

Comparación de Resonadores Biocompatibles para el Diseño de un Sensor de Muestras Biológicas

Casimiro. A. Rocha

UNIVERSIDAD DEL NORTE, Barranquilla, Colombia, rochac@uninorte.edu.co

José R. Escorcía Gutierrez

UNIVERSIDAD DEL NORTE, Barranquilla, Colombia, escorciar@uninorte.edu.co

RESUMEN

Los cantiléver y los FBAR han sido utilizados últimamente tanto resonadores como sensores para la detección de reacciones químicas que ocurren a nivel molecular, como la síntesis de proteínas y la hibridización de moléculas de ADN. En este artículo, se presenta una comparación que permita la evaluación de estos dispositivos para este tipo de detección y además permita modelar su comportamiento teniendo en cuenta la compatibilidad con sustancias biológicas. También se presentan los resultados adquiridos a partir de las herramientas de análisis y la comparación frente a otros trabajos que presentan otros diseños ya terminados. Se cuenta con la herramienta ANSYS para el análisis electromecánico, mientras que se utiliza SPICE para el análisis del equivalente eléctrico.

Palabras claves: ADN, Cantilever, FBAR, hibridización, MEMS, NEMS.

ABSTRACT

Cantilevers and FBAR have been used lastly as a resonator and as a sensor, especially for those that require a detection of chemical reactions at molecular levels, such as the synthesis of proteins and DNA hybridization. This article shows a comparison that helps to evaluate these devices used to detect variations on mass and to model their behavior based on the compatibility requirements needed on organic substances. Also, it's shown the results obtained with some simulation software and the comparisons with other jobs. To make the electromechanical analysis it's used ANSYS and for the electrical equivalent circuit it's used SPICE.

Keywords: DNA, Cantilever, FBAR, hybridization, MEMS, NEMS

1. INTRODUCCIÓN

Los cantiléver y los FBAR han sido dispositivos ampliamente usados en aplicaciones biomédicas en recientes años debido a su gran variedad de aplicaciones que estos pueden llegar a tener. En la Fig. 1 se observa la estructura física de un cantiléver y la de un FBAR sencillo. Estos dispositivos pueden ser caracterizados tanto por sus propiedades mecánicas como eléctricas, y en ambos casos presentan un comportamiento útil para la detección de reacciones químicas. Estos dispositivos pueden variar su comportamiento físico debido a cambios de temperatura, a cambios en la carga e incluso a cambios de voltaje, es por esto que para cada variable física, al cantiléver se le puede dar una característica transductiva.

Por ejemplo se puede considerar el cantiléver como un elemento piezorresistivo, si se tiene en cuenta que una variación en su forma representa una variación en su resistencia eléctrica (Young, 1964). Otra forma también puede ser detectar la variación de frecuencia debido a un incremento en la carga del cantiléver (Arcamone et al., 2008). En el caso de un FBAR, se puede considerar una variación de la frecuencia por dos razones; la primera por una variación en el medio donde se encuentra (Campanella et al, 2006), el segundo ocurre por una variación de la carga aplicada (Ilic et al, 2004). En todos los casos estas variaciones ocurren por eventos externos, como lo puede

ser añadir una pequeña cantidad de masa, o un proceso químico que ocurra sobre el sustrato como lo puede ser una inmovilización molecular o la hibridización de ADN.

Aún así, por las cargas que estos dispositivos manejan y por las diminutas escalas a las que ocurren estos procesos, resulta importante presentar un modelo que contenga las suficientes características como para poder establecer las pautas de diseño que requiere el dispositivo. Estas características deben ser tanto intrínsecas como las propiedades del sustrato o sus dimensiones geométricas, como externas como la densidad del material que se vaya a colocar como carga (Johnstone et al, 2002).

En este documento se presenta un análisis sencillo pero bastante útil al momento de caracterizar tanto un cantiléver como un FBAR mecánica y eléctricamente, aunque estos modelos pueden extenderse más para observar otros comportamientos.

Además, se analiza la sensibilidad electromecánica tanto de los FBAR como el del cantiléver teniendo en cuenta las variaciones en frecuencia frente a una variación en la masa.

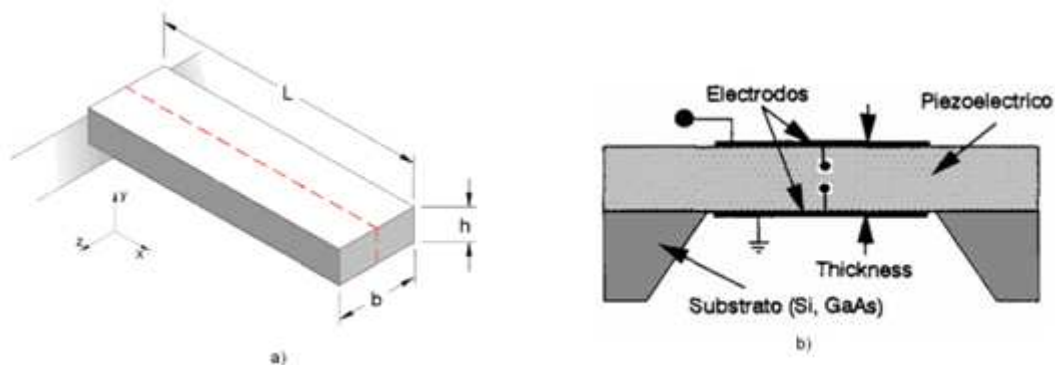


Fig. 1. Modelo básico de un a) cantiléver para detección de masa y un b) FBAR como resonador. Tomado de (Arecco, 2003) y (Campanella, 2006) respectivamente.

Finalmente se comparan los resultados entre cada uno de los dispositivos y se define cual de los dos presenta mejores características para el sensado de reacciones bioquímicas.

2. MODELADO Y SENSIBILIDAD

Existen varios modelos matemáticos que permiten realizar un análisis a un cantiléver y un FBAR como el propuesto en (Ilic et al, 2004) en el caso de un cantiléver, que determina la frecuencia de este solo conociendo las dimensiones y los materiales con los que está hecho el cantiléver; mientras que para un FBAR los más usados son el modelo Butterworth Van Dyke (BVD) (Lakin, 1999) o Modified Butterworth Van Dyke (MBVD) (Larsson III et al 2000). Pero es importante entender que cada modelo permite determinar una característica importante de estos dispositivos como por ejemplo las impedancias equivalentes del FBAR; por tal motivo es importante saber qué propiedad o propiedades, o que comportamientos se requieren para utilizarlo en una aplicación exclusiva.

Para el caso de este análisis se utiliza la frecuencia de resonancia que tiene un cantiléver, variable dependiente de la elasticidad del material (determinado por el modulo de Young) con que este se construye y la densidad de este. El cantiléver propuesto es como el que se muestra en la Fig. 1 a).

Este comportamiento resulta útil, ya que como lo muestra (Verd et al, 2005), la frecuencia con la que resuena un cantiléver es aproximadamente proporcional a la masa que posee en su punto de carga como lo muestra la Figura 2.

Las dos formas de determinar su comportamiento son:

- Considerar al cantiléver como un conjunto de elementos conformados por varios sistemas Masa-Resorte.

- Considerar el cantiléver como un sistema Masa-Resorte Simple con una masa y una constante elástica efectiva.

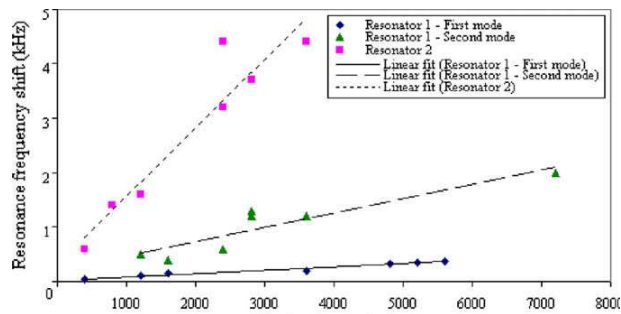


Fig. 2. Cambio de frecuencia respecto al incremento en la carga. Tomado de (Narducci et al, 2009).

Por lo general, en etapas iniciales de diseño se propone utilizar la segunda opción como se observa en (Arecco 2003); ya que esta permite obtener un buen estimado de las características físicas que debe poseer un cantiléver. Además, las herramientas matemáticas necesarias para un análisis como este, solo requieren solucionar una ecuación diferencial ordinaria simple o una función de transferencia.

El primer método se usa para constatar que las características físicas propuestas, estén bastante próximas al comportamiento que se propone, que para nuestro caso será la frecuencia de resonancia del cantiléver. Además, en este método se pueden agregar ciertas particularidades que pueda tener nuestro diseño propuesto, como es el agregar un micropozo para adherir la muestra de ADN.

Para este análisis, se usa la ecuación diferencial de un sistema masa resorte simple y la ecuación general de curva elástica, las cuales se explican en detalle en este artículo y finalmente se comprueba con un análisis de elementos finitos, si las características del modelo propuesto concuerdan con el comportamiento deseado.

Para el análisis del FBAR se utiliza el modelo BVD que presenta las características del dispositivo como si fuese un modelo eléctrico, que además permite obtener los parámetros intrínsecos y geométricos que debe poseer el FBAR para resonar a una frecuencia específica. También se tiene en cuenta las ecuaciones acústicas de un FBAR para determinar la frecuencia de oscilación del sistema.

Finalmente como comparación se utilizan para cada dispositivo herramientas de elemento finito para corroborar los modelos simplificados con un modelo tridimensional.

2.1. MODELO MASA-RESORTE SIMPLE PARA EL CANTILÉVER

Antes de presentar los modelos, se definen las variables que se encuentran en cada una de estas:

Cantiléver

- E: Es el módulo de Young del material con el que está hecho el sensor
- ρ : Es la densidad de los materiales que constituyen al sensor
- h: Es el grosor del cantiléver
- b: Es el ancho del cantiléver
- L: Es la longitud del cantiléver
- m_{eff} : Es la masa efectiva del cantiléver
- f_0 : Es la frecuencia de oscilación del cantiléver
- y: Es la posición del cantiléver en el eje vertical.

x: Es la posición donde se aplica a fuerza en el eje horizontal.

Como anteriormente se comentó, la ventaja de usar el modelo de masa resorte simple es que este permite tener una buena estimación de las características del cantiléver, sin la necesidad de tener que realizar un análisis exhaustivo.

Este análisis se realiza a partir de tres ecuaciones fundamentales: la ecuación de un sistema masa-resorte simple; la ecuación general de curva elástica; y la ecuación de energía cinética del cantiléver.

Con estas tres ecuaciones es posible determinar las características geométricas y físicas que requiere el cantiléver para resonar a una frecuencia deseada.

Cabe anotar que si existe una carga extra sobre el cantiléver su frecuencia de resonancia cambiará, más este caso no se tuvo en cuenta para las determinar las constantes elásticas y la masa efectiva del cantiléver.

Para determinar la constante elástica para la ecuación masa resorte, se utiliza la ecuación general de curva elástica (1), la cual tiene como condición de frontera que en la base del cantiléver no existe ningún movimiento y que la velocidad es cero.

$$\frac{\partial^2}{\partial x^2} \left(EI \frac{\partial^2 y}{\partial x^2} \right) = F(x) \quad (1)$$

Para determinar la masa efectiva, se utilice una equivalencia energética que exista entre la masa dinámica y la masa estática del cantiléver.

$$KE = \left(\frac{33}{144} \rho b h L \right) \frac{\dot{y}_{\max}}{2} = \frac{1}{2} m_{\text{eff}} v^2 \quad (2)$$

Donde m_{eff} es la masa efectiva o masa dinámica del cantiléver, es decir que la masa efectiva es aproximadamente 0.24 veces la masa estática del cantiléver.

De esta manera al integrar la masa del cantiléver en la ecuación (1) se tiene que

$$f_0 = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{k}{m}} = \frac{h}{2\pi L^2} \sqrt{\frac{35E}{33\rho}} \quad (3)$$

Finalmente, es posible caracterizar el sustrato y sus propiedades electromecánicas para poder obtener una frecuencia de resonancia indicada. Cabe recordar que los parámetros E y ρ , dependen exclusivamente de los materiales con los que se construya el cantilever, que para procesos bioquímicos resulta en una composición de polisilicio y oro (Dufva et al, 2003), SU-8 (Schmid et al, 2006) o vidrio (Brockman et al, 2001). Además en caso de existir varios materiales se deben tener en cuenta las ecuaciones presentadas por (Kyung-Tae Kim et al, 2008) para la variación de la frecuencia de resonancia.

$$\Delta m = \frac{k}{4\pi^2} \left(\frac{1}{f_{\text{shift}}^2} - \frac{1}{f_0^2} \right) \quad (4)$$

2.2. MODELO ELECTROACÚSTICO

Para este modelo se considera el volumen de un prisma de longitud, grosor y ancho, l, t, w y hecho de un material con un módulo de Young E y una densidad ρ_0 como el que se muestra en la Fig. 3.

FBAR

- E: Es el módulo de Young del material con el que está hecho el sensor
- ρ_o : Es la densidad de los materiales que constituyen al sensor
- t: Es el grosor del FBAR
- d_o : Es la separación entre las placas del FBAR
- l: Longitud del FBAR
- w: Ancho del FBAR
- f_o : Es la frecuencia de oscilación del FBAR

Suponiendo que este volumen es sometido a una tensión eléctrica, el cual induce una onda acústica longitudinal dentro del material, y que parte de esta onda se disipa a través de todos los medios que la rodean, se diseña un FBAR con un grosor equivalente a la mitad longitud de onda, de tal manera que la otra mitad sea disipada a través de los electrodos que componen el dispositivo.

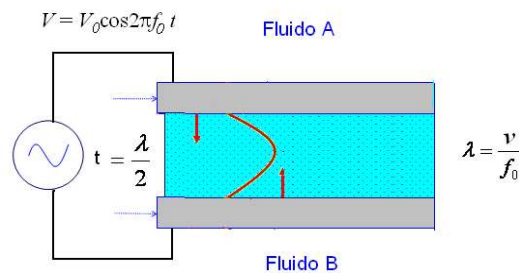


Fig. 3. FBAR sometido a una tensión eléctrica, el grosor de este es la mitad de la longitud de onda.

Teniendo en cuenta que la velocidad del sonido en un sólido y el grosor de la película del FBAR están dadas por [14]:

$$v = \lambda f = \sqrt{\frac{E}{\rho_o}} \quad (5)$$

Se tiene que la frecuencia de resonancia es:

$$f = \frac{1}{2t} \sqrt{\frac{E}{\rho_o}} \quad (6)$$

Teniendo como equivalencia la ecuación de la frecuencia de resonancia en un circuito RLC, se tiene que:

$$\frac{1}{2t} \sqrt{\frac{E}{\rho}} = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{1}{L_m C_m}} \quad (7)$$

Para la equivalencia electromecánica, se usa también la capacitancia generada entre los dos electrodos y la película del material acústico:

$$C_o = \frac{\epsilon A}{d_o} \quad (8)$$

A partir de las ecuaciones (10) y (11) se obtiene el modelo BVD equivalente para un FBAR (Min-Chiang Chao et al, 2002):

$$C_m = \frac{8k_t^2 C_o}{\pi^2} \quad (9)$$

$$L_m = \frac{1}{4\pi^2 f_s C_m} \quad (10)$$

$$R_m = \frac{\eta_0}{\rho_o v^2 C_m} \left(\frac{f}{f_o} \right) \quad (11)$$

$$L_3 = \frac{4f_o L_m \rho_3 d_3}{\rho_o v} \quad (12)$$

Donde L_m , R_m , C_m son las inductancias, resistencias y capacitancias equivalentes en el modelo BVD, como se muestra en la Fig. 4. Mientras L_3 representa el grosor la masa adherida sobre el sensor. La constante k_t es el parámetro de acoplamiento electromecánico que se encuentra generalmente entre 2.4% y 6.4% para el AlN. d_3 Es el grosor del material adicional que se ha agregado.

Teniendo en cuenta las ecuaciones (9), (10), (11) y (12) se determina la variación de la frecuencia con respecto a una variación en la carga

$$\frac{\Delta f}{f_o} = - \frac{\rho_3 d_3}{\rho_o d_o} \quad (13)$$

Donde ρ_3 y d_3 son la densidad y la el grosor del material que cubre la superficie del FBAR.

3. PRUEBAS Y RESULTADOS

Ya que el objetivo es comparar el comportamiento de un FBAR y un cantiléver para que resuene a una frecuencia, se proponen dos dispositivos que posean escalas similares y se comparen las características en frecuencia tanto para el modelo electromecánico como el de elementos finitos. Finalmente, se comparan analíticamente y con documentaciones previas las respuesta en frecuencia debido a variaciones en la carga.

De las ecuación (11) y (13), se pueden sacar dos conclusiones: la primera consiste en la característica geométrica del cantiléver, es decir la frecuencia de resonancia solo depende del grosor y de la longitud del sustrato, mas no de su ancho; la segunda es que la variación de la frecuencia en un FBAR depende de las características intrínsecas del sustrato, pero también depende en gran medida de las características geométricas de la carga. Por tal motivo nuestro análisis toma en cuenta sus características geométricas.

Considerando que recientemente en las últimas aplicaciones biológicas se pueden obtener microgotas de hasta 30pL (Villanueva et al, 2006), se comparan los dispositivos con dimensiones como las que se presentan en la Tabla 1.

En la Tabla 1 se presentan las frecuencias obtenidas al variar la longitud y el ancho del cantiléver y el FBAR son escogidos de tal forma que una microgota se pueda colocar encima de la superficie de cada dispositivo, de tal forma que el FBAR posee un área de soporte para materiales de mayor tamaño que el cantiléver. Las características de los materiales usados para cada sensor, así como la de sus propiedades se encuentran en la Tabla

3. También se presenta el resultado obtenido a través de la herramienta de elementos finitos ANSYS y la desviación respecto al modelo electromecánico en esta tabla.

Tabla 1: Frecuencia de Resonancia con Respecto a la Longitud del Cantiléver y el Grosor del FBAR.

Parámetros	FBAR	Cantiléver
Longitud	40µm	90µm
Grosor	1.8µm	10µm
Ancho	40µm	50µm

Tabla 2: Módulos de Young y densidades de distintos materiales usados en dispositivos MEMS/NEMS

Material	Módulo de Young	Densidad	Dispositivo
Polisilicio	172.5 GPa	2330kg/m ³	Cantiléver
Su-8	4 GPA	1190kg/m ³	Cantiléver
Au	78 GPA	19300kg/m ³	Cantiléver
AlN	330 GPa	3320kg/m ³	FBAR
ZnO	208 GPA	5600kg/m ³	FBAR

Para el modelo FEM, se diseñó un modelo para el cantiléver con las mismas características que se presentan en la Tabla 1 y sometido a las fuerzas de gravedad. Existe una gran variedad de materiales que se pueden usar para un cantiléver como lo pueden ser AU, SU-8, o el Polisilicio (Lomax et al, 2003), pero el cantiléver debe usarse como un elemento sensor, SU-8 no puede usarse debido a su compatibilidad eléctrica. El Polisilicio es por lo general el material más utilizado en este tipo de aplicaciones debido a sus propiedades mecánicas que permite alcanzar altas frecuencias de resonancia. Cabe resaltar que para aplicaciones biológicas se debe utilizar una combinación de materiales entre el Polisilicio y AU o SU-8 debido a su alta compatibilidad con las proteínas, el ARN y el ADN

Para determinar la frecuencia de resonancia se utilizó la función Modal de ANSYS (Kwon et al, 2000), de esta manera se estimula el cantiléver con un esfuerzo que barra a partir de una frecuencia designada por el usuario que para nuestro modelo será de 750KHz hasta una frecuencia final de 1.2MHz.

Como resultado se obtiene que el modelo propuesto en elementos finitos es de 1.06MHz, es decir posee una desviación frente al modelo de cuerpo libre electromecánico una variación del 2.75% frente al modelo en SPICE que se muestra en la Tabla 3. Si se tiene en cuenta que la sensibilidad es proporcional con la frecuencia de resonancia inicial del dispositivo, se debe obtener una sensibilidad mucho mayor para el FBAR que para el cantiléver. Aunque el modelo en elementos finitos a diferencia del modelo electromecánico es sometido a la fuerza de gravedad, la variación de la frecuencia se debe principalmente a que el ancho del dispositivo influye de manera mínima en la frecuencia de resonancia como lo presenta (Arecco, 2003).

Tabla 3: Tabla de resultados entre la frecuencia de resonancia de una FBAR y un cantilever

Parámetros	FBAR	Cantiléver
Frecuencia Modelo electromecánico	4.84GHz	1.09MHz
Frecuencia FEM	5.7GHz	1.06MHz
% Desviación	17.76%	2.75%

Finalmente, en la Fig. 4.a se observa el comportamiento debido a un esfuerzo realizado a la frecuencia de resonancia. Cabe resaltar que al igual que todo sistema resonante, este modelo presenta más de una frecuencia de resonancia, de hecho la frecuencia de resonancia encontrada en el modelo equivale a la frecuencia de resonancia fundamental (Narducci et al, 2009).

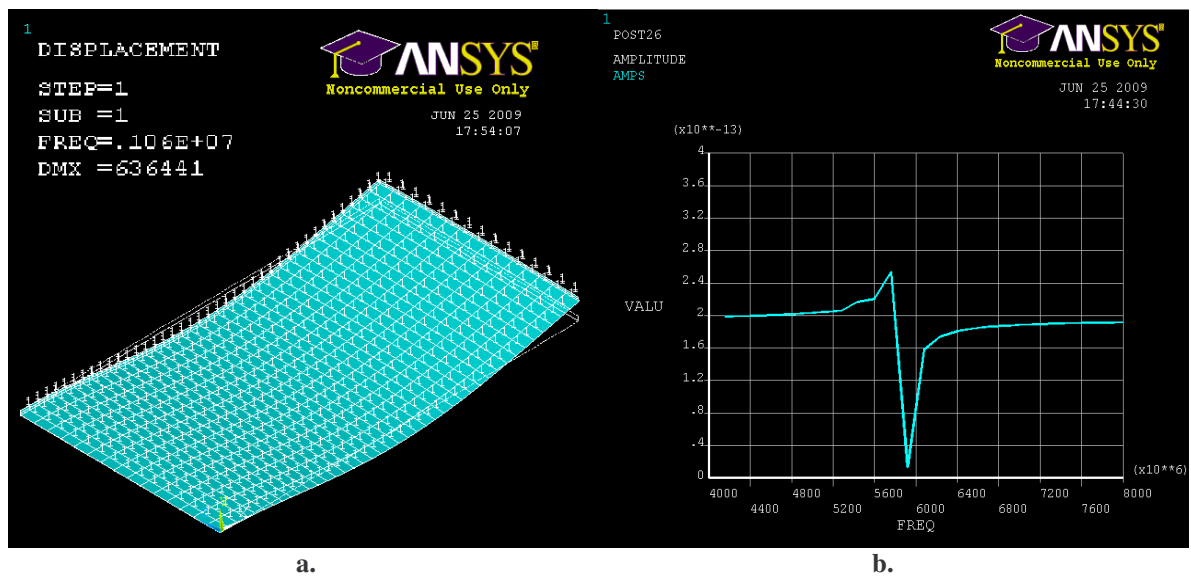


Fig 4.a. Análisis modal del cantiléver para el primer armónico; y b. respuesta en frecuencia del FBAR

Para el modelo en elementos finitos para el FBAR, se tiene en cuenta que el material a escoger no debe conducir la corriente eléctrica debido a que el elemento actuador será una tensión que sirve de fuente para la onda acústica. Los materiales más usados para estas aplicaciones son el AlN, el ZnO, y el PZT. De estos, el PZT presenta problemas de compatibilidad para adherirse a materiales como el Pt bastante utilizados en estos dispositivos como electrodos. Para la simulación en ANSYS se presenta un FBAR hecho a partir de electrodos de Pt y de un dieléctrico hecho de AlN. En la Tabla 2 se presentan las propiedades del AlN.

En la Fig. 4.b se presenta la respuesta en frecuencia del FBAR simulado. En esta gráfica se puede observar que existen dos frecuencias, una de resonancia y una de antiresonancia, la primera se presenta debido a las características acústica del dispositivo y la segunda debido al paralelo entre la capacitancia formada por los electrodos y el dieléctrico, y el circuito RLC equivalente.

Como se esperaba el FBAR presenta un pico de resonancia, aunque esta frecuencia se encuentra bastante distanciada respecto a la propuesta por el modelo electromecánico. Esto se debe a que el modelo electromecánico no contiene información sobre los electrodos usados en el FBAR; de esta manera la desviación frente al modelo propuesto es bastante superior frente a la obtenida por el cantiléver simulado en SPICE, ya que fue del 17.76% como se observa en la Tabla 3. También se debe tener en cuenta las dimensiones del FBAR, ya que esta afecta la frecuencia de resonancia.

Respecto a la variación de la frecuencia de resonancia debido a un cambio a la carga soportada, se tiene en cuenta que para el cantiléver esta variación no depende necesariamente ni de la posición del material agregado ni de sus dimensiones geométricas. Esto presenta una ventaja para aplicaciones biológicas, debido a que materiales biológicos como las proteínas o el ADN no se adhieren de manera uniforme, requerimiento que se debe tener en cuenta para sensar en un FBAR. Además, considerando que estos materiales biológicos siempre van acompañados de una solución buffer, existirá siempre una desviación desconocida en el FBAR dependiendo del tipo de solución buffer que se use.

4. CONCLUSIONES

Del análisis previo se puede concluir que aunque no se considera de manera exhaustiva modelos electromecánicos que tomen en cuenta diversos grados de libertad que puedan tener el cantiléver y el FBAR, los modelos permitieron obtener buenos resultados frente a los modelos simulados en la herramienta de elementos finitos ANSYS.

Se debe tener en cuenta que estos modelos electromecánicos son modelos simplificados, de esta manera existirán otras características que siempre afectan el comportamiento de estos dispositivos, como lo puede ser el ancho del cantiléver o el grosor de los electrodos. De hecho para el caso del FBAR se debe tener en cuenta la matriz piezoeléctrica para poder modelarlo correctamente.

En cuanto a la capacidad de sensado de estos dispositivos en aplicaciones biológicas, resulta importante tener en cuenta que los materiales biológicos no son materiales uniformes por ende el dispositivo a usar debe adaptarse a esta situación. La variación en la frecuencia de resonancia en un cantiléver resulta ser menor frente a la del FBAR, pero la variación en el cantiléver no depende de la uniformidad del material a analizar o de las características acústicas que pueda tener. Por ende, para aplicaciones biológicas resulta mejor utilizar un cantiléver frente a un FBAR

Finalmente, resulta importante tener una herramienta para el análisis de elementos finitos para solucionar ecuaciones complejas como las ecuaciones diferenciales parciales. Como se observa en las Figura 5 se espera que este método permita simular el comportamiento electromecánico del FBAR sin conocer la compleja matemática que implica desarrollar una ecuación diferencial o una ecuación parcial. Aparte, estos modelos tienen en cuenta características que el modelo electromecánico no presenta y que resultan importantes para determinar el comportamiento que se desea.

5. AGRADECIMIENTOS

Los autores agradecen al ingeniero Humberto Campanella por la información presentada sobre cantiléver durante el curso de MEMS y NEMS, también se le agradece a Mario Esmeral por la ayuda presenta en el análisis de elementos finitos y al ingeniero Miguel Sotaquirá por su apoyo en la investigación. Este proyecto tuvo la financiación de COLCIENCIAS y la UNIVERSIDAD DEL NORTE.

REFERENCIAS

B. Ilic, H.G. Craighead, S. Krylov, W. Senaratne, C. Ober, P. Neuzil, Attogram detection using nanoelectromechanical oscillators, *J. Appl. Phys.* 95 (2004) 3694–3703.

Call DR, Chandler DP, Brockman F. Fabrication of DNA microarrays using unmodified oligonucleotide probes. *Biotechniques* 2001;30:368–72, 374, 376 passim.

D. Arecco. Analysis and preliminary characterization of a mems cantilever-type chemical sensor. Master of science thesis. December 2003.

G. O. Young, “Synthetic structure of industrial plastics (Book style with paper title and editor),” in *Plastics*, 2nd ed. vol. 3, J. Peters, Ed. New York: McGraw-Hill, 1964, pp. 15–64.

Guillermo Villanueva, Francesc Pérez-Murano, Martin Zimmermann, Jan Lichtenberg and Joan Bausells. Piezoresistive cantilevers in a commercial CMOS technology for intermolecular force detection. *Microelectronic Engineering*. Vol. 83, Issues 4-9, April-September 2006, Pages 1302-1305

Han A, DufvaM, Belleville E, Christensen C. Detection of analyte binding to microarrays using gold nano particles labels and a desktop scanner. *Lab Chip* 2003;3:336–9.

H. Campanella, J. Esteve, J. Montserrat, A. Uranga, G. Abadal, N. Barniol, A. Romano-Rodríguez, Localized and distributed mass detectors with high sensitivity based on thin-film bulk acoustic resonators, *Appl. Phys. Lett.* 89 (2006) 033507.

J Arcamone, M A F van den Boogaart, F Serra-Graells, J Fraxedas, J Brugger and F Perez-Murano. Full-wafer fabrication by nanostencil lithography of micro/nanomechanical mass sensors monolithically integrated with CMOS. *Nanotechnology* 19 (2008).

J.D. Larson III, P. Bradley, S. wartenberg, and R. Ruby, "Modified butterworth-Van Dyke Equivalent Circuit for FBAR Resonators and Automated Measurement System. " Paper 3H-5 2000 IEEE Int. Ultrasonics Symposium

J. Verd, *Student Member, IEEE*, G. Abadal, J. Teva, M. Villarroya Gaudó, A. Uranga, X. Borrísé, et al. Design, Fabrication, and Characterization of a Submicroelectromechanical Resonator With Monolithically Integrated CMOS Readout Circuit. *Journal of microelectromechanical systems*, vol. 14, no. 3, June 2005.

Kwon and Bang. *The Finite Element Method using MATLAB*. 2000.

K.M. Lakin, "Thin Film Resonators and Filters", 1999 IEEE Ultrasonics Symp. Proc. pp. 895-906

Kyung-Tae Kim and Young-Woo Park. Feasibility of Low-Cost Microarray Printing with Inkjet Printer. *International Conference on Control, Automation and Systems* 2008. 1932-1935.

LOMAX, H, Pulliam, T, Zingg, D. *Fundamentals of Computational Fluid Dynamics*. Springer 2003. p. 19

M. Narducci, E. Figueras, M. J. Lopez, I. Gràcia, J. Santander, P. Ivanov, L. Fonseca, C. Cané. Sensitivity improvement of a microcantilever based mass sensor. *Microelectronic Engineering*. 2009.

Margarita Narducci, Eduard Figueras, María José Lopez, Isabel Gràcia, Joaquin Santander, Peter Ivanov, Luis Fonseca, Carles Cané. Sensitivity improvement of a microcantilever based mass sensor. *Microelectronic Engineering*. Volume 86, Issues 4-6, April-June 2009, Pages 1187-1189

Marie R, Schmid S, Johansson A, Ejsing L, Nordstrom M, Hafliger D, Christensen C, Boisen A, Dufva M. Immobilisation of DNA to polymerised SU-8 photoresist. *Biosensors and Bioelectronics*, in press.

Microdrop Technologies. <http://www.microdrop.de/wDeutsch/technology/microdrop.shtml>

Min-Chiang Chao; Zi-Neng Huang; Shih-Yung Pao; Wang, Z.; Lam, C.S.; , "Modified BVD-equivalent circuit of FBAR by taking electrodes into account," *Ultrasonics Symposium, 2002. Proceedings. 2002 IEEE*, vol.1, no., pp. 973- 976 vol.1, 8-11 Oct. 2002

R. W. Johnstone and M Parameswaran. Theoretical limits on the freestanding length of cantilevers produced by surface micromachining technology. *Journal Of Micromechanics And Microengineering*. Octubre 2002.

Autorización y Renuncia

Los autores autorizan a LACCEI para publicar el escrito en los procedimientos de la conferencia. LACCEI o los editores no son responsables ni por el contenido ni por las implicaciones de lo que esta expresado en el escrito