

**ANÁLISIS, DISEÑO Y SIMULACIÓN DE UN MICROACTUADOR
ELECTROTÉRMICO PARA EL ACCIONAMIENTO DE UNA MICROPINZA**

**ISAAC BURGOS ORTEGA
JULIAN DAVID TORRES RONCANCIO**

**UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER
FACULTAD DE INGENIERÍAS FISICOMECÁNICAS
ESCUELA DE INGENIERÍA MECÁNICA
BUCARAMANGA**

2013

**ANÁLISIS, DISEÑO Y SIMULACIÓN DE UN MICROACTUADOR
ELECTROTÉRMICO PARA EL ACCIONAMIENTO DE UNA MICROPINZA**

ISAAC BURGOS ORTEGA

JULIAN DAVID TORRES RONCANCIO

**TRABAJO DE GRADO PARA OPTAR AL TÍTULO DE
INGENIERO MECÁNICO**

DIRECTOR:

Ph.D. CARLOS BORRAS PINILLA

**UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER
FACULTAD DE INGENIERÍAS FISICOMECÁNICAS
ESCUELA DE INGENIERÍA MECÁNICA
BUCARAMANGA**

2013

AGRADECIMIENTOS

Al profesor Carlos Borrás Pinilla, director del proyecto, por toda la confianza depositada, además de su excelente disposición, colaboración y apoyo en la realización del proyecto.

A los profesores Expedito Lozano Gómez y Omar Armando Gelves Arocha por su incondicional acompañamiento y sabios consejos, además de su énfasis en la importancia de ser un profesional preparado y consecuente.

A la Universidad Industrial de Santander, entidad estatal precursora de la formación profesional y excelencia académica.

TABLA DE CONTENIDO

	Pág.
INTRODUCCIÓN	14
1. OBJETIVOS	15
1.1 OBJETIVO GENERAL.....	15
1.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS.....	15
2. SISTEMAS MICRO-ELECTROMECÁNICOS (MEMS).....	16
2.1 GENERALIDADES.....	16
2.2 CLASIFICACI3N DE LOS SISTEMAS MICRO-ELECTROMECÁNICOS SEGUN SU ÁREA DE APLICACI3N.....	17
2.3 MICRO-ACTUADORES	18
2.3.1 Clasificaci3n de los micro-actuadores segun su método de accionamiento.....	18
2.3.2 Actuadores termo-mecánicos.....	20
2.3.2.1 Actuador termo-mecánico bimetálico.....	20
2.3.2.2 Actuador termo-mecánico bimorfo.....	21
2.3.2.3 Actuador termo-mecánico Chevron.....	22
2.4 MATERIALES USADOS EN LA MICRO-FABRICACI3N DE MEMS	23
2.4.1 Silicio poly-cristalino.....	24
2.5 MICROFABRICACI3N	25
2.5.1 Sustratos.....	25
2.5.2 Limpieza de la oblea.....	27
2.5.3 Dopaje.....	28

2.5.4	Deposición de película delgada.....	29
2.5.4.1	Deposición física de vapor.....	29
2.5.4.2	Deposición química de vapor.....	30
2.5.4.3	Electrodeposición.....	31
2.5.4.4	Spin Casting.....	31
2.5.4.5	Tensión de película fina.....	32
2.5.5	Transferencia de patrones.....	32
2.5.5.1	Litografía óptica.....	33
2.5.5.2	Reglas de diseño.....	35
2.5.5.3	Máscaras para litografía.....	36
2.5.5.4	Litografía de doble cara.....	36
2.5.5.5	Litografía blanda.....	36
2.5.5.6	Grabado húmedo.....	36
2.5.5.7	Grabado en seco.....	38
2.5.6	Tecnologías de micro-fabricación.....	39
2.5.6.1	Liga.....	39
2.5.6.2	Micro-maquinado superficial.....	40
2.5.6.3	Micro-maquinado volumétrico.....	42
2.5.7	Análisis comparativo.....	43
3.	MARCO TEÓRICO.....	45
3.1	MECANISMOS DE TRANSFERENCIA DE CALOR.....	45
3.1.1	Conducción de calor.....	45
3.1.2	Convección.....	47
3.1.2.1	Coefficiente de convección.....	48

3.2	GENERACIÓN DE CALOR EN UN CONDUCTOR.....	49
3.3	SOLUCIÓN DE SISTEMAS DE ECUACIONES MEDIANTE EL MÉTODO DE LA MATRIZ INVERSA.	50
3.4	DEFLEXIÓN Y PANDEO EN VIGAS	51
3.4.1	DEFLEXIÓN EN VIGAS	51
3.4.1.1	Relación entre la curvatura y el momento.	51
3.4.2	Método de área de momentos.	55
3.4.2.1	Diagramas de momentos por partes.	55
3.4.3	Deformación por carga y temperatura	57
3.4.3.1	Deformación por carga.	57
3.4.3.2	Deformación por temperatura.....	58
3.4.4	Energía de deformación para cargas axiales.	59
3.4.5	Pandeo en columnas.	60
4.	MODELAMIENTO MICRO-ACTUADOR Y MICRO-PINZA	63
4.1	MODELAMIENTO TERMICO DEL ACTUADOR.....	63
4.2	MODELO ELÉCTRICO DEL ACTUADOR	67
4.3	MODELO ESTRUCTURAL DEL ACTUADOR	68
4.3.1	Mecanismos de falla en el actuador.....	70
4.3.1.1	Falla por temperatura.....	70
4.3.1.2	Falla por carga.	70
4.4	MODELAMIENTO DE LA MICRO-PINZA	71
4.4.1	Proceso de acercamiento.....	72
4.4.2	Proceso de apriete.....	75
4.5	SIMULACIÓN EN COMSOL MULTIPHYSICS.....	79

4.5.1	Geométrica del modelo en Comsol.....	81
4.5.2	Mallado del modelo.....	83
5.	DISEÑO Y SIMULACIÓN DEL SISTEMA MICROACTUADOR-PINZA.....	85
5.1	REQUERIMIENTOS DE DISEÑO DEL ACTUADOR	85
5.2	DISEÑO Y SIMULACIÓN	86
5.2.1	Comparación de los resultados obtenidos en el Matlab y en el Comsol Multiphysics.....	89
5.2.1.1	Variación de la temperatura a lo largo del actuador.....	89
5.2.1.2	Variación de la temperatura máxima con respecto al voltaje aplicado.....	91
5.2.1.3	Variación de la deformación con la posición.	91
5.2.1.4	Variación de la deformación máxima con respecto al voltaje aplicado.....	93
5.2.1.5	Variación de la fuerza producida en los actuadores con respecto al voltaje aplicado.....	93
5.2.2	Dimensionamiento del actuador.....	94
5.2.2.1	Separación entre anclajes.....	94
5.2.2.2	Angulo de pre-curvatura.....	96
5.2.2.3	Sección transversal del actuador.....	97
5.2.2.4	Numero de actuadores.....	98
5.2.3	Resultados del dimensionamiento.....	100
6.	CONCLUSIONES.....	106
	BIBLIOGRAFÍA.....	107
	ANEXOS.....	111

LISTA DE LISTA DE FIGURAS

	Pág.
Figura 1. Micro-actuador térmico bimetálico	21
Figura 2. Microactuador térmico biformo	22
Figura 3. Microactuador térmico chevron.....	23
Figura 4. Proceso de micro-fabricación	25
Figura 5. Contacto o aproximación fotolitográfico	33
Figura 6. Tipos de foto-resinas	34
Figura 7. Proceso de desalineación.....	35
Figura 8. Grabado isotrópico.....	37
Figura 9. Proceso isotrópico y anisotrópico	38
Figura 10. Proceso de liga	40
Figura 11. Micro-maquinado superficial	41
Figura 12. Conducción tridimensional de calor a través de un elemento rectangular de volumen.	46
Figura 13. Elástica de una viga sometida a carga.	52
Figura 14. Radios de curvatura en la elástica de una viga sometida a carga	52
Figura 15. Diferencial de una viga para el análisis de deformación	53
Figura 16. Viga sometida a cargas de deflexión	56
Figura 17. Separación de las carga en la viga	56
Figura 18. Diagrama de momentos por partes y ubicación de centroides	56
Figura 19. Deformación de una barra sometida a carga axial	58
Figura 20. Estructura sometida a deformación por carga	59
Figura 21. Barra sujeta a la aplicación gradual de fuerza	60
Figura 22. Procedimiento para hallar carga critica en una columna	61
Figura 23. Elemento diferencial	64
Figura 24. División del micro-actuador en partes.....	65

Figura 25. Esquemas y características de un actuador térmico.....	69
Figura 26. Valores de α para diferente apoyos en columnas	70
Figura 27. Esquema general sistema actuador y pinza	72
Figura 28. Proceso de acercamiento	73
Figura 29. Diagrama de cuerpo libre proceso de acercamiento.....	73
Figura 30. Diagrama de momentos para proceso de acercamiento	74
Figura 31. Forma de la elástica de la viga para el proceso de acercamiento.	74
Figura 32. Diagrama de cuerpo libre para el proceso de agarre.....	76
Figura 33. Diagrama de equilibrio para hallar el área de momentos por partes	76
Figura 34. Diagrama de momentos para la viga 1 para el proceso de agarre.	77
Figura 35. Diagrama de la elástica para la viga 1 para el proceso de agarre	77
Figura 36. Diagrama de momentos de la viga 2 proceso de agarre	78
Figura 37. Diagrama de la elástica para la viga 2 en el proceso de apriete.....	78
Figura 38. Físicas del Comsol.....	80
Figura 39. Geometría del sistema en Comsol.....	83
Figura 40. Mallado extremadamente fino del sistema en Comsol.....	84
Figura 41. Dimensiones micro-pinza referencia FT-G62	85
Figura 42. Geometría de los brazos de la micro-pinza	86
Figura 43. Esquema general del microsistema	87
Figura 44. Configuración geométrica del actuador	88
Figura 45. Variación de la temperatura a lo largo del actuador (Matlab)	89
Figura 46. Variación de la temperatura a lo largo del actuador (Comsol)	90
Figura 47. Variación de la temperatura con $V = 8.01V$ en Comsol.	90
Figura 48. Variación de la temperatura máxima con respecto al voltaje aplicado .	91
Figura 49. Variación de la deformación vs voltaje.....	92
Figura 50. Variación de la deformación en Comsol con $V = 5.9V$	92
Figura 51. Variación de la deformación máxima vs voltaje aplicado	93
Figura 52. Carga en los actuadores vs voltaje aplicado.....	94
Figura 53. Espacio que ocupan los actuadores	94
Figura 54. Variación de la potencia vs separación entre anclajes	95

Figura 55. Variación del potencia vs el ángulo de pre-curvatura	96
Figura 56. Deformación del actuador vs ángulo de pre-curvatura	96
Figura 57. Fuerza en el actuador vs ángulo de pre-curvatura	97
Figura 58. Variación de la potencia con respecto al espesor del actuador	98
Figura 59. Variación del potencia con respecto a la profundidad del actuador.....	98
Figura 60. Variación de la potencia con respecto al número de actuadores.....	99
Figura 61. Variación del voltaje con respecto al número de actuadores.....	100
Figura 62. Temperatura vs posición actuador.....	101
Figura 63. Deformación vs posición actuador.....	102
Figura 64. Fuerza de agarre vs voltaje para una pieza de 20 μm (Matlab).....	102
Figura 65. Distribución de la temperatura del sistema en Comsol.....	103
Figura 66. Deformación del sistema en Comsol	103
Figura 67. Voltaje vs separación entre anclajes.....	104
Figura 68. Fuerza de agarre vs voltaje	104
Figura 69. Voltaje vs número de actuadores	105

LISTA DE TABLAS

	Pág.
Tabla 1. Clasificación de los Micro-actuadores según se método de accionamiento.....	19
Tabla 2. Propiedades mecánicas del poly-silicio.....	24
Tabla 3. Materiales utilizados en el micro-maquinado superficial	42
Tabla 4. Comparación entre las técnicas de micro-maquinado superficial y volumétrico.....	43
Tabla 5. Análisis comparativo de las 3 técnicas.....	44
Tabla 6. Valores medios del coeficiente de convección.....	48
Tabla 7. Datos geométricos del sistema en Comsol	81
Tabla 8. Propiedades que dependen de la temperatura	87
Tabla 9. Otros datos de entrada	88
Tabla 10. Dimensiones finales del micro-actuador	100

LISTSA DE ANEXOS

	Pág.
Anexo A. Diagrama de flujo.....	112
Anexo B. Planos del sistema.....	113

RESUMEN

TITULO: ANÁLISIS, DISEÑO Y SIMULACIÓN DE UN MICROACTUADOR ELECTROTÉRMICO PARA EL ACCIONAMIENTO DE UNA MICROPINZA*

AUTORES: ISAAC BURGOS ORTEGA

JULIAN DAVID TORRES RONCANCIO**

PALABRAS CLAVES:

MEMS (sistemas microelectromecánicos), actuador térmico, micropinza, Comsol Multiphysics, Matlab.

DESCRIPCIÓN

A partir del primer Sistema microelectromecánico (MEMS por sus siglas en ingles), construido en los sesenta, la necesidad de diseñar elementos miniaturizados ha sido motivo de investigación y estudio para científicos de diversas áreas a lo largo de la historia y se ha incrementado notoriamente en la última década.

En este trabajo se da en primer lugar una visión general de los sistema microelectromecánicos MEMS, mencionando sus áreas de aplicación más relevantes y analizando detalladamente los actuadores termomecánicos. Se describen los actuadores térmicos más comunes, su forma de operación y sus características principales. Además se presenta de manera global la tecnología de microfabricación, ilustrando los procesos más usados en este campo.

Se presenta el desarrollo de un modelamiento estructural, eléctrico y térmico de un sistema de actuación para el accionamiento de una micropinza. Se realiza un modelamiento matemático a partir de ecuaciones diferenciales que rigen el comportamiento de las variables electricas, térmicas y estructurales y se desarrolla e implementa un algoritmo en Matlab. Además se realiza una simulación numérica del sistema en software Comsol Multiphysics. Con los resultados de los dos software se realiza una comparación para validación del modelo, estableciendo porcentajes de desviación de uno con respecto a otro. A partir del algoritmo desarrollado en Matlab se realiza el diseño del sistema de actuación para el accionamiento de una micropinza, caracterizando completamente el sistema y analizando el comportamiento de las variables eléctricas, térmicas y estructurales que intervienen en los procesos de sujeción y manipulación de objetos a nivel microscópicos.

*Proyecto de grado

** Facultad de Ingenierías físicomecánicas, Escuela de Ingeniería Mecánica. Director: Carlos Borrás Pinilla

ABSTRACT

TITLE: ANALYSIS, DESIGN AND SIMULATION FOR AN ELECTROTHERMAL MICROACTUATOR TO ACTIVE A MICROGRIPPER *

AUTHORS: ISAAC BURGOS ORTEGA

JULIAN DAVID TORRES RONCANCIO**

KEYWORDS:

MEMS (Microelectromechanical Systems), thermal actuator, microgripper, Comsol Multiphysics, Matlab.

DESCRIPTION:

Since the first Microelectromechanical Systems (MEMS from its English acronym) was made in the sixties, necessity to create miniaturized elements' designs has been subject of research and study to scientifics from different areas throughout history and it has increased markedly during last decade.

This paper, first of all shows an overview of microelectromechanical systems, talking about its most important application areas and doing a thermo-mechanical actuators' detailed analyze. Then, it is made a description about the most common thermal actuators, the way as these work and its main characteristics. Besides, here is globally shown the microfabrication technology, illustrating the most used processes in this field.

This also reports the development of a structural, thermal and electrical modeling to an actuation system to actuate a microgripper. After that, a mathematical modeling is made from differential equations which govern the behavior of the electric, thermal and structural variables and also it develops and implements an algorithm by using Matlab. Also, it's done a numerical simulation of the system by using Comsol Multiphysics software. With both results is made a comparison to the model validation, setting deviation percentages to one with respect to other. From the algorithm developed into Matlab is designed the actuation system to actuate a microgripper, by completely characterizing the system and by analyzing the behavior of the electrical, thermal and structural variables which are involved into gripping and manipulating processes to microscopic level objects.

* Degree project

** Physical-mechanical Faculty of Engineering, School of Mechanical Engineering. Director: Carlos Borrás Pinilla

INTRODUCCIÓN

A medida que la tecnología avanza se pueden apreciar los grandes cambios que se han producido alrededor del mundo. El siglo XXI se ha caracterizado por los logros obtenidos en miniaturización y el almacenamiento de grandes cantidades de información. Esta tendencia se demuestra mejor por la revolución de la información experimentada por nuestra sociedad durante las últimas décadas, la cual fue resultado del notable desarrollo de los circuitos integrados (ICs), consecuencia del progreso en la fabricación de materiales semiconductores. En esta dimensión miniaturizada ha sido necesaria la construcción de nuevas herramientas que sustituyan las capacidades humanas a escala microscópica, este conjunto de herramientas forman parte de los llamados Sistemas Micro Electro Mecánicos.

A partir del primer Sistema Micro Electro Mecánico (MEMS por sus siglas en ingles), construido en los sesenta, la necesidad de diseñar elementos miniaturizados ha sido motivo de investigación y estudio para científicos de diversas áreas a lo largo de la historia y se ha incrementado notoriamente en la última década.

Este documento pretende mostrar el análisis, modelamiento y simulación de un micro-actuador basado en la tecnología MEMS, aplicado al área de sujeción de objetos mediante una micro-pinza.

1. OBJETIVOS

1.1 OBJETIVO GENERAL

Contribuir con la misión de la Universidad Industrial de Santander la cual promueve la formación de personas de alta calidad ética, política y profesional; la investigación, generación y adecuación de conocimientos, mediante el análisis, diseño y simulación de un micro-actuador termo-mecánico tipo chevron aplicado al accionamiento de una micro-pinza para la manipulación de objetos.

1.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Realizar un modelado matemático multifísico (estructural, eléctrico y térmico) del micro-actuador termo-mecánico tipo chevron y de la micro-pinza.
- Realizar una simulación numérica a partir del modelo matemático utilizando el software COMSOL MULTIPHYSICS y/o el software MATLAB y/o similares para observar y analizar el comportamiento de las variables (Voltaje, corriente, desplazamiento, fuerza, etc.) del microsistema (actuador termo-mecánico tipo chevron y micro pinza).
- Diseñar un micro-actuador termo-mecánico tipo chevron para el accionamiento de una micro-pinza (MEMS), con los siguientes requerimientos.
 - Para una fuerza de agarre de $10\mu\text{N}$ - $40\mu\text{N}$.
 - Voltaje de accionamiento de entre 0 V - 15 V.
 - Material: Poly-silicón (Poly-Si).

2. SISTEMAS MICRO-ELECTROMECA'NICOS (MEMS)

2.1 GENERALIDADES

Los sistemas micro-electro-mec'nicos (MEMS, acr'nico del ingl' Micro-Electro-Mechanical Systems) son dispositivos formados por partes el'ctricas y mec'nicas m'viles suspendidas que realizan una funci'n espec'fica. Estas funciones son esencialmente la percepci'n, el procesado de datos, la comunicaci'n con el exterior y la acci'n sobre el entorno. La naturaleza del microsistema puede ser el'ctrica, magn'tica, 'ptica, t'rmica, mec'nica o flu'ida.

La arquitectura del microsistema incorpora circuitos electr'nicos y/u 'pticos, generadores de se'nal y receptores, micro-sensores, micro-actuadores y micro-generadores. Los circuitos electr'nicos/'pticos realizan principalmente funciones inteligentes, entre las que se encuentran el procesado de se'nal, el an'lisis de datos y las tareas de decisi'n. A su vez, la acci'n conjunta de generadores de se'nal y receptores, permiten realizar las funciones de comunicaci'n del microsistema. Los micro-sensores, por su parte, realizan funciones sensoriales de detecci'n y de percepci'n, mientras que los micro-actuadores llevan a cabo funciones de adaptaci'n y de acci'n/reacci'n. La autonom'ia del sistema est' garantizada por los micro-generadores que realizan funciones de suministro y de transformaci'n de la energ'ia.

El tama'no de estos dispositivos es inferior a las centenas de micras y se fabrican usando algunas tecnolog'ias de circuitos integrados (IC, acr'nico del ingl' Integrated Circuits) y otras espec'ficas de micro-mecanizado.

2.2 CLASIFICACIÓN DE LOS SISTEMAS MICRO-ELECTROMECAÑICOS SEGÚN SU ÁREA DE APLICACIÓN

Según la función que cumplen se pueden clasificar de la siguiente manera¹:

- Sensores: Son dispositivos MEMS diseñados para medir cambios e interactuar con el ambiente. Estos microsistemas incluyen sensores químicos, de movimiento, inerciales, térmicos y ópticos.
- Micro-actuadores: Son un grupo de dispositivos diseñados para proporcionar un estímulo a otros componentes o dispositivos MEMS. En los microsistemas los actuadores son operados electrostática o térmicamente.
- MEMS RF: Son una clase de dispositivos usados para transmitir alta frecuencia, es decir señales de radio frecuencia. Los dispositivos típicos incluyen: interruptores (switches), capacitores, antenas, etc.
- MEMS ópticos: Son dispositivos diseñados para dirigir, reflejar, filtrar, y/o amplificar la luz. Estos componentes incluyen interruptores ópticos y reflectores.
- MEMS para micro-fluidos: Son dispositivos diseñados para interactuar con fluidos. Dispositivos como bombas y válvulas se han diseñado para trabajar con pequeños caudales.
- Bio MEMS: Son dispositivos que son diseñados para interactuar específicamente con muestras biológicas. Son diseñados para interactuar con proteínas, células, reactivos médicos, etc. y pueden usarse para suministrar medicamentos o realizar un análisis médico en sitio.

Estas seis áreas representan aplicaciones totalmente diferentes de dispositivos MEMS que actualmente se encuentran en uso o en desarrollo para aplicaciones comerciales o gubernamentales.

¹ MARQUEZ, David y CARDENAS, Oscar. Estado del arte de los sistemas microelectromecánicos. En: revista Ciencia e Ingeniería. Vol. 27, No.3, Agosto de 2006. p. 119-117.

2.3 MICRO-ACTUADORES

Un actuador es un dispositivo que se utiliza para generar una perturbación en algún sistema. Para nuestros propósitos, vamos a considerar los actuadores en el orden de las micras (menos de 1 mm). Este dispositivo transforma la energía en un movimiento controlable.

Las primeras aplicaciones relacionadas con la micro-ingeniería fueron los sensores. La idea de usar estas técnicas en actuadores fue desarrollada a partir de los micro-sensores, dada la cantidad de posibles aplicaciones a esta área. Unos ejemplos de micro-actuadores existentes en el mercado son los siguientes²:

- Micro bombas.
- Actuadores de presión para chorro de tinta mediante pulsos.
- Actuadores térmicos para chorro de tinta.
- Cabezas impresoras térmicas.
- Elementos de comunicación ópticos.
- Espejos exploradores.
- Micro- bombas y válvulas implantables, para dosificar medicamentos.
- Accionadores de dispositivos para la manipulación de objetos.

2.3.1 Clasificación de los micro-actuadores según su método de accionamiento. Algunas tecnologías de actuación permiten la integración de muchos micro-actuadores idénticos los cuales se combinan para formar un único actuador. Cuando se integran en una configuración paralela, la fuerza total es la suma de las fuerzas ejercidas por cada micro-actuador individual. En cambio sí se integran en una configuración en serie, la fuerza total es la misma fuerza ejercida

² Manuel José López Fernández. INTRODUCCION A LOS SISTEMAS MICROELECTROMECHANICOS MEMS. XXIII SEMINARIO DE INGENIERIA HOSPITALARIA. SEVILLA. Octubre 2.005. p.7.

por cada micro-actuador. Un tipo de clasificación de los micro-actuadores se realiza de acuerdo al tipo de energía de entrada tal como se muestra en la tabla 1.

Tabla 1. Clasificación de los Micro-actuadores según se método de accionamiento

ENERGÍA DE ENTRADA	CLASE	ACTUADOR
Eléctrica	Campo eléctrico y Magnético	Electrostático
		Electromagnético
		Piezo-eléctrico
		Piezo-cerámico
		Piezo-polímero
		Magnetostrictivo
		Aleaciones con memoria de forma
Neumática	Neumático	Alta presión
		Baja presión
	Hidráulica	Hidráulico
Térmica	Expansión térmica	Bimetálico
		Chevron
		Bimorfo
Química	Electrolítico	Electromecánico
	Explosivo	Pirotécnicos
Óptica	Fotomecánica	Fotomecánica
		Gel de polímero

Acústica	Vibración inducida	Vibrante
----------	--------------------	----------

Fuente: SANTANA, Andrea y VERDEZOTO, Gabriela. Estudio del estado del arte, modelamiento y simulación de MEMS (Micro-Electro-Mechanical-Systems) para el diseño de un prototipo orientado al área de automatización y control. Proyecto de grado para la obtención del título en ingeniería electrónica, automatización y control. Sangolquí – Ecuador: Escuela Politécnica del Ejército. Departamento de Eléctrica y Electrónica, 2011. p.223.

2.3.2 Actuadores termo-mecánicos. Este tipo de actuadores combina la energía eléctrica con la térmica. Mediante el suministro de energía eléctrica se produce una expansión térmica en el material de los actuadores, debido al efecto Joule. Se conoce como efecto Joule al fenómeno por el cual si en un conductor circula corriente eléctrica, parte de la energía cinética de los electrones se transforma en calor debido a los choques que sufren con los átomos del material conductor por el que circulan, elevando la temperatura del mismo³.

Los actuadores termo-mecánicos se clasifican principalmente en tres categorías que son actuadores bimetalicos, actuadores bimorfos y actuadores Chevron. A continuación se describirán brevemente.

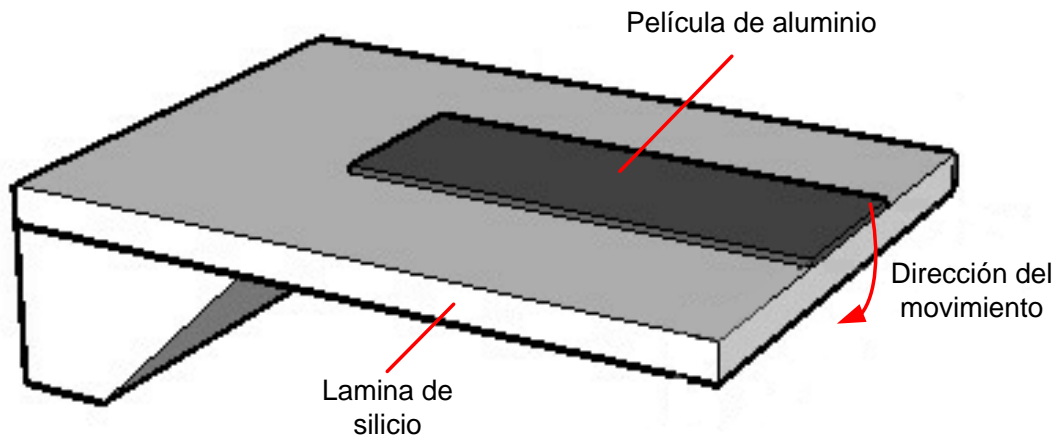
2.3.2.1 Actuador termo-mecánico bimetalico. Este tipo de micro-actuador térmico denominado bimetalico se utiliza a menudo en MEMS cuando se requieren grandes desplazamiento o fuerzas de salida, además cuando se necesita un movimiento rotativo. Un micro-actuador térmico bimetalico se compone de dos materiales diferentes que se superponen entre sí como se muestra en la figura 1. Cuando se calientan (por el efecto Joule), se genera una deflexión por la expansión térmica diferente entre los dos materiales. Por la diferencia de los coeficientes de expansión térmica de los dos materiales se genera una deflexión mayor en el material de mayor coeficiente de expansión.

A menudo, el material base es de silicio y la película delgada de otro material, por ejemplo de aluminio, la cual se deposita en la parte superior. Frecuentemente se utilizan estructuras similares a voladizos. El espesor de la película se expresa

³ Efecto Joule [online]. [citado 21 marzo de 2013]. En: <http://enciclopedia.us.es/index.php/Efecto_Joule>.

como un porcentaje del espesor de la viga. La deflexión aumenta con el espesor de la película y alcanza un máximo en un espesor particular y luego disminuye.

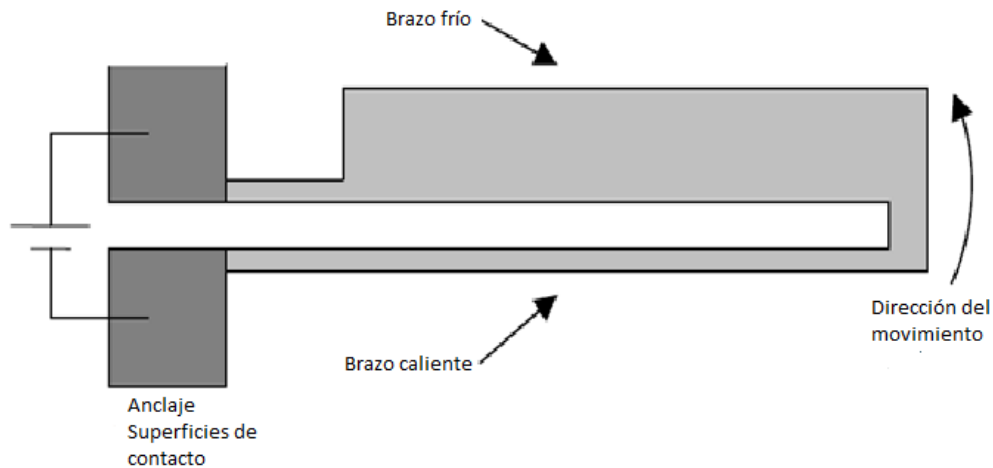
Figura 1. Micro-actuador térmico bimetálico



Fuente: MEMSolver Online Help. [En: < http://www.memsolver.com/Help/index.html >](http://www.memsolver.com/Help/index.html).

2.3.2.2 Actuator termo-mecánico bimorfo. Un actuador térmico bimorfo consta de una región fría y una región caliente que están conectadas entre sí. Opera generando una diferencia de temperatura entre el brazo caliente y frío debido a los distintos valores de resistencia de cada sección del micro-actuador. En el micro-actuador térmico bimorfo, el brazo caliente es más delgado que el brazo frío como se muestra en la figura 2, por lo que la resistencia eléctrica del brazo caliente es mayor que la del brazo frío. Cuando una corriente eléctrica pasa a través de los brazos, el calor generado (por efecto Joule) en el brazo caliente es mayor que el generado en el brazo frío, provocando que la temperatura del brazo caliente sea mucho más alta que la del otro brazo. Dado que los dos brazos están hechos del mismo material (silicon o poly-silicon) y poseen el mismo coeficiente de expansión térmica, la diferencia de temperatura hace que un brazo se expanda más que el otro. Esto produce un movimiento de arco pivotante alrededor de la base.

Figura 2. Microactuador térmico bimorfo

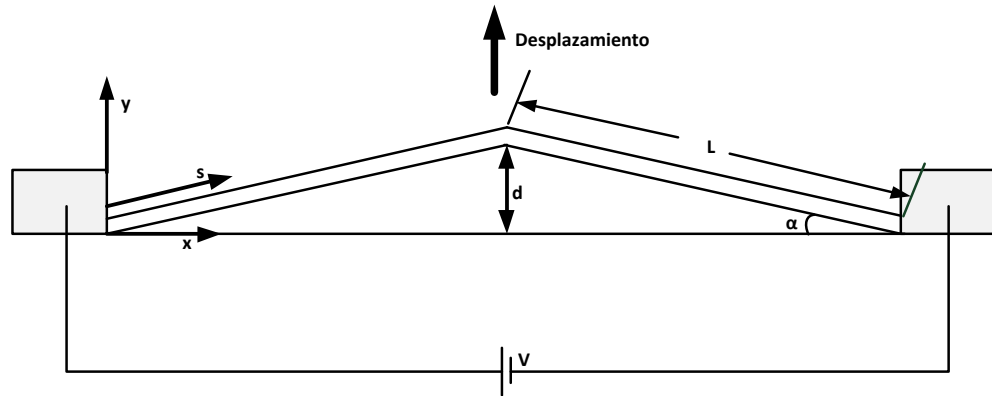


Fuente: MEMSolver Online Help. En: <<http://www.memsolver.com/Help/index.html>>.

2.3.2.3 Actuator termo-mecánico Chevron. Los actuadores termo-mecánicos tipo Chevron utilizan una serie de vigas que se enfrentan entre sí en pares para generar movimiento unidireccional. Las vigas están diseñadas con un ángulo α de pre-curvatura, debido a esto el actuador tiene una tendencia a moverse en el plano paralelo al sustrato como se representa en la figura 3. Los actuadores Chevron son típicamente operados a través de calentamiento Joule, debido a esto, el par de vigas se expanden generando un movimiento lineal. La deflexión de un actuador Chevron depende fuertemente de la longitud y el ángulo de las vigas.

Los actuadores térmicos generan una fuerza grande, pero los desplazamientos de dilatación térmica lineal son pequeños. Cuando el micro-actuador se calienta al máximo permitido, alcanza su mayor desplazamiento. El tiempo que tarda en alcanzar este estado, es el tiempo de respuesta del actuador, luego la energía se desconecta y el actuador se enfría volviendo a su posición original. Generalmente este tipo de micro-actuadores se diseñan y fabrican en silicon o poly-silicon.

Figura 3. Microactuador térmico chevron



Fuente: FLEWITT, A J, et al. Three types of planar structure microspring electro-thermal actuators with insulating beam constraints [online]. [En: < http://www-mech.eng.cam.ac.uk/profiles/fleck/papers/214.pdf >](http://www-mech.eng.cam.ac.uk/profiles/fleck/papers/214.pdf). p. 1528.

2.4 MATERIALES USADOS EN LA MICRO-FABRICACIÓN DE MEMS

Existen varios materiales utilizados en la fabricación de MEMS como son⁴:

1. Dióxido de silicio (SiO_2)
2. Carburo de silicio (SiC)
3. Nitruro de silicio (Si_3N_4)
4. Silicio poli cristalino o poly-silicio
5. Arseniuro de Galio (GaAs)
6. Cuarzo
7. Polímeros
8. Cristales piezoeléctricos

⁴ Fuente: SANTANA, Andrea y VERDEZOTO, Gabriela. Estudio del estado del arte, modelamiento y simulación de MEMS (Micro-Electro-Mechanical-Systems) para el diseño de un prototipo orientado al área de automatización y control. Proyecto de grado para la obtención del título en ingeniería electrónica, automatización y control. Sangolquí – Ecuador: Escuela Politécnica del Ejército. Departamento de Eléctrica y Electrónica, 2011. p. 20-31.

2.4.1 Silicio poly-cristalino. El silicio poly-cristalino o poly-silicon está formado por pequeños cristales de silicio. Presenta un factor de galga (cociente entre la resistencia eléctrica y la tensión) menor al del silicio mono cristalino, y mayor al de los metales. Por ello, este material ha sido utilizado con frecuencia en la fabricación de piezo-resistencias sobre sustratos aislantes en sensores de presión, acelerómetros o resonadores. También se ha usado en la fabricación de micro-actuadores de accionamiento eléctrico. Una desventaja del silicio poly-cristalino con respecto al mono-cristalino es que las obleas de mono-cristal son casi libres de estrés debido a su pureza, este no es el caso con poly-silicio. Después de la deposición del poly-silicio en algún proceso de micromaquinado debe ser recocido a altas temperaturas (por ejemplo, 900°C) para reducir las tensiones intrínsecas desarrolladas durante su crecimiento. La naturaleza de tracción / compresión de tensiones desarrolladas en poly-silicio durante la de deposición cambia con la temperatura. La cuidadosa adaptación de deposición a temperaturas y espesores de película de poly-silicio multicapa, alternadas de bajas a altas temperaturas, pueden llevar a la película a estar libre de estrés. Algunas propiedades fundamentales de poly-silicio se presentan en la Tabla 2.

Tabla 2. Propiedades mecánicas del poly-silicio

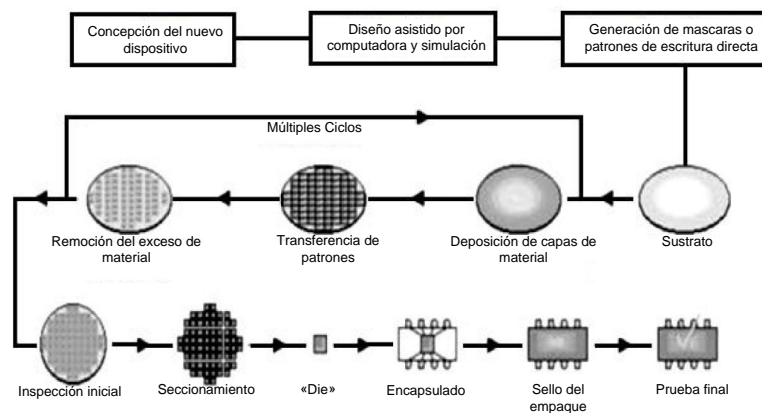
Propiedad	Valor
Conductividad térmica del poly-silicon	$K_p = 32 \mp 2 [W/m K]$
Resistividad eléctrica poly-silicon	$\rho_0 = 1.97 * 10^{-5} [\Omega . m]$
Coeficiente de expansión térmica poly-silicon	$\alpha_0 = 2.8 \mp 0.2 * 10^{-6} [1/K]$
Módulo de Young poly-silicon	$E_0 = 158 \mp 10 [GPa]$
Conductividad térmica del aire	$K_{aire} = 0.026 [W/m K]$

Fuente: MATMAT, Mohamed, Pour une approche complète de l'évaluation de fiabilité dans les microsystèmes. Doctorat de l'université de Toulouse. Université de Toulouse. Délivré par l'Institut National des Sciences Appliquées, Le 3 septembre 2010. p. 35.

2.5 MICROFABRICACIÓN

La microfabricación practicada en la microelectrónica y en los campos de MEMS, está basada en tecnologías planas: construcción de dispositivos electrónicos y componentes para MEMS sobre sustratos que están inicialmente en forma plana. Ya que la industria microelectrónica ha hecho grandes inversiones para el desarrollo de procesos tecnológicos basados en la producción de obleas, existe una gran ventaja para los diseñadores de MEMS para explotar estos procesos. Se presentaran los métodos de microfabricación en dos secciones principales: procesos a nivel de oblea y transferencia de patrones. La práctica común es identificar el micromecanizado volumétrico; proceso que graba profundamente en el sustrato y el micromecanizado superficial que elimina capas de sacrificio de debajo de las estructuras de película delgada, dejando independientes las estructuras mecánicas. El proceso general de microfabricación se puede apreciar en la figura 4.

Figura 4. Proceso de micro-fabricación



Fuente: A. Malshe, C. O'Neal, S. Singh, W. Brown, W. Eaton y W. Miller, "Challenges in the packing of MEMS", International Journal of Microcircuits and Electronic Packaging, Vol. 22, 1999.

2.5.1 Sustratos. Dentro de los sustratos que se pueden elegir están los de silicio monocristalino, cuarzo monocristalino, vidrio y cuarzo fundido. Actualmente se

presta atención al arsenuro de galio, variedad de dispositivos optoelectrónicos se puede fabricar con ese material. Todos están disponibles en forma de oblea en tamaños que son compatibles con el equipo de procesamiento de la microelectrónica estándar. Como la industria de la microelectrónica se mueve hacia tamaños más y más grandes de obleas, hay una presión sobre los fabricantes de MEMS para desplazarse a tamaños de obleas más grandes y mantener la compatibilidad con el equipo de producción. Sin embargo, la fabricación de MEMS obedece a una economía diferente a la microelectrónica estándar; por lo tanto, en comparación con la microelectrónica convencional, hay menos presión para ir a tamaños más grandes de la oblea. De hecho, la planificación cuidadosa y una capacidad de producción bien diseñada de las instalaciones de fabricación de MEMS, permite trabajar sobre obleas de menor tamaño.

La mayoría de los cristales de silicio de alta pureza se producen a partir del método Czochralski⁵. Un pequeño cristal de siembra con una orientación preseleccionada se inserta en un crisol calentado que contiene una masa fundida altamente purificada. La semilla se tira gradualmente a partir de la masa fundida mientras que el crisol que contiene la masa fundida se hace girar. La temperatura de fusión y la velocidad de tracción se controlan para equilibrar la tasa de crecimiento del cristal con la tracción de la tasa. Un método alternativo se denomina zona de flotación, abreviado FZ. Comenzando con una varilla de polisilicio, un calentador de radio-frecuencia crea una zona local de fundido que se arrastra desde un extremo de la varilla a la otra. Para iniciar el crecimiento, un cristal de siembra se puede utilizar en un extremo del conjunto de la varilla.

La calidad de cristal de silicio se especifica en términos de sus impurezas químicas e imperfecciones estructurales, tales como defectos puntuales (átomos

⁵ S. A. Campbell. The Science and Engineering of Microelectronic Fabrication. New York: Oxford University Press, 1996.

de falta o fuera de lugar) y dislocaciones (lugares donde los planos del cristal no se acoplan perfectamente entre sí). Las Obleas CZ tienen por lo general cantidades más altas de impurezas químicas residuales, tales como el carbono, el oxígeno y los metales pesados, en comparación con las obleas FZ porque la zona fundida tiende a llevar a las impurezas con ella, ya que barre desde un extremo de la varilla al otro. El oxígeno como una impureza en obleas CZ tiene algún beneficio en ciertas secuencias de fabricación de dispositivos microelectrónicos, como la migración de defectos puntuales durante los pasos de los procesos de alta temperatura lejos de las superficies en las que se fabrican los dispositivos. Por otra parte, las obleas FZ de mayor pureza pueden ser necesarias en dispositivos en los que debe reducirse a un mínimo la contaminación de metales pesados. La densidad de dislocación también se ve afectada por el procesamiento a alta temperatura. Sin embargo, los cristales de ahora se pueden cultivar virtualmente, libres de las formas más perturbadoras de dislocaciones. Las obleas se suministran en diámetros estándar y espesores, y se pulen para reflejar suavidad en uno o ambos lados. Espesores no estándar también se pueden comprar, aunque a precios elevados.

Las obleas también se caracterizan por su nivel de dopaje, de tipo n o de tipo p. El dopaje, es discutido con más detalle en la sección 2.5.3, se refiere al proceso por el cual las impurezas se añaden intencionalmente para modificar la conductividad eléctrica del material. En el caso del proceso CZ, se añaden agentes de dopado a la masa fundida de partida, y se incorporan de manera uniforme cuando el cristal crece. Por el momento, basta señalar que la introducción de átomos del grupo III como el boro produce material de tipo p, mientras que la introducción de átomos del grupo V, como el fósforo y el arsénico produce material de tipo n.

2.5.2 Limpieza de la oblea. Antes de que una oblea se pueda utilizar en procesos microelectrónicos que implican altas temperaturas, se debe limpiar. El

conjunto estándar de medidas de limpieza de obleas se llama RCA Clear⁶. El primer paso es la eliminación de todos los recubrimientos orgánicos con un oxidante fuerte, una mezcla 7:3 de ácido sulfúrico concentrado y peróxido de hidrógeno. A continuación, los residuos orgánicos se eliminan con una mezcla 5:1:1 de oblea, peróxido de hidrógeno, e hidróxido de amonio. Debido a que en este paso se puede formar un óxido delgado sobre el silicio, es necesario insertar un ácido fluorhídrico diluido para eliminar este óxido y limpiar el silicio. El baño en HF se omite si no se desea remover la capa de óxido. Por último, se eliminan los contaminantes iónicos con una mezcla 6:1:1 de oblea, ácido clorhídrico y peróxido de hidrógeno. Tenga en cuenta que la solución de limpieza no tiene cationes metálicos. La limpieza debe realizarse antes de cada paso de alta temperatura (oxidación, difusión, o la deposición química de vapor).

2.5.3 Dopaje. El dopaje es proceso por el cual se añaden contaminantes a los cristales del semiconductor, modificando de este modo las características eléctricas del material. El silicio es un semiconductor del grupo VI. Los átomos dopantes del grupo III de la tabla periódica, tales como el boro, crean portadores de cargas libres en el silicio que se comportan como especies cargadas positivamente.

Los materiales en los que las cargas positivas predominan son llamados tipo p. Los átomos dopantes del grupo V de la tabla periódica, como el fósforo, arsénico y antimonio, crean especies cargadas negativamente. Estos materiales cargados negativamente son llamados de tipo n. Cuando una región contiene dopantes de ambos tipos, la concentración neta de dopante en una región es la que determina su tipo de conductividad. Así, una región inicialmente de tipo p se puede convertir en una región de tipo n mediante la adición de más agente de dopado tipo n que la cantidad de dopante de tipo p originalmente presente. Este proceso se llama

⁶ S. Wolf and R. N. Tauber, Silicon Processing for the VLSI Era, Vol. 1: Process Technology. Sunset Beach, CA, USA: Lattice Press, second ed., 2000.

contra-dopaje, y es crítico para la fabricación de dispositivos microelectrónicos y MEMS.

El proceso de dopaje en una oblea consta de dos pasos: deposición, que es la entrega de la cantidad correcta de átomos de dopante a una región cerca de la superficie de la oblea, por lo general por implantación de iones, y la unidad, que es la redistribución de los átomos de dopante por difusión.

2.5.4 Deposición de película delgada. En muchos procesos microelectrónicos es necesario depositar y posteriormente moldear una película delgada. Hay una amplia variedad de métodos para la realización de tales deposiciones, que se denominan generalmente procesos aditivos.

2.5.4.1 Deposición física de vapor. La deposición física de vapor, abreviada PVD, cubre dos métodos principales: la evaporación y la pulverización. La evaporación se utiliza principalmente para los metales. La superficie de una muestra de metal en un crisol se calienta con un haz de electrones incidente. El flujo de los átomos de vapor del crisol se deja alcanzar a la oblea. Esta evaporación debe realizarse bajo condiciones de alto vacío. La evaporación con un haz de electrones es muy direccional, lo que permite efectos de sombreado interesantes. Por ejemplo, un sustrato inclinado permite que un lado tenga características específicas, mientras que el otro lado este sombreado. Tal método se utiliza para depositar electrodos en los lados de grabado de microestructuras de cuarzo utilizadas en los acelerómetros y giroscopios.

La pulverización catódica es un proceso en el que los átomos químicamente inertes, tales como argón, se ionizan en una descarga luminiscente. Los iones son acelerados por un campo eléctrico. Los átomos sobrantes son eliminados y a los demás se les permite alcanzar el sustrato. La pulverización tiene lugar en un

ambiente de gas de baja presión. No se puede direccionar como en la evaporación por haz de electrones y por lo general puede alcanzar velocidades de deposición más altas. Esto implica que sea el método más utilizado comercialmente. La pulverización catódica también se puede utilizar con objetivos no metálicos. Películas dieléctricas, tales como el dióxido de silicio, se puede someter a bombardeo iónico, aunque los métodos de deposición química de vapor, que se describen más adelante, son los preferidos para estas películas. Sin embargo, algunos materiales especiales, tales como las películas de óxido de zinc piezoeléctrico y nitruro de aluminio, son muy adecuados para la pulverización catódica.

2.5.4.2 Deposición química de vapor. La deposición química de vapor, abreviado CVD, se refiere a una clase de métodos de deposición en materiales precursores que se introducen en un horno calentado. Una reacción química se produce en la superficie de la oblea, lo que da como resultado la deposición. Una amplia variedad de materiales puede ser depositados por este método: películas de silicio que forman a partir de la descomposición de silano (SiH_4), con hidrógeno como un subproducto gaseoso; el nitruro de silicio se forma por la reacción de diclorosilano (SiH_2Cl_2) y amoníaco (NH_3), con hidrógeno y vapor de HCl en forma de subproductos gaseosos; el dióxido de silicio se forma por la reacción de silano o un derivado con una especie de oxidantes adecuados, tales como oxígeno u óxido nitroso, o de la descomposición de un organosiloxano. Las deposiciones CVD se realizan normalmente en condiciones de baja presión (menos de 1 Torr) y por lo general implican un gas diluyente inerte, tal como nitrógeno, además de las especies reaccionantes. La LPCVD, abreviatura utilizada para identificar el proceso de CVD de baja presión, es el proceso más importantes comercialmente. Con la excepción de la epitaxia de silicio, los procesos implican típicamente temperaturas en el intervalo de 500° a 850° C. Estas temperaturas son demasiado altas para llevar a cabo en obleas que han sido metalizadas con

aluminio u oro, ya que forman eutécticos con el silicio a temperaturas de entre 577 ° C y 380 ° C, respectivamente.

2.5.4.3 Electrodeposición. La electrodeposición o galvanoplastia, es un proceso electroquímico en el que los iones metálicos en solución se depositan sobre un sustrato. Los metales que están bien adaptados para el chapado son el oro, el cobre, el níquel, y las aleaciones de hierro-níquel. La mayoría de procesos de chapado implica el control de una corriente eléctrica aplicada. El chapado uniforme depende del mantenimiento de una densidad de corriente uniforme en todo el material.

El revestimiento se utiliza en la microelectrónica para formar interconexiones de cobre en circuitos integrados de silicio, y se utiliza en la creación de microestructuras de materiales magnéticos en sensores y actuadores. El Revestimiento también se utiliza en la fabricación de microestructuras cuando los moldes se hacen con la litografía óptica estándar y con el proceso llamado LIGA cuando los moldes se hacen utilizando litografía de rayos X.

2.5.4.4 Spin Casting. Las películas delgadas pueden ser depositadas mediante una técnica llamada spin casting. El material a depositar, típicamente un polímero, se disuelve en un disolvente adecuado. La solución se aplica a la oblea, y la oblea se hace girar a alta velocidad. Las fuerzas centrífugas, en combinación con la tensión superficial de la solución y la viscosidad de la solución extienden la película de espesor uniforme. La rotación también permite que una parte del disolvente se evapore, lo que aumenta la viscosidad de la película. Después de girar, se utiliza la cocción en un horno para eliminar el disolvente restante y, en función del material, para llevar a cabo reacciones químicas adicionales.

Spin casting es el método estándar para la deposición de resina fotosensible, una

capa de polímero fotosensible utilizado en la fotolitografía. También se puede utilizar para depositar una película de poliamida, que son polímeros aislantes que puedan soportar temperaturas hasta aproximadamente 400 °C. El polímero depositado, en este caso, es un ácido poliámico. El horneado de post-rotación elimina el disolvente y también convierte el ácidoámico a una imida, con la pérdida de una molécula de agua. Algunos poliamidas también son fotosensibles, y pueden ser modelados a través de litografía y luego utilizados como moldes para la deposición de las estructuras.

2.5.4.5 Tensión de película fina. Un problema importante con las películas delgadas depositadas es el control del estado de la tensión mecánica⁷. Por el momento, es suficiente afirmar que prácticamente todas las películas delgadas depositadas tienen algún grado de estrés en el plano y que la distribución de tensiones es sensible a las condiciones de procesamiento, y a la historia térmica posterior. Las tensiones de película fina pueden conducir a la curvatura y deformación de la propia oblea y flexión de las estructuras suspendidas.

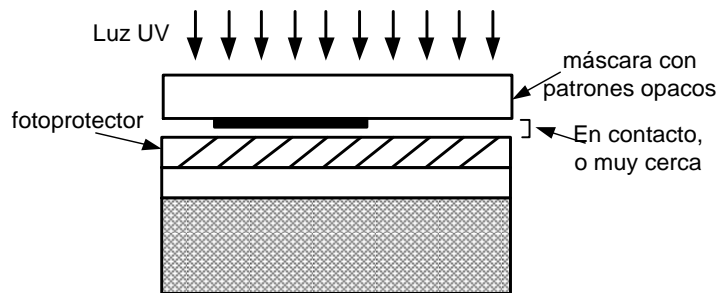
2.5.5 Transferencia de patrones. Los circuitos integrados y dispositivos microfabricados MEMS se forman mediante la definición de los patrones en las diversas capas creadas por los pasos del proceso a nivel de oblea. La transferencia de patrón consta de dos partes: un foto-proceso, mediante el cual el patrón deseado fotográficamente se transfiere de una placa óptica a un recubrimiento de película fotosensible de la oblea, y un proceso químico o físico para la eliminación o la adición de material para crear el patrón. La mayoría de procesos son sustractivos de eliminación de material no deseado por ataques químicos.

⁷ SENTURIA, Stephen D. *Microsystem design*. Massachusetts United States of America. Kluwer Academic Publishers. p.149-197. ISBN 0-7923-7246-8.

2.5.5.1 Litografía óptica. La litografía óptica es muy parecida al proceso fotográfico de producir una impresión a partir de un negativo. Impresiones de contacto se hacen cuando el negativo se coloca directamente sobre una hoja de papel fotosensible. La luz es aplicada sobre el negativo que esta sobre la superficie del papel, como la intensidad de la luz es variada expone la imagen en el documento, que se hace entonces visible a través de un proceso de desarrollo de productos químicos. Las ampliaciones o reducciones se hacen a partir de la interposición de lentes adecuadamente entre el negativo y el papel fotosensible. Los materiales que se usan en la litografía óptica son las resinas fotosensibles.

La figura 5 ilustra el proceso litográfico. Una foto-resina contiene el patrón para ser transferido como un conjunto de regiones opacas y transparentes. El contacto es con una oblea de silicio oxidado recubierto con resina fotosensible. La luz ultravioleta es dirigida a través de la máscara sobre la oblea. La exposición de las partes no protegidas de la capa protectora cambian sus propiedades químicas como resultado de la exposición a la luz. A diferencia de fotografía normal, la litografía óptica tal como se practica en la industria de los circuitos integrados no utiliza ningún tipo de escala de grises. Los procesos fotoquímicos en la foto-resina son relativamente altos en contraste y se desarrollan límites definidos entre las regiones expuestas y protegidas. El contacto litográfico es uno de los procesos estándar que se utilizan en la manufactura de MEMS.

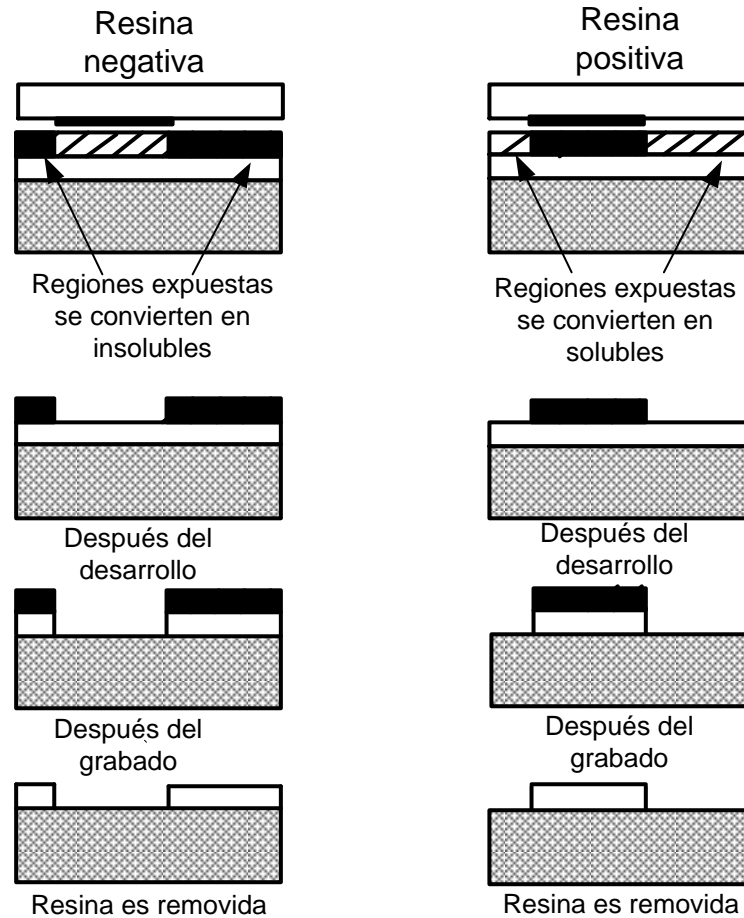
Figura 5. Contacto o aproximación fotolitográfico



Fuente: SENTURIA, Stephen D. Microsystem design. Massachusetts United States of America. Kluwer Academic Publishers. p.51. ISBN 0-7923-7246-8.

Lo que sucede después de la exposición, depende de la química específica de la resina fotosensible. Existen dos tipos de foto-resinas, negativas y positivas estas se ilustran en la figura 6.

Figura 6. Tipos de foto-resinas



Fuente: SENTURIA, Stephen D. Microsystem design. Massachusetts United States of America. Kluwer Academic Publishers. p.51. ISBN 0-7923-7246-8.

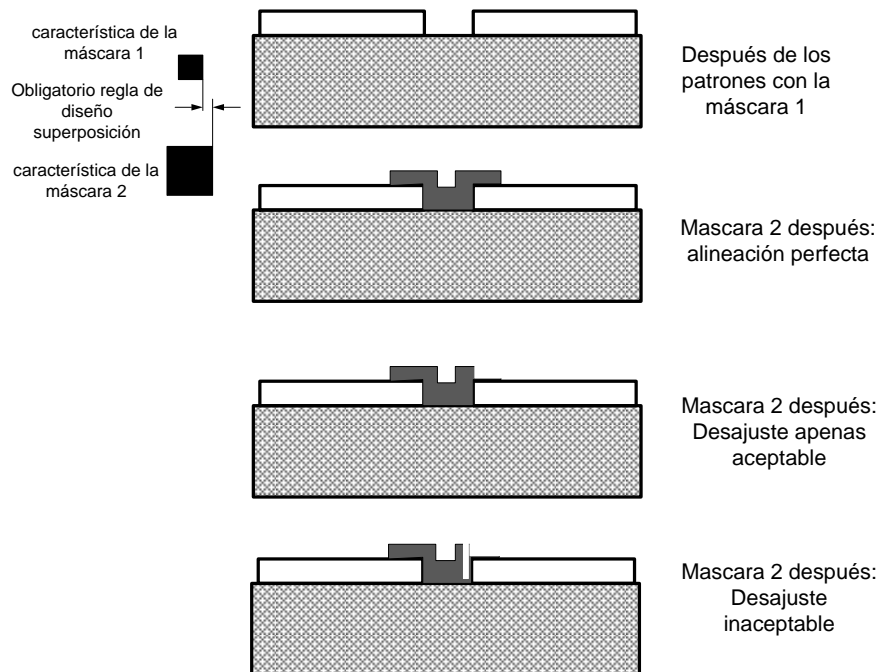
En la foto-resina negativa específicamente, las regiones que están expuestas a la luz ultravioleta se vuelven reticuladas e insolubles en el revelador, mientras que las regiones protegidas permanecen solubles.

La foto-resina positiva funciona opuestamente a la foto-resina negativa. La química de la resina fotosensible es diferente. Regiones expuestas a la luz UV se

vuelven más solubles en el revelador que las regiones protegidas. Después del desarrollo las regiones protegidas permanecen en la oblea de manera que después del grabado las regiones opacas de la máscara se mantienen como óxido y las regiones claras se eliminan.

2.5.5.2 Reglas de diseño. En el diseño de un proceso completo, cada capa debe estar alineada con las características previamente del modelado. La figura 7 muestra lo que puede ocurrir cuando hay desalineación, en la parte inferior se muestra una desalineación inaceptable. Las reglas de diseño especifican una superposición mínima entre dichas características. Las reglas son el desarrollo de la información estadística sobre los errores de alineación obtenidos del procesamiento del dispositivo y se estructuran de manera en cada paso del proceso se produzcan dispositivos aceptables. De esta manera obtener una alta productividad.

Figura 7. Proceso de desalineación



Fuente: SENTURIA, Stephen D. Microsystem design. Massachusetts United States of America. Kluwer Academic Publishers. p.52. ISBN 0-7923-7246-8.

Los procesos de circuitos integrados tienen muchas reglas de diseño que rigen en cada paso del desarrollo del proceso y en cada capa de máscara. En los dispositivos de MEMS, no hay reglas de diseño estándar. El diseñador del equipo debe evaluar el impacto de los posibles errores de alineación a cada paso y ajustar las funciones de máscara en consecuencia.

2.5.5.3 Máscaras para litografía. Puesto que las máscaras son la base para la litografía, es razonable preguntar de dónde provienen. La producción de máscaras es un proceso especializado que puede adquirirse de proveedores. Pero existen dos métodos básicos. Ambos comienzan con placas de Sílica fundida (cuarzo amorfo) que han sido recubiertas con una capa delgada de cromo y luego una foto-resina. El tipo de resina depende del método que se utilizará para crear la máscara.

2.5.5.4 Litografía de doble cara. Muchos de los dispositivos MEMS requieren patrones en ambos lados de una oblea. Para lograr la alineación posicional necesaria entre la parte delantera y trasera se requiere herramientas especiales. Primero se alinea la máscara de cara posterior a las marcas de referencia en la herramienta, la máscara debe estar sobre la oblea y luego se alinea la oblea con la parte delantera. De esta manera quedan las dos partes expuestas.

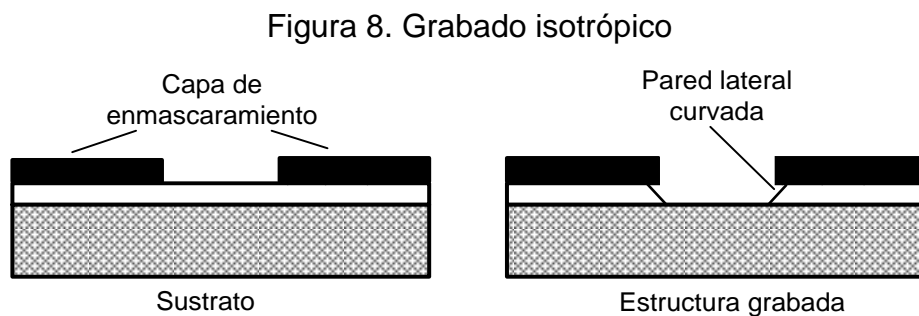
2.5.5.5 Litografía blanda. La llamada litografía blanda es un desarrollo relativamente reciente para la transferencia de patrones. A diferencia de la litografía óptica convencional, utiliza un cuerpo de polímero moldeado para lograr la transferencia del patrón físico, al igual que un sello de goma que se utiliza para presionar sobre una almohadilla de tinta en el papel.

2.5.5.6 Grabado húmedo. La técnica de grabado húmedo es la más simple. Esta técnica consiste en la remoción de material por inmersión de un sustrato

dentro de una solución a disolverse. A continuación se examinarán brevemente los distintos métodos de grabado utilizadas en la fabricación microelectrónica.

2.5.5.6.1 Grabado químico húmedo isotrópico. La mayoría de los grabados húmedos son isotrópicos, en el que la tasa de eliminación de material no depende de la orientación del sustrato. Sin embargo, cuando el grabado se hace en sustratos de cristal único con ciertos reactivos el ataque químico depende de la orientación.

La figura 8 ilustra el uso de grabado húmedo isotrópico a través de las aberturas en una capa de patrón de máscara de una película delgada sobre un sustrato. La suposición es que el reactivo de ataque no ataca la capa de enmascaramiento o el sustrato. La característica importante de este tipo grabado es que puede tener lugar en todas las direcciones a la misma velocidad.

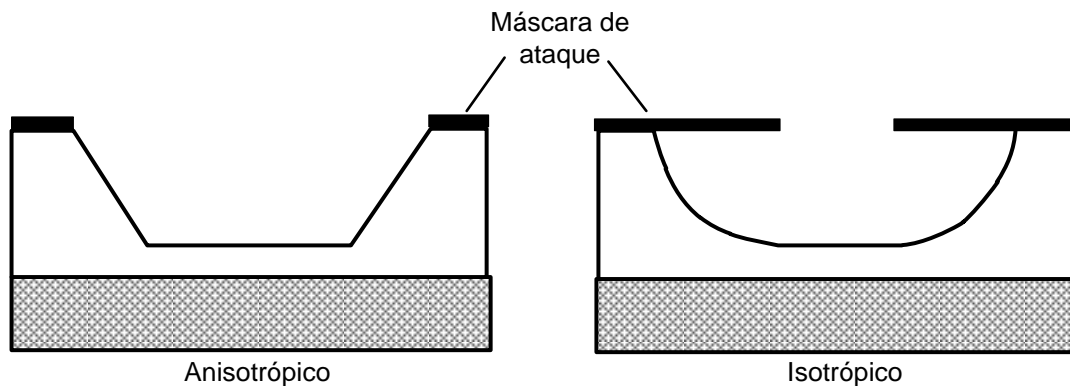


2.5.5.6.2 Grabado húmedo anisotrópico. El grabado electroquímico anisotrópico es importante en la fabricación de microsistemas, ya que es la base del proceso de micromecanizado en volumen. Desde su creación, el micromecanizado en volumen sigue siendo un método muy poderoso para la fabricación de elementos de micromecánica, tales como canales microhidráulicos, boquillas, membranas, suspensión de vigas y otros elementos móviles o

estructurales. Ocurre cuando el grabado se produce más rápido en una dirección que en las otras.

La diferencia entre los grados húmedos isotrópicos y anisótropos se puede apreciar en la figura 9.

Figura 9. Proceso isotrópico y anisotrópico



Fuente: SANTANA, Andrea y VERDEZOTO, Gabriela. Estudio del estado del arte, modelamiento y simulación de MEMS (Micro-Electro-Mechanical-Systems) para el diseño de un prototipo orientado al área de automatización y control. Proyecto de grado para la obtención del título en ingeniería electrónica, automatización y control. Sangolquí – Ecuador: Escuela Politécnica del Ejército. Departamento de Eléctrica y Electrónica, 2011. p.223.

2.5.5.7 Grabado en seco. Los vapores reactivos y las especies reactivas en plasmas de descarga luminiscente son agentes de ataque muy eficaz. Estos se clasifican en dos grupos: grabado de vapor y grabado asistido por plasma.

2.5.5.7.1 Grabado Vapor. Hay un vapor de reactivo de ataque que se ha convertido comercialmente importante en los procesos de micromecanizado. El difluoruro de Xenón (XeF_2), es un reactivo de ataque de vapor altamente selectivo para el silicio. Como resultado, es ideal para la liberación en seco de las superficies de las estructuras micromecanizadas en las que se utiliza polisilicio en la capa de sacrificio.

2.5.5.7.2 Grabado asistido por plasma. Un plasma de descarga luminiscente de baja presión produce especies ionizadas en abundancia. Cuando se dirige a la superficie de la oblea, estos iones pueden producir ambos efectos de pulverización catódica, eliminación de material por bombardeo por haz de iones directo.

Grabado profundo por iones reactivos (DRIE). DRIE es una versión más compleja en comparación al grabado por iones reactivos. Existen dos tecnologías principales: criogénicos y Bosch. El proceso de Bosch es el más aplicado, utiliza una base química del plasma de flúor para grabar el silicio. Además combina un proceso de plasma de carbono para mejorar la selectividad a los materiales.

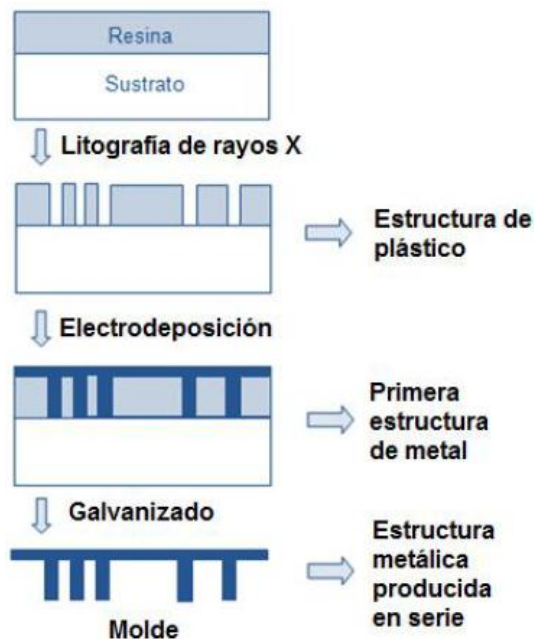
2.5.6 Tecnologías de micro-fabricación. La micro-fabricación de MEMS se divide actualmente en 3 tecnologías principales:

1. LIGA o micro-moldeo.
2. Micro-maquinado superficial.
3. Micro-maquina volumétrico.

2.5.6.1 Liga. El método LIGA se desarrolló en Alemania y significa Lithographie (Litografía), Galvanoformung (Electrodeposición) y Abformung (Moldeo). En este proceso se obtienen las micro-estructuras a partir de moldes creados mediante fotolitografía de rayos X seguida de metalizado. Se parte de una capa de material resistente a la luz como la resina, colocada encima de un sustrato metálico. Sobre esta capa se coloca una máscara y se transmite el patrón utilizando radiación X de una fuente sincrotrón. Esta fuente presenta una radiación con gran intensidad, gran brillantez y polarización. Además debido a la longitud de onda se puede conseguir una penetración profunda.

Después el molde obtenido de resina se replica gracias a un proceso de electrodeposición (“electroplating”), donde los agujeros del molde se llenan de metal (Ni, Cu, Au o distintos tipos de aleación). Una vez realizado el molde metálico, éste puede utilizarse para replicar la pieza en plástico, metal o cerámica con un bajo costo. Un esquema del proceso se observa en la figura 10.

Figura 10. Proceso de liga



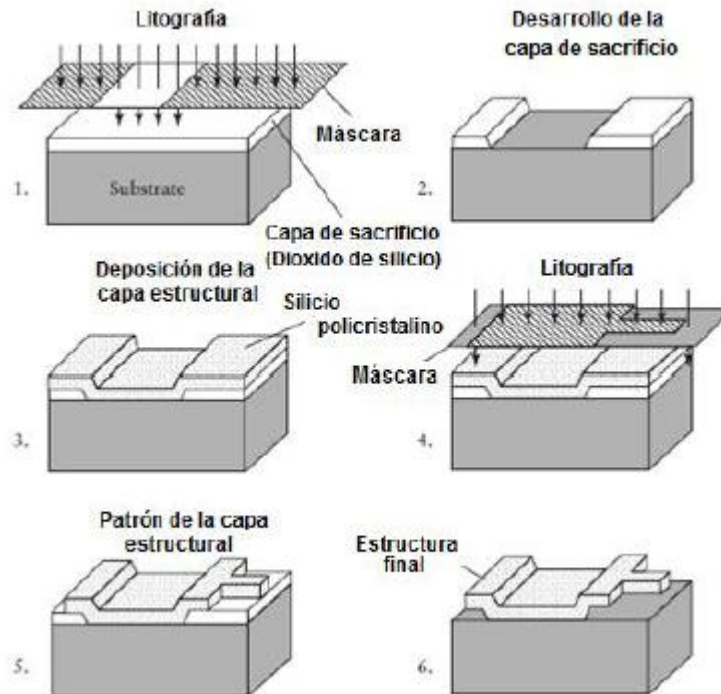
Fuente: SANTANA, Andrea y VERDEZOTO, Gabriela. Estudio del estado del arte, modelamiento y simulación de MEMS (Micro-Electro-Mechanical-Systems) para el diseño de un prototipo orientado al área de automatización y control. Proyecto de grado para la obtención del título en ingeniería electrónica, automatización y control. Sangolquí – Ecuador: Escuela Politécnica del Ejército. Departamento de Eléctrica y Electrónica, 2011. p.112.

2.5.6.2 Micro-maquinado superficial. El micro-maquinado superficial se creó a fines de los 80 para hacer el micro-maquinado de silicio compatible con la tecnología del circuito integrado (CI). De esta manera se puede combinar MEMS y circuitos integrados en la misma oblea de silicio.

Esta es una técnica de fabricación aditiva para construir micro-estructuras sobre la superficie del sustrato. El proceso empieza con sucesivas deposiciones de capas finas, luego transmisión de patrones utilizando litografía y por último un grabado selectivo. Se aplica un grabado seco para definir las características de la superficie en el plano XY. También se puede utilizar un grabado húmedo

isotrópico para liberar las capas. El proceso del micro-maquinado superficial se puede observar en la figura 11.

Figura 11. Micro-maquinado superficial



Fuente: S. Fatikow, U. Rembold, "Microsystems Technology and Microrobotics", Springer, New York, 1997

El micro-maquinado superficial requiere materiales estructurales compatibles con los materiales de sacrificio y con los decapantes químicos. Los materiales estructurales deben poseer propiedades físicas y químicas adecuadas para la aplicación. Además deben cumplir con las propiedades mecánicas, por ejemplo: alto rendimiento y buena resistencia al desgaste. Así también, los materiales de sacrificio también deben tener buenas propiedades mecánicas para evitar fallas en el dispositivo durante la fabricación. Además, deben poseer una buena adherencia y bajas tensiones residuales para evitar la formación de grietas. Para remover el material de sacrificio sin afectar a los materiales estructurales se utiliza un grabado selectivo. Los materiales utilizados en el micro-maquinado superficial que son compatibles con los CI se especifican en la tabla 3:

Tabla 3. Materiales utilizados en el micro-maquinado superficial

Material	Material Estructural	Material de Sacrificio	Proceso
Dióxido de Poli-Si/Silicio	Por LPCVD: Poli-Silicio	Por LPCVD: Silicio	El óxido se disuelve fácilmente en una solución de alta frecuencia sin afectar el poli-Si. El nitruro de silicio es usado para el aislamiento eléctrico.
Poliamida/ aluminio	Poliamida	Aluminio	Ácido-base utilizada para disolver la capa de Al.
Nitruro de silicio/ poli-silicio	Nitruro de silicio	Poli-silicio	KOH y EDP usados para disolver el Poli-silicio.
Tungsteno / Dióxido de Silicio	Por (CVD): Tungsteno	Óxido	Solución de HF

Fuente: SANTANA, Andrea y VERDEZOTO, Gabriela. Estudio del estado del arte, modelamiento y simulación de MEMS (Micro-Electro-Mechanical-Systems) para el diseño de un prototipo orientado al área de automatización y control. Proyecto de grado para la obtención del título en ingeniería electrónica, automatización y control. Sangolquí – Ecuador: Escuela Politécnica del Ejército. Departamento de Eléctrica y Electrónica, 2011. p.115.

2.5.6.2.1 Proceso para realizar el micro-maquinado superficial. Existen 2 posibilidades de implementación de esta tecnología:

- Una máscara
- Dos máscaras

2.5.6.3 Micro-maquinado volumétrico. El micro-maquinado volumétrico es una de las tecnologías de microfabricación de silicio más populares. Surgió en la década de 1960 y se ha utilizado para realizar estructuras con volumen. Se utiliza en la fabricación de la mayoría de dispositivos comerciales como sensores de presión, válvulas de silicio y el 90% de los acelerómetros de silicio.

Es una técnica de fabricación subtractiva para construir micro-estructuras por eliminación de material sobrante de un substrato base, mediante el mecanizado de canales y carriles.

Este proceso permite eliminar de forma selectiva cantidades significativas de silicio, generalmente en la cara inferior. Además se pueden obtener cavidades útiles en la fabricación de membranas y otro tipo de transductores para la fabricación de sensores.

2.5.6.3.1 Proceso para realizar el micro-maquinado volumétrico. En los procesos de micro-maquinado volumétrico parte de la pieza inicial (substrato) se elimina con el fin de crear estructuras mecánicas libres de contacto.

Por ejemplo: estructuras en voladizo o membranas, o estructuras tridimensionales como cavidades o agujeros. Estos elementos atraviesan la oblea mediante el uso de reactivos dependientes de la orientación (isotrópicos) y/o independientes de la orientación (anisotrópicos). El micro-maquinado en volumen se puede aplicar en piezas de silicio, vidrio, arseniuro de galio u otros materiales.

2.5.7 Análisis comparativo. En la tabla 4 se realiza una comparación entre las técnicas de microfabricación superficial y volumétrico:

Tabla 4. Comparación entre las técnicas de micro-maquinado superficial y volumétrico

Características	Micro-Maquinado superficial	Micro-Maquinado volumétrico
Técnica	Aditiva	Substractiva
Dispositivos	De pequeños rasgos con bajo espesor y masa.	De grandes rasgos con considerable masa y grosor.
Oblea	Utiliza un lado	Utiliza los dos lados.
Mecanismos de Detección	Capacitivos	Piezo-resistivos.
	Resonantes	Capacitivos.

Fuente: SANTANA, Andrea y VERDEZOTO, Gabriela. Estudio del estado del arte, modelamiento y simulación de MEMS (Micro-Electro-Mechanical-Systems) para el diseño de un prototipo orientado al área de automatización y control. Proyecto de grado para la obtención del título en ingeniería electrónica, automatización y control. Sangolquí – Ecuador: Escuela Politécnica del Ejército. Departamento de Eléctrica y Electrónica, 2011. p.120.

En la tabla 5 se realiza un análisis comparativo de las 3 técnicas utilizadas en la micro-fabricación de MEMS:

Tabla 5. Análisis comparativo de las 3 técnicas

Técnica	Ventaja	Desventaja
LIGA	<ul style="list-style-type: none"> • Es posible un rango amplio en los tamaños de las piezas, con alturas que van de los micrómetros a los centímetros. • Alta precisión. 	<ul style="list-style-type: none"> • LIGA usa exposición a rayos x, por lo que afecta la salud humana. • LIGA es un proceso muy costoso, requiere grandes cantidades de fabricación para justificar su utilización.
MICRO-MAQUINADO SUPERFICIAL	<ul style="list-style-type: none"> • Permite combinar los circuitos integrados con los MEMS en una sola oblea. 	<ul style="list-style-type: none"> • Requiere una limpieza al final del proceso
MICRO-MAQUINADO VOLUMÉTRICO	<ul style="list-style-type: none"> • Se pueden fabricar MEMS en 3 dimensiones. 	<ul style="list-style-type: none"> • Las obleas pueden ser frágiles, cerca del final de la producción.

Fuente: SANTANA, Andrea y VERDEZOTO, Gabriela. Estudio del estado del arte, modelamiento y simulación de MEMS (Micro-Electro-Mechanical-Systems) para el diseño de un prototipo orientado al área de automatización y control. Proyecto de grado para la obtención del título en ingeniería electrónica, automatización y control. Sangolquí – Ecuador: Escuela Politécnica d

3. MARCO TEÓRICO

3.1 MECANISMOS DE TRANSFERENCIA DE CALOR

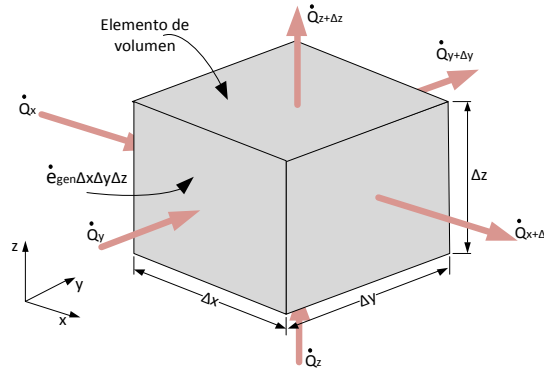
A continuación se hará una breve descripción de los mecanismos de transferencia de calor por convección y conducción.

3.1.1 Conducción de calor. La mayoría de los procesos de transferencia de calor por conducción se dan en forma multidimensional. A continuación se desarrollara la ecuación diferencial que rige tales sistemas en coordenadas rectangulares. Para ello se considera un pequeño elemento rectangular de longitud Δx , ancho Δy y altura Δz , como se muestra en la figura 12. Suponga que la densidad del cuerpo es ρ y el calor específico es C . Un balance de energía sobre este elemento, durante un pequeño intervalo de tiempo Δt , se puede expresar como⁸:

$$\left(\begin{array}{l} \text{Razon de} \\ \text{conduccion del} \\ \text{calor en } x, y, z \end{array} \right) - \left(\begin{array}{l} \text{Razon de} \\ \text{conduccion del} \\ \text{calor de } x + \Delta x, \\ y + \Delta y, z + \Delta z \end{array} \right) + \left(\begin{array}{l} \text{Velocidad de} \\ \text{generacion de} \\ \text{calor en el} \\ \text{interior del} \\ \text{elemento} \end{array} \right) = \left(\begin{array}{l} \text{Razon de} \\ \text{cambio del} \\ \text{contenido de} \\ \text{energia del} \\ \text{elemento} \end{array} \right)$$

⁸ YUNUS, Cengel. Transferencia de calor y masa. Un enfoque práctico. Traducida: Jose Hernán Pérez Castellano y Javier Enríquez Brito. 3 ed. Mexico D.F.: McGraw-Hill, 2007. p. 74. ISBN-13: 978-970-10-6173-2

Figura 12. Conducción tridimensional de calor a través de un elemento rectangular de volumen.



Fuente: YUNUS, Cengel. Transferencia de calor y masa. Un enfoque práctico. Traducida: Jose Hernán Pérez Castellano y Javier Enríquez Brito. 3 ed. Mexico D.F.: McGraw-Hill, 2007. p. 74. ISBN-13: 978-970-10-6173-2

O bien:

$$\dot{Q}_x + \dot{Q}_y + \dot{Q}_z - \dot{Q}_{x+\Delta x} - \dot{Q}_{y+\Delta y} - \dot{Q}_{z+\Delta z} + \dot{E}_{gen, elemento} = \frac{\Delta E_{elemento}}{\Delta t} \quad (1)$$

Dado que el volumen del elemento es $V_{elemento} = \Delta x \Delta y \Delta z$, el cambio en el contenido de energía en dicho elemento y la velocidad de generación de calor dentro del mismo se pueden expresar, como:

$$\Delta E_{elemento} = E_{t+\Delta t} - E_t = mc(T_{t+\Delta t} - T_t) = \rho c \Delta x \Delta y \Delta z (T_{t+\Delta t} - T_t) \quad (2)$$

$$\dot{E}_{gen, elemento} = \dot{e}_{gen} V_{elemento} = \dot{e}_{gen} \Delta x \Delta y \Delta z \quad (3)$$

Si se sustituye en la ecuación (1) las ecuaciones (2) y (3) se obtiene:

$$\dot{Q}_x + \dot{Q}_y + \dot{Q}_z - \dot{Q}_{x+\Delta x} - \dot{Q}_{y+\Delta y} - \dot{Q}_{z+\Delta z} + \dot{e}_{gen} \Delta x \Delta y \Delta z = \frac{\rho c \Delta x \Delta y \Delta z (T_{t+\Delta t} - T_t)}{\Delta t} \quad (4)$$

Al dividir la ecuación (4) entre $\Delta x \Delta y \Delta z$ da como resultado:

$$-\frac{\dot{Q}_{x+\Delta x} - \dot{Q}_x}{\Delta x \Delta y \Delta z} - \frac{\dot{Q}_{y+\Delta y} - \dot{Q}_y}{\Delta x \Delta y \Delta z} - \frac{\dot{Q}_{z+\Delta z} - \dot{Q}_z}{\Delta x \Delta y \Delta z} + \dot{e}_{gen} = \frac{\rho c (T_{t+\Delta t} - T_t)}{\Delta t} \quad (5)$$

Dado que las áreas de transferencia de calor del elemento para la conducción de calor en la direcciones x , y y z son $A_x = \Delta y \Delta z$, $A_y = \Delta x \Delta z$ y $A_z = \Delta x \Delta y$,

respectivamente y tomando el límite cuando $\Delta x, \Delta y, \Delta z$ y $\Delta t \rightarrow 0$ en la ecuación (5), se obtiene:

$$\frac{\partial}{\partial x} \left(K \frac{\partial T}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(K \frac{\partial T}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(K \frac{\partial T}{\partial z} \right) + \dot{e}_{gen} = \rho c \frac{\partial T}{\partial t} \quad (6)$$

La cual es la ecuación de conducción de calor en coordenadas rectangulares. Para el caso de conductividad térmica constante la ecuación (6), se reduce a:

$$\frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} + \frac{\dot{e}_{gen}}{K} = \frac{1}{\alpha} \frac{\partial T}{\partial t} \quad (7)$$

Donde $\alpha = K/\rho c$ es la difusividad térmica el material.

3.1.2 Convección. La convección, se presenta por la interacción de energía entre una superficie sólida y un fluido adyacente que se encuentra en movimiento, entre más rápido se mueva el fluido, mayor será la transferencia de calor por convección. La convección es el desplazamiento de masas de algún líquido o gas, cuando una masa de un fluido se calienta al estar en contacto con una superficie de mayor temperatura, sus moléculas se separan y se dispersan, causando que la masa del fluido llegue a ser menos densa; cuando esto sucede se desplaza hacia arriba u horizontalmente hacia una región fría; mediante este mecanismo, los volúmenes más calientes transfieren calor a los volúmenes menos calientes⁹.

En la convección, la rapidez de la transferencia de calor es proporcional al área de la superficie a través de la cual se transfiere el calor, a la diferencia de temperatura entre el fluido y la superficie, y a un factor o coeficiente de transferencia de calor por convección.

$$Q = h * A * (T_s - T_{\infty}) \quad (8)$$

⁹ INCROPERA, Frank P. y DEWITT, David P. Fundamentos de transferencia de calor, cuarta edición. Editorial Prentice Hall, Mexico, 1999. p. 5. ISBN 970-17-0170-4.

La ecuación (8) se conoce como la ley de enfriamiento de Newton, donde A es el área de la superficie; h es el coeficiente de transferencia de calor por convección; T_s es la temperatura de la superficie y T_∞ es la temperatura del fluido.

3.1.2.1 Coeficiente de convección. El coeficiente de transferencia de calor por convección no es una propiedad del fluido, sino, un parámetro determinado experimentalmente. Su valor es difícil de calcular y depende de todas las variables que influyen sobre la convección, como la configuración geométrica de la superficie, la naturaleza de movimiento del fluido, las propiedades de éste y el flujo másico. La mayoría de los procesos actuales de transferencia de calor usualmente implican geometrías complejas y las soluciones analíticas no son útiles.

Los datos experimentales para una configuración de flujo dada, se obtienen generalmente al medir el área de transferencia de calor y la temperatura de los fluidos, para un determinado flujo de calor. De este modo, el coeficiente de transferencia de calor se calcula a partir de la ecuación (8).

$$h = \frac{q}{A*(T_s - T_\infty)} \quad (9)$$

Hallar el coeficiente de convección, es una tarea difícil y en muchos casos se hace imposible un análisis exacto, por lo tanto, se utilizan correlaciones a partir de datos experimentales, o de las ecuaciones de la capa límite. En la tabla 6, se muestran los valores típicos del coeficiente de convección en diferentes condiciones de flujo.

Tabla 6. Valores medios del coeficiente de convección.

TIPO DE CONVECCIÓN	$h [W/m^2 K]$
Convección libre (aire)	3 – 25
Convección libre (agua)	15 -100
Convección forzada (aire)	10 – 200

Convección forzada (agua)	50 - 10 000
Convección forzada (sodio líquido)	10 000 - 100 000
Condensación de vapor	5000 - 50 000
Ebullición de agua	3000 -100 000

Fuente: INCROPERA, Frank P. y DEWITT, David P. Fundamentos de transferencia de calor, cuarta edición. Editorial Prentice Hall, Mexico, 1999. p. 8.

3.2 GENERACIÓN DE CALOR EN UN CONDUCTOR

La generación de calor en un conductor puede expresarse como:

$$\dot{e} = \frac{Pot}{V_{cond}} [W/m^3] \quad (10)$$

Donde \dot{e} es la generación de calor por unidad de volumen, Pot es la potencia eléctrica suministrada al conductor y V_{cond} es volumen del conductor.

La potencia eléctrica depende del voltaje y de la corriente que circula por el conductor. Mediante la ley de ohm se puede relacionar el voltaje con la corriente y la resistencia del material. Esto se puede expresar de la siguiente manera:

$$V = I * R \quad (11)$$

La relación entre la potencia el voltaje y la resistencia del material se expresa en la ecuación (12).

$$Pot = I * V = \frac{V^2}{R} \quad (12)$$

Donde V es el voltaje, I es la corriente eléctrica, Pot es la potencia y R es la resistencia del conductor.

La resistencia de un conductor depende de su resistividad, de su longitud y de su sección transversal y se relacionan entre sí de la siguiente manera:

$$R = \rho * \frac{L}{s} \quad (13)$$

Donde ρ es la resistividad del material, L es la longitud y s es la sección transversal.

Relacionando las ecuaciones (11), (12) y (13) se tiene la siguiente expresión para la generación de calor:

$$\dot{e} = \frac{V^2 * s}{\rho * L * V_{cond}} \quad (14)$$

3.3 SOLUCIÓN DE SISTEMAS DE ECUACIONES MEDIANTE EL MÉTODO DE LA MATRIZ INVERSA.

La teoría general de matrices encuentra una de sus aplicaciones más inmediatas en la resolución de sistemas de ecuaciones lineales con múltiples incógnitas. Aunque posteriormente fue objeto de un extenso desarrollo teórico, este campo de las matemáticas surgió en realidad como un instrumento de cálculo para facilitar las operaciones algebraicas complejas. Uno de los métodos matriciales para resolver ecuaciones es el de la matriz inversa¹⁰.

Cualquier sistema de ecuaciones lineales puede escribirse siempre en forma matricial de la siguiente forma:

$$A * X = B \quad (15)$$

¹⁰ HIRU. Sistemas de ecuaciones lineales y matrices. [online]. [citado 28 febrero 2013]. En: <<http://www.hiru.com/matematicas/sistemas-de-ecuaciones-lineales-y-matrices>>.

Donde A es la matriz de los coeficientes, X es la matriz de los términos independientes. Aplicando el método de la matriz inversa que consiste en multiplicar por la izquierda los dos miembros de la expresión matricial del sistema de ecuaciones por la matriz inversa de la de los coeficientes, si existe, se encuentra la solución del sistema. De este modo:

$$X = A^{-1} * B \quad (16)$$

Cuando la matriz de los coeficientes no es invertible, el sistema no tiene solución.

3.4 DEFLEXIÓN Y PANDEO EN VIGAS

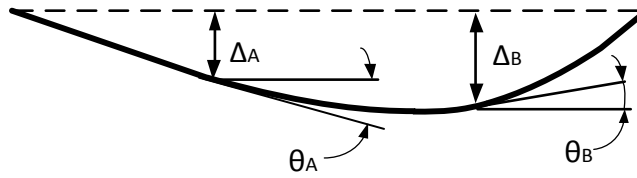
3.4.1 DEFLEXIÓN EN VIGAS

3.4.1.1 Relación entre la curvatura y el momento. La elástica de una viga es la forma que toma el eje neutro cuando esta se carga. Una línea que muestra la forma flexionada de una viga sometida a carga se conoce como la elástica de la viga. La pendiente de una viga se define como la pendiente de la tangente a la elástica en un punto cualquiera.

La figura 13 muestra la elástica de una viga deformada por cargas respecto a su posición recta original. Las tangentes a la elásticas se muestran en A y B, con los símbolos θ_A y θ_B indicando la pendiente de la curva en esos puntos. La deflexión en una viga es el movimiento (desviación) de un punto situado sobre la elástica, con respecto a su posición original sin carga. Se usan los símbolos Δ_A y Δ_B en la figura 13 para indicar la deflexión de los puntos A y B de esta viga, con respecto a la posición sin carga¹¹.

¹¹ FITZFERALD, Robert W. Mecánica de materiales. México D.F.: Alfaomega. p. 183. ISBN 970-15-0154-3.

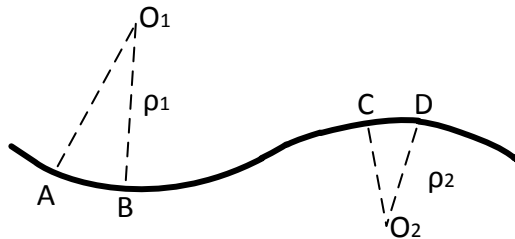
Figura 13. Elástica de una viga sometida a carga.



Fuente: FITZFERALD, Robert W. Mecánica de materiales. México D.F.: Alfaomega. p. 183. ISBN 970-15-0154-3.

Como las deflexiones de las vigas son pequeñas con respecto a su longitud, cada segmento de la elástica puede considerarse aproximadamente como un arco de círculo. El radio de arco se llama radio de curvatura y se le asigna el símbolo ρ . La figura 14 muestra la curva elástica de una viga flexionada mediante cargas. Cualquier segmento pequeño tal como el AB, es un arco de círculo de radio ρ_1 .

Figura 14. Radios de curvatura en la elástica de una viga sometida a carga



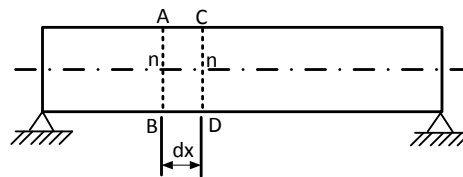
Fuente: FITZFERALD, Robert W. Mecánica de materiales. México D.F.: Alfaomega. p. 183. ISBN 970-15-0154-3.

Cada segmento diferente de la curva tiene un radio de curvatura diferente. Por consiguiente, el segmento CD de la figura 15 tiene un radio de curvatura ρ_2 , que es diferente de ρ_1 . El centro de curvatura es la intersección de los radios, tal como los puntos O_1 y O_2 . Existe una relación definida entre el radio de curvatura de la viga, el esfuerzo en las fibras extremas y el momento flexionante que produce ese esfuerzo. Se puede encontrar esa relación considerando la figura 15. La figura 15(a) muestra una pequeña sección de una viga sin carga, de longitud dx ; la figura

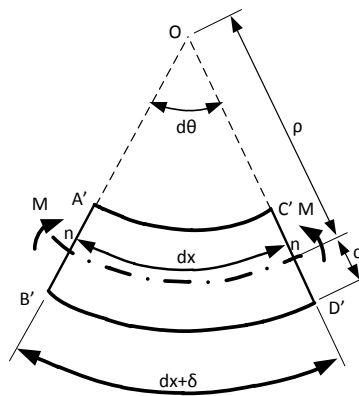
15(b) muestra la misma sección después de que la viga se ha deformado por la acción de las cargas aplicadas.

Puesto que las secciones planas antes de la deformación se conservan planas después de ella, y esta pequeña sección de la elástica es un arco de círculo, $A'B'$ y $C'D'$ se cortaran en el centro de curvatura O , formando un sector circular. El eje neutro (elástica) no está sujeto a ningún esfuerzo y conserva la longitud original dx . Sin embargo, las otras fibras cambian de longitud. Supóngase que las fibras inferiores, situadas a una distancia c a partir del eje neutro, aumentan su longitud en una cantidad δ .

Figura 15. Diferencial de una viga para el análisis de deformación



(a)



(b)

Fuente: FITZFERALD, Robert W. Mecánica de materiales. México D.F.: Alfaomega. p. 184. ISBN 970-15-0154-3.

Considerando la geometría de los sectores semejantes Onn y $OB'D'$ (figura 12(b)), se puede escribir:

$$d\theta = \frac{dx}{\rho} = \frac{dx+\delta}{\rho+c} \quad (17)$$

Simplificando la ecuación (17) se obtiene:

$$\frac{c}{\rho} = \frac{\delta}{dx} \quad (18)$$

Partiendo de las definiciones de deformación unitaria ϵ :

$$\epsilon = \frac{\text{variacion en la longitud}}{\text{longitud original}} = \frac{\delta}{dx} \quad (19)$$

Y también $\epsilon = \sigma/E$. Eliminando ϵ de la ecuaciones (19), se obtiene:

$$\frac{\delta}{dx} = \frac{\sigma}{E} \quad (20)$$

Sustituyendo la ecuación (18) en (20) se tiene:

$$\frac{c}{\rho} = \frac{\sigma}{E} \quad (21)$$

Donde σ es el esfuerzo en las fibras extremas, E es el módulo de elasticidad, c es la distancia entre el eje neutro y las fibras extremas y ρ es el radio de curvatura.

Puede obtenerse otra expresión útil, sustituyendo la relación $\rho = Mc/I$ en la ecuación (21):

$$\frac{1}{\rho} = \frac{M}{EI} \quad (22)$$

Que es la relación entre la curvatura de una viga y el momento flexionante. Además se puede obtener una expresión adicional, de la siguiente manera:

$$d\theta = \frac{dx}{\rho} \quad (23)$$

$$\frac{1}{\rho} = \frac{d\theta}{dx} \quad (24)$$

Reemplazando (22) en (24) se consigue:

$$\frac{d\theta}{dx} = \frac{M}{EI} \quad (25)$$

Despejando de la ecuación (25) $d\theta$ se obtiene:

$$d\theta = \frac{Mdx}{EI} \quad (26)$$

La ecuación (26) indica que la variación en la pendiente entre dos secciones transversales de una viga es igual al área bajo el diagrama de momentos (Mdx) comprendido entre esas secciones, dividida entre EI .

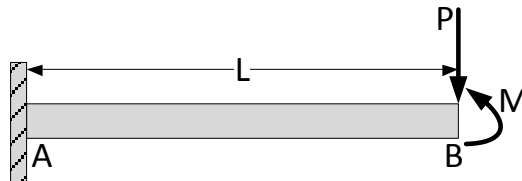
3.4.2 Método de área de momentos. Existe un buen número de métodos diferentes para determinar las pendientes y las deflexiones de las vigas. El método del área de momentos usa las propiedades geométricas de la curva elástica y la relación con la variación del M/EI a lo largo de la viga¹².

3.4.2.1 Diagramas de momentos por partes. Consiste en trazar un diagrama de momentos separado para cada carga que actúa sobre la viga. Es relativamente fácil trazar el diagrama de momentos para una viga en voladizo que soporta una sola carga. En la mayoría de los casos se puede hacer esto por inspección, sin tener que trazar un diagrama preliminar de fuerzas cortantes. Al construir un diagrama de momentos por partes, se usa el mismo procedimiento; es decir, consideramos un punto convencional, un punto de la viga como “empotrado” y se trazan diagramas de momentos para cada carga individual como si fuera la única carga ejercida sobre una viga en voladizo fija en el punto escogido. Cuando se trazan los diagramas para todas las cargas que actúan sobre la viga, la suma algebraica de todas las ordenadas en cualquier lugar tendrá el mismo valor que la ordenada correspondiente del diagrama compuesto. Se hará énfasis en este procedimiento con el siguiente ejemplo.

¹² FITZFERALD, Robert W. Mecánica de materiales. México D.F.: Alfaomega. p. 183. ISBN 970-15-0154-3.

Se tiene una viga sometida a cargas a flexión como se muestra en la figura 16. Empleando el método descrito, se hallara la deflexión máxima en el extremo B de la viga.

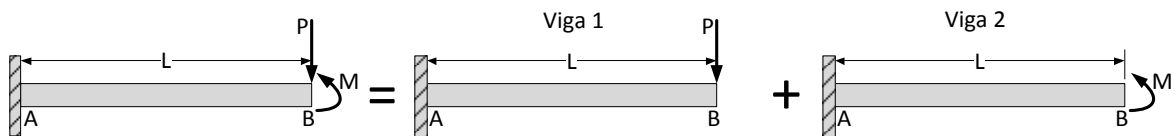
Figura 16. Viga sometida a cargas de deflexión



Fuente: Autores

Para aplicar el método de diagramas de momentos se aplica cada carga a la viga como si estuvieran actuando por separado, como se ilustra en la figura 17.

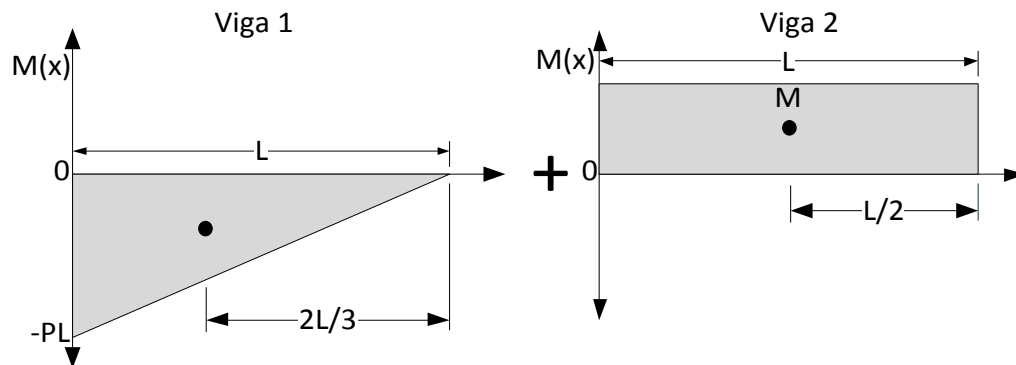
Figura 17. Separación de las carga en la viga



Fuente: autores

A continuación se realiza el diagrama de momentos para cada una de las vigas y se ubican sus centroides (figura 18).

Figura 18. Diagrama de momentos por partes y ubicación de centroides



Fuente: Autores

Al aplicar el segundo teorema de momento de área, se calcula el primer momento de cada área sobre un eje vertical que pasa por el extremo B de la viga y queda:

$$y_B = t_{B/A} = \sum \frac{1}{EI} * (Area_{BA}) * centroide_{BA} \quad (27)$$

De esta manera la deflexión en el extremo B es:

$$y_B = \frac{1}{EI} \left(-\frac{PL^2}{2} \right) \left(\frac{2L}{3} \right) + \frac{1}{EI} (ML) \left(\frac{L}{2} \right) \quad (28)$$

Simplificando la ecuación (28):

$$y_B = \frac{L^2 * (3 * M - 2 * L * P)}{6 * E * I} \quad (29)$$

Donde y_B representa la deflexión en el extremo B de la viga.

3.4.3 Deformación por carga y temperatura

3.4.3.1 Deformación por carga. La deformación de un material sometido a cargas, se conoce como elongación o contracción. La figura 19 muestra una barra sujeta a cambios de longitud debido a una carga aplicada. Esto se debe a que cuando se aplica la carga ésta desarrolla un esfuerzo unitario que es igual a $\sigma = P/A$. Donde P y A , son respectivamente la fuerza y el área de la sección transversal¹³.

Las definiciones de deformación total y deformación unitaria se necesitan en la solución de muchos problemas. La deformación total es el cambio total de la longitud del miembro. La deformación unitaria se define como el cambio en la longitud por unidad de longitud (ecuación (19)).

¹³ FITZFERALD, Robert W. Mecánica de materiales. México D.F.: Alfaomega. p. 183. ISBN 970-15-0154-3.

Figura 19. Deformación de una barra sometida a carga axial



Fuente: FITZFERALD, Robert W. Mecánica de materiales. México D.F.: Alfaomega. p. 184. ISBN 970-15-0154-3.

Mediante la ley de Hooke se puede calcular la deformación total del material para casos de estiramientos longitudinales, ésta establece que el alargamiento unitario que experimenta un material elástico es directamente proporcional a la fuerza aplicada P^{14} .

$$\epsilon = \frac{\delta}{L} = \frac{P}{AE} \quad (30)$$

Despejando δ da:

$$\delta = \frac{PL}{AE} \quad (31)$$

Donde E es el módulo de Young del material, A es su sección transversal, δ es la deformación total de la barra, L es la longitud inicial de la barra y P es la carga aplicada.

3.4.3.2 Deformación por temperatura. Cuando un cuerpo se somete a una elevación de temperatura se alarga. Inversamente, cuando se somete a un descenso de temperatura, se contrae. Las variaciones de longitud se pueden calcular a partir de la siguiente relación¹⁵:

$$\delta_T = \alpha L \Delta T \quad (32)$$

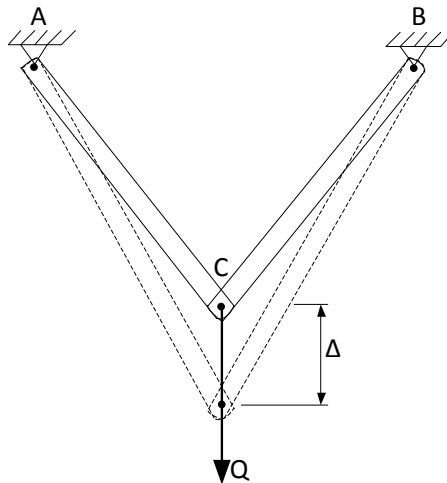
¹⁴ NORTON, Robert. Diseño de máquinas. Traducida: Gabriel Sánchez. México D.C.: Prentice Hall, 1999. p 60-68. ISBN 9070-17-0257-3.

¹⁵ FITZFERALD, Robert W. Mecánica de materiales. México D.F.: Alfaomega. p. 183. ISBN 970-15-0154-3.

Donde δ_T es el cambio de longitud debido a la variación de temperatura, α es el coeficiente de dilatación térmica, L es la longitud inicial y ΔT variación de la temperatura ($T_{final} - T_{inicial}$).

3.4.4 Energía de deformación para cargas axiales. El hecho de que el trabajo externo sea igual a la energía interna de deformación puede usarse directamente como método para determinar deflexiones. Por ejemplo, las barras simples de la estructura de la figura 20 tiene una carga Q aplicada gradualmente. Si el sistema se conserva elástico, el trabajo externo es $Q\Delta/2$. Si se puede determinar la energía interna de deformación de las barras AC y BC , se puede calcular la deflexión Δ ¹⁶.

Figura 20. Estructura sometida a deformación por carga



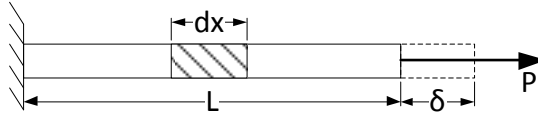
Fuente: FITZFERALD, Robert W. Mecánica de materiales. México D.F.: Alfaomega. p. 375. ISBN 970-15-0154-3.

Se desarrollara una expresión para la energía de deformación de una barra cargada axialmente, de la siguiente manera. La figura 21 indica una barra sujeta a la aplicación gradual de una carga P . La barra experimentara un alargamiento

¹⁶ FITZFERALD, Robert W. Mecánica de materiales. México D.F.: Alfaomega. p. 183. ISBN 970-15-0154-3.

total δ . La deformación interna de un segmento de la barra, de longitud dx (véase la figura 21) es igual a la fuerza promedio por el cambio de longitud dx .

Figura 21. Barra sujeta a la aplicación gradual de fuerza



Fuente: FITZFERALD, Robert W. Mecánica de materiales. México D.F.: Alfaomega. p. 375. ISBN 970-15-0154-3.

El cambio de longitud de un miembro cargado axialmente está dado por la ecuación $\delta = PL/AE$. La energía interna de deformación para el segmento dx es:

$$dU = \frac{P}{2} \delta = \frac{P}{2} \frac{P dx}{AE} = \frac{P^2 dx}{2AE} \quad (33)$$

La energía total de deformación para toda la barra es la suma de las energías de deformación para cada segmento:

$$U = \int_0^L \frac{P^2 dx}{2AE} \quad (34)$$

3.4.5 Pandeo en columnas. Para realizar el análisis de falla por pandeo se empieza por determinar la longitud efectiva L_e esta se define matemáticamente como¹⁷:

$$L_e = K * L \quad (35)$$

Donde L es longitud de la columna y K es una constante que depende del mecanismo de fijación en los extremos.

A continuación se calcula el radio de giro mediante la siguiente expresión:

¹⁷ MOTT, Robert L. Diseño de elementos de máquinas. Traducido: Virgilio Gonzalez y Poso. 4 ed. Mexico D.F.: Pearson educación, 2006. p. 234. ISBN 970-26-0812-0.

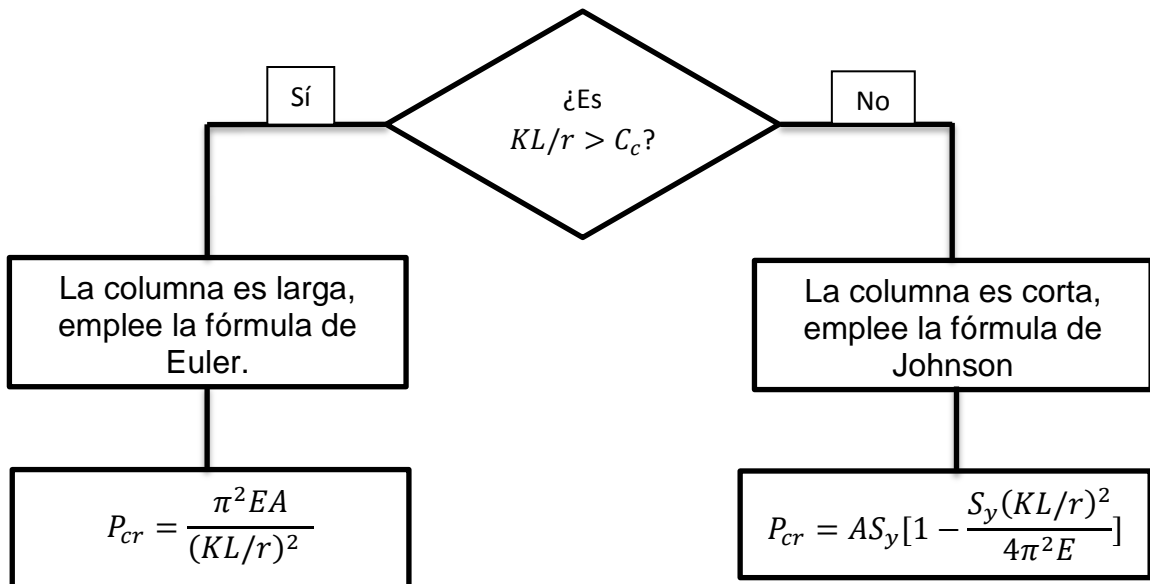
$$k = \sqrt{\frac{I}{A}} \quad (36)$$

Donde I es el momento de inercia mínimo y A es el área de la sección transversal.

Para analizar columnas con carga central se tienen dos métodos, el de Euler para columnas largas y esbeltas y el de J. B. Johnson para columnas cortas. El criterio que se utiliza para usar uno de los métodos es la comparación entre la relación de esbeltez de transición o constante de columna C_c con el valor de la expresión kL/r .

La figura 22 muestra el procedimiento a seguir para determinar la carga crítica de pandeo dependiendo del tipo de columna que se esté estudiando.

Figura 22. Procedimiento para hallar carga crítica en una columna



Fuente: MOTT, Robert L. Diseño de elementos de máquinas. Traducido: Virgilio Gonzalez y Poso. 4 ed. Mexico D.F.: Pearson educación, 2006. p. 234. ISBN 970-26-0812-0.

El valor de C_c se calcula de la siguiente manera:

$$C_c = \sqrt{\frac{2\pi^2 E}{S_y}} \quad (37)$$

Donde S_y es la resistencia de fluencia del material.

Teniendo en cuenta el factor de seguridad N , se puede establecer la siguiente relación:

$$P_a = \frac{P_{cr}}{N} \quad (38)$$

Donde P_a es la carga que puede soportar la columna sin que ésta falle por pandeo.

4. MODELAMIENTO MICRO-ACTUADOR Y MICRO-PINZA

En ésta sección se presenta el modelamiento térmico, eléctrico y estructural del micro-actuador Chevron, así como el análisis estructural de la micropinza.

4.1 MODELAMIENTO TERMICO DEL ACTUADOR

Para realizar el modelamiento se consideran las siguientes suposiciones¹⁸:

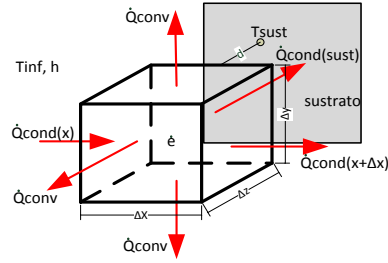
- Se supone flujo de calor unidireccional a lo largo de la viga del actuador, porque el espesor y la profundidad se consideran pequeño en comparación de su longitud.
- Se desprecia el flujo de calor por radiación, debido a que se considera pequeña con respecto a la convección y conducción.
- se considera que la deflexión de la viga es elástica.

Se parte de la geometría mostrada en la figura 3 que es la forma estándar de un actuador térmico tipo chevron.

Considerando un pequeño elemento rectangular de longitud Δx , Δy y altura Δz como se muestra en la figura 23. Realizando un balance de energía en estado estacionario y teniendo en cuenta que las variables dependientes de la temperatura (conductividad térmica poly-silicio, conductividad térmica aire, resistividad, coeficiente de transferencia de calor por convección) se mantienen constantes, se plantea la ecuación (39):

¹⁸ HUANG Q., y LEE N., Analysis and design of polysilicon thermal flexure actuator, *J. Micromech. Microeng.*, vol. 9, pág. 64-70, 1999.

Figura 23. Elemento diferencial



Fuente: Autores

$$\dot{Q}_x - \dot{Q}_{x+\Delta x} - \dot{Q}_{conv} - \dot{Q}_{sust} + \dot{e} * \Delta x \Delta y \Delta z = 0 \quad (39)$$

Al dividir la ecuación (39) entre el término $\Delta x \Delta y \Delta z$ y sustituyendo los respectivos flujos de calor se tiene:

$$\frac{\dot{Q}_x - \dot{Q}_{x+\Delta x}}{\Delta x \Delta y \Delta z} - \frac{h * (\Delta x \Delta y + 2 \Delta x \Delta z) * (T(x) - T_{inf})}{\Delta x \Delta y \Delta z} - \frac{k_{aire} * \Delta x \Delta y * (T(x) - T_{sust})}{\Delta x \Delta y \Delta z * d} + \dot{e} = 0 \quad (40)$$

Simplificando términos y tomando el límite cuando Δx tiende a cero en la ecuación (40), se obtiene:

$$\frac{1}{\Delta y \Delta z} \frac{d\dot{Q}_x}{dx} - \frac{h * (\Delta y + 2 \Delta z) * (T(x) - T_{inf})}{\Delta y \Delta z} - \frac{k_{aire} * (T(x) - T_{sust})}{\Delta z * d} + \dot{e} = 0 \quad (41)$$

Reemplazando \dot{Q}_x por $k * \Delta y \Delta z \frac{dT}{dx}$ en la ecuación (41) y simplificando:

$$\frac{d^2 T}{dx^2} - \frac{h}{k} * \frac{\Delta y + 2 \Delta z}{\Delta y \Delta z} * (T(x) - T_{inf}) - \frac{k_{aire}}{k * \Delta z * d} * (T(x) - T_{sust}) + \frac{\dot{e}}{k} = 0 \quad (42)$$

Reorganizando la ecuación (42), agrupando términos convenientemente y tomando $T_{sust} = T_{inf}$:

$$\frac{d^2 T}{dx^2} - \left(\frac{h}{k} * \frac{\Delta y + 2 \Delta z}{\Delta y \Delta z} + \frac{k_{aire}}{k * \Delta z * d} \right) (T(x) - T_{inf}) + \frac{\dot{e}}{K} = 0 \quad (43)$$

Al reemplazar los términos que acompañan a $(T(x) - T_{inf})$, por la variable b^2 , la ecuación (43) se reduce a:

$$\frac{d^2 T}{dx^2} - (b^2) (T(x) - T_{inf}) + \frac{\dot{e}}{K} = 0 \quad (44)$$

Donde b^2 es:

$$b^2 = \frac{h}{k} * \frac{\Delta y + 2\Delta z}{\Delta y \Delta z} + \frac{k_{aire}}{k * \Delta z * d} \quad (45)$$

Para la solución de la ecuación (44) se utilizó el software Matlab. El siguiente código permite su solución:

```
syms b Tinf e k;
dsolve('D2T-b^2*(T-Tinf)+(e/K)=0','x')
```

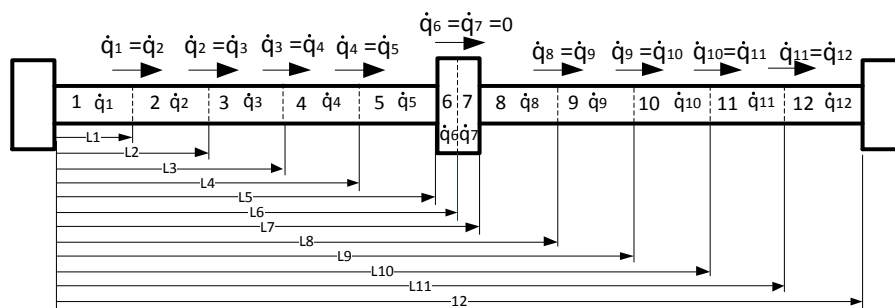
Obteniendo la siguiente expresión:

$$T(x) = C1e^{bx} + C2e^{-bx} + T_{inf} + \frac{e}{K*b^2} \quad (46)$$

La generación en un conductor se puede calcular de acuerdo a la expresión (14).

Debido a que las propiedades cambian con la temperatura y a que la generación de calor no es homogénea a lo largo del actuador, ya que esta depende de la geometría del elemento que se tome, se debe dividir el medio en un número finito de partes y evaluar las propiedades en cada una de ellas, como se observa en la figura 24¹⁹.

Figura 24. División del micro-actuador en partes



Fuente: Autores

¹⁹ SZABO, Francis R. Demonstrating Optothermal Actuators for an Autonomous MEMS Microrobot. Thesis Master of Science in Electrical Engineering. Wright-Patterson Air Force Base, Ohio. Air Force Institute of Technology. Department of Electrical and Computer Engineering. 2004. p. 99-111.

A continuación se procede a plantear la ecuación de distribución de temperatura para cada división:

Para las secciones 1 a 12 se utiliza las siguientes ecuaciones:

$$T_n(x) = C_i e^{b_n x} + C_j e^{-b_n x} + T_{inf} + \frac{\dot{e}_n}{K_n * b_n^2} \quad (L_{n-1} \leq x \leq L_n) \quad (47)$$

Donde $L_0 = 0$ y teniendo en cuenta que:

$$T_n(L_n) = T_{n+1}(L_n) \quad (48)$$

Al aplicar la ecuación (48) a los n tramos se obtienen 12 ecuaciones y 24 incógnitas, las otras 12 ecuaciones para resolver el sistema se generan a partir del análisis de las condiciones de frontera en el extremo de cada partición.

$$\dot{q}_n = \dot{q}_{n+1} = -k * A_{cs_n} * \frac{dT_n(x)}{dx} \Big|_{x=L_n} = -k * A_{cs_{n+1}} * \frac{dT_{n+1}(x)}{dx} \Big|_{x=L_{n+1}} \quad (49)$$

Al derivar la ecuación (46) de distribución de temperatura y remplazar en la ecuación (49) queda:

$$C_i * A_{cs_n} * b_n e^{b_n L_n} - C_j * A_{cs_n} * b_n e^{-b_n L_n} = C_k * A_{cs_{n+1}} * b_{n+1} e^{b_{n+1} L_n} - C_m * A_{cs_{n+1}} * b_{n+1} e^{-b_{n+1} L_n} \quad (50)$$

Al aplicar la ecuación (50) a los n tramos se obtienen 12 ecuaciones más. De este modo se cuenta con 24 ecuaciones linealmente independientes y 24 incógnitas.

El método que se usó para resolver el sistema fue el de la matriz inversa y se expresa algebraicamente de la siguiente manera:

$$[I]_{24 \times 1} = [Fact]_{24 \times 24} * [C]_{24 \times 1} \quad (51)$$

Donde $[I]$ representa los términos independientes de cada ecuación, $[Fact]$ es la matriz de los factores que acompañan a cada constante y $[C]$ es el vector de las constantes.

El vector de constates se halla invirtiendo la matriz $[Fact]$ y multiplicándola por el vector de términos independientes $[I]$.

4.2 MODELO ELÉCTRICO DEL ACTUADOR

La potencia eléctrica depende del voltaje y de la corriente que circulan por el conductor y mediante la ley de ohm se puede relacionar el voltaje con la corriente y la resistencia del material. Esto se puede expresar de la siguiente manera:

$$Pot = I * V = \frac{V^2}{R} \quad (52)$$

Donde V es el voltaje, I es la corriente eléctrica y R es la resistencia del conductor.

La resistencia de un conductor depende de su resistividad, de su longitud y de su sección transversal y se relacionan así:

$$R = \rho * \frac{L}{s} \quad (53)$$

Donde ρ es la resistividad del material, L y s son la longitud y la sección transversal del conductor respectivamente.

Relacionando las ecuaciones (52), (53) y (14) se tiene la siguiente expresión para la generación de calor:

$$\dot{e} = \frac{V^2 * s}{\rho * L * V_{cond}} \quad (54)$$

La resistividad del cualquier material varía con la temperatura de la siguiente manera:

$$\rho(T) = \rho_0 * [1 + \alpha * (T - T_0)] \quad (55)$$

Donde ρ_0 es la resistividad del material a condiciones de temperatura T_0 y α es un coeficiente de temperatura.

La generación se considera para cada elemento de volumen. Relacionando las ecuaciones (54) y (55) se obtiene:

$$\dot{e} = \frac{V^2 * s}{(\rho_0 * [1 + \alpha * (T - T_0)]) * L * V_{cond}} \quad (56)$$

La ecuación (56) representa la generación de calor en conductor en función de la variación de la temperatura.

4.3 MODELO ESTRUCTURAL DEL ACTUADOR

La estructura mecánica de un actuador térmico se representa en la figura 25. Un actuador térmico tipo Chevron se expande en dirección del vértice debido al calentamiento Joule. Posee un ángulo de pre-curvatura θ , con el fin de impedir el movimiento del actuador fuera del plano y obtener ventajas de amplificación del desplazamiento sobre el plano de movimiento²⁰.

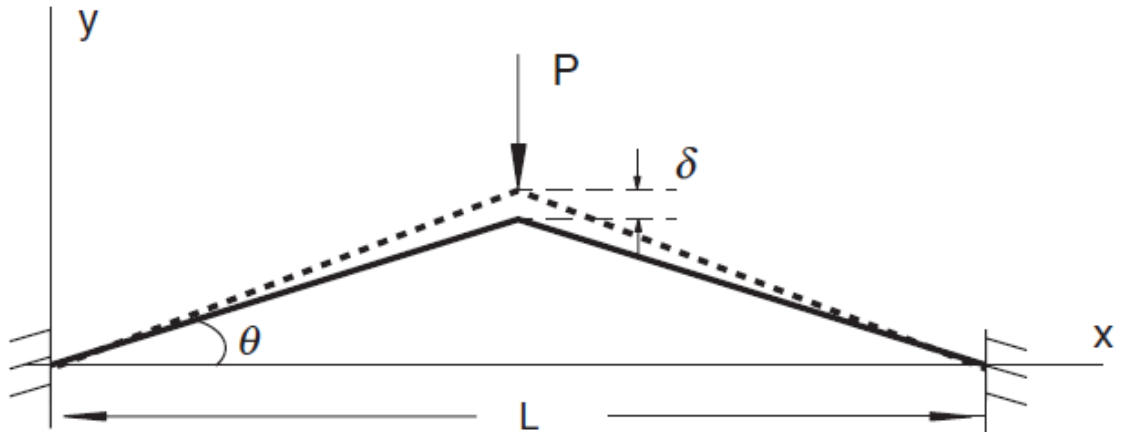
La energía de deformación del actuador térmico debido a la deformación axial estada dada por:

$$U = \frac{F_x^2 L}{2AE \cos(\theta)} = \frac{P^2 L}{8AE \sin^2(\theta) \cos(\theta)} \quad (57)$$

Donde L es la separación entre anclajes, A es el área de la sección transversal, E es el Módulo de Young y F_x es la fuerza axial del actuador térmico. Como se muestra en la figura 25, P es la fuerza resultante y δ es el desplazamiento debido al calentamiento térmico respectivamente.

²⁰ Garcia Ephrahim, Nam Yoonsu and Lobontiu Nicolae, "Design, Modeling, and Initial Experiments on Microscale Amplification Device", Journal of Intelligent Material Systems and Structures, Vol. 16—November/December 2005. pp. 1042-1043.

Figura 25. Esquemas y características de un actuador térmico.



Fuente: Garcia Ephrahim, Nam Yoonsu and Lobontiu Nicolae, "Design, Modeling, and Initial Experiments on Microscale Amplification Device", Journal of Intelligent Material Systems and Structures, Vol. 16—November/December 2005. p1043.

La rigidez del actuador térmico puede ser encontrada aplicando el teorema de Castigliano:

$$\delta = \frac{\partial U}{\partial P} = \frac{PL}{4AE\sin^2(\theta)\cos(\theta)} \quad (58)$$

Por lo tanto la constante de rigidez del actuador térmico se puede aproximar como:

$$K = \frac{P}{\delta} = \frac{4AE\sin^2(\theta)\cos(\theta)}{L} \quad (59)$$

La relación entre una diferencia de temperatura dada (ΔT), una fuerza (P) y una deformación (δ) del actuador térmico está dada por:

$$\Delta T\alpha = \frac{2\cos(\theta)\sin(\theta)}{L}\delta + \frac{P}{2EAsin(\theta)} \quad (60)$$

Donde α es el coeficiente de expansión térmica.

4.3.1 Mecanismos de falla en el actuador. El actuador térmico puede fallar de dos formas, por temperatura y/o por carga (pandeo); a continuación se realizara el análisis correspondiente para cada caso.

4.3.1.1 Falla por temperatura. La temperatura de calentamiento debe ser inferior a los 800°C, para proteger poly-silicio del auto-recocido²¹.

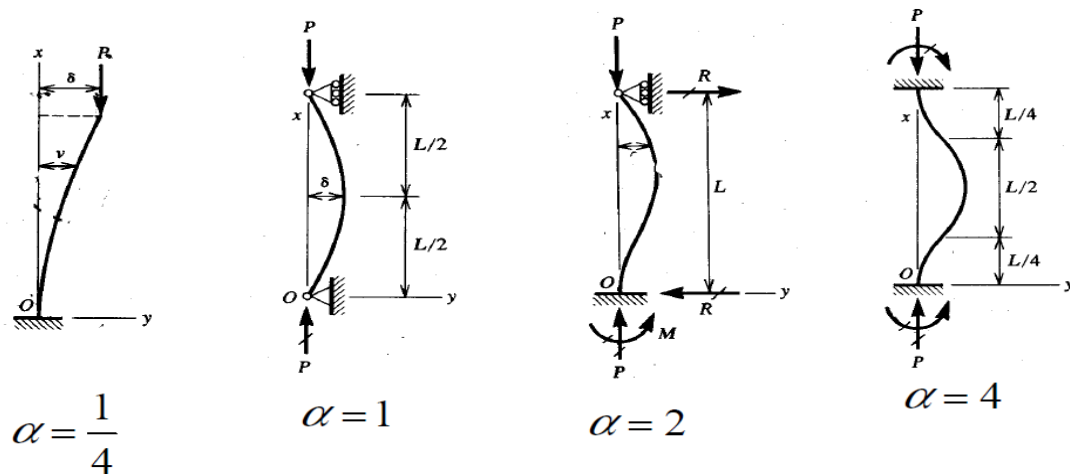
4.3.1.2 Falla por carga. El actuador puede fallar por pandeo debido a la carga axial. Los brazos de los actuadores se consideran brazos largos y esbeltos. Para calcular la carga crítica se empleó el método de Euler:

$$F_{critica} = \alpha \frac{\pi^2 EI}{L^2} \quad (61)$$

Donde α es una constante del anclaje de la viga, $F_{critica}$ es la fuerza critica, E es el Modulo de Young, I es la inercia mínima y L longitud de la barra.

Para hallar el α se emplea la figura 26 en la cual se muestra vigas apoyada de distintas maneras.

Figura 26. Valores de α para diferente apoyos en columnas



Fuente: MOTT, Robert L. Diseño de elementos de máquinas. Traducido: Virgilio Gonzalez y Poso. 4 ed. Mexico D.F.: Pearson educación, 2006. p. 234. ISBN 970-26-0812-0.

²¹ Garcia Ephrahim, Nam Yoonsu and Lobontiu Nicolae, "Design, Modeling, and Initial Experiments on Microscale Amplification Device", Journal of Intelligent Material Systems and Structures, Vol. 16—November/December 2005. p1042.

Para el actuador se empleó $\alpha = 4$, reemplazando en la ecuación (61) se obtiene:

$$F_{critica} = 4 * \frac{\pi^2 EI}{L^2} \quad (62)$$

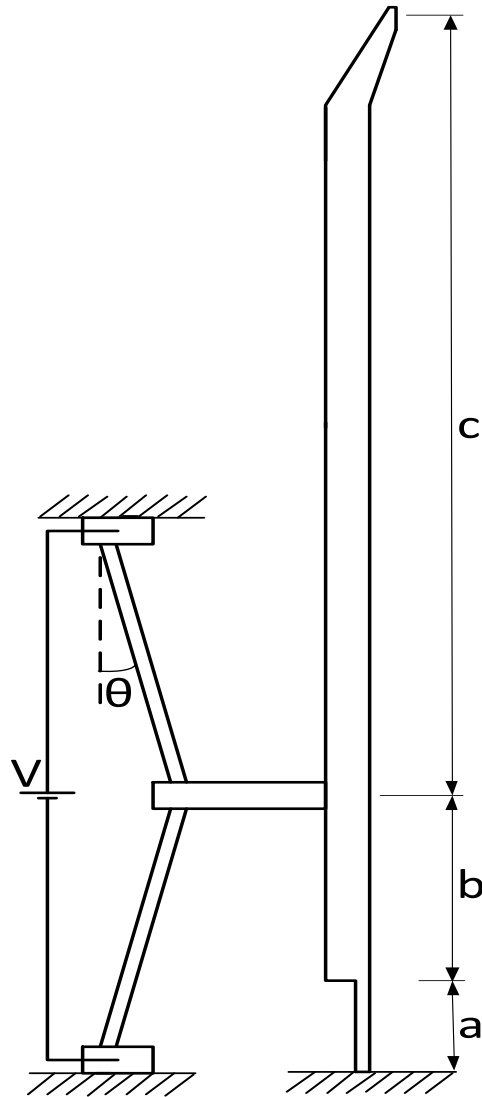
De esta manera se puede calcular la carga crítica que puede soportar el brazo de cada actuador.

4.4 MODELAMIENTO DE LA MICRO-PINZA

El mecanismo que acciona o da movimiento a la micro-pinza es el actuador térmico, cuando este se deforma produce desplazamiento y fuerza transmitiéndolos directamente al sistema de sujeción. En la figura 27 se muestra el esquema general del actuador y la pinza. De acuerdo a esto se realizó el modelamiento del proceso de manipulación. El análisis de deformación en la micro-pinza se realiza en dos etapas, la primera consiste en acercar la pinza hasta la pieza a sujetar y en la segunda el proceso de sujeción como tal.

El cambio de sección en la base del brazo de la micro-pinza que se muestra en la figura 27 es para disminuir la fuerza que los actuadores deben realizar para deformarla.

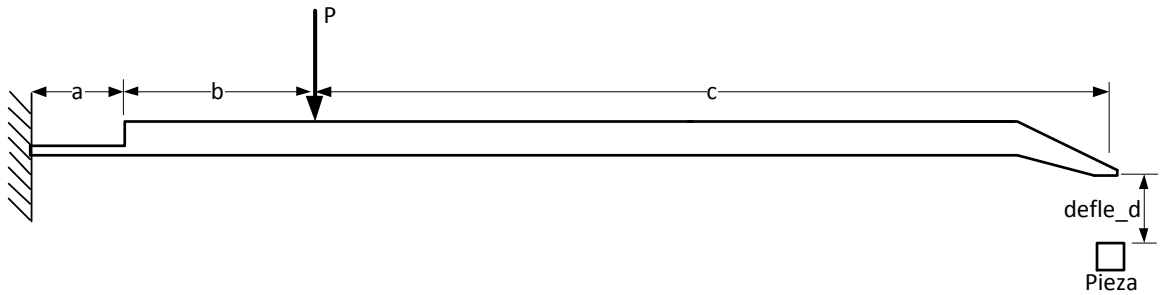
Figura 27. Esquema general sistema actuador y pinza



Fuente: Autores

4.4.1 Proceso de acercamiento. Este proceso consiste en acercar la micro-pinza a la pieza a sujetar hasta que esta esté en contacto inminente. La micro-pinza está inicialmente en posición horizontal, empotrada en su base, con su otro extremo libre y sometida a una carga P , como se muestra en la figura 28.

Figura 28. Proceso de acercamiento

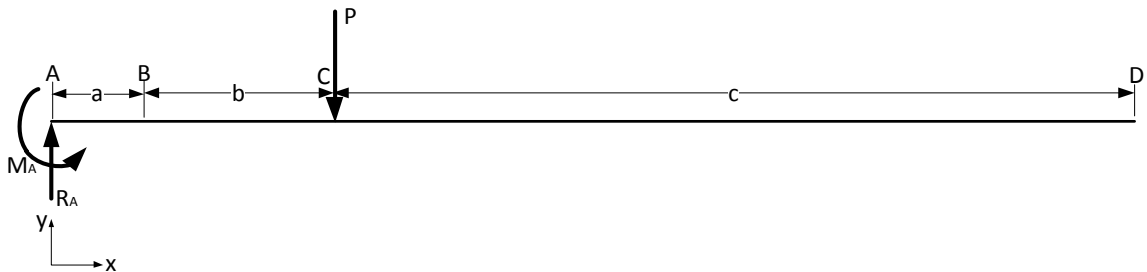


Fuente: Autores

Para resolver este tipo de problemas se empleó la siguiente metodología.

Se realiza el diagrama de cuerpo libre, en el cual se establecen las cargas que interactúan en el sistema, como se muestra en la figura 29.

Figura 29. Diagrama de cuerpo libre proceso de acercamiento



Fuente: Autores

Con el diagrama de cuerpo libre se determinan las ecuaciones de equilibrio; de esta manera se tiene:

$$\uparrow \sum F_y = 0 ; \quad R_A = P \quad (63)$$

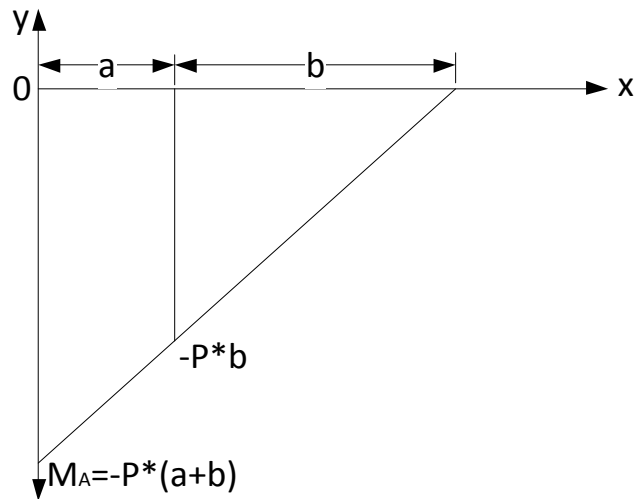
$$\curvearrowright \sum M_A = 0 ; \quad M_A = P * (a + b) \quad (64)$$

Como se tienen dos ecuaciones con tres incógnitas, el sistema se convierte en un problema estáticamente indeterminado de primer grado.

Para solucionar este tipo de problemas se emplea el diagrama de momentos por partes. Este método del área de momento es un procedimiento que generalmente es muy útil cuando se desea obtener las pendientes y las deflexiones solamente en ciertos puntos seleccionados a lo largo de la viga y además cuando la viga tiene sección transversal diferente.

En la primera situación solo hay una carga externa, el diagrama general de momentos es el mostrado en la figura 30.

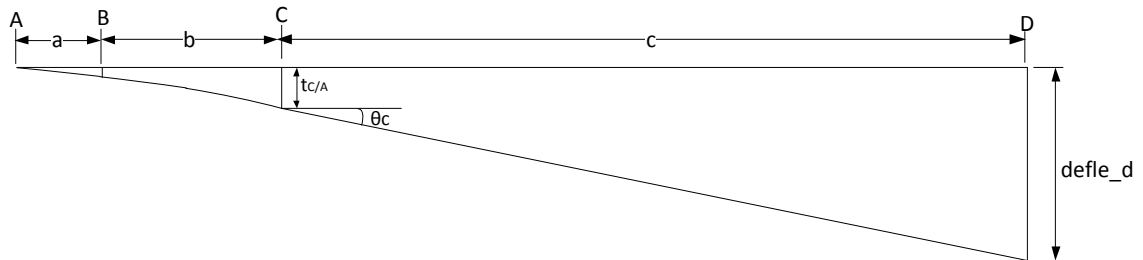
Figura 30. Diagrama de momentos para proceso de acercamiento



Fuente: Autores

El esquema de la elástica par al cálculo de la deflexión en un punto específico de la viga (C) se muestra en la figura 31.

Figura 31. Forma de la elástica de la viga para el proceso de acercamiento.



Fuente: Autores

Como el ángulo θ_c es muy pequeño se puede suponer que:

$$\tan(\theta_c) = \theta_c \quad (65)$$

Geoméricamente la deflexión en el punto D es la siguiente:

$$defle_d = t_{C/A} + \theta_c * c \quad (66)$$

Dónde:

θ_c representa la pendiente en el punto C y se calcula de esta manera:

$$\theta_c = \frac{P*b*a}{E*I_{AB}} + \frac{P*a^2}{2*E*I_{AB}} + \frac{P*b^2}{2*E*I_{BC}} \quad (67)$$

$$t_{C/A} = \frac{P*b*a}{E*I_{AB}} * \left(\frac{a}{2} + b\right) + \frac{P*a^2}{2*E*I_{AB}} * \left(\frac{2*a}{3} + b\right) + \frac{P*b^2}{2*E*I_{BC}} * \left(\frac{2*b}{3}\right) \quad (68)$$

Reemplazando las ecuaciones (67) y (68) en la ecuación (66) se obtiene:

$$defle_d = \frac{P*b*a}{E*I_{AB}} * \left(\frac{a}{2} + b\right) + \frac{P*a^2}{2*E*I_{AB}} * \left(\frac{2*a}{3} + b\right) + \frac{P*b^2}{2*E*I_{BC}} * \left(\frac{2*b}{3}\right) + \left(\frac{P*b*a}{E*I_{AB}} + \frac{P*a^2}{2*E*I_{AB}} + \frac{P*b^2}{2*E*I_{BC}}\right) * c \quad (69)$$

Despejando de la ecuación (69) la variable P queda:

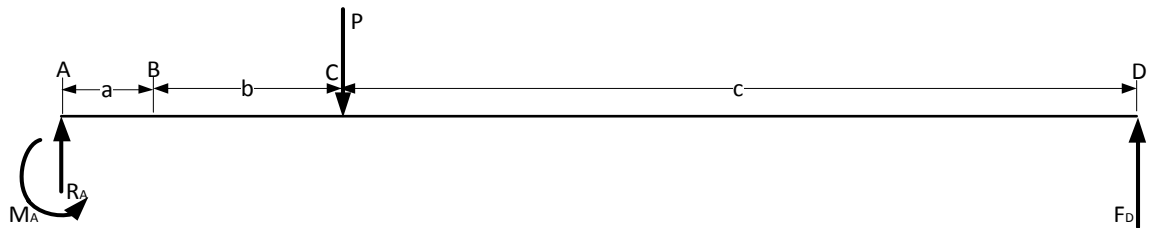
$$P = (6 * EE * I_{ab} * I_{bc} * defle_d) / (2 * I_{bc} * a^3 + 6 * I_{bc} * a^2 * b + 3 * I_{bc} * c * a^2 + 6 * I_{bc} * a * b^2 + 6 * I_{bc} * c * a * b + 2 * I_{ab} * b^3 + 3 * I_{ab} * c * b^2) \quad (70)$$

Donde P representa la carga necesaria que deben suministrar los actuadores para que la pinza se aproxime a la pieza.

4.4.2 Proceso de apriete. Al igual que en el proceso de acercamiento, la micro-pinza se comporta como una viga sometida a cargas de flexión. En este caso

aparece una nueva carga en el extremo derecho de la micro-pinza (ver figura 32), la cual es producida por el contacto de pieza a sujetar.

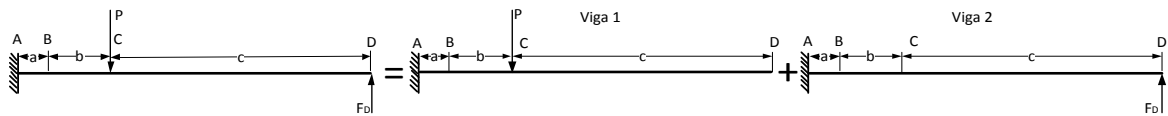
Figura 32. Diagrama de cuerpo libre para el proceso de agarre



Fuente: Autores

Esta viga sometida a cargas de deflexión, es estáticamente indeterminada. Para solucionarla se empleó el método de diagrama de momentos por partes, en este caso se separan las cargas externas que interactúan en la viga como se observa en la figura 33.

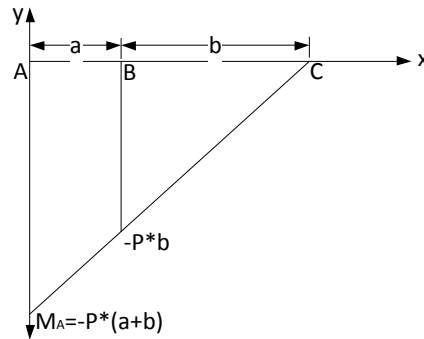
Figura 33. Diagrama de equilibrio para hallar el área de momentos por partes



Fuente: Autores

A continuación se realiza diagramas de momentos para cada viga por separado.

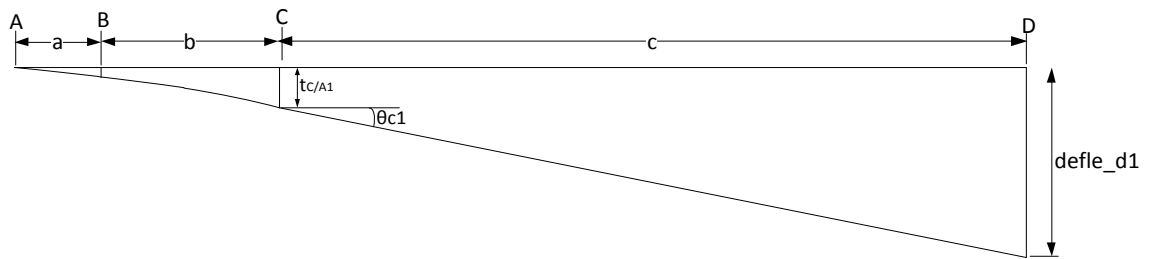
Figura 34. Diagrama de momentos para la viga 1 para el proceso de agarre.



Fuente: Autores

Con la dirección de la fuerza externa se traza el diagrama de la elástica de la viga, el cual se muestra con claridad en la figura 35.

Figura 35. Diagrama de la elástica para la viga 1 para el proceso de agarre



Fuente: Autores

De esta manera se puede determinar la deflexión del punto de interés (D), de la siguiente manera:

$$\tan(\theta_c) = \theta_c \quad (71)$$

$$defle_d1 = t_{C/A1} + \theta_{c1} * c \quad (72)$$

$$\theta_{c1} = \frac{P*b*a}{E*I_{AB}} + \frac{P*a^2}{2*E*I_{AB}} + \frac{P*b^2}{2*E*I_{BC}} \quad (73)$$

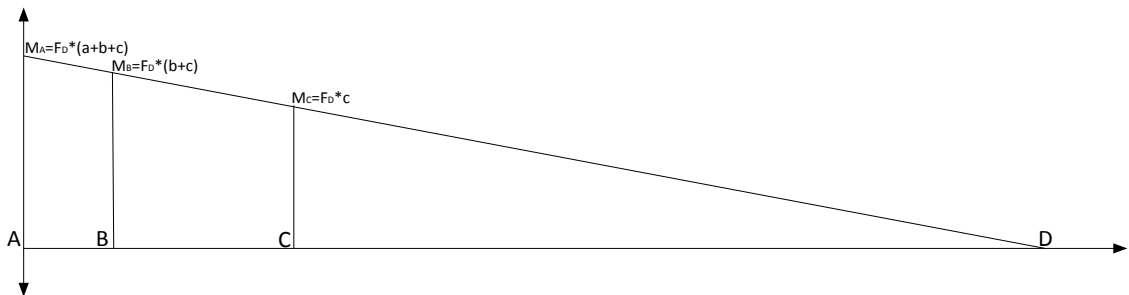
$$t_{C/A1} = \frac{P*b*a}{E*I_{AB}} * \left(\frac{a}{2} + b\right) + \frac{P*a^2}{2*E*I_{AB}} * \left(\frac{2*a}{3} + b\right) + \frac{P*b^2}{2*E*I_{BC}} * \left(\frac{2*b}{3}\right) \quad (74)$$

Reemplazando las ecuaciones (73) y (74) en la ecuación (72) se obtiene:

$$defle_d1 = \frac{P*b*a}{E*I_{AB}} * \left(\frac{a}{2} + b\right) + \frac{P*a^2}{2*E*I_{AB}} * \left(\frac{2*a}{3} + b\right) + \frac{P*b^2}{2*E*I_{BC}} * \left(\frac{2*b}{3}\right) + \left(\frac{P*b*a}{E*I_{AB}} + \frac{P*a^2}{2*E*I_{AB}} + \frac{P*b^2}{2*E*I_{BC}}\right) * c \quad (75)$$

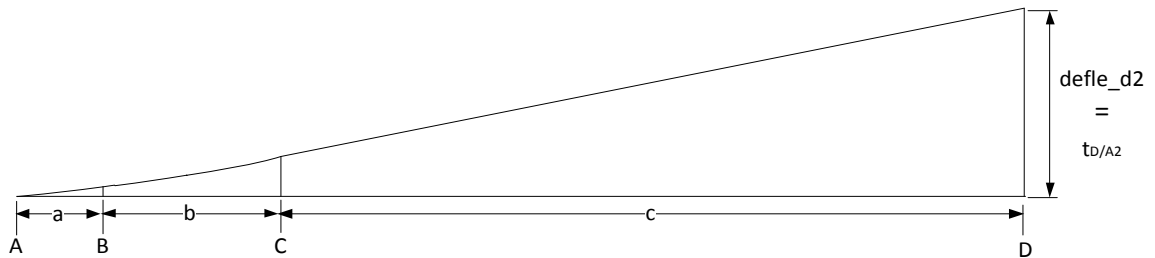
Para la viga 2 se emplea básicamente el mismo procedimiento anterior.

Figura 36. Diagrama de momentos de la viga 2 proceso de agarre



Fuente: Autores

Figura 37. Diagrama de la elástica para la viga 2 en el proceso de apriete



Fuente: Autores

$$defle_d2 = \frac{F*(b+c)*a}{E*I_{Ab}} * \left(\frac{a}{2} + b + c\right) + \frac{F*a^2}{2*E*I_{AB}} * \left(\frac{2*a}{3} + b + c\right) + \frac{F*(b+c)*(b+c)}{2*E*I_{BC}} * \left(\frac{2}{3} * (b + c)\right) \quad (76)$$

Como la deflexión $defle_d$ es igual cero, porque la micro-pinza está en contacto con la pieza se tiene:

$$defle_d1 = defle_d2 \quad (77)$$

Reemplazando en la ecuación (77) las ecuaciones (75) y (76) se obtiene:

$$\frac{P*b*a}{E*I_{AB}} * \left(\frac{a}{2} + b\right) + \frac{P*a^2}{2*E*I_{AB}} * \left(\frac{2*a}{3} + b\right) + \frac{P*b^2}{2*E*I_{BC}} * \left(\frac{2*b}{3}\right) + \left(\frac{P*b*a}{E*I_{AB}} + \frac{P*a^2}{2*E*I_{AB}} + \frac{P*b^2}{2*E*I_{BC}}\right) * c = \frac{F*(b+c)*a}{E*I_{Ab}} * \left(\frac{a}{2} + b + c\right) + \frac{F*a^2}{2*E*I_{AB}} * \left(\frac{2*a}{3} + b + c\right) + \frac{F*(b+c)*(b+c)}{2*E*I_{BC}} * \left(\frac{2}{3} * (b + c)\right) \quad (78)$$

Despejando P de la ecuación (78) se obtiene:

$$P = (2 * I_{bc} * F * a^3 + 6 * I_{bc} * F * a^2 * b + 6 * I_{bc} * F * a^2 * c + 6 * I_{bc} * F * a * b^2 + 12 * I_{bc} * F * a * b * c + 6 * I_{bc} * F * a * c^2 + 2 * I_{ab} * F * b^3 + 6 * I_{ab} * F * b^2 * c + 6 * I_{ab} * F * b * c^2 + 2 * I_{ab} * F * c^3) / (2 * I_{bc} * a^3 + 6 * I_{bc} * a^2 * b + 3 * I_{bc} * c * a^2 + 6 * I_{bc} * a * b^2 + 6 * I_{bc} * c * a * b + 2 * I_{ab} * b^3 + 3 * I_{ab} * c * b^2) \quad (81)$$

$$P = f(\text{geometria y carga en la pinza})$$

Donde P representa la carga necesaria que deben suministrar los actuadores para el proceso de apriete.

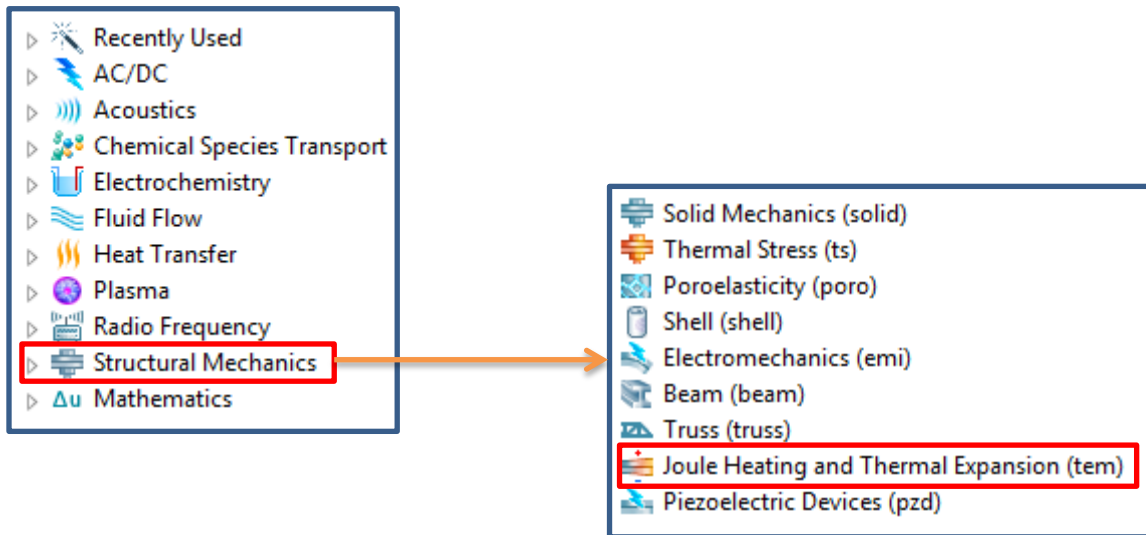
El diagrama de flujo del modelo que se implementó en Matlab se puede consultar en el anexo A.

4.5 SIMULACIÓN EN COMSOL MULTIPHYSICS

Lo primero que se debe tener en cuenta al iniciar el proceso de simulación en Comsol²² es la física a utilizar. Para el proyecto se utilizó Joule Heating and Thermal Expansión (tem). Como se muestra en la figura 38.

²²Se usó una versión de prueba de Comsol Multiphysics. El grupo de investigación DICBOT en estos momentos está realizando el proceso para adquirir el software.

Figura 38. Físicas del Comsol



Fuente: Comsol Multiphysics

Como en este tipo de física se encuentra el calentamiento por efecto Joule y la expansión térmica, el Software Comsol incorpora ecuaciones para cada fenómeno.

En el fenómeno de calentamiento por efecto joule, Comsol usa las siguientes ecuaciones:

$$\nabla \cdot J = Q_j$$

$$J = \sigma E + J_e$$

$$E = -\nabla V$$

$$\nabla \cdot (k \nabla T) + Q = 0$$

Don J es la densidad de corriente, σ conductividad eléctrica, E intensidad de campo eléctrico, V potencial eléctrico, Q fuente de calor.

Mientras que en el fenómeno elástico térmico usa las siguientes ecuaciones:

$$-\nabla \cdot \sigma = FV, \quad \sigma = s$$

$$S - S_0 = C: (\epsilon - \epsilon_0 - \epsilon_{inel}), \quad \epsilon_{inel} = \alpha(T - T_{ref})$$

$$\epsilon = \frac{1}{2} [(\nabla u)^T + \nabla u]$$

$$\nabla \cdot (k\nabla T) + Q = 0$$

Donde α es el coeficiente de expansión térmica, T temperatura, ϵ tensor de deformación total, u campos de desplazamientos, C tensor de elasticidad de cuarto orden, S es el esfuerzo y ϵ_{inel} es la deformación térmica unitaria.

El software utiliza el método de elementos finitos para la solución de las ecuaciones diferenciales mostradas anteriormente, el primer paso para la resolución del modelo es el análisis electrotérmico y a continuación se realiza la simulación del modelo estructural.

4.5.1 Geométrica del modelo en Comsol. El modelo se realizó en 3D, con una tabla paramétrica (ver tabla 7) de valores con el fin de realizar reconstrucciones de manera sencilla.

Tabla 7. Datos geométricos del sistema en Comsol

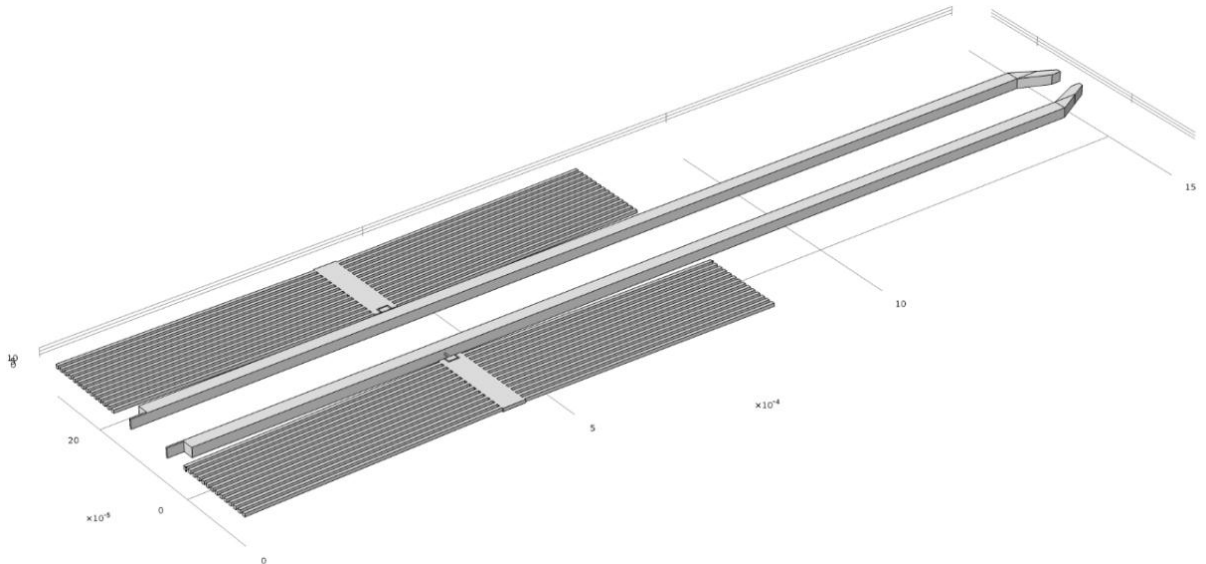
NOMBRE	EXPRESIÓN	VALOR	DESCRIPCIÓN
Sepanc	820[um]	0.000820 [m]	Separación entre anclajes.
Theta	1[deg]	0.017453 [rad]	Angulo de pre-curvatura.
Linc	Sepanc/(cos(theta))	0.00082012 [m]	Longitud de los dos brazos del actuador.
Pun	35[um]	3.5e-05 [m]	Espesor de la parte en la que se unen los dos brazos.
Esp	5[um]	5e-06 [m]	Espesor del actuador.

dz	5[um]	5e-06 [m]	Ancho del actuador.
Tinf	293[K]	293.00 [K]	Temperatura de los anclajes y ambiente.
Longpinza	1.5[mm]	0.0015 [m]	Longitud total de la pinza
Longinermini	25 [um]	2.5e-05 [m]	Longitud de la sección de inercia mínima.
Lonactuador	Sepanc/2	0.00041 [m]	Distancia desde el empotramiento hasta donde se aplica la carga producida por el actuador.
espesorpinza	20 [um]	2e-05 [m]	Espesor de la pinza.
Cierre	40 [um]	4e-05 [m]	Cierre de la pinza.
profundidadpinza	15 [um]	1.5e-05 [m]	Profundidad de la pinza.
Espesorinermini	espesorpinza/8	2.5e-06 [m]	Espesor de la inercia mínima.
Numact	14	14	Numero de actuadores.
Capoxid	Pun/20	1.75e-06 [m]	Espesor de la capa de óxido.
hconvec	10 [W/(m ² *K)]	10 [W/(m ² *K)]	Coefficiente de convección del aire.
espesorpieza	20 [um]	2e-05 [m]	Espesor pieza.
Alturapieza	20 [um]	2e-05 [m]	Altura pieza.
d	2 [um]	2e-06 [m]	Separación del sustrato.

Fuente: autores

Al variar cualquier parámetro geométrico de la tabla 4, el modelo cambia sus dimensiones (figura 39) al ejecutar su reconstrucción.

Figura 39. Geometría del sistema en Comsol



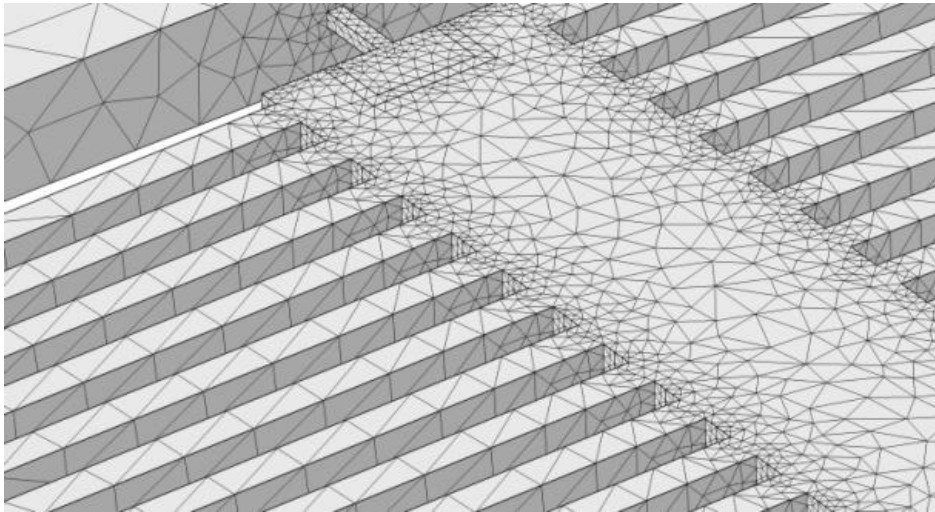
Fuente: Comsol Multiphysics

4.5.2 Mallado del modelo. La herramienta COMSOL Multiphysics está destinada a la resolución de ecuaciones diferenciales en derivadas parciales (PDE) utilizando el método de los elementos finitos. En el entorno de trabajo de COMSOL el usuario dispone de las herramientas necesarias para la introducción de las ecuaciones que describen su modelo. Sin embargo, COMSOL incorpora un importante número de sistemas físicos predefinidos con sus ecuaciones (modelos) agrupados en áreas temáticas (módulos) junto con librerías de materiales con un buen número de propiedades físicas relevantes. Otro aspecto de gran importancia es la posibilidad que nos brinda de valorar el acoplamiento de diferentes físicas en un mismo problema de una forma muy sencilla. Esto es, valorar la acción simultánea de solicitaciones de distinta naturaleza sobre el mismo sistema.

El algoritmo de mallado libre que utiliza elementos tetraédricos (figura 40) es la técnica de mallado más general, y no plantea ninguna restricción en la estructura de la geometría. Por lo tanto puede ser utilizado para mallar cualquier objeto. Existen nueve conjuntos de parámetros predefinidos para el mallador, que van

desde “extremadamente fino” a “extremadamente grueso”. Estos ajustes dan como resultado una buena malla para la mayoría de geometrías y problemas de simulación²³.

Figura 40. Mallado extremadamente fino del sistema en Comsol



Fuente: Comsol Multiphysics

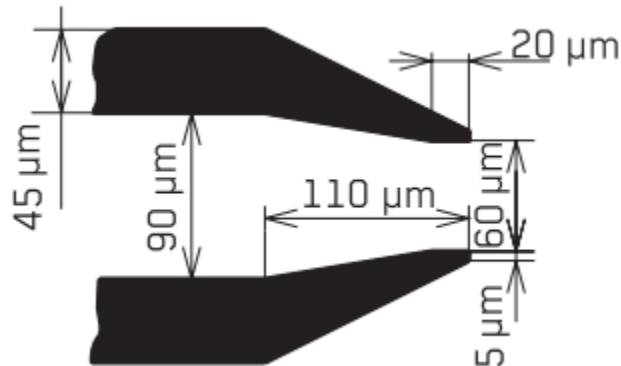
²³ Tutoriales de Comsol Multiphysics sobre mallado. [online]. [citado 18 diciembre 2012]. En: <<http://www.addlink.es/news/98-comsol/2024-tutorial-mallado-comsol>>.

5. DISEÑO Y SIMULACIÓN DEL SISTEMA MICROACTUADOR-PINZA

5.1 REQUERIMIENTOS DE DISEÑO DEL ACTUADOR

Comercialmente existe variedad de micro-pinzas para micro-ensamble que satisfacen diferentes requerimientos de manipulación y fuerza. La empresa Femto tools se ha especializado en la fabricación de este tipo de artículos, dentro de los cuales tiene la referencia FT-G62 (Figura 41) que tiene las siguientes dimensiones:

Figura 41. Dimensiones micro-pinza referencia FT-G62



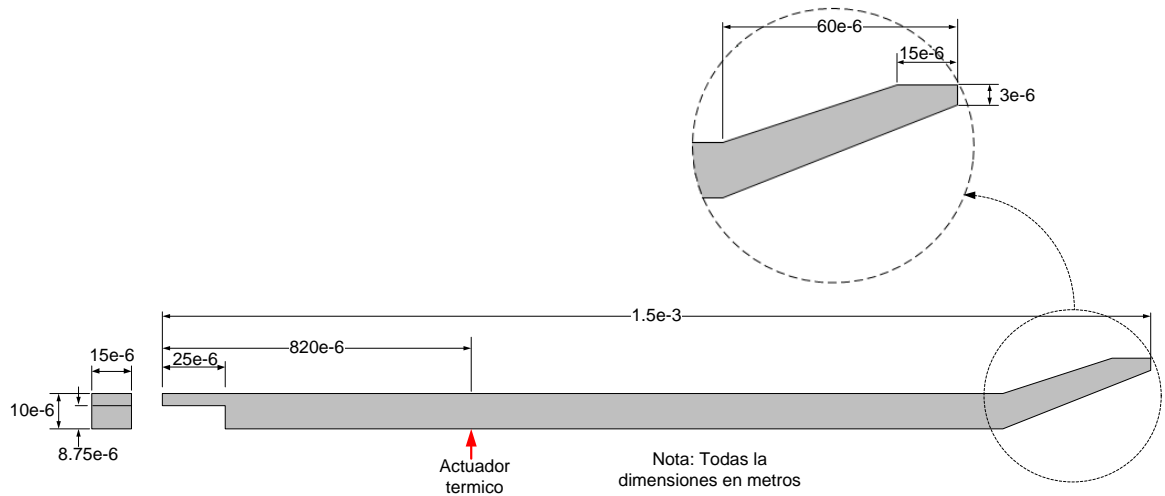
Fuente: FEMTO TOOLS. [Online]. [Citado 26 de diciembre de 2012]. En: <http://www.femtotools.com/fileadmin/datasheets/FT-G62_Datasheet.pdf>.

Longitud del brazo: 1.5 [mm]

Profundidad: 50 [μm]

Con base a las dimensiones de la micro-pinza de referencia FT-G62, se propuso la geometría que se puede observar en la figura 42.

Figura 42. Geometría de los brazos de la micro-pinza



Fuente: Autores

Con las medidas propuestas se diseñó el sistema de accionamiento para cumplir con los objetivos: una fuerza de agarre de entre $10 \mu\text{N}$ y $40 \mu\text{N}$ y un voltaje de accionamiento de entre 0 V y 15 V .

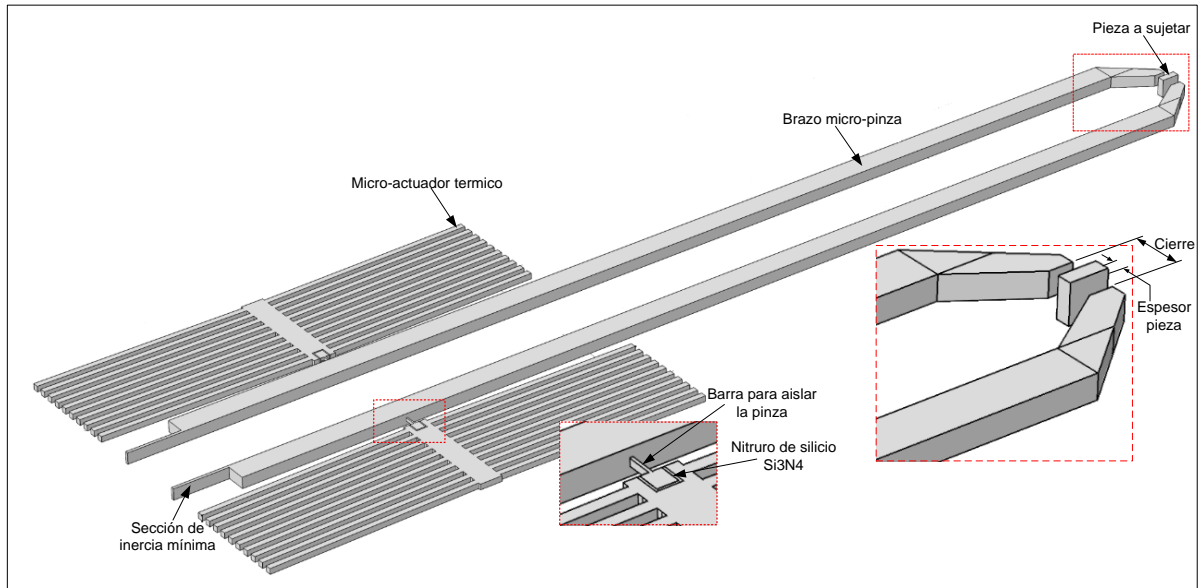
5.2 DISEÑO Y SIMULACIÓN

Según lo expuesto en el capítulo de modelado se realizó un algoritmo en Matlab que representa el comportamiento en estado estacionario del sistema (actuador y micropinza). Del mismo modo se realizó una simulación numérica en Comsol Multiphysics para comparar los resultados obtenidos.

Las variables que deben ser suministradas al algoritmo son las características geométricas del sistema: longitud del actuador, longitud de la pinza, número de actuadores, etc (figura 43). Además de las propiedades del material, las cuales dependen de la evolución de la temperatura (consultar tabla 8). Otros datos importantes de entrada se muestran en la tabla 9. El nitruro de silicio (Si_3N_4) que

se puede apreciar en la figura 43 es utilizado para aislar térmicamente la micro-pinza del sistema de actuación.

Figura 43. Esquema general del microsistema



Fuente: Comsol Multiphysics

Tabla 8. Propiedades que dependen de la temperatura

Propiedad	Variación de la propiedad con la temperatura
Conductividad térmica del poly-silicon	$Kp(T) = \frac{1}{-2.2 * 10^{-11} * T^3 + 9 * 10^{-8} * T^2 - 1 * 10^{-5} * T + 0.014}$
Resistividad eléctrica poly-silicon	$\rho(T) = (1.97 * 10^{-5} * (1 + (1.25 * 10^{-3} * (T - 293))))$
Coefficiente de expansión térmica poly-silicon	$\alpha(T) = (3.725 * 10^{-6} * (1 - e^{(-5.88e-3)*(T-125)}) + 5.548 * 10^{-10} * T)$
Módulo de Young poly-silicon	$E(T) = 158 * 10^9 - 0.04 * (T - 300)$

Conductividad térmica del aire	$K_{aire}(T) = 1.002328 * 10^{-3} + 9.043956 * 10^{-5} * T - 2.902134 * 10^{-8} * T^2 + 4.639952 * 10^{-12} * T^3 + 8.50727977 * 10^{-27} * T^4$
--------------------------------	--

Fuente: MATMAT, Mohamed, Pour une approche complète de l'évaluation de fiabilité dans les microsystèmes. Doctorat de l'université de Toulouse. Université de Toulouse. Délivré par l'Institut National des Sciences Appliquées, Le 3 septembre 2010. pp. 35.

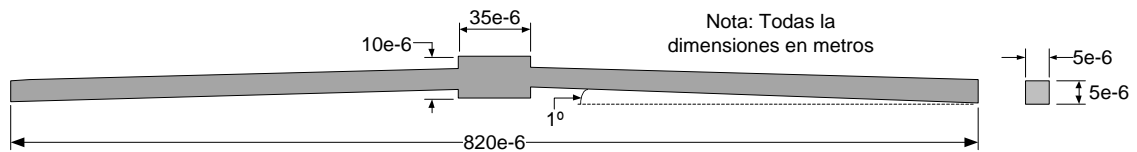
Tabla 9. Otros datos de entrada

VARIABLE	VALOR
Coeficiente de convección del aire	$h = 10 [W/m^2K]$
Numero de actuadores	Numact = 10
Distancia de separación del sustrato	$d = 2 [\mu m]$
Temperatura del entorno	$T_{\infty} = 293 [K]$
Temperatura del sustrato	$T_{sust} = 293 [K]$
Fuerza de apriete requerida por la micro pinza	$F = 25 [\mu N]$
Espesor de la pieza a sujetar	Esppieza = 20 $[\mu m]$
Cierre	Cierre = 40 $[\mu m]$

Fuente: Autores

Para analizar el comportamiento de las variables del sistema se partió de la geometría mostrada en la figura 44:

Figura 44. Configuración geométrica del actuador

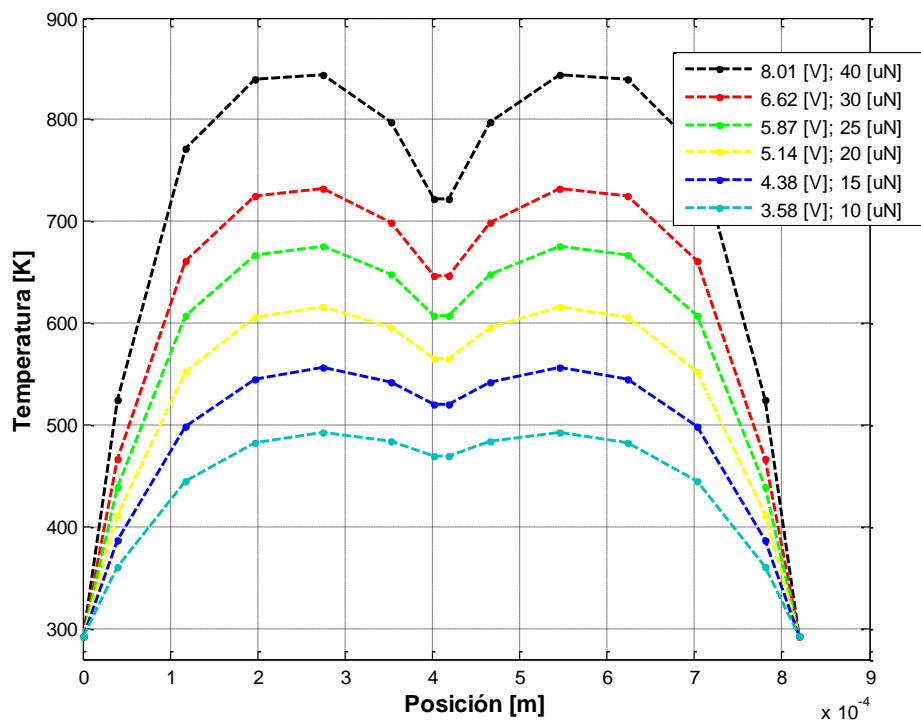


Fuente: Autores

5.2.1 Comparación de los resultados obtenidos en el Matlab y en el Comsol Multiphysics. Se generaron las gráficas más representativas que expresen el comportamiento del sistema mediante el algoritmo de Matlab y la simulación realizada en Comsol Multiphysics.

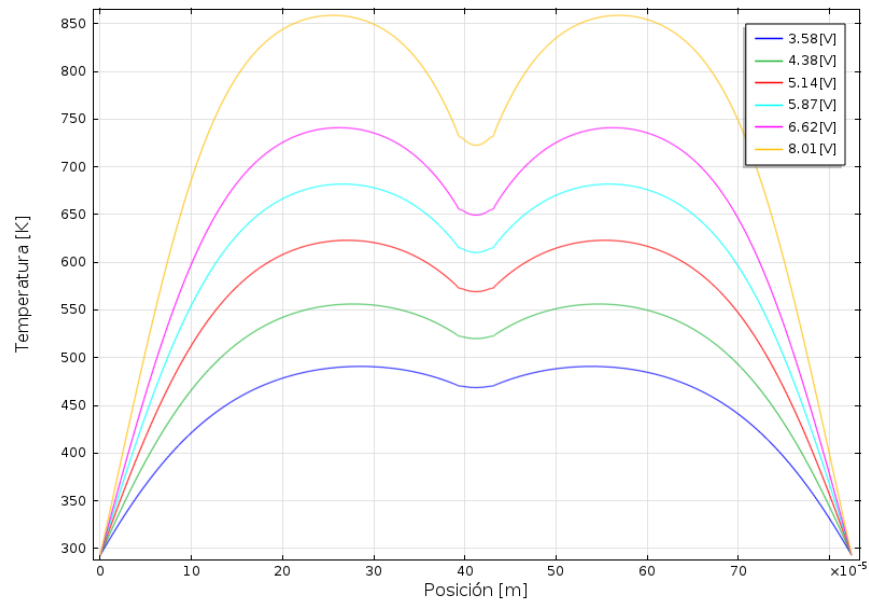
5.2.1.1 Variación de la temperatura a lo largo del actuador. Como se puede apreciar en las figura 45 y 46, la temperatura del actuador se distribuye simétricamente con respecto a la posición central. La temperatura disminuye en la mitad debido a la mayor área, que representa una mayor pérdida de calor por convección y conducción hacia el sustrato. Al observar las tendencias de las dos graficas se puede decir que el algoritmo elaborado en Matlab produjo resultados satisfactorios para la variación de la temperatura a lo largo del actuador.

Figura 45. Variación de la temperatura a lo largo del actuador (Matlab)



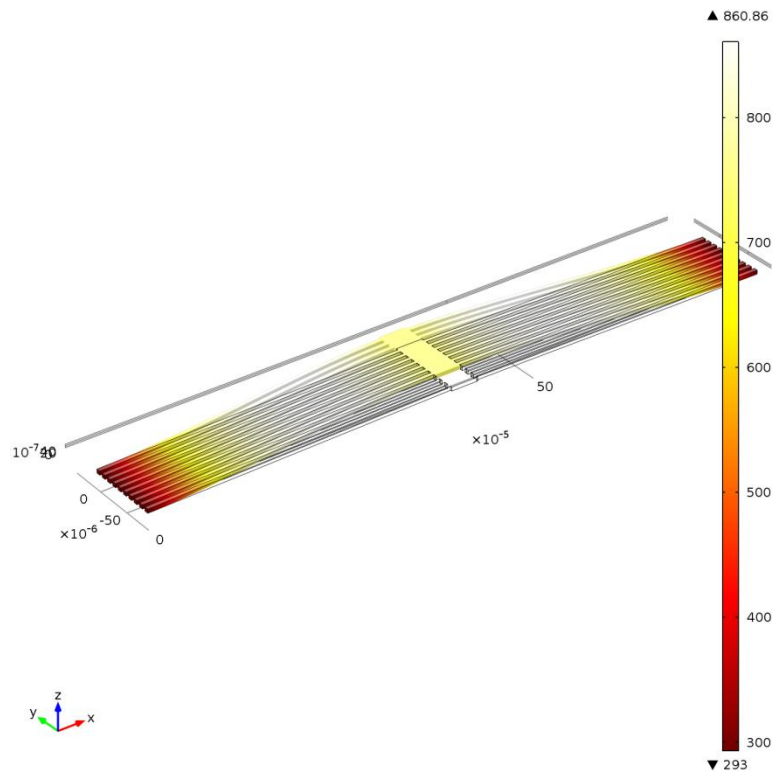
Fuente: Autores

Figura 46. Variación de la temperatura a lo largo del actuador (Comsol)



Fuente: Comsol Multiphysics

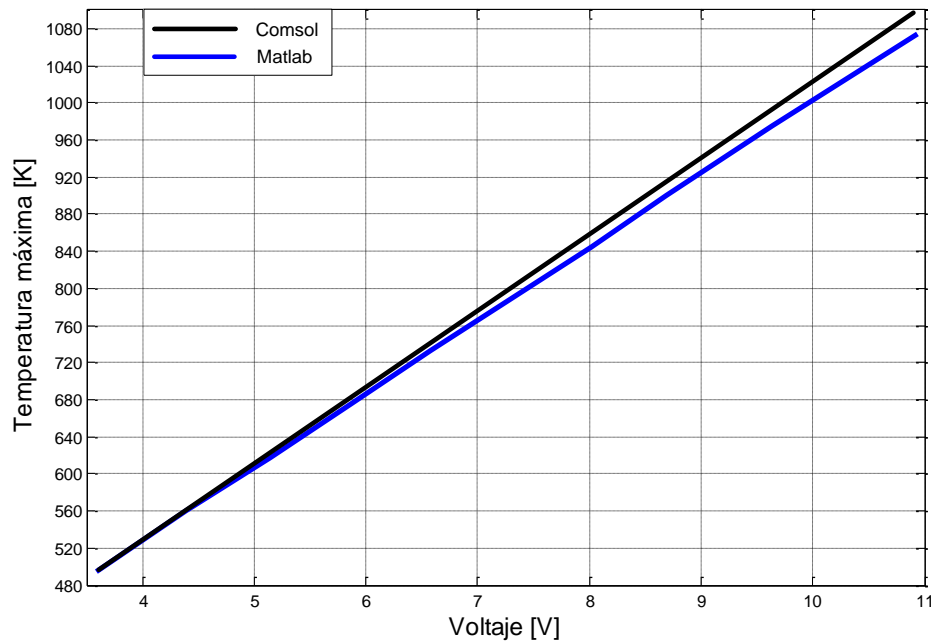
Figura 47. Variación de la temperatura con $V = 8.01[V]$ en Comsol.



Fuente: Comsol Multiphysics

5.2.1.2 Variación de la temperatura máxima con respecto al voltaje aplicado. Al observar la figura 48 se puede decir que la temperatura máxima varía linealmente con el voltaje aplicado, un resultado esperado de acuerdo a las variaciones mostradas en las figuras 45 y 46.

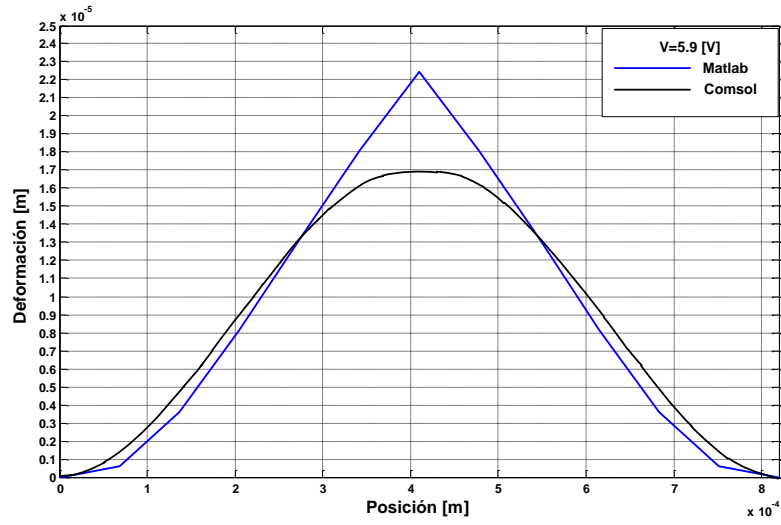
Figura 48. Variación de la temperatura máxima con respecto al voltaje aplicado



Fuente: Autores

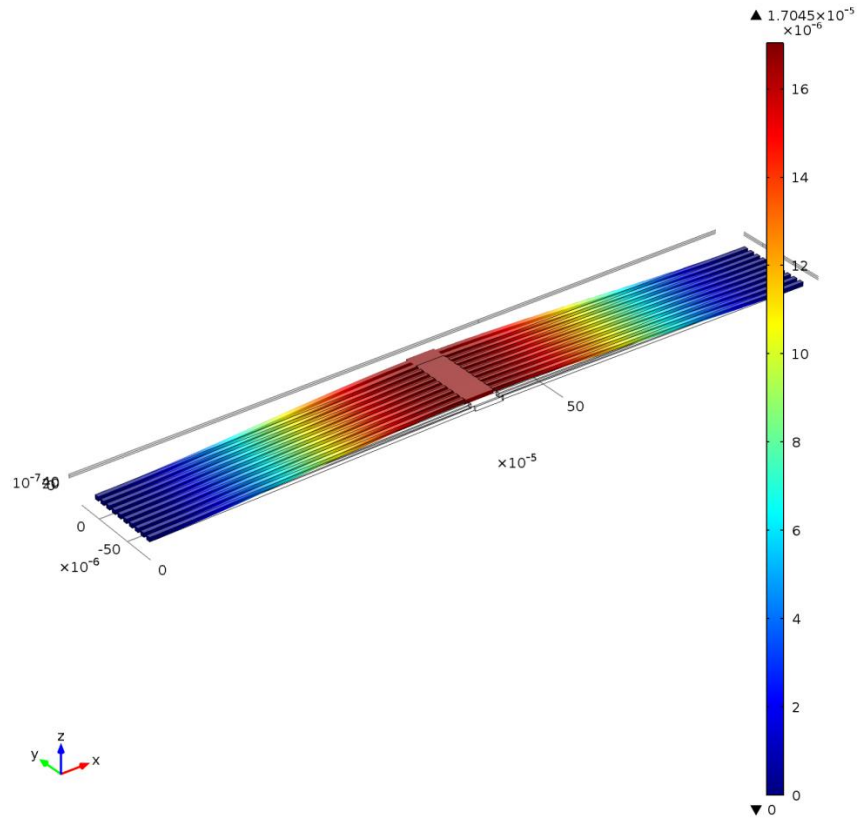
5.2.1.3 Variación de la deformación con la posición. Al examinar la gráfica 49, se observa una diferencia entre las curvas trazadas por los dos software. Este comportamiento se debe a que el algoritmo realizado en Matlab supuso un modelo lineal para la deformación producida por la temperatura y la carga. Se debe tener en cuenta que Comsol es un simulador comercial que ejecuta algoritmos precisos y representan el sistema de una manera más real.

Figura 49. Variación de la deformación vs voltaje



Fuente: Autores

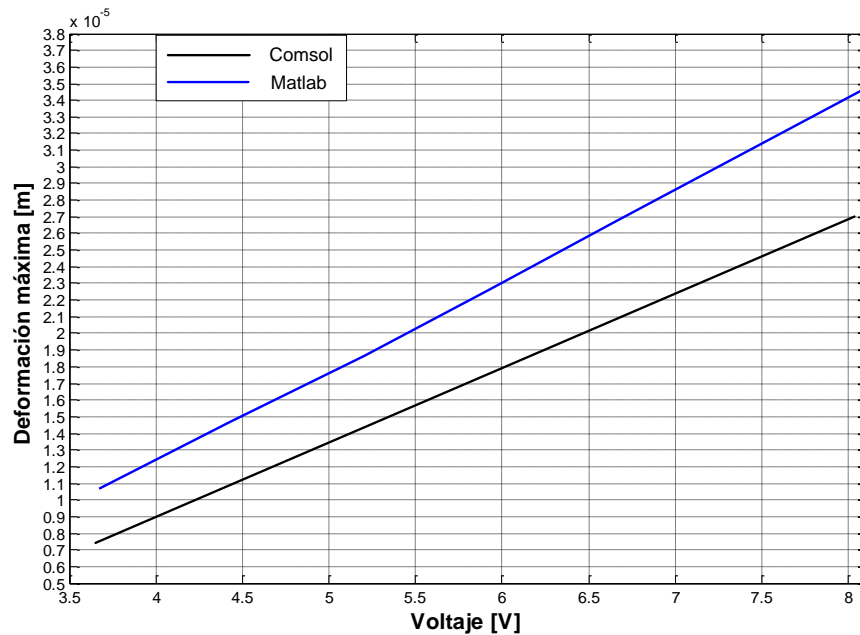
Figura 50. Variación de la deformación en Comsol con $V = 5.9$ [V]



Fuente: Comsol Multiphysics

5.2.1.4 Variación de la deformación máxima con respecto al voltaje aplicado. En relación a la figura 51 se puede decir que el comportamiento de la deformación con respecto al voltaje aplicado es lineal, la diferencia en la deformación que hay entre las dos graficas se debe al comportamiento explicado anteriormente.

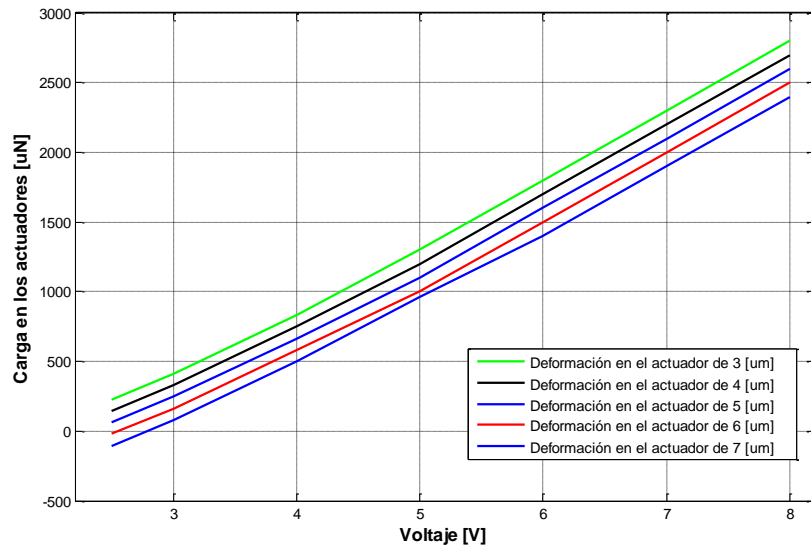
Figura 51. Variación de la deformación máxima vs voltaje aplicado



Fuente: Autores

5.2.1.5 Variación de la fuerza producida en los actuadores con respecto al voltaje aplicado. Al examinar la figura 52 se puede decir que a medida que el voltaje se incrementa los actuadores producen mayor fuerza para una determinada deformación.

Figura 52. Carga en los actuadores vs voltaje aplicado

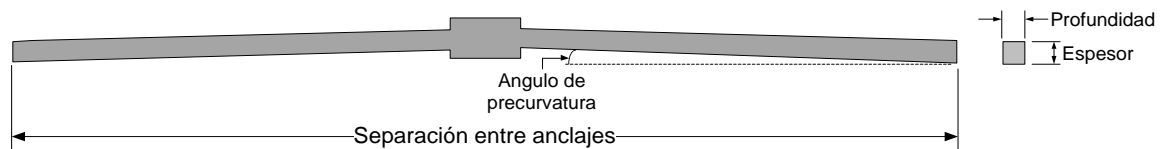


Fuente: Autores

5.2.2 Dimensionamiento del actuador. Para la realización de este proceso se tuvo en cuenta las variaciones geométricas más representativas que afectan el comportamiento del sistema.

5.2.2.1 Separación entre anclajes. El objetivo del dimensionamiento es minimizar la potencia suministrada al sistema. A partir de la geometría de la micro-pinza, se acota el espacio máximo que ocuparán los actuadores. Como se puede apreciar en la figura 53, el espacio está comprendido entre 750 µm y 820 µm esto con el objetivo de que la pinza pueda maniobrar libremente en la punta.

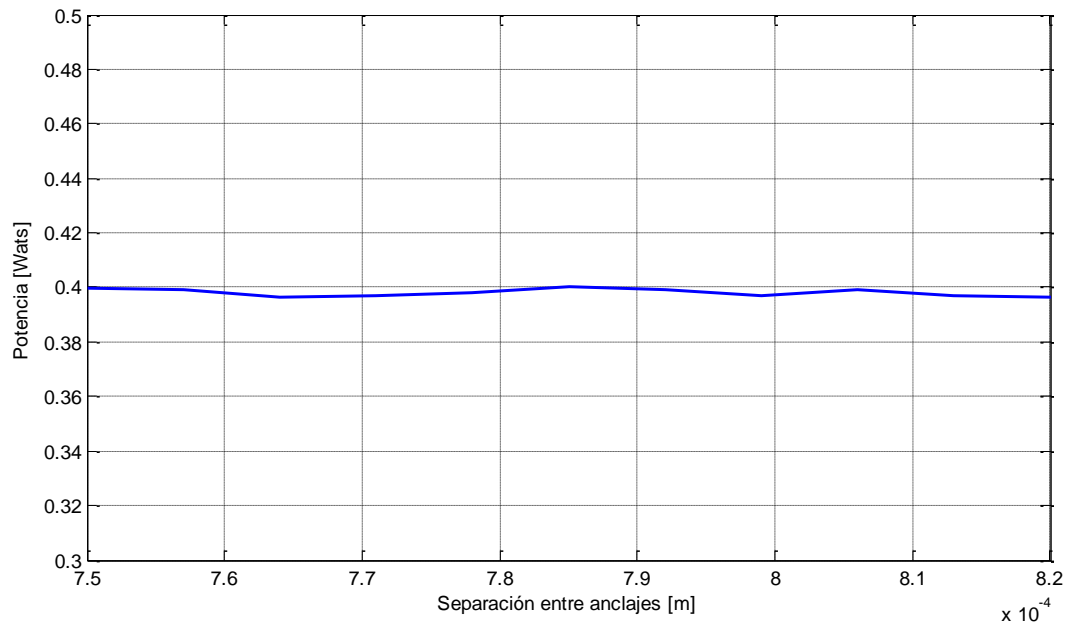
Figura 53. Espacio que ocupan los actuadores



Fuente: Autores

Para observar la variación de la potencia con respecto a la separación entre los anclajes de los actuadores se suministraron valores fijos al algoritmo (consultar tabla 9) y se generó la figura 54.

Figura 54. Variación de la potencia vs separación entre anclajes



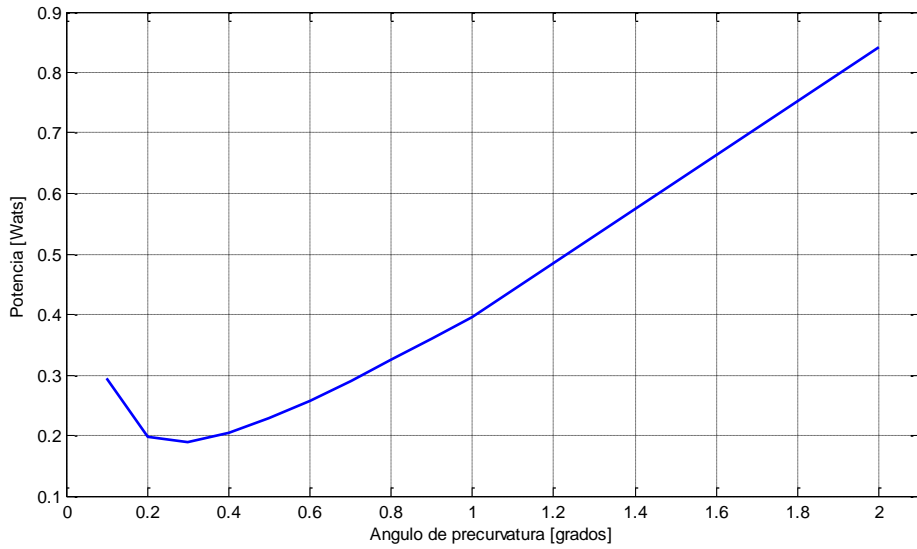
Fuente: Autores

Como se puede apreciar la separación entre anclajes no afecta la potencia suministrada al actuador, esto puede explicarse debido a que si se aumenta la separación, aumenta la deformación producida por la temperatura por lo que el voltaje, para cumplir con ciertos requerimientos de carga y deformación en la pinza, debe disminuir; ahora bien, a medida que se aumentan las dimensiones del conductor la corriente en el actuador aumenta y esto compensa la disminución del voltaje manteniendo así una potencia constante.

Teniendo en cuenta que si se aumenta la longitud inicial del brazo también se aumenta la deformación producida por la temperatura, se elige la mayor separación entre anclajes que se tenga disponible para los actuadores, es decir 820 μm .

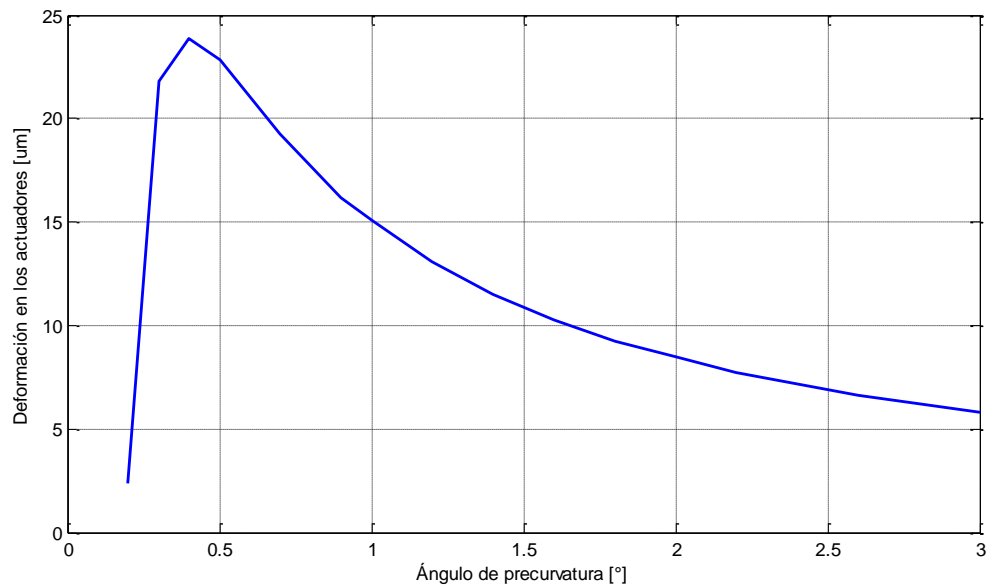
5.2.2.2 Angulo de pre-curvatura. Para observar el comportamiento de la potencia, la carga y la deformación con respecto al ángulo de pre-curvatura, se generaron las figuras 55, 56 y 57.

Figura 55. Variación del potencia vs el ángulo de pre-curvatura



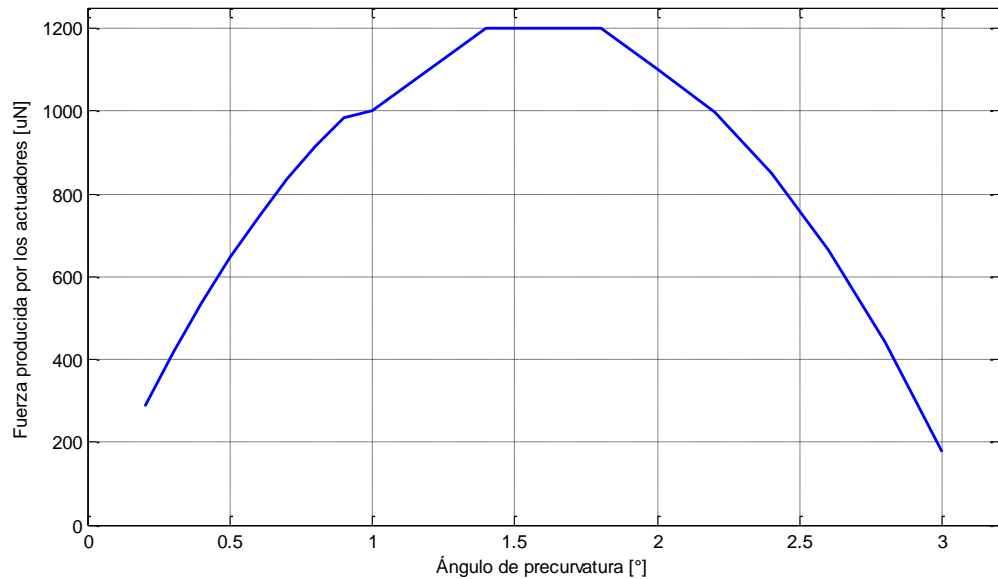
Fuente: Autores

Figura 56. Deformación del actuador vs ángulo de pre-curvatura



Fuente: Autores

Figura 57. Fuerza en el actuador vs ángulo de pre-curvatura

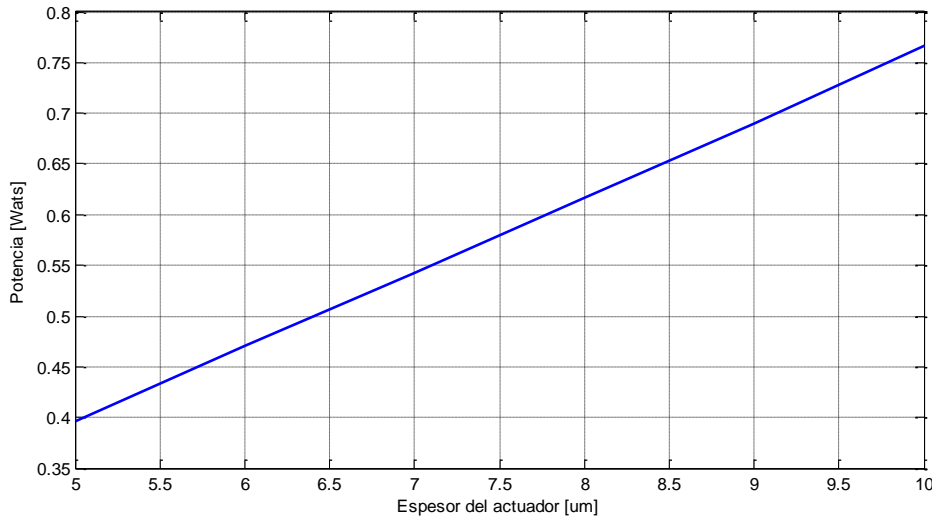


Fuente: Autores

Como se puede observar el ángulo de pre-curvatura afecta la carga, la deformación y el consumo de potencia. El ángulo óptimo se encuentra en un rango de valores de 0.3 a 1.7 grados, dentro de estos valores se puede ubicar el punto de intersección entre las diferentes curvas generadas. Hay que tener en cuenta que si el ángulo es menor a uno el actuador se sale del plano de accionamiento cuando se la aplica una diferencia de voltaje.

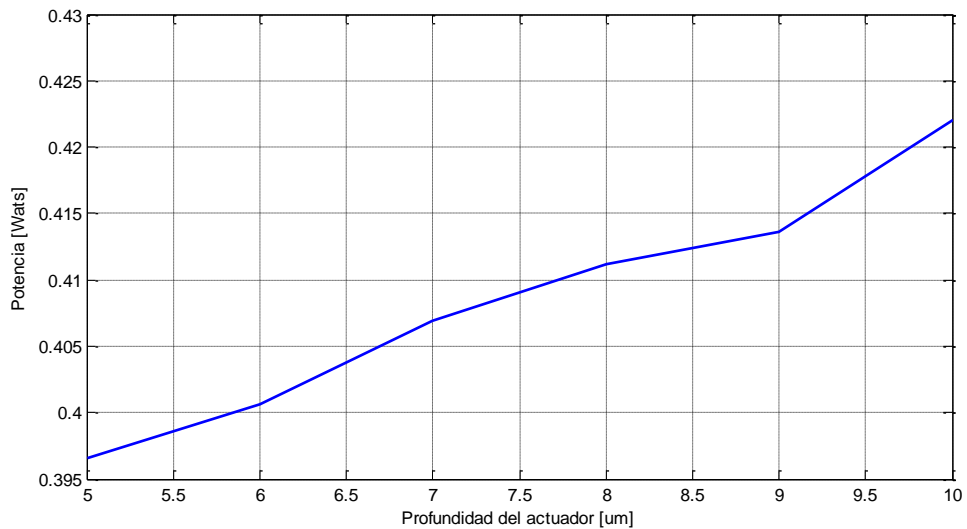
5.2.2.3 Sección transversal del actuador. Para apreciar el comportamiento de la sección transversal del actuador con respecto a la potencia se generaron las figuras 58 y 59, en las cuales se puede observar que la variación del espesor del actuador afecta en mayor medida el consumo de potencia, que la variación de la profundidad. Como las dos tienen una relación lineal, el área de sección transversal mínima sería la óptima, esta se calcula con base en la carga máxima que puede soportar el actuador sin que se pandee el brazo.

Figura 58. Variación de la potencia con respecto al espesor del actuador



Fuente: Autores

Figura 59. Variación de la potencia con respecto a la profundidad del actuador

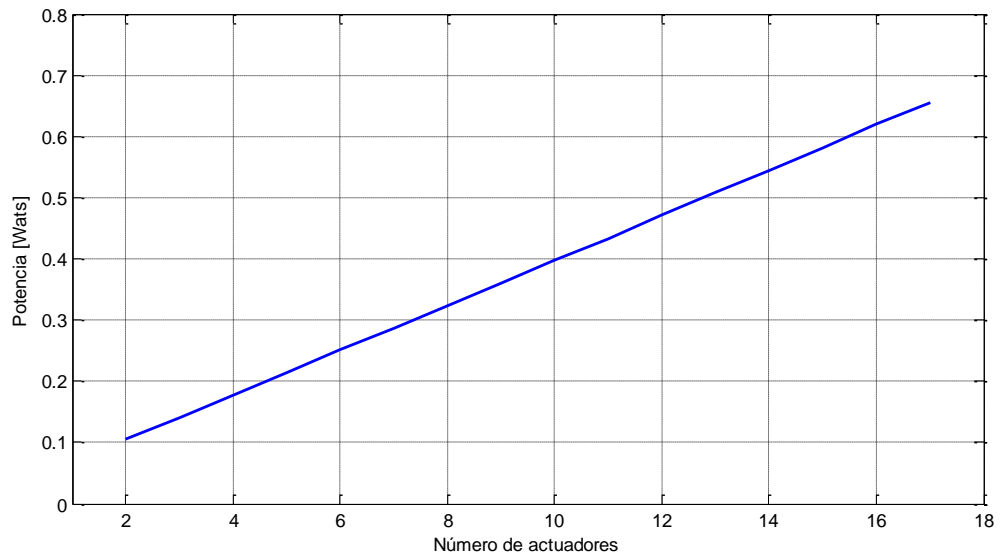


Fuente: Autores

5.2.2.4 Numero de actuadores. Para apreciar el comportamiento de la potencia con respecto al número de actuadores, se generaron las figuras 60 y 61. En la figura 60 se observa que la potencia aumenta a medida que se aumentan el número de actuadores esto se debe a que el volumen de generación en el

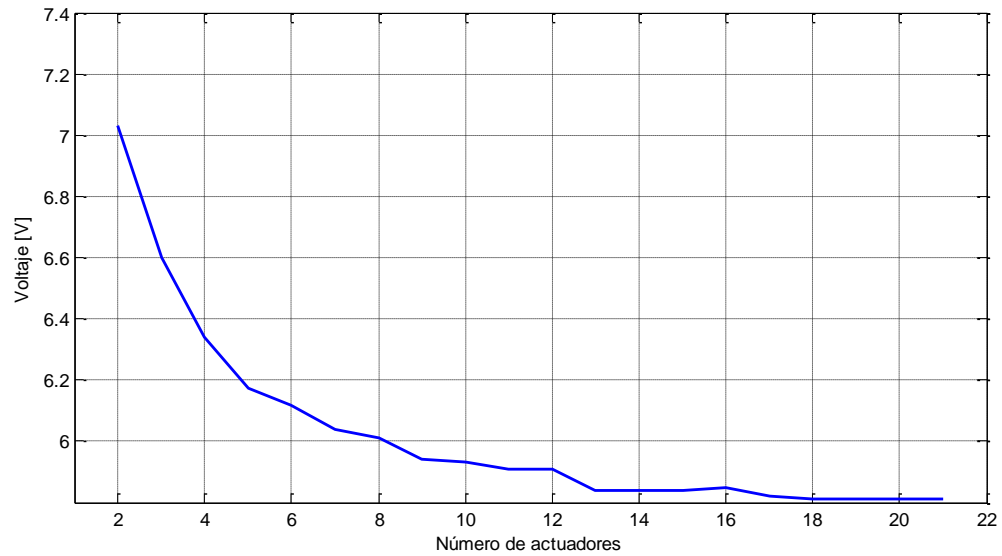
conductor es mayor. En la figura 61 se observar un comportamiento asintótico del voltaje con respecto al número de actuadores, esto es debido a que para determinadas condiciones de carga y desplazamiento en la pinza los actuadores se deforman por carga y temperatura. En la medida en la que se aumente el número de actuadores, la deformación por carga se reduce ya que esta se distribuye entre el número de actuadores; esto implica que la deformación total se satisface solo por temperatura para cierto número de actuadores.

Figura 60. Variación de la potencia con respecto al número de actuadores



Fuente: Autores

Figura 61. Variación del voltaje con respecto al número de actuadores



Fuente: Autores

5.2.3 Resultados del dimensionamiento. Luego de observar el comportamiento de las gráficas anteriores, se realizaron una serie de iteraciones para dimensionar el actuador que produjera los mejores resultados. Las características geométricas más representativas y las características de operación crítica se aprecian en la tabla 10, los plano del sistema se pueden consultar en el anexo B.

Tabla 10. Dimensiones finales del micro-actuador

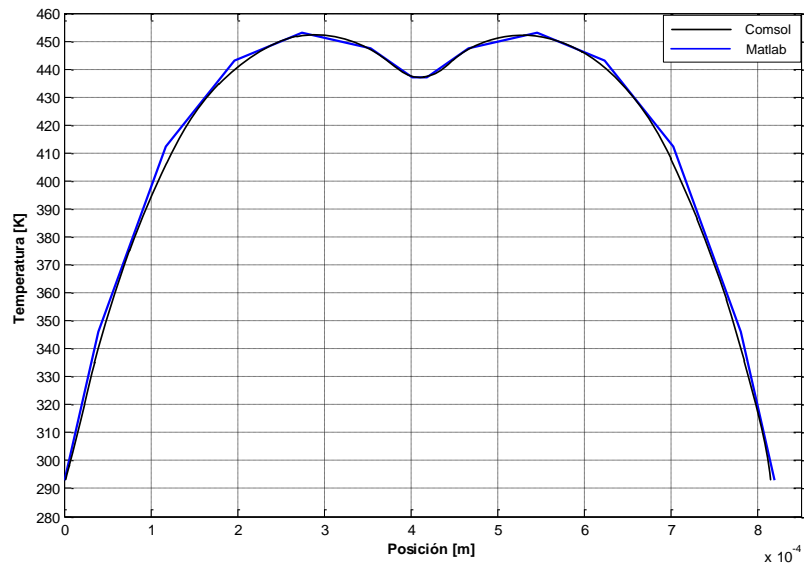
VARIABLE	VALOR
Separación entre anclajes	$Sep_{anc} = 820 [\mu m]$
Contacto actuador pinza	$P_{un} = 35 [\mu m]$
Profundidad de los actuadores	$dz = 5 [\mu N]$
Espesor de actuadores	$Esp = 5 [\mu N]$

Angulo de pre-curvatura	$theta = 1 [deg]$
Fuerza máxima en la pinza	$F = 40 [\mu N]$
Fuerza critica en el actuador (pandeo)	$F_{critica} = 19 * 10^{-4} [N]$
Carga máxima en el actuador	$F_x = 1.568 * 10^{-4} [N]$
Voltaje de accionamiento máximo	$V = 3.1086 [V]$
Espesor de la pieza a sujetar	$Espesorpieza = 20 [\mu N]$
Número de actuadores	14

Fuente: Autores

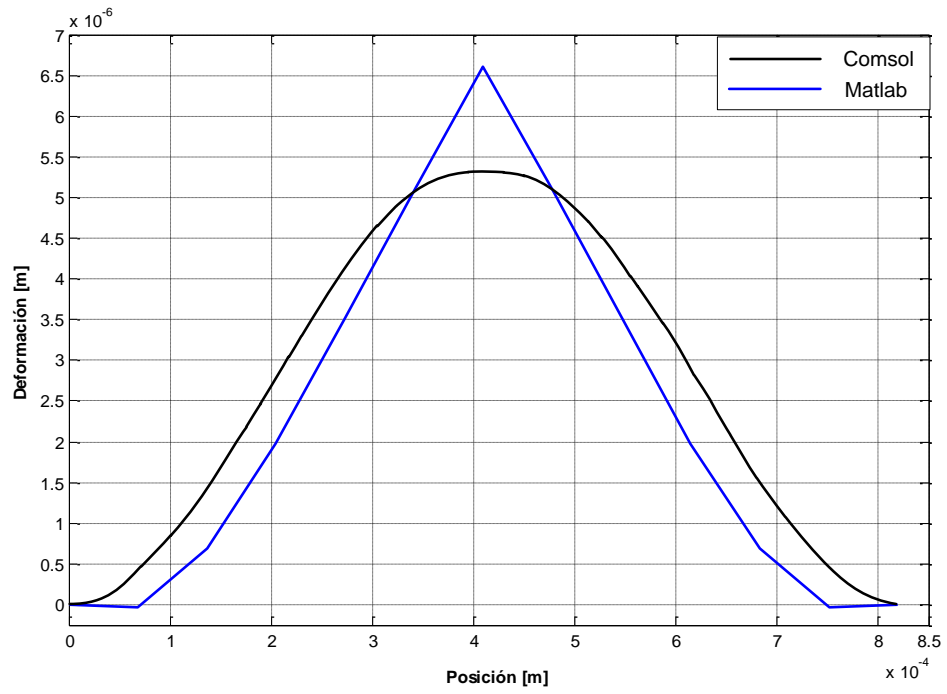
Con los datos proporcionados en la tabla 10 se realizó la respectiva simulación en Comsol y en Matlab donde se obtuvieron los resultados que se muestran en la figuras 62, 63 y 64. Las figuras 65 y 66 muestran esquemas más detallados del comportamiento del sistema en Comsol.

Figura 62. Temperatura vs posición actuador



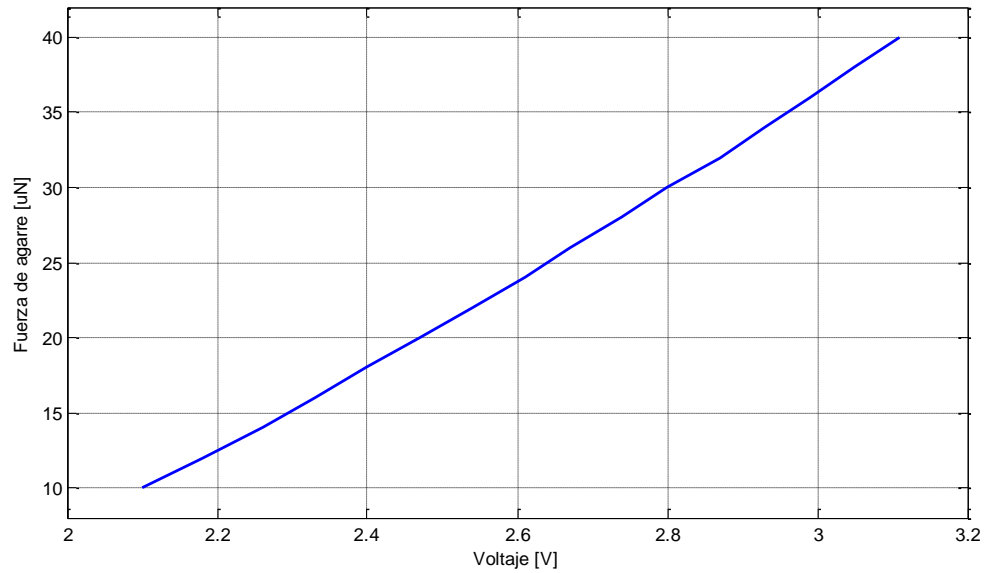
Fuente: Autores

Figura 63. Deformación vs posición actuador



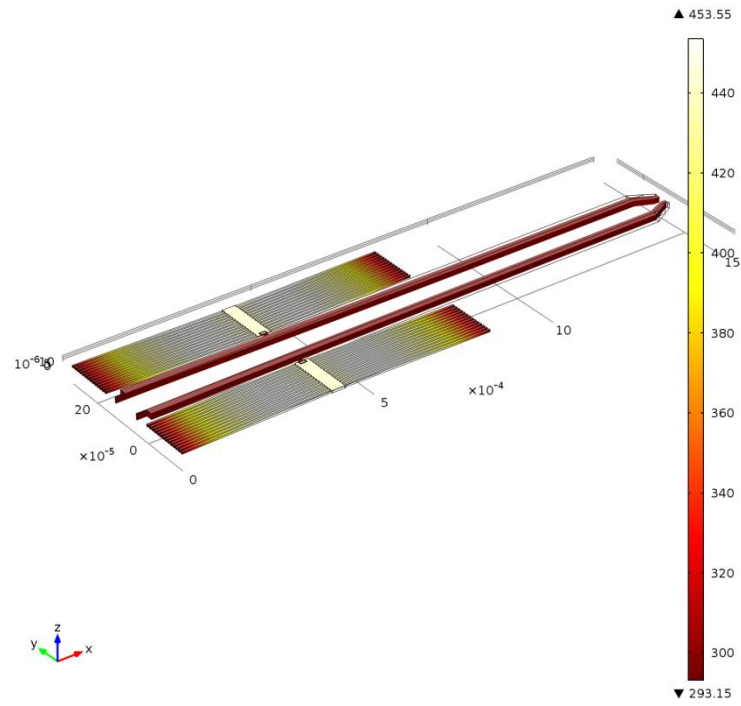
Fuente: Autores

Figura 64. Fuerza de agarre vs voltaje para una pieza de 20 μm (Matlab)



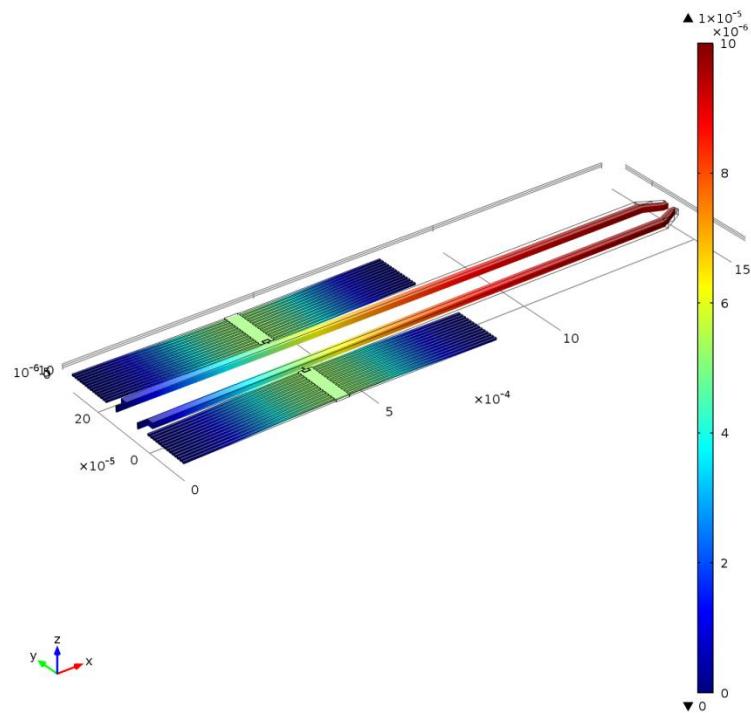
Fuente: Autores

Figura 65. Distribución de la temperatura del sistema en Comsol



Fuente: Comsol Multiphysics

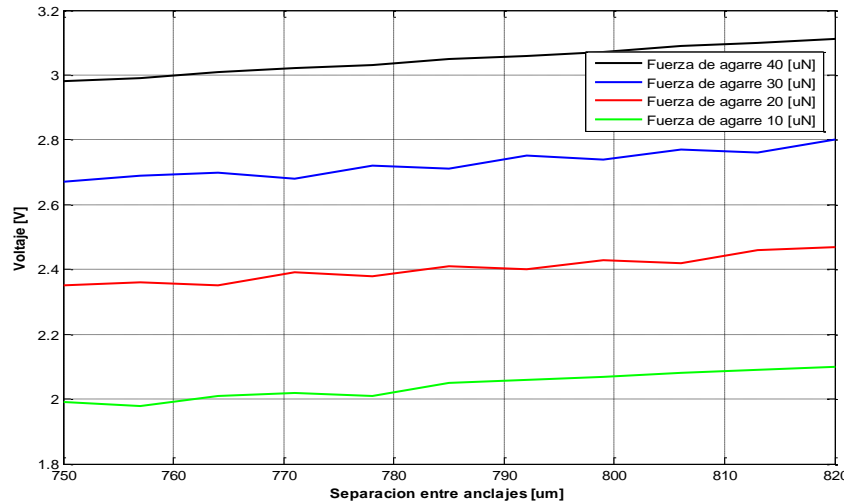
Figura 66. Deformación del sistema en Comsol



Fuente: Comsol Multiphysics

En la figura 67 se muestra la influencia de la variación entre la separación de anclajes en los actuadores para diferentes fuerzas de agarre y el voltaje para producirlas.

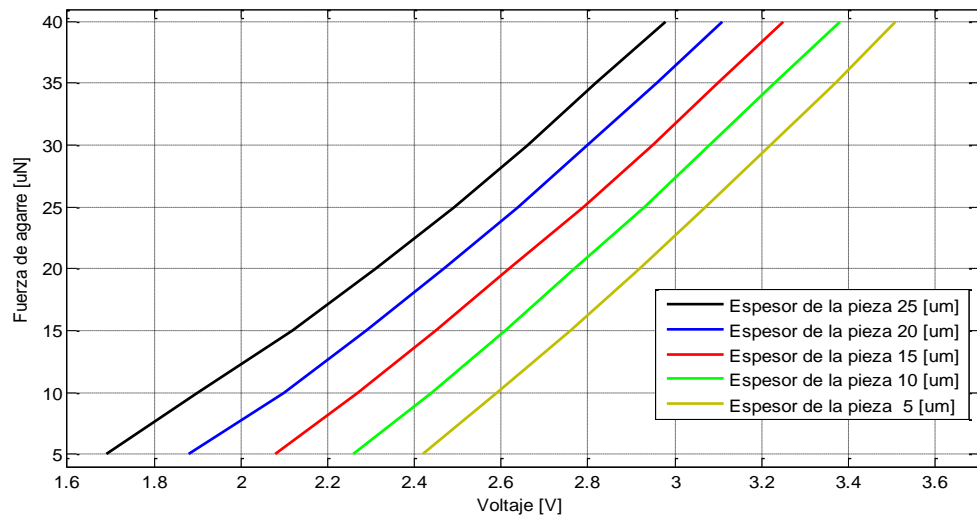
Figura 67. Voltaje vs separación entre anclajes



Fuente: Autores

En la figura 68 se puede examinar que voltaje de accionamiento se requiere para sujetar una pieza de determinado espesor con cierta fuerza de agarre.

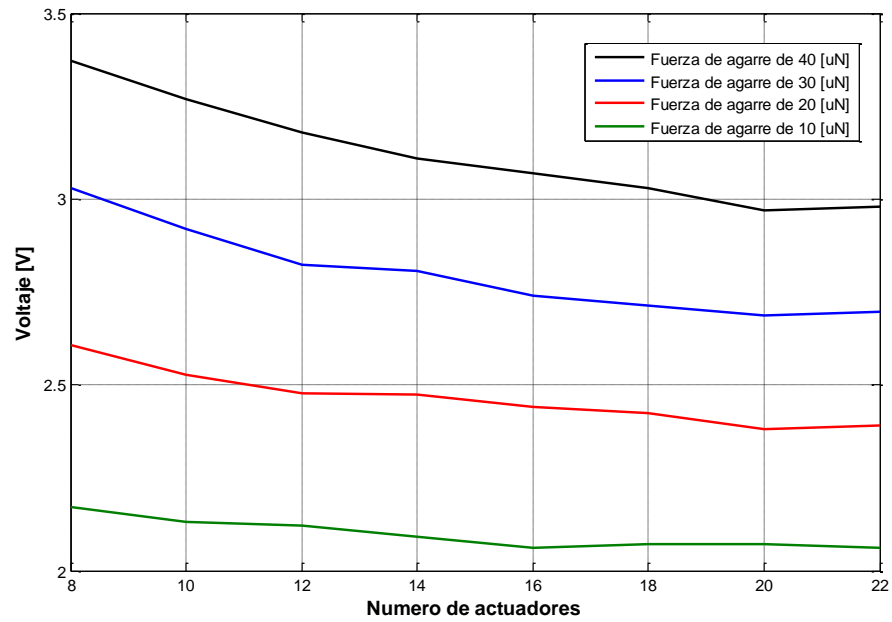
Figura 68. Fuerza de agarre vs voltaje



Fuente: Autores

En la figura 69 se puede observar como varia la fuerza y el voltaje con un determinado número de actuadores.

Figura 69. Voltaje vs número de actuadores



Fuente: Autores

6. CONCLUSIONES

- Al comparar el algoritmo desarrollado en Matlab con la simulación numérica desarrollada en Comsol Multiphysics se obtuvo:
 - Una diferencia máxima de 10 [K] para la distribución de temperatura, con un voltaje de 8.1 [V], lo que equivale a un porcentaje de error del Matlab con respecto al Comsol del 1.16%. Hay que tener en cuenta que a medida que se reduce el voltaje el porcentaje de error disminuye.
 - Para una distribución de deformación a lo largo del actuador se obtuvo una diferencia en el desplazamiento máximo de 7.2 [μm], lo que equivale a un porcentaje de error del Matlab con respecto al Comsol del 25%. Esta diferencia se dio por la aplicación de un modelo lineal a la deformación carga-temperatura en el algoritmo desarrollado en Matlab. Al igual que la temperatura el porcentaje de error se reducen a medida que el voltaje disminuye.
 - El ángulo de pre-curvatura es una variable que requiere un estudio detallado en el momento de diseñar el actuador ya que existen puntos máximos para la carga y la deformación, estos deben tenerse en cuenta para seleccionar un ángulo óptimo.
 - De acuerdo a estos resultados se puede concluir que el algoritmo desarrollado en el software Matlab arrojó resultados satisfactorios.
- Teniendo en cuenta la temperatura de calentamiento en el termo-actuador debe ser inferior a los 800 °C, para proteger el poly-silicio del auto-recocido,

se debe aplicar un voltaje inferior a los 10.9 [V] para la geometría propuesta en la validación del modelo.

- Se diseñó un actuador termo-mecánico para el accionamiento de una micro-pinza con una fuerza de agarre máxima de 40 [μN] y un voltaje de accionamiento de 3.1086 [V]. Este proceso se realizó en el algoritmo desarrollado en Matlab y se validó en Comsol Multiphysics.

BIBLIOGRAFÍA

CASTILLO, Jaime, et al. 3D Biomanipulation Using Microgrippers. En: Micro and Nano Techniques for the Handling of Biological Samples. Ed. CRC Press 2011. p. 152-171.

FITZFERALD, Robert W. Mecánica de materiales. México D.F.: Alfaomega. p. 375. ISBN 970-15-0154-3.

FLEWITT, A J, et al. Three types of planar structure microspring electro-thermal actuators with insulating beam constraints [online]. En:< <http://www-mech.eng.cam.ac.uk/profiles/fleck/papers/214.pdf> >. p. 1527-1537.

GARCÍA, Jorge O. Análisis de nuevas tecnologías para microactuadores en la exploración espacial. En:<<http://www.efn.unc.edu.ar/departamentos/aero/Asignaturas/SisEqAvi/Microactuadores.pdf>>. 18 p.

GREMINGER, Michael A.; SEZEN, A. Serdar y Nelson Bradley J. A Four Degree of Freedom MEMS Microgripper with Novel Bi-Directional Thermal Actuators. En:<<http://ieeexplore.ieee.org/Xplore/guesthome.jsp>>. 6 p.

HUANG Q., y LEE N., Analysis and design of polysilicon thermal flexure actuator, *J. Micromech. Microeng.*, vol. 9, pág. 64-70, 1999.

INCROPERA, Frank P. y DEWITT, David P. Fundamentos de transferencia de calor, cuarta edición. Editorial Prentice Hall, Mexico, 1999. p. 8.

J. T. Feddema, A. J. Ogden, L. K. Warne, W. A. Johnson, D. Armour, "Electrostatic/electromagnetic gripper for micro-assembly," World Automation congress, Proc. of the 5th biannual, pp. 268-274, 2000.

MEMSolver Online Help. En: < <http://www.memsolver.com/Help/index.html>>.

MOTT, Robert L. Diseño de elementos de máquinas. Traducido: Virgilio Gonzalez y Poso. 4 ed. Mexico D.F.: Pearson educación, 2006. p. 234. ISBN 970-26-0812-0.

SANTANA, Andrea y VERDEZOTO, Gabriela. Estudio del estado del arte, modelamiento y simulación de MEMS (Micro-Electro-Mechanical-Systems) para el diseño de un prototipo orientado al área de automatización y control. Proyecto de grado para la obtención del título en ingeniería electrónica, automatización y control. Sangolquí – Ecuador: Escuela Politécnica del Ejército. Departamento de Eléctrica y Electrónica, 2011. 386 p.

SAMEOTO, Dan; HAMIDI, Mana y PARAMESWARAN, M. Characterization of Work and Power Efficiency of Micromachined Polymer Thermal Actuators. En: <<http://ieeexplore.ieee.org/Xplore/guesthome.jsp>>. p. 1441-1444.

SENTURIA, Stephen D. Microsystem design. Massachusetts United States of America. Kluwer Academic Publishers. p.689. ISBN 0-7923-7246-8.

T. Sato, K. Koyano, M. Nakao, and Y. Hatamura, "Novel Manipulator for Micro Object Handling Interface between Micro and Human Worlds," Proc. of IEEE/RSJ Int'l Conf. on intelligent Robots and Systems, pp. 1674-1680, 1993.

VARONA, Jorge; et al. Design of MEMS vertical–horizontal chevron thermal actuators. En: < <http://www.sciencedirect.com/> >. p.127-130.

W. Riethmuller and W. Benecke, "Thermally excited silicon microactuators," IEEE Trans. on Electron Devices, Vol. 35, Issue 6, pp.758–763, June 1988.

YUNUS, Cengel. Transferencia de calor y masa. Un enfoque práctico. Traducida: Jose Hernán Pérez Castellano y Javier Enríquez Brito. 3 ed. Mexico D.F.: McGraw-Hill, 2007. p. 901. ISBN-13: 978-970-10-6173-2.

Y. Zhou and B. J. Nelson, "The Effect of Material Properties and gripping forces on micrograsping," Proc. of IEEE int'l conf. on robotics and automation. pp. 1115-1120, 2000.

ANEXOS

Anexo A. Diagrama de flujo

