

DISEÑO Y SIMULACIÓN MULTI-FISICA DE SENSOR DE PRESIÓN INTRAOCULAR IMPLANTABLE

**Alvaro U. Achury^a, Edgar A. Unigarro^a, Andres M. Poloche^a, Alejandro Arciniegas^c,
Fernando Ramirez^b, Juan C. Bohórquez^a and Fredy Segura-Quijano^a**

^a*Departamento de Ingeniería Eléctrica y Electrónica, Universidad de los Andes, Bogotá, Colombia,
fsegura@uniandes.edu.co*

^d*Departamento de Ingeniería Civil y Ambiental, Universidad de los Andes, Bogotá, Colombia,
framirez@uniandes.edu.co*

^c*Instituto Barraquer de América, Bogotá, Colombia*

Palabras clave: Implante, Presión Intraocular, Sensor Inalámbrico, Simulación Multi-física.

Resumen. Se presenta la metodología de diseño de un sensor pasivo, inalámbrico e implantable para la medición presión intraocular. El proceso de diseño garantizó su implementación mediante procesos estándar de fabricación de PCB de bajo costo. El sensor tiene un área efectiva máxima de 36 mm², sensibilidad mínima de 1 mmHg y opera en presiones desde 0 mmHg hasta 40 mmHg. El sensor es pasivo e inalámbrico con el fin de poder realizar durante varias semanas el monitoreo periódico del mismo, sin incurrir en procesos de mantenimiento o cambio de baterías.

El sensor está basado en un resonador RLC (serie), implementado a partir de dos bobinas en espiral concéntricas ubicadas una encima de la otra y con conexión eléctrica entre ellas; con una de sus espiras unida una membrana de Polidimetilsiloxano (PDMS), la cual permite la compresión del sistema por una de sus caras, y por ende la variación de la capacitancia existente entre las dos espirales. Tomando ventaja de la presencia de las bobinas que conforman el resonador, el sistema es energizado y leído de manera inalámbrica vía acople magnético.

El sistema multi-físico es simulado mediante un estudio de elementos finitos. En esta simulación se logra analizar de manera conjunta la interacción de los campos electromagnéticos y las deformaciones mecánicas a que se ve sometido el sensor por la presión intraocular. Este tipo de simulación multi-física, permite analizar el comportamiento del acople electromagnético entre la antena y el sensor, a partir de la cual es posible encontrar la frecuencia de resonancia propia del sensor. En el modelo de compresión se solucionan las ecuaciones de Navier-Stokes para materiales incompresibles, considerando la memoria mecánica del sensor. Se simuló el efecto de una presión constante sobre una de las superficies del sensor para evaluar su comportamiento ante cambios de presión de 0 a 40mmHg. La simulación multi-física permitió correlacionar los efectos del cambio de presión con los cambios en la frecuencia de resonancia.

En el artículo se presentarán resultados de fabricación, de caracterización eléctrica y mecánica, así como los resultados obtenidos de las pruebas preliminares realizadas al sensor. Las pruebas preliminares han sido realizadas utilizando una columna de agua como fuente de presión y un analizador vectorial de redes (VNA) para la medición de los parámetros eléctricos.

1 INTRODUCCION

Los sensores pasivos inalámbricos permiten el monitoreo continuo a través de un sistema de adquisición por largos periodos de tiempo, en aplicaciones donde las conexiones eléctricas de sistemas alimentados por baterías no es conveniente (John C. Butler, 2002). Siendo muy convenientes para aplicaciones médicas (Haibo Cao, 2011), en las cuales no representa un riesgo para el paciente el remplazo periodo de baterías.

Lo anterior ha permitido que los resonadores LC hayan venido siendo una alternativa atractiva para el desarrollo de sensores cuyo objetivo es el monitoreo de variables físicas o químicas, como es el caso del monitoreo de presión (Haibo Cao, 2011), humedad y detección de compuestos químicos (Diego A. Sanz, 2013) (Jesús García-Cantón, 2007). El principio de funcionamiento de estos sensores, se encuentra en la medida de las variaciones de la capacitancia a partir del monitoreo de la frecuencia natural de resonancia de un sistema LC. Este es realizado por medio de una antena loop, la cual ante la excitación de un sistema electrónico permite que los campos electromagnéticos generados en la antena por la fuente de excitación se acoplen al sensor, reflejando así las variaciones de la capacitancia en la medida de la impedancia de la antena.

En este artículo se muestra un sensor de presión pasivo y el diseño y modelado del sistema empleando COMSOL 4.3b.

2 PROCESO DE FABRICACION

El sensor fue diseñado a partir de dos espirales, con frecuencia de resonancia de 1.3Ghz y diámetro externo de 3.5mm; las cuales al ser ubicadas una concéntricamente sobre otra a una distancia de 300 μ m, permiten la creación de una capacitancia parasita con dieléctrico de aire.

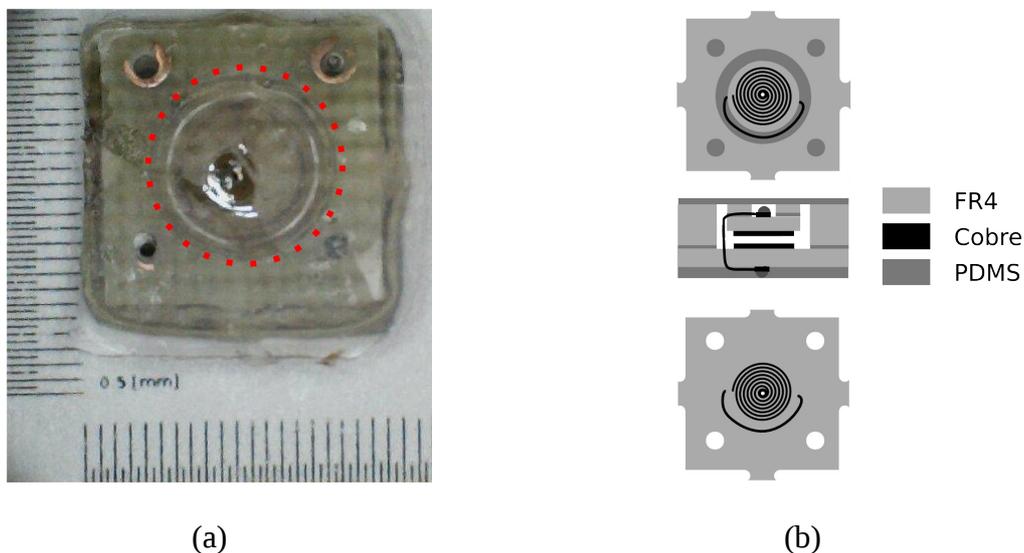


Figura 1: (a) Región de sensibilidad del sensor y (b) estructura del sensor de presión implementado.

La conexión eléctrica entre los interiores de las espirales se realiza a través de la zona externa, a través de perforaciones metalizadas de 300 μ m de diámetro, y empleando alambre de cobre de 60 μ m de diámetro, creando un resorte de $\frac{1}{2}$ vuelta con diámetro de 4.1mm; esta conexión permite aumentar el acoplamiento inductivo con la antena y reduce el efecto que puede llegar a tener la resistencia mecánica del alambre, minimizando a su vez la interferencia

con la capacitancia creada entre las espirales.

Cada espiral es fabricada sobre un sustrato de FR4 de 500 μm de espesor, el cual cuenta con un recubrimiento de cobre de 36,5 μm por ambas caras, lo cual permite la metalización del hueco pasante y facilita la conexión eléctrica por la cara de FR4 opuesta a la que se encuentran las espirales. Una de las espiras, se encuentra sujeta a una estructura de FR4 a través de una capa de PDMS de 200 μm de espesor; lo cual permite que se presenten cambios en la distancia entre las dos espirales al someter el sensor a cambios de presión.

El proceso de fabricación del sensor completo se realiza sobre un área de 1x1cm, lo cual facilita la manipulación de las piezas que conforman el sensor empleando técnicas estándar en procesos estándar de fabricación de PCB de bajo costo. Sin embargo, el área efectiva del sensor es de tan solo 42mm². Como se muestra en la Figura 1(a).

3 MODELADO

El análisis del sensor se realizó mediante simulaciones multi-físicas utilizando COMSOL 4.3b. El sensor de presión fabricado requiere el modelado del comportamiento mecánico y electromagnético, para lo cual se emplea el módulo *Solid Mechanics* y *RF Electromagnetic Waves* respectivamente. El módulo *Solid Mechanics* se utilizó para determinar la compresión del sensor causada por una presión aplicada en la parte superior de la membrana de PDMS y evaluar el desplazamiento sobre el eje normal a la superficie ocasionada por la deformación de la membrana. El módulo *RF Electromagnetic Waves* se utilizó para modelar la variación del acople electromagnético al cambiar la distancia entre los sustratos que soportan las espiras.

Se realizó el modelo tridimensional del sensor y la antena de acuerdo con las especificaciones de la figura 1, la antena y el sensor se colocan dentro de una esfera que simula los medios que los rodean. Debido a que en el desarrollo de las pruebas experimentales del sensor este se encuentra inmerso en agua destilada, para la simulación este aspecto es tenido en cuenta dividiendo la en dos dominios, en donde el dominio de la esfera con la antena se definió como aire y el dominio con el sensor se definió como agua.

En la simulación mecánica se modela únicamente la membrana de PDMS y los elementos que conforman el sensor, ya que son los únicos elementos involucrados en la deformación del material ante modificación de la presión externa; la antena y los dominios de aire y agua se dejan fuera de la simulación. Para la simulación de compresión se define como un punto de referencia sin desplazamiento la superficie inferior del sustrato de FR4 y se aplica una presión uniforme sobre la cara superior de la membrana de PDMS, los efectos de los procesos de fabricación en la membrana son estimados teniendo en cuenta los aspectos discutidos en (F Schneider, 2008).

4 MEDIDAS

Las medidas para la caracterización de la respuesta del sensor fueron realizadas empleando un analizador vectorial de redes (VNA). En el cual se observaba la variación de la respuesta de la parte real de la impedancia de la antena ante cambios de la respuesta del sensor.

La configuración empleada para el desarrollo de la prueba se muestra en la Figura 2. Un barómetro con agua destilada es empleado para cambiar la presión a la cual se somete el sensor ubicado en la base del barómetro. La variación de la presión a la cual es sometido el sensor es lograda cambiando el nivel del líquido.

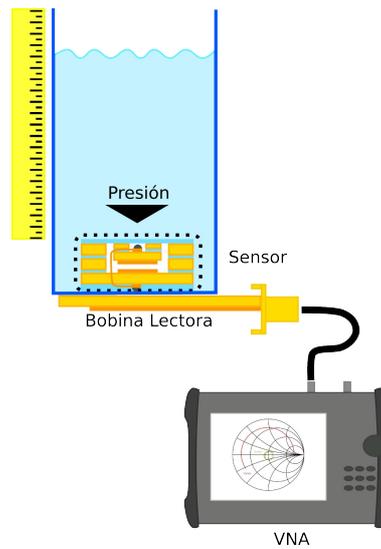


Figura 2: Configuración empleada para el desarrollo de la prueba del sensor de presión.

5 DISCUSION Y RESULTADOS

La deformación causada por la presión sobre la membrana de PDMS se modela para que su distribución sea uniforme; los valores de compresión obtenidos en la simulación de deformación mecánica fueron empleados en la simulación electromagnética para el análisis del cambio de la respuesta de resonancia ocasionada por el cambio de presión sobre el sensor.

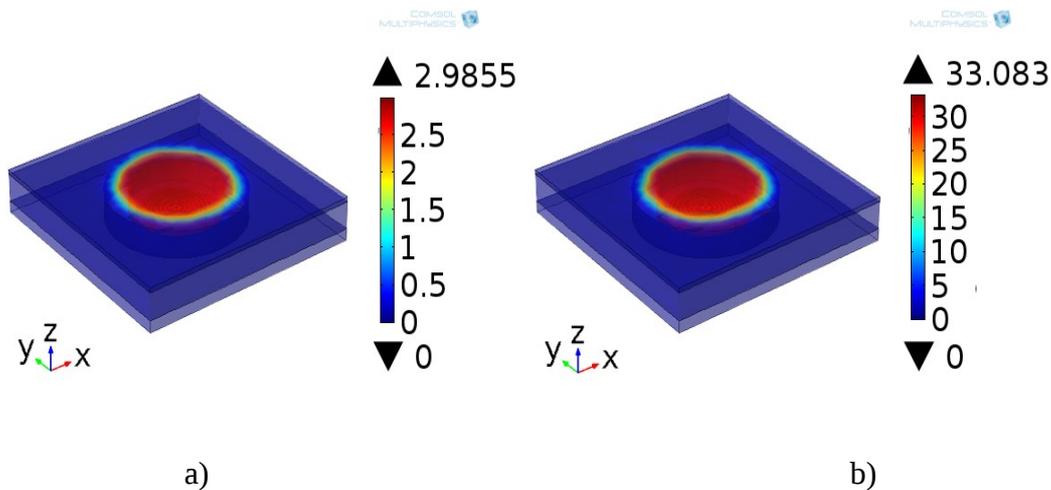


Figura 3: Deformación causada por una presión externa aplicada. (a) Presión de 1mmHg (b) Presión de 25mmHg.

El desplazamiento en el eje z fue calculado evaluando el desplazamiento completo sobre los puntos de frontera donde la presión fue aplicada. Para este estudio, una presión máxima de 25mmHg fue usada; la deformación sobre el sensor después de la simulación con esta presión fue de 33.01 μ m.

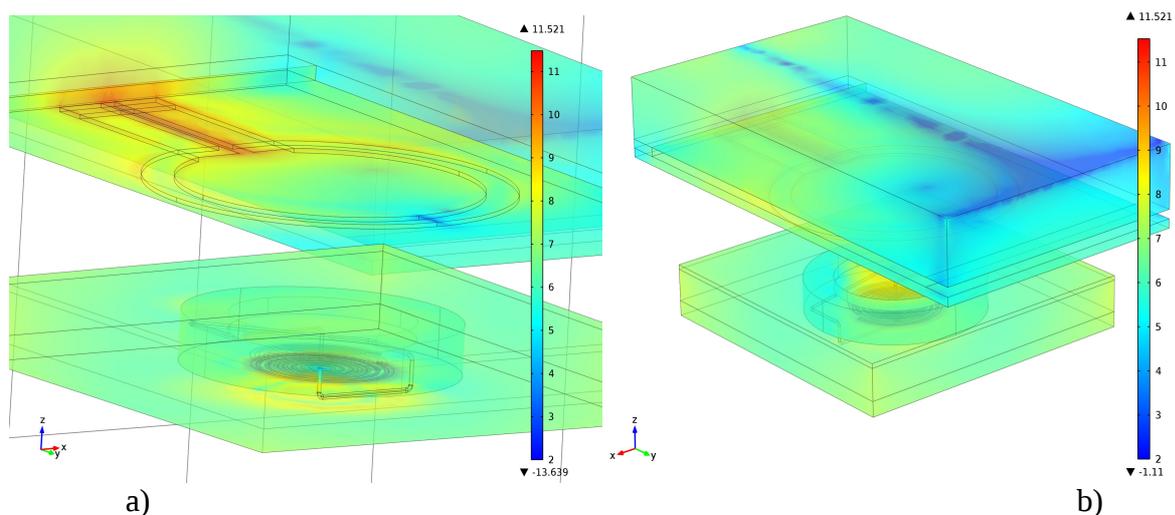


Figura 4: Intensidad de campo eléctrico de la antena y el sensor. a) Vista lateral inferior, b) vista lateral superior.

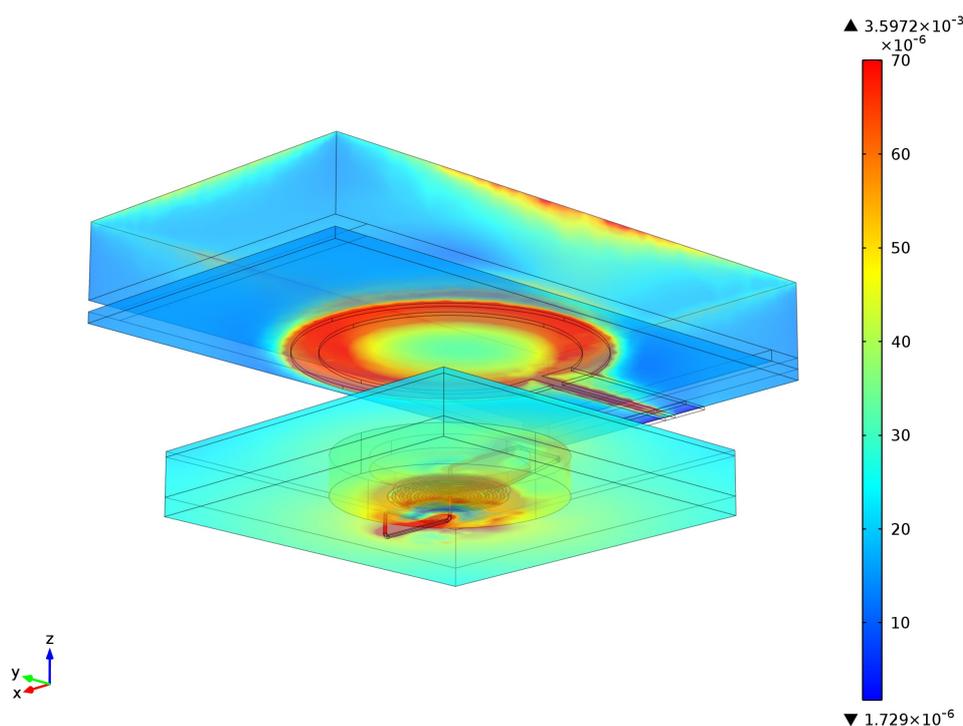


Figura 5: Intensidad de campo magnético. Vista lateral inferior.

Un estimado de la intensidad de campo magnético y campo eléctrico del sistema antena-sensor, con evaluados mediante el módulo *RF electromagnetic Waves* (ver Figura 4 y Figura 5). Por medio del análisis es posible evaluar la energía inducida en el sensor por la antena, así como los efectos que tienen en la respuesta del sistema: la línea de transmisión que permite la excitación de la antena, y de la geometría del sensor.

La Figura 6 muestra la relación entre la presión aplicada y la frecuencia de resonancia. La simulación electromagnética muestra un error máximo de 12.5% con respecto a los resultados experimentales.

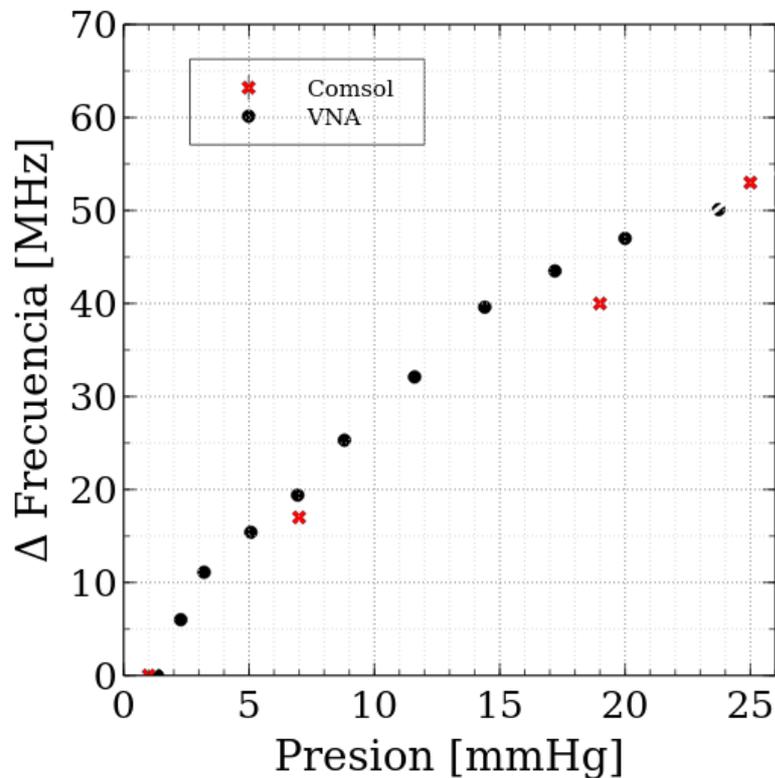


Figura 6. Frecuencia de resonancia del sensor con diferentes niveles de presión. Datos simulados son mostrados en azul y medidos en rojo.

6 CONCLUSIONES

COMSOL *Multiphysics* fue usado para la simulación de un sensor de presión pasivo inalámbrico. El modulo RF permite evaluar el comportamiento del acople entre el sensor y la antena, así como el cambio en frecuencia del sistema al variar la distancia entre las dos espirales, lo cual permite estimar un error relativo máximo de 12,5% causado por factores involucrados con el proceso de fabricación. La compresión del sensor ocasionada por una fuente externa fue evaluada mediante simulación y de manera independiente, el corrimiento de frecuencia mediante este modelo se estima en 2.4MHz por 1mmHg.

7 REFERENCIAS

- Butler, J. C., Vigliotti, A. J., Verdi, F. W., & Walsh, S. M. (2002). Wireless, passive, resonant-circuit, inductively coupled, inductive strain sensor. *Sensor and Actuators* , 102, 61-66.
- Cao, H., R.J., W., & N.G., H. (2011). A Passive Intraocular Pressure Sensor and a Wireless Sensing Technique Using an Intermediate LC Resonator. *Life Science Systems and Applications Workshop (LiSSA)* , 5-8.
- Garcia-Canton, J., Merlos, A., & Baldi, A. (2007). A wireless LC chemical sensor based on a high quality factor EIS capacitor. *Sensors and Actuators B* , 126, 648–654.
- Sanz, D. A., Unigarro, E. A., Osma, J. F., & Segura-Quijano, F. (2013). Low cost wireless passive microsensors for the detection of hazardous compounds in water systems for control and monitoring. *Sensors and Actuators B: Chemical* , 178, 26-33.
- Schneider, F., Fellner, T., Wilde, J., & Wallrabe, U. (2008). Mechanical properties of silicones

for MEMS. *Journal of Micromechanics and Microengineering* , 18 (6).