

MICROACELERÓMETRO MEMS, DISEÑO, ANÁLISIS ESTRUCTURAL Y ELECTROSTÁTICO

MEMS MICROACCELEROMETER, DESIGN, STRUCTURAL AND ELECTROSTATIC ANALYSIS

José Luis González Vidal

Universidad Autónoma del Estado de Hidalgo
jlvidal@uaeh.edu.mx

Daniel Hernández Moedano

Universidad Autónoma del Estado de Hidalgo
dhmoedano@gmail.com

Francisco Morales Jiménez

Universidad Autónoma del Estado de Hidalgo
ciscofran@gmail.com

Juan José Raygoza Panduro

Universidad de Guadalajara
juan.raygoza@cucei.udg.mx

Resumen

En ese trabajo se describe el diseño de un microacelerómetro de bajo consumo de potencia con tecnología MEMS; se obtuvo un microacelerómetro de 159 μm x 109 μm . Se realizó un mesh por el método de elementos finitos, para su análisis estructural y electrostático, esto con el software COMSOL MULTIPHYSICS 5.1, para comprobar su eficiencia y buen funcionamiento. Debido a que es un sensor de movimiento inercial tipo capacitivo, su principal aplicación es en los disparadores de bolsas de aire de automóviles; el cual podría impactar en la industria automotriz y de consumo.

Palabra(s) Clave: MEMS, microacelerómetro, mesh, sensor capacitivo, sensor inercial.

Abstract

This paper describes the design of a low power consumption micro-accelerometer with MEMS technology; the dimensions of microaccelerometer computed were

159x109 μm , a mesh was obtained by the finite element method, for its structural and electrostatic analysis, this with the COMSOL MULTIPHYSICS 5.1 software, to verify its efficiency and good performance. The main application of microaccelerometers is in automobile airbag triggers, which could impact the automotive and consumer industries.

Keywords: *Capacitive sensor, Inertial sensor, MEMS, mesh, microaccelerometer.*

1. Introducción

Los primeros trabajos, en los cuales se realizó el grabado de materiales, se reportaron a mediados de los años 60 del siglo pasado [Nathanson y Wickstrom, 1965], dichos grabados se empezaron a utilizar para construir pequeños sistemas micromaquinados con partes móviles, por medio de las técnicas de grabado y eliminación de materiales utilizadas en la fabricación de circuitos integrados electrónicos; principalmente el grabado de silicio. Dando lugar a lo que posteriormente se conoció como sistemas microelectromecánicos (MEMS), Se puede entender que un MEMS es un sistema de ingeniería que contiene diminutos componentes, diseñados para realizar una función específica. [Bassous, 1978], [Nathanson y Wickstrom, 1965], [González, 2006], [Petersen, 1982], [Zhang y otros, 2017], [Khan y Shanmuganatham, 2017], [Beeby, Ensell, Kraft y White, 2004], [Basuwaqi y otros, 2017], [Maluf y Williams, 2004], [Vijay, 2006], [Wu y otros, 2017]. Con respecto a la aplicación de los MEMS, la mayoría de los automóviles cuentan con disparadores de las bolsas de aire, pero poca gente sabe que este disparador es un microacelerómetro, por lo que, es posiblemente la aplicación comercial más exitosa y famosa de los microacelerómetros. Desde el punto de vista mecánico, los microacelerómetros son sensores inerciales, los cuales detectan el cambio de velocidad de un vehículo y envían una señal eléctrica para que se infle la bolsa de aire. Desde el punto de vista eléctrico, los microacelerómetros son sensores capacitivos. La gran ventaja, es que se realiza una misma acción consumiendo una mínima fracción de la energía, son extremadamente veloces y precisos, pueden integrarse con electrónica convencional y permiten fabricar sensores de alta

resolución y ocupan un espacio muy reducido. [Kittali, Sheeparamatti y Sheeparamatti, 2017], [Kuncar, Sysel y Urbanek, 2017], [Lee y otros, 2005].

El principio básico de funcionamiento de un acelerómetro, como su nombre lo dice, es la medición del cambio de velocidad con respecto al tiempo, ésta puede realizarse cuantificando la fuerza necesaria para acelerar un objeto de masa conocida, por medio de un sistema de resortes unidos a dicha masa y una escala para cuantificar el movimiento (figura 1). [Beeby, Ensell, Kraft y White, 2004], [Lu y Yeh, 2017], [Marra y otros, 2018], [Khan y Shanmuganatham, 2017], [Zhang y otros, 2017].

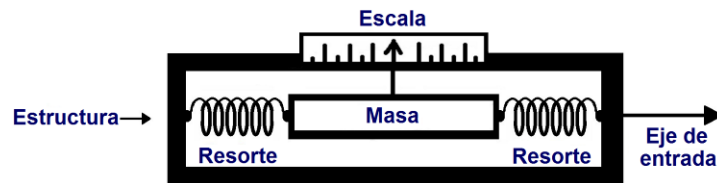


Figura 1 Modelo físico en que se basa el funcionamiento de acelerómetros integrados.

Para determinar el sistema del acelerómetro, el cual está basado en el sistema masa-resorte, se establece que, la deformación $x(t) - y(t)$ del resorte, siendo $x(t)$ desplazamiento del objeto vibrante, $y(t)$ al desplazamiento de la masa m del sistema, se busca una relación entre esta deformación y la aceleración a ; se tiene que f es la fuerza aplicada por el resorte a la masa (ecuación 1).

$$f = ma \quad (1)$$

Considerando que g es la aceleración gravitacional, la ecuación 1 se puede representar mediante la ecuación 2.

$$f = mg \quad (2)$$

Es bien conocido que la ecuación 2 puede ser representado por la ecuación 3.

$$m\ddot{y} + ky = kx \quad (3)$$

Este análisis matemático se encuentra muy bien explicado en la literatura.

Para el caso de la geometría, la más usada se muestra en la figura 2, siendo esta base para la serie ADXL** de empresa Analog Devices, el cual consta de un peine central, sujeto sólo a unos muelles rectangulares elásticos, anclados en cada uno de los extremos, de la cual emergen las vigas, mismos que actúan como placas centrales de capacitores diferenciales, junto con las vigas situadas en las partes superior e inferior de la figura 2, las partes negras representan las anclas, cuadros que fijan la estructura al sustrato. La masa de dicho modelo corresponde a la masa del peine y de las vigas, la constante elástica (k) a la elasticidad de los muelles representadas en (3) [Hernández, 2009], [Analog, 2018], [Rana y Kaur, 2016], [Nevludov, Yevsieiev, Bortnikova y Miliutina, 2017].

Considerando que se trata de un sensor capacitivo, se puede considerar la deformación en una variación de capacitancia, que puede medirse eléctricamente con (4) [Petersen, 1982], [Khan y Shanmuganatham, 2017], [Beeby, Ensell, Kraft y White, 2004], [Basuwaqi y otros, 2017], [Maluf y Williams, 2004], [Vijay y Varadan, 2006], [Kittali, Sheeparamatti y Sheeparamatti, 2017], [Hernández, 2009], [Hayt, Kemmerly y Durbin, 2011], [Shahbaz y otros, 2017].

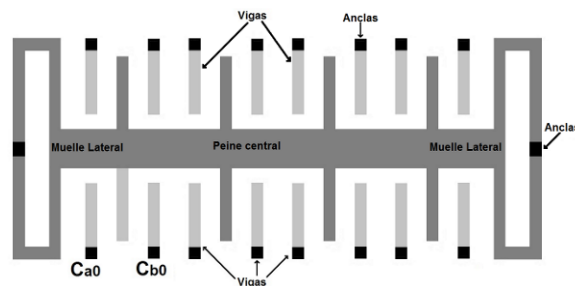


Figura 2 Geometría estándar de un acelerómetro.

Este diseño se realizó también considerando los parámetros eléctricos del dispositivo, debido a que su funcionamiento es igual a un capacitor de placas paralelas, el cual está formado por dos conductores planos de superficie S separados por una distancia d entre los que se establece una diferencia de potencial, $+Q$ y $-Q$ representan las cargas en cada placa, E el campo eléctrico y A el área de la superficie (figura 3). La capacidad de un condensador de placas paralelas depende su geometría, área y distancia, teniendo así la ecuación 4.

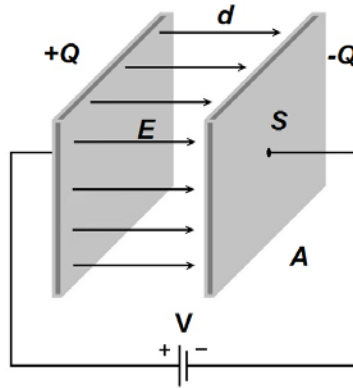


Figura 3 Geometría de un capacitor de placas paralelas.

$$C = \epsilon_0 \frac{A}{d} \quad (4)$$

Dónde ϵ_0 es la permitividad del vacío ($8.8541 \times 10^{-12} C^2/Nm^2$), A es el área de las placas que forman el capacitor y d es la distancia de separación entre ellas. Si se toma la distancia de separación entre placas mucho más pequeña que el área de las mismas ($d \ll \sqrt{A}$), así mismo, en ecuación 4 se desprecia el efecto de borde y se considera que el campo eléctrico en el interior del capacitor es constante [Hernández, 2009], [Hayt, Kemmerly y Durbin, 2011], [Rashid, 2001], [Shahbaz y otros, 2017], [Rana y Kaur, 2016], [Nevludov, Yevsieiev, Bortnikova y Miliutina, 2017], [Lui y otros, 2018], [Dhineshkaarathi, Preeth y Kumar, 2017].

Por otra parte, el análisis por elementos finitos es un método utilizado en la simulación de un amplio rango de aplicaciones de ingeniería, debido a que es muy adecuado para la solución de ecuaciones diferenciales con condiciones de frontera conocidas y, es capaz de realizar el análisis de geometrías complejas, por medio de su división en un número finito de elementos con una forma más simple. Cada elemento se define por las características más relevantes del problema que se quiere resolver, considerando las condiciones de frontera y obteniendo los valores de nodos de cada función del elemento en particular. Después se consideran el equilibrio entre cada elemento y las condiciones de frontera globales y se representan por un conjunto de ecuaciones simultáneas, las cuales conforman una matriz muy compleja que puede ser resuelta por una computadora [Hernández,

2009], [Kittali, Sheeparamatti y Sheeparamatti, 2017], [Kuncar, Sysel y Urbanek, 2017], [Lu, 2017], [Nevludov yevsieiev, Bortnikova y Miliutina 2017], [Rana y Kaur, 2016], [Shahbaz y otros, 2017], [Vijay y Varadan, 2006], [Wu y otros, 2017], [Zhang y otros, 2017].

2. Métodos

Se desarrolló una estructura tipo microacelerómetro, como la que se muestra en la figura 4, la cual corresponde a un acelerómetro de tipo capacitivo interdigitado, en el cual, la masa inercial está constituida por las barras azules con dimensiones de $3 \times 48 \mu\text{m}$, con la variación de la distancia entre placas capacitivas y un muelle de barra simple (en amarillo) en cada extremo, además, con dimensiones de $3 \times 100 \mu\text{m}$, además, las barras fijas (en rojo y verde) que se encuentran en las partes superior e inferior, se encuentran aisladas eléctricamente de la masa inercial, y tienen dimensiones de $1.6 \times 50 \mu\text{m}$.

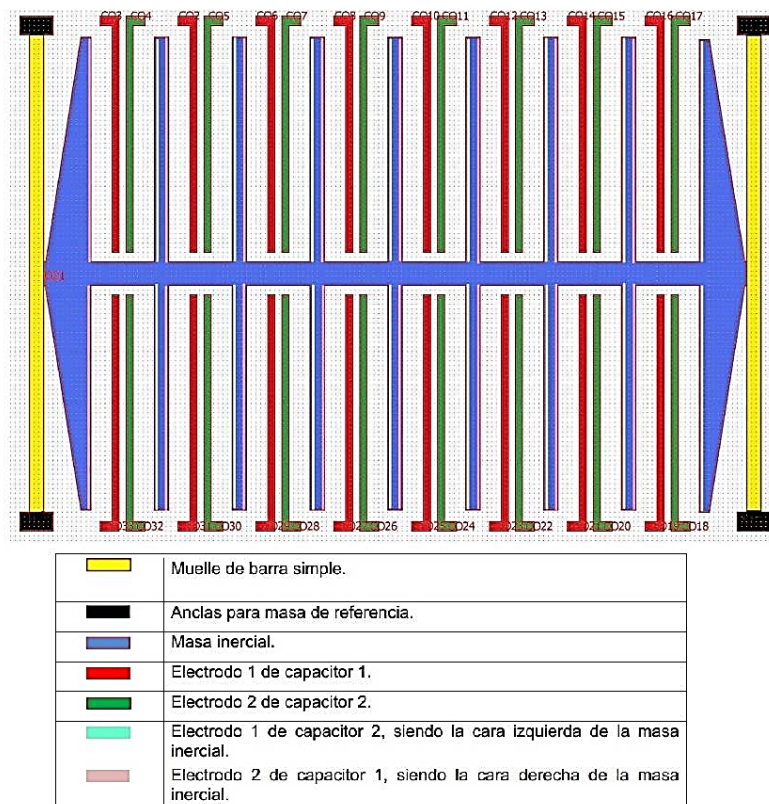


Figura 4 Acelerómetro MEMS capacitivo con muelle en forma de barras simples.

El diseño fue desarrollado con el programa COMSOL MULTIPHYSICS 5.1. Donde la masa inercial constituye una de las placas de los capacitores variables $C_1(16\text{ nF})$ y $C_2(16\text{ nF})$, además de la terminal de salida. Las barras fijas rojas, constituyen la otra placa paralela de capacitor C_1 (siendo la terminal más positiva) y están interconectadas entre sí; las barras verdes constituyen la otra placa paralela de capacitor C_2 y también se encuentran interconectadas entre sí (constituyen la parte más negativa del sistema), esto con el fin de formar un capacitor variable con la masa inercial. El capacitor $C_3(43\text{ nF})$, está conformado por la capacitancia intrínseca entre cada una de las barras fijas (en rojo y verde); la figura 5 representa el circuito capacitivo equivalente.

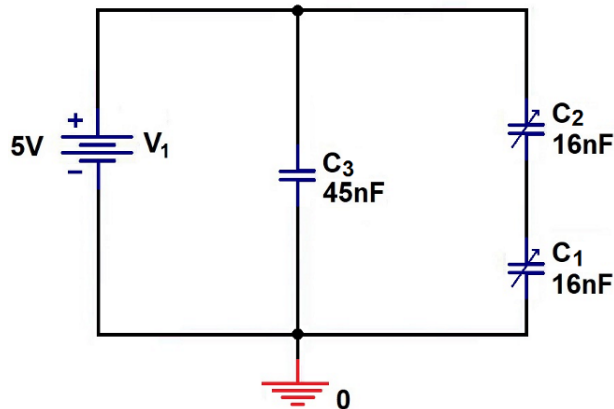


Figura 5 Circuito capacitivo equivalente.

Los muelles en forma de barra simple (en amarillo), se encuentran unidos a los extremos de la masa inercial(en azul), al igual los muelles están sujetos a sus extremos por unas anclas (en negro) a una masa de referencia, éstos tienen la función de proporcionar soporte mecánico a la mencionada masa, de tal forma que cuando la masa inercial se desplaza sobre el eje x, su deformación es proporcional a la aceleración aplicada, después de cierto tiempo, el sistema regresa a su estado estable, debido a este efecto, los capacitores C_1 y C_2 se consideran capacitores variables; la simulación del movimiento de la masa inercial en presencia de una aceleración positiva o negativa. La potencia disipada por el dispositivo es de 138 pW. La tabla 1 resume las características del microacelerómetro diseñado.

Tabla 1 Características generales del acelerómetro interdigitado de la figura 13.

Propiedad	Magnitud	Unidades
Masa	185	Mg
Constante de resorte k	$1.4e^{-6}$	N/m
Capacitancia C_1	16	(nF)
Capacitancia C_2	16	(nF)
Capacitancia C_3	45	(nF)
longitud en X	159	μm
Longitud en Y	109	μm
Longitud en Z	20	μm
Potencia disipada	138	pW

3. Resultados

Una vez diseñado microacelerómetro, se procedió su análisis estructural y electroestático. En la figura 6 se muestra los puntos donde las partes móviles del sistema presentan mayor esfuerzo mecánico, la magnitud de dicho esfuerzo está definida por las líneas en forma de ondas, cuya equivalencia se encuentra en la parte derecha de la figura 6; este esfuerzo es producido por el desplazamiento de sus partes móviles (figura 7), este comportamiento obedece a la mecánica newtoniana, donde cualquier masa se opone a los cambios de movimiento en ella, esto es, si está en reposo tratará de permanecer en reposo hasta que alguna fuerza cambie este estado, si se encuentra en movimiento tratará de permanecer en movimiento hasta que alguna fuerza cambie este estado.

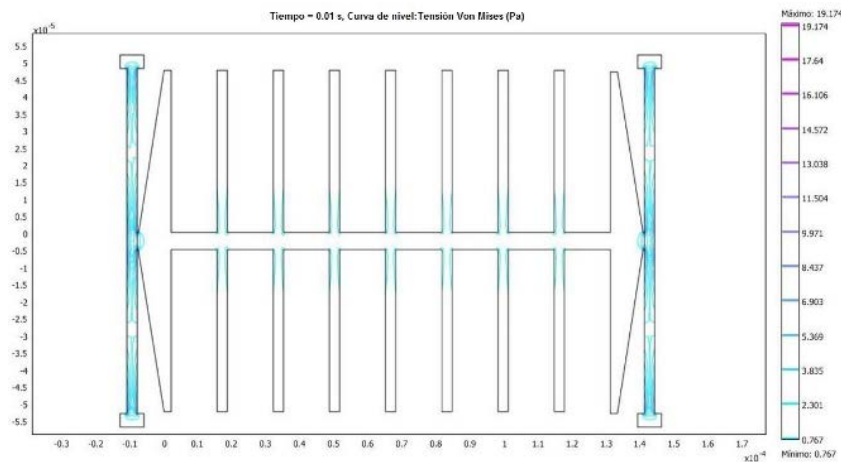


Figura 6 Esfuerzos mecánicos del material.

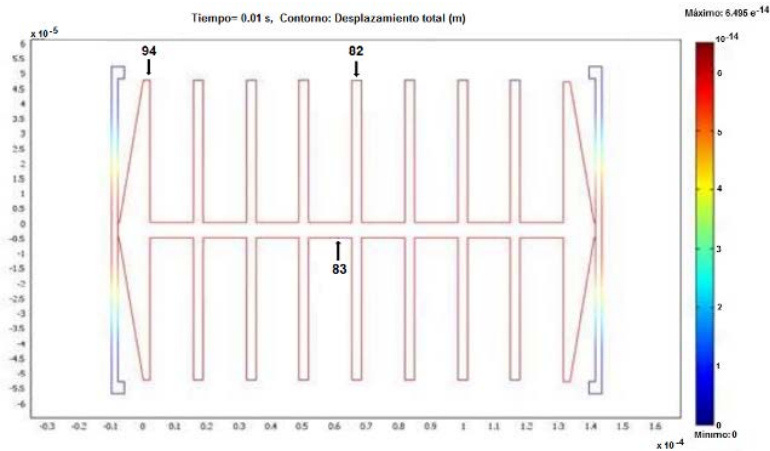


Figura 7 Desplazamiento de la masa inercial.

En la gráfica de la figura 8, se puede observar el fenómeno mencionado y la reacción de este sistema cuando se aplica una fuerza, ésta es aplicada como una aceleración sobre el eje de las ordenadas y su forma de onda obedece a un escalón, tomando en cuenta que el sistema está en reposo y que la aceleración es positiva.

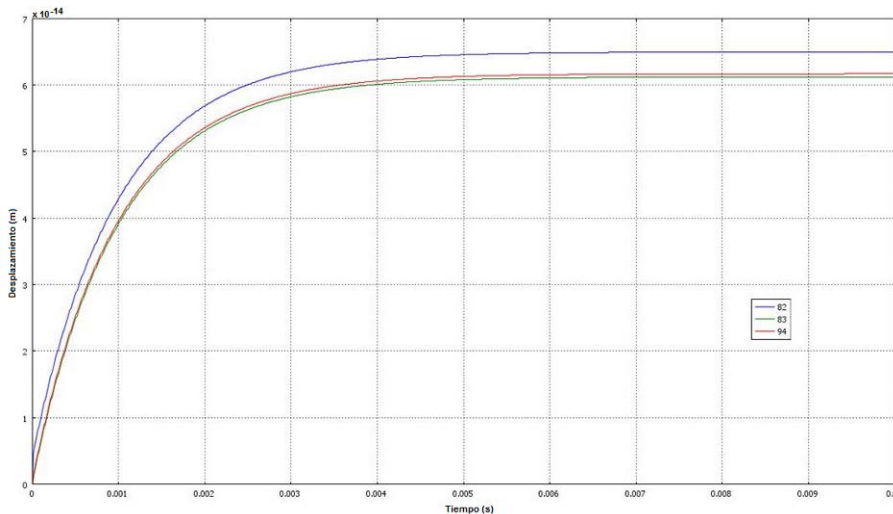


Figura 8 Comportamiento del sistema de masa inercial.

En figura 7, el desplazamiento total del sistema, pero de igual manera se muestran los puntos de los cuales se obtuvieron los datos de desplazamiento para la gráfica de la figura 8; en esta gráfica se toman solo tres puntos (82, 83 y 93) como muestra representativa del comportamiento del sistema, esto es debido a que el análisis por

elementos finitos, que es el tipo de simulación que se lleva a cabo para este sistema genera alrededor de 18,088 elementos de arista, esto significa que para el análisis, la geometría mecánica del sistema es fraccionada (meshing) en más de 18,000 partes tal como se muestra en la figura 9.

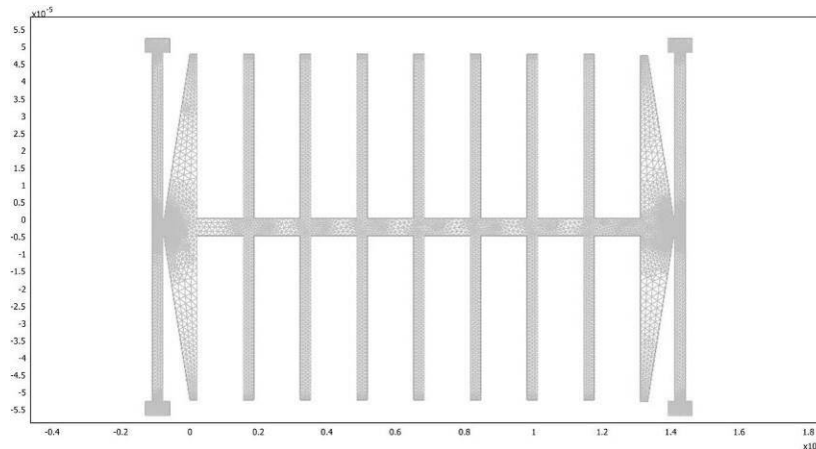


Figura 9 Geometría mecánica fraccionada (meshing) del sistema.

La distribución electrostática está ilustrada en la figura 10, en ella se puede observar más a detalle el voltaje que existe en la geometría y, en cada uno de los puntos designados por la malla de elementos finitos; además se anexan al análisis, las partes fijas a la masa de referencia como lo son los electrodos, también se coloca un cuadro alrededor de la geometría, este representa el gas en el que se encuentra contenido el acelerómetro, en este caso es aire.

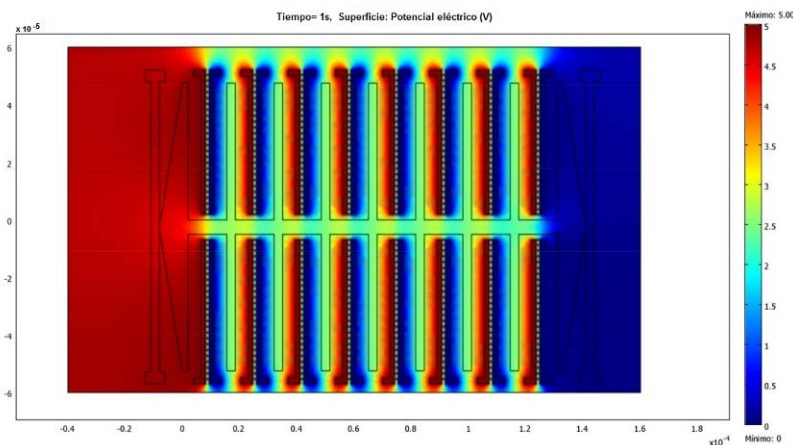


Figura 10 Distribución electrostática.

La gama de colores que presenta la figura 10 corresponden a un valor de voltaje cuya escala se muestra en el extremo derecho, en ésta, la masa inercial se encuentra en reposo, dicho de otra manera la masa inercial y la masa de referencia poseen la misma aceleración, así pues la distribución electrostática es uniforme dentro de la simulación, donde la terminal positiva son las barras rojas internas en la geometría, la parte negativa las barras internas en azul, donde estos colores representan los dos extremos del valor voltaico que se aplica directamente de la batería, la masa inercial nos representa el electrodo de salida y el valor de interés como salida es el de su parte media, representado con un color verde azulado y que indica un valor aproximado de entre 2 y 2.5 V; aun cuando la masa inercial se encuentra en la parte central de los electrodos su valor no es medio, esto se debe a que el campo electrostático en el aire, con condiciones normales decrece con el cuadrado de su distancia esto con base en la ley de coulomb.

En la gráfica de la figura 11 se muestra más a detalle el comportamiento de la carga electrostática en la masa inercial, en esta se puede ver que tiene un comportamiento cuadrático, aun cuando el desplazamiento de la masa es de apenas 6.49×10^{-14} m, existe una variación de 30 mV.

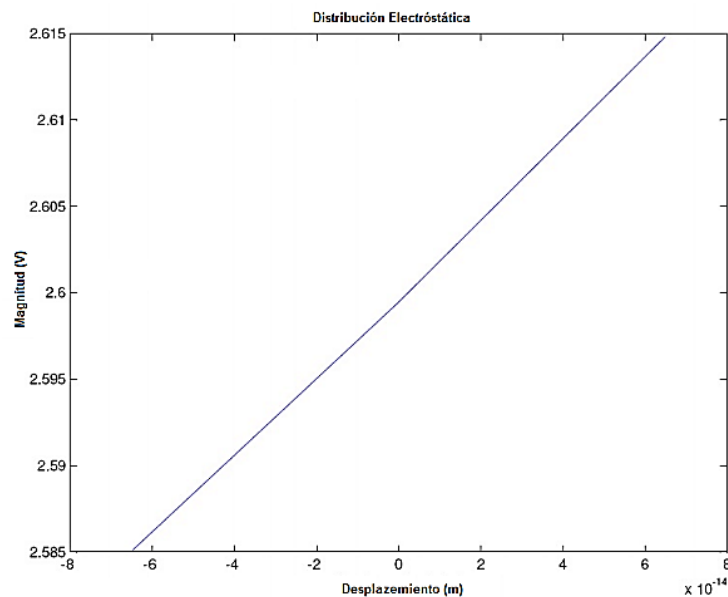


Figura 11 Distribución electrostática de la masa inercial sometida a una aceleración positiva y negativa de 70 g.

4. Discusión

El acelerómetro diseñado tipo capacitivo interdigitado, tiene la característica principal de que sus componentes están dispuestas para que varíe la distancia entre las placas capacitivas y un muelle de barra simple anchado en los extremos; Se desarrolló con el software COMSOL MULTIPHYSICS 5.1 y se le realizó un mesh, el cual arrojó un sistema fraccionado de 18,000 partes para su análisis por el método de elementos finitos, la simulación de los esfuerzos mecánicos de la figura 6 y del desplazamiento que se muestra en la figura 7, denota la flexibilidad del sistema; para el caso del desplazamiento de la masa inercial en este caso se indicaron los puntos 82, 83 y 93 y el tiempo en que alcanza la estabilidad figura 8. Por último, el análisis electrostático realizado a la estructura del acelerómetro, demuestra que es la mencionada distribución electrostática se distribuye de manera uniforme y gradual de izquierda a derecha (figura 10), donde el color rojo indica la parte más positiva y la región azul, la parte más negativa, dicha distribución de color se aplica para las barras del dispositivo.

5. Conclusiones

Por sus características los MEMS han ocupado un lugar clave en la industria automotriz y de consumo. Principalmente su aplicación como microsensors interdigitado tipo capacitivo. En este caso el microacelerómetro de $159 \times 109 \mu\text{m}$, donde los muelles de barra simple (en amarillo) miden $3 \times 50 \mu\text{m}$ cada una; las barras azules miden $3 \times 48 \mu\text{m}$. y las barras fijas rojas y verdes miden $1.6 \times 50 \mu\text{m}$ cada una. La potencia disipada por el dispositivo es de 138 pW, esta potencia es muy pequeña debido a las dimensiones del dispositivo y, se encuentra debajo de los valores reportados en la literatura. El microacelerómetro se analizó desde el punto de vista estructural y electrostático, debido a que es un sensor capacitivo, con variación de distancia entre placas. Se realizaron experimentos con distancia variable tipo barra simple y se observó que es de fácil caracterización y estructura sencilla, sin embargo, nos proporciona un rango limitado de movimiento, esto debido a su geometría y las propiedades del material; la simulación arrojó un mesh de 18,088

elementos. Para el análisis de estas microestructuras se realizaron simulaciones con el programa COMSOL MULTIPHYSICS 5.1.

6. Bibliografía y Referencias

- [1] Analog Devices (2018). <http://www.analog.com> (Analog Devices) <http://www.analog.com/en/products/sensors-mems/accelerometers.html>.
- [2] Bassous, E. (1978). Fabrication of Novel Three Dimensional Microstructures by the Anisotropic Etching of (100) and (110) Silicon. *EEE Transactions on Electron Devices*, 25(10), pp. 1178-1185. doi:10.1109/T-ED.1978.19249.
- [3] Basuwaqi, A., Khir, M. H., A. Y. Ahmed, A., Rabih, A. S., Mian, M. U. y Dennis, J. O. (2017). Effects of Frequency and Voltage on the Output of CMOS-MEMS Device. 2017 IEEE Asia Pacific Conference on Postgraduate Research in Microelectronics and Electronics (PrimeAsia). Kuala Lumpur, Malasia: IEEE. doi:10.1109/PRIMEASIA.2017.8280361.
- [4] Beeby, S., Ensell, G., Kraft, M. y White, N. (2004). *MEMS Mechanical Sensors*. Norwood, MA, EE.UU., Artech House, Inc.
- [5] Dhineshkaarthi, K., Preeth, S. L. y Kumar, R. (2017). MEMS Cantilever Based Identification of Carcinogenic MZN. 2017 International Conference on Electrical, Instrumentation and Communication Engineering (ICEICE2017) pp. 1-4, Karur, India: IEEE. doi:10.1109/ICEICE.2017.8191863.
- [6] González-Vidal, J. L. (2006). *Aplicación de Estructuras Micro-Electro-Mecánicas (MEM's) con Tecnología MOS, para Sensores de Parámetros Físicos*. tesis doctoral. Ciudad de México, México: Tesis doctoral, CINVESTAV-IPN.
- [7] Lee, S., Nam, G.-J., Chae, J., Kim, H. y Drake, A. J. (2005). Two-Dimensional Position Detection System with MEMS Accelerometers, Readout Circuitry, and Microprocessor for Padless Mouse Applications. (IEEE, Ed.) *IEEE Transactions on Very Large Scale Integration (VLSI) Systems*, 13(10), pp 1167 - 1178. doi:10.1109/TVLSI.2005.859473.
- [8] Khan, A. S. y T. Shanmuganatham (2017). Arc-Shaped Cantilever Beam RF MEMS Switch for Low Actuation Voltage. *Proceedings of 2017 IEEE*

- International Conference on Circuits and Systems (ICCS 2017), pp. 302-305. IEEE. doi:10.1109/ICCS1.2017.8326009.
- [9] Hayt, W., Kemmerly, J. y Durbin, S. (2011). *Engineering Circuits Analysis* (8a ed). Nueva York, EE.UU., McGraw Hill.
- [10] Hernández, D. (2009). *Desarrollo de Prototipos para Acelerómetros MEMS*, Tesis de maestría, UAEH, Mineral de la Reforma, Hidalgo, México.
- [11] Kittali, R. M., Sheeparamatti, B. G. y Sheeparamatti, A. (2017). Modeling and Analysis of MEMS Based Accelerometer in Simulink. *Smart Technologies for Smart Nation, 2017 International Conference On*, pp. 602-606. Bengaluru, India: IEEE. doi:10.1109/SmartTechCon.2017.8358442.
- [12] Kuncar, A., Sysel, M. y Urbanek, T. (2017). Calibration of Low-Cost Accelerometer and Magnetometer with Differential Evolution. *2017 International Conference on Military Technologies (ICMT)*. Brno, República Checa. IEEE. doi:10.1109/MILTECHS.2017.7988795.
- [13] Lu, C.-L. y Yeh, M.-K. (2017). Thermal Stress Analysis of Chip with Pressure Sensor Embedded in Accelerometer. *Electronics Packaging (ICEP), 2017 International Conference on*, pp. 540-543. Yamagata, Japón. IEEE. doi:10.23919/ICEP.2017.7939442.
- [14] Lui, X., Jiang, W., Zhao, L., Jia, C., Yu, M. y Jiang, Z. (2018). Liquid Packaging Effects on Piezoresistive MEMS Accelerometer. *Inertial Sensors and Systems (INERTIAL), 2018 IEEE International Symposium on*. Lake Como, Italia, IEEE. doi:10.1109/ISS.2018.8358133.
- [15] Maluf, N. y Williams, K. (2004). *An Introduction to Microelectromechanical Systems Engineering, Second Edition, (2nd ed.)*. Norwood, MA, EE.UU., Artech House Inc.
- [16] Rashid, M. H. (2001). *Power Electronics Handbook*. Pensacola, Florida, EE.UU., Academic Press.
- [17] Rana, D. y Kaur, M. (2016). Design and Simulation of CMOS MEMS Accelerometer Behavioral Model. *Wireless Networks and Embedded Systems (WECON)*. Rajpura, India: IEEE. doi:10.1109/WECON.2016.7993427.

- [18] Marra, C. R., Ferrari, F. M., Langfelder, G., Tocchio, A. y Rizzini, F. (2018). Single Resonator, Time-Switched, Low Offset Drift z-Axis FM MEMS Accelerometer. *Inertial Sensors and Systems (INERTIAL)*, 2018 IEEE International Symposium on, pp 1-4, Lago de Como, Italia, IEEE. doi:10.1109/ISISS.2018.8358116.
- [19] Nathanson, H. C. y Wickstrom, R. A. (1965). A Resonant-Gate Silicon Surface Transistor with High-Q Band-Pass Properties. *Applied Physics Letters*, 7(4), pp. 84-86. doi:doi.org/10.1063/1.1754323.
- [20] Nevludov, I., Yevsieiev, V., Bortnikova, V. y Miliutina, S. (2017). MEMS Accelerometers Production Technological Route Selection. Experience of Designing and Application of CAD Systems in Microelectronics (CADSM), 2017 14th International Conference The, pp. 424-427, Lviv, Ucrania, IEEE. doi:10.1109/CADSM.2017.7916166.
- [21] Petersen, K. (1982). Silicon as a Mechanical Material. *Proceedings of the IEEE* > Volume: 70 Issue: 5, 70(5), pp. 420 - 457. doi:10.1109/PROC.1982.12331.
- [22] Shahbaz, M. A., Warsi, Z. H., Irshad, S. M., Irshad, S. T. y Jawed, S. A. (2017). Design and Analysis of CMOS MEMS Based Single Proof Mass Tri-axial Capacitive Accelerometer with Readout Integrated Circuit. *Electrical Engineering and Computing Technologies (INTELLECT)*, pp. 1-8, Karachi, Pakistan. doi:10.1109/INTELLECT.2017.8277644
- [23] Vijay K. y Varadan, K. J. (2006). *Smart Material Systems and MEMS: Design and Development Methodologies*. Chichester, Inglaterra: Wiley y Sons Ltd.
- [24] Wu, W., Li, Z., Liu, J., Fan, J., y Tu, L. (2017). A Nano-G MEMS Accelerometer for Earthquake Monitoring. *Transducers 2017*, pp. 599-602, Kaohsiung, Taiwán.
- [25] Zhang, Y., Yu, Y., Zhang, Z. y Zhang, X. (2017). Structure and Design of Microgrippers: A Survey. *Cybernetics, Robotics and Control (CRC)*, 2017 2nd International Conference on, pp. 139-143. Chengdu, China. IEEE. doi:10.1109/CRC.2017.9.