

DISEÑO Y SIMULACIÓN DE UN MICROINDUCTOR PLANAR PARA UN SENSOR TELEMÉTRICO DE PRESIÓN INTRAOCULAR

María C. Pérez^{a,b}, Juan M. Reta^b, Fabio A. Guarnieri^{a,b}

^a*Cimec, Intec (UNL-Conicet) PTLC, El pozo, 3000, Santa Fe, Argentina*

^b*Facultad de Ingeniería, UNER, 3101, Oro Verde, Argentina*

Palabras Clave: Microinductor, microfabricación, sensores de presión intraocular.

Resumen. *Motivación:* Los microinductores permiten integrar la transmisión inalámbrica de energía en múltiples aplicaciones como sensores y actuadores en el campo biomédico. El uso de EF para el diseño de los microinductores permite considerar las restricciones geométricas y materiales utilizados por las técnicas de micro fabricación. *Métodos:* Se utilizan modelos 3D numéricos en EF junto con modelos circuitales para el análisis y diseño de una bobina de sección cuadrada. El modelo circuital considera la bobina de cobre depositada sobre un sustrato de silicio cubierta con una película aislante de dióxido de silicio. Los parámetros del modelo son la inductancia, la resistencia del conductor, la capacitancia parásita, y la resistencia del aislante. En el modelo numérico, la geometría consiste en el inductor en forma de espiral rodeado de aire. Las ecuaciones del modelo en EF son las ecuaciones de continuidad y magnetostática donde σ es la conductividad eléctrica, μ es la permeabilidad magnética, A es el vector potencial magnético, V el potencial eléctrico y Je el vector densidad de corriente generada externamente. *Resultados:* Se comparan los resultados obtenidos de inductancia a partir del modelo circuital con el numérico. Se realizan 3 diseños diferentes de microbobinas para optimizar el tamaño y la tecnología de micro fabricación.

INTRODUCTION

En los últimos años, el interés y el uso de implantes en el cuerpo humano se ha incrementado. Los implantes permanentes pueden ser utilizados para la monitorización continua de determinados parámetros médicos como los niveles de insulina, la presión intraocular o para accionamiento de nervios específicos (Puers et al. 2000). Como los implantes se hacen cada vez más pequeños, la atención se centra en la miniaturización de la electrónica, los circuitos de transmisión y el suministro de energía.

Es por esto que el uso de una batería no siempre es posible o conveniente a causa de su tamaño y limitaciones de vida útil. Una alternativa es la transmisión de energía a través de un acoplamiento inductivo entre dos bobinas, una bobina transmisora y una bobina receptora implantada en el cuerpo humano. La bobina receptora para este tipo de aplicación debe ser de un tamaño muy pequeño y una alta eficiencia en la transferencia de energía.

El pequeño tamaño de la bobina receptora podría dar lugar a la necesidad de un campo magnético denso, con el fin de transferir una cantidad suficiente de energía. Sin embargo, como el campo induce corrientes de Foucault en un material conductor, esto provoca calentamiento por resistencia o una activación de los nervios. Se ha informado de que este calentamiento puede causar daño a los tejidos humanos. Así que, en general, los campos magnéticos de alta intensidad no son deseables. Con el fin de ser capaces de transferir energía suficiente con una intensidad de campo magnético adecuada, el diseño de la bobina receptora debe ser optimizado (Neagu et al. 1997).

En este artículo se comparan los parámetros eléctricos obtenidos a través de un modelo circuital y un modelo numérico en 3D en elementos finitos, de distintas configuraciones de microbobinas. Se evalúan los parámetros eléctricos como la autoinductancia, la resistencia del conductor, la capacidad parásita, y la resistencia del aislante en distintos tamaños, geometrías y tecnologías de microfabricación como la deposición de película fina y galvanoplastia. Con estas tecnologías las bobinas pequeñas son relativamente fáciles de fabricar de forma reproducible.

1 TEORÍA DE LA BOBINA PLANAR

En esta sección se discute un modelo eléctrico de las características intrínsecas de una microbobina plana. Esto permite comprender la influencia de los efectos parásitos permitiendo optimizar el diseño de la bobina para maximizar la transferencia de energía. El circuito eléctrico equivalente simplificado de la microbobina se muestra en la [Figura 1](#).

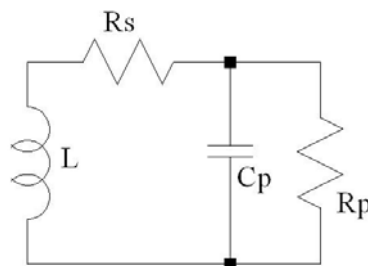


Figura 1: Modelo eléctrico de la microbobina

Debido a las imperfecciones en los conductores y aislantes, las bobinas tienen una resistencia en serie R_s y una resistencia en paralelo R_p . Estas resistencias disipan la energía en forma de calor reduciendo la eficiencia de la microbobina. La energía disipada es directamente influenciada por la resistencia en serie, que depende de los factores geométricos

(ver Figura 2). La energía recibida depende principalmente de la autoinducción de la bobina, que también depende de las dimensiones de la bobina (Neagu et al. 1997).

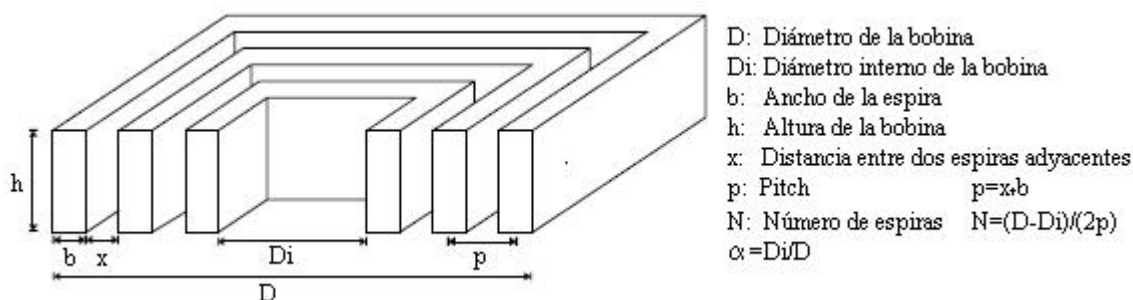


Figura 2: Factores geométricos de la microbobina

En este artículo, se tienen en cuenta bobinas de cobre de sección rectangular depositadas sobre un sustrato de silicio y cubierta con una película aislante de óxido de silicio. Entonces las propiedades eléctricas de la microbobina planar depende de la autoinductancia L , la resistencia serie del conductor R_s , la capacitancia parásita C_p , y la resistencia el aislante R_p .

Por otra parte, el factor de calidad mide la eficiencia de la bobina receptora. Cuando sometemos a una bobina a un campo alterno externo, ésta oscila a la frecuencia de resonancia intrínseca ω_i .

$$\omega_i = \sqrt{\frac{1}{LC_p} - \frac{R_s^2}{L^2}} \approx \sqrt{\frac{1}{LC_p}} \quad (1)$$

El factor de calidad intrínseco de la bobina se puede determinar a partir de su frecuencia de resonancia como

$$Q_i = \frac{\omega_i L}{R_s} = \sqrt{\frac{L}{R_s^2 C_p} - 1} \approx \frac{1}{R_s} \sqrt{\frac{L}{C_p}} \quad (2)$$

1.1 Autoinductancia

La autoinductancia es una medida de la energía electromagnética almacenada en una bobina por unidad de corriente que circula a través de ella. La autoinductancia es un parámetro que depende de los factores geométricos de la misma, principalmente de su longitud total y en menor medida de su área de sección transversal. Para bobinas cuadradas la autoinductancia se puede determinar como

$$L[H] \approx 0.95 \frac{\mu D^2}{4\pi p^2} \quad (3)$$

donde μ es la permeabilidad del aire ($\mu = 4\pi \cdot 10^{-7}$ [H/m]).

La relación entre la inductancia de bobinas cuadradas y circulares puede aproximarse a través de la relación entre las longitudes totales de las bobinas ℓ (Neagu et al. 1997),

$$\frac{L_{\square}}{L_{\circ}} \approx \frac{\ell_{\square}}{\ell_{\circ}} = \frac{4}{\pi} \quad (4)$$

1.2 Resistencia en serie

La resistencia serie para una bobina cuadrada de sección rectangular es función de la resistividad del material ρ ($\rho_{cu}=1,667\Omega m$) y de sus dimensiones geométricas,

$$R_s[\Omega] = \frac{\rho D^2}{b \cdot h \cdot p} \quad (5)$$

1.3 Resistencia en paralelo

La resistencia en paralelo es causada por la resistencia finita de la capa aislante en la cual se coloca la bobina. La pérdida de potencia en esta resistencia se vuelve importante cuando ésta se aproxima a la impedancia capacitiva $X_c=1/(2 \cdot \pi \cdot C_p)$ La resistencia R_p se determina en función de la resistividad del aislante ρ_{ox} y del espesor del mismo x_{ox}

$$R_p[\Omega] = \frac{\rho_{ox} \cdot x_{ox}}{b \cdot l} \quad (6)$$

En la práctica, la influencia de la resistencia en paralelo es mucho menor que la resistencia en serie (Neagu et al. 1997).

1.4 Capacidad parásita

La capacidad parásita está formada por 3 componentes diferentes, la capacidad entre espiras C_{tt} , la capacidad entre las espiras y el sustrato C_{st} , y la capacidad entre los pads de contacto y el sustrato C_{cs} . Para microbobinas solo adquiere relevancia la capacidad C_{st} que puede determinarse como

$$C_p[F] = \frac{\epsilon b D^2}{4 x_{ox} p} \quad (7)$$

donde ϵ es la permitividad del material ($\epsilon = \epsilon_0 \epsilon_r$, $\epsilon_0 = 8,85 \cdot 10^{-12}$ [F/m], $\epsilon_r = 3,8$ para el SiO_2) (Neagu et al. 1997).

1.5 Diseño y fabricación de microbobinas

En los sistemas de telemetría el mayor requerimiento es la alta transferencia de energía. Esto significa que la bobina receptora debe tener una alta eficiencia Q , una alta autoinductancia y una baja resistencia en serie y capacidad. Al disminuir el tamaño de la bobina aumentamos el Q , pero disminuimos su inductancia. Este efecto se puede compensar con bobinas de un alto número de vueltas, pero esto aumenta tanto la resistencia serie como la capacidad parásita. Es por eso que se utilizan materiales de muy baja resistividad como el cobre. Una forma de mejorar la eficiencia de una microbobina sin afectar el valor de autoinductancia es aumentando el espesor h de las espiras. Esto mantiene el valor de L , disminuyendo la resistencia serie. Las técnicas de fabricación que se utilizan para microbobinas son la deposición de película fina y la galvanoplastia. En el caso de esta última es posible fabricar estructuras de mayor espesor. Este proceso comienza con la oxidación de la oblea de Si ($SiO_2 - 1\mu m$) y la deposición de una capa de adhesión de Cr (20nm) y Cu (0.5 μm). Luego se deposita la fotoresina y se realiza un proceso de litografía para ser utilizado como molde del electroplateado. En este último se deposita el espesor de Cu según las especificaciones de la bobina y se remueve la fotoresina y la capa sacrificial de Cu (Puers

et al. 2000).

2 MODELO DE ELEMENTOS FINITOS

2.1 Introducción

La geometría utilizada está formada por un microinductor de cobre de sección rectangular rodeado de aire, al cual queremos calcular su autoinductancia y la resistencia del conductor. Para ello planteamos un problema estático, gobernado por las ecuaciones de Maxwell, en el cual hacemos circular un flujo de corriente constante I a través del inductor. Este análisis permite tratar el campo magnético y eléctrico en forma independiente.

Dado un campo magnético, podemos determinar la autoinductancia calculando la energía magnética total W_m

$$L = \frac{2W_m}{I} \quad (8)$$

Dado un campo eléctrico, podemos determinar la diferencia de potencial eléctrico V del conductor y determinar su resistencia serie según la ley de Ohm

$$R_s = \frac{V}{I} \quad (9)$$

2.2 Formulación del problema

El problema magnetostático está gobernado por las ecuaciones de Ampère-Maxwell y la ley de Gauss para campos magnéticos (Jin, 2001., Preis et al. 1991)

$$\begin{aligned} \nabla \times H &= J \\ \nabla \cdot B &= 0 \end{aligned} \quad (10)$$

donde H representa la intensidad de campo magnético, B la densidad de flujo magnético y J la densidad de corriente total.

Las ecuaciones constitutivas que describen las propiedades macroscópicas del medio

$$\begin{aligned} B &= \mu_0 \mu_r H \\ J &= \sigma E + J_e \end{aligned} \quad (11)$$

donde μ_0 es la permeabilidad del vacío, μ_r es la permeabilidad relativa del material, σ la conductividad del material ($\sigma_{Cu} = 5.998e7$ [S/m]), E el campo eléctrico y J_e la densidad de corriente externa.

Resulta útil la formulación en base al potencial eléctrico V y el vector potencial magnético A cuyas ecuaciones son

$$\begin{aligned} E &= -\nabla V \\ B &= \nabla \times A \end{aligned} \quad (12)$$

Finalmente las ecuaciones diferenciales del modelo eléctrico y magnético para el problema son las siguientes

$$-\nabla \cdot (\sigma \nabla V - J_e) = 0 \quad (13)$$

$$\nabla \times (\nu \nabla \times A) = J \quad (14)$$

donde ν es la reluctividad del material la cual es la inversa de la permeabilidad. La forma débil para este problema es

$$\int_{\Omega} \nu (\nabla \times A) \cdot (\nabla \times \delta A) d\Omega - \oint_{\Gamma} \nu (\nabla \times A) \cdot n \cdot \delta A d\Gamma = \int_{\Omega} J \cdot \delta A d\Omega \quad (15)$$

La condición de contorno para el vector potencial magnético A esta dado por la siguiente ecuación

$$n \cdot \nabla \times A = 0 \quad (16)$$

La ecuación (14) no determina una única solución para el vector potencial magnético, ya que si A es solución, cualquier función $A' = A + \nabla f$ también lo es (Coulomb, 1981, Demerdash et al. 1981, Jin, 2001., Song and Ida. 1991). Para encontrar una solución de manera única es necesario imponer una segunda condición dada por la transformación de Coulomb-Gauge la cual impone que la divergencia del vector potencial magnético es nula

$$\nabla \cdot A = 0 \quad (17)$$

Aplicando esta condición la ecuación diferencial para el vector potencial magnético se transforma en (Preis et al. 1991)

$$\nabla \times (\nu \nabla \times A) - \nabla \nu \nabla \cdot A = J \quad (18)$$

donde el término ν' es un término positivo el cual es físicamente equivalente a la reluctividad del material (Coulomb, 1981). Para el caso de materiales lineales este término es igual a la inversa de la permeabilidad del material. La forma débil para este caso es

$$\int_{\Omega} [\nu (\nabla \times A) \cdot (\nabla \times \delta A) + \nu (\nabla \cdot A) (\nabla \cdot \delta A)] d\Omega - \oint_{\Gamma} \nu (\nabla \times A \times n) \cdot \delta A d\Gamma - \oint_{\Gamma} (\nu \nabla \cdot A) \delta A \cdot n d\Gamma = \int_{\Omega} J \cdot \delta A d\Omega \quad (19)$$

Las condiciones de contorno esenciales para la ecuación (18) son (Preis et al. 1991)

$$n \times A = 0 \quad \nu \nabla \cdot A = 0 \quad (20)$$

Es decir que la solución de la ecuación diferencial (14) aplicando la condición Coulomb Gauge en todo el dominio con la condición de contorno (16), es equivalente a resolver la ecuación (18) con las condiciones de contorno dadas por (20) (Coulomb, 1981).

3 APLICACIONES

3.1 Microbobina cuadrada básica

Se definieron 3 bobinas cuadradas con iguales parámetros constructivos, variando su tamaño y número de vueltas (ver Tabla 1) con el fin de comparar el modelo circuital con el modelo numérico.

Parámetro constructivo	Bobina Pequeña	Bobina Intermedia	Bobina Grande
b (μm)	10	10	10
h (μm)	10	10	10

p (μm)	10	10	10
D (mm)	0.2	0.4	0.6
N	5	10	15

Tabla 1: Parámetros constructivos.

Los resultados obtenidos del modelo eléctrico y numérico se muestran en la [Tabla 2](#)

Parámetro eléctrico	Bobina Pequeña		Bobina Intermedia		Bobina Grande	
	Modelo Eléctrico	Modelo EF	Modelo Eléctrico	Modelo EF	Modelo Eléctrico	Modelo EF
L (nH)	1.90	1.90	15.2	13.8	51.3	47.2
Rs (Ω)	0.334	0.342	1.336	1.34	3.005	3.009
Cp (pF)	0.17	-	0.67	-	1.51	-
Qi	319	-	113	-	61	-
Fi (MHz)	8914	-	1576	-	571	-

Tabla 2: Parámetros eléctricos obtenidos en el modelo eléctrico vs modelo numérico.

En la [Figura 3](#) se muestran los resultados del modelo de EF para la bobina de 15 vueltas

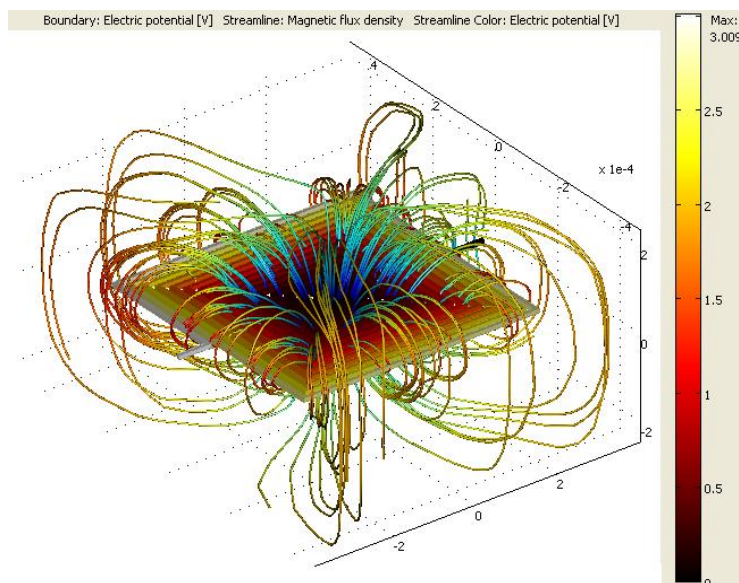


Figura 3: Resultados del modelo de elementos finitos para la bobina de mayor tamaño

3.2 Microbobina cuadrada vs. circular – Efecto de la geometría de la bobina

Se compararon una bobina cuadrada y otra circular con iguales parámetros constructivos, tamaño y número de vueltas (ver [Tabla 3](#)).

Parámetro constructivo	Bobina cuadrada	Bobina redonda
b (μm)	10	10
h (μm)	10	10
p (μm)	10	10

D (mm)	0.2	0.2
N	5	5

Tabla 3: Parámetros constructivos.

Los resultados obtenidos del modelo eléctrico y numérico se muestran en la [Tabla 4](#)

Parámetro eléctrico	Bobina cuadrada		Bobina redonda	
	Modelo Eléctrico	Modelo EF	Modelo Eléctrico	Modelo EF
L (nH)	1.90	1.90	1.49	1.49
Rs(Ω)	0.334	0.342	0.262	0.265

Tabla 4: Parámetros eléctricos obtenidos en el modelo eléctrico vs modelo numérico.

En la [Figura 4](#) se muestran los resultados del modelo de EF para las dos bobinas

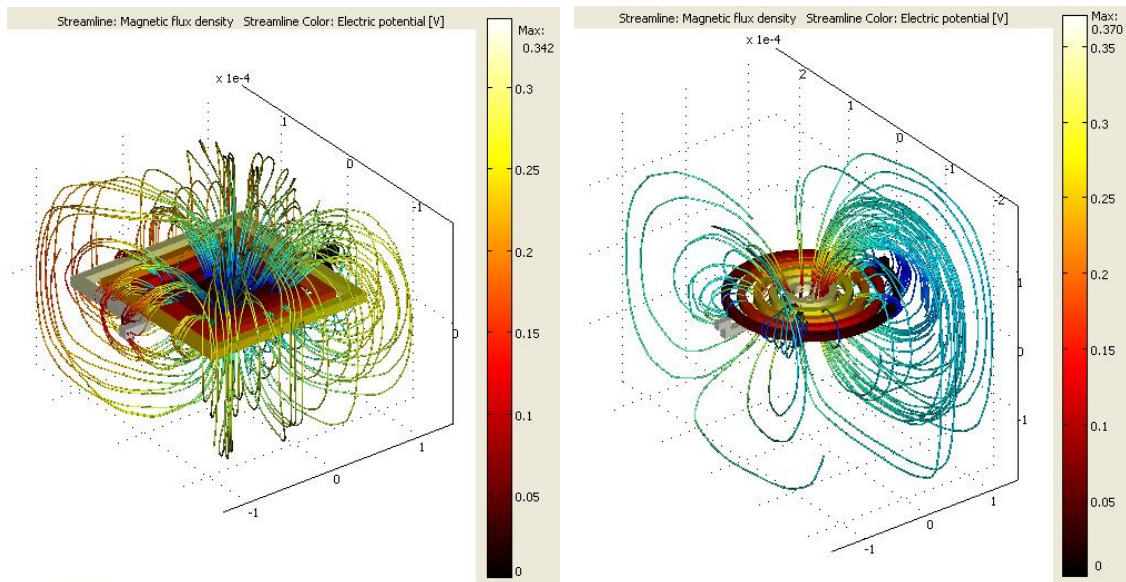


Figura 4: Resultados del método de EF. Comparación entre los resultados de la bobina cuadrada vs. circular

3.3 Microbobinas de distintos espesores – Efecto del proceso de fabricación

Se compararon una bobina de pequeño espesor (deposición de película fina) y otra de mayor espesor (galvanoplastía) de igual tamaño y número de vueltas (ver [Tabla 6](#)).

Parámetro constructivo	Bobina Bajo espesor	Bobina Alto espesor
b (μm)	10	10
h (μm)	1	10
p (μm)	10	10
D (mm)	0.2	0.2
N	5	5

Tabla 5: Parámetros constructivos.

Los resultados obtenidos del modelo eléctrico y numérico se muestran en la [Tabla 6](#)

Parámetro eléctrico	Bobina Bajo espesor		Bobina Alto espesor	
	Modelo Eléctrico	Modelo EF	Modelo Eléctrico	Modelo EF
L (nH)	1.90	2.12	1.90	1.90
Rs(Ω)	3.39	3.392	0.334	0.342

Tabla 6: Parámetros eléctricos obtenidos en el modelo eléctrico vs modelo numérico.

En la [Figura 5](#) se muestran los resultados del modelo de EF para las dos bobinas

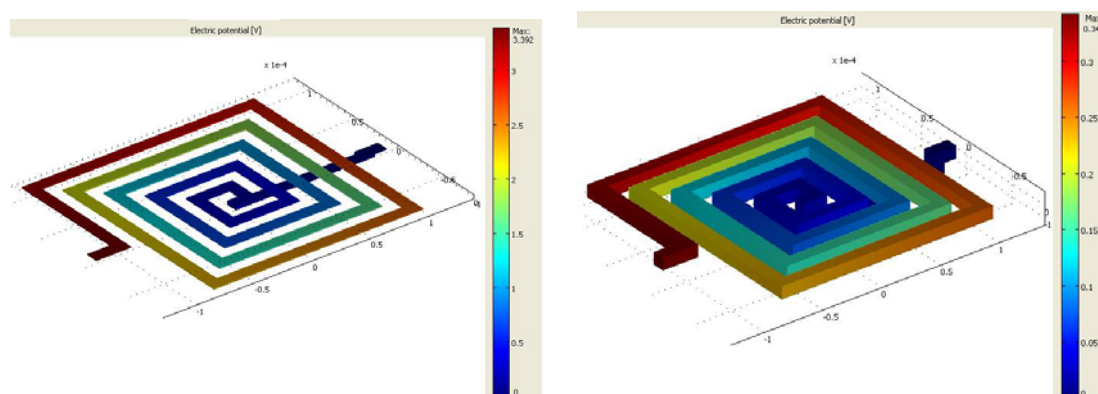


Figura 5: Resultados del método de EF. Comparación entre bobinas de distinto espesor

4 CONCLUSIONES

En el siguiente trabajo se realiza la comparación de dos modelos, uno circuital y uno numérico para la caracterización de los parámetros eléctricos de una microbobina para un sensor de presión intraocular telemétrico. Se estudiaron distintos tamaños, geometrías y técnicas de microfabricación de inductores. En todos los casos los resultados fueron comparables, por lo que es posible caracterizar con muy buena exactitud los parámetros eléctricos de la microbobina a través de ambos métodos. El modelo numérico permite, además trabajar con otro tipo de geometrías no contempladas en el modelo circuital, permitiendo aumentar las posibilidades durante el diseño de la microbobina, el circuito de acondicionamiento y el sensor de presión. Por otra parte, se espera poder desarrollar un modelo numérico más completo representando la microbobina depositada sobre un sustrato y cubierta por medio de un material aislante, pudiendo evaluar su capacidad parásita, utilizando otros materiales alternativos, no contemplados en el modelo analítico, y utilizados en técnicas de microfabricación. Esto permitirá optimizar el factor de calidad y la eficiencia del inductor para un diseño definitivo.

REFERENCIAS

- Coulomb, J., Finite element three dimensional magnetic field computation. *Transactions on Magnetics*, 17:3241–3246, 1981.
- Demerdash, N.A., Nehl, T.W., Fouad, F.A. and Mohammed, O.A., Three dimensional finite

- element vector potential formulation of magnetic fields in electrical apparatus. *IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems*, 100:4104–4111, 1981.
- Jin, J., *The finite element method in electromagnetics*, volumen II. Wiley-interscience publication, 2001.
- Neagu, C.R., Jansen, H.V., Smith, A., Cardeniers, J.G.E. and Elwenspck, M.C., Characterization of a planar microcoil for implantable microsystems. *Sensor and Actuators a physical*, 62:599–611, 1997.
- Preis, K., Bardi, I., Biró, O., Magele, C., Renhart, W., Richter, K.R., and Vrisk, G., Numerical analysis of 3D magnetostatic fields. *IEEE Transactions on Magnetics*, 27:3798–3803, 1991.
- Puers, R., Vandevoorde, G. and De Bruyker, D., Electrodeposited copper inductors for intraocular pressure telemetry. *J. Micromech. Microeng.*, 10:124-129, 2000.
- Song, H. and Ida, N., An eddy current constraint formulation for 3d electromagnetic field calculations. *IEEE Transactions on Magnetics*, 27:4012–4015, 1991.