

DISEÑO DE ANTENAS DE MICROCINTA CON EMPLEO DE ESTRUCTURAS METAMATERIALES RESONANTES

Por: Ing. Dairon González La Rosa, Especialista de Redes, Escuela Latinoamericana de Medicina (ELAM); Ing. Roberto Carlos Mieres García, Especialista “C” en Telemática; Ing. Carlos García Pérez, Especialista “C” en Telemática e Ing. Miguel Ángel Borges Sánchez, Especialista “C” en Telemática (EP). División Territorial Artemisa. (ETECSA).
rcmieresg@gmail.com, carlosg.perez@etecsa.cu y miguel.borges@etecsa.cu

RESUMEN

En este artículo se propone un estudio sobre los metamateriales resonantes del tipo OSRR, los cuales convenientemente distribuidos sobre las líneas de alimentación resuelven el limitado ancho de banda que presentan las antenas de microcinta. Con los modelos que se proponen se logra alcanzar incrementos del ancho de banda que oscilan entre 6.42% y 6.72%, y se resuelven las inconveniencias ocasionadas a las características de radiación (directividad y ganancia) de las antenas, provocadas por la inclusión de metamateriales.

Palabras clave: Ampliación del ancho de banda, antena de microcinta, metamateriales, resonadores planares

ABSTRACT

This paper proposes a study on the OSRR resonant metamaterials that, conveniently distributed over the power lines, solve the limited bandwidth of the microstrip antennas. With the proposed models it is possible to achieve bandwidth increments ranging between 6.42% and 6.72%, and the inconveniences caused to the radiation characteristics (directivity and gain) of the antennas by the inclusion of metamaterials, are solved.

Keywords: Bandwidth expansion, microstrip antenna, metamaterials, planar resonators

Introducción

El actual progreso de las tecnologías en la época moderna, dirigido a las distintas esferas de la ciencia, muestra un número considerable de soluciones en la búsqueda de la miniaturización de los dispositivos y el logro de altas prestaciones. Una herramienta considerable ha sido la inclusión de estructuras con características distintas a las propias del modelo, tal se ha comprobado con la inclusión de metamateriales en antenas de microcinta. [1]

Una definición estricta sobre los metamateriales no ha sido elaborada aún, pero se pueden definir a los metamateriales como estructuras periódicas o cuasi-periódicas que son artificialmente creadas para exhibir propiedades electromagnéticas controlables [2,3].

Por otra parte, las antenas de microcinta presentan características bien conocidas que las hacen más ventajosas que otro tipo de estructuras, pero su limitado ancho de banda y baja eficiencia limita su uso para algunas aplicaciones. El objetivo de esta investigación es proveer nuevas herramientas que resuelvan parámetros críticos en el diseño de

este tipo de antenas, como son su limitado ancho de banda y mejora de los parámetros de radiación que se debilitan al insertar otras estructuras, ubicándolas en un punto de preferencia para algunas aplicaciones inalámbricas.

Metamateriales resonantes

Los primeros intentos para lograr el comportamiento negativo de los parámetros eléctricos que describen un metamaterial trajeron consigo la introducción de nuevos diseños, basados en la implementación de estructuras zurdas mediante el empleo de resonadores de anillos.

Resonador de anillos cortados (SRR)

El resonador de anillos abiertos —*Split Ring Resonators*, (SRR) — resultó ser la primera estructura resonante no magnética capaz de dar lugar a valores negativos de permeabilidad magnética efectiva [5].

Como se muestra en la figura 1, la estructura está formada por un par de anillos metálicos concéntricos en los cuales se han realizado unas aberturas en posiciones opuestas una respecto a la otra.

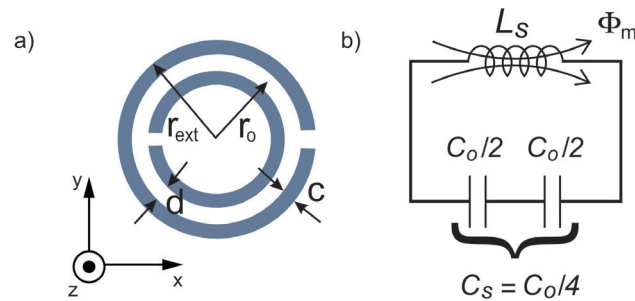


Figura 1. Esquema de las dimensiones más relevantes del SRR (a), modelo eléctrico (b). Fuente: [5]

Resonador de anillos divididos abiertos (OSRR)

El OSRR —*Open Split Ring Resonator*— o resonador abierto de anillos partidos es una evolución de las estructuras SRR y ORR [6]. Su topología se puede describir como dos ganchos concéntricos situados uno en el interior del otro. La estructura consiste en la inserción dentro de la microtira de los propios anillos resonantes, lo que es equivalente a decir, que se obtienen truncando los anillos que forman el resonador y alargando sus salidas de alimentación, hasta ser interceptados con la línea, como se muestra en la figura 2 junto al modelo de su circuito equivalente.

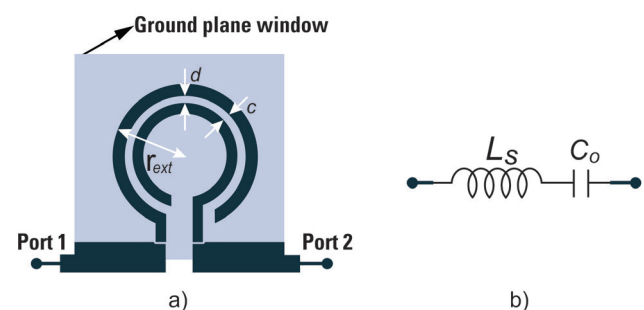


Figura 2. Estructura de microcinta cargada con resonadores abiertos. (a) resonador abierto de anillos cortados (OSRR), (b) modelo de circuito equivalente. Fuente: [8]

En el modelo de circuito equivalente la capacidad está distribuida entre los dos anillos concéntricos. Por tanto, se puede decir que la frecuencia de resonancia de un OSRR será la mitad que en un SRR de iguales dimensiones.

Líneas de transmisión basadas en resonadores OSRR

Sin ranuras capacitivas

El primer diseño propuesto es el de una línea de microcinta convencional cargada con tres pares de partículas OSRR a cada lado de la línea con una simetría impar.

Para esta estructura se realizó el análisis de las pérdidas de retorno (Figura 3) y del campo eléctrico (Figura 4) y para comprobar la existencia de las bandas de transmisión y de rechazo, características de las líneas de transmisión meta-materiales. Con esta configuración se obtiene una banda de transmisión a la frecuencia de 2.35 GHz seguida de una banda de rechazo a la frecuencia de resonancia de los anillos donde se inhibe la propagación de la señal como se puede apreciar en el gráfico de la figura 5, seguida de una banda de transmisión a la frecuencia de 3.75 GHz.

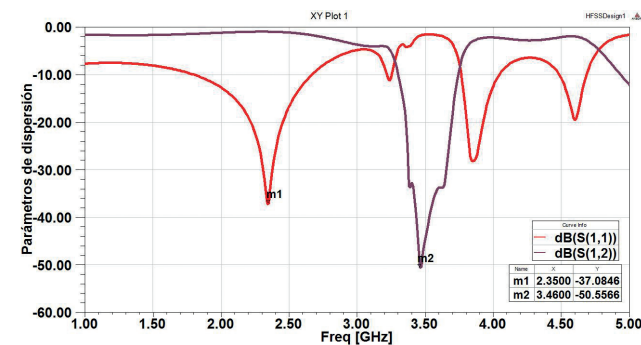


Figura 3. Pérdidas de retorno para la línea cargada con 3 pares de OSRR sin ranuras. Fuente: Ansoft HFSS.

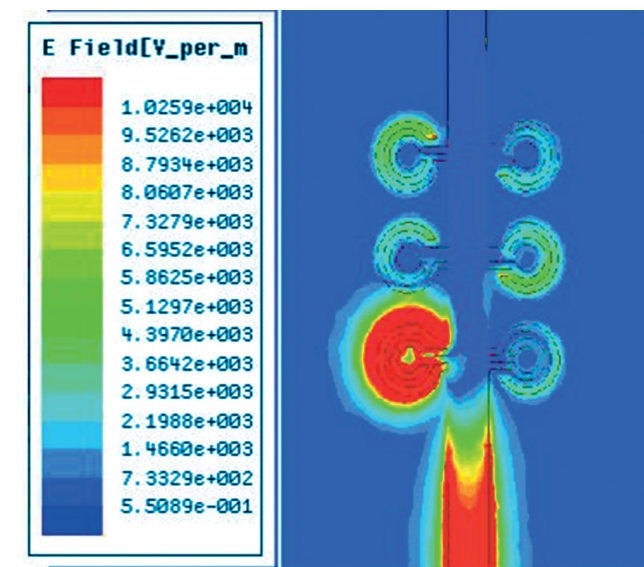


Figura 4. Campo eléctrico de la línea cargada con 3 pares de OSRR sin ranuras. Fuente: Ansoft HFSS.

En estas figuras se aprecia cómo los anillos están completamente desarrollados y la onda sufre una atenuación considerable al pasar por los mismos o lo que es equivalente a decir que encuentra una barrera al paso. Este es un resultado consecuente con la banda de rechazo que se observa en la figura 3.

Por último y para validar el comportamiento metamaterial de estas estructuras se simuló la permitividad dieléctrica

ca efectiva y la permeabilidad magnética efectiva siguiendo la metodología propuesta en [2] y se obtuvo como resultado la gráfica de la figura 5 que demuestra como existe una banda de transmisión derecha y zurda consecuente con un signo positivo y negativo simultáneo de los parámetros eléctricos, seguido de una banda de rechazo resultado de un comportamiento opaco con $\mu > 0$ y $\varepsilon < 0$.

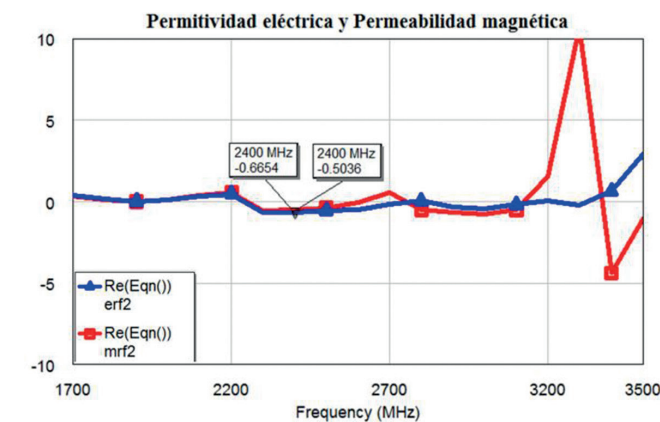


Figura 5. Permitividad eléctrica efectiva (azul) y permeabilidad magnética efectiva (rojo) de la línea cargada con 3 pares de OSRR sin ranuras. Fuente: Ansoft HFSS.

Para conseguir una configuración zurda, se requieren otros elementos que sean capaces de proveer otros efectos metamateriales, los cuales deben introducirse en la estructura. Este efecto puede lograrse grabando ranuras capacitivas en la línea huésped.

El análisis de las pérdidas de retorno muestra que aparece una banda de rechazo a la frecuencia central de 2.28 GHz y en la vecindad cercana de manera abrupta aparece una banda de transmisión a la frecuencia de 2.41 GHz, que es la frecuencia objeto de estudio. Como un dato interesante se puede observar que a la frecuencia de 3.56 GHz aparece una banda considerablemente amplia que podría ser atractiva para el diseño de filtros. (Figura 6).

En la conducta del campo eléctrico para este segundo diseño a la frecuencia de resonancia de los anillos 2.41GHz se puede observar cómo estos permiten el paso de la onda a lo largo de línea. (Figura 7)

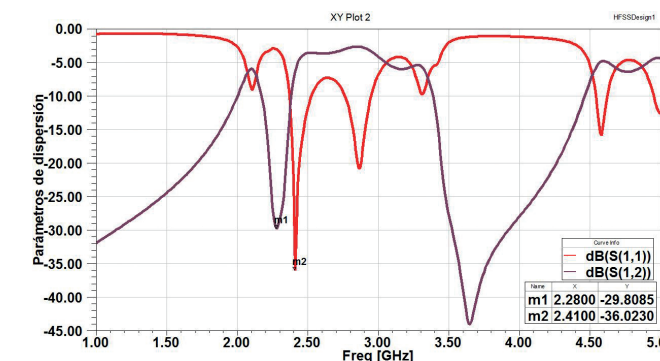


Figura 6. Pérdidas de retorno para la línea cargada con tres pares de OSRRs con ranuras. Fuente: Ansoft HFSS.

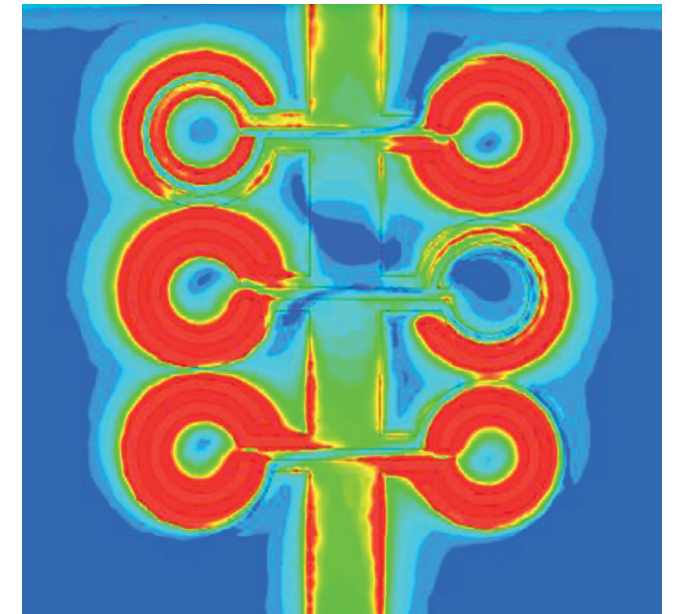


Figura 7. Campo eléctrico de la línea cargada con 3 pares de OSRR con ranuras. Fuente: Ansoft HFSS.

En el análisis de los parámetros eléctricos de esta estructura es importante destacar el comportamiento completamente zurdo con $\mu < 0$ y $\varepsilon < 0$ dentro de la banda de transmisión. (Figura 8)

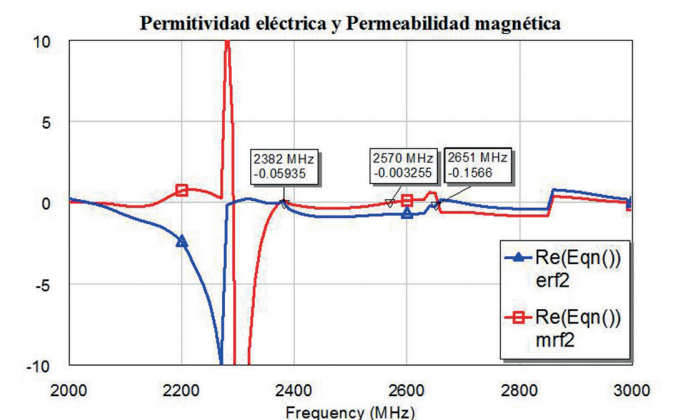


Figura 8. Permitividad eléctrica efectiva (azul) y permeabilidad magnética efectiva (rojo) de la línea cargada con 3 pares de OSRR con ranuras. Fuente: Ansoft HFSS.

Antenas de microcintas basadas en OSRR

Siguiendo la metodología propuesta en [7] se presentan dos nuevos diseños de antenas de microcinta cargadas con OSRR en su línea de alimentación con el objetivo de conseguir ampliar el ancho de banda de impedancia sin disminuir las características de radiación.

Para el primer diseño se insertarán estructuras OSRR y gaps en la línea de alimentación, creados para una frecuencia de resonancia igual a la del parche rectangular convencional como requerimiento de diseño. El modelo descrito se muestra en la figura 9.

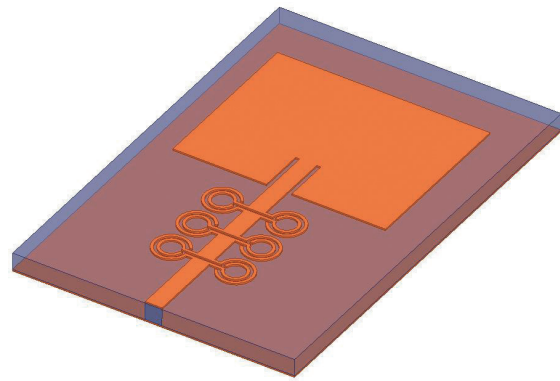


Figura 9. Modelo del parche rectangular con línea cargada con OSRR y gaps. Fuente: Ansoft HFSS.

En la figura 10 se observan las pérdidas de retorno de la antena convencional (azul) y de la antena cargada con OSRR y gaps (rojo). Para la antena convencional se obtuvo un ancho de banda de 70 MHz y para el modelo cargado con OSRR y ranuras se amplió la banda de transmisión a hasta 167 MHz aunque con una pérdida de acoplamiento.

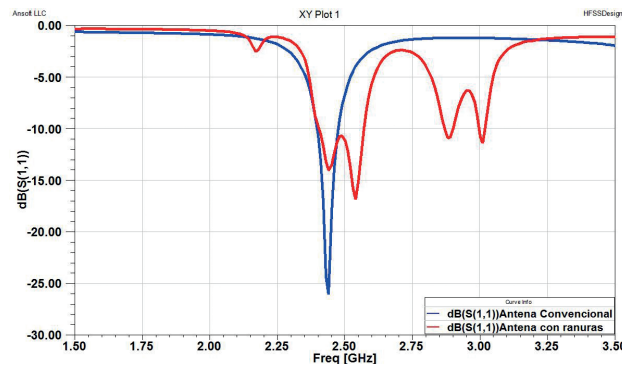


Figura 10. Pérdidas de retorno de la antena con anillos y aberturas. Fuente: Ansoft HFSS.

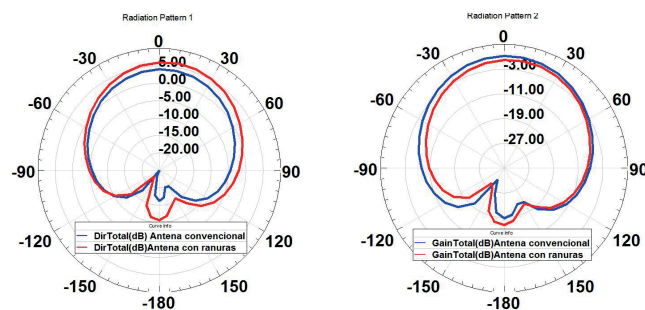


Figura 11. Patrón de radiación (a) Directividad (b) Ganancia. Fuente: Ansoft HFSS.

Los patrones de directividad y ganancia correspondientes a ambos modelos son mostrados en la figura 11.

Existe una disminución de la ganancia y un aumento de la directividad de la antena con metamateriales respecto al parche convencional. La ganancia de este parche es de solo 1.33 dB debido a la alta tangente de pérdidas del

sustrato utilizado, y al añadir los CSRRs y gaps se introducen pérdidas del orden de los 1.2 dB que a pesar de ser considerables son menores que las reportadas en investigaciones anteriores [7].

Para el segundo diseño se insertarán estructuras OSRR en la línea de alimentación y se eliminarán las ranuras capacitivas para resonar a la misma frecuencia del parche rectangular convencional. El modelo descrito se muestra en la figura 12.

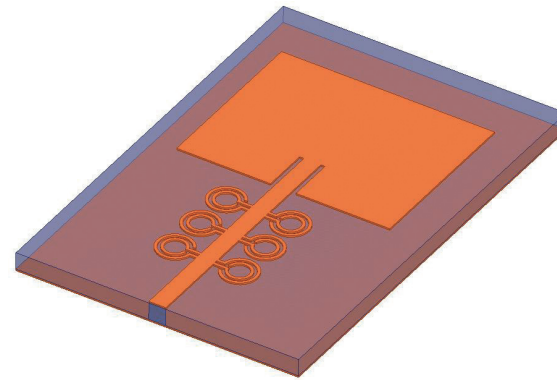


Figura 12. Modelo del parche rectangular con línea cargada con OSRR sin gaps. Fuente: Ansoft HFSS.

En la figura 13 se puede verificar que se aumenta el ancho de banda a 159 MHz y además mejora el acoplamiento de la antena.

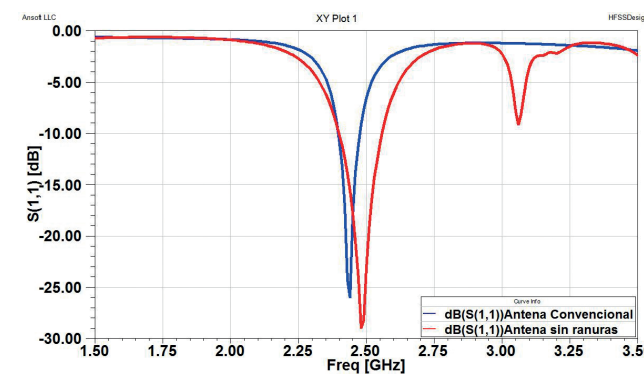


Figura 13. Pérdidas de retorno de la antena con anillos sin aberturas. Fuente: Ansoft HFSS.

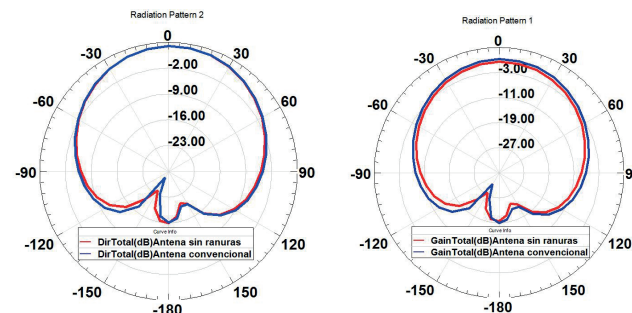


Figura 14. Patrón de radiación a) Directividad (b) Ganancia. Fuente: Ansoft HFSS.

En la figura 14 se ofrecen los patrones de directividad y ganancia y sus gráficos son analizados en la frecuencia correspondiente a la banda de trabajos mostrada en la figura 13. Para este caso se observa una ligera disminución de la ganancia y un aumento de la directividad.

Comparación entre modelos basados en diferentes resonadores

La figura 15 muestra el gráfico del ancho de banda correspondiente a las antenas presentadas en las secciones anteriores y el modelo de antena cargada con CSRR en el plano tierra y gaps en la línea de alimentación reportado en [7].

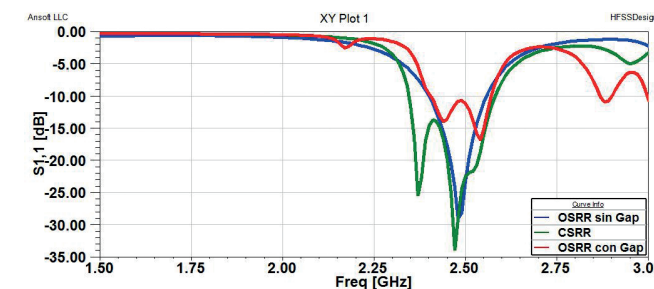


Figura 15. Pérdidas de retorno para las antenas construidas sobre la base de metamateriales. Fuente: Ansoft HFSS.

Hasta el momento los mejores resultados alcanzados en cuanto al aumento de ancho de banda se corresponden con el modelo de la antena para la línea cargada con CSRR y ranuras capacitivas en la alimentación. Dicho modelo en la frecuencia de resonancia de la antena presenta un ancho de banda de 237 MHz, lo que supera en 70 MHz a la antena basada en OSRR con ranuras que presenta un ancho de banda de 167 MHz y en 78 MHz a la antena basada en OSRR sin ranuras, la cual tiene un ancho de banda de 159 MHz. Hay que tener en cuenta que independientemente de la superioridad del diseño de mayor ancho de banda sobre los otros modelos, existen aplicaciones en las que se necesita aumentar este parámetro hasta cierto rango, pues un exceso puede provocar la introducción de señales no deseadas en la banda de frecuencias de trabajo.

Realizando una inspección se detecta que el modelo que presenta mayor directividad corresponde al de la antena con estructuras OSRRs y gaps en la línea, para un valor de 6.025 dB. Los otros modelos también presentan una directividad mayor que la unidad, para un valor de 4.1576 dB y 3.2836 dB para las antenas con OSRR sin gaps y CSRR con gaps respectivamente.

Finalmente se muestra en la figura 16, a modo de comparación, el comportamiento de la ganancia para las tres antenas. Nótese que en este caso la antena con OSRR sin gaps presenta una mayor ganancia (1.0961 dB), siendo esta mayor que la unidad en todo el intervalo de frecuencias correspondiente a la banda de diseño. Seguidamente,

para la antena con los mismos resonadores en presencia de gaps se obtiene el segundo mejor valor de ganancia máxima, correspondiente a 0.0177 dB, aunque es importante señalar que hasta la mitad de la banda esta presenta un comportamiento negativo. Finalmente, cuando se está en presencia de CSRR y ranuras capacitivas se obtienen valores negativos de ganancia para toda la banda de trabajo, lo que representa grandes pérdidas. En consecuencia con estas magnitudes se ofrecen los valores de eficiencia de radiación siendo estos de 49.41%, 26.83% y 46.87% para el orden en que han sido mostrados los valores de ganancia de las antenas.

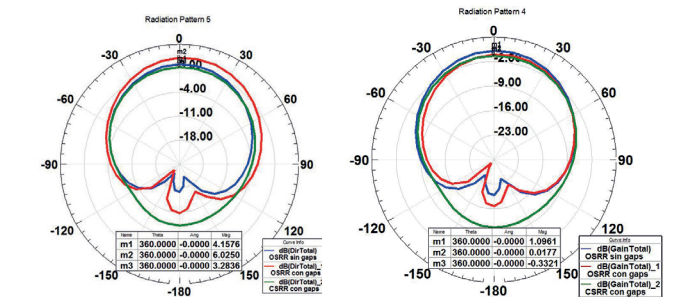


Figura 16. Patrón de radiación (Directividad y Ganancia respectivamente) para las tres antenas. Fuente: Ansoft HFSS.

Después de analizar los resultados de la comparación es necesario señalar que estas tres variantes de diseño presentan un amplio ancho de banda, lo cual garantiza los requerimientos para la banda WiFi. De igual manera, se resaltan los valores de directividad y ganancia obtenidos.

Construcción de prototipos para validar el incremento del ancho de banda

Una vez descritos los resultados alcanzados por medio de las simulaciones, se pasa a la etapa de fabricación de los diseños propuestos, ambos para la banda de 2.4 GHz. El método utilizado para la construcción fue el proceso fotoquímico. Para ello, se debía crear inicialmente una foto patrón (Figura 17) mediante el uso de distintos software como el AutoCad y del Cam350.

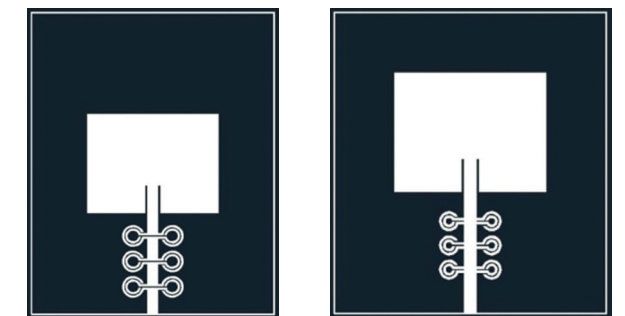


Figura 17. Archivos generados en AutoCAD. Fuente: HFSS y AutoCAD.

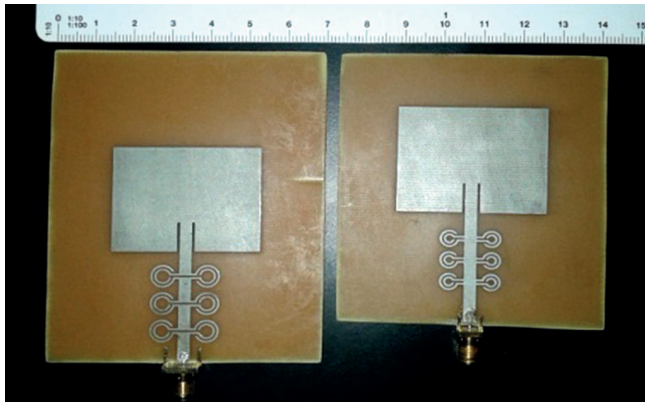


Figura 18. Prototipos construidos de la antena con línea de alimentación basada en OSRRs con ranuras y sin ranuras, respectivamente. Fuente: Lab. Redes Inalambricas, CUJAE

Estos diseños presentaron errores en el proceso constructivo, por lo que las dimensiones reales de los prototipos construidos no se corresponden con las dimensiones de las simulaciones. Con el fin de validar el proceso de construcción se realizaron nuevas simulaciones con las dimensiones reales de las antenas construidas, haciendo uso del microscopio digital DINOLITE para su obtención. Estas antenas fueron medidas apoyándonos en un Analizador de Redes Vectorial, con el cual se obtuvieron los gráficos de las pérdidas de retorno. El referente a la antena con ranuras en la alimentación se muestra en la figura 19:

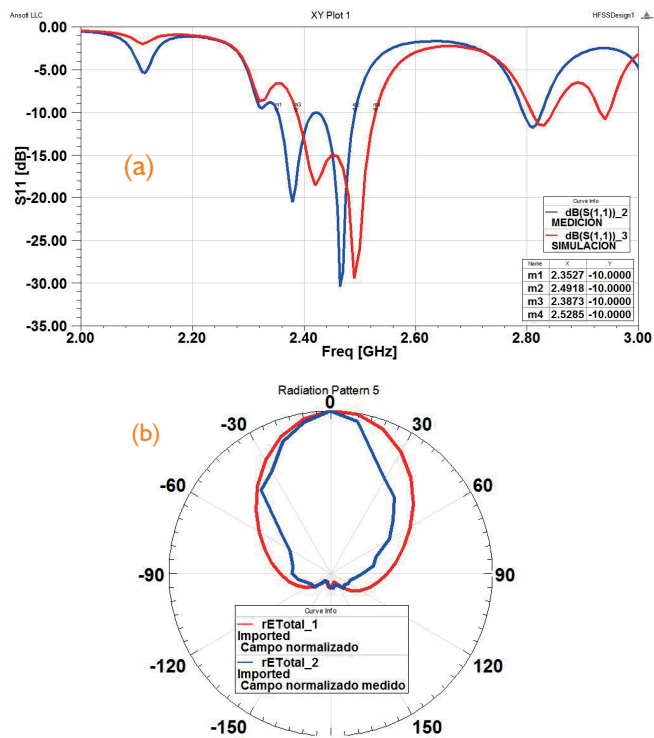


Figura 19. Comparación entre (a) simulación (rojo) y construcción (azul) de (b) patrón de radiación simulado (rojo) y medido (azul) respectivamente. Fuente: Ansoft HFSS.

De lo anterior, se aprecia que existe un corrimiento en frecuencia entre los resultados de la medición y la simulación, aportando un ancho de banda de 141.2 MHz para la simulación y de 139.1 MHz para la medición y una pérdida de acoplamiento de -5 dB en el caso de la medición. Este efecto negativo está dado en su mayoría por las alteraciones en la forma circular de los anillos y en las dimensiones de los demás componentes de la estructura.

Las mediciones en exterior se llevaron a cabo haciendo uso de un analizador de espectro y de un generador de señales. Para la medición en exteriores, de la antena con gaps se obtuvo el patrón de radiación mostrado en la figura 19 (b), el cual presenta una gran similitud con el patrón resultante de la simulación. Las diferencias que se presentan son debido a las imperfecciones del terreno y las condiciones de la medición, entre otras.

Los gráficos de la figura 20 describen los resultados simulados y experimentales para la configuración de la antena sin ranuras. Es posible observar que se obtuvo un acuerdo considerable entre los resultados simulados y los experimentales, teniendo como afectaciones una disminución del acoplamiento y pérdida del ancho de banda. Independientemente de los efectos provocados principalmente por irregularidades en las dimensiones físicas de los anillos y asimetría entre ellos, la similitud entre los resultados valida el proceso de simulación.

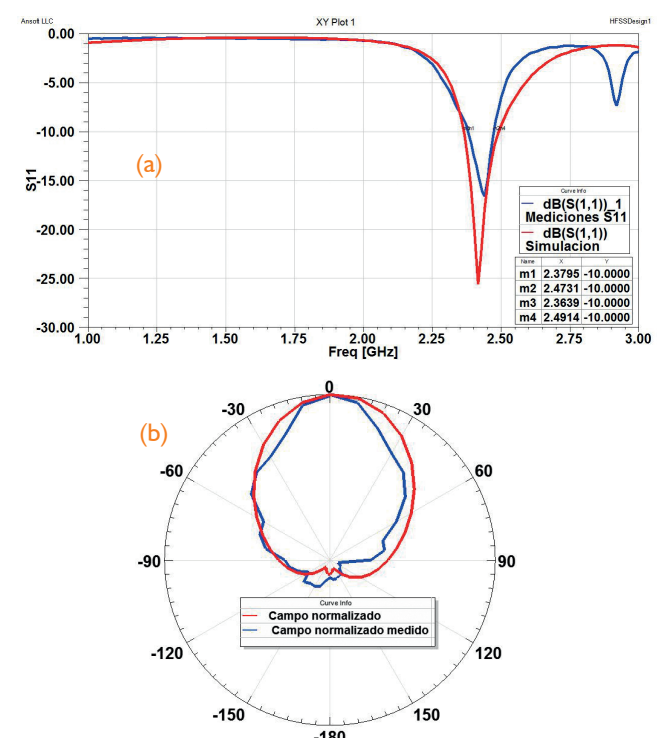


Figura 20. Comparación entre (a) simulación (rojo) y construcción (azul) de (b) patrón de radiación simulado (rojo) y medido (azul) respectivamente. Fuente: Ansoft HFSS.

Además, se realizaron mediciones del patrón de radiación de la antena presentado en la figura 20 (b), donde se pudieron apreciar algunas imperfecciones en cuanto a la precisión del campo, lo que está avalado por los efectos negativos antes descritos y algunos inconvenientes en el escenario de medición. Se puede apreciar que a pesar de lo anteriormente descrito el patrón conserva su forma lobular.

Conclusiones

Considerando lo anterior es importante señalar que los modelos de antenas presentados sobre la base de resonadores presentan una alternativa para el incremento del ancho de banda y mejorar la directividad y la ganancia de las antenas, teniendo en cuenta el efecto negativo que causa la inclusión de estructuras metamateriales a las características de radiación de estos dispositivos pasivos. Nótese que cuando se diseñan los modelos de antenas cargadas

con resonadores, para la primera banda de transmisión que aparece antes de la frecuencia de resonancia de los anillos, se obtiene una disminución del ancho de banda que presentaban prototipos semejantes con presencia de ranuras; pero aun así se ofrecen prestaciones suficientes para cubrir la banda de trabajo.

En este sentido, se presentaron variadas posibilidades que ofrece el empleo de los metamateriales en el diseño de antenas de microcinta, especialmente las partículas OSRR. Se comprobó la aplicabilidad de estas estructuras en la implementación de líneas de transmisión zurdas, como modelo conveniente para la síntesis de dispositivos de alta frecuencia. Se demuestra que diseños basados en la inclusión de OSRRs con y sin presencia de ranuras capacitivas en la línea de alimentación de las antenas, mejoran considerablemente el ancho de banda y la capacidad de controlar, de manera eficaz, algunas de las características de radiación.

Referencias bibliográficas

- [1] N. Engheta and R. W. Ziolkowski, *Metamaterials. "Physics and Engineering Explorations"*. IEEE PRESS and WILEY-INTERSCIENCE, 2006.
- [2] R. Marqués, F. Martín y M. Sorolla. "Metamaterials with Negative Parameters: Theory, Design and Microwave Applications". John Wiley & Sons, Inc., New Jersey, 2007.
- [3] V. G. Veselago. "The electrodynamics of substances with simultaneously negative values of ϵ and μ ", *Soviet Physics Uspekhi*, pp. 509-514, 1968.
- [4] F. J. F. Lanas, "Synthesis and applications of Microwave Metamaterials in Planar Circuit Technology: From Electromagnetic Bandgaps to Left Handed Materials". Telecomunicaciones. NA-FARROAKO UNIBERTSITATE PUBLIKOA IngeniaritzaElektriko eta ElektronikoSaila, 2005.
- [5] J. Naqui, M. Durán-Sinreu y F. Martín. "Modeling Split-Ring Resonator (SRR) and Complementary Split-Ring Resonator (CSRR) loaded transmission lines exhibiting cross-polarization effects". *IEEE Antennas and Wireless Propagation*, Vol. 12, pp. 178-181, 2013.
- [6] J. D. Baena, R. Marqués, y F. Medina. "Artificial magnetic metamaterial design by using spiral resonators". *PhysicalReviewLetters*, Vol. 69, pp. 014402-1:5. 2004.
- [7] A. G. G. Alicia E. Torres García. "Diseños de antenas de microcinta empleando anillos resonadores complementarios". Tesis de Pregrado, Instituto Superior Politécnico "José Antonio Echeverría", La Habana, 2013.
- [8] M. Durán-Sinreu, A. Vélez, F. Aznar, G. Sisó, J. Bonache y F. Martín. "Applications of Open Split Ring Resonators and Open Complementary Split Ring Resonators to the Synthesis of Artificial Transmission Lines and Microwave Passive Components". *IEEE TRANSACTIONS ON MICROWAVE THEORY AND TECHNIQUES*, VOL. 57, NO. 12, 2009.

(Artículo recibido en marzo de 2017 y aprobado en junio de 2017)