

Optimización geométrica de un MEMS tipo Hot-Arm

María Teresa Orvañanos Guerrero

Facultad de Ingeniería, Universidad Panamericana, Josemaría Escrivá de Balaguer #101, Fracc. Rústicos Calpulli, C.P. 20290, Aguascalientes, Ags., México
Teléfono: +52 (449) 9106200
torvananos@up.edu.mx

Jorge Varona Salazar

Facultad de Ingeniería, Universidad Panamericana, Josemaría Escrivá de Balaguer #101, Fracc. Rústicos Calpulli, C.P. 20290, Aguascalientes, Ags., México
Teléfono: +52 (449) 9106200
jvarona@up.edu.mx

Ramiro Velázquez Guerrero

Facultad de Ingeniería, Universidad Panamericana, Josemaría Escrivá de Balaguer #101, Fracc. Rústicos Calpulli, C.P. 20290, Aguascalientes, Ags., México
Teléfono: +52 (449) 9106200
rvelazquez@up.edu.mx

Resumen

Este artículo presenta la optimización experimental de la geometría de un actuador térmico MEMS tipo hot-arm. Empleando simulación numérica de la transferencia de calor y la expansión mecánica que ocurre en la microestructura, se evalúan diferentes parámetros de diseño y características geométricas con la finalidad de ilustrar el impacto de dichas variables en la distribución térmica y sobre todo en el rendimiento del actuador. Para fundamentar el análisis se presentarán algunos modelos analíticos existentes y las técnicas propuestas para el estudio y diseño de actuadores térmicos.

Mediante el uso de herramientas computacionales, el presente trabajo de investigación muestra la utilidad del empleo de análisis por elemento finito aplicado en particular a la

transferencia de calor para determinar las dimensiones más adecuadas en la arquitectura de un dispositivo. La técnica presentada en este artículo puede ser aplicada en forma general a la optimización del diseño de cualquier otro dispositivo MEMS ya existente o incluso para la creación de nuevos dispositivos.

Palabra(s) Clave(s): hot-arm, MEMS, método de elemento finito, optimización, simulación numérica.

1. Introducción

Las siglas MEMS vienen del inglés *Micro-Electro-Mechanical Systems*, es decir Sistemas Micro-Electro-Mecánicos. Se trata de pequeños dispositivos o sistemas que combinan componentes tanto eléctricos como mecánicos.

Los MEMS han sido considerados como una de las tecnologías más prometedoras para el siglo XXI y su empleo en productos de uso diario ha permitido mejoras considerables en los mismos.

Entre las ventajas que pueden considerarse en el empleo de MEMS, es posible mencionar el amplio rango de aplicaciones que van desde las comerciales hasta las militares, además de que permiten acoplar con mayor simplicidad los sistemas de sensores y actuadores a los circuitos electrónicos, reduciendo así su costo e incrementando su confiabilidad.

En el campo de los MEMS se han desarrollado gran cantidad de actuadores que van desde los electrostáticos [1], electromagnéticos [2] y piezoeléctricos [3] hasta las aleaciones con memoria de forma SMA (Shape Memory Alloy) [4], polímeros electroactivos [5] y fluidos electroreológicos [6].

Una característica relevante de los MEMS es que las tecnologías de fabricación de estos dispositivos son compatibles con los procesos de fabricación de circuitos integrados, lo cual hace posible el desarrollo de microsistemas complejos.

Con base en las investigaciones realizadas, es posible afirmar que en escalas microscópicas, es más sencillo producir campos eléctricos y que dichos campos produzcan algún efecto en pequeños dispositivos como respuesta a las fuerzas electrostáticas.

Este artículo presenta una optimización geométrica experimental de un actuador MEMS tipo hot-arm con el objeto de lograr un actuador que al presentar un aumento de temperatura en una de sus anclas responda presentado la mayor deflexión posible, de manera que dicho movimiento pudiese ser utilizado posteriormente para la generación de pequeñas cantidades de energía que sea almacenada en otro tipo de MEMS. Los parámetros a optimizar son:

- Longitud de la flexura
- Ancho del brazo frío
- Longitud total del actuador
- Separación entre las vigas
- Ancho de los brazos
- Ancho del conector

El resto del artículo está organizado de la siguiente forma: en la sección 2 se presenta una revisión conceptual de los dos tipos de actuadores MEMS más utilizados: cantilever y hot-arm; en la sección 3 se presenta el modelo matemático de un actuador tipo hot-arm y se lleva a cabo el desarrollo de la optimización geométrica del mismo de acuerdo a los parámetros mencionados; en la sección 4 se discuten los resultados obtenidos y finalmente la sección 5 concluye el trabajo retomando los conceptos principales y las perspectivas de trabajo futuro.

2. Desarrollo

El primer MEMS desarrollado con el propósito de ayudar al procesamiento de una señal de microondas fue el llamado Cantilever, posteriormente en 1992 Guckel et al. propusieron un actuador electro-térmico llamado hot-arm cuyo diseño ha sido empleado

en gran variedad de sistemas micro-mecánicos [7]. Dichos actuadores son descritos a continuación.

2.1. Cantilever

El actuador electrostático más básico, debido a su simplicidad, es la barra Cantilever en su configuración tradicional y en barra doblemente soportada.

Una primera aproximación del Cantilever fue diseñada por Petersen [8]. Este actuador tenía la forma de una varilla compuesta por una membrana aislante, cubierta de metal delgado ($0.35 \mu\text{m}$) y se encontraba fija en uno de sus lados a un sustrato (Figura 1).

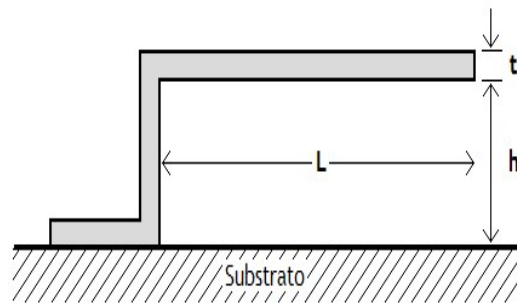


Fig. 1. Actuador Cantilever típico.

Al aplicar un voltaje entre el silicio p+ en la base y la parte superior de la viga, el actuador experimenta una fuerza de atracción distribuida a lo largo de la viga, que lo jala hacia abajo hasta que se genera un contacto eléctrico que descarga la energía electrostática.

Existe una variación del actuador Cantilever tradicional, que consiste en soportar la estructura por ambos extremos, permitiendo que la parte superior actúe a manera de membrana (Figura 2).

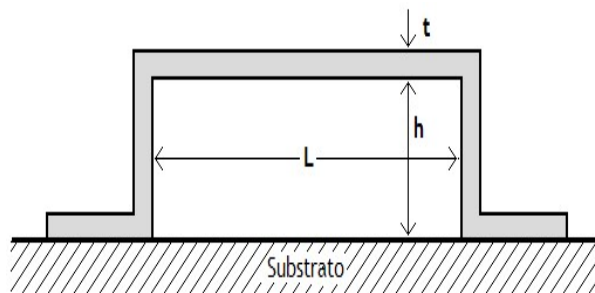


Fig. 2. Actuador Cantilever soportado por ambos extremos.

2.2. Hot-arm

Un hot-arm es un tipo de actuador MEMS formado por dos brazos asimétricos. La figura 3 muestra la geometría de este actuador.

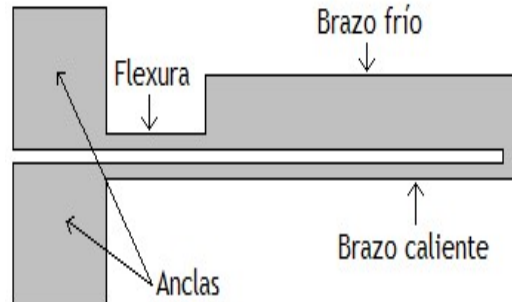


Fig. 3. Geometría del actuador hot-arm.

Cuando una diferencia de potencial eléctrico se aplica entre las anclas del actuador, se produce una corriente que circula a través de los brazos, provocando en ellos un calentamiento debido al efecto de Joule. La geometría asimétrica del actuador ocasiona que uno de los brazos sufra un calentamiento mayor (brazo caliente), en tanto que el otro presentará un menor incremento en su temperatura (brazo frío). A su vez, el incremento en la temperatura provoca una expansión térmica (mayor en el brazo caliente), que ocasionará una deflexión en el actuador [9] (Figura 4).

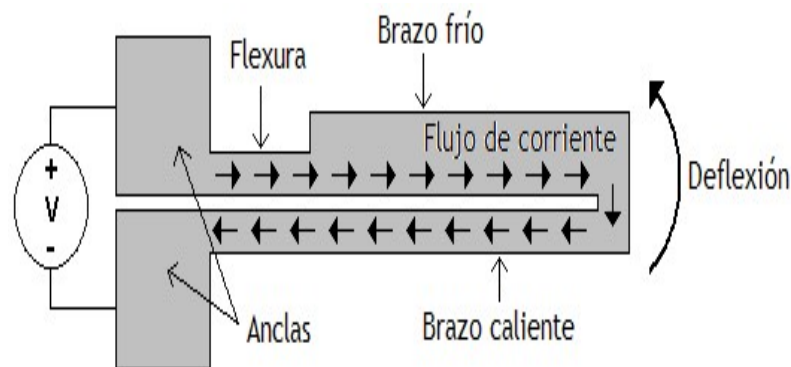


Fig. 4. Funcionamiento del actuador hot-arm.

3. Desarrollo

3.1. Modelo matemático

Considere un sistema en equilibrio térmico definido por la ecuación (1):

$$\rho cV \frac{dT}{dt} = Q_s - Q_{conducción} - Q_{convección} - Q_{radiación} \quad (1)$$

Donde Q_s es el calor generado por fuentes externas, ρ corresponde a la densidad del material, c es el calor específico, V es el volumen del material y T es la temperatura en un tiempo t .

Considerando que las temperaturas que se manejan en este tipo de actuadores son relativamente bajas, el calor que se pierde por radiación $Q_{radiación}$ puede ser despreciado y el calor que se pierde por conducción $Q_{conducción}$ puede despreciarse también debido a que se trata de un metal.

Dado que:

$$Q_{convección} = hS(T - T_e) \quad (2)$$

En donde T_e corresponde a la temperatura ambiental, h es el coeficiente de intercambio de calor y S representa el área superficial, la ecuación (1) puede ser escrita como:

$$\rho cV \frac{dT}{dt} = Q_s - hS(T - T_e) \quad (3)$$

De la solución de la ecuación (3) se obtiene una expresión que describe la temperatura en función del tiempo:

$$T(t) = \begin{cases} T_e + \frac{Q_s}{hS} (1 - e^{-at}) & (\text{calentamiento}) \\ T_e + (T_o - T_e)e^{-at} & (\text{enfriamiento}) \end{cases} \quad \text{con } a = \frac{hS}{\rho cV} \quad (4)$$

Donde a es la constante de tiempo térmica y T_o es la temperatura inicial del actuador al principio de proceso de enfriamiento.

La expansión térmica ΔL se encuentra dada por:

$$\Delta L = K^{-1}AE\alpha\Delta t \quad (5)$$

Donde K es el coeficiente de rigidez, A es el área de sección transversal, E corresponde al módulo de Young, $\Delta T = (T_o - T_e)$, σ representa el estrés térmico y α es el coeficiente de expansión térmica del material.

La expansión térmica de cada uno de los brazos puede ser obtenida a través del cálculo de la integral a lo largo de la estructura de cada brazo:

$$\Delta L = \alpha \int_0^L (T_o - T_e) dx \quad (6)$$

Utilizando alguno de los métodos de cálculo de estructuras se puede estimar la deflexión que sufrirá el actuador en función de su expansión térmica calculada en la ecuación (6).

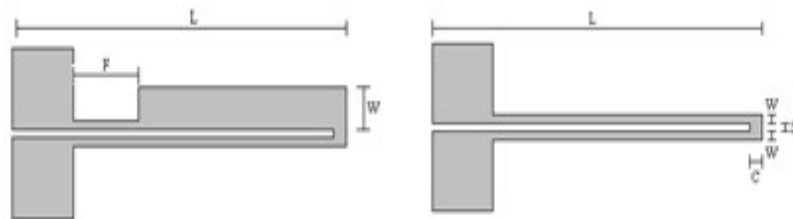


Fig. 5. Parámetros en la geometría del actuador tipo hot-arm.

Sin embargo al aplicar la ecuación (6) para el cálculo de la expansión térmica, es necesario considerar el cambio en la geometría del brazo caliente del actuador (debido a su cambio de grosor en el extremo), de ahí que el análisis se vuelve más complejo. Es por ello que el presente artículo expone los resultados de simulaciones en el sistema computacional ANSYS al variar los parámetros L , F , W , C y S (Figura 5).

3.2. Restricciones

Se realizaron varias simulaciones del desempeño de un actuador MEMS tipo hot-arm con la finalidad de probar cuáles son las dimensiones más adecuadas para obtener una mayor deflexión cuando un flujo de calor constante es aplicado a una de las anclas del actuador, para ello fue necesario aplicar restricciones al brazo modelado.

El ancla correspondiente al brazo caliente se sometió a un flujo de calor de 10 W/cm^2 (Figura 6). Con el fin de generar un flujo térmico entre las anclas, la correspondiente al

brazo frío se determinó a una temperatura fija de 30 °C, que en la realidad es proporcionada por el substrato (Figura 7).

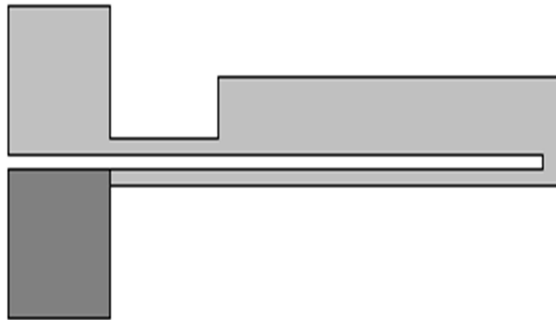


Fig. 6. Superficie en la que se aplicó un flujo de calor.

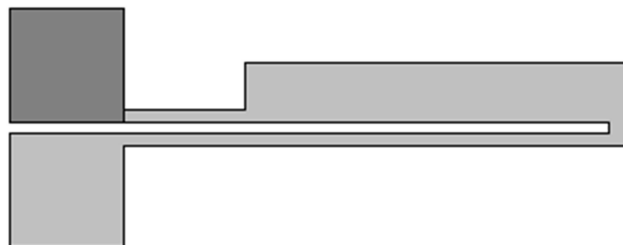


Fig. 7. Superficie en la que se aplicó una temperatura constante.

Ambas anclas en su parte inferior se encuentran fijas al substrato de tal forma que no es posible que sufran desplazamiento en ninguno de los ejes **X**, **Y** o **Z** (Figura 8).

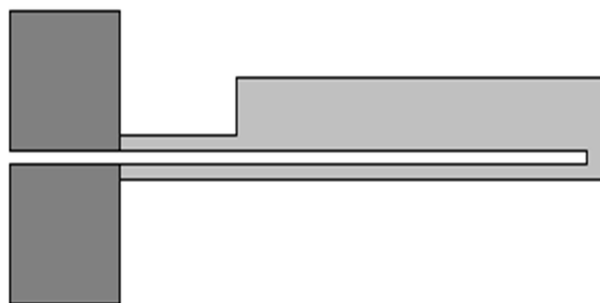


Fig. 8. Superficies que tienen restringido el movimiento en X, Y y Z.

3.3. Optimización de la longitud y el ancho del brazo frío

Los primeros parámetros a optimizar fueron **F** (longitud de la flexura) y **W** (ancho del brazo frío) (Figura 9).

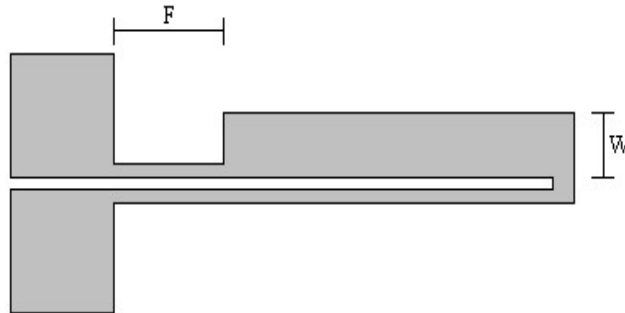


Fig. 9. Parámetros a variar en el brazo frío.

En la tabla 1 se pueden apreciar los resultados obtenidos en las simulaciones con los diferentes valores probados para el ancho del brazo frío. Las figuras 10 y 11 muestran los resultados en cuanto a las máximas temperaturas y las deflexiones obtenidas alcanzadas al variar el ancho del brazo frío. Se puede apreciar que al disminuir el ancho del brazo frío, la temperatura máxima se incrementa y la deflexión aumenta moderadamente, lo cual indica en este análisis preliminar que para los parámetros propuestos, es posible eliminar el brazo frío como tal, estableciendo la variable **W** como 2 μm .

Ancho W (μm)	Máxima Temperatura ($^{\circ}\text{C}$)	Máxima Deflexión y (μm)
20 μm	91.899	0.6972
15	87.966	0.5325
10	94.918	0.7031
5	101.388	0.6935
2	121.359	0.786

Tabla 1. Resultados al variar el ancho del brazo frío.

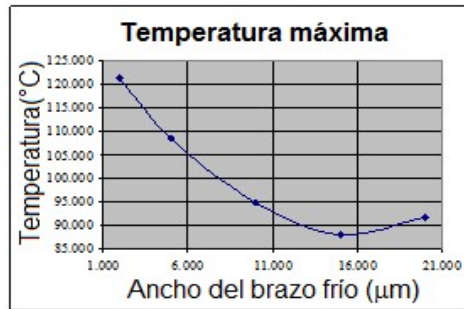


Fig. 10. Temperatura en relación con la variación del ancho del brazo frío.

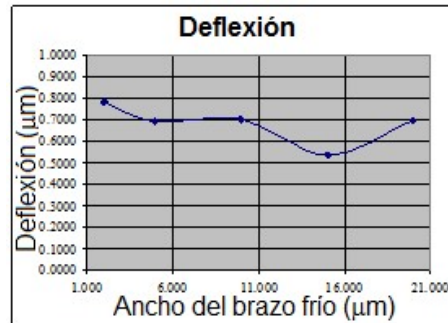


Fig. 11. Deflexión en relación con la variación del ancho del brazo frío.

A pesar de que en esta configuración ambos brazos (el brazo frío y el caliente) tienen el mismo ancho, uno de ellos se calienta más debido a la naturaleza de la conducción del calor, haciendo que dicho brazo sufra una mayor expansión térmica provocando así la deflexión.

Con la finalidad de determinar la necesidad de mantener la asimetría en el brazo frío, o bien de considerar un cambio en la geometría del actuador hot-arm original, es necesario analizar los resultados de variación en la longitud de la flexura del actuador MEMS tipo hot-arm (Tabla 2).

Longitud de la flexura (μm)	Temperatura Máxima ($^{\circ}\text{C}$)	Deflexión (μm)
20 μm	87.966 $^{\circ}\text{C}$	0.5325 μm
40 μm	96.593 $^{\circ}\text{C}$	0.7211 μm
60 μm	100.338 $^{\circ}\text{C}$	0.7325 μm
80 μm	104.081 $^{\circ}\text{C}$	0.7390 μm

Tabla 2. Resultados al variar la longitud de la flexura.

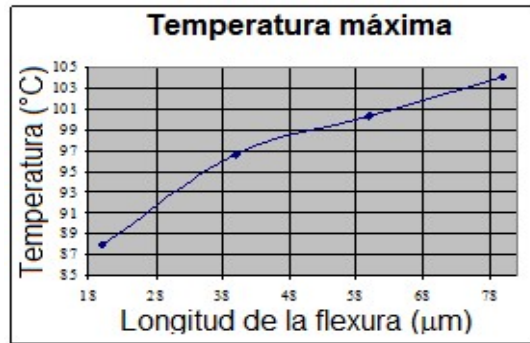


Fig. 12. Temperatura en relación con la variación de la longitud de la flexura.

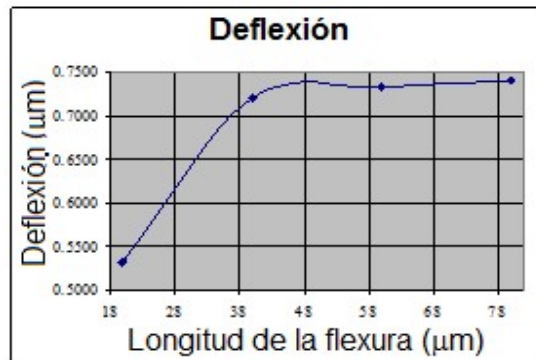


Fig. 13. Deflexión en relación con la variación de la longitud de la flexura.

Es posible apreciar que conforme la longitud de la flexura aumenta, la temperatura máxima alcanzada en el actuador se incrementa (Figura 12). De forma similar, al aumentar la longitud de la flexura, la deflexión también se incrementa (Figura 13). Si se continúa aumentando la longitud de la flexura, se llegará a un punto en el cual el brazofrío desaparece totalmente quedando una geometría igual a la empleada en las últimas simulaciones en las que se varió el ancho del brazo frío **W** hasta alcanzar un valor óptimo de 2 μm .

Al comparar la deflexión obtenida con el aumento de la longitud de la flexura hasta 80 μm (0.786 μm) con la deflexión obtenida al disminuir el ancho del brazo frío hasta 2 μm (0.7390 μm), es posible notar que para optimizar el desempeño del actuador es más conveniente eliminar totalmente el brazo frío y no solamente aumentar la longitud de la flexura, de ahí que el primer cambio geométrico realizado al actuador tipo hot-arm original, se muestra en la figura 14.

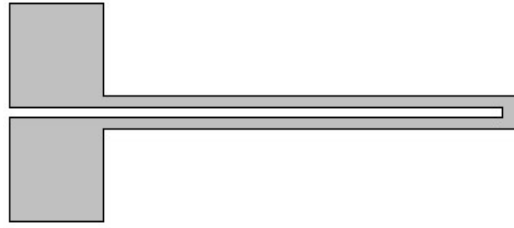


Fig. 14. Geometría optimizada propuesta para el nuevo actuador.

3.4. Optimización de la longitud del nuevo actuador

La figura 15 muestra el parámetro L a optimizar en esta sección.

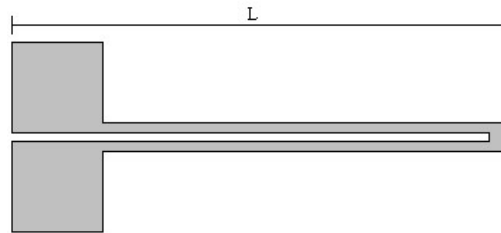


Fig. 15. Medida de la longitud del actuador optimizado.

En la tabla 3 se presentan los resultados numéricos al variar la longitud del actuador.

Longitud (μm)	Temperatura máxima ($^{\circ}\text{C}$)	Deflexión (μm)
286 μm	121.359 $^{\circ}\text{C}$	0.7860 μm
306 μm	130.017 $^{\circ}\text{C}$	1.0180 μm
326 μm	138.636 $^{\circ}\text{C}$	1.2940 μm
366 μm	155.927 $^{\circ}\text{C}$	1.9830 μm
446 μm	190.483 $^{\circ}\text{C}$	4.0190 μm
546 μm	233.686 $^{\circ}\text{C}$	8.0780 μm
746 μm	320.087 $^{\circ}\text{C}$	22.0980 μm
1046 μm	449.688 $^{\circ}\text{C}$	68.3910 μm
2046 μm	881.686 $^{\circ}\text{C}$	562.5360 μm

Tabla 3. Resultados al variar la longitud del actuador.

En las figuras 16 y 17 se muestran los resultados de temperatura máxima y deflexión en relación con la longitud del actuador tipo hot-arm.

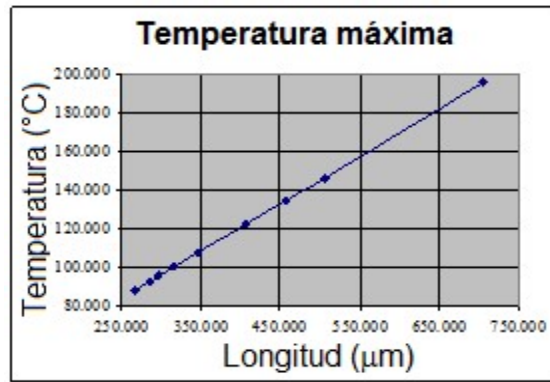


Fig. 16. Temperatura en relación con la variación de la longitud del hot-arm.

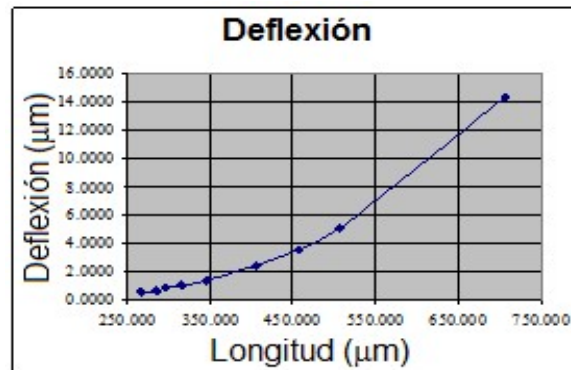


Fig. 17. Deflexión en relación con la variación de la longitud del hot-arm.

Analizando los resultados anteriores es fácil comprobar que, entre mayor sea la longitud del actuador tipo hot-arm, la temperatura máxima se incrementa, lo cual provoca también un incremento en la deflexión. Sin embargo, a pesar de que la deflexión aumenta, el torque que el brazo es capaz de producir disminuye en relación inversa a la longitud del hot-arm, es por ello que se decidió mantener la longitud del brazo en 286 μm , no obstante, dependiendo de la aplicación concreta que se le dé al actuador, será posible variar este parámetro.

3.5. Optimación de la separación entre las vigas del nuevo actuador

El siguiente parámetro analizado fue la separación entre las vigas **S** (figura 18), el valor típico para dicho parámetro es de 2 μm .

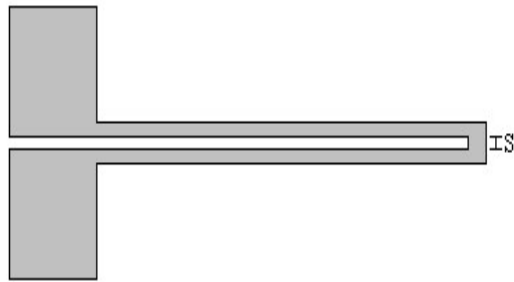


Fig. 18. Medida de la separación entre brazos del actuador.

En la tabla 4 se muestran los resultados numéricos al variar la separación entre las vigas del actuador. En la figura 19 se observa que, a pesar de los cambios en la separación, la variación en la temperatura máxima alcanzada es muy pequeña, sin embargo los cambios en la deflexión obtenida son notorios, tal como puede observarse en la figura 20.

Separación S (μm)	Temperatura máxima ($^{\circ}\text{C}$)	Deflexión (μm)
1 μm	121.27 $^{\circ}\text{C}$	0.9852 μm
2 μm	121.359 $^{\circ}\text{C}$	0.7860 μm
3 μm	121.479 $^{\circ}\text{C}$	0.6494 μm
5 μm	121.681 $^{\circ}\text{C}$	0.4789 μm
12 μm	122.292 $^{\circ}\text{C}$	0.2490 μm

Tabla 4. Resultados al variar la separación entre las vigas.

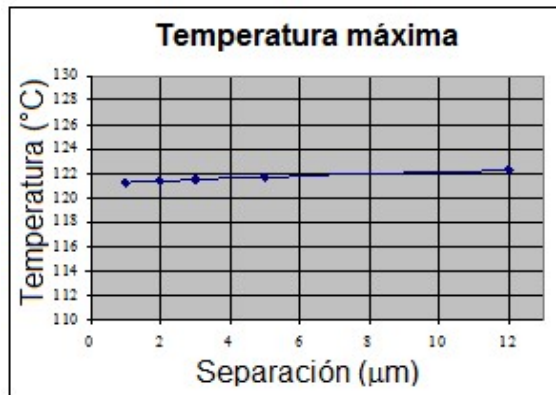


Fig. 19. Temperatura en relación con la variación de la separación de los brazos del hot-arm.

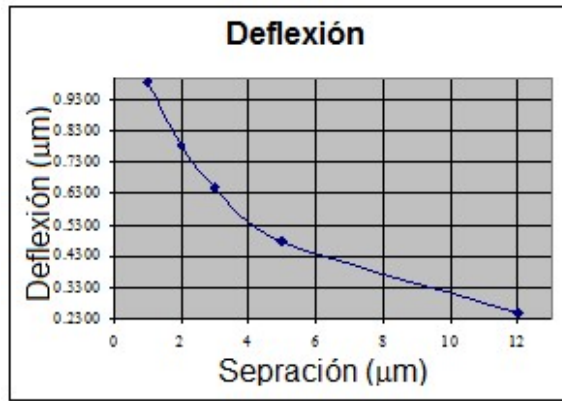


Fig. 20. Deflexión en relación con la variación de la separación de los brazos del hot-arm.

Analizando los resultados es posible observar que entre mayor sea la separación entre las vigas, el gradiente de temperatura entre la parte inferior y superior será mayor. En consecuencia la temperatura máxima alcanzada por el brazo caliente será menor que la que podría alcanzarse si la separación fuese más pequeña y hubiera una menor caída de temperatura en ese tramo. Cuanto más cercanas estén las vigas entre sí, la deflexión obtenida será mayor, por lo tanto los mejores resultados se obtienen cuando las vigas están tan cerca una de otra como sea posible, sin embargo, a pesar de que se obtienen mejores resultados utilizando una separación de $1 \mu\text{m}$, esta precisión no puede lograrse en la realidad debido al proceso de manufactura empleado. Es por ello que la separación elegida entre las vigas será de $2 \mu\text{m}$.

3.6. Optimación del ancho de los brazos del nuevo actuador

El siguiente parámetro a analizar fue el ancho de los brazos o vigas **W** (Figura 21).

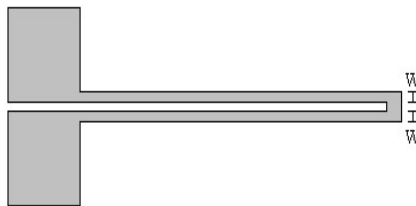


Fig. 21. Medida del ancho de los brazos del actuador optimizado.

En la tabla 5 se pueden observar los resultados obtenidos en las simulaciones al variar el ancho de los brazos del actuador. En la figura 22 y figura 23 se aprecian las variaciones de temperatura y deflexión en relación con el ancho de los brazos del actuador tipo hot-arm analizado.

Ancho de las vigas (μm)	Temperatura máxima ($^{\circ}\text{C}$)	Deflexión (μm)
1 μm	210.477 $^{\circ}\text{C}$	2.179 μm
2 μm	121.359 $^{\circ}\text{C}$	0.7860 μm
3 μm	91.595 $^{\circ}\text{C}$	0.4076 μm
4 μm	76.689 $^{\circ}\text{C}$	0.2502 μm
6 μm	61.724 $^{\circ}\text{C}$	0.1234 μm

Tabla 5. Resultados al variar el ancho de los brazos del actuador.

Puede notarse que entre menor sea el ancho de los brazos del actuador, el incremento de la temperatura será mayor y por lo tanto habrá también una mayor deflexión. La medida óptima sería 1 μm o menos, sin embargo, como ya se explicó con anterioridad, debido al proceso de fabricación, resulta imposible lograr un trabajo preciso con menos de 2 μm , de ahí la necesidad de conservar el espesor en 2 μm .

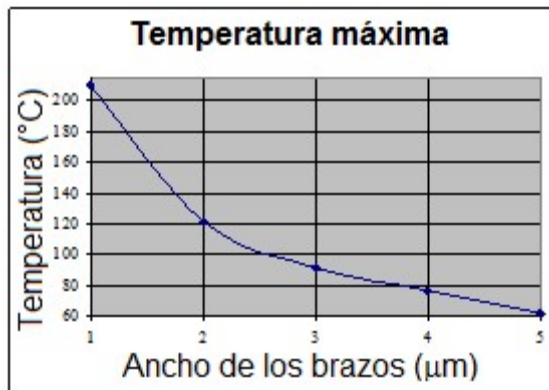


Fig. 22. Temperatura en relación con la variación del ancho de los brazos.

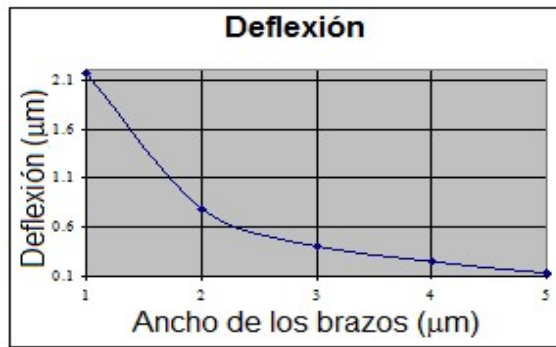


Fig. 23. Deflexión en relación con la variación del ancho de los brazos.

3.7. Optimización del ancho del conector del nuevo actuador

El último parámetro en ser analizado fue el ancho del conector en la punta del actuador, este parámetro puede observarse en la figura 24.

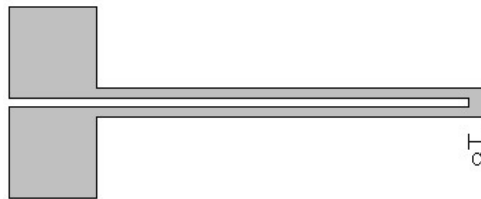


Fig. 24. Medida del ancho del conector en la punta del actuador optimizado.

En la tabla 6 se muestran los resultados numéricos obtenidos al variar el ancho del conector en la punta del nuevo actuador con valores desde 2 μm hasta 15 μm.

En las figuras 25 y 26 se presentan las gráficas de las temperaturas máximas alcanzadas y las deflexiones obtenidas en relación con los diferentes anchos en el conector de la punta del nuevo actuador, respectivamente.

Ancho del conector (μm)	Temperatura máxima (°C)	Deflexión (μm)
2 μm	122.861 °C	0.7978 μm
5 μm	121.359 °C	0.7860 μm
8 μm	120.078 °C	0.7756 μm
15 μm	117.032 °C	0.7504 μm

Tabla 6. Resultados al variar el ancho del conector en la punta del actuador.

Observando estos resultados se puede notar que las deflexiones mayores se obtienen utilizando un ancho de conector en la punta del actuador con un valor tan pequeño como sea posible, se sabe que el mínimo valor que permite el proceso para fabricación de un MEMS es de $2\ \mu\text{m}$, de ahí que se decidió utilizar dicho valor para **C**.

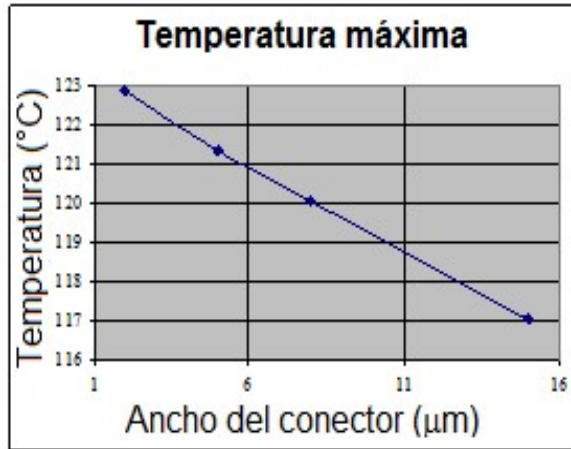


Fig. 25. Temperatura en relación con la variación del ancho del conector de la punta.

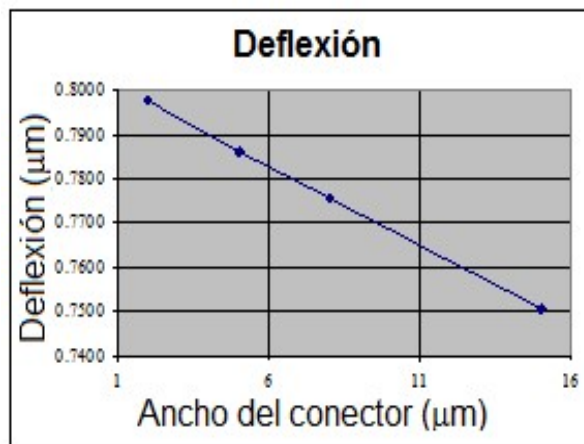


Fig. 26. Deflexión en relación con la variación del ancho del conector de la punta.

3.8 Geometría optimizada

Con base en todas las simulaciones realizadas se definió que la geometría optimizada para un actuador térmico tipo hot-arm es la que se muestra en la figura 27.

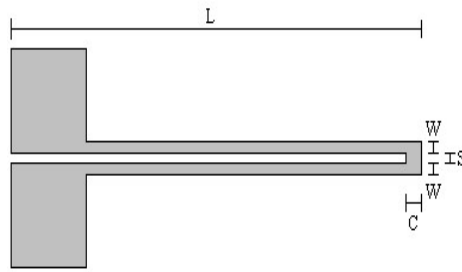


Fig. 27. Geometría optimizada para el nuevo actuador térmico.

Los mejores resultados se obtuvieron al utilizar las medidas: $L=286 \mu\text{m}$, $W=2 \mu\text{m}$, $S=2\mu\text{m}$ y $C= 2\mu\text{m}$ [10].

4. Discusión

Para probar que la geometría optimizada experimentalmente presentará mejores resultados que la geometría de un actuador MEMS tipo hot-arm tradicional al someterlo un flujo de calor, se aplicó un flujo de 15 W/cm^2 a ambos actuadores. El actuador tipo hot-arm tradicional alcanzó una temperatura máxima de $123 \text{ }^\circ\text{C}$ y una deflexión de $0.99 \mu\text{m}$ (figura 28). Por su parte el actuador con la geometría optimizada alcanzó una temperatura de $167 \text{ }^\circ\text{C}$ y una deflexión de $1.18 \mu\text{m}$ (figura 29). Puede apreciarse que la deflexión obtenida con el actuador optimizado es 19% mayor que la deflexión obtenida en el actuador tipo hot-arm sin optimizar.

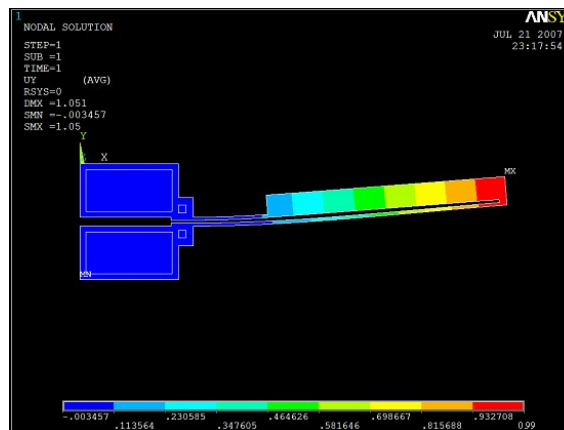


Fig. 28. Deflexión del hot-arm tradicional al activarlo mediante un flujo de calor.

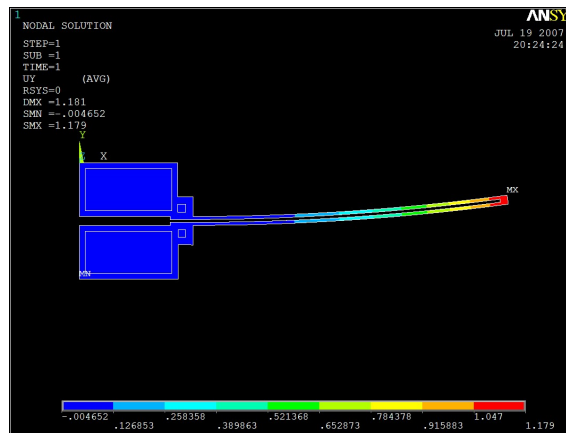


Fig. 29. Deflexión del actuador optimizado al activarlo mediante un flujo de calor.

5. Conclusiones

Se ha demostrado que a partir del análisis de simulaciones de elemento finito, es posible optimizar la geometría de un actuador MEMS para obtener un desplazamiento mecánico útil al excitarlo mediante una fuente de calor externa. Este método de optimización puede aplicarse tanto para geometrías existentes como para el desarrollo de nuevos dispositivos micrométricos.

El actuador desarrollado presenta aplicaciones potenciales en cualquier medio en el que se cuente con un gradiente de temperatura aun cuando no se cuente con una fuente de energía eléctrica convencional.

Los resultados en ANSYS son lo suficientemente alentadores como para justificar la fabricación de los prototipos de manera que puedan realizarse pruebas reales. Mediante la fabricación del actuador descrito en la presente investigación sería posible corroborar la precisión de las simulaciones y analizar las discrepancias que se presenten, puesto que en el campo de MEMS es común que los resultados varíen significativamente (más del 50%) respecto a los resultados obtenidos en simulaciones, por lo que para obtener un prototipo final, completamente funcional, se requiere de un proceso iterativo de diseño y fabricación.

6. Referencias

- [1] W. Chuang, H. Lee, P. Chang, Y. Hu, "Review on the modeling of electrostatic MEMS". *Sensors*. Vol. 10. 2010. 6149-6171 pp.
- [2] J. Getpreecharsawas, I. Puchades, B. Hournbuckle, L. Fuller, An electromagnetic MEMS actuator for micropumps, *Proc. of International Conference on Perspective Technologies and Methods in MEMS Design*. 2006. 11-14 pp.
- [3] S. Tadigadapa, K. Mateti, "Piezoelectric MEMS sensors: state-of-the-art and perspectives". *Measurement Science and Technology*. Vol. 20. No. 9. 2009.
- [4] R. Velázquez, M. Hafez, E. Pissaloux, J. Szewczyk, "A computational-experimental thermomechanical study of shape memory alloy microcoils and its application to the design of actuators, *Journal of Computational and Theoretical Nanoscience*". Vol. 3. No. 4. 2006. 538-550 pp.
- [5] R. Kornbluh, R. Pelrine, H. Prahald, R. Heydt, Electroactive polymers: An emerging technology for MEMS, In: *MEMS/MOEMS Components and their Applications*. 2004. S. W. Janson Ed. *Proceedings of Spie*. 13-27.
- [6] N. Vandelli, D. Wroblewski, M. Velonis, T. Bifano, "Development of a MEMS microvalve array for fluid flow control", *Journal of Microelectromechanical Systems*. Vol. 7. No. 4. 2002. 395-403 pp.
- [7] H. Guckel, J. Klein, T. Christenson, K. Skrobis, M. Laudon, E. Lovell, Thermo-magnetic metal flexure actuators. *Solid State Sensors and Actuators Workshop*. 1992. 73-75 pp.
- [8] K. Petersen, "Silicon as a mechanical material". *Proc. of the IEEE*. Vol. 70. No. 5. 1992. 420-457 pp.
- [9] E. Kolesar, T. Htun, B. Least, J. Tippey, "Design and performance comparison of single- and double-hot arm polysilicon surface micromachined electrothermal

actuators and arrays applied to realize a microengine". 8th IEEE Conference on Nanotechnology. 2008. 444-447 pp.

- [10] M. T. Orvañanos, Diseño y optimización geométrica de un actuador térmico MEMS. 2008. Tesis de Maestría en Ciencias, Universidad Panamericana.

7. Autores

MC. María Teresa Orvañanos Guerrero es Ingeniera en Electrónica y Sistemas Digitales con especialidad en Robótica por la Universidad Panamericana, campus Bonaterra. Estudió su maestría en Ciencias en esta misma universidad realizando investigaciones en MEMS. Actualmente estudia su doctorado en esta misma universidad, en donde a su vez es jefa de la carrera de Ingeniería en Electrónica y Sistemas Digitales y se desempeña como profesora/investigadora.

Dr. Jorge Varona Salazar es Ingeniero en Electrónica y Sistemas Digitales por la Universidad Panamericana campus Bonaterra, Maestro en Ciencias por la Universidad de Toronto en el 2002 y Doctor en Ingeniería por la Universidad Autónoma del Estado de Morelos (UAEM) en el 2009. Actualmente es director del Centro de Diseño México de Semtech y profesor adjunto de la Universidad Panamericana. También es miembro del Consejo Asesor del Consorcio Mexicano de Microsistemas (CMM), miembro grado "Senior" del IEEE (Institute of Electrical and Electronics Engineers) y miembro del Sistema Nacional de Investigadores (Nivel 1).

Dr. Ramiro Velázquez Guerrero es Ingeniero en Electrónica y Sistemas Digitales por la Universidad Panamericana campus Bonaterra, Maestro en Ciencias por el INSA de Lyon (Francia) y Doctor en Robótica por la Universidad Pierre et Marie Curie (Francia). Actualmente es profesor/investigador y Director de la Facultad de Ingeniería en la Universidad Panamericana Campus Bonaterra. Es miembro del Sistema Nacional de Investigadores (Nivel 1).