

Actuadores chevron MEM con reguladores de movimiento

MEM chevron with bossed diaphragms

Margarita Tecpoyotl-Torres,^{1*} Pedro Vargas-Chable,² Ramón Cabello-Ruíz,²
Miguel Ángel Flores-González²

¹Centro de Investigación en Ingeniería y Ciencias Aplicadas, CIICAp, Universidad Autónoma del Estado de Morelos, UAEM

²Doctorado en Ingeniería y Ciencias Aplicadas, CIICAp, UAEM

Avenida Universidad 1001, col. Chamilpa. Cuernavaca, Morelos. México. CP 62209

* Correo-e: tecpoyotl@uaem.mx

PALABRAS CLAVE:

regulador de movimiento,
microestructura, frecuencia natural,
fuerza y desplazamiento

RESUMEN

En este artículo se presenta el análisis y diseño de una estructura chevron MEM con reguladores de movimiento, actuada por calor. La estructura se analizó considerando diferentes ángulos de inclinación, número de brazos y formas de reguladores de movimiento, con la intención de obtener un mayor desplazamiento de la flecha. Los diseños se realizaron en Autodesk Inventor y las simulaciones en Ansys Workbench 15.0. Se presentan, además, comparaciones del desempeño de la estructura con respecto al chevron convencional.

KEYWORDS:

boss, microstructure, natural
frequency, force, and displacement

ABSTRACT

This paper presents the analysis and design of a MEMS chevron structure with motion regulators, actuated by heat. The structure is analyzed considering different inclination angles, numbers of beams and shapes of bosses, in order to provide a larger shuttle displacement. Designs were developed in Autodesk Inventor and simulations in Ansys Workbench 15.0. In addition, a performance comparison respect to conventional chevron was realized.

1 INTRODUCCIÓN

Entre los mecanismos de accionamiento más populares están: los piezoeléctricos, los electrostáticos, los de memoria de forma y los electrotérmicos. Los dispositivos electrostáticos tienen la desventaja de no incrementar la fuerza y el desplazamiento; los actuadores piezoeléctricos requieren de altos voltajes, y los actuadores basados en memoria de forma llegan a ser ineficientes en su desempeño. En cambio, los actuadores electrotérmicos permiten mayor desplazamiento e incrementan la fuerza de actuación [1-3]. Los sistemas micro electro mecánicos (MEMS, por sus siglas en inglés) se encuentran integrados por elementos mecánicos, microsensores, microactuadores y microelectrónicos. Los actuadores verticales presentan fuerzas que van desde los diez a cientos de $\mu N/mm$; sin embargo, al realizar arreglos de vigas horizontales, desarrollan fuerzas en el orden de los mN/mm . Estas estructuras son llamadas actuadores chevron. Estos dispositivos exhiben elevadas fuerzas de salida, bajos voltajes de operación, una resolución submicrométrica de posicionamiento, un movimiento lineal sin deformación en la flecha, entre otras cualidades [4-6].

El objetivo de este estudio es obtener un nuevo dispositivo a partir del diseño del actuador térmico chevron usado en [4]; así como observar su comportamiento cuando se disminuye o incrementa el número de brazos o vigas unidas a la flecha del dispositivo. Los brazos son modificados a través de reguladores de movimiento con tres geometrías diferentes. Se propone el uso de silicio porque es el material comúnmente utilizado en la fabricación de estructuras MEMS.

2 CONCEPTOS BÁSICOS

El actuador chevron está diseñado por dos arreglos de brazos o barras alineadas horizontalmente con cierto ángulo de inclinación, unidos a la flecha en la parte central. La estructura está soportada por dos anclas o pilares (figura 1). Al ejercer calentamiento en las anclas, los brazos tienden a deformarse y producir un desplazamiento y fuerza de salida en la dirección de la flecha de acuerdo a la longitud de las barras, su ángulo de inclinación y el incremento de temperatura [7-10]. Las ecuaciones 1-5 se utilizaron para analizar el desempeño de las estructuras. La nomenclatura se presenta en la sección 6.

Fuerza de actuación del dispositivo[10-11]:

$$F_y = N\beta EA\Delta T \sin \theta \quad (1)$$

El desplazamiento máximo de la flecha debido a la fuerza de actuación en la dirección Y [3, 11].

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

El momento de inercia:

$$I = \frac{W^3 t}{12} \quad (3)$$

La rigidez del dispositivo [3, 11]:

$$k_{CH} = \frac{F_y}{U_y} \quad (4)$$

De manera equivalente:

$$k_{CH} = N \left(s^2 \frac{EWt}{L} + c^2 \frac{EW^3t}{L^3} \right) \quad (5)$$

En la tabla 1 se presentan las propiedades del silicio empleadas.

Tabla 1. Propiedades físicas y mecánicas del silicio [12,13]

PROPIEDAD	VALOR	UNIDAD
Densidad (ρ)	2330	kg/m^3
Coefficiente de expansión térmica (α)	2.6 e-6	$1/^\circ C$
Módulo de Young (E)	1.31 e11	Pa
Razón de Poisson (ν)	0.33	
Módulo de compresibilidad (B)	1.2843 e11	Pa
Módulo de corte (S)	4.9248 e10	Pa
Tensión de rotura	2.5 e8	Pa
Conductividad térmica (κ)	124	$W/(^\circ C m)$
Calor específico (C_p)	702	$J/kg \ ^\circ C$
Resistividad eléctrica (R)	0.001	Ωm

La implementación del regulador de movimiento se realizó a partir de la relación presentada en la figura 2 [12]:

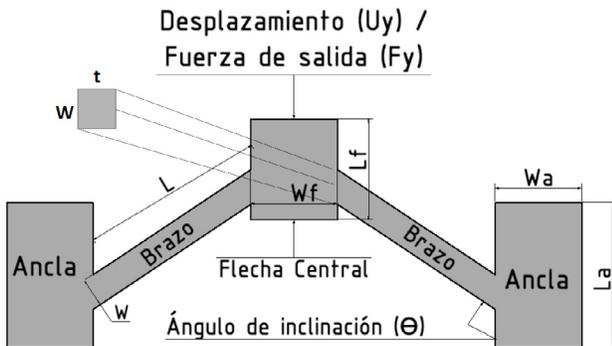


Figura 1. Elementos de la estructura chevron MEMS con dos brazos

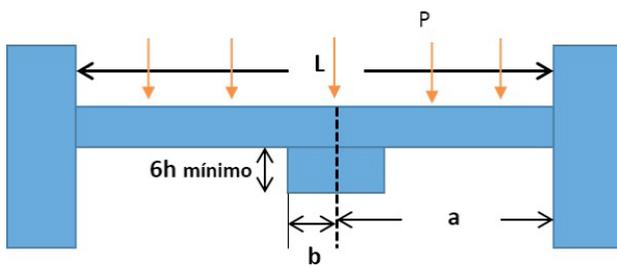


Figura 2. Modelo de la implementación de un regulador de movimiento en una viga suspendida

3 DISEÑO Y SIMULACIÓN

3.1 Diseño de la estructura chevron convencional

Se llevó a cabo la variación de la cantidad de los brazos, de 2 a 18. Las dimensiones de los brazos fueron: $W = 3 \mu\text{m}$, $t = 2 \mu\text{m}$, $L = 200 \mu\text{m}$ y $\theta = 2.14^\circ$. Se considera $T = 100 \text{ }^\circ\text{C}$ y $T_a = 25 \text{ }^\circ\text{C}$. Se aplicó una variación de temperatura T en las anclas, mientras que en la flecha se aplica a T_a . Las dimensiones de la flecha son: $W_f = 15 \mu\text{m}$, $L_f = 160 \mu\text{m}$ y $t = 2 \mu\text{m}$. Las dimensiones de las anclas son: $W_a = 20 \mu\text{m}$, $L_a = 160 \mu\text{m}$ y $t = 2 \mu\text{m}$. El mayor desplazamiento de la flecha se obtuvo con la estructura de 16 brazos, la cual fue utilizada para realizar la variación angular y observar el efecto de este parámetro. Los resultados se muestran en la tabla 2. En este caso, el mayor desplazamiento de la flecha se obtuvo para el ángulo de inclinación con valor de 0.9° . Sin embargo, en la tabla 3 se observa que se tienen valores de fuerza y rigidez con un ángulo de inclinación de 4° .

Tabla 2. Desplazamiento de la flecha con variaciones angulares de los brazos

θ ($^\circ$)	U_y (m) SIMULADO	U_y (m) TEÓRICO	% ERROR
4	5.0753e-7	5.3447e-7	5.04
1	1.2382e-6	1.2853e-6	3.67
0.9	1.2508e-6	1.2987e-6	3.69
0.7	1.2258e-6	1.2732e-6	3.72
0.5	1.0877e-6	1.1301e-6	3.75

Tabla 3. Resultado de la fuerza y la rigidez por variación angular

θ ($^\circ$)	F_y (N) SIMULADO	F_y (N) TEÓRICO	K_{CH} SIMULADO	K_{CH} TEÓRICO	% ERROR F_y	% ERROR K_{CH}
4	1.541e-4	1.710e-4	303.75	320.06	9.88	5.01
1	3.969e-5	4.279e-5	32.06	33.3	7.24	3.72
0.9	3.574e-5	3.851e-5	28.6	29.7	7.19	3.7
0.7	2.78e-5	2.995e-5	22.72	23.5	7.04	3.32
0.5	1.993e-5	2.140e-5	18.32	18.9	6.9	3.07

Los resultados mostrados en las tablas 2 y 3 permiten la posibilidad de elegir el enfoque del estudio: obtener mayores desplazamientos u obtener mayor fuerza de actuación. Para este estudio nos enfocaremos en seguir modificando el dispositivo con la finalidad de obtener mayores desplazamientos, por lo que elegimos la estructura con el ángulo de inclinación de 0.9° .

3.2 Estructura chevron con reguladores de movimiento

Se implementaron los reguladores de movimiento con diferentes geometrías en los brazos del chevrón. En la tabla 4 se presentan todas las geometrías de los reguladores implementados, así como sus respectivos parámetros obtenidos de la simulación.

El rango de colores mostrados en las figuras 3-9 corresponde a: azul, mínimo desplazamiento, y rojo, máximo.

En la figura 4 la anchura lateral del brazo es de $3 \mu\text{m}$ y la anchura central es de $5.5 \mu\text{m}$. Las dimensiones de los reguladores rectangulares presentados en las figuras 5-6 son: $7.5 \mu\text{m} \times 30.02 \mu\text{m}$. En las figuras 7 y 8 son: $7.5 \mu\text{m}$ altura $\times 30.02 \mu\text{m}$ base. Las dimensiones del regulador rectangular usado en la figura 9 son de

Tabla 4. Estructuras chevron con 16 brazos

MODELO	DESPLAZAMIENTO DE LA FLECHA, U_y (m)	FUERZA DE ACTUACIÓN MÁXIMA F_y (N)	RIGIDEZ DEL CHEVRON K_{CH} (N/m)
Figura 3. Brazos uniformes sin regulador de movimiento: estructura convencional	865.5e-9	84.3 e-6	97.44
Fig. 4. Reguladores distribuidos	876.9e-9	87.3e-6	99.5
Figura 5. Regulador rectangular en la parte superior de cada brazo	876.9e-9	87.3e-6	99.59
Figura 6. Regulador rectangular en la parte inferior de cada brazo	873 e-9	86.6e-6	99.2
Figura 7. Regulador triangular en la parte inferior de cada brazo	874e-9	86.5e-6	99.1
Figura 8. Regulador triangular en la parte superior de cada brazo	874e-9	86.5e-6	99.1
Figura 9. Regulador rectangular simétrico en cada brazo	888.32e-9	94.1e-6	106

12 μm x 30.02 μm . En la tabla 4 puede observarse que el modelo presentado en la figura 9, con reguladores de movimiento rectangulares simétricos, presenta un ligero incremento en desplazamiento (2.5%), pero menor fuerza de actuación (10%) y rigidez (35.49%) comparado con la estructura chevron convencional.

4 COMPARACIÓN ENTRE EL CHEVRON CONVENCIONAL Y EL CHEVRON CON REGULADORES RECTANGULARES SIMÉTRICOS

En la tabla 5 se presenta la comparación entre los valores calculados utilizando las ecuaciones 6-9 [14-16] y los obtenidos mediante las simulaciones.

Masa:

$$m = \rho V \tag{6}$$

Frecuencia natural:

$$\omega_1 = 3.51563 \left(\sqrt{\frac{EI}{mL^3}} \right) \tag{7}$$

Tiempo de enfriamiento:

$$\tau_h = \frac{1}{\lambda_h} = \left(\frac{3\kappa}{\rho C_p L^2} \right)^{-1} \tag{8}$$

Tiempo de calentamiento:

$$\tau_c = \frac{1}{\lambda_c} = \left(\frac{\pi^2 \kappa}{4\rho C_p L^2} \right)^{-1} \tag{9}$$

Tabla 5. Valores calculados y obtenidos de la simulación

PARÁMETRO	CHEVRON SIN REGULADOR DE MOVIMIENTO	CHEVRON CON REGULADOR DE MOVIMIENTO		
Masa, valor calculado	8.5744e-11 kg	1.05889e-10 kg		
Masa, valor obtenido de simulación	8.5744e-11 kg	1.0603e-10 kg		
% error	0	-0.133		
	Modo	Frecuencia (Hz)	Modo	Frecuencia (Hz)
Modos y frecuencia natural, obtenidos de simulación	1	94761	1	91867
	2	1.4024e5	2	1.2878e5
	3	1.5272e5	3	1.31e5
	4	2.4151e5	4	1.9447e5
	5	2.8418e5	5	2.2591e5
Primera frecuencia natural (ω_1) modo 1, valor calculado	103 062 Hz	92 679.9 Hz		
% error	8.07	0.87		

Tabla 6. Tiempo de enfriamiento y calentamiento del dispositivo con una carga térmica

TIEMPO DE ENFRIAMIENTO, VALOR CALCULADO	1.7 milisegundos
TIEMPO DE CALENTAMIENTO, VALOR CALCULADO	1.4 milisegundos

El chevron con reguladores rectangulares de movimiento tiene una masa mayor (19.2%), y su primera frecuencia natural del primer modo es 10.073% más baja. En la figura 10 se presenta el desplazamiento obtenido con respecto a la frecuencia para ambos casos.

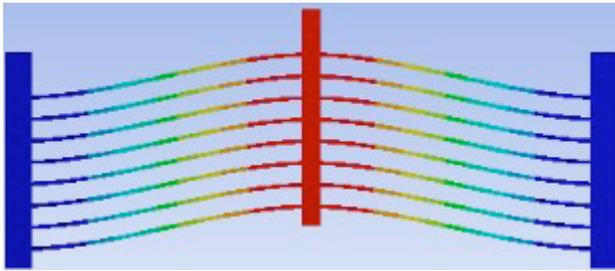


Figura 3. Brazos uniformes sin regulador de movimiento: estructura convencional

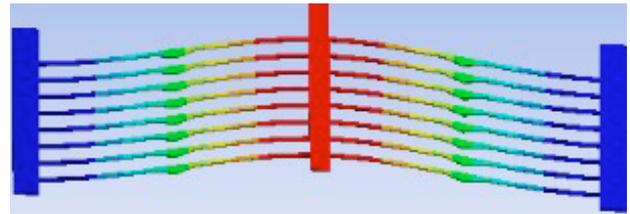


Figura 7. Regulador triangular en la parte inferior de cada brazo

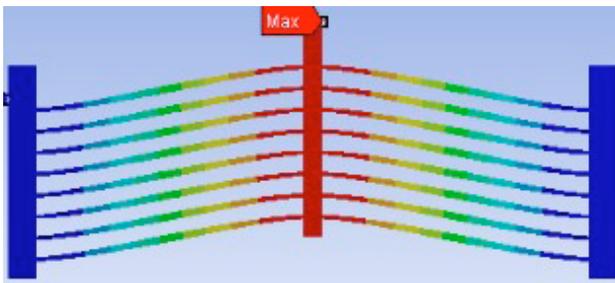


Figura 4. Reguladores distribuidos

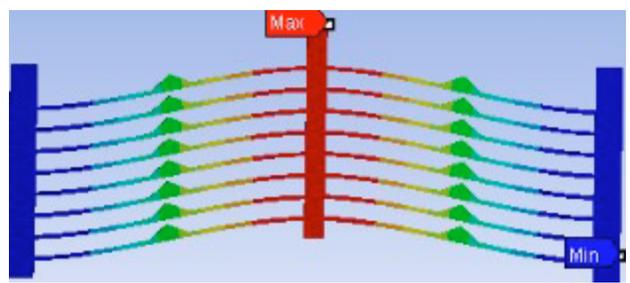


Figura 8. Regulador triangular en la parte superior de cada brazo

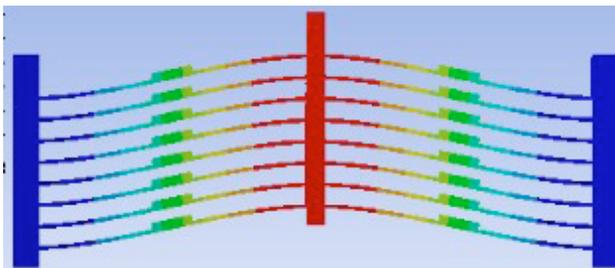


Figura 5. Regulador rectangular en la parte superior de cada brazo

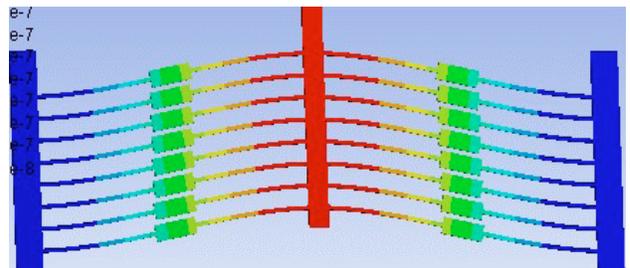


Figura 9. Regulador rectangular simétrico en cada brazo

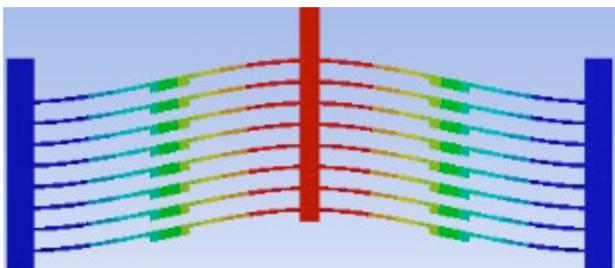


Figura 6. Regulador rectangular en la parte inferior de cada brazo

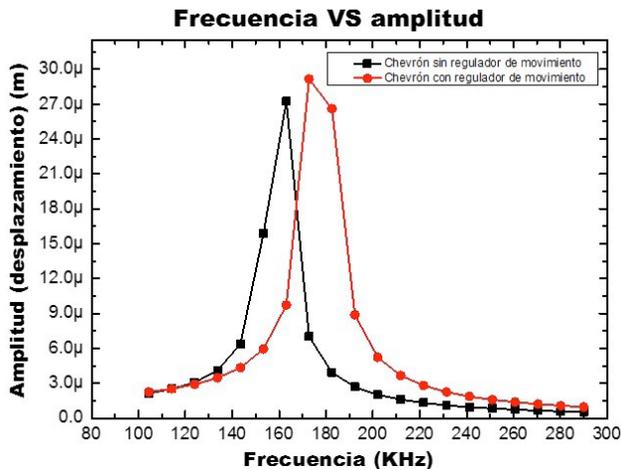


Figura 10. Desplazamiento obtenido en ambas estructuras con respecto a la frecuencia

5 CONCLUSIONES

Los resultados mostraron que la estructura chevron con reguladores rectangulares simétricos tiene un desplazamiento mayor en 2.5% con respecto al chevron convencional, con una primera frecuencia natural en el modo primero 10% menor. Además, su rigidez es 35.49% menor a la observada con el chevron convencional.

Del análisis de respuesta en frecuencia se observa que el dispositivo chevron con reguladores de movimiento rectangulares simétricos presenta un desplazamiento 10% mayor con respecto al caso de la estructura convencional; así como un corrimiento en la frecuencia de operación en aproximadamente 10 KHz.

Al implementar reguladores de movimiento al actuador chevron clásico, se obtiene un margen de error menor entre los resultados teóricos y simulados en todos los parámetros calculados, comparado con el caso de la estructura convencional.

6 NOMENCLATURA

L	Longitud de la barra o brazo del dispositivo (μm)
a	$L/2$ la mitad de la longitud de la barra (μm)
W	Ancho de la sección transversal de la barra (μm)
b	$(L/2)*0.15$, largo del regulador de movimiento (μm)
t	Espesor o grosor de la barra (μm)
δt	Ancho del regulador de movimiento del centro de la barra (μm)
θ	Ángulo de inclinación de la barra
I	Momento de inercia
F_y	Fuerza de actuación máxima en "Y" (N)
La	Longitud de las anclas (μm)
k_{CHV}	Rigidez del dispositivo chevron (N/m)
W_a	Ancho de las anclas (μm)
β	Coefficiente de expansión térmica del material
W_f	Ancho de la flecha (μm)
E	Módulo de Young del material
L_f	Longitud de la flecha
A	Área de la sección transversal de la barra ($W*t$)
τ_h	Tiempo de enfriamiento del dispositivo
T_a	Temperatura ambiente ($^{\circ}C$)
τ_c	Tiempo de calentamiento del dispositivo
T	Temperatura de alimentación ($^{\circ}C$)
ρ	Densidad del material
ΔT	Cambio de temperatura (T-Ta)
C_p	Capacidad calorífica o calor específico
N	Número de brazos
κ	Conductividad térmica del silicio
U_y	Desplazamiento de la flecha del dispositivo por una fuerza externa (μm)
V	Volumen (m^3)
S^2	$sen^2(\theta)$
Q	Factor de calidad
C^2	$cos^2(\theta)$
m	Masa (kg)

REFERENCIAS

1. Jain, N., Sharma, A., Kumar, S. Design and Simulation of Bidirectional In-Plane Chevron Beam Microtweezer. *International Journal of Emerging Technologies in Computational and Applied Sciences*. 2013, 3(1), 43-49.
2. Jain, N., Arora, D., Kumar, S. Effect of Residual Stress of Different Materials on Performance of Chevron Beam Actuator. *International Journal of Current Engineering and Technology*. 2013, 3(1).
3. Chen, Y. M., Sheppy, M. S., Hopcroft, M. A., Pisano, A. P., Mehta, R. V., Marcus, M. A., Hawkins, G. A. *Piezoelectric Actuators*. Patente número US2011/0107962 A1, United States Patent Application Publication, 2011.
4. Varona, J., Tecpoyotl-Torres, M., Hamoui, A. Design of MEMS vertical-horizontal chevron thermal actuators. *Sensors and Actuators A: Physical*. 2009, 153(1), 127-130.
5. Luo, J. K., Flewitt, A. J., Spearing, S. M., Fleck, N. A., Milne, W. I. Modelling of Microspring Thermal Actuator. *NSTI-Nanotech*. 2004, 1, 351-358.
6. Chen, Y. M., Sheppy, M. S., Yen, T. T., Vigevani, G., Lin, G. M., Kuypers, J., M., Hopcroft, M. A., Pisano, A. P. Bi-chevron aluminum nitride actuators for high pressure microvalves. *Proceedings of the Eurosensors XXIII Conference*. 2009, 1(1), 706-709.
7. Varona, J., Tecpoyotl-Torres, M., Hamoui, A. Modeling of MEMS thermal actuation with external heat source. *Electronics, robotics and automotive mechanics Conference 2007*. CERMA 2007, 591-596.
8. Missey, M., Pezeshki, B., Lang, R. J. *Tunable distributed feedback laser*. 2004, patente número US 6 754 243 B2, United States Patent.
9. Zhu, Y., Corigliano, A., Espinosa, H. D. A thermal actuator for nanoscale in situ microscopy testing: design and characterization. *Journal of Micromechanics and Microengineering*. 2006, 16 (2), 242-253.
10. Ando, B., Baglio, S., Savalli, N., Trigona, C. Cascaded Triple-Bent-Beam MEMS Sensor for Contactless Temperature Measurements in Nonaccessible Environments. *IEEE Transactions on Instrumentation & Measurement*. 2011, 60(4), 1348-1357.
11. Espinosa, H. D., Zhu, Y., Moldovan, N. Design and Operation of a MEMS-Based Material Testing System for Nanomechanical Characterization. *Journal of Microelectromechanical System*, 2007, 16(5), pp. 1219-1231.
12. Beeby, S., Ensell, G., Kraft, M., White, N. *MEMS Mechanical Sensors*. Boston: Artech House, 2004, p. 128.
13. Hernández, J. E., Valenzuela, V. M., Del Real, J. M., Mireles, Jr. J. Diseño, simulación, fabricación y comparación experimental de un micro-dinamómetro MEMS para la medición de fuerza de un actuador térmico. *Congreso Internacional de Ingeniería Electrónica. Memorias Electro*. 2013, 35, 226-231.
14. Sumali, H. Natural Frequencies and Mode Shapes of a Coupled Cantilever Array. Sandia National Laboratories. Distrito Federal: UNAM-IIMAS-FENOMECE, 2013. http://www.fenomec.unam.mx/mems_2013/ArrayModelSumali1.pdf
15. Ruiz-Aranda, J. *Vibraciones de elementos simples con condiciones de contorno dependientes del tiempo*. Tesis. 2010, Universidad Carlos III de Madrid, pp. 44-46.
16. Kaajakari, V. *Practical MEMS*. Small Gear Publishing, 2009, pp. 50-68, 251-261.

Acerca de los autores



Margarita Tecpoyotl-Torres es Licenciada en Matemáticas (1991) y Licenciada en Electrónica (1994) por la Benemérita Universidad Autónoma de Puebla (BUAP). Obtuvo los grados de Maestría y Doctorado en Ciencias en Electrónica por parte del Instituto Nacional de Astrofísica, Óptica y Electrónica (INAOE) en 1997 y 1999, respectivamente. Trabaja desde 1999 en el Centro de Investigación en Ingeniería y Ciencias Aplicadas (CIICAp) de la Universidad Autónoma del Estado de Morelos (UAEM), donde actualmente es profesora titular. Sus principales líneas de investigación incluyen MEMS, diseño de antenas, dispositivos de microondas, innovación y emprendimiento, además de interesarse por el desarrollo de programas educativos. Es miembro del Sistema Nacional de Investigadores SNI, desde 1999.



Pedro Vargas-Chablé es Licenciado en Ingeniería Eléctrica y Electrónica (2008) por parte de la Universidad Juárez Autónoma de Tabasco (UJAT). Obtuvo el grado de Maestría por parte del CIICAp, en 2012 y 2014. Actualmente estudia el Doctorado en Ingeniería y Ciencias Aplicadas en el mismo centro. Su línea de investigación abarca los sistemas microelectromecánicos (MEMS), principalmente el actuador electro térmico chevron y micropinzas.



Ramón Cabello-Ruíz es Ingeniero Mecánico (2007) por parte de la UAEM, México. Recibió el grado de Maestro en Ingeniería y Ciencias Aplicadas por parte del CIICAp en 2009. Actualmente estudia el Doctorado en Ingeniería y Ciencias Aplicadas en el CIICAp, además ha impartido clases en la Facultad de Ciencias Químicas e Ingeniería de la UAEM.



Miguel Angel Flores-González es Licenciado en Electromecánica (2010) por parte del Instituto Tecnológico de Zacatepec (ITZ). Obtuvo el grado de Maestro en Ingeniería y Ciencias Aplicadas por parte del CIICAp en 2015. Actualmente estudia en CIICAp para obtener el grado de Doctor. Sus líneas de investigación incluyen diseño de antenas y electrónica, además de interesarse por el diseño de semiconductores.