

MICROBALANZA DE CRISTAL DE CUARZO: DISEÑO Y SIMULACIÓN

Martín A. Zalazar^a, Fabio A. Guarnieri^{a,b}

^aFacultad de Ingeniería, Bioingeniería, UNER, 3101, Oro Verde, Argentina.

^bCIMEC, INTEC (UNL-CONICET), PTLC, El pozo, 3000, Santa Fe, Argentina

Palabras clave: Microbalanza, microfabricación, ecuación de Sauerbrey, piezoelectricidad.

Resumen. *Propósito:* Las microbalanzas son extremadamente sensibles a cambios de masa y permiten medir películas muy delgadas típicas de los procesos de microfabricación (MEMS y semiconductores). Una aplicación importante es la medición de deposición del polímero parylene, utilizado en dispositivos médicos. Los métodos numéricos permiten introducir efectos mecánicos no contemplados en los métodos analíticos. *Metodología:* Se desarrollaron dos modelos: uno circuital y otro numérico (FEM). Se eligió un espesor de cristal que genere una frecuencia de resonancia de aproximadamente 5MHz. En el modelo circuital se utilizó el circuito equivalente Butterworth-Van Dike modificado implementándolo en Simulink. En el modelo de FEM se usó un sólido 3D elástico lineal piezoeléctrico para el cuarzo (trigonal 32). El parylene fue modelado como un material elástico lineal isotrópico. La respuesta en frecuencia fue obtenida para ambos modelos. *Resultados:* En el modelo circuital la frecuencia de resonancia presentó un error de 0.18% respecto a la obtenida analíticamente para un espesor de cuarzo de 330 μ m. Su corrimiento en frecuencia para espesores de deposición de parylene entre 4 μ m-20 μ m presentó un error promedio de 4.83% con una desviación estándar de 2.9% respecto al analítico. Para el modelo numérico, la frecuencia de resonancia mostró un error de 14.74% respecto a la obtenida analíticamente para el mismo espesor de cuarzo. El corrimiento en frecuencia para espesores de deposición de parylene entre 1 μ m-20 μ m presentó un error promedio de 10.4% con una desviación estándar de 3% respecto al analítico. *Conclusiones:* Los resultados obtenidos con el modelo circuital conciben una herramienta confiable para modelar la deposición de parylene sobre el disco de cuarzo. Los valores obtenidos con el modelo de elementos finitos para esta deposición muestran la linealidad existente entre el espesor del parylene y el cambio en frecuencia como lo indica la ecuación de Sauerbrey.

1 INTRODUCCIÓN

La microbalanza de cristal de cuarzo (QCMB, por sus siglas en inglés) es un dispositivo altamente sensible a las pequeñas variaciones de masa que en ella ocurren (Figura 1). Esto se debe a los cambios que experimenta la frecuencia de resonancia (f_0) del cristal de cuarzo, material piezoeléctrico, al hacerle su masa. Algunas microbalanzas poseen una resolución de hasta $0,05\text{ng}$ (O'Sullivan et al. 1999). Las QCMBs 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).

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 Δf es el cambio en la f_0 , Δm 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.

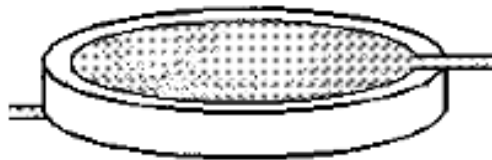


Figura 1: Esquema del cristal de cuarzo de una microbalanza.

Las QCMBs 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 la QCMB presenta. 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 QCMB (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 (Figura 2). 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. 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.

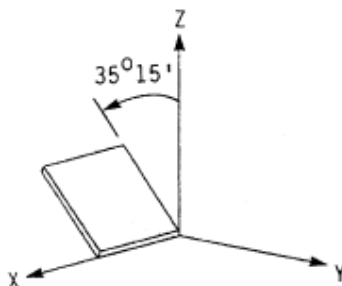


Figura 2: Corte AT (O'Sullivan et al. 1999).

En este trabajo se realizó un análisis del comportamiento de una QCMB para diferentes cantidades de material depositado en su superficie. Se llevó a cabo su diseño y también su simulación mediante dos modelos: circuital y de elementos finitos. Estos modelos fueron contrastados con un modelo analítico. El modelo numérico considera aspectos constructivos de la QCMB, incapaces de ser abordados con el modelo analítico utilizado.

2 METODOLOGÍA

2.1 Microfabricación

Las dimensiones del dispositivo diseñado se basaron en las más usuales utilizadas en diferentes publicaciones (Wu et al. 2003; Mecea et al. 2005). Para el espesor del cristal se optó por uno que produzca una frecuencia de resonancia cercana a los 5MHz, asegurando de este modo un espesor no tan delgado (ver ec. (2)), disminuyendo así su fragilidad y evitando la cercanía de modos espurios de vibración al modo fundamental (Hung et al. 2003). Las dimensiones utilizadas son: diámetro cuarzo 12mm, espesor cuarzo 330 μ m, diámetro electrodo 8mm y espesor electrodo 10 μ m.

2.2 Modelo Analítico (Sauerbrey)

Como lo establece la ecuación de Sauerbrey (1959), el cambio en la frecuencia de resonancia del cristal de cuarzo debido a la deposición de un material, para el modo vibracional de corte es (Lucklum et al. 2000; Mecea, 2005):

$$\Delta_f = \frac{f_0 \rho_f h_f}{\rho_q h_q} \quad (2)$$

donde ρ_q es la densidad del cuarzo, ρ_f la densidad del film, h_f el espesor del film y h_q el espesor del cuarzo. Este modelo se empleó para validar los dos modelos que siguen a continuación.

2.3 Modelo Circuital

Cualquier estructura mecánica puede ser simplificada a un sistema masa-resorte-amortiguador y eventualmente ser reemplazado por un circuito equivalente. Esta analogía se presenta también en la QCMB, pudiéndose llegar a un circuito equivalente Butterworth-Van Dike (BVD) como el de la figura siguiente:

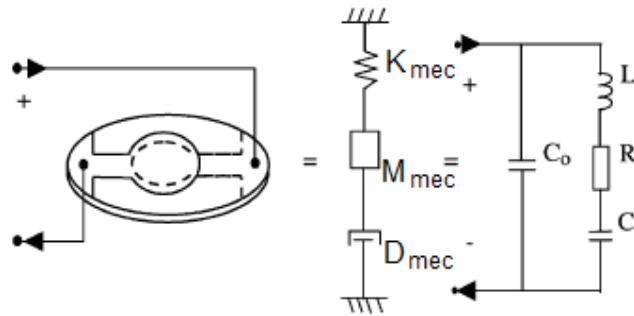


Figura 3: Circuito equivalente BVD para una QCMB (Wu et al. 2003).

Como se observa en la figura, la masa M_{mec} , la constante del resorte K_{mec} , el coeficiente de amortiguamiento D_{mec} y los electrodos de la QCMB son reemplazados respectivamente por la inductancia L_1 (representando las vibraciones que mueven cargas en el espacio), la capacitancia dinámica C_1 (representando la separación de cargas de las vibraciones simétricas), la resistencia R_1 (representando las pérdidas de energía) y la capacitancia estática C_0 (representando la separación de cargas en los electrodos). Estos componentes pueden ser calculados en base a los parámetros materiales y geométricos del cristal de cuarzo (Cernosek, 1998; Wu et al. 2003), donde:

$$L_1 = \frac{1}{\omega_0^2 C_1} \quad (3)$$

$$C_1 = \frac{8C_0 K_e^2}{\pi^2} \quad (4)$$

$$R_1 = \frac{\eta_q}{c_q C_1} \quad (5)$$

$$C_0 = \frac{p_q A_e}{h_q} \quad (6)$$

con ω_0 la frecuencia angular característica, c_q el módulo de corte del cuarzo, K_e la constante de acoplamiento electromecánico, η_q la viscosidad del cuarzo, p_q la permitividad del cuarzo, A_e el área del electrodo y h_q el espesor del cuarzo.

La frecuencia de resonancia analítica para este circuito está dada por la siguiente ecuación (Cernosek, 1998, ecuación (14) considerando $\omega_0 = 2\pi f$ y la primer armónica):

$$f_0 = \frac{1}{2h_q} \sqrt{\frac{c_q}{\rho_q}} \sqrt{1 - \frac{8K_e^2}{\pi^2}} \quad (7)$$

con c_q el módulo de corte del cuarzo.

Esta situación corresponde al caso en el cual la QCMB 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. (8)). 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 cristal resonador y el material depositado. Para el caso de pequeños y rígidos espesores de deposición de material (módulo de corte $G > 1 \text{MPa}$) (Lucklum et al. 2000; Lucklum et al. 2003), la ecuación de esta impedancia es

(Cernosek, 1998, ecuación (17) y (20) considerando $\rho_s = \rho_f h_f$):

$$Z_m^L = \left(\frac{\pi}{4K_e^2 \omega_0 C_0} \right) \left(\frac{Z_L}{Z_q} \right) \quad (8)$$

con

$$Z_L = \omega_0 h_f \rho_f \quad (9)$$

$$Z_q = \sqrt{\rho_f c_q} \quad (10)$$

donde Z_L es la impedancia de carga acústica y Z_q la impedancia acústica característica. El modelo del circuito eléctrico se implementó en *Simulink* que es una herramienta de *Matlab*.

Se realizaron los siguientes ensayos: i) *QCMB sin material depositado*: se obtuvo la f_0 y se la contrastó con la analítica (ver ec. (7)). Los valores de los componentes se obtuvieron en base a las dimensiones del cuarzo y sus parámetros materiales para un corte AT. ii) *QCMB en el rango de trabajo del 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 QCMB. Su espesor de deposición se encuentra en un rango que va desde el micrón hasta los 20 μm aproximadamente. Se contrastaron los corrimientos de frecuencia del modelo con los analíticos (ver ec. (2)).

Los valores de los parámetros utilizados fueron:

- | | |
|--|---|
| - $c_q = 2.947 \times 10^4 \text{ N/m}^2$ | - $A_e = \pi(4 \times 10^{-3})^2 \text{ m}^2$ |
| - $K_e = 7.74 \times 10^{-3}$ | - $A_q = \pi(6 \times 10^{-3})^2 \text{ m}^2$ |
| - $\eta_q = 35 \times 10^{-3} \text{ kg/m/s}$ | - $\rho_q = 2651 \text{ kg/m}^3$ |
| - $p_q = 3.982 \times 10^{-11} \text{ A}^2 \text{ s}^4 \text{ kg}^{-1} \text{ m}^{-3}$ | - $\rho_f = 1289 \text{ kg/m}^3$ |
| - $h_q = 330 \mu\text{m}$ | |

2.4 Modelo de Elementos Finitos

Se usó un sólido 3D elástico lineal piezoeléctrico para el cuarzo (trigonal 32). Las ecuaciones que gobiernan este problema de piezoelectricidad son la relación constitutiva de la piezoelectricidad lineal

$$T = C \cdot S - e^T \cdot E \quad (11)$$

$$D = e \cdot S + \varepsilon \cdot E \quad (12)$$

y las ecuaciones de balance mecánico

$$\rho \ddot{u} = \nabla \cdot T \quad (13)$$

y eléctrico

$$\nabla \cdot D = 0 \quad (14)$$

donde

$$S = \nabla \cdot u \quad (15)$$

$$E = -\nabla \phi \quad (16)$$

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, ε (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 ϕ el potencial eléctrico.

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

$$M_{uu}\ddot{u} + C_{uu}\dot{u} + K_{uu}u + K_{u\phi}\Phi = F \quad (17)$$

$$K_{u\phi}^T u + K_{\phi\phi}\Phi = Q \quad (18)$$

donde

$$M_{uu} = \int_{\Omega} \rho N_u^T N_u d\Omega \quad (19)$$

$$K_{uu} = \int_{\Omega} (\nabla N_u)^T C (\nabla N_u) d\Omega \quad (20)$$

$$K_{u\phi} = \int_{\Omega} (\nabla N_u)^T e^T (\nabla N_{\phi}) d\Omega \quad (21)$$

$$K_{\phi\phi} = \int_{\Omega} (\nabla N_{\phi})^T \varepsilon^T (\nabla N_{\phi}) d\Omega \quad (22)$$

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 Φ el vector de potencial nodal.

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

$$M_{uu}\ddot{u} + C_{uu}\dot{u} + K_{uu}u - F = 0 \quad (23)$$

es:

$$u = \bar{u} e^{(i\omega t)} \quad (24)$$

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

$$|-\omega^2 M + K| = 0 \quad (25)$$

arroja los n valores de ω^2 (Zienkiewicz and Taylor, 2000).

Se aplica el potencial eléctrico sobre las caras del disco evitando modelar los electrodos pero respetando su área (donde se aplica el potencial), despreciando de esta forma los efectos mecánicos de las películas metálicas. De esta forma se simplifica el modelo y se reducen los tiempos de simulación sin perder exactitud.

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 haciendo rotar $35^{\circ}15'$ el eje coordenado Z y X sobre el Y . Este nuevo cristal de cuarzo presenta en estado estacionario vibraciones de corte como se observa en la siguiente figura:

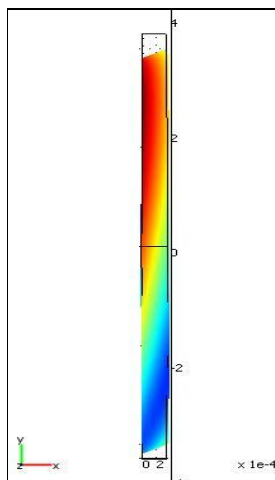


Figura 4: Vibraciones de corte de un disco de cuarzo en estado estacionario.

Se realizaron dos análisis, uno para el cristal de cuarzo y otro para el cristal con deposición de parylene: i) *QCMB sin material depositado*: para el cuarzo los parámetros ingresados fueron la matriz de rigidez, la piezoeléctrica y la dieléctrica. Se obtuvo la f_0 y se la contrastó con la analítica (ver ec. (7)). ii) *QCMB con material depositado*: para modelar esta situación se ubicó sobre una de las caras principales del disco de cuarzo otro disco de igual radio y espesor eventualmente variable. Esta nueva película representa el material depositado, por lo que posee las propiedades del parylene. Se contrastaron los corrimientos de frecuencia del modelo con los analíticos (ver ec. (2)).

Para el cuarzo, los parámetros utilizados fueron los que se muestran en las siguientes tablas para la simetría del cristal clase 32:

Matriz de rigidez [1/Pa]					
12.77e-12	-1.79e-12	-1.22e-12	-4.5e-12	0	0
-1.79e-12	12.77e-12	-1.22e-12	4.5e-12	0	0
-1.22e-12	-1.22e-12	9.6e-12	0	0	0
-4.5e-12	4.5e-12	0	20.04e-12	0	0
0	0	0	0	20.04e-12	-9.6e-12
0	0	0	0	-9.6e-12	29.1e-11

Tabla 1: Matriz de rigidez.

Matriz piezoeléctrica [C/N]					
-2.3e-12	2.3e-12	0	-0.67e-12	0	0
0	0	0	0	0.67e-12	4.6e-12
0	0	0	0	0	0

Tabla 2: Matriz piezoeléctrica.

Matriz dieléctrica		
4.52		0
0	4.52	0
0	0	4.68

Tabla 3: Matriz dieléctrica.

Los valores de los parámetros utilizados para el parylene fueron:

- *Módulo de Young* (E) = 2.7579 Mpa
- *Relación de Poisson* (ν) = 0.4
- *Coefficiente de expansión termal* (α) = 1.27e3 1/K

Para hallar las frecuencias de resonancia del disco de cuarzo, 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 impedancias (Z) a través de la Ley de Ohm ($Z=V/I$).

3 RESULTADOS ALCANZADOS

3.1 Modelo Circuitual

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

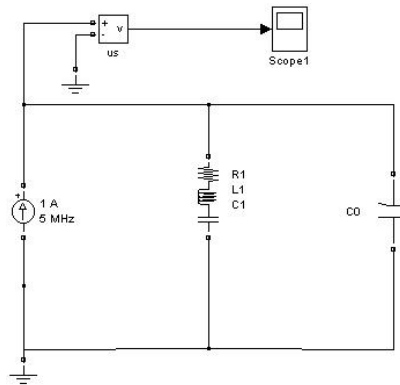


Figura 5: Circuito BVD implementado.

Los valores de los componentes eléctricos fueron:

- $R_1 = 31.2104\Omega$
- $L_1 = 0.0262H$
- $C_1 = 3.8053e-014F$
- $C_0 = 6.0654e-012F$

Con estos valores se obtuvo una gráfica (Figura 6) que muestra la impedancia equivalente y la fase del circuito en función de la frecuencia. Se observa que la frecuencia de resonancia da un valor cercano a los 5.045MHz.

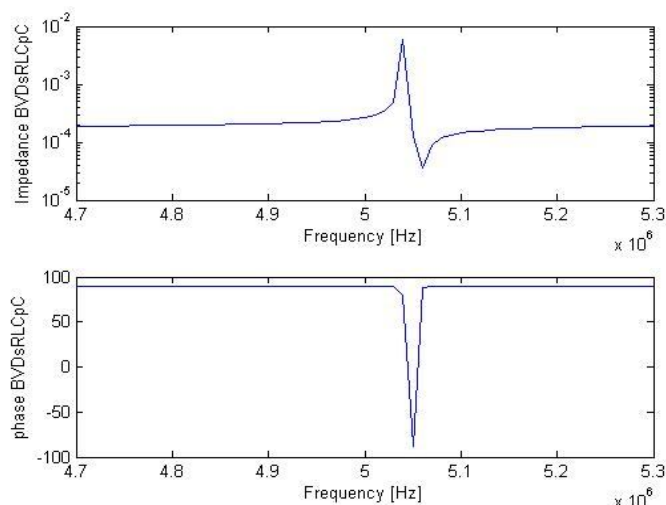


Figura 6: Circuito equivalente sin masa depositada.

Analíticamente con la ec. (7) se obtuvo un valor de 5.0359MHz. Este valor difiere en un 0.18% del obtenido con el modelo circuital.

ii) *QCMB en el rango de trabajo del parylene*: el espesor de deposición del parylene se encuentra en un rango que va desde 1 μ m hasta los 20 μ m aproximadamente. Se obtuvieron los corrimientos de frecuencia que se observan en la [Tabla 4](#):

hf [m]	Δ_{fa} [Hz]	Δ_{fg} [Hz]	E [%]
4,00E-06	2,97E+04	2,70E+04	9,03
7,00E-06	5,19E+04	5,20E+04	0,12
1,00E-05	7,42E+04	7,00E+04	5,66
1,40E-05	1,04E+05	1,00E+05	3,74
1,70E-05	1,26E+05	1,20E+05	4,87
2,00E-05	1,48E+05	1,40E+05	5,66

Tabla 4: 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, Δ_{fa} el corrimiento analítico de la frecuencia, Δ_{fg} el corrimiento de la frecuencia del modelo circuital obtenido en forma gráfica y E el error de Δ_{fg} respecto de Δ_{fa} .

El corrimiento en frecuencia del modelo circuital respecto al analítico (ver ec. (2)), para espesores de deposición de parylene entre 4 μ m-20 μ m, presentó un error promedio de 4.83% con una desviación estándar de 2.9%. La estimación gráfica de la frecuencia de resonancia para el espesor de deposición de 1 μ m se torna delicada ante un cambio tan pequeño en la frecuencia. Mejores resultados se podrían obtener con la utilización de un software para circuitos electrónicos más robusto.

3.2 Modelo de Elementos Finitos

Para el disco de cuarzo se consideraron despreciables los efectos del amortiguamiento mecánico (matriz C_{uu} en ec. (17)). 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 material depositado también se modeló de igual manera resolviendo la variable desplazamiento en las tres direcciones.

Se diseñó el disco contemplando las dimensiones establecidas anteriormente: 8mm de diámetro para los electrodos y 12mm para el cuarzo, aplicando el potencial eléctrico sobre las caras del cristal considerando las dimensiones de los electrodos.

i) *QCMB sin material depositado*: en una primera instancia se hizo un modelo del cristal de cuarzo aplicando el potencial eléctrico sobre toda la superficie de las caras del disco (sobre los 12mm de diámetro). Se encontró que la frecuencia de resonancia se aproxima a los 5.7785MHz.

Para obtener un modelo un tanto más riguroso, se diseñó un nuevo disco contemplando las dimensiones originales, esto es, 8mm de diámetro para los electrodos y 12mm para el cuarzo, aplicando el potencial eléctrico sobre las caras del cristal considerando las dimensiones de los electrodos.

En estado estacionario, este nuevo modelo también presentó vibraciones de corte como se muestra en la [Figura 7](#).

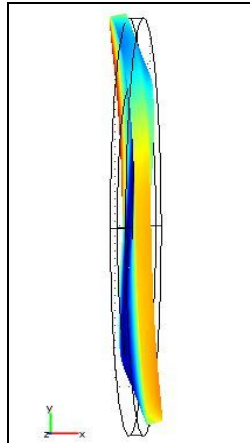


Figura 7: Vibraciones de corte del nuevo disco de cuarzo en estado estacionario.

La frecuencia de resonancia para este material se observa en la siguiente gráfica para un rango de frecuencias entre 4MHz y 7MHz:

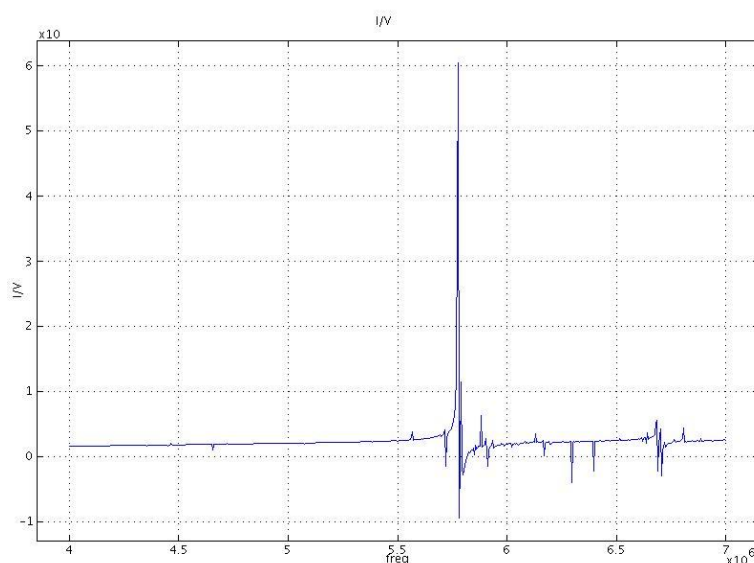


Figura 8: Frecuencia de resonancia para el cristal de cuarzo.

Como lo muestra este diagrama de bode, la frecuencia de resonancia para este modelo se halla en aproximadamente 5.7785MHz, que es el mismo valor que se obtuvo para el modelo anterior. Como se esperaba, la frecuencia de resonancia del cristal, teniendo en cuenta sólo sus parámetros geométricos, depende del espesor del disco.

Esta f_0 se halló para un mallado de 3000 elementos. Se contrastó este resultado con el valor de f_0 para un mallado de 7200 elementos, arrojando un error cercano al 0.67%; considerando este bajo valor, los modelos utilizaron mallas con cantidades cercanas a los 3000 elementos, disminuyendo así el tiempo de cálculo. Esta frecuencia de resonancia presentó un error de 14.74% respecto a la obtenida analíticamente (ver ec. (7)).

ii) *QCMB con material depositado*: para modelar esta situación se ubicó sobre una de las caras principales del disco de cuarzo otro disco de igual radio y espesor eventualmente variable. Esta nueva película representa el material depositado, por lo que posee las propiedades del Parylene. Como en el caso del cuarzo, este material no se encuentra dentro de la librería de materiales, por lo que sus parámetros se le tuvieron que ingresar manualmente.

El modelado de este nuevo sistema se muestra en la Figura 9, en la cual se exhibe el aspecto físico del disco con material depositado, su respectivo mallado y la respuesta vibracional.

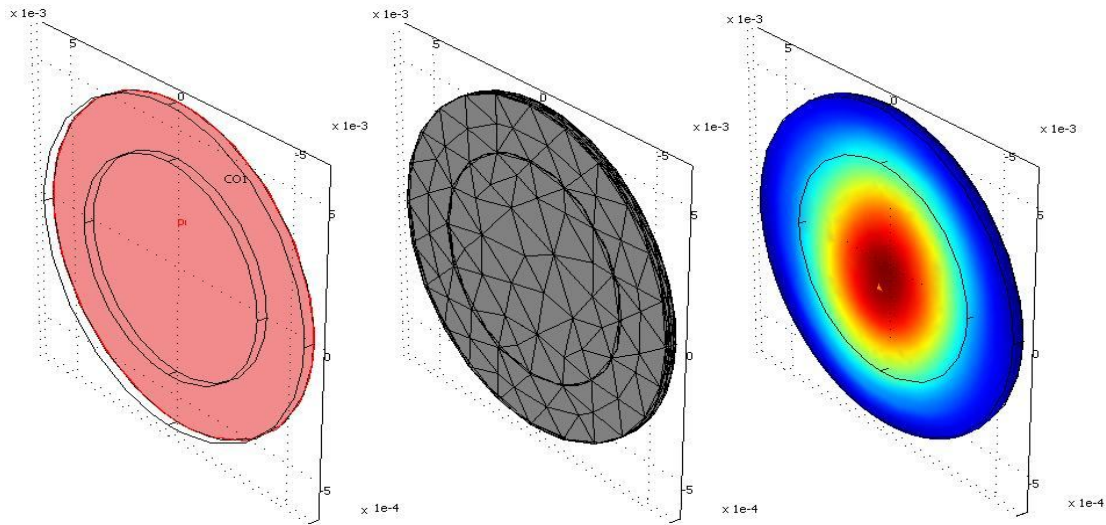


Figura 9: Aspecto físico del disco de cuarzo con deposición de $20\mu\text{m}$ de parylene (rojo)(izq.), mallado (centro) y respuesta vibracional (der.).

Para un espesor de parylene de $1\mu\text{m}$ la variación de la impedancia eléctrica en función de la frecuencia se observa en la Figura 10. La f_0 se encontró en aproximadamente 5.7705MHz , estableciendo un corrimiento de frecuencia de 8kHz .

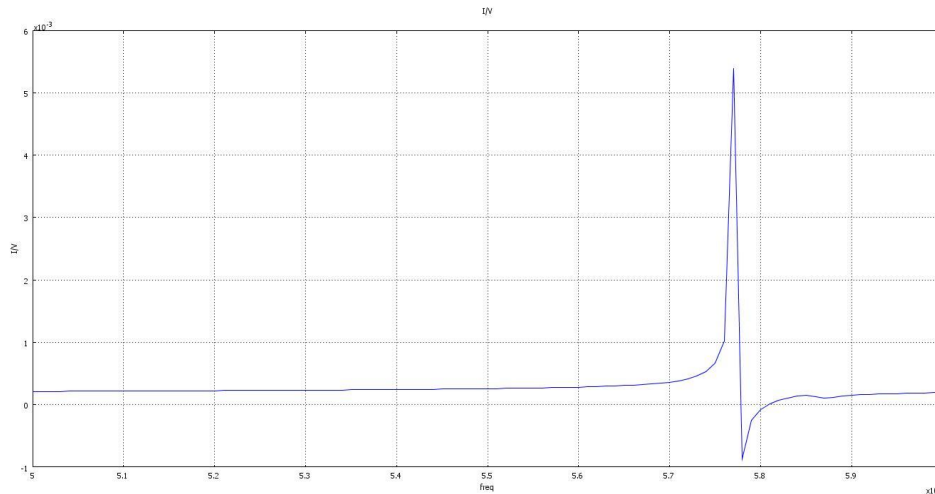


Figura 10: Frecuencia de resonancia para un espesor de deposición de Parylene de $8\mu\text{m}$.

Para validar este resultado se lo contrastó con el corrimiento analítico (ver ec. (2)) que arrojó un valor de 7.42kHz . Esto significa un error del 7.82% .

Para espesores de $5\mu\text{m}$, $10\mu\text{m}$, $15\mu\text{m}$ y $20\mu\text{m}$ se obtuvieron corrimientos de 42kHz , 79kHz , 98.5kHz y 167.7kHz respectivamente. La comparación con los valores analíticos se aprecian en la Tabla 5 y la Figura 11. Estos resultados muestran un error promedio de 10.4% con una desviación estándar de 3% .

h_f [m]	Δ_{fa} [Hz]	Δ_{ffem} [Hz]	E [%]
1,00E-06	7420,0	8000,0	7,82
5,00E-06	37100,0	42000,0	13,21
1,00E-05	74200,0	79000,0	6,47
1,50E-05	111300,0	98500,0	11,50
2,00E-05	148400,0	167700,0	13,01

Tabla 5: 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, Δ_{fa} el corrimiento analítico de la frecuencia, Δ_{ffem} el corrimiento de la frecuencia del modelo numérico y E el error de Δ_{ffem} respecto de Δ_{fa} .

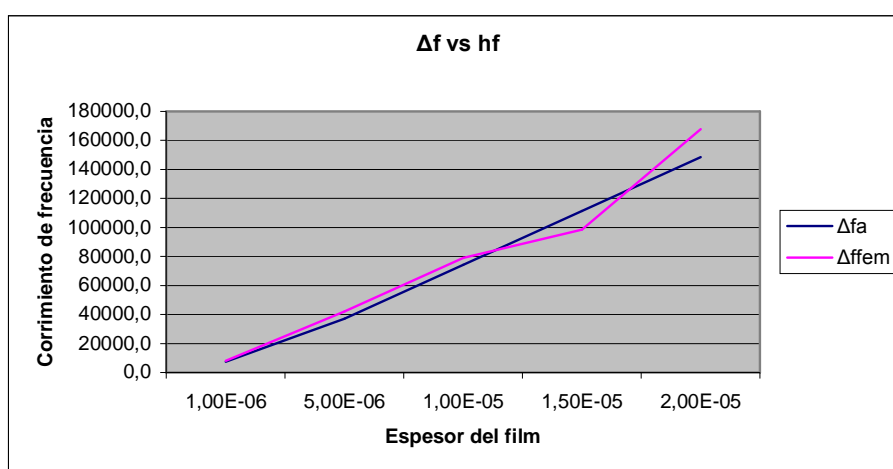


Figura 11: Corrimiento en frecuencia (analítico y numérico) para diferentes espesores de Parylene depositado

4 CONCLUSIONES

La frecuencia de resonancia del cristal de cuarzo modelado por elementos finitos mostró que, en cuanto a los parámetros geométricos, depende del espesor del cristal y se mantiene invariante con el diámetro.

Se ha visto que los resultados obtenidos con el modelo circuital se aproximan con bastante exactitud a las soluciones analíticas encontradas para el disco de cristal de cuarzo aquí presentado y considerando la deposición de material. Esto concibe una herramienta confiable para modelar, dentro de su rango de trabajo, la deposición de parylene sobre el disco.

La diferencia existente entre la frecuencia de resonancia obtenida con el modelo circuital 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 por las matrices de rigidez, piezoeléctrica y dieléctrica, mientras que en el modelo circuital lo están por la constante piezoeléctrica, la constante de acoplamiento electro-mecánico, el módulo de corte y la viscosidad. En común se encuentran las características geométricas y la densidad.

El modelo numérico propone una solución más realista respecto al analítico; las soluciones obtenidas con el primero revisten aspectos constructivos ausentes en el analítico. Esto propende a utilizar la simulación numérica para modelar geometrías complejas no posibles de

realizar con el modelo analítico.

Los valores obtenidos con el modelo de elementos finitos para la deposición de parylene muestran la linealidad existente entre el espesor de éste y el cambio en frecuencia como lo indica la ecuación de Saurbrey. Esto motiva la utilización del modelo para estimar el comportamiento esta deposición.

Es importante mencionar que los dos valores de corrimiento de frecuencia correspondientes a los espesores más delgados, generan corrimientos porcentuales respecto a la f_0 sin deposición de material, que se encuentran muy cercanos al error que produce la simplificación de un mallado con menor cantidad de elementos (0.67%). Los corrimientos porcentuales que estos generan respecto a la f_0 sin deposición de material son de 0.14% y 1.36% (para el espesor más delgado y el siguiente respectivamente). Es correcto considerar aceptables estos valores dentro del análisis de linealidad abordado, relacionando espesor y cambio en frecuencia, siendo consistente con la ecuación de Sauerbrey.

Queda abierta la posibilidad de comparar estos valores con un prototipo de una microbalanza real con las características descriptas en este trabajo.

5 RECONOCIMIENTOS

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

REFERENCIAS

- Abboud, N. et al., Finite Element Modeling for Ultrasonic Transducers, Proc. SPIE Int. Symp. Medical Imaging, San Diego, 1998.
- Buck, R. et al., Piezoelectric chemical sensors, *Pure Appl. Chem.*, Vol. 76, No. 6, 1139–1160, 2004.
- 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.
- Hung, V. et al., High-frequency one-chip multichannel quartz crystal microbalance fabricated by deep RIE, *Sensors and Actuators A*, 108:91–96, 2003.
- 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.
- Mecea, V., From Quartz Crystal Microbalance to Fundamental Principles of Mass Measurements, *Analytical Letters*, 38:753-767, 2005.
- O'Sullivan, C., Guilbault, G., Commercial quartz crystal microbalances – theory and applications, *Biosensors & Bioelectronics*, 14:663–670, 1999.
- 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.
- Zienkiewicz, O., and Taylor, R., *The finite element method*, volume I. Butterworth-Heinemann, 2000.