

## ANÁLISIS Y EVALUACIÓN DEL COMPORTAMIENTO DE SENSORES PIEZOELÉCTRICOS

Martín A. Zalazar<sup>a</sup>, Fabio A. Guarnieri<sup>a,b</sup>

<sup>a</sup>CIMEC, INTEC (UNL-CONICET), PTLIC, El pozo, 3000, Santa Fe, Argentina

<sup>b</sup>Facultad de Ingeniería, Bioingeniería, UNER, 3101, Oro Verde, Argentina.

**Palabras clave:** microbalanza, MEMS, macromodelo, piezoelectricidad, microfluídica, resonador acústico de película delgada, biosensor.

**Resumen.** *Propósito:* Las microbalanzas como sensores acústicos son extremadamente sensibles a cambios de masa y permiten medir películas muy delgadas típicas de los procesos de microfabricación (MEMS y semiconductores). Algunas de las aplicaciones más importantes involucran la medición de deposición del polímero parylene, utilizado en dispositivos médicos y el sensado de la deposición de antígenos y proteínas en canales microfluídicos. *Metodología:* Se desarrolló un macromodelo (modelo dinámico de orden reducido de dispositivos) basado en el modelo de Mason de líneas de transmisión acústica. Este modelo permite modelar múltiples capas piezoeléctricas (cuarzo, PVDF y AlN) y no piezoeléctricas (Al, Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub>, parylene, líquido) encontradas en estos dispositivos. Se utilizó un modelo numérico (FEM) con deposición de parylene para validar el macromodelo y optimizar los parámetros para una microbalanza con disco de PVDF y para una con disco de cuarzo (QCM), con frecuencias de resonancia de 45.8MHz y 5MHz respectivamente. Se implementó también un modelo FEM para validar el macromodelo de una microbalanza con membrana de AlN con frecuencia de resonancia de 1.5GHz. En el modelo FEM se usó un sólido 3D elástico lineal piezoeléctrico para el cuarzo (trigonal 32), para el PVDF (ortorrómbico mm2) y para el AlN. El parylene fue modelado como un material elástico lineal isotrópico. *Resultados:* Para el macromodelo de la QCM, el corrimiento en frecuencia para espesores de deposición de parylene entre 1µm-20µm presentó un error promedio de 2.57% con una desviación estándar de 1.4% respecto a la solución analítica; para el modelo numérico, el corrimiento en frecuencia presentó un error promedio de 3.66% con una desviación estándar de 4.39% respecto al analítico. Para la microbalanza de PVDF en el macromodelo, el corrimiento en frecuencia para espesores de deposición de parylene entre 80nm-400nm presentó un error promedio de 4.18% con una desviación estándar de 4.55% respecto al modelo FEM. Para la microbalanza de AlN en el macromodelo, la frecuencia de resonancia presentó un error de 63.5% respecto al modelo FEM. Su aplicación en un medio líquido (agua) mostró la respuesta en frecuencia y la atenuación del factor de calidad (Q) en concordancia la literatura. *Conclusiones:* El macromodelo para los detectores gravimétricos concibe una herramienta confiable para modelar esta detección en el sistema completo fluido-transporte-acústico.

## 1 INTRODUCCIÓN

La microbalanza de cristal de cuarzo (QCM, por sus siglas en inglés) es un dispositivo altamente sensible a las pequeñas variaciones de masa que en ella ocurren (Figura ). Esto se debe a los cambios que experimenta la frecuencia de resonancia ( $f_0$ ) del cristal de cuarzo, material piezoeléctrico, al hacerlo su masa. Algunas microbalanzas poseen una resolución de hasta  $0,05\text{ng}$  (O'Sullivan et al. 1999). Las QCMs poseen una mayor sensibilidad que las microbalanzas analíticas convencionales que se utilizan actualmente en los laboratorios. Esta gran sensibilidad a la masa se explica en la elevada aceleración que actúa sobre el film depositado (Mecea, 2005). El hecho que el máximo desplazamiento se produzca en la superficie del cristal, hace que el modo de sensado de corte sea muy sensible a la acumulación de masa en la superficie (Ballantine Jr. et al. 1997).

La  $f_r$  del cristal depende tanto de sus propiedades físicas como de las propiedades del medio adyacente. La ecuación de Sauerbrey (ver ec. (1)) relaciona este cambio en la  $f_0$  con la masa acumulada sobre el cristal:

$$\Delta f = k_s \Delta m \quad (1)$$

donde  $\Delta f$  es el cambio en la  $f_0$ ,  $\Delta m$  es la masa depositada y  $k_s$  es una constante que considera parámetros del cuarzo como la  $f_0$ , el espesor, la densidad y el módulo de corte.

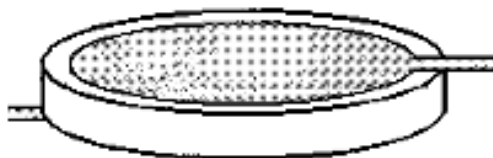


Figura 1: Esquema del cristal de cuarzo de una microbalanza.

Las QCMs están constituidas por un delgado disco de cristal de cuarzo al cual se le fijan los electrodos para la estimulación y sensado. La aplicación de un potencial eléctrico externo al material piezoeléctrico, produce tensiones mecánicas internas. Un campo eléctrico oscilante aplicado en las caras del dispositivo induce una onda acústica que se propaga a través del cristal.

Las dimensiones y geometrías tanto del cristal como de los electrodos son determinantes en las características funcionales que presenta la QCM. Por ejemplo, se ha mostrado a través de simulaciones con elementos finitos, que la forma circular de los electrodos ha arrojado mejores resultados que la anular y que el aumento de su espesor reduce la sensibilidad de la QCM (Wu et al. 2003). También se ha aplicado esta técnica numérica para observar el perfil del desplazamiento vibratorio del cristal (Kurosawa et al. 2004). Otra característica que presenta la geometría de la microbalanza es que reduciendo el diámetro de los electrodos, se mejora la separación de los modos de vibración espurios del fundamental (Hung et al. 2003). Se ha observado que las vibraciones del cristal se concentran en el centro del disco, perdiendo amplitud más allá de las dimensiones de los electrodos; además la distribución del desplazamiento no es circular sino elíptica (Kurosawa et al. 2004; Mecea, 2005).

Los modos de oscilación de los cristales se corresponden con su deformación, la cuál es dependiente del corte del cristal. Para un modo vibracional de corte, el cristal tiene un corte AT, el cuál posee una orientación específica de  $35^{\circ}15'$  respecto del eje óptico y en donde las ondas acústicas se propagan en dirección perpendicular a la superficie del cristal (O'Sullivan et al. 1999; Ballantine Jr. et al. 1997). Este modo es el utilizado para la fabricación de microbalanzas debido a su bajo coeficiente de temperatura, con mínimos cambios en la frecuencia cuando lo hace la primera además de su estabilidad en frecuencia (Yang, 2006).

Operan a una frecuencia relativamente baja que oscila entre los 3MHz y los 15MHz (O'Sullivan et al. 1999; Wu et al. 2003; Buck et al. 2004). Las aplicaciones más usuales de estos dispositivos se encuentran en los sistemas de deposición, detección de fase gaseosa (humedad, etc.), inmunosensores mediante capa de anticuerpos, biosensores de ADN (inmovilizando la cadena simple de ADN y detectando la hibridación) y análisis de droga mediante una capa de adsorventes específicos.

Hoy en día se encuentra en constante crecimiento el desarrollo de resonadores acústicos de volumen de película delgada (FBAR por sus siglas en inglés). La tecnología FBAR nace como una extensión directa de los resonadores de cristal de cuarzo. Esta tecnología permite reducir el espesor de las capas piezoeléctricas de los resonadores y así aumentar su frecuencia de resonancia. Lo último en desarrollo de FBARs han sido los biosensores miniatura.

Dentro de esta tecnología se encuentran los sensores de polímeros piezoeléctricos. El polivinilideno fluoruro (PVDF) y sus copolímeros son los polímeros con mayor efecto piezoeléctrico. Una de las mayores ventajas de los films piezoeléctricos sobre las cerámicas piezoeléctricas es la baja impedancia acústica, cercana a la del agua, tejido humano y otros materiales orgánicos, además de poseer un amplio rango dinámico y gran ancho de banda. Por esto es que revisten de gran importancia en aplicaciones biomédicas. Existen copolímeros que permiten espesores muy delgados para aplicaciones sobre silicio.

El PVDF tiene simetría ortorrómbica clase  $mm2$ . Para el PVDF existen tres principales modos de actuación/sensado: modo en el plano ( $d_{31}$ ,  $d_{32}$ ), modo de espesor ( $d_{33}$ ) y modo de corte ( $d_{15}$ ,  $d_{24}$ ). Cuando es utilizado como transmisor ultrasónico (generalmente  $>500\text{KHz}$ ) es normalmente operado en el modo de espesor ( $d_{33}$ ) (Measurement Specialties, Inc., 1999).

Existe discrepancia entre valores obtenidos de las propiedades del PVDF ortorrómbico, que tiene su origen en las diferentes formas encontradas en los procesos de producción mecánicos y eléctricos; este es uno de los obstáculos encontrados al considerar las propiedades anisotrópicas del PVDF. Se han publicado estudios de la influencia de la orientación del film piezoeléctrico (Ohigashi, 1976; Sokhanvar et al. 2007). Varios autores han puesto sus esfuerzos en la obtención de sus propiedades (Roh, 2002; Sokhanvar et al. 2007) y su dependencia con la temperatura (Ohigashi, 1976). Se encuentran varias opciones de fabricación como la utilización de soft lithography mediante casting y posterior pooling (Koucky, 2009) y utilizando film de PVDF posteriormente polarizado para un amplio rango de aplicaciones (Measurement Specialties, Inc., 1999; Roh et al. 2002; Sokhanvar et al. 2007). Se han hecho modelos de actuadores basados en elementos finitos considerando características geométricas del disco piezoeléctrico y del patrón de los electrodos (Myers et al. 2008). Dentro de las aplicaciones más importantes, se han realizado transductores de fuerza midiendo el corrimiento de frecuencia del PVDF excitado piezoeléctricamente (Ngalamou et al. 1996).

Para bajar costos y mejorar la compatibilidad de la electrónica asociada, se requiere que los sensores estén integrados con la electrónica. Por otro lado, el enorme desarrollo de la industria electrónica ha llevado a desarrollar nuevos sensores y aplicaciones de sensores compatibles con esta tecnología que sigue en crecimiento, con la idea de fabricación en masa, abaratando costos. Uno de los materiales mayormente utilizado para aplicaciones electroacústicas es el nitruro de aluminio (AlN) debido a su excelente calidad para la fabricación de resonadores acústicos (Dubois, Mural, 1999). Este piezoeléctrico debe ser fabricado sobre un sustrato, donde en muchos casos se utilizan los electrodos de excitación. Los resonadores utilizados actualmente solo están formados por la lámina piezoeléctrica, los dos electrodos y aire en ambas superficies como se puede observar en la figura siguiente:

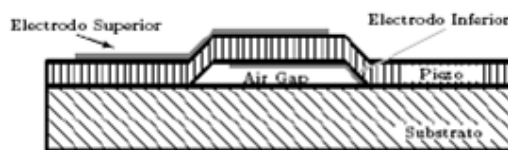


Figura 2: Esquema de un FBAR con gap de aire.

Varios autores han puesto sus esfuerzos en la obtención de las propiedades del AlN (constantes elásticas (Carlotti et al 1997), propiedades electrónicas y elásticas (Shimada et al. 1998; Dubois, Muralt, 1999)), la forma en que se obtienen (Holmquist et al. 2001) y su dependencia del espesor del film (Martin, Muralt, 2004). Se encuentran varias opciones de fabricación (Carlotti et al 1997; Dubois, Muralt, 1999; Martin, Muralt, 2004; Bjurström et al. 2004,2006; Bu et al. 2006).

Se ha encontrado que la inclinación del eje c (dirección 001) de la estructura de célula única primitiva hexagonal respecto a la normal no debe estar por debajo de los 20° para asegurar la alta eficiencia de la operación en modo de corte y permitir drenaje capacitivo (Bjurström et al. 2007). Los sensores de modo longitudinal generalmente no son aptos para aplicaciones bioquímicas en solución (Wingqvist et al. 2006). Se ha integrado al sustrato de silicio de estos resonadores, canales microfluídicos debajo de la membrana FBAR mostrando un funcionamiento adecuado (Wingqvist et al. 2006, 2007).

En este trabajo se realizó un análisis del comportamiento de tres sensores piezoeléctricos para diferentes cantidades de material depositado en su superficie: QCM, FBAR con polímero PVDF y FBAR con AlN. Se llevaron a cabo el diseño y simulación de modelos FEM para la QCM, el FBAR con polímero PVDF y el FBAR con AlN. Se implementaron macromodelos para estos mismos resonadores y se contrastaron los resultados con los modelos de elementos finitos. La QCM además fue contrastada con un modelo analítico.

## 2 METODOLOGÍA

### 2.1 Microfabricación

Las dimensiones de la QCM diseñada se basaron en las más usuales utilizadas en diferentes publicaciones (Ballantine Jr. et al. 1997; Wu et al. 2003; Kurosawa et al. 2004; Mecea, 2005). Se implementó un cristal con forma de disco, cuyo espesor se optó por uno que produzca una frecuencia de resonancia cercana a los 5MHz, disminuyendo así su fragilidad y evitando la cercanía de modos espurios de vibración al modo fundamental (Hung et al. 2003). Las dimensiones utilizadas fueron: diámetro del cuarzo 12mm, espesor del cuarzo 330µm y diámetro del electrodo 8mm.

Para el caso del FBAR de PVDF se optó también por una forma circular, consierdando el diámetro de los electrodos igual que el del resonador. Las dimensiones del FBAR diseñado se basaron en las más usuales utilizadas en diferentes publicaciones (Measurement Specialties, Inc., 1999; Sokhanvar et al. 2007), generando una fo cercana a los 45.8MHz: diámetro 2mm y espesor 10µm.

El FBAR de AlN se implementó como una membrana cuadrada, consierdando la superficie de los electrodos igual que la del resonador. Las dimensiones del FBAR diseñado se basaron en publicadas por (Bjurström et al. 2006; Wingqvist et al. 2006), obteniendo una fo de 1.5GHz: lado 300µm y espesor 2µm.

En todos los casos de consideró despreciable la influencia de los electrodos, generalmente de aluminio, debido a su pequeño espesor y baja impedancia acústica.

## 2.2 Modelo Analítico (Sauerbrey)

Como lo establece la ecuación de Sauerbrey, el cambio en la frecuencia de resonancia de un material piezoeléctrico debido a la deposición de un film, para el modo vibracional de corte es (Lucklum et al. 2000; Mecea, 2005):

$$\Delta_f = \frac{f_0 \rho_f h_f}{\rho_p h_p} \quad (2)$$

donde  $\rho_p$  es la densidad del piezoeléctrico,  $\rho_f$  la densidad del film,  $h_f$  el espesor del film y  $h_p$  el espesor del piezoeléctrico. Este modelo se empleó para validar el modelo FEM y el circuitual para la QCM.

Esta ecuación considera un corrimiento de fase pequeño de la onda acústica mientras atraviesa el material de deposición y esta condición impone la limitación de ser aplicable a la deposición de películas rígidas y delgadas (Vives, 2008). La frecuencia de resonancia analítica para el disco de cuarzo de corte AT sin deposición de material está dada por la siguiente ecuación (Rosenbaum, 2000; Yang<sup>b</sup>, 2006, considerando  $\omega_0=2\pi f$  y la primer armónica):

$$f_0 = \frac{1}{2h_p} \sqrt{\frac{c_p}{\rho_p}} \sqrt{1 - \frac{8K_e^2}{\pi^2}} \quad (3)$$

donde  $c_p$  es el módulo de corte del piezoeléctrico y  $K_e$  la constante de acoplamiento electromecánico.

## 2.3 Macromodelo

Un modelo más real para dispositivos acústicos puede ser construido utilizando el modelo de Mason (Rosenbaum, 2000). Este modelo presenta un circuito equivalente exacto que separa el material piezoeléctrico en un puerto eléctrico y dos puertos acústicos utilizando un transformador electromecánico ideal como el de la Figura 3 (Cernosek, 1998; Sherrit et al. 1999).

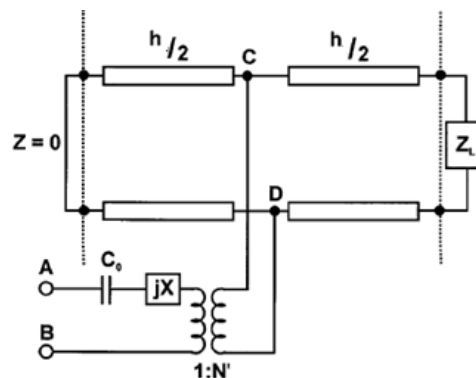


Figura 3: Representación en líneas de transmisión de un resonador piezoeléctrico con una superficie libre de tensión y la otra con carga, basado en el modelo de Mason de tres puertos.

en donde el puerto eléctrico está caracterizado por una reactancia eléctrica  $jX$  y un transformador con una relación de transformación de  $N'$  que acopla electromecánicamente el voltaje aplicado en A-B al desplazamiento en C-D. De esta manera se representa el dispositivo resonante como una línea de transmisión acústica formada por una capa piezoeléctrica y una o más cargas mecánicas de superficie ( $Z_L$ ) compuestas impedancias discretas o no distribuidas, imponiendo condiciones de contorno en sus extremos. Este

tratamiento produce una descripción matemática generalizada y elegante de la superficie del resonador que no usa otra aproximación más que la suposición de unidimensionalidad.

La impedancia compleja eléctrica de entrada para un resonador como el descrito por el modelo de la Figura 3 es:

$$Z = Z_{AB} = \frac{1}{j\omega C_0} + jX + \frac{1}{(N')^2} Z_{CD} \quad (4)$$

Donde  $Z_{CD}$  es la impedancia acústica en C-D y  $C_0$  la capacitancia estática. Esta impedancia puede ser representada como la capacidad  $C_0$  en paralelo con una impedancia de movimiento  $Z_m$  proveniente de la resonancia mecánica. Reacomodando la ecuación (4), la impedancia de movimiento queda:

$$Z_m = \frac{1}{j\omega C_0} \left[ \frac{\frac{\alpha}{K^2}}{2 \tan\left(\frac{\alpha}{2}\right)} - 1 \right] + \frac{1}{\omega C_0} \frac{\alpha \zeta}{4K^2} \left[ 1 - \frac{j\zeta}{2 \tan\left(\frac{\alpha}{2}\right)} \right]^{-1} = Z_m^0 + Z_m^L \quad (5)$$

en donde  $Z_m^0$  es la impedancia de movimiento del resonador sin perturbar y  $Z_m^L$  la impedancia de movimiento creada por la carga en la superficie; además  $\alpha = \omega h_p \sqrt{\rho_p / c_p}$  y  $\zeta = Z_L / Z_p$  con  $Z_L$  la impedancia de carga acústica y  $Z_p$  la impedancia acústica característica del piezoelectrico. Para el caso de un líquido como carga, la impedancia de carga acústica para un fluido Newtoniano es:

$$Z_L = (1 + j) \sqrt{\frac{\omega \rho_l \eta_l}{2}} \quad (6)$$

donde  $\rho_l$  y  $\eta_l$  son la densidad y viscosidad del líquido respectivamente.

Por lo general el film depositado en la superficie es viscoelástico y con un espesor acústicamente no despreciable. En este caso el resonador ve una  $Z_L$  descrita por la siguiente expresión:

$$Z_L = Z_0 \frac{Z_1 \cosh(\beta h_f) + Z_0 \sinh(\beta h_f)}{Z_0 \cosh(\beta h_f) + Z_1 \sinh(\beta h_f)} \quad (7)$$

en donde  $\beta = j\omega \sqrt{\rho_f / G_f}$  es la constante propagación compleja de la onda,  $G_f$  es el módulo elástico complejo del film,  $Z_0$  es la impedancia característica del film,  $Z_1$  es una impedancia de carga en la superficie del film depositado, que puede ser un líquido (ec. (6)), aire ( $Z_1 = 0$ ) o cualquier film depositado.

Se utilizó la ecuación (7) con la impedancia de carga  $Z_1$  igual a cero y la impedancia característica  $Z_0$  con las constantes del parylene. Se realizaron los siguientes ensayos:

- i) PVDF sin material depositado:* se obtuvo la  $f_0$  y se la contrastó con la del modelo FEM.
- ii) PVDF con deposición de parylene:* para el film depositado se utilizó nuevamente el polímero parylene (rango 80-400nm). Se contrastaron los corrimientos de frecuencia con los del modelo FEM.
- iii) ALN sin material depositado:* se obtuvo la  $f_0$  y se la contrastó con la del modelo FEM.
- iv) ALN con deposición de proteínas:* para analizar su comportamiento como biosensor, se simuló la fijación de la proteína estreptavidina (de amplio uso en bionanotecnología) en la

superficie funcionalizada del FBAR. Se utilizaron espesores de deposición entre 1-50nm.

v) *AlN con deposición de proteínas en un medio líquido*: se modeló el FBAR en un medio líquido (agua) simulando un sistema microfluídico.

Para el FBAR de PVDF se utilizaron las constantes publicadas en [Measurement Specialties Inc. y 1999](#); [Sokhanvar et al. 2007](#):

- $C_p = 1.51e9 \text{N/m}^2$
- $K_e^2 = 19.6e-3$
- $p_p = 1.062e-10 \text{A}^2 \text{s}^4 \text{kg}^{-1} \text{m}^{-3}$
- $\rho_p = 1800 \text{kg/m}^3$

Para el FBAR de AlN se utilizaron las constantes publicadas en [Dubois, Muralt, 1999](#), [Martin, Muralt, 2004](#) y [Wingqvist et al. 2009](#). Para la estreptavidina se utilizó el módulo elástico complejo publicado en [Wingqvist et al. 2009](#).

- $c_p = 120e9 \text{N/m}^2$
- $c_f = 0.28e6 \text{N/m}^2$
- $K_e^2 = 0.02$
- $\eta_f = 0.082 \text{kg/m/s}$
- $\eta_{agua} = 1e-3 \text{kg/m/s}$
- $p_p = 9.0270e-11 \text{A}^2 \text{s}^4 \text{kg}^{-1} \text{m}^{-3}$
- $\rho_p = 3260 \text{kg/m}^3$
- $\rho_f = 1060 \text{kg/m}^3$
- $\rho_{agua} = 1000 \text{kg/m}^3$

### 2.3.1 Modelo Circuital

Haciendo algunas aproximaciones, se pueden despreciar algunos términos de la ecuación (5) pudiéndose llegar a un circuito equivalente Butterworth-Van Dike (BVD) como el de la figura siguiente:

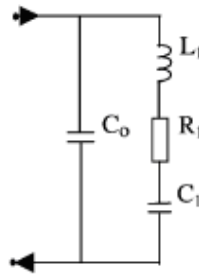


Figura 4: Circuito equivalente BVD para un material piezoeléctrico ([Wu et al. 2003](#)).

Estos componentes pueden ser calculados en base a los parámetros materiales y geométricos del material piezoeléctrico ([Cernosek, 1998](#); [Wu et al. 2003](#)), donde:

$$L_1 = \frac{1}{\omega_0^2 C_1} \quad (8)$$

$$C_1 = \frac{8C_0 K_e^2}{\pi^2} \quad (9)$$

$$R_1 = \frac{\eta_p}{c_p C_1} \quad (10)$$

$$C_0 = \frac{p_p A_e}{h_p} \quad (11)$$

con  $\omega_0$  la frecuencia angular característica,  $\eta_p$  la viscosidad del piezoeléctrico,  $p_p$  la permitividad del piezoeléctrico y  $A_e$  el área del electrodo.

Esta situación corresponde al caso en el cual el piezoeléctrico se encuentra sin perturbación, esto es, sin un cambio en la masa debido a la deposición de algún material. En

el caso en que la superficie del resonador se encuentre con alguna carga, esta nueva situación se puede modelar utilizando el circuito equivalente Butterworth-Van Dike Modificado (MBVD) (Cernosek, 1998). Esta nueva configuración agrega una impedancia en serie, la impedancia de movimiento creada por la carga en la superficie (ver ec.(12)). Pero estos cambios en la masa no aparecen directamente como cambios lineales en los parámetros eléctricos, sino que resultan de cambios en las propiedades acústicas en la interfase entre el resonador y el material depositado. Para el caso de espesores suficientemente pequeños y rígidos de deposición de material (módulo de corte  $G > 1 \text{MPa}$ ) (Lucklum et al. 2000, 2003), en donde estos se mueven en forma sincrónica con la superficie del material oscilante (Ballantine Jr. et al. 1997), la ecuación de esta impedancia es (Cernosek, 1998, ecuación (17) y (20) considerando  $\rho_s = \rho_f h_f$ ):

$$Z_m^L = \left( \frac{\pi}{4K_e^2 \omega_0 C_0} \right) \left( \frac{Z_L}{Z_p} \right) \quad (12)$$

con

$$Z_L = \omega_0 h_f \rho_f \quad (13)$$

$$Z_p = \sqrt{\rho_p c_p} \quad (14)$$

Esta nueva impedancia  $Z_m^L$  se implementa como una inductancia  $L_f$  en serie con  $L_1$ ,  $C_1$  y  $R_1$  y cuyo valor está dado por  $Z_m^L / \omega_0$ . El modelo del circuito eléctrico se implementó en *LTSpice* que es un simulador de circuitos electrónicos.

Se realizaron los siguientes ensayos:

i) *QCM sin material depositado*: se obtuvo la  $f_0$  y se la contrastó con la analítica y la del modelo FEM. Los valores de los componentes se obtuvieron en base a las dimensiones del cuarzo y sus parámetros materiales para un corte AT.

ii) *QCM con deposición de parylene*: para la masa depositada se utilizó el polímero parylene que es un material en donde la medición de su deposición es una potencial aplicación para una QCM. Su espesor de deposición se encuentra en un rango que va desde el micrón hasta los  $20 \mu\text{m}$  aproximadamente. Se contrastaron los corrimientos de frecuencia con los analíticos y los del modelo FEM.

Los valores de las constantes y parámetros utilizados fueron:

- |  |   |
|--|---|
| - $c_p = 2.901 \times 10 \text{ N/m}^2$  | - $A_e = \pi(4 \times 10^{-3})^2 \text{ m}^2$ |
| - $K_e^2 = 7.74 \times 10^{-3}$  | - $A_p = \pi(6 \times 10^{-3})^2 \text{ m}^2$ |
| - $\eta_f = 35 \times 10^{-3} \text{ kg/m/s}$  | - $P_p = 2649 \text{ kg/m}^3$                 |
| - $p_f = 3.982 \times 10^{-11} \text{ A}^2 \text{ s}^4 \text{ kg}^{-1} \text{ m}^{-3}$ | - $\rho_f = 1289 \text{ kg/m}^3$              |
| - $h_p = 330 \mu\text{m}$  |   |

## 2.4 Modelo de Elementos Finitos

Se modelaron tres geometrías diferentes para cada material piezoeléctrico. Se usó un sólido 3D elástico lineal piezoeléctrico para el cuarzo (trigonal 32), para el PVDF (ortorrómbico mm2) y para el AlN ( $35^\circ$  de inclinación del eje c). Para modelar el parylene se utilizó un sólido 3D elástico lineal y para la estreptavidina un sólido 3D viscoelástico.

Las ecuaciones que gobiernan el problema de piezoelectricidad son la relación constitutiva de la piezoelectricidad lineal

$$T = C \cdot S - e^T \cdot E \quad (15)$$

$$D = e \cdot S + \varepsilon \cdot E \quad (16)$$



y las ecuaciones de balance mecánico

$$\rho \ddot{u} = \nabla \cdot T \quad (17)$$

y eléctrico

$$\nabla \cdot D = 0 \quad (18)$$

donde

$$S = \nabla \cdot u \quad (19)$$

$$E = -\nabla \phi \quad (20)$$

con  $T$  (6x1) el vector de esfuerzo mecánico,  $S$  (6x1) el vector de deformación mecánica,  $E$  (3x1) el vector de campo eléctrico,  $D$  (3x1) el vector de desplazamiento eléctrico,  $C$  (6x6) la matriz elástica con  $E$  constante,  $\varepsilon$  (3x3) la matriz de coeficientes dieléctricos a deformación constante,  $e$  (6x3) la matriz de acoplamiento piezoeléctrico,  $u$  el vector de desplazamiento mecánico,  $\ddot{u} = \partial^2 u / \partial t^2$  la aceleración y  $\phi$  el potencial eléctrico.

La forma matricial del problema luego de la discretización espacial en el problema variacional (Abboud et al. 1998) es

$$M_{uu} \ddot{u} + C_{uu} \dot{u} + K_{uu} u + K_{u\phi} \Phi = F \quad (21)$$

$$K_{u\phi}^T u + K_{\phi\phi} \Phi = Q \quad (22)$$

donde

$$M_{uu} = \int_{\Omega} \rho N_u^T N_u d\Omega \quad (23)$$

$$K_{uu} = \int_{\Omega} (\nabla N_u)^T C (\nabla N_u) d\Omega \quad (24)$$

$$K_{u\phi} = \int_{\Omega} (\nabla N_u)^T e^T (\nabla N_{\phi}) d\Omega \quad (25)$$

$$K_{\phi\phi} = \int_{\Omega} (\nabla N_{\phi})^T \varepsilon^T (\nabla N_{\phi}) d\Omega \quad (26)$$

son las matrices elementales, con  $C_{uu}$  la matriz de amortiguamiento,  $F$  el vector de fuerzas mecánicas nodales,  $Q$  el vector de carga eléctrica nodal,  $u$  el vector de desplazamiento nodal y  $\Phi$  el vector de potencial nodal.

Para hallar los valores característicos del disco oscilante, se tiene que una solución general para la ecuación

$$M_{uu} \ddot{u} + C_{uu} \dot{u} + K_{uu} u - F = 0 \quad (27)$$

es:

$$u = \bar{u} e^{(i\omega t)} \quad (28)$$

Sustituyendo y despreciando los efectos de  $C_{uu}$ , queda el problema de valores característicos en donde el determinante

$$|-\omega^2 M + K| = 0 \quad (29)$$

arroja los  $n$  valores de  $\omega^2$  (Zienkiewicz and Taylor, 2000).

Se aplica el potencial eléctrico sobre las caras del material piezoeléctrico evitando modelar los electrodos, despreciando de esta forma los efectos mecánicos de las películas metálicas debido a su pequeño espesor (del orden de las pocas centenas de nanómetros). De esta forma se simplifica el modelo y se reducen los tiempos de simulación.

Se realizaron simulaciones para los tres materiales piezoeléctricos:

i) *QCM sin material depositado*: Se obtuvo la  $f_0$ . Para obtener el corte AT en el disco de cuarzo, se requiere un corte con una inclinación de  $35^\circ 15'$  respecto del eje óptico del cristal. Esto se logró utilizando una matriz elástica ( $C$ ) con sus coordenadas rotadas

(Yang<sup>b</sup>, 2006). Para la aplicación del potencial eléctrico sobre las caras del disco, se respetó el área de los electrodos sobre la zona central.

ii) *QCM con deposición de parylene*: para modelar esta situación se ubicó sobre una de las caras principales del disco de cuarzo otro disco de igual radio y espesor variable (rango 1-20um). Esta nueva película representa el material depositado, por lo que posee las propiedades del parylene. Se obtuvieron los corrimientos de frecuencia.

iii) *PVDF sin material depositado*: El disco piezoeléctrico trabaja en el modo de espesor (TE) de excitación, en donde el campo eléctrico está en dirección de la propagación de las ondas acústicas. Se obtuvo la  $f_0$ .

iv) *PVDF con deposición de parylene*: Se ubicó sobre una de las caras principales del disco de PVDF otro disco de igual radio y espesor variable representando el parylene depositado (rango 80-400nm). Se obtuvieron los corrimientos de frecuencia.

v) *AlN sin material depositado*: Se utilizó una inclinación de 35° del eje c. Se obtuvo la  $f_0$ .

Para la QCM los parámetros utilizados fueron los que se muestran en las siguientes tablas para la simetría del cristal clase 32 con rotación óptica de mano izquierda (Yang<sup>a</sup>, 2006):

<i>Matriz de elasticidad [Pa]</i>					
86.74e9	-8.25 e9	27.15 e9	-3.66 e9	0	0
-8.25 e9	129.77 e9	-7.42 e9	5.7 e9	0	0
27.15 e9	-7.42 e9	102.83 e9	9.92 e9	0	0
-3.66 e9	5.7 e9	9.92 e9	38.61 e9	0	0
0	0	0	0	68.81 e9	2.53 e9
0	0	0	0	2.53 e9	29.01 e9

Tabla 1: Matriz elástica del cuarzo.

<i>Matriz de acoplamiento piezoeléctrico [C/m<sup>2</sup>]</i>					
0.171	-0.152	-0.0187	0.067	0	0
0	0	0	0	0.108	-0.095
0	0	0	0	-0.0761	0.067

Tabla 2: Matriz de acoplamiento piezoeléctrico del cuarzo.

<i>Matriz dieléctrica</i>		
39.21		0
0	39.82	0.86
0	0.86	40.42

Tabla 3: Matriz dieléctrica del cuarzo.

Los valores de los parámetros utilizados para el parylene fueron:

- *Módulo de Young* = 2.7579Mpa
- *Relación de Poisson* = 0.4
- *Coefficiente de expansión termal* = 1.27e31/K

Para el FBAR de PVDF se utilizó el modo de sentido de corte (predominancia de  $d_{15}$ ,  $d_{24}$ ), donde las matrices usadas fueron las siguientes:

<i>Matriz de elasticidad [Pa]</i>					
3.7e9	1.47e9	1.23e9	0	0	0
1.47e9	3.2e9	1e9	0	0	0
1.23e9	1e9	1.51e9	0	0	0
0	0	0	0.55e9	0	0
0	0	0	0	0.59e9	0
0	0	0	0	0	0.7e9

Tabla 4: Matriz elástica del PVDF.

<i>Matriz de acoplamiento piezoeléctrico [C/m<sup>2</sup>]</i>					
0	0	0	0	-0.0159	0
0	0	0	-0.0127	0	0
0.0449	0.0129	-0.0061	0	0	0

Tabla 5: Matriz de acoplamiento piezoeléctrico del PVDF.

<i>Matriz dieléctrica</i>		
12	0	0
0	12	0
0	0	12

Tabla6: Matriz dieléctrica del PVDF.

Para el FBAR de AIN se utilizó el modo de sensado de corte determinado por la inclinación del eje c (35°), donde las matrices usadas fueron las siguientes:

<i>Matriz de elasticidad [Pa]</i>					
3.45e11	1.25e11	1.2e11	0	0	0
1.25e11	0	0	0	0	0
1.2e11	0	3.95e11	0	0	0
0	0	0	1.2e11	0	0
0	0	0	0	0	0
0	0	0	0	0	1.1e11

Tabla7: Matriz elástica del AIN.

<i>Matriz de acoplamiento piezoeléctrico [C/m<sup>2</sup>]</i>					
0	0	0	0	-0.48	0
0	0	0	0	0	0
-0.58	0	1.55	0	0	0

Tabla8: Matriz de acoplamiento piezoeléctrico del AIN.

<i>Matriz dieléctrica</i>		
10.2	0	0
0	0	0
0	0	10.2

Tabla9: Matriz dieléctrica del AIN.

Para hallar las frecuencias de resonancia de los dispositivos piezoeléctricos, se analizó la variación de la impedancia del cuerpo dentro de un rango de frecuencias (diagrama de Bode).

Para esto se impuso un potencial ( $V$ ) entre caras opuestas y se resolvió la distribución de cargas ( $I$ ) para el rango de frecuencias dado; con esta información se obtuvieron las admitancias ( $Y$ ) mediante la Ley de Ohm ( $Y=I/V$ ).

### 3 RESULTADOS ALCANZADOS

#### 3.1 QCM

##### 3.1.1 Modelo circuital

i) *QCMB sin material depositado*: el circuito equivalente (BVD) utilizado fue el siguiente:

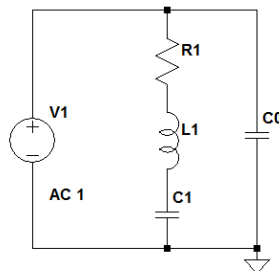


Figura 5: Circuito BVD implementado.

Los valores de los componentes eléctricos fueron:

- $R_1 = 0.005\Omega$
- $L_1 = 4.2083\mu\text{H}$
- $C_1 = 239.43\text{pF}$
- $C_0 = 38.163\text{nF}$

Con estos valores se obtuvieron una gráficas mostrando la admitancia equivalente (su análisis es más directo que el de la impedancia) y la fase del circuito en función de la frecuencia. Se observó que la frecuencia de resonancia se encuentra en los 4.99826MHz.

Analíticamente se obtuvo un valor de 4.99830MHz. Este valor presenta un error del 0.0008% respecto al obtenido con el modelo circuital.

ii) *QCMB en el rango de trabajo del parylene*: Se obtuvieron los corrimientos de frecuencia que se observan en la siguiente tabla:

$h_f$ [m]	$\Delta_{fa}$ [Hz]	$\Delta_{fc}$ [Hz]	$E$ [%]
1e6	7,37e3	7314	7,63e-1
4 e6	2,95e4	29130	1,19
7 e6	5,16e4	50640	1,84
1 e5	7,37e4	71880	2,47
1 e5	1,03e5	99780	3,30
1e5	1,25e5	120400	3,90
2e5	1,47e5	140750	4,51

Tabla10: Comparación de valores analíticos y gráficos para la deposición de Parylene, donde  $h_f$  es el espesor del film,  $m_f$  la masa del film,  $\Delta_{fa}$  el corrimiento analítico de la frecuencia,  $\Delta_{fc}$  el corrimiento del modelo circuital obtenido en forma gráfica de la frecuencia y  $E$  el error de  $\Delta_{fc}$  respecto de  $\Delta_{fa}$ .

El corrimiento en frecuencia del modelo circuital respecto al analítico para espesores de deposición de parylene entre  $1\mu\text{m}$ - $20\mu\text{m}$ , presentó un error promedio de 2.57% con una desviación estándar de 1.4%.

### 3.1.2 Modelo de Elementos Finitos

Para el disco de cuarzo se consideraron despreciables los efectos del amortiguamiento mecánico. Se utilizó interpolación cuadrática y elementos tetraédricos en la discretización e integración de 4to orden. Se resolvieron las variables desplazamiento ( $u_x$ ,  $u_y$ ,  $u_z$ ) y el potencial eléctrico ( $V$ ) y se realizó un análisis de respuesta en frecuencia.

El parylene depositado también se modeló de igual manera resolviendo la variable desplazamiento en las tres direcciones.

*i) QCMB sin material depositado:* Se encontró que la frecuencia de resonancia se aproxima a los 5.0302MHz. En la siguiente gráfica se observa dicho valor para un rango de frecuencias entre 4.5MHz y 5.5MHz:

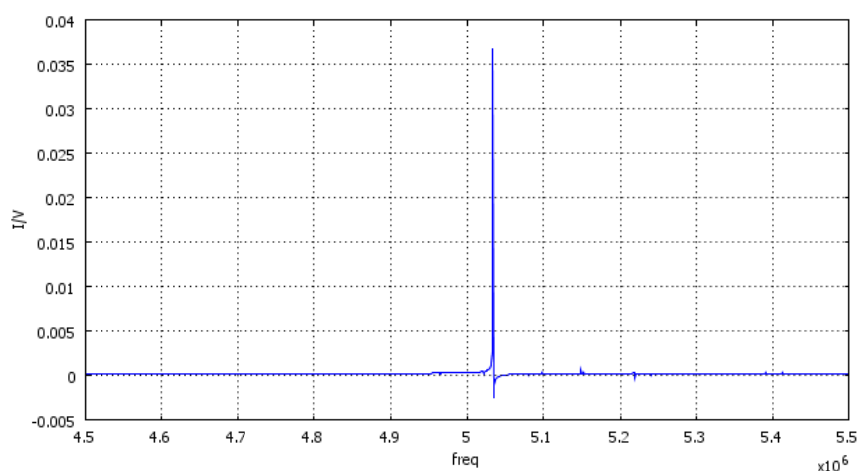


Figura 6: Frecuencia de resonancia para el cristal de cuarzo.

Esta  $f_0$  se halló para un mallado de 6600 elementos. Presentó un error de 0.64% respecto a la obtenida analíticamente.

*ii) QCMB con deposición de parylene:* Se utilizaron mallados que variaron entre 5000 y 8000 elementos, considerando los diferentes espesores de material depositado. Para un espesor de parylene de, por ejemplo, 1 $\mu$ m la variación de la admitancia eléctrica en función de la frecuencia se observa en la Figura 7. La  $f_0$  se encontró en aproximadamente 4.992MHz, estableciendo un corrimiento de frecuencia de 38.2kHz.

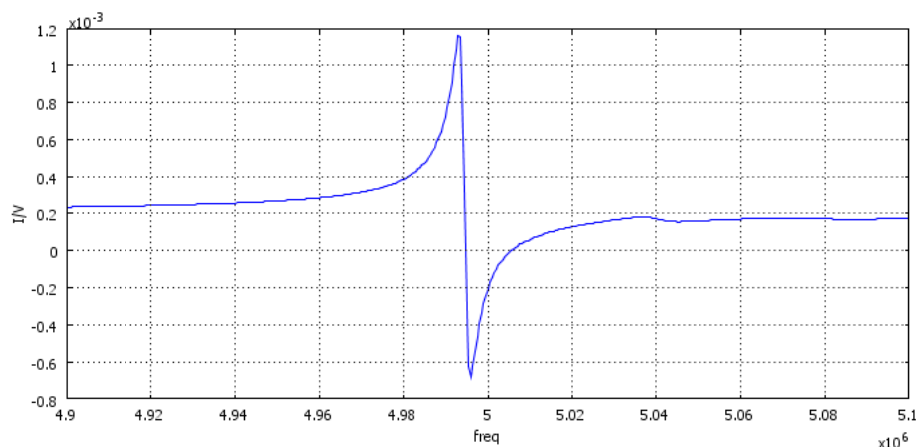


Figura 71: Frecuencia de resonancia para un espesor de deposición de Parylene de 8 $\mu$ m.

Este resultado se lo contrastó con el corrimiento analítico que arrojó un valor de 36.851kHz; esto significa un error del 3.6%. Para espesores de 1 $\mu$ m, 10 $\mu$ m, 15 $\mu$ m y 20 $\mu$ m se obtuvieron corrimientos de 8.2kHz, 73.2kHz, 109.2kHz y 145.2kHz respectivamente. La comparación con los valores analíticos se aprecian en Tabla 1 y Figura 8:

$h_f$ [m]	$\Delta_{fa}$ [Hz]	$\Delta_{ffem}$ [Hz]	E [%]
1e-6	7370.2	8200	11,26
5e-6	36851	38200	3,6
1e-5	73702	73200	0,68
1.5e-5	110550	109200	1,22
2e-5	147400	145200	1,49

Tabla 1: Comparación de los valores analíticos con los del modelo de elementos finitos para la deposición de Parylene, donde  $h_f$  es el espesor del film,  $\Delta_{fa}$  el corrimiento analítico de la frecuencia,  $\Delta_{ffem}$  el corrimiento de la frecuencia del modelo numérico y E el error de  $\Delta_{ffem}$  respecto de  $\Delta_{fa}$ .

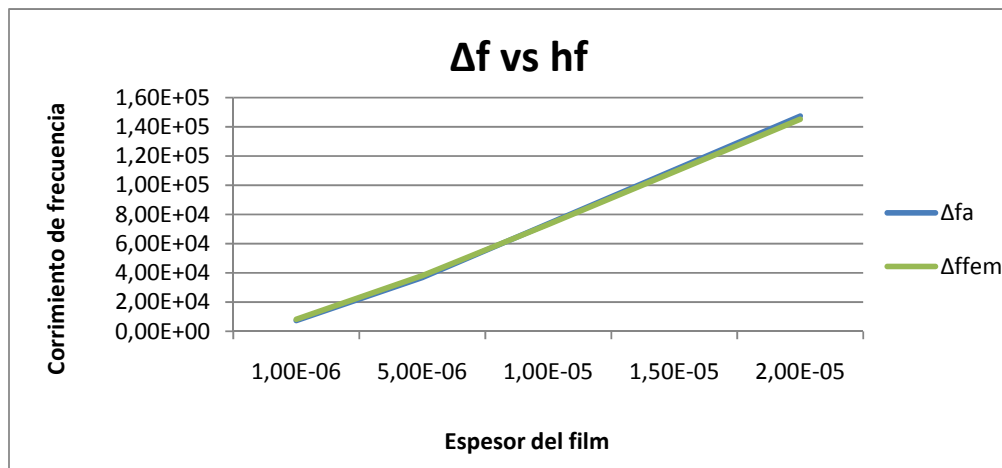


Figura 8: Corrimiento en frecuencia (analítico y numérico) para diferentes espesores de Parylene depositado

Estos resultados muestran un error promedio de 3.66% con una desviación estándar de 4.39%.

## 3.2 FBAR con PVDF

### 3.2.1 Macromodelo

Se implementaron las ecuaciones del modelo de Mason en *Matlab*. De esta forma se obtuvieron gráficas mostrando la admitancia equivalente y la fase del resonador en función de la frecuencia.

i) *PVDF sin material depositado*: Igualando a cero la impedancia  $Z_m^L$ , la  $Z_m^0$  en función de la frecuencia se muestra en la Figura 9. Se observó que la frecuencia de resonancia se encuentra en los 45.428MHz.

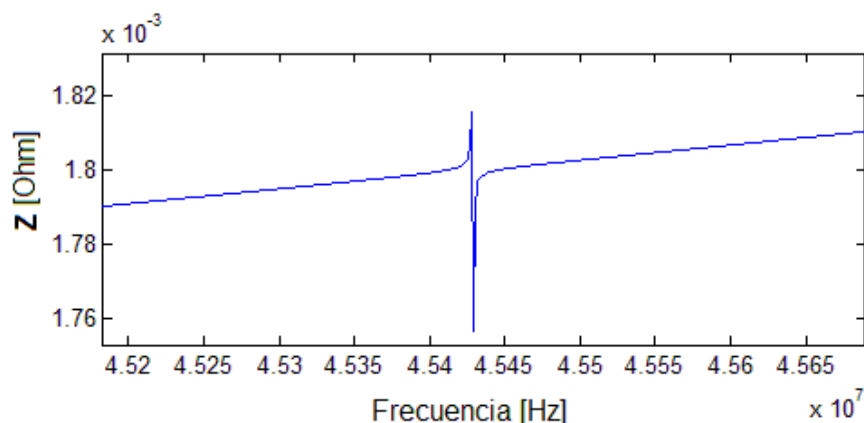


Figura 9: Frecuencia de resonancia para el PVDF con espesor de 10 $\mu$ m.

*ii) PVDF con deposición de parylene:* Se utilizó la ecuación (14) con la impedancia de carga  $Z_1$  igual a cero y la impedancia característica  $Z_0$  con las constantes del parylene. Para espesores de 80nm, 100nm, 200nm y 400nm se obtuvieron corrimientos de 260.2kHz, 325.3kHz, 650kHz y 1.301MHz respectivamente.

### 3.2.2 Modelo de Elementos Finitos

Para el disco PVDF también se consideraron despreciables los efectos del amortiguamiento mecánico. Se utilizó interpolación cuadrática y elementos tetraédricos en la discretización e integración de 4to orden. Se resolvieron las variables desplazamiento ( $u_x, u_y, u_z$ ) y el potencial eléctrico ( $V$ ) y se realizó un análisis de respuesta en frecuencia.

El parylene depositado también se modeló de igual manera resolviendo la variable desplazamiento en las tres direcciones.

*i) PVDF sin material depositado:* Se encontró que la frecuencia de resonancia se aproxima a los 45.8MHz. Esta  $f_0$  se halló para un mallado de 5000 elementos. Presentó un error de 0.82% respecto a la obtenida con el macromodelo.

*ii) PVDF con deposición de parylene:* Se utilizaron mallados que variaron entre 4000 y 6000 elementos, considerando los diferentes espesores de material depositado. Para espesores de 80nm, 100nm, 200nm y 400nm se obtuvieron corrimientos de 270kHz, 360kHz, 648kHz y 1.275MHz respectivamente. . La comparación con los valores del macromodelo se aprecian en Tabla12 y Figura 10:

$h_f$ [m]	$\Delta_{fm}$ [Hz]	$\Delta_{ffem}$ [Hz]	$E$ [%]
8e8	2,6e5	2,7e5	3,766
1e7	3,25e5	3,6e5	10,667
2e7	6,5e5	6,48e5	0,307
4e7	1,3e6	1,275e6	1,998

Tabla12: Comparación de los valores analíticos con los del modelo de elementos finitos para la deposición de Parylene, donde  $h_f$  es el espesor del film,  $\Delta_{fm}$  el corrimiento en frecuencia del macromodelo,  $\Delta_{ffem}$  el corrimiento de la frecuencia del modelo numérico y  $E$  el error de  $\Delta_{ffem}$  respecto de  $\Delta_{fm}$ .

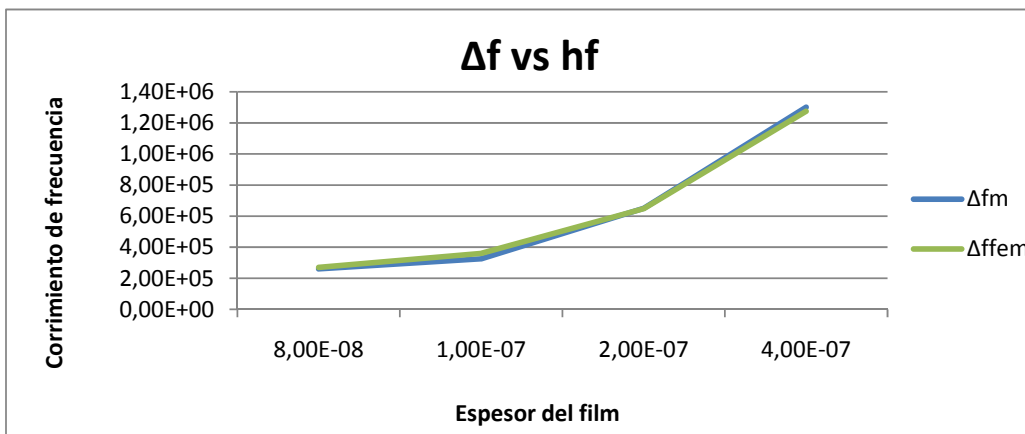


Figura 20: Corrimiento en frecuencia (Mason y numérico) para diferentes espesores de Parylene depositado

Estos resultados muestran un error promedio de 4.18% con una desviación estándar de 4.55%.

### 3.3 FBAR con AlN

#### 3.3.1 Macromodelo

Se implementaron las ecuaciones del modelo de Mason en *Matlab*. De esta forma se obtuvieron gráficas mostrando la admitancia equivalente y la fase del resonador en función de la frecuencia.

i) *AlN sin material depositado*: Igualando a cero la impedancia  $Z_m^L$ , la  $Z_m^0$  en función de la frecuencia se muestra en la Figura 11. Se observó que la frecuencia de resonancia se encuentra en los 1.5043GHz.

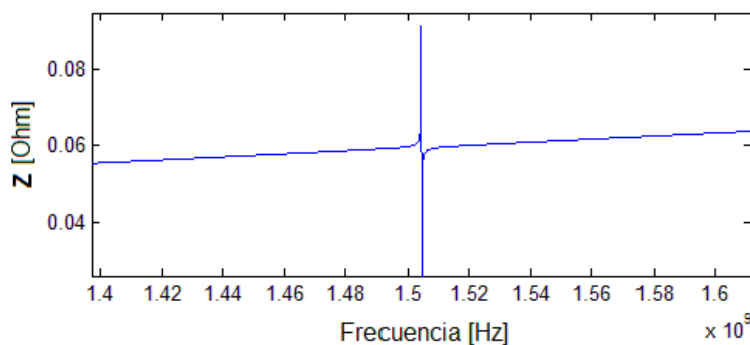


Figura 11: Frecuencia de resonancia para el AlN con espesor de 2μm.

ii) *AlN con deposición de proteínas*: Se utilizó la ecuación (14) con la impedancia de carga  $Z_1$  igual a cero y la impedancia característica  $Z_0$  con las constantes de la estreptavidina. Para espesores de 1nm, 5nm, 10nm, 25nm y 50nm se obtuvieron corrimientos de 200kHz, 1.1MHz, 2.4MHz, 6.1MHz y 12MHz respectivamente.

iii) *AlN con deposición de proteínas en un medio líquido*: Se utilizó la ecuación (14) con la impedancia de carga  $Z_1$  de la forma de la ecuación (13) y la impedancia característica  $Z_0$  con las constantes de la estreptavidina. Para espesores de 1nm, 5nm, 10nm, 25nm y 50nm se



obtuvieron corrimientos de 300kHz, 1.2MHz, 2.4MHz, 5.9MHz y 11.4MHz respectivamente. A continuación se aprecia la respuesta en frecuencia de la impedancia del resonador para el espesor de 50nm:

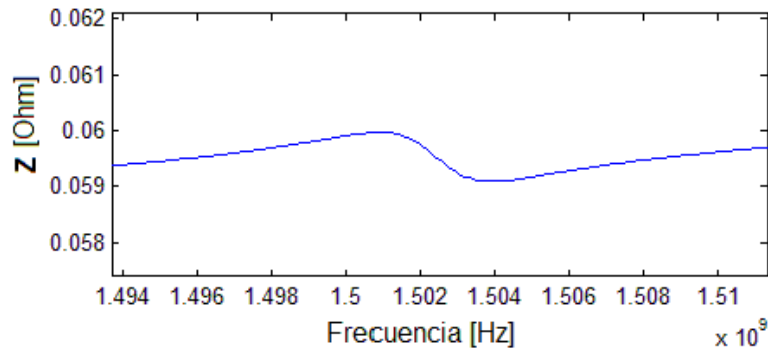


Figura 12: Frecuencia de resonancia para el AlN con deposición de 1nm de estreptavidina en un medio líquido.

### 3.3.2 Modelo de Elementos Finitos

Para la membrana rectangular de AlN también se consideraron despreciables los efectos del amortiguamiento mecánico. Se utilizó interpolación cuadrática y elementos tetraédricos en la discretización e integración de 4to orden. Se resolvieron las variables desplazamiento ( $u_x$ ,  $u_y$ ,  $u_z$ ) y el potencial eléctrico ( $V$ ) y se realizó un análisis de respuesta en frecuencia.

i) *AlN sin material depositado*: El modelado de este sistema se muestra en la Figura 13, en la cual se exhibe la respuesta vibracional de la membrana rectangular de AlN (izq.) con su respectivo mallado (der.).

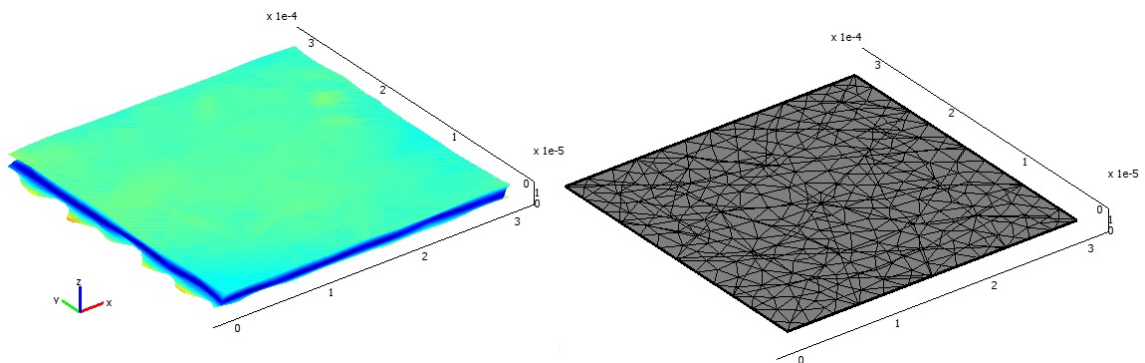


Figura 13: Respuesta vibracional de la membrana rectangular de AlN (izq.) y su respectivo mallado (der.).

Se encontró que la frecuencia de resonancia se aproxima a los 2.46GHz. Esta  $f_0$  se halló para un mallado de 4500 elementos. Presentó un error de 63.5% respecto a la obtenida con el macromodelo.

## 4 CONCLUSIONES

Para el caso de la QCM, la pequeña diferencia (0.64%) existente entre la frecuencia de resonancia obtenida con el modelo circuital, como así también la analítica, y la obtenida con el modelo de elementos finitos se debe a las distintas formas encontradas en la caracterización del cristal de cuarzo: en este último modelo las características del cuarzo se ven representadas de forma más completa por la matriz elástica, la dieléctrica y la matriz de acoplamiento

piezoeléctrico para un sólido. Los resultados obtenidos con el modelo circuital y el de elementos finitos, para la deposición de parylene entre  $1\mu\text{m}$ - $20\mu\text{m}$ , se aproximan con mucha exactitud a las soluciones analíticas encontradas (error promedio de 3.66%). Esto concibe herramientas confiables para modelar, dentro de su rango de trabajo, la deposición de parylene sobre el disco.

En el caso del FBAR con PVDF, se ha visto que la  $f_0$  obtenida con el modelo FEM se aproxima con mucha exactitud a la obtenida con el macromodelo (error de 0.82%). Para la deposición de parylene entre  $1\mu\text{m}$ - $20\mu\text{m}$  el error promedio entre modelos se encuentra cercano al 4%; teniendo en cuenta la simplicidad de implementación del macromodelo, queda expuesta la ventaja de su aplicación en ciertos casos particulares.

En el caso del FBAR con AlN, la notable diferencia en la frecuencia de resonancia del macromodelo respecto al modelo FEM (63.5%) se justifica en la influencia de las demás constantes elásticas de la matriz de elasticidad del modelo FEM.

Al incluir el medio líquido sobre la superficie del resonador se evidencia la disminución del factor de calidad de la respuesta en frecuencia debido a que la resonancia es de cuasi-corte, ya que posee componentes de resonancia longitudinal como se ha visto en la literatura.

Se concluyó que el macromodelo es una muy buena alternativa al modelo analítico y al circuital cuando los materiales utilizados no son lo suficientemente rígidos ni delgados.

## 5 RECONOCIMIENTOS

Los autores desean agradecer la ayuda financiera recibida por el Consejo Nacional de Investigaciones Científicas y Técnicas (CONICET), Argentina.

## REFERENCIAS

- Abboud, N. et al., Finite Element Modeling for Ultrasonic Transducers, Proc. SPIE Int. Symp. Medical Imaging, San Diego, 1998.
- Ballantine Jr., D. et al., *Acoustic Wave Sensors: Theory, Design, & Physico-Chemical Applications (Applications of Modern Acoustics)*, Academic Press, 1997.
- Bjurström, J. et al., Dependence Of The Electromechanical Coupling On The Degree Of Orientation Of C-Textured Thin AlN Films, *IEEE Transactionson Ultrasonics, Ferroelectrics and Frequency Control*, Vol. 51, 1347-1353, 2004.
- Bjurström, J. et al., Synthesis of Textured Thin Piezoelectric AlN Films With a Nonzero C-Axis Mean Tilt for the Fabrication of Shear Mode Resonators, *IEEE Transactions On Ultrasonics, Ferroelectrics, And Frequency Control*, Vol. 53, No. 11, 2006.
- Bjurström, J. et al, Temperature Compensation of Liquid FBAR Sensors, *Journal of Micromechanics and Microengineering*, Vol. 17, 651-658, 2007.
- Bu, G. et al., Surface Acoustic Wave Velocity in Single-Crystal AlN Substrates, *IEEE Transactions On Ultrasonics, Ferroelectrics, And Frequency Control*, Vol. 53, No. 1, 2006.
- Buck, R. et al., Piezoelectric chemical sensors, *Pure Appl. Chem.*, Vol. 76, No. 6, 1139-1160, 2004.
- Carlotti, G. et al., Comparative Study Of The Elastic Properties Of Polycrystalline Aluminum Nitride Films On Silicon By Brillouin Light Scattering, *Thin Solid Films* 310:34-38, 1997.
- Cernosek R., Comparison of Lumped-Element and Transmission-Line Models for Thickness-Shear-Mode Quartz Resonator Sensors. *IEEE transactions on ultrasonics, ferroelectrics, and frequency control*, vol. 45, no. 5, 1998.
- Dubois, M., Muralt, P., Properties Of Aluminum Nitride Thin Films For Piezoelectric Transducers And Microwave Filter Applications, *Applied Physics Letters*, Vol. 74, No. 20,

- 1999.
- Holmquist, T. et al., Constitutive Modeling Of Aluminum Nitride For Large Strain, High-Strain Rate, And High-Pressure Applications, *International Journal of Impact Engineering* 25:211-231, 2001.
- Hung, V. et al., High-frequency one-chip multichannel quartz crystal microbalance fabricated by deep RIE, *Sensors and Actuators A*, 108:91–96, 2003.
- Koucky, M., Piezoelectric Polymer Microstructures For Biomedical Applications, MS Thesis, The Ohio State University, 2009.
- Kurosawa, C. et al., Computational Simulation of Vibration Displacement on Piezoelectric Quartz Crystal Using Finite Element Method, IEEE International Ultrasonics, Ferroelectrics, and Frequency Control Joint 50th Anniversary Conference, 2004.
- Lucklum, R., Hauptmann, P., The quartz crystal microbalance: mass sensitivity, viscoelasticity and acoustic amplification, *Sensors and Actuators B*, 70:30–36, 2000.
- Lucklum, R., Hauptmann, P., Transduction Mechanism of acoustic-wave based chemical and biochemical sensors, *Meas. Sci. Technol.*, 14:1854-1864, 2003.
- Martin, F., Muralt, P., Thickness Dependence of the Properties Of Highly C-Axis Textured AlN Thin Films, *J. Vac. Sci. Technol. A*, 22:2, 2004.
- Measurement Specialties, Inc., *Piezo Film Sensors-Technical Manual*, 1999.
- Mecea, V., From Quartz Crystal Microbalance to Fundamental Principles of Mass Measurements, *Analytical Letters*, 38:753-767, 2005.
- Myers, O. et al., Designing Piezoelectric Interdigitated Microactuators using COMSOL, Excerpt from the Proceedings of the COMSOL Conference, 2008.
- Ngalamou, L. et al., Analysis of the sensitivity and the temperature influence of a static force sensor based on a PVDF resonator, *Sensors and Actuators A*, 57:173-177, 1996.
- Ohigashi, H., Electromechanical Properties Of Polarized Polyvinylidene Fluoride Films As Studied By The Piezoelectric Resonance Method, *Journal of Applied Physics*, Vol. 47, No. 3, 1976.
- O'Sullivan, C., Guilbault, G., Commercial quartz crystal microbalances – theory and applications, *Biosensors & Bioelectronics*, 14:663–670, 1999.
- Roh, Y. et al., Characterization of All the Elastic, Dielectric, and Piezoelectric Constants of Uniaxially Oriented Poled PVDF Films, *IEEE*, 2002.
- Rosenbaum, J., *Bulk Acoustic Wave Theory and Devices*, Artech House, Inc., 2000.
- Sherrit, S. et al., Comparison of the Mason and KLM Equivalent Circuits for Piezoelectric Resonators in the Thickness Mode, *IEEE Ultrasonics Symposium*, 1999.
- Shimada, K. et al., First-Principles Study On Electronic And Elastic Properties of BN, AlN, and GaN, *Journal of Applied Physics*, Vol. 84, No. 9, 1998.
- Sokhanvar, S. et al., Investigating The Effect Of The Orthotropic Property Of Piezoelectric PvdF, *Transactions of the CSME/SCGM*, Vol. 31, No. 1, 2007.
- Vives, A., *Piezoelectric Transducers and Applications*, 2<sup>nd</sup>. Edition, Springer, 2008.
- Wingqvist, G. et al., Shear mode AlN thin film electro-acoustic resonant sensor operation in viscous media, *Sensors and Actuators B*, 123:466–473, 2006.
- Wingqvist, G. et al., Immunosensor utilizing a shear mode thin film bulk acoustic sensor, *Sensors and Actuators B*, 127: 248–252, 2007.
- Wingqvist, G. et al., On The Applicability Of High Frequency Acoustic Shear Mode Biosensing InView Of Thickness Limitations Set By The Film Resonance, *Biosensors and Bioelectronics*, 24:3387–3390, 2009.
- Wu, D., Tsai, Y., Yen, Y., Robust design of quartz crystal microbalance using finite element and Taguchi method, *Sensors and Actuators B*, 92:337–344, 2003.
- Yang<sup>a</sup>, J., *Analysis of Piezoelectric Devices*, World Scientific Publishing Co. Pte. Ltd., 2006.

Yang<sup>b</sup>, J., *The mechanics of piezoelectric structures*, World Scientific Publishing Co. Pte. Ltd., 2006.

Zienkiewicz, O., and Taylor, R., *The finite element method*, volume I. Butterworth-Heinemann, 2000.