



# Aumento del Ancho de Banda en Antenas de Microcintas a 2,4 GHz con Inserción de Metamateriales

*Ailyn Estévez Hidalgo, Francisco Marante Rizo*

## **RESUMEN / ABSTRACT**

En este trabajo se presenta el estudio de la inserción de estructuras metamateriales en una antena de parche rectangular alimentado por línea de microcinta de polarización lineal para lograr un incremento del ancho de banda. Se analizan las principales características que presentan los materiales zurdos y se investiga su comportamiento dentro de la antena para obtener un aumento del ancho de banda y mejorar algunos de los parámetros fundamentales en el diseño de antenas de parche rectangular, aplicando la teoría de los mismos y sustentado en herramientas de simulación asistidas por computadora. Inicialmente se realiza un estudio de la influencia que realiza, la estructura de células compuesta por anillos resonadores abiertos complementarios de forma cuadrada con sus respectivos “gaps” asociada al parche y la posición de la misma, sobre los parámetros de interés de la antena de microcinta, especialmente el ancho de banda. Los resultados obtenidos permiten concluir que la ubicación del metamaterial asociado a la línea de alimentación ejerce una marcada influencia en la estructura radiante; se produce un aumento del ancho de banda y una disminución de la eficiencia respecto a la antena de microcinta convencional sin estructuras zurdas. Además, constatar que el incremento de las dimensiones de los anillos complementarios provoca una disminución de la frecuencia de resonancia. Finalmente, se presenta el diseño de una antena de microcinta con estructuras zurdas para la banda ISM 2.4 GHz.

Palabras claves: Antenas de microcinta de parche rectangular, metamateriales, resonador de anillos abiertos complementario (CSRR), ancho de banda.

*In this paper is presented a study of the insertion of metamaterial structures in a rectangular patch antenna fed by microstrip line linear polarization to achieve increased bandwidth. The main characteristics of left-handed materials are analyzed and their behavior is investigated inside the antenna, which allows obtaining an increase bandwidth and improve some of the fundamental parameters in the design of rectangular patch antennas by applying the theory of themselves and simulation tools supported by computer-assisted. Initially a study of the influence that makes is performed, the cell structure composed by complementary ring resonators open square in shape with their respective "gaps" associated to the patch and position thereof on the parameters of interest microstrip antenna especially bandwidth. The results obtained allowed to conclusions that the location of metamaterial associated power line exerts a marked influence on the radiating structure; an increase in bandwidth and a decrease in efficiency over conventional microstrip antenna structures occur no left-handed. Besides confirm that the increased the dimensions of the complementary rings cause a decrease in the resonance frequency. Finally, the design of a microstrip antenna with left-handed structures for the 2.4 GHz ISM band is presented.*

**Keywords:** *microstrip antenna of rectangular patch, metamaterials, complementary split-ring resonators (CSRR), bandwidth.*

**Increase of the Bandwidth in 2.4 GHz Microwells Antennas with Insertion of Metamaterials**

## 1.- INTRODUCCIÓN

Actualmente las propiedades de las antenas de microcinta de bajo perfil, peso ligero, compacta estructura de montaje, fabricación fácil e integrable con dispositivos en estado sólido [1] contribuyen al éxito de las mismas en aplicaciones como comunicaciones celulares terrestres, comunicaciones móviles de satélites, sistemas de satélite de difusión directa, sistema de posicionamiento global, sensor remoto e hipertermia, aeronaves, misiles, cohetes y naves espaciales. Sin embargo, las antenas de microcinta presentan como limitante su característica de estrecho ancho de banda [2]. Recientemente, el concepto de metamaterial debido a sus características es de gran interés para su aplicación en estructuras planas [3], atendiendo a la aplicación a la que están destinadas. Se han implementado en antenas [4] para lograr mejores rendimientos, un aumento del ancho de banda, un mejor patrón de radiación [5, 6], o la miniaturización de la antena [7], por solo citar algunas ventajas.

En la década de los años 60 nace el concepto de metamaterial, un material hipotético no existente en la naturaleza con propiedades electromagnéticas atractivas; con una permitividad eléctrica y una permeabilidad magnética negativas a los que se le llamó “materiales con comportamiento zurdo”, en inglés *Left Handed Metamaterials* (LHM). La verificación empírica no ocurrió hasta tres décadas más tarde por un grupo de investigadores de la Universidad de California San Diego (UCSD) mediante la combinación de resonadores de anillos divididos, en inglés *split-ring resonators* (SRR), y finos cables de cobre que proporcionaban permeabilidad magnética y permitividad eléctrica negativas, respectivamente [8]. Los metamateriales se caracterizan por presentar un índice de refracción negativo. Este primer descubrimiento ha ido evolucionando a través de los años y ha sido introducido en varios dispositivos de radiofrecuencia con el objetivo de mejorar su desempeño, disminuir su tamaño, aumentar el ancho de banda, mejorar sus cifras de méritos, tales como los parámetros de radiación en las antenas, el rechazo de modos de propagación, bandas de trabajo y armónicos en líneas de transmisión y filtros, entre otros.

Los metamateriales pueden definirse como estructuras que no son encontradas en la naturaleza, sino que se obtienen artificialmente, que presentan propiedades electromagnéticas diferentes a las de sus elementos (llamados celdas) constituyentes. Los metamateriales constituyen una estructura cuyo tamaño de celda promedio debe ser mucho menor que la longitud de onda; por tal motivo, la estructura diseñada podría considerarse como una "molécula", y sus propiedades ser modeladas mediante parámetros globales como la permitividad eléctrica, la permeabilidad magnética y el índice de refracción, tal y como se hace con las moléculas presentes en el mundo natural [9]. En un metamaterial, la interacción de la radiación electromagnética sobre el medio no estará determinada por las características microscópicas de los elementos constituyentes, sino por la organización y la estructura de los elementos que conforman al material. Un medio efectivo puede estar formado por una distribución de unidades de resonadores periódicos (celdas), cuyo tamaño es menor que la longitud de onda; por lo que a la frecuencia de resonancia, todas las celdas se comportan como un medio homogéneo, pues la radiación incidente no detecta la estructura interna del medio [10].

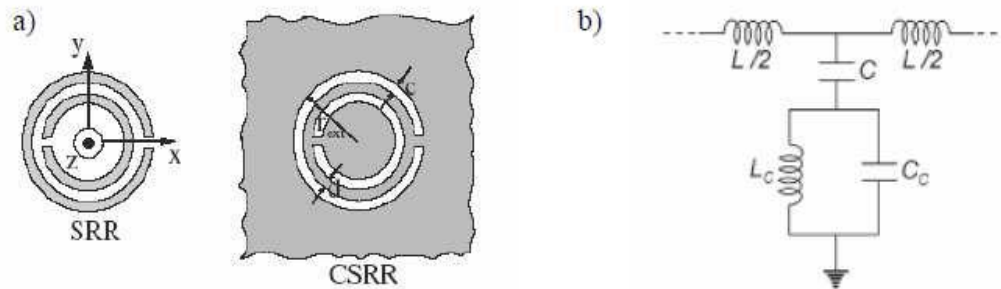
Debido a las numerosas potencialidades que presentan los metamateriales en el campo de las tecnologías de comunicaciones inalámbricas, se continúan haciendo estudios para lograr aplicarlos en sistemas de comunicación con el objetivo de mejorar su desempeño y disminuir los costos de implementación. Motivado por el creciente interés despertado en la comunidad científica internacional por los efectos que pueden provocar estructuras que presentan un comportamiento metamaterial sobre determinados parámetros, es que en el presente trabajo se realiza un análisis en antenas de microcinta que permita la obtención de un mayor ancho de banda en antenas de parche rectangular. Por tanto, el objetivo principal es el estudio de la inserción de estructuras que presentan un comportamiento metamaterial en antenas impresas de parche rectangular para lograr un considerable ancho de banda que cubra la banda de 2.4 GHz.

En este trabajo se presentan algunas consideraciones de la inserción de metamateriales en una antena de microcinta. Primeramente, se realiza un estudio de las características de la estructura con comportamiento zurdo. Seguidamente se diseña la antena convencional para la banda de frecuencias de 2.4 GHz, a la cual se le incorpora la estructura zurda de elementos compuestos por resonadores de anillos cuadrados abiertos complementarios con sus respectivos *gaps* que conforman el metamaterial. Posteriormente variando la posición de las celdas y la distribución de la estructura metamaterial se analiza el comportamiento de la misma sobre la antena convencional, obteniéndose un incremento del ancho de banda al precio de la degradación de la ganancia. Finalmente, se desarrolla la discusión de los resultados y se plantean las conclusiones.

## 2.- ESTRUCTURA CON COMPORTAMIENTO ZURDO

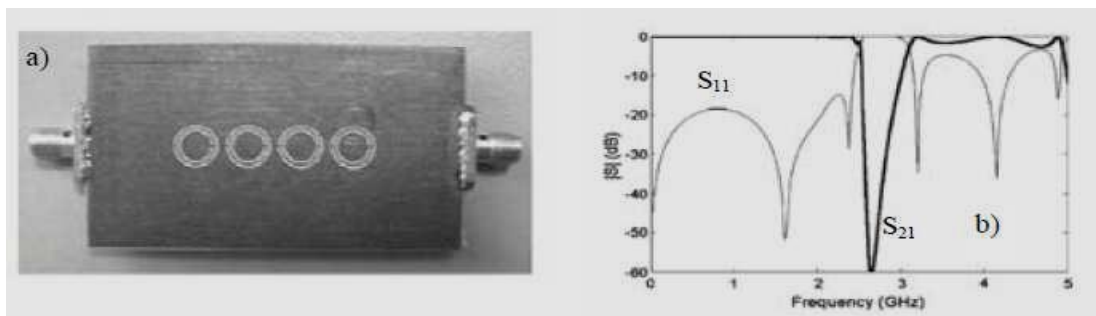
Los resonadores de anillos divididos en inglés *split-ring resonators* (SRR) son capaces de introducir valores de permeabilidad efectiva negativa en un determinado rango de frecuencias. Respecto a los medios que introducen una permitividad efectiva negativa, son conocidas estructuras que proporcionan valores negativos, como es el caso de una red de hilos finos metálicos. No obstante, existe una partícula que es capaz de introducir valores de permitividad efectiva negativa en un determinado rango de frecuencias. Ésta partícula es el resonador de anillos divididos complementario en inglés *complementary split-ring resonators* (CSRR), que no es más que la versión complementaria del SRR, en la que se ha grabado la geometría del SRR en una lámina metálica, quedando eliminado el metal de dicha lámina hasta describir la forma del SRR (Figura 1a).

Utilizando el principio de Babinet [11] puede concluirse que, en condiciones ideales en las que la conductividad del metal es infinita y su grosor despreciable, dicha partícula tiene una frecuencia de resonancia idéntica a la de un SRR con las mismas dimensiones, pero en lugar de ser excitada por un campo magnético en la dirección axial, dicha excitación ha de ser mediante un campo eléctrico en la misma dirección. En este caso la partícula induce un valor de  $\epsilon_{\text{eff}}$  negativo en una banda de frecuencias cercanas a la frecuencia de resonancia de la partícula. Así pues, esta partícula puede ser utilizada para sintetizar líneas de transmisión con permitividad efectiva negativa si se coloca, por ejemplo, en el plano de masa bajo la tira conductora de una línea de microcinta, ya que en esta zona la dirección del campo eléctrico es perpendicular a dicho plano de masa, por lo que el CSRR será excitado de la forma adecuada. En estas circunstancias el modelo discreto de un CSRR acoplado a una línea de microcinta aparece descrito en la figura 1 (b), donde L y C son la inducción y capacidad de la sección de línea, mientras que  $L_c$  y  $C_c$  modelan el CSRR. Este tipo de estructura producirá una banda de rechazo para aquellas frecuencias para las cuales el valor de  $\epsilon_{\text{eff}}$  sea negativo.



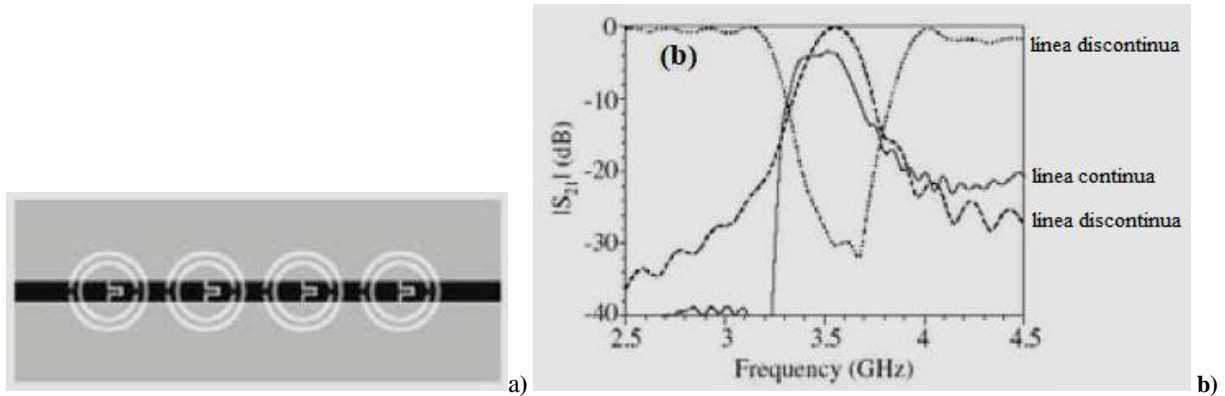
**Figura 1**  
Topología del SRR y del CSRR (a) y modelo discreto de un CSRR acoplado a una línea de microcinta (b)[3].

La Figura 2 muestra la respuesta en frecuencia de una línea de transmisión cargada con cuatro CSRRs en la que puede verse la banda rechazada, correspondiente al rango de frecuencias para el cual la estructura presenta un valor negativo de permitividad eléctrica efectiva. Si esta estructura se combina con una serie de “gaps” capacitivos dispuestos en serie para implementar una línea de transmisión con una permeabilidad efectiva negativa, se consigue un medio que presentará ambas magnitudes,  $\epsilon$  y  $\mu$  negativas.



**Figura 2**  
Fotografía del prototipo con  $\epsilon_{\text{eff}} < 0$  (plano de masa) y respuesta en frecuencia (b) de dicho prototipo [3].

La Figura 3a muestra la vista superior en capas de esta estructura, en la que se ha representado en gris el plano de masa de la línea de microcinta y en negro la tira conductora. La respuesta en frecuencia de dicha estructura puede verse en la Figura 3b.



**Figura 3**  
 Línea de transmisión LHM basada en CSRRs. Vista superior en capas (a) y respuesta en frecuencia (b) (3).

La línea discontinua corresponde a la respuesta obtenida al utilizar la línea de transmisión de la Figura 3a, mientras que la línea de puntos corresponde a la respuesta en frecuencia de la línea de transmisión con  $\epsilon_{\text{eff}}$  negativa (las medidas experimentales se han indicado en línea continua). Se ve como efectivamente aparece una banda de rechazo en el caso de utilizar únicamente CSRRs, mientras que en esa misma banda de frecuencias aparece una banda de paso al combinar la estructura con los “gaps” capacitivos [3]. A partir de la configuración planteada en este epígrafe compuesta por anillos resonantes complementarios y sus respectivos “gaps”, la cual demuestra un comportamiento metamaterial, se propone su inserción dentro de una antena de microcinta para la banda de 2.4 GHz con el objetivo de evaluar su comportamiento y lograr un incremento de ancho de banda.

### 3.- DISEÑO DE LA ANTENA DE MICROCINTA

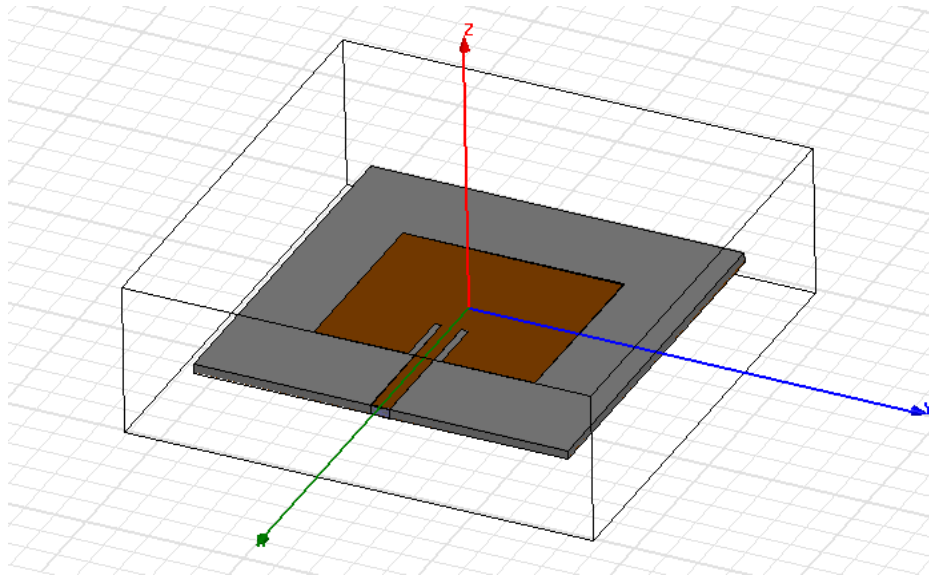
El diseño de una antena de parche rectangular con alimentación por línea de microcinta para brindar servicios en la banda ISM a 2.4 GHz se presenta en la Figura 1. Para el diseño se dispone de una placa de fibra de vidrio (FR-4), doble capa (metalización en ambos lados); las características de este sustrato dieléctrico aparecen reflejadas en la Tabla 1:

**Tabla 1**  
 Características del sustrato FR-4

Sustrato	Permitividad dieléctrica Relativa	Tangente del ángulo de pérdidas	Grosor del sustrato	Grosor del conductor (cobre)
Placa de FR-4	4.2	0.02	1.5 mm	0.035 mm

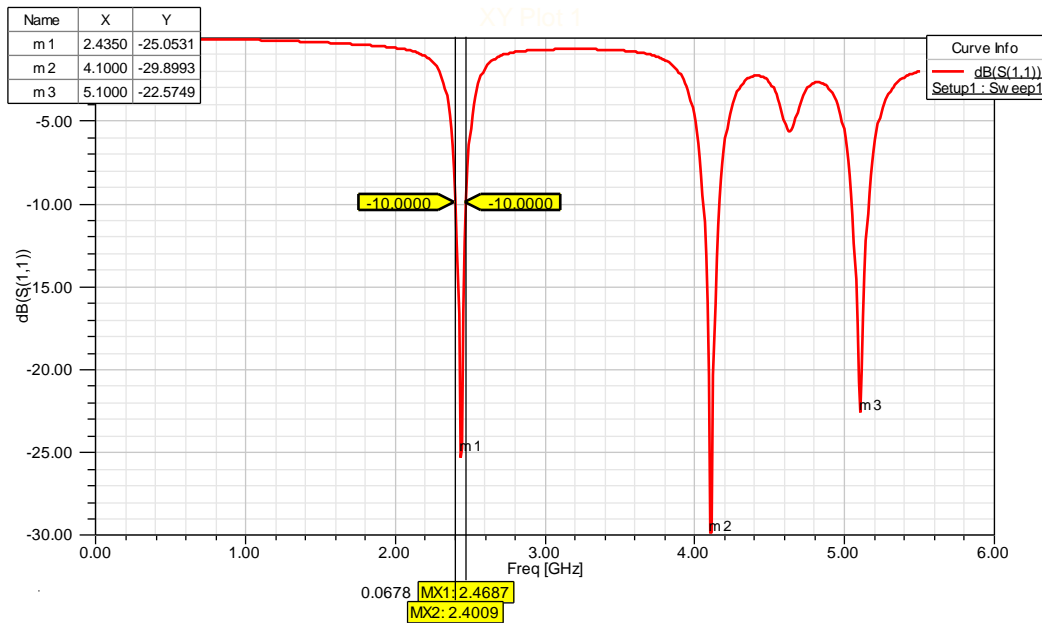
Primeramente, se realiza el cálculo aproximado de las dimensiones de la antena de parche utilizando las ecuaciones de diseño del método de línea de transmisión [12]. En el software de simulación HFSS Ansoft se crea una estructura inicial y mediante variaciones paramétricas de las dimensiones físicas y analizando su influencia en la frecuencia de resonancia, se obtiene un diseño que resuene a la frecuencia deseada, aproximadamente 2.44 GHz.

Finalmente se obtuvo una antena de parche para la frecuencia de 2.435 GHz que presenta 35 mm de ancho con 29.6 mm de largo, está situado sobre un sustrato FR-4 de permitividad eléctrica relativa 4.2 y grosor 1.5 mm, dimensiones de 59.2 x 59.2 mm. El plano tierra tiene las mismas dimensiones del sustrato, excepto por su espesor, que al igual que el del parche es de 0.035 mm (cobre). Como la impedancia de entrada del parche decrece gradualmente, desde un máximo en los bordes radiantes hasta un mínimo en el centro, la línea de alimentación es conectada relativamente cerca de la menor impedancia ( $y_0=9$  mm). La Figura 4 muestra la representación de la estructura radiante.



**Figura 4**  
**Antena de parche rectangular alimentada por línea de microcinta para 2.44 GHz.**

Como se muestra en la Figura 5 presenta un mínimo de pérdidas de retorno de  $-25$  dB en la frecuencia de 2.435 GHz con un ancho de banda de 67.8 MHz (2.78 %) tomando como referencia pérdidas de retorno inferiores a  $-10$  dB. Se obtiene una impedancia de entrada de  $50.15 + j 2.34 \Omega$ , por lo que existe buen acoplamiento entre la impedancia de la línea y la impedancia de entrada del parche, garantizando la mayor transferencia de potencia.



**Figura 5**  
**Parámetro  $S_{11}$  de la antena de parche rectangular para 2.435 GHz.**

Esta antena muestra una directividad de 5.37 dB, una ganancia 1.95 dB para una eficiencia de 45%. La baja eficiencia se debe a las considerables pérdidas existentes en el sustrato ( $\tan \Delta = 0,02$ ) y las pérdidas presentes en la línea de transmisión producto a radiaciones espurias u ondas de superficie, característico en este tipo de topología.

Como se puede apreciar dado los resultados alcanzados, el ancho de banda de la antena no cubre la banda de frecuencias de 2.4 GHz por lo que se realiza el estudio de la incorporación de estructuras metamateriales en la antena. Luego, sobre el diseño se aplica la teoría de los metamateriales para investigar la influencia de los mismos en el funcionamiento de los parámetros de radiación de la antena y lograr incrementar el ancho de banda.

## 4.- INSERCIÓN DE METAMATERIALES

En el diseño presentado se graban los CSRRs cuadrados en el plano tierra para que sean excitados con campo eléctrico axial dando lugar a valores negativos de permitividad eléctrica. Para proporcionarle a la estructura metamaterial la permeabilidad magnética negativa se realiza discontinuidades en el parche radiante como equivalente de los “gaps”, retirando una tira del metal con el fin de lograr una estructura con comportamiento zurdo. A continuación, se muestran las variables físicas y las dimensiones que caracterizan la estructura metamaterial:

donde:

- c1: lado del anillo cuadrado externo 1.
- c2: lado del anillo cuadrado interno 1 ( $c2=c1-w$ ).
- c3: lado del anillo cuadrado externo 2 ( $c3=c2-t$ ).
- c4: lado del anillo cuadrado interno 2 ( $c4=c3-w$ ).
- c5: ancho del “Split”
- w: ancho de los anillos complementarios
- t: distancia entre los anillos externo e interno
- g: ancho del “gap”

**Dimensiones de la estructura metamaterial compuesta por CSRR cuadrados y “gaps”.**  
**c1=3mm, c2=2.75mm, c3=2.5mm, c4=2.25mm, c5=0.5 mm, t=0.25 mm, w=0.25 mm, g=0.5 mm.**

La Figura 6 muestra el primer diseño con inserción de metamateriales obtenido. Los anillos resonadores abiertos complementarios de forma cuadrada se ubican en los bordes del parche donde es mayor la radiación axial de campo eléctrico.

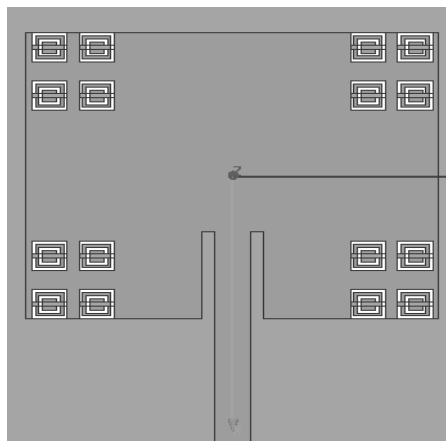


Figura 6

**Antena de microcinta para 2.4 GHz con CSRRs grabados en el plano tierra y “gaps” en el parche.**

En la Figura 7 se muestra el incremento del número de elementos que conforman la estructura zurda dentro del parche radiante y como se varia la posición de los mismos, obteniéndose diferentes distribuciones de los elementos.

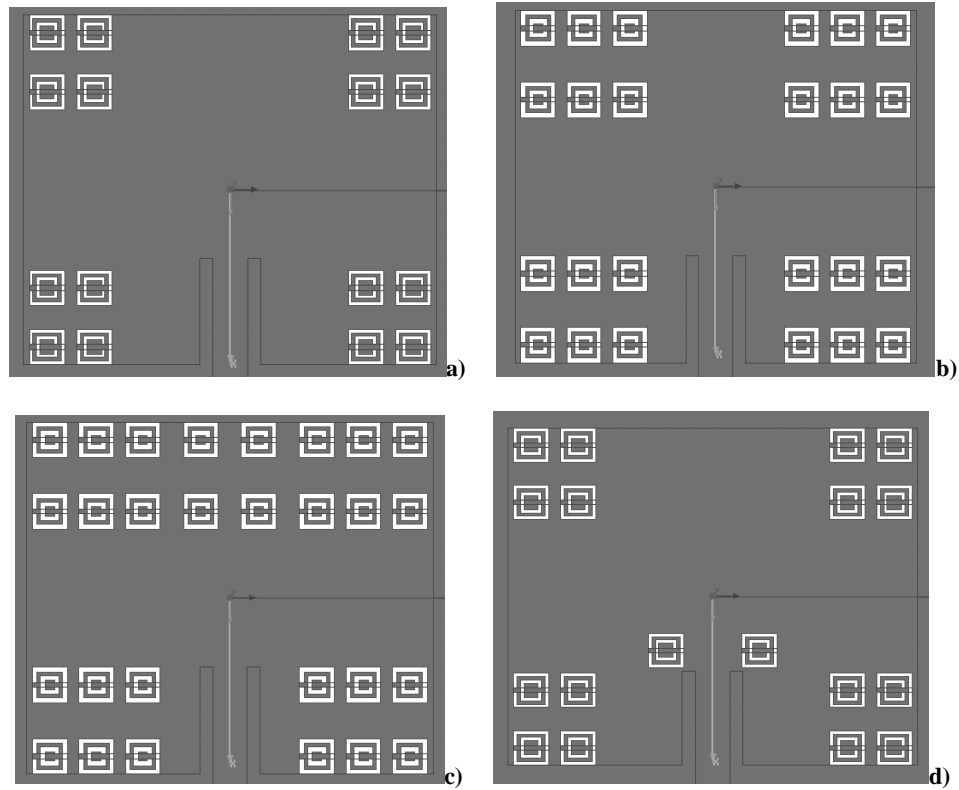


Figura 7

Antena de microcinta para la banda de 2.4 GHz con a) 16, b) 24, c) 28, d) 18 elementos.

En la medida que aumenta la cantidad de elementos se produce una disminución de la frecuencia asociada a las mínimas pérdida de retorno para la banda de trabajo, pero no se incrementa el ancho de banda de la antenna respecto a la antenna convencional, como se puede observar en la Figura 8 y los parámetros de radiación no muestran cambios significativos. Por ejemplo, al analizar la configuración de menor cantidad de anillos que se muestra en la Figura 7a, cuya banda de funcionamiento se encuentra más próxima a 2.4 GHz, presenta pérdidas de retorno de -45 dB para 2.4 GHz con un ancho de banda de 66.8 MHz (2.78 %).

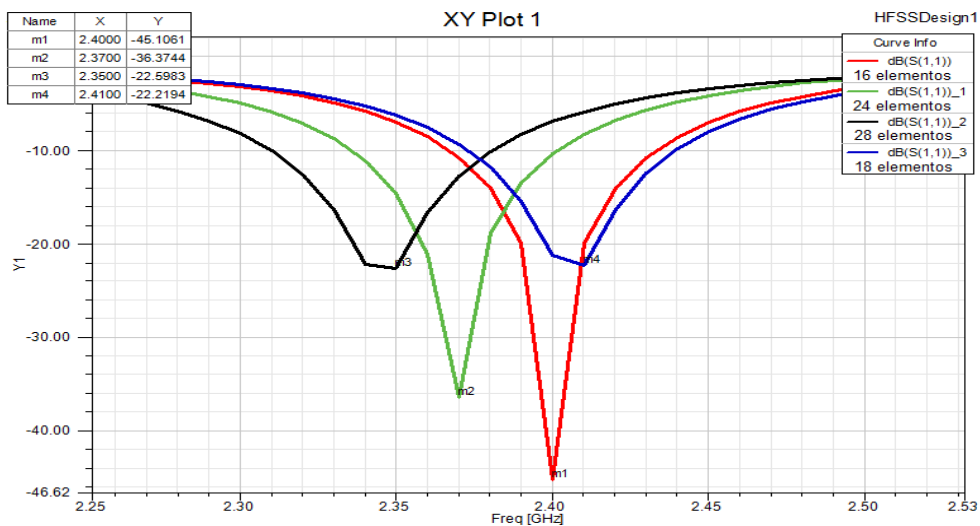


Figura 8

Parámetro  $S_{11}$  de la antenna de microcinta para 2.4 GHz con 16, 24, 28, 18 elementos.

La introducción de estructuras metamateriales en el parche no provoca un aumento del ancho de banda; sin embargo, cuando los anillos complementarios se sitúan debajo de la línea como se muestra en la Figura 9 se produce un desplazamiento de la frecuencia correspondiente a las mínimas pérdidas de retorno y se evidencia un incremento significativo del ancho de banda respecto a los diseños anteriores, lo cual se puede corroborar en la Figura 10.

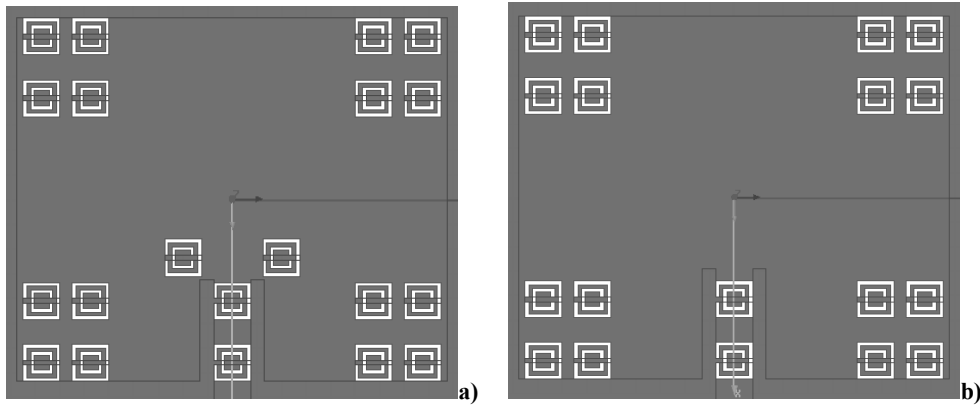


Figura 9

Antena de microcinta para 2.4 GHz con a) 20 y b) 18 celdas asociadas al parche y a la línea de alimentación.

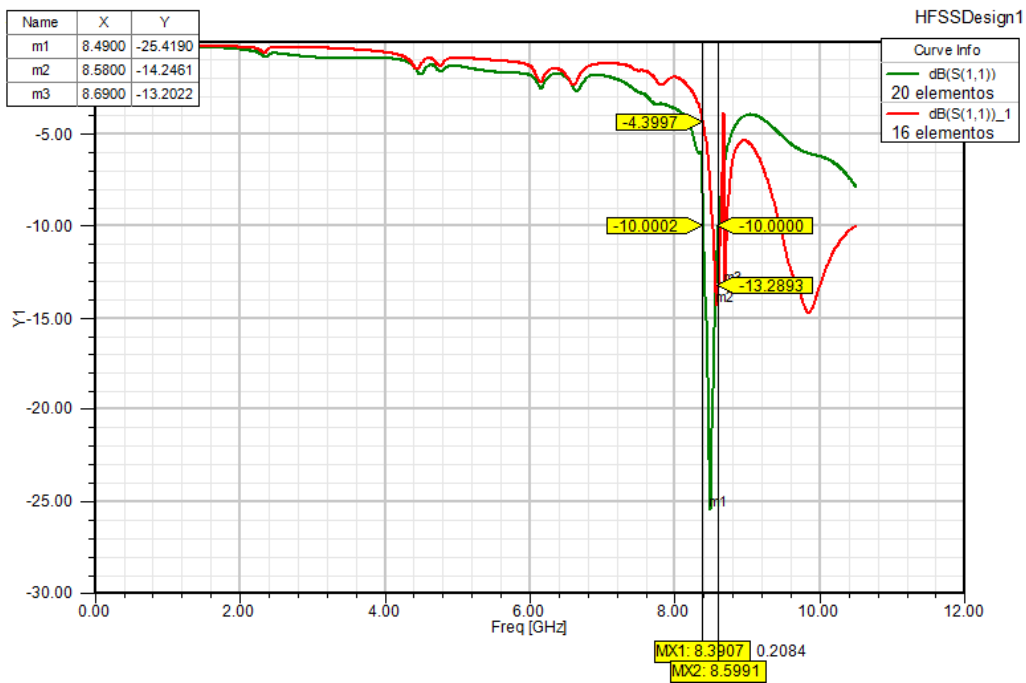
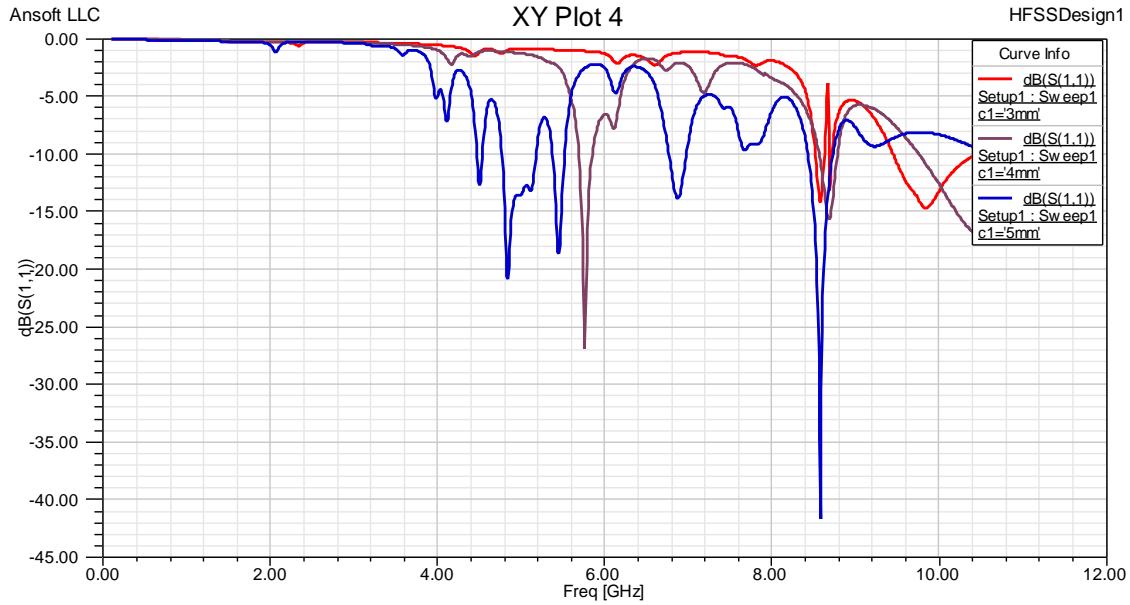


Figura 10

Parámetro  $S_{11}$  de la antena de parche rectangular con celdas asociadas al parche y a la línea de alimentación.

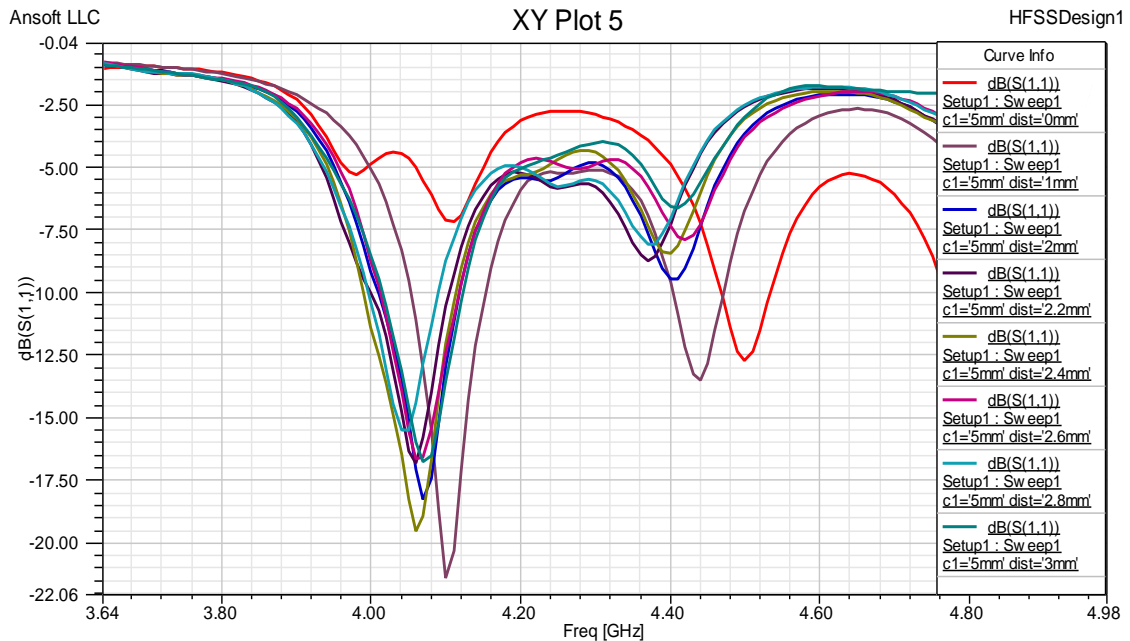
Los resultados obtenidos en el barrido paramétrico realizado a la dimensión del lado del anillo cuadrado complementario para el diseño de la Figura 9b, permiten concluir que ejerce una marcada influencia en las pérdidas de retorno y comprobar que existe una relación inmediata entre dicha dimensión y la frecuencia de resonancia ya que se puede apreciar que la variación de la dimensión del lado del anillo produce un corrimiento en la frecuencia de resonancia, lo cual se puede observar en la Figura 11. Nótese además que existe una tendencia a la disminución de la frecuencia de resonancia en la medida en que aumenta la dimensión del lado del anillo cuadrado “c1”.





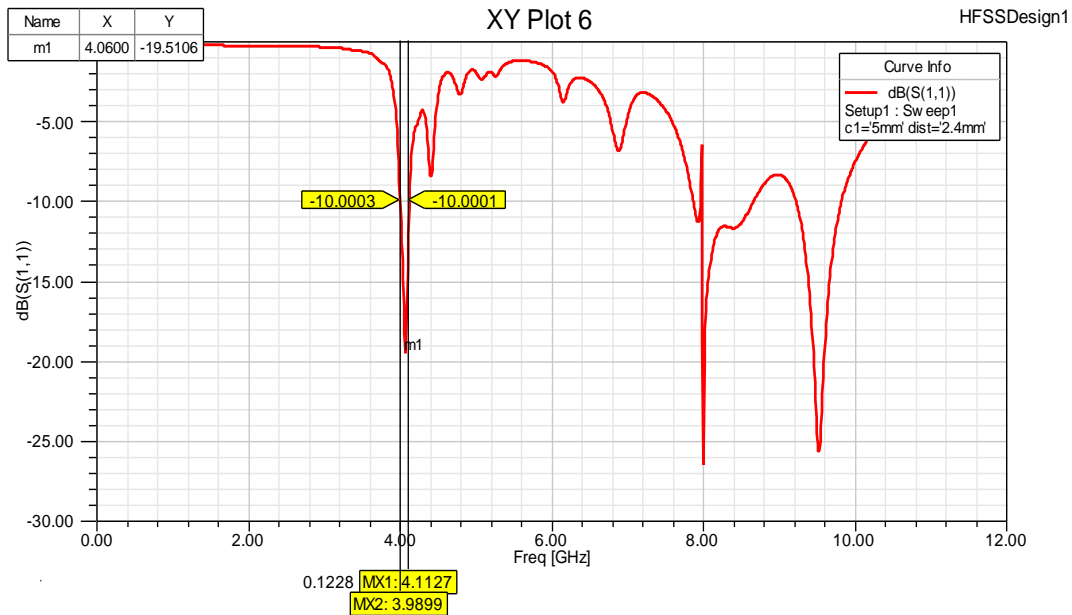
**Figura 11**  
 Comportamiento de las pérdidas de retorno para distintos valores de la dimensión del lado del anillo “c1”.

Para el análisis de la influencia de la posición de la estructura metamaterial compuesta por CSRR cuadrados y “gaps” respecto al parche, se procedió a desplazar los mismos por la línea de alimentación, hasta que se encontrara fuera del área ocupada por el parche. Como se puede observar en la Figura 12, al mover la estructura metamaterial utilizando para esto en el software de simulación HFSS una variable denominada “dist.”, se produce una variación de las pérdidas de retorno.



**Figura 12**  
 Comportamiento de las pérdidas de retorno para distintas posiciones de la estructura de estudio tomando c1=5mm.

Además, en la Figura 13 se puede apreciar que para c1=5mm y dist.=2.4mm se obtiene un ancho de banda de 122.8 MHz, correspondiente a un 3.03%.



**Figura 13**  
**Ancho de banda y pérdidas de retorno para  $c_1=5$  mm y  $dist.=2.4$  mm.**

Luego de estudiar la estructura metamaterial en diferentes lugares de la antena, se puede plantear sin establecerse una regla absoluta, que se produce un mejoramiento del ancho de banda cuando dicha estructura metamaterial se dispone asociada a la línea de microcinta; lo cual reafirma los resultados de muchas investigaciones científicas reflejadas en artículos de revistas y base de datos de alto impacto, cuando se habla de la teoría de metamateriales en línea de transmisión [3,13, 14].

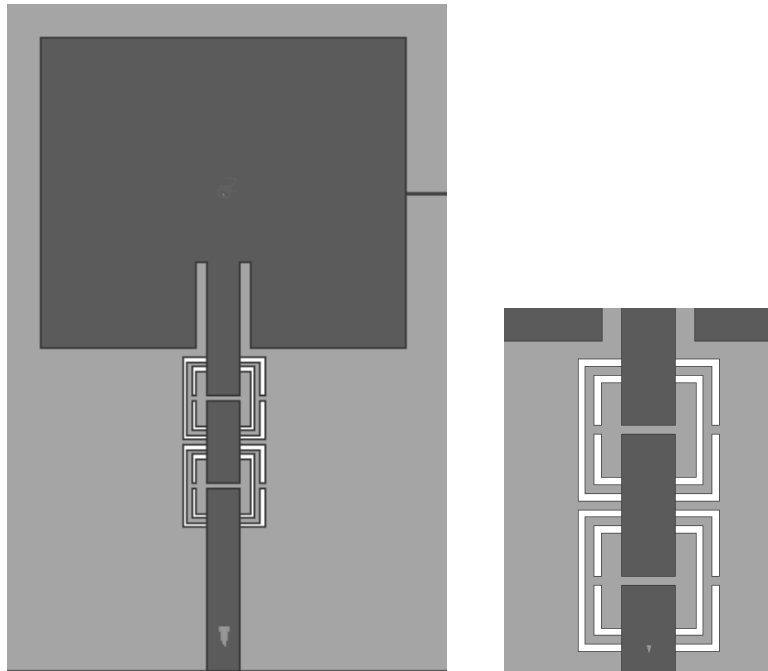
El estudio de la estructura de red de anillos en el parche evidencia la necesidad de alargar la línea de transmisión y por tanto los planos sustrato-tierra para poder aumentar las dimensiones de las estructuras metamateriales asociadas a la línea con el fin de alcanzar la frecuencia deseada para el diseño propuesto.

Finalmente se plantea la posibilidad de implementar este tipo de estructura en la línea de alimentación de la antena de parche rectangular. Para ello, hay que tener en cuenta la configuración de los campos en la línea de microcinta, con un campo eléctrico fuertemente confinado debajo de la tira conductora y líneas de campo magnético que se cierran entorno a la tira conductora. Se propuso la partícula denominada resonador de anillos cortados complementario (CSRR), que se trata de grabar el negativo del SRR en el plano de masa debajo de la línea de microcinta. De esta manera, se excita mediante las líneas de campo eléctrico, cuyo valor es máximo dando valores negativos de permitividad eléctrica en un rango de frecuencias cercano a la frecuencia de resonancia. En este caso, se obtiene una respuesta LHM al introducir de manera simultánea elementos capacitivos en serie, lo cual se consigue mediante “gaps” sobre la línea de alimentación [13].

## 5.- DISCUSIÓN DE LOS RESULTADOS

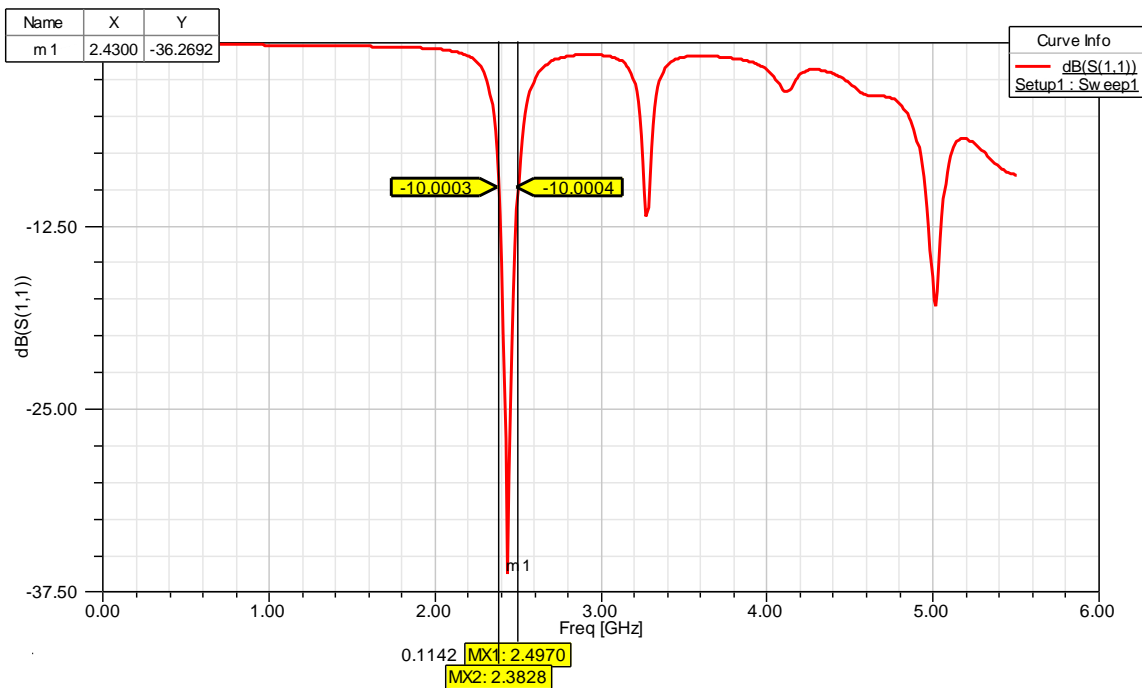
En lugar de una red de elementos, se presenta en la Figura 14 una estructura metamaterial compuesta de dos elementos asociados a la línea de transmisión y se analizan las características funcionales de dicha configuración sobre la antena. Se muestra el diseño final obtenido que presenta un parche radiante de 35 mm de ancho y 29.6 mm de largo empleando un sustrato de fibra de vidrio FR-4 con permitividad eléctrica relativa de 4.2 y grosor 1.5 mm de 97 x 91.6mm. El plano tierra tiene las mismas dimensiones del dieléctrico excepto por su espesor que al igual que el parche, es de 0.035 mm (cobre). El estudio realizado demostró que al aumentar la dimensión del plano tierra se degrada el acoplamiento de la antena con la línea de alimentación; por tal motivo, se realiza un barrido paramétrico del punto de alimentación. Esto reveló un resultado positivo para una inserción de la ranura de 8.2 mm. Las dimensiones físicas del elemento se muestran a continuación:

**Dimensiones de la estructura metamaterial compuesta por CSRR cuadrados y “gaps”.**  
 $c_1=7.9$  mm,  $c_2=7.5$ mm,  $c_3=7$ mm,  $c_4=7.6$ mm,  $c_5=0.5$  mm,  $t=0.5$  mm,  $w=0.4$  mm,  $g=0.5$ mm.



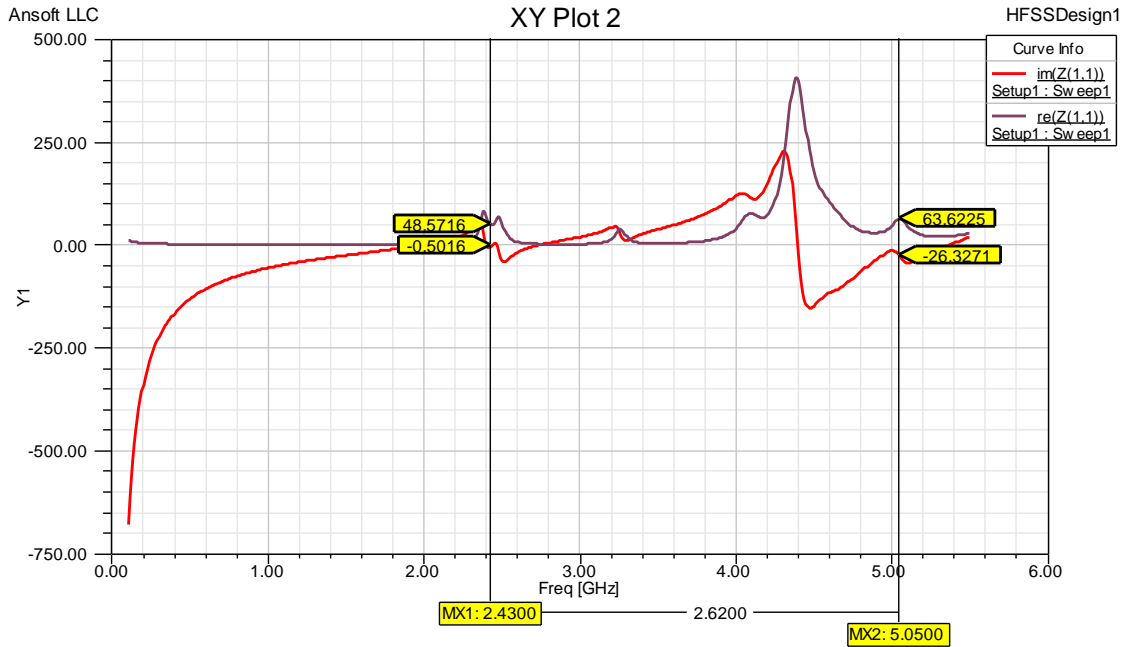
**Figura 14**  
**Antena de microcinta para 2.4 GHz con dos celdas asociadas a la línea.**

En la Figura 15 se muestra el comportamiento de las pérdidas de retorno, para la cual se obtuvo un mínimo de -36 dB para la frecuencia de 2,43 GHz. El diseño obtenido muestra un ancho de banda de 114 MHz (4.68%) para una frecuencia de resonancia centralizada alrededor de los 2.44 GHz, reafirmando así el aumento de ancho de banda que presenta la antena.



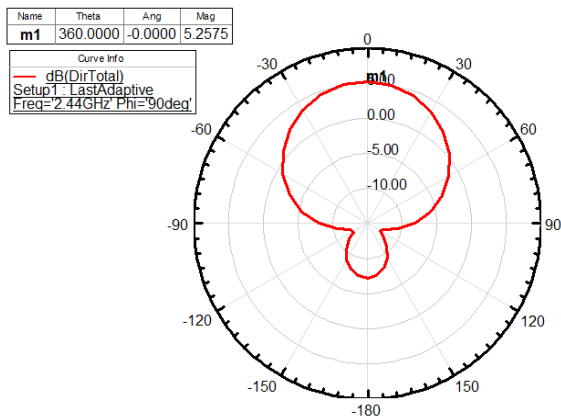
**Figura 15**  
**Parámetro  $S_{11}$  de la antena de microcinta para 2.43 GHz con dos celdas asociadas a la línea.**

La parte real de la impedancia de entrada de la antena estudiada para 2.43 GHz es  $48.6 \Omega$  y la parte imaginaria es  $-0.5 \Omega$  como se aprecia en la Figura 16, valores aceptables de impedancia para el desempeño de la misma.

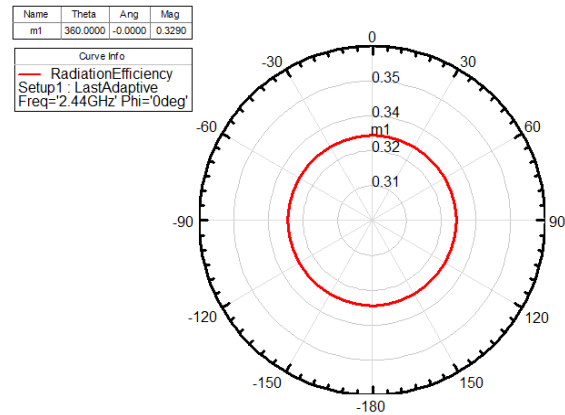


**Figura 16**  
 Parte real e imaginaria de la impedancia del parche rectangular para 2.43 GHz.

En la antena diseñada aumenta el ancho de banda, sin embargo, se afectan algunos parámetros de radiación de la antena de parche rectangular al implementar las celdas metamateriales. La antena presenta buena directividad, pero la degradación de la eficiencia debido a las pérdidas en el plano conductor, en la línea y al dieléctrico utilizado, provocan una disminución de la ganancia; lo cual se puede analizar en la Figura 17 y la Figura 18 que se presentan a continuación.

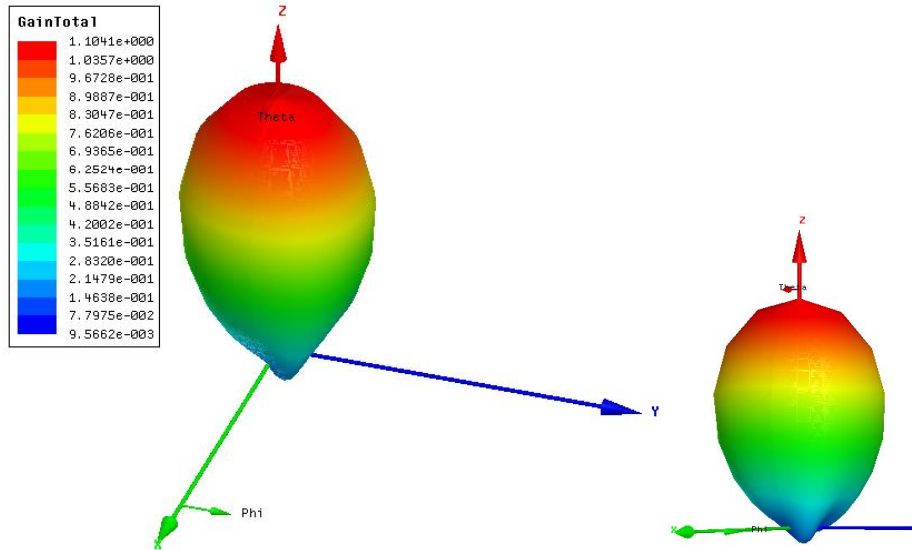


**Figura 17**  
 Directividad de la antena de parche rectangular con estructura metamaterial.



**Figura 18**  
 Eficiencia de la antena de parche rectangular con estructura metamaterial.

Luego de analizar los resultados en la región de campo lejano se puede asegurar que la antena presenta una directividad de 5.25 dB y en la Figura 19 se muestra el diagrama de ganancia en 3D con un valor de 0.43 dB. La eficiencia de radiación que se obtiene es de aproximadamente un 33%. Se observa que la antena radia en la dirección del eje z y el patrón no presenta lóbulos secundarios.



**Figura 19**  
**Diagrama de ganancia en 3D de la antena de parche rectangular con estructura metamaterial.**

Los resultados obtenidos revelan que el desplazamiento de la estructura metamaterial estudiada por la línea de transmisión produce un aumento del ancho de banda, sin embargo, provoca la degradación de la eficiencia y la ganancia de la antena. El aumento de ancho de banda, sin establecer un criterio absoluto, puede ser resultado del solapamiento de las bandas de frecuencias producidas por la antena y la estructura con comportamiento metamaterial compuesta por dos elementos. Una solución para el deterioro de los parámetros de radiación pudiera ser la implementación de un arreglo de antenas con inserción de metamateriales.

Los resultados obtenidos en el presente trabajo, han permitido lograr un mayor entendimiento de la influencia que los metamateriales ejercen sobre determinados parámetros de las antenas de microcinta de parche rectangular con polarización lineal como son: las pérdidas de retorno, el ancho de banda, la eficiencia, la ganancia y la directividad, así como detectar la existencia de relaciones de compromiso que se presentan en el diseño de estas estructuras.

Una propiedad de los materiales zurdos es que son capaces de soportar ondas hacia atrás, es decir, ondas con velocidades de grupo y fase antiparalelas. Para el caso en que  $\epsilon > 0$  y  $\mu > 0$  (medio diestro), los vectores de campo magnético  $H$ , el de campo eléctrico  $E$  y el vector de propagación  $k$  forman un triplete diestro. El vector de Poynting, que indica la dirección y el sentido de la densidad del flujo de potencia transportado por una onda y que viene descrito por  $S = E \times H$  toma la misma dirección y sentido que el vector de onda ( $k$ ). En un medio doblemente negativo ( $\epsilon < 0$  y  $\mu < 0$ ), estos vectores forman una triada zurda. El vector de Poynting en este caso, toma la misma dirección pero no el mismo sentido que el vector de onda, como en el caso del medio diestro; es decir, que la potencia fluye a partir de la fuente (velocidad de grupo positiva) mientras el frente de fase viaja hacia la fuente (velocidad de fase negativa) [15, 16].

En la Figura 20 se presentan imágenes de la animación del campo eléctrico en la configuración estudiada que ilustran una inversión de fase en el primer elemento (celda) ubicado en la línea de microcinta en el sentido de la alimentación hacia el parche, indicando una posible onda de retroceso (onda retrógrada) evidenciando el comportamiento de inversión del vector de onda ( $k$ ) y la velocidad de onda, lo cual puede ser posible debido a la obtención de las variables electromagnéticas del medio negativas; es decir, expresa el posible comportamiento negativo de la permitividad eléctrica que proporcionan los CSRR cuadrados grabados en el plano tierra y la permeabilidad magnética negativa producida por los "gaps" en la línea de alimentación para un intervalo de frecuencias determinado.

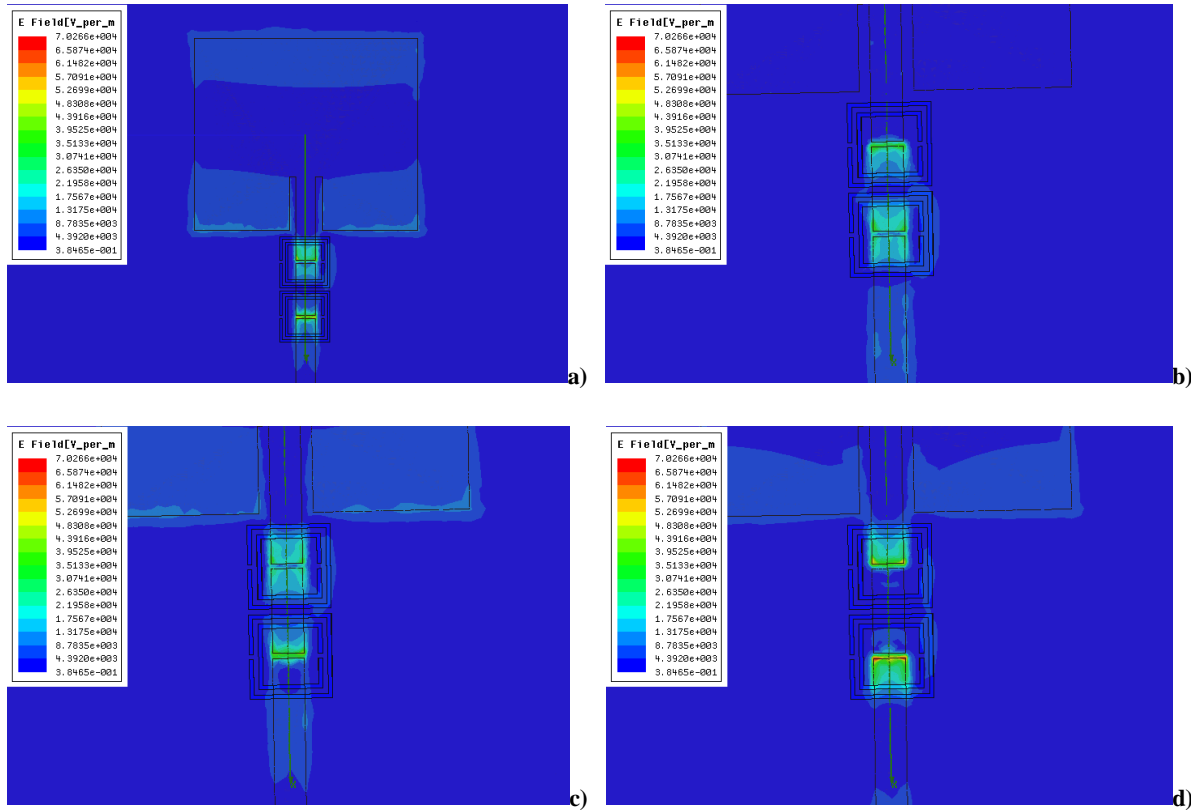


Figura 20

Distribución de campo eléctrico en la antena con implementación de CSRRs cuadrados con sus respectivos “gaps”.

## 6.- CONCLUSIONES Y LÍNEAS FUTURAS

El estudio realizado demostró que es posible obtener un incremento significativo del ancho de banda en las antenas de parche rectangular con alimentación por línea de microcinta, utilizando estructuras zurdas asociadas a la propia línea de alimentación. En la antena de parche rectangular con inserción de estructura zurda se comprobó la existencia de una relación inversamente proporcional entre la dimensión de los CSRR cuadrados y la frecuencia de resonancia. En el diseño se obtiene menor afectación del parámetro de directividad; sin embargo, la eficiencia se degrada respecto a la antena convencional en mayor grado debido a las pérdidas en el dieléctrico, en la línea de transmisión y en los planos conductores, afectando negativamente la ganancia. En este diseño se evidencia un nivel de compromiso entre el ancho de banda y la eficiencia, en la medida que aumenta el ancho de banda empeora la eficiencia de la antena. Este aumento del ancho de banda puede resultar de gran interés para los futuros sistemas de RF, cuyos requisitos de multifuncionalidad harán necesario disponer de dispositivos de RF de elevado ancho de banda. Finalmente, se presenta el diseño de una antena de microcinta con estructuras zurdas para la banda ISM 2.4 GHz, que constituye el inicio de la investigación para la posterior implementación de una antena de microcinta con estructura híbrida metamaterial.

## REFERENCIAS

1. Garg R., Bhartia P., Bahl I., Ittipiboon A. “Microstrip Antenna Design Handbook”. Artech House, INC. 2001. ISBN 0-89006-513-6.
2. Fernández González, J.M. Aplicación de estructuras metamateriales en el diseño, análisis y prototipado de antenas planas. Tesis de Doctorado. Universidad Politécnica de Madrid, 2008. Disponible en: [http://www.upm.es/observatorio/vi/index.jsp?pageac=actividad.jsp&id\\_actividad=68737](http://www.upm.es/observatorio/vi/index.jsp?pageac=actividad.jsp&id_actividad=68737).

3. Bonache Albacete Y. Filtros de microondas basados en metamateriales y en resonadores concentrados. Tesis de Doctorado. Bellaterra: Universidad Autónoma de Barcelona; Diciembre, 2006. Disponible en: <http://www.tesisenred.net/bitstream/handle/10803/5355/jba1de1.pdf?sequence=1>
4. Castellanos L.M., López F., Reyes-Vera E. Metamateriales: principales características y aplicaciones. Facultad de Ingeniería, Instituto Tecnológico Metropolitano, Medellín, Colombia. Revista de la Academia Colombiana de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales, [S.l.], v.40, n. 156, p. 395401, oct. 2016. ISSN 2382-4980. Disponible en: <http://dx.doi.org/10.18257/raccefyfyn.345>
5. Li L.W., Li Y.N., Yeo T.S., Mosig J.R., Martin O.J.F. A broadband and high-gain metamaterial microstrip antenna. Applied Physics Letters, 96, 164101 (2010). DOI: 10.1063/1.3396984.
6. Catano-Ochoa D, Senior D.E., Lopez F., Reyes-Vera E. Performance Analysis of a Microstrip Patch Antenna loaded with an Array of Metamaterial Resonators. IEEE, 2016. DOI: 10.1109/APS.2016.7695849.
7. Ouedraogo R.O., Rothwell E.J., Diaz A.R., Fuchi K., Temme A. "Miniaturization of Patch Antennas Using a Metamaterial-Inspired Technique," IEEE Trans. Antennas Propag., vol. 60, no. 5, pp. 2175–2182, 2012. DOI: 10.1109/TAP.2012.2189699
8. Smith D.R., Padilla W.J., Vier D.C., Nemat-Nasser S.C., Schultz S. "Composite medium with simultaneously negative permeability and permittivity," Phys. Rev. Lett., vol. 84, pp. 4184–4187, 2000. Disponible en: <https://doi.org/10.1103/PhysRevLett.84.4184>.
9. Capolino F. Theory and Phenomena of Metamaterials (Metamaterials Handbook). CRC Press Taylor & Francis Group. ISBN 978-1-4200-5425-5. 2009. Disponible en: <http://www.fulviofrisone.com/attachments/article/404/theory%20and%20phenomena%20in%20metamaterials.pdf>
10. Ballesta F.A. Caracterización de nuevos resonadores metamaterial, líneas de transmisión artificiales y aplicaciones en el diseño de circuitos de comunicaciones. Tesis doctoral. Escuela Técnica Superior de Ingeniería. Departamento de Ingeniería Electrónica. Universidad Autónoma de Barcelona. 2008. Disponible en: [www.tdx.cat/bitstream/handle/10803/5363/fab1de1.pdf?sequence=1](http://www.tdx.cat/bitstream/handle/10803/5363/fab1de1.pdf?sequence=1)
11. Falcone F., Lopetegui T., Laso M.A.G., Baena J.D., Bonache J., Marqués R., et al. "Babinet principle applied to the design of metasurfaces and metamaterials", Phys. Rev. Lett., Vol. 93, p 197401, November 2004. DOI: 10.1103/PhysRevLett.93.197401 PACS.
12. Balanis C.A. "Modern Antenna Handbook", N. Jersey; 2008.
13. Caloz C., Itoh T., "Application of the transmission line theory of left-handed (LH) materials to the realization of a microstrip LH transmission line," Proc. IEEE-AP-S USNC/URSI National Radio Science Meeting 2002, vol. 2, pp. 412–415, 2002. DOI:10.1109/APS.2002.1016111
14. Falcone F., Martín F., Bonache J., Baena J., Lopetegui T., Gómez Laso M.Á., et al. Estructuras metamateriales en tecnología plana basadas en partículas SRR y CSRR. 30 de septiembre de 2012. Disponible en: [https://www.researchgate.net/publication/228759555\\_Estructuras\\_metamateriales\\_en\\_tecnologia\\_plana\\_basadas\\_en\\_particulas\\_SRR\\_y\\_CSRR](https://www.researchgate.net/publication/228759555_Estructuras_metamateriales_en_tecnologia_plana_basadas_en_particulas_SRR_y_CSRR)
15. ANSOFT. Left-Handed Metamaterial Design Guide. 2007. Disponible en: <https://www.wirelessdesignonline.com/doc/left-handed-metamaterial-design-guide-0001>
16. Monografías del SOPT. "Los metamateriales y sus aplicaciones en defensa". Ministerio de Defensa; Marzo, 2011. Disponible en: [http://www.portalcultura.mde.es/Galerias/publicaciones/fichero/Monografia\\_SOPT\\_9.pdf](http://www.portalcultura.mde.es/Galerias/publicaciones/fichero/Monografia_SOPT_9.pdf)

## AUTORES

**Ailyn Estévez Hidalgo**, *Ingeniera en Telecomunicaciones y Electrónica por el Instituto Superior Politécnico José Antonio Echeverría en el año 2013. Instructora. Profesora e investigadora de la Universidad Tecnológica de La Habana "José Antonio Echeverría". La Habana, Cuba. Email: [ailynest.90@gmail.com](mailto:ailynest.90@gmail.com). Actualmente como aspirante al título de master en telecomunicaciones desarrolla una investigación orientada a arreglos de antenas faseadas.*

**Francisco R. Marante Rizo**, *Ing. en Telecomunicaciones en el año 1974 en la Universidad de La Habana y Dr. C.T en la Universidad Técnica de Praga en 1986. Profesor, investigador y Jefe del Laboratorio de Comunicaciones Inalámbricas de la Universidad Tecnológica de La Habana "José Antonio Echeverría". La Habana, Cuba. Email: [marante@tele.cujae.edu.cu](mailto:marante@tele.cujae.edu.cu).*

