick-
Up.
const byte focus = PB6;// Salida PWM
unsigned int referencia_min, referencia_max, referencia_inicio,
referencia_fin;
byte calib_1=1;
LiquidCrystal lcd(rs, en, d4, d5, d6, d7); // Configuración del LCD

void setup(void)
{
  pinMode(PC13, OUTPUT); // Pin configurado como salida, correspondiente a
un led indicador de funcionamiento
  digitalWrite(LED_BUILTIN, LOW);

  lcd.begin(16, 2); // Inicialización del LCD
  lcd.print("Micrometer V1.0 ");
  delay(500);
  Serial1.begin(9600);// Velocidad del puerto serial de salida
  // ESTABLECIAMIENTO DEL RANGO DE SALIDA DE TENSION PARA CONTROL DEL MOTOR
VCM
  referencia_min=50;// El rango de tensión comienza en 2517 microVolts
(considerandō resolución de 16 bit del PWM y alimentación de 3V)
  referencia_max=referencia_min+4000; // El rango de tensión para buscar la
Señal de Error de Enfoque (SFE)finaliza en 203.936 miliVolts
  referencia_inicio=referencia_min;
  referencia_fin=referencia_inicio+16000;// El rango de posicionamiento del
lente es equivale a la tensión en el rango de 2517 microVolts a 808.194
miliVols
  // CONFIGURACION DE LA SALIDA PWM
  Timer4.pause();
  pinMode(focus, PWM);
  Timer4.setPrescaleFactor(1); // 0.014 μs resolución
  Timer4.setCompare(TIMER_CH1, referencia_min);
  Timer4.setOverflow(65535);// PWM Periodo= 0.000910208s PWM
Frecuencia=1098.64 Hz
  Timer4.refresh();
  Timer4.resume();
}

void loop(void)//***** METODO PRINCIPAL
{
  byte muestras[2000];
  unsigned long results=0;
  unsigned int dutyCycle, cont_1, cont_2, cont_3, posicion_max, posicion_min,
ancho_senal, muestra_1, muestra_2, muestra_3;
  byte i=0, muestra_max, muestra_min, val_ref, posicion_val_ref;
```

```

byte error,num_dif, muestra, num_senales, llave_1;// byte num_dif[100];
unsigned int rep_num_dif[103];
float posicion_lente_min, posicion_lente_max, posicion_lente;
unsigned long prom_dutyCycle;
//***** INICIO DEL BUCLE
while(calib_1==1){
    error=0;
    lcd.clear();
    lcd.print("Inicio Calibrac.");
    delay(500);

    // *****BARRIDO DE LA SEÑAL SFE
    cont_1=0;
    for(dutyCycle = referencia_min; dutyCycle< referencia_max;
dutyCycle=dutyCycle+2){
        pwmWrite(focus, dutyCycle);           //puts resultin PWM form
Timer1.pwm(pin_dac, cont_1);
        delayMicroseconds(600);//delayMicroseconds(600);//
Serial.println(cont_1);
        muestras[cont_1]= analogRead(analoginput)/40;
        cont_1++;
    }
// *****ENCONTRAR VALORES MÁXIMOS Y MÍNIMOS DE LA SEÑAL SFE
muestra_max=muestras[0];
posicion_max=0;
muestra_min=muestras[0];
posicion_min=0;
for(cont_1=0; cont_1<1998; cont_1++){
    if(muestras[cont_1+1]>muestra_max){
        muestra_max=muestras[cont_1+1];
        posicion_max=cont_1+1;
    }
    if(muestras[cont_1+1]<muestra_min){
        muestra_min=muestras[cont_1+1];
        posicion_min=cont_1+1;
    }
}
//***** VALORES REPETIDOS
num_dif=muestra_max-muestra_min;
for(cont_1=0; cont_1<=num_dif;cont_1++){
    cont_3=0;
    muestra=muestra_min+cont_1;
    for(cont_2=0; cont_2<=1998; cont_2++){
        if(muestra==muestras[cont_2])
            cont_3++;
    }
    rep_num_dif[muestra]= cont_3;
}
//*****BUSQUEDA DEL VALOR DE REFERENCIA DE LA SEÑAL SFE
val_ref=muestra_min;
for(cont_1=muestra_min; cont_1<muestra_max;cont_1++){
    if(rep_num_dif[cont_1+1]>rep_num_dif[val_ref])
        val_ref=cont_1+1;
}
//*****POSICIONAMIENTO DEL LENTE
//***** Primer muestra
dutyCycle=referencia_inicio;

```

```

    pwmWrite(focus, dutyCycle);
    delay(300);
    muestra_1 = analogRead(analoginput)/40;
    //***** Segunda muestra
    dutyCycle=dutyCycle+2;
    pwmWrite(focus, dutyCycle);
    delayMicroseconds(400);
    muestra_2 = analogRead(analoginput)/40;

while(error==0){//***** SI SE ENCUENTRA LA SEÑAL SFE EL
PROGRAMA ENTRA EN ESTE BUCLE
    if(dutyCycle<(referencia_fin-100))    {
        dutyCycle=dutyCycle+2;
        pwmWrite(focus, dutyCycle);
        delayMicroseconds(400);
        muestra_3 = analogRead(analoginput)/40;
        //***** Inicio de pendiente
        if(    (muestra_3>muestra_2) && (muestra_2>(val_ref+10))    ){
            //*****SEÑAL ENCONTRADA

            lcd.setCursor(0, 0);// Se procede a mostrar los tres valores que
indican un incremento en la pendiente de la señal SFE
            lcd.print(muestra_3);
            lcd.print(" ");
            lcd.print(muestra_2);
            lcd.print(" ");
            lcd.print(val_ref+10);
            lcd.print(" ");
            digitalWrite(PC13, HIGH); // Se activa un LED para indicar que se
encontro la señal SFE

            do{// Con este bucle el lente se posiciona dos unidades por encima del
centro de la señal SFE, es decir dos unidades del valor de referencia
                dutyCycle++;
                pwmWrite(focus, dutyCycle);
                delayMicroseconds(500);
                muestra_3 = analogRead(analoginput)/40;
            }while( muestra_3>(val_ref+2) );
            lcd.setCursor(9, 0);
            lcd.print( muestra_3); // Se despliega el valor cercano al centro de la
señal SFE
            prom_dutyCycle=0;
            cont_2=0;
            while(error==0){ //*****CONTROL DE POSICION
                muestra_3 = analogRead(analoginput)/40;
                if(muestra_3 >(val_ref+1)){
                    dutyCycle=dutyCycle+1;//+((muestra_3 -val_ref)*0.5);
                    pwmWrite(focus, dutyCycle);
                }
                if(muestra_3 <(val_ref-1)){
                    dutyCycle=dutyCycle-1;//-((val_ref-muestra_3 )*0.5);
                    pwmWrite(focus, dutyCycle);
                }
            }
            delayMicroseconds(1500);
            cont_2++;
            prom_dutyCycle=prom_dutyCycle+ dutyCycle;

```


ANEXO C

Circuito electrónico del sensor de desplazamiento lineal

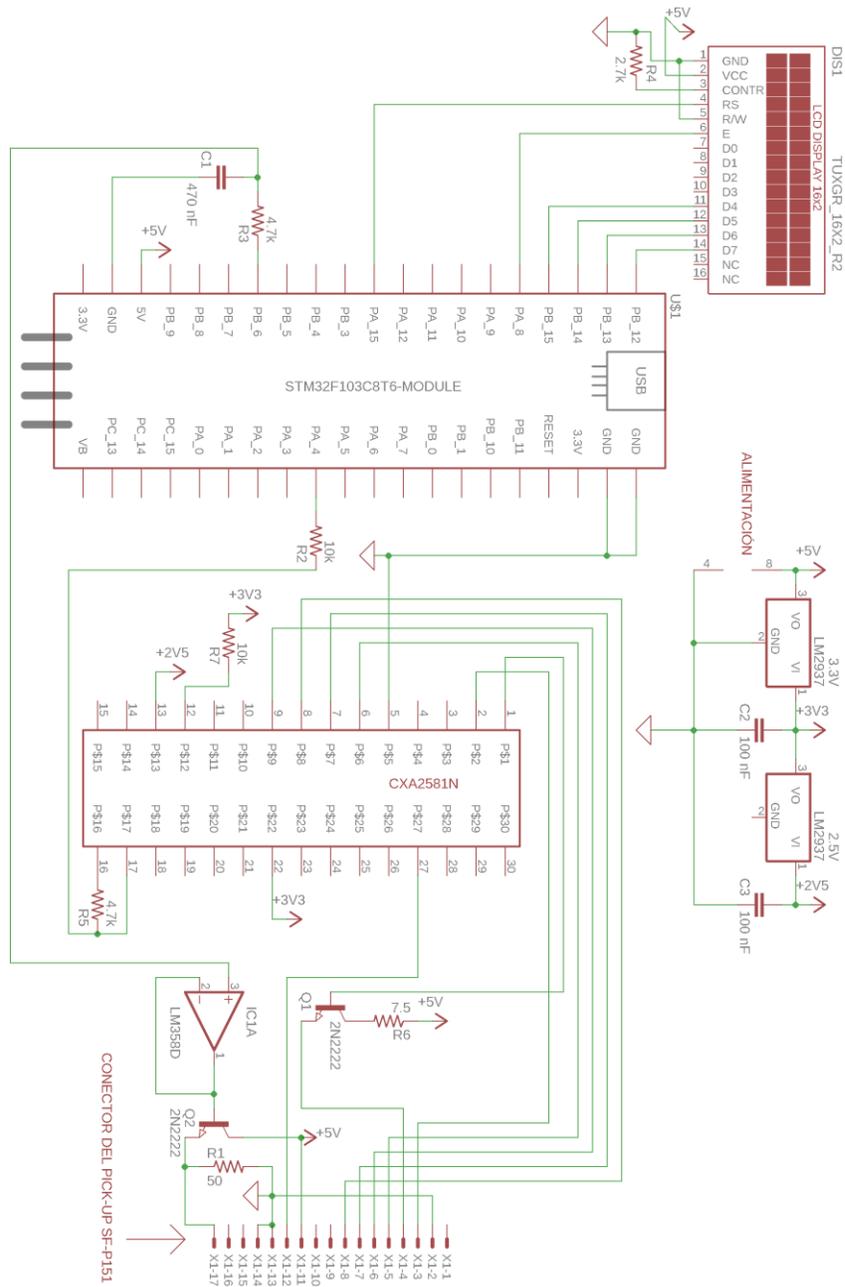


Figura A1.1 Circuito electrónico diseñado e implementado para el sensor de desplazamiento lineal. Elaboración propia.

ANEXO D

Constancias por participación en eventos de divulgación de la ciencia



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

otorga el presente

RECONOCIMIENTO

Al: Ing. Carlos Andrés Ferrara Bello

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

Emiliano Zapata, Mor., noviembre de 2019



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



ICMEAE

INTERNATIONAL CONFERENCE ON MECHATRONICS,
ELECTRONICS AND AUTOMOTIVE ENGINEERING

El Centro de Investigación en Ingeniería y Ciencias Aplicadas de la
Universidad Autónoma del Estado de Morelos y El Instituto de Ingenieros
Electrónicos y Eléctricos de Morelos A.C.

otorgan el presente

RECONOCIMIENTO

A: **C.A Ferrara-Bello**

Por su destacada participación como:

Design and implementation, with 3D printing, of a microgripper
actuated by a piezoelectric stack

En el marco del Congreso Internacional de Ingeniería Mecatrónica, Electrónica y
Automotriz realizado del 26 al 29 de Noviembre del 2019 en la ciudad de
Cuernavaca, Morelos, México.



Ing. Leoncio Aguilar Negrete

Presidente del Instituto de Ingenieros Electrónicos
y Eléctricos de Morelos.A.C.



Dra. Elsa Carmina Menchaca Campos

Directora Interina del Centro de Investigación en
Ingeniería y Ciencias Aplicadas.

