



Diseño de lente metamaterial con anillos resonantes para aplicación en imágenes médicas por Resonancia Magnética

Amalia Lobaina Abad, Luis Ramón González Betanzos, Miguel Eduardo Borrego Corona, Evelio González Dalmau

RESUMEN / ABSTRACT

El presente artículo propone el diseño de dos prototipos de lentes metamateriales magnéticas empleando anillos resonadores. La estructura elegida es basada en resonadores CLR por sus siglas en inglés (*capacitively loaded rings*). Los diseños se conciben como guías de onda, con la finalidad de disminuir el efecto del campo eléctrico que provoca el aumento de la Relación Señal-Ruido en la bobina para animales (*Volume Resonator ID35OD119 of Rapid Biomedical GmbH*). Esta bobina se emplea para obtener imágenes de ratas en ensayos no clínicos. Para ello se empleó el equipo de imágenes por resonancia magnética **Siemens Magnetón Allegra 3T** del Centro de Neurociencias de Cuba a una frecuencia de Larmor de 123.3 MHz. Palabras claves: lentes metamateriales magnéticas, anillos resonadores, resonadores CLR, guías de onda, Relación Señal-Ruido, imágenes por resonancia magnética.

This article proposes the design of two prototypes of magnetic metamaterial lens using rings resonator. The chosen structure is based on CLR resonator (capacitively loaded rings). The designs are conceived as wave guides, in order to reduce the effect of the electric field that causes the increase Signal-Noise Ratio in the coil for animals (Volume Resonator IDR5OD119 from Rapid Biomedical GmbH). This coil is used to obtain images of rats in non-clinical trials. The Siemens Magnetón Allegra 3T Magnetic Resonance Imaging equipment was used from the Cuban Neuroscience Center at Larmor frequency of 123.3 MHz.

Keywords: *magnetic metamaterial lens, rings resonator, CLR resonator (capacitively loaded rings), wave guides, Signal-Noise Ratio, Magnetic Resonance Imaging.*

Title: *"Metamaterial lens design with resonant rings for application in medical imaging of Magnetic Resonance".*

1. -INTRODUCCIÓN

Los materiales artificiales o metamateriales (MM), son estructuras artificiales fabricadas a partir de elementos conductores y aislantes convencionales. Debido a su particular estructura, los metamateriales pueden presentar propiedades electromagnéticas que no se encuentran en materiales naturales [1]. Según el análisis del eje de coordenadas de los parámetros electromagnéticos, los dieléctricos se pueden agrupar en cuatro cuadrantes, en dependencia del signo que presenten su parte real. En el caso de los metamateriales, estos pertenecen al segundo, tercer y cuarto cuadrante, teorizados por primera vez en 1968 por el físico soviético Víctor Veselago. Se caracterizan por poseer partes reales de permitividad, permeabilidad o ambas

simultáneamente negativa, en al menos un estrecho margen de frecuencias, dando lugar a índices de refracción negativos. Los metamateriales también se definen como medios zurdos o LHM (por sus siglas en inglés, *Left-Handed Media*), pues en ellos las ondas electromagnéticas se propagan en dirección contraria a la propagación de la energía. Tienen en común la existencia de ciertas estructuras periódicas elementales, que cumplen las propiedades que les permiten definirse como metamateriales. En función de sus características constructivas reciben diversos nombres. Una clasificación interna usual, es en términos de sus dimensiones respecto a la longitud de onda. Así, cuando las celdas básicas son mucho menores que las longitudes de onda se pueden encontrar materiales ENG (ϵ -Negativa), MNG (μ -Negativa) o DNG (Doble Negativa), y si las celdas básicas son del orden de la longitud de onda se habla de estructuras EBG (*Electromagnetic Band-Gap*).

Empleando estas estructuras metamateriales, se han fabricado prototipos de antenas de tipo parche, acopladores, filtros pasa banda con bandas pasantes espurias de menor intensidad que con diseños convencionales, guías rectangulares, e incluso conductores magnéticos artificiales. Pues, las reducciones de tamaño y peso usando MM, con respecto a diseños más convencionales son notables, aunque suelen requerir procesos de fabricación más complejos. La fabricación de antenas con mejores parámetros de diseño es de utilidad en estudios que requieren gran calidad y precisión, como es el caso de las llamadas Imágenes por Resonancia Magnética (IRM)[2].

La IRM constituye una técnica espectroscópica usada por los científicos para obtener química y físicamente información microscópica sobre las moléculas[3]. Dicha técnica utiliza un imán potente para generar un campo magnético que obliga a los protones de las moléculas a alinearse con ese campo; y mediante la corriente generada por bobinas de radiofrecuencia (RF) los protones son excitados y giran fuera del equilibrio, luchando contra la fuerza del campo magnético. Cuando se apaga el campo de radiofrecuencias las bobinas son capaces de detectar la energía liberada por los protones al alinearse con el campo magnético. Los procesos de excitación y luego detección de la energía liberada en el movimiento de los protones, son realizados por las bobinas de RF, las cuales se clasifican en antenas transmisoras, receptoras o transceptoras [4].

Con estas bobinas de RF, se obtienen imágenes de alta resolución, con suficiente Relación Señal-Ruido (SNR). Sin embargo, algunas configuraciones como las bobinas superficiales, tiene limitantes en cuanto al poder de penetración. Por otro lado, las muestras tienen una alta permitividad que junto a la conductividad que desintoniza la bobina de RF disminuye su factor de calidad[5]. Utilizando los metamateriales se podría solucionar o atenuar estos problemas, debido a que estos materiales tienen parámetros eficaces (permeabilidad y permitividad) que pueden ser ajustables, tanto positiva como negativa [6]. Dada las ventajas que brindan los metamateriales al poder manipular el campo electromagnético de un dispositivo en la región de campo próximo (a distancias inferiores a la longitud de onda); se pueden emplear lentes metamateriales en el diseño de bobinas de IRM, para atenuar el campo eléctrico y potenciar o no influir en el magnético. En el presente trabajo se investigan las aplicaciones en RM de lentes metamateriales basados en estructuras periódicas de anillos resonantes [7].

El objetivo principal del trabajo es el diseño una de lente metamaterial de anillos resonantes CLR (por sus siglas en inglés, *capacitively loaded rings*) con valores de permeabilidad negativa enfocado mejorar la SNR de bobinas de RF. Esta lente se empleará como guía de onda acoplado a una bobina de radiofrecuencia comercial para animales, dentro de un equipo de Imágenes por Resonancia Magnética.

Este proyecto, forma parte del proyecto FONCI “Modificación de IRM clínica y diseño de dispositivos para el estudio de animales pequeños” dentro del objeto de la entidad BIOCUBAFARMA para certificar el registro de nuevos fármacos. La perspectiva histórica demuestra lo eficaz y esencial que ha sido la utilización de animales como sujetos de prueba. Se ha logrado salvar vidas y responder a diferentes preguntas biomédicas, a partir de esta práctica. Una de las ventajas de los estudios en animales es la capacidad de investigar un grupo relativamente homogéneo de animales en lugar de un grupo heterogéneo de pacientes. Además, los estudios en animales ofrecen una gama más amplia de posibilidades para examinar la toxicidad de las intervenciones o la patología en estudio, y mecanismos de la enfermedad. Actualmente los órganos regulatorios aceptan los ensayos no clínicos de fármacos por medio de imágenes médicas. En la Unidad de Mapeo Cerebral del Centro de Neurociencias, se realiza el estudio de fármacos mediante su validación por IRM en animales pequeños.

Mejorar la calidad de las imágenes obtenidas en el Departamento de Resonancia de CNEURO es un reto importante. Es por ello, que la implementación de una estructura que optimice la Relación Señal-Ruido, dentro de la bobina volumétrica comercial que se emplea para el estudio de animales pequeño, podría brindar mejores resultados en la calidad de las imágenes. La contribución científica fundamental de este diseño es aumentar las prestaciones del equipo y, por ende, un aumento de su valor agregado dentro de los estudios no clínicos de fármacos en animales pequeños por Imágenes de Resonancia Magnética. Estos proyectos de evaluación de fármacos, con los requerimientos de los órganos regulatorios, acortan el período en que las nuevas drogas se convierten en productos. Dichos fármacos contribuyen a tratar diversas patologías médicas y, por tanto, elevar la calidad de vida de la sociedad cubana. La inclusión de los metamateriales puede generar los mismos resultados en los ensayos no clínicos en un equipo de Imágenes por Resonancia Magnética con respecto a equipos que se emplean para el estudio de animales pequeños. Estos dispositivos tienen un elevado costo, lo cual representa más factible potenciar los ensayos con metamateriales y brindar los mismos resultados.

La estructura del trabajo se distribuye como sigue: en la sección 2 se presentan los materiales y métodos, en la sección 3 se presentan los resultados y la discusión de los mismos, y finalmente se presentan las conclusiones.

2.- MATERIALES Y METODOS

En esta sección se describe el diseño de una lente metamaterial con permeabilidad negativa basada en estructuras periódicas de anillos resonantes. Se emplea como guía de onda de bobinas de RF en un equipo de Resonancia Magnética de 3T. Se conciben dos configuraciones de lentes empleando dos y cuatro resonadores. Se caracteriza la permeabilidad efectiva de la lámina de metamateriales haciendo uso de un modelo circuital para un anillo resonante y de un modelo de homogenización para la estructura.

2.1.- Concepción de una lente metamaterial con anillos resonantes CLR como guía de onda para una bobina de radiofrecuencia

Para el diseño de las lentes se eligió la estructura metamaterial CLR (Fig.1 c). Estas estructuras respecto de anillos resonantes cortados (o SRR, del inglés *Split Ring Resonator*) (Fig.1 b), presentan pérdidas en las tolerancias menores para las dimensiones de los anillos de más de 1 cm y se hace difícil poder generar capacidad distribuida con estas dimensiones, [8-10]. Con respecto al el denominado rollo suizo (o en inglés *swiss roll*) (Fig.2.1 a), se pretende el diseño de la lente para el estudio de animales pequeños en resonancia magnética, en una bobina volumétrica de dimensiones donde los *swiss rolls* no proporcionan el espacio necesario para el análisis de los resultados.

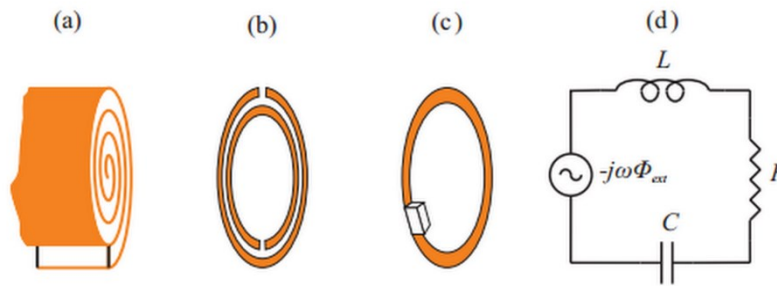


Figura 1

(a) Esquema del *swiss roll*. (b) Esquema del SRR. (c) Esquema del CLR. (d) Modelo circuital aplicable a los elementos resonantes a, b y c [11].

Se diseñan dos estructuras de lentes con el fin de analizar cuál configuración puede generar mejores resultados para una posterior implementación. Las lentes metamateriales se conciben como guía de onda, para disminuir el efecto del campo eléctrico en la bobina para animales (*Volume Resonator* ID35OD119) de unos 30 mm (Fig. 2). Esta bobina se emplea en el departamento para los experimentos con ratas dentro de un equipo de resonancia magnética **Siemens Magnetom Allegra 3T**, por lo cual, las estructuras deben estar sujetas al tamaño de la bobina y también debe cumplir los parámetros para que no sobrepase la longitud de onda a la que se trabaja.

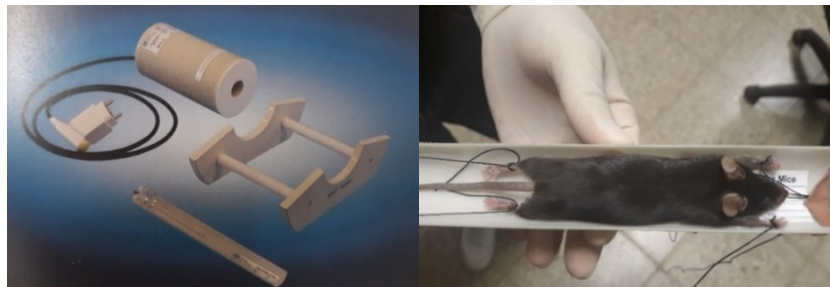


Figura 2

Bobina Volumétrica para el estudio de animales pequeños.

Para el diseño de las lentes se pretende partir de un esquema circuital (Fig.1 d) donde este circuito debe resonar a la frecuencia de 123,3 MHz aproximadamente que es la frecuencia del equipo de IRM de 3T.

Se utilizó para los diseños de las lentes el software de pago *AWR Design Environment 13* para Windows 7 (<http://www.awr.com>). Este programa permite caracterizar bobinas, simular los substratos, los componentes y los parámetros de frecuencia a los que estos se comportan con gran precisión. Permite conocer su funcionamiento gracias a las simulaciones virtuales. Además de las funciones principales de visualización e información, se incluyen la exportación, modificación y optimización de sus ficheros.

El análisis circuital se hace de forma individual para determinar las dimensiones y los parámetros de cada anillo que conforman las estructuras. Este análisis se puede hacer independiente de la simulación electromagnética, debido a que los valores de los capacitores empleados para optimizar la sintonía e impedancia del diseño eléctrico, no influyen directamente en la simulación electromagnética. Para dicha simulación electromagnética se crea una estructura con el arreglo de los anillos previamente optimizados.

2.2.- Dimensiones geométricas de las lentes

El diseño experimental de las lentes, como se ha indicado anteriormente, será implementado para el equipo de IRM del Centro de Neurociencias de Cuba. El imán del equipo genera una intensidad del campo magnético de 3T, por lo que la frecuencia de trabajo es $f_0=123.3MHz$, la longitud de onda es $\lambda \approx 2.43 m$ y la frecuencia de resonancia $\omega_0=774.71Mrad/s$.

$$\omega_0 = 2\pi f_0 \quad (1)$$

$$\omega_0 = 2\pi(123.3Mhz) = 774.71Mrad/s \quad (2)$$

Primeramente, se parte que el diseño de las lentes debe tener dimensiones específicas pues se efectuará en el estudio de animales pequeños de laboratorio como las ratas dentro de la bobina volumétrica comercial de diámetro aproximadamente de 30 mm.

Se pretende diseñar dos lentes con anillos de una vuelta $N=1$. Las lentes están constituidas una, por un arreglo bidimensional de $30 \times 30 mm^2$ con periodicidad $a=15 mm$ y contiene cuatro CLR's y otra por un arreglo bidimensional de $25 \times 42 mm^2$ con periodicidad $a=20 mm$ y contiene 2 CLR's. Para el arreglo de cuatro resonadores tenemos sus dimensiones del anillo de radio $r=4 mm$ y de ancho $w=2.5 mm$. Para el desarrollo de la lente de dos resonadores su radio es de $w=6 mm$ y ancho del anillo de $w=6 mm$.

Seguido tenemos la regla general, y es que los segmentos individuales de los anillos deben tener una longitud inferior a 1/10 de la longitud de onda en la frecuencia de trabajo. La longitud de nuestros anillos para las distintas lentes cumple con la regla pues sus longitudes son $L_1=25.13 mm$ y $L_2=37.7 mm$ respecto a la longitud de la regla $L_r=243 mm$.

Las lentes se conformaron en una microcinta basándose en substrato (MSUB) con permitividad relativa de $\epsilon_r=4.8$, alturas para una lente de $H_1=1.58mm$ y para otra de $H_2=1 mm$ y grosor $T=0.02$. El material a utilizar para los conductores de la lente es el cobre, material adecuado para las corrientes de radiofrecuencia [12].

2.3.- Diseño circuital del anillo. Cálculo de la inductancia y la capacitancia

Para la simulación circuital se diseña el circuito equivalente (Fig. 3), que corresponde a cada anillo de las lentes.

Este circuito se diseña en el software *AWR*, donde, primeramente, se definen unos valores de inductancia L y capacitancia C aleatorios; los cuales se ajustan agregando la medición de coeficiente de reflexión S_{11} . La frecuencia de trabajo f_0 se fija al criterio práctico con un coeficiente de reflexión $S_{11} < -30 dB$. Se determina el rango de frecuencias a la que se quiere operar. Se puede seguir el criterio práctico ubicando las frecuencias dentro 3 o 6 dB o en dependencia del factor de calidad Q al que se desea diseñar el circuito, ya que este se relaciona con el circuito resonante con la expresión donde se deduce que con los valores de f_0 y Δf en software optimiza los valores de L y C con una r fija.

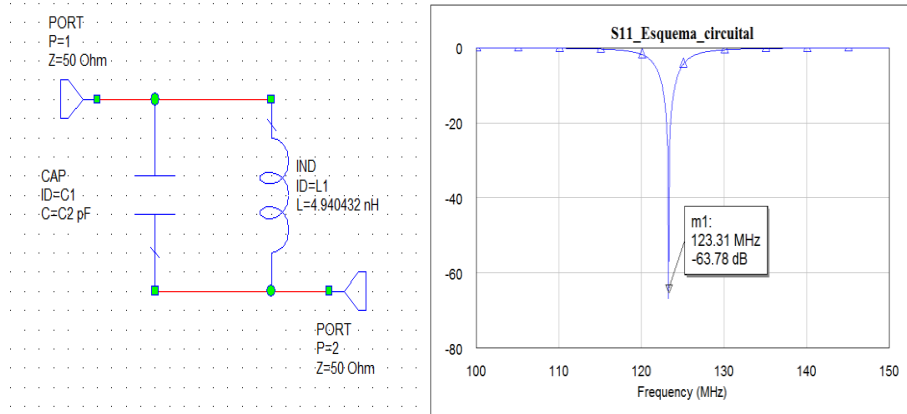


Figura 3

Esquema circuital de un anillo de una lente CLR y su parámetro de reflexión s11 con frecuencia de resonancia a 123,31 MHz a -67.78 dB.

Los valores de la capacidad son optimizados en función de la frecuencia de trabajo $f_0=123,3 \text{ MHz}$ y un coeficiente de reflexión $S_{11} < -30 \text{ dB}$.

$$Q = \frac{\omega L}{r} = \frac{1}{r} \sqrt{L/C} = \frac{f_0}{\Delta f} \quad (3)$$

$$L_1 = \frac{1}{(\omega_0^2 C_1)} = \frac{1}{(774.71M)^2 * 337.25p} \quad (4)$$

$$L_2 = \frac{1}{(\omega_0^2 C_2)} = \frac{1}{(774.71M)^2 * 208.86p} \quad (5)$$

Conociendo los valores de L y C el circuito equivalente (Fig.4) para cada anillo; se diseñó un circuito conformado por una microcinta con forma de curva (MCURVE) asociados al sustrato (MSUB), que representa el conductor físico de los anillos de las lentes y los capacitores que conforman el acople (Fig.5). Luego se obtienen los valores teóricos de la capacitancia y las dimensiones del sustrato.

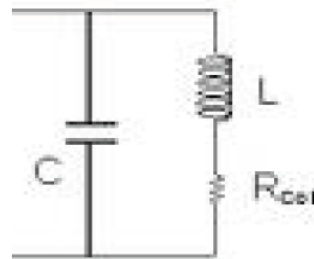


Figura 4

Circuito resonante RLC equivalente, donde la bobina se representa por un inductor (L) en serie con una resistencia (R_{coil} , muy pequeña), y un condensador de cierta capacidad (C o Ct) conectado en paralelo [13].

Donde la bobina se representa como un conductor (en este caso un sustrato), de un material dado (en este caso cobre), para determinar el largo y ancho del mismo. El conductor se representa esquemáticamente como una resistencia que equivale al inductor en serie con un resistor, en serie o paralelo al capacitor previamente calculado. El sustrato se define como el componente MSUB definido por E_r permeabilidad, H altura del sustrato y T espesor del sustrato. El componente MSUB representa la sección del conductor al cual se le deben ajustar las dimensiones w y r (ancho y radio) [14, 15].

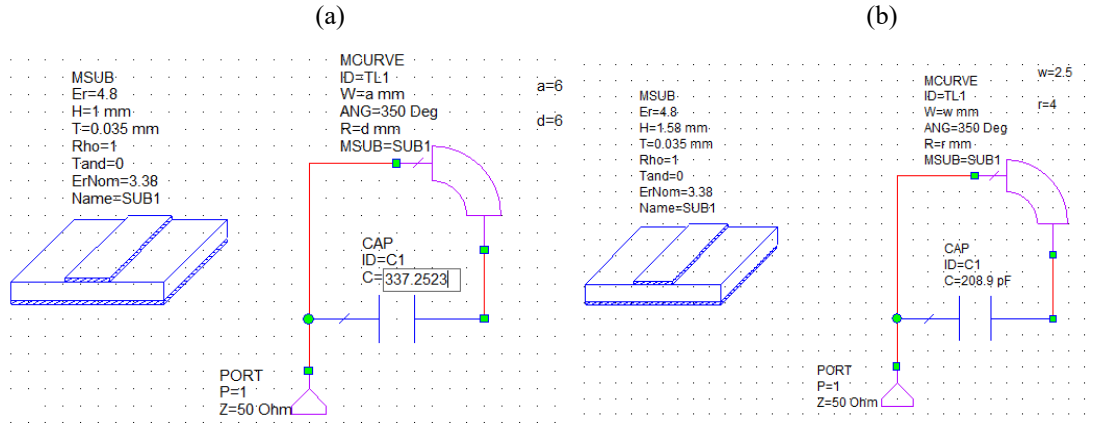


Figura 5

a) Esquema de Microcinta para la estructura de lente de dos resonadores. b) Esquema de Microcinta para la estructura de lente de cuatro resonadores.

2.4.- Obtención de las capacitancias para el anillo y optimización del diseño

Para el posterior diseño físico de las lentes de arreglos de anillos resonadores, existe un inconveniente respecto a los valores expresados en la simulación experimental del circuito equivalente que representa el esquema eléctrico de cada anillo. Dentro del diseño de la estructura metamaterial CLR el principal problema que refleja es que los valores experimentales de capacitancias a la hora del diseño físico de las lentes no pueden ser reflejado de manera física tal y como se expresó en la simulación. Existe un rango de valores comerciales de estos capacitores cerámicos para su fabricación. Este problema se soluciona optimizando los valores de ancho y radio de las estructuras de los anillos CLR con el fin de obtener la frecuencia de resonancia deseada a un valor comercial de capacitores cerámicos los cuales también debía de encontrarse disponibles en el Centro de Neurociencias de Cuba (CNEURO) en el momento en que se pudieran diseñar las lentes. Para la estructura CLR de dos resonadores el valor experimental de capacitancia $C_1=337,25 \text{ pF}$ aproximadamente, se sustituyó por un valor comercial de 330 pF , 5% de tolerancia, y se optimizaron las propiedades de la estructura de su anillo (Fig.6). Para la estructura CLR de cuatro resonadores el valor experimental es de $C_2=208.86 \text{ pF}$ aproximadamente, se sustituyó por un valor comercial de 220 pF , 5% de tolerancia y se optimizaron las estructuras físicas de sus anillos (Fig.7).

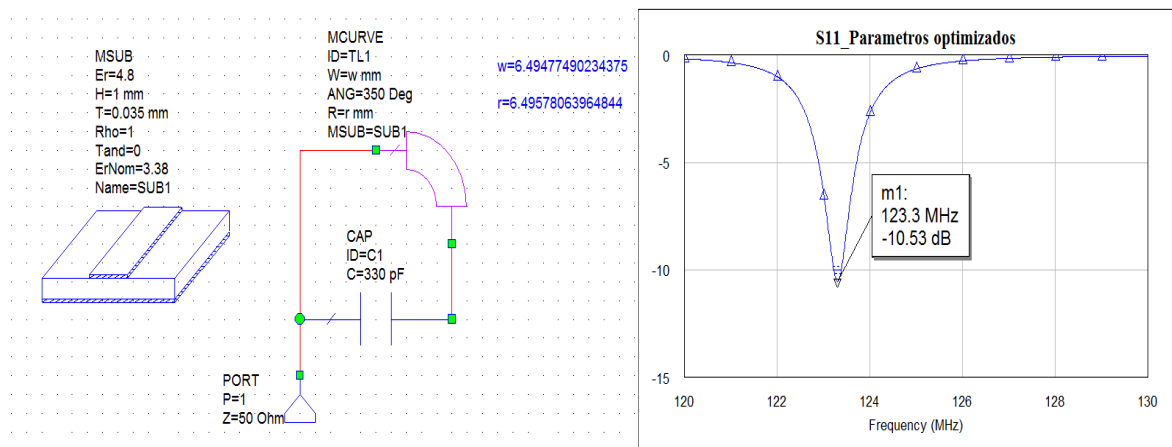


Figura 6

Parámetros optimizados para un valor de capacitancia de 330 pF y su parámetro de reflexión a la frecuencia de resonancia de $123,3 \text{ MHz}$.

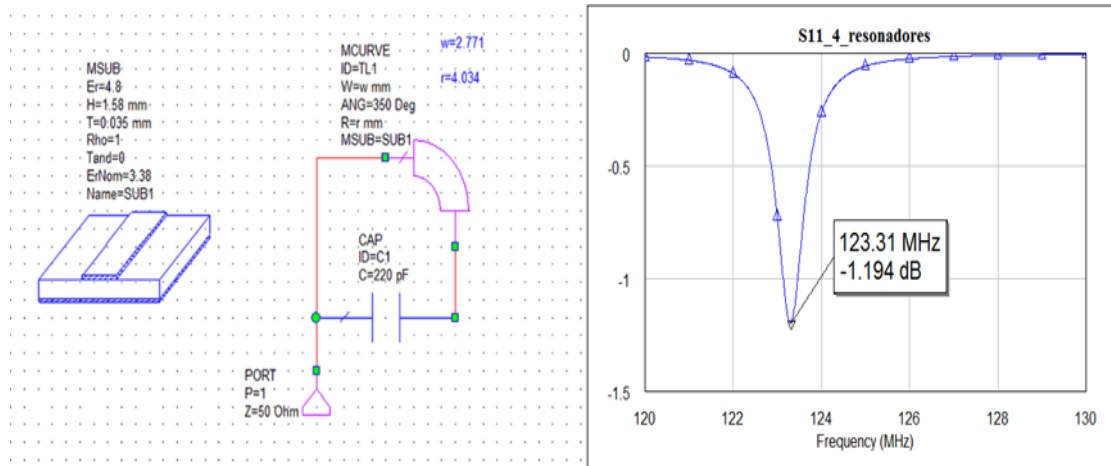


Figura 7

Parámetros optimizados para un valor de capacitancia de 220 pF y su parámetro de reflexión a la frecuencia de resonancia de 123,31 MHz.

2.5.- Cálculo de la permeabilidad magnética de la lente

Para determinar la permeabilidad magnética se analizó el esquema circuital con la microcinta de la celda unitaria de la lente extraída de los parámetros S simulados S_{11} y S_{21} . La permitividad efectiva y la permeabilidad efectiva se pueden determinar a partir de los coeficientes de transmisión y de reflexión, representados por S_{21} y S_{11} respectivamente. Las ecuaciones para la determinación se enumeran a continuación:

$$n = \pm \frac{\pm \cos^{-1}\left(\frac{1-S_{11}^2+S_{21}^2}{2S_{21}}\right)}{kd} \quad (6)$$

$$z = \pm \sqrt{\frac{(1+S_{11})^2-S_{21}^2}{(1-S_{11})^2-S_{21}^2}} \quad (7)$$

$$\epsilon_{eff} = n/z \quad (8)$$

$$\mu_{eff} = n * z \quad (9)$$

Aquí n es el índice de refracción, z representa la impedancia, k representa el número de onda ($k=\omega c$, $\omega=2\pi f$), y d es igual la longitud de la celda unitaria. Los resultados simulados de onda completa muestran que el medio construido de los resonadores CLR puede proporcionar permeabilidad magnética negativa para una frecuencia de trabajo que oscila con la frecuencia del equipo de Resonancia Magnética de 3T. La Figura 8 (a) describe la parte real y la parte imaginaria de la permeabilidad efectiva para la estructura CLR de la lente con dos resonadores. La Figura 8 (b) representa la parte real y la parte imaginaria de la permeabilidad efectiva de resonadores CLR para la estructura de cuatro anillos planos.

2.6.- Diseño de la estructura electromagnética de la lente con los arreglos de anillos CLR

Luego de obtener los valores de capacitancia y las dimensiones de los anillos, además de demostrar que la estructura diseñada se comporta como metamaterial con permeabilidad magnética negativa; se diseña la estructura electromagnética con el arreglo de anillos resonantes CLR (Fig.9).

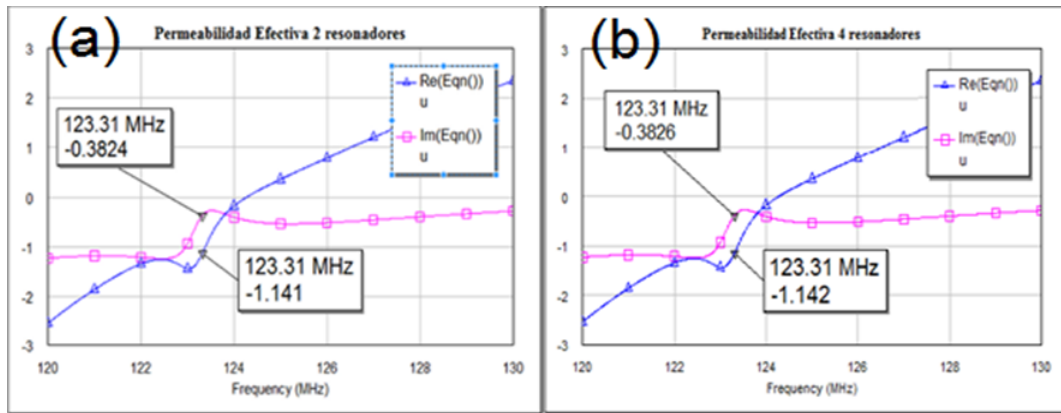


Figura 8

(a) Parte real y parte imaginaria de la permeabilidad magnética efectiva de la estructura de dos resonadores CLR (b) Parte real y parte imaginaria de la permeabilidad magnética efectiva de la estructura de cuatro resonadores CLR.

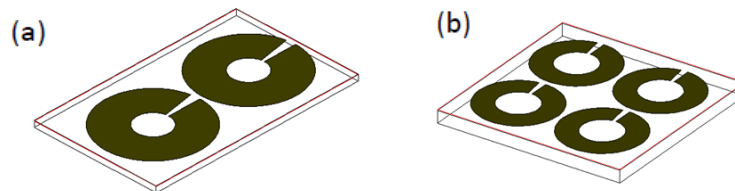


Figura 9

Estructura electromagnética de las lentes (a) dos resonadores (b) cuatro resonadores.

La simulación electromagnética de las lentes se realiza aparte del esquema circuital, y brinda un resultado de cómo se va a comportar la lente con respecto a la acción de un campo magnético sobre ella, principalmente la homogeneidad del campo durante el uso de esta lente. Para la simulación de la estructura de metamaterial (Fig.10) y (Fig.11) se empleó un diseño de una bobina superficial que tiene una frecuencia de resonancia de 123.3 MHz la cual crea un campo magnético externo en donde se coloca la lente diseñada y se analiza la homogeneidad del campo magnético en presencia de la lente y el comportamiento del campo eléctrico, con y sin la lente. Los resultados de dichas simulaciones se darán en la sección 3.

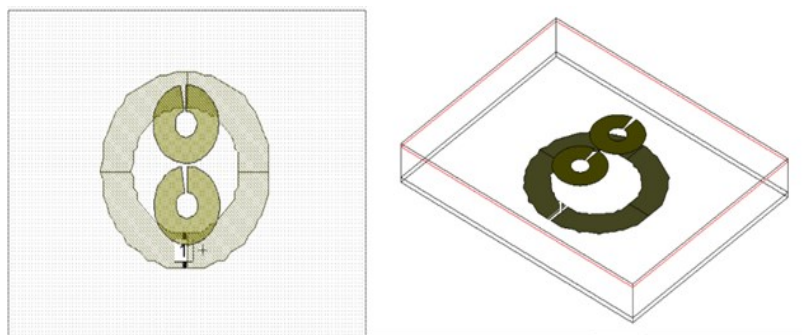


Figura 10

Simulación de la estructura electromagnética junto a la bobina para la estructura de dos resonadores

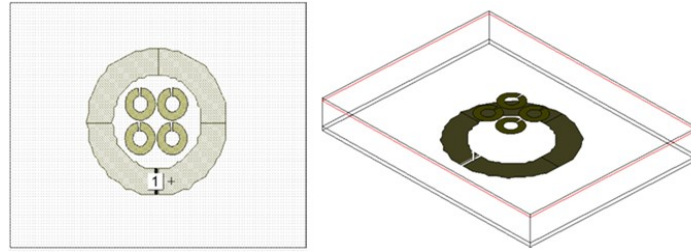


Figura 11

Simulación de la estructura electromagnética junto a la bobina para la estructura de cuatro resonadores.

2.7.- Propuesta de implementación práctica de la lente en PCB

Para el diseño de la lente en PCB, se empleó el software *Altium Designer* (Fig.12.a). Pues, es un programa basado principalmente en el diseño de circuitos impresos, y refleja una gran precisión en las medidas circuitales para el diseño de los anillos y las distancias de periodicidad de la lente. Además, este software te permite convertir el diseño en un archivo que contiene la información del circuito para su posterior fabricación en las impresoras de circuitos que trabajan por control numérico computarizado (CNC).

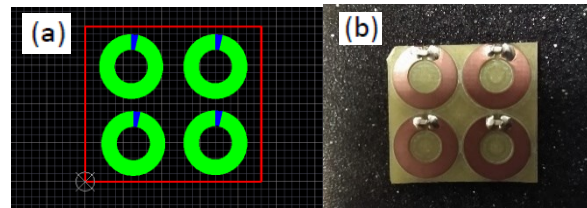


Figura 12

Implementación de una configuración de lente empleando 4 resonadores (a) PCB (*printed circuit board*) circuito impreso de la lente que se diseñó en el software *Altium Designer* (a) Placa de estructura de lente CLR impresa.

Se imprimió un primer modelo de lente en PCB (Fig.12.b) usando la configuración de cuatro resonadores CLR; y se colocaron capacitores comerciales de 220 pF. Se debe reimprimir la placa porque el corte del sustrato se realizó demasiado justo a la estructura impresa. Además, se debe tener en cuenta los resultados arrojados en las simulaciones para elegir un diseño óptimo.

3.- RESULTADOS Y DISCUSION

En este capítulo se comparan los valores obtenidos del análisis de las variables fundamentales para caracterizar los distintos diseños de las lentes de los metamateriales: en base a su permeabilidad magnética, la resolución de las lentes, análisis de la uniformidad del campo eléctrico, valores promedios de las imágenes tales como la Media, Mediana, Moda; y la homogeneidad del campo magnético con y sin la presencia de las lentes de metamaterial diseñadas. Con respecto a su comparación se pretende escoger la lente que mejores resultados genere en base a sus características y su influencia en la mejora de la calidad de la imagen y por ende de su Relación Señal-Ruido.

3.1.- Comparación de los valores de permeabilidad magnética efectiva

En la Tabla 1 Se puede observar la comparación de los valores de permeabilidad magnética a sus distintas frecuencias, de las lentes de dos resonadores y de cuatro resonadores correspondientemente.

Tabla 1
Comparación de los valores de permeabilidad magnética a las distintas frecuencias reflejadas.

Lentes	Frecuencia (MHz)	Permeabilidad Magnética(parte real)	Permeabilidad Magnética (Parte Imaginaria)
Cuatro resonadores	123.31	-1,142	-0.3826
Dos resonadores	123.31	-1,141	-0.3824

Los valores de permeabilidad se representan aproximadamente al valor ideal de permeabilidad efectiva de $\mu=-1$ a distintas frecuencias cercanas al valor de la frecuencia de resonancia de dichas lentes. En este caso las dos lentes cumplen con el objetivo descrito de la permeabilidad magnética negativa capaz de aumentar la distancia de penetración de las bobinas detectoras de RM en el interior del tejido, y con ello la Relación Señal-Ruido de las bobinas.

3.2.- Homogeneidad del campo magnético

En la (Fig.13.a) se ve representado la simulación electromagnética de la bobina sin presencia de la lente de metamaterial y con presencia de las lentes (Fig.13. b).

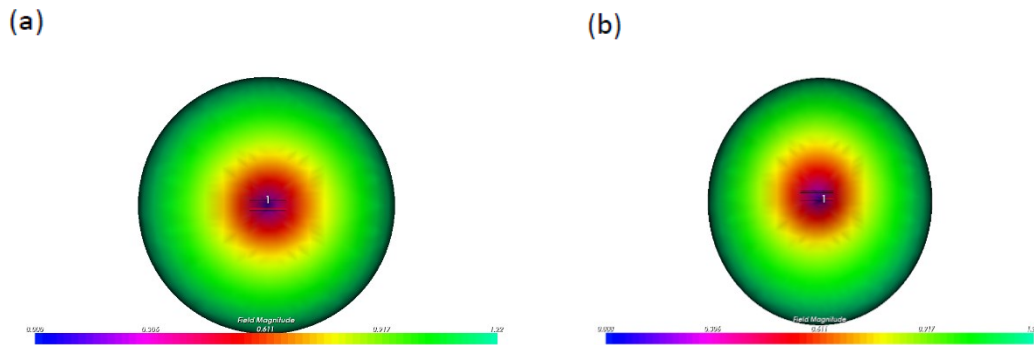


Figura 13

Simulación del campo magnético en 3D (a) sin lente de metamaterial (b) con presencia de lente de metamaterial.

Se puede observar en la (Fig.13) la homogeneidad del campo magnético generado por la bobina y como estos valores y su homogeneidad no se ven alterados al introducir las lentes por lo que podemos afirmar que:

- La inclusión de las láminas no afecta la homogeneidad del campo magnético alrededor de la bobina.
- Las lentes se comportan como un medio zurdo.
-

3.3.- Función de Transferencia. Focalización de las lentes

Para una lámina de metamaterial actuando como lente de campo cercano, el interés reside en obtener la función de transferencia para los armónicos evanescentes de la distribución de campo. Para el análisis que viene a continuación, se define la función de transferencia $T(\omega, k)$ como el coeficiente de transmisión entre el plano fuente y el plano imagen, a la frecuencia ω , para cada armónico evanescente con número de onda transversal k en un plano paralelo a las interfaces de la lámina (plano xy). Con el fin de establecer primero la referencia a efectos comparativos, se procede en primer lugar a calcular la función de transferencia de la lámina de material homogénea caracterizada por el modelo descrito en la ecuación para el cálculo de la permeabilidad. Esta función de transferencia puede ser obtenida analíticamente como

$$T(\omega, k) = \frac{4\mu e^{-|k|d}}{(\mu+1)^2 e^{-|k|d} - (\mu-1)^2 e^{-|k|d}} \quad (10)$$

Donde d es el espesor de la lámina y μ vendrá dada por la ecuación que describe la permeabilidad magnética. La figura (Fig.14) muestra un mapa bidimensional de los valores de $T(\omega, k)$ así obtenidos para los valores del número de ondas transversal k en el intervalo $[0, 1/d]$. Se observan valores de frecuencias que oscilan aproximadamente para $T \approx 1$. Este valor en esa determinada región define los intervalos de frecuencias para la cual todos los armónicos evanescentes presentan en el plano imagen la misma amplitud que en el plano fuente, de manera que la imagen es transferida sin distorsión desde el plano fuente al plano imagen [16].

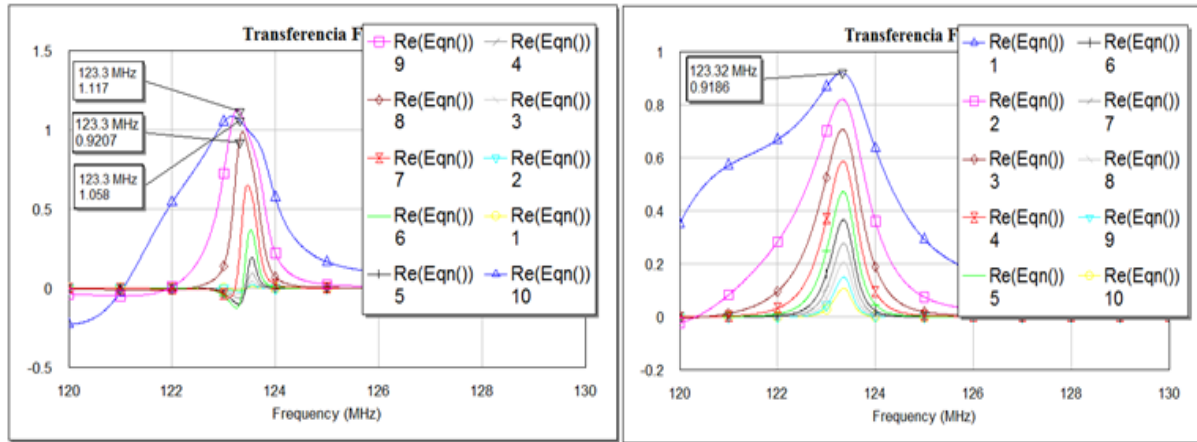


Figura 14

Función de transferencia para distintos valores kd , siendo k el número de ondas transversal discreto de los armónicos evanescentes y d el espesor de la lente.

Durante el análisis de la función de transferencia se estudiaron los valores correspondientes a ciertas distancias de focalización donde se hace variar en tamaños enteros del espesor d de la lente, donde la transferencia de señal es su valor unidad explicado anteriormente. El resultado de este análisis determinó que la lente de dos resonadores proporciona los valores aproximados a $T=1$ a la distancia de focalización de $10d$ y para la lente de cuatro resonadores a la distancia d . Estos resultados determinan la resolución de las lentes las cuales, a estas distancias, proporcionan los valores optimizados que describen la funcionalidad de dichas estructuras para la mejora de la calidad de la imagen en presencia de metamateriales.

3.4.- Comparación de los valores para el análisis del campo eléctrico

Para el análisis del campo eléctrico se simuló lentes con diferentes configuraciones de los anillos resonadores (Fig.15 a), para obtener la estructura que mejores resultados brinde con respecto a los distintos valores de análisis de las imágenes. Las configuraciones simuladas son: bobina circular sola, lente de cuatro resonadores, lente de cuatro resonadores distribuidos en contrafase, lente de dos resonadores, lente de dos resonadores distribuidos en contrafase y lente de dos resonadores con puertos unidos.

En las distintas imágenes se estudiaron cinco Regiones de Interés (ROI) (Fig.15 b) y se determinaron por cada región sus valores de No Uniformidad (NUI), Desviación Estándar (DS), Media, Mediana y Moda.

3.5.- Análisis de la No Uniformidad de Imagen (NUI)

La No Uniformidad de una Imagen (NUI) se manifiesta como las variaciones de las bajas frecuencias espaciales típicamente en una imagen. La NUI dentro de una Región de Interés (ROI) se calcula dividiendo la desviación estándar de los píxeles de la ROI entre su Media [17].

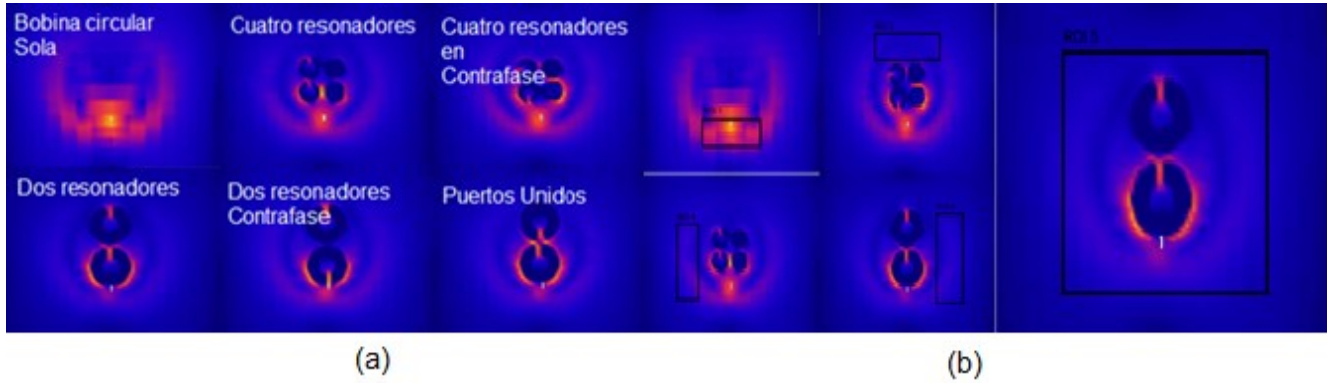


Figura 15

a) Simulación del campo eléctrico con y sin presencia de las lentes y sus estructuras a analizar b) Regiones de Interés (ROI) en las distintas simulaciones del campo eléctrico de las estructuras analizadas

Para calcular la NUI se debe utilizar el siguiente procedimiento:

- Seleccionar la ROI en la imagen.
- Calcular la desviación estándar de la ROI: DS_p
- Calcular la Media de la ROI: M_p
- Calcular la No Uniformidad de Imagen (NUI) como:

$$NUI = \frac{DS_p}{M_p} * 100(\%) \quad (11)$$

$$M_p = \frac{\sum_{p=1}^{N_{puntos}} i_p}{N_{puntos}} \quad (12)$$

$$DS_p = \sqrt{\frac{\sum_{p=1}^{N_{puntos}} (i_p - \mu)^2}{N_{puntos} - 1}} \quad (13)$$

En base a estas ecuaciones se implementó una función de Matlab. Las tablas 2 y 3, y las Fig. 16 y 17 muestran los resultados de estos parámetros por regiones:

Tabla 2
 Valores de NUI obtenidos en las ROI 1, ROI 2, ROI 3, ROI 4, ROI 5 y el promedio de las ROIs para las distintas configuraciones de la lente.

NUI(%)	Bobina circular sola	Lente de cuatro resonadores	Lente de cuatro resonadores en contrafase	Lente de dos resonadores	Lente de dos resonadores distribuidos en contrafase	Lente de dos resonadores con puertos unidos
ROI 1	26.63	26.89	25.01	31.31	31.29	31.58
ROI 2	5.3	5.91	6.76	8.28	1.33	7.12
ROI 3	25.19	4.74	5.74	4	3.13	3.51
ROI 4	25.19	4.74	5.74	4	3.13	3.51
ROI 5	51.07	37.12	41.35	62.14	45.18	66.26
Average	26.676	18.3725	16.92	21.946	16.812	22.796

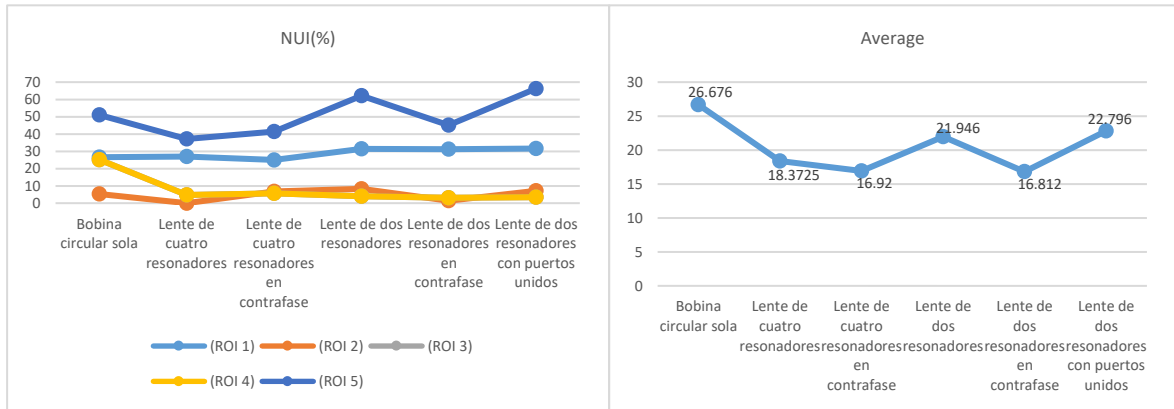


Figura 16

Comparación de los valores de la NUI en las cinco ROIs respecto a las configuraciones de los resonadores.

Tabla 3
 Valores de Desviación Estándar (DS) en las ROIs.

DS	Bobina circular sola	Lente de cuatro resonadores	Lente de cuatro resonadores en contrafase	Lente de dos resonadores	Lente de dos resonadores en contrafase	Lente de dos resonadores con puertos unidos
ROI 1	23.32	9.49	9.47	9.58	9.69	9.64
ROI 2	1.86	2.57	2.09	2.52	2.69	2.03
ROI 3	13	2.49	1.88	1.35	0.92	1.09
ROI 4	11.28	3.65	3.06	2.13	1.57	1.82
ROI 5	25.56	17.19	14.15	22.09	16.35	23.48
Average	15.004	7.078	6.13	7.534	6.244	7.612

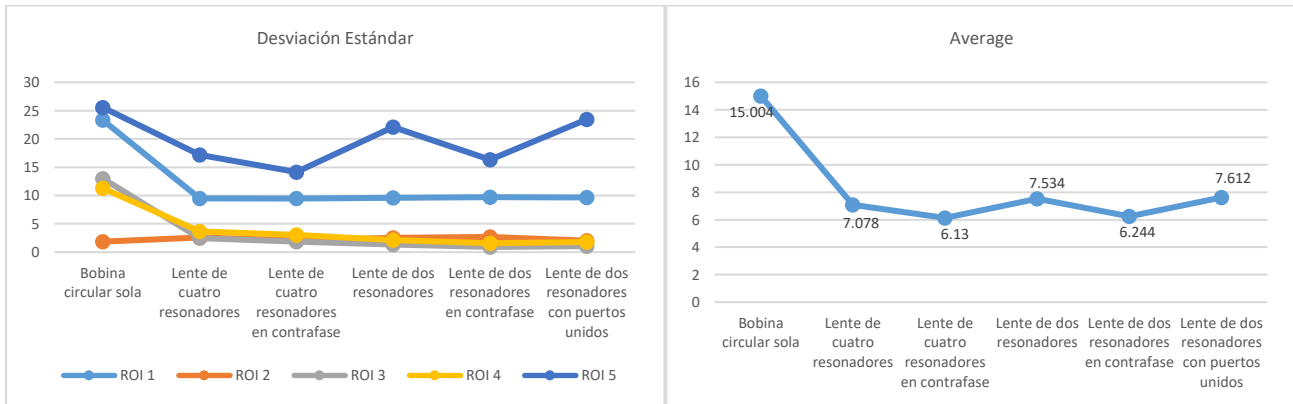


Figura 17

Comparación de los valores de DS en las ROIs de las imágenes para el análisis del campo eléctrico.

El estudio de la NUI (Fig.17) en las diferentes estructuras determinó que los valores de no uniformidad reflejan diferencias significativas. Podemos comparar los valores de NUI con respecto a la simulación del campo eléctrico sin presencia de los resonadores y con presencia de los mismos y sus diferentes formas. Se pudo ver que el promedio de los valores de NUI a lo largo de todas las ROI disminuyen. Los valores descriptores de la Media, Mediana y Moda (Fig.18) determinan la variación de la intensidad del campo eléctrico y su notable disminución cuando se analiza el campo en presencia de las lentes de metamateriales. Los índices que mejores resultados proporciona con respecto a la disminución de los valores en los

descriptores de NUI, DS(Fig.18), Media, Moda y Mediana se ven reflejados en la estructura de metamaterial de dos resonadores ubicados en contrafase.

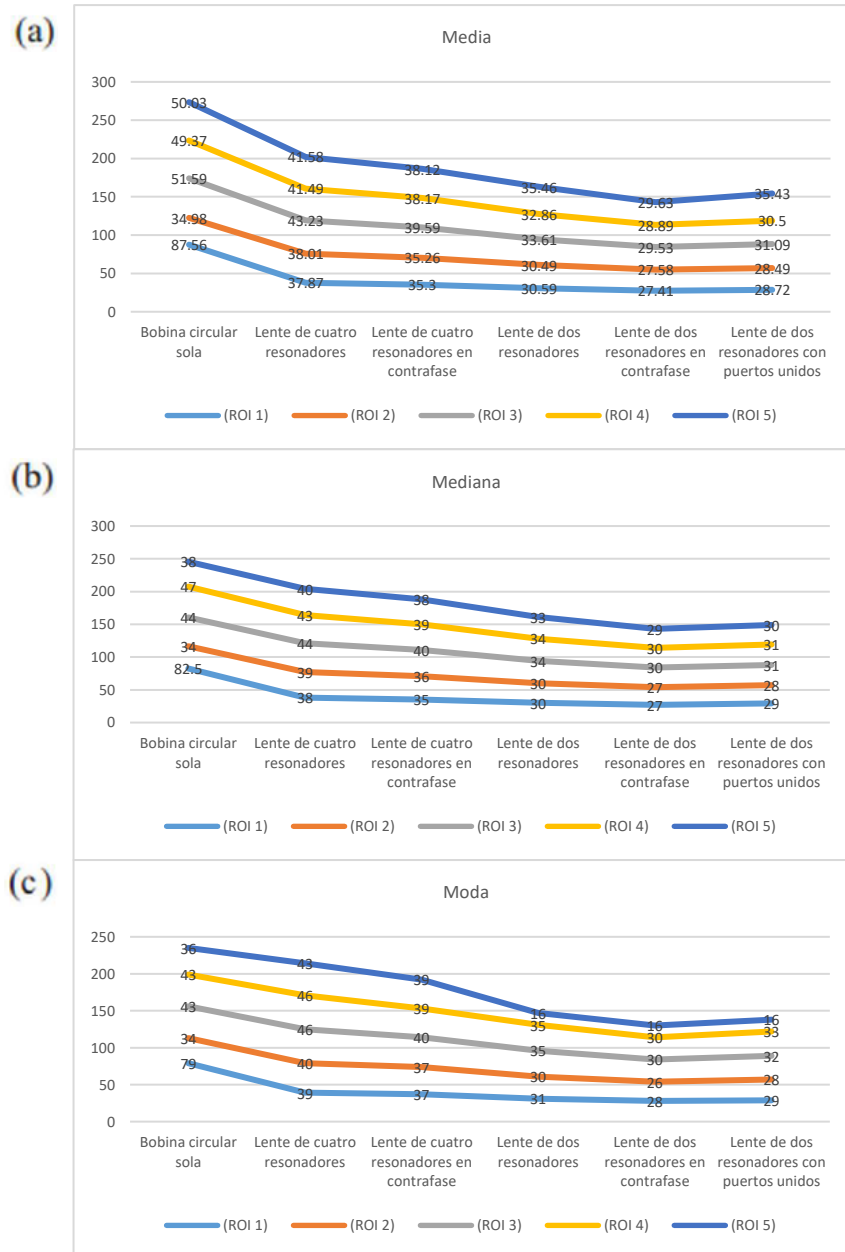


Figura 18

Análisis y comparación de los valores estadísticos descriptores de Media, Mediana y Moda para las ROIs en la simulación del campo eléctrico con las diferentes configuraciones de la lente.

4.- Conclusiones

Se logró el diseño y la optimización de una lente metamaterial formada por estructuras periódicas de anillos resonantes. Se demostró que estas estructuras presentan un comportamiento metamaterial al demostrar que la permeabilidad magnética es negativa. Se demostró con resultados, que el diseño de una lente metamaterial usando resonadores CLR puede ser implementada como guía de onda junto a una bobina de radiofrecuencia para animales mejorando la señal de las mediciones.

Se analizó los resultados de las simulaciones dos lentes metamateriales para el campo magnético y eléctrico por separado. Mediante la simulación de la estructura electromagnética se demostró que las lentes no afectan el campo magnético, pero sí el campo eléctrico. Por lo que estas lentes se pueden emplear como guías de onda para bobinas de radiofrecuencia. Además, se comparó los resultados de los valores de permeabilidad magnética para dos configuraciones demostrando su condición metamaterial con $\mu = -1$. Se observó la influencia de la distancia entre las lentes y la bobina como un factor importante a tener en cuenta, ya que cambia los resultados de las mediciones. También, se demostró que la posición de los capacitores al colocar el arreglo de resonadores CLR en contrafase atenúa el campo eléctrico. La lente formada por dos resonadores en contrafase fue la escogida para su diseño por brindar los mejores resultados, luego del análisis de la no uniformidad para las cinco regiones elegidas de todas las posibles combinaciones de las lentes.

Se recomienda implementar en PCB la configuración escogida en simulación, de dos resonadores en contrafase; pues en el primer diseño implementado de cuatro resonadores no se tuvo en cuenta la ubicación en contra fase para disminuir el ruido. Una vez impresa la placa circuital optima, se deben realizar mediciones prácticas con un analizador de espectros para determinar los valores de la Relación Señal-Ruido de la lente. Estas mediciones se deben realizar en la bobina volumétrica para animales que se tiene en el Centro, pues para efectos de la simulación se empleó una bobina superficial debido a la complejidad del diseño de la volumétrica en el software empleado.

AGRADECIMIENTOS

Agradecimientos al Dpto. de Electrónica del CNEURO por la ayuda brindada con la instrumentación y la puesta a punto del primer prototipo de la lente.

REFERENCIAS

1. Pendry, J.B., et al., Magnetism from conductors and enhanced nonlinear phenomena. *IEEE Transactions on microwave theory and techniques*, 1999. **47**(11): p. 2075-2084.
2. Arbesú, J.M.G., E.Ú. Farré, and J.R. Robert, *Metamateriales en microondas y antenas*. Universidad Politécnica de Catalunya, 2003: p. 32-38.
3. Kretov, E., A. Shchelokova, and A. Slobozhanyuk. Investigation of metasurface eigenmode impact on receive sensitivity enhancement of MRI machine. in *12th International Congress on Artificial Materials for Novel Wave Phenomena (Metamaterials)*. 2018. IEEE.
4. Castellanos, L.M., F. López, and E. Reyes-Vera, *Metamateriales: principales características y aplicaciones*. *Revista de la Academia Colombiana de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales*, 2016. **40**(156): p. 395-401.
5. Khennouche, M., et al., The use of metamaterials: A solution to improve the performance of radiofrequency coil for magnetic resonance imaging (MRI)? *Metamorphose-VI*, 2011. **4**: p. 468-470.
6. Abdeddaim, R. and S. Enoch. MetaMaterials for ultra-high field MRI. M-Cube project: objectives and some results. in *12th International Congress on Artificial Materials for Novel Wave Phenomena (Metamaterials)*. 2018. IEEE.
7. Shchelokova, A., et al. A metasolenoid-like resonator for MRI applications. in *11th International Congress on Engineered Materials Platforms for Novel Wave Phenomena (Metamaterials)*. 2017. IEEE.
8. Vélez, P., et al. Measuring Glucose Content in Aqueous Solutions by means of Split Ring Resonator (SRR) Loaded Transmission Lines. in *12th International Congress on Artificial Materials for Novel Wave Phenomena (Metamaterials)*. 2018. IEEE.
9. Pandey, A. and P. Chaudhary. Comparative analysis of resonance characteristics single sided SRR type metamaterials for varying gap size. in *International Conference on Inventive Communication and Computational Technologies (ICICCT)*. 2017. IEEE.

10. Soboleva, V., et al., Coherent radiation of relativistic electrons in metamaterials based on the SRR/wire-grid unit cell in millimeter wavelength range. Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section B: Beam Interactions with Materials and Atoms, 2017. **402**: p. 182-184.
11. Algarín, J.M., Metamateriales magnéticos de anillos resonantes para aplicaciones en imagen médica por resonancia magnética, in Universidad de Sevilla. 2015, Universidad de Sevilla.
12. Wu, J. and B.N. Li, Development of a magnetoinductive lens for magnetic resonance imaging. IEEE Instrumentation & Measurement Magazine, 2017. **20**(6): p. 56-60.
13. Hasan, M., et al., A new compact double-negative miniaturized metamaterial for wideband operation. Materials, 2016. **9**(10): p. 830.
14. Bautista, M.G., Y. Yang, and E. Dutkiewicz. Compact on-chip 60 GHz resonator with ring defected ground structure for millimetre-wave applications. in 9th International Conference on Humanoid, Nanotechnology, Information Technology, Communication and Control, Environment and Management (HNICEM). 2017. IEEE.
15. Bautista, M.G., J. Hora, and E. Dutkiewicz. Design Methodology of a Miniaturized Millimetre Wave Integrated Passive Resonator Using (Bi)-CMOS Technology. in 18th International Symposium on Communications and Information Technologies (ISCIT). 2018. IEEE.
16. Marqués, R., F. Martin, and M. Sorolla, Metamaterials with negative parameters: theory, design, and microwave applications. 1 ed. Vol. 183. 2011, New York: John Wiley & Sons.
17. González Dalmau, E.R., C. Cabal Mirabal, and M. Noda Guerra, Bases para un sistema de control remoto de la calidad de equipos de imágenes por resonancia magnética. Revista Ingeniería Electrónica, Automática y Comunicaciones, 2014. **35**(1): p. 33-45.

CONFLICTO DE INTERESES

Ninguno de los autores manifestó la existencia de posibles conflictos de intereses que debieran ser declarados en relación con este artículo.

CONTRIBUCIONES DE LOS AUTORES

Amalia Lobaina Abad: Contribución importante en la revisión bibliográfica, elección del software de simulación y la concepción de lentes metamateriales aplicadas a IRM. Colaboración significativa, en el diseño específico de lente metamaterial basada en resonadores CLR, como tutora del trabajo de Diploma de Ingeniería Biomédica. Redacción del artículo y su revisión final.

Luis Ramón González Betanzos: Contribución significativa en la concepción y simulación del software en este diseño de lente metamaterial con anillos resonadores CLR como parte de su trabajo de curso de Ingeniería Biomédica. Participación importante en la redacción y revisión del artículo.

Evelio Rafael González Dalmau: Contribución relevante en la concepción y dirección del proyecto de metamateriales para IRM. Aporte significativo en la base teórica del electromagnetismo y la instrumentación en antenas de RF en equipos de IRM y su aplicación con metamateriales. Revisión crítica del borrador y la versión final del artículo a publicar.

Eduardo Borrego Corona: Colaboración y asesoramiento en las simulaciones con el software CST. Contribución en el basamento teórico para el diseño de antenas con metamateriales. Participación en la redacción y revisión del artículo.

AUTORES

Amalia Lobaina Abad, Ingeniera en Automática, graduada de en la Universidad Tecnológica de La Habana José Antonio Echeverría CUJAE, La Habana, Cuba. Especialista en Neuroinformática en el Centro de Neurociencias de Cuba. Email: amalia.lobaina@cneuro.edu.cu. ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-4842-2483>. Principales intereses de investigación: Diseño de bobinas de RF para equipos de imágenes por Resonancia Magnética empleando estructuras metamateriales; e instrumentación y control en el departamento de Optogenética.

Luis Ramón González Betanzos, Ingeniero en Biomédica, graduado de en la Universidad Tecnológica de La Habana José Antonio Echeverría CUJAE, La Habana, Cuba. Especialista del CITMA en el Centro de Neurociencias de Cuba. Email: luisramon@cneuro.edu.cu. ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-9449-2410>. Principales intereses de investigación: Diseño

de bobinas de RF para equipos de imágenes por Resonancia Magnética empleando estructuras metamateriales; e instrumentación y control en el departamento de Optogenética.

Evelio Rafael González Dalmau, Lic. Física, Dr. Ciencias Técnicas, graduado de en la Universidad de Oriente, Santiago de Cuba, Cuba. Prof. E Investigador Titular en el Centro de Neurociencias de Cuba. Profesor adjunto de facultad de Ingeniería Automática y Biomédica la Universidad Tecnológica de la Habana. Email: evelio.gonzalez@cneuro.edu.cu. ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-4569-2103> Principales intereses de investigación: Proyectos de Resonancia Magnética para estudios de modelos de animales y ensayos clínicos; y mejora de la Relación Señal-Ruido y el contraste en las imágenes de IRM.

Eduardo Borrego Corona, Ing. Radioelectrónico, Dr. Ciencias Técnicas, Máster en la especialidad de Microondas, Diplomado en electrónica en la Universidad de Hefei, China, Investigador Auxiliar, Orden Carlos J Finlay. Profesor auxiliar del departamento de Dpto. de Telecomunicaciones y Electrónica de la CUJAE. Email: borregomiguel6709@gmail.com. ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-8381-8320> Principales intereses de investigación: Aplicaciones de nuevas tecnologías de WIFI en sistemas de vídeo vigilancia y aplicaciones de estructuras metamateriales en RF.



Esta revista se publica bajo una [Licencia Creative Commons Atribución-No Comercial-Sin Derivar 4.0 Internacional](https://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/4.0/)