

## Caracterización y diseño de una antena de parche cuadrado acoplada por ranuras ortogonales de polarización circular en FR-4.

Yordanis Alonso Roque<sup>1</sup>, Francisco R. Marante Rizo<sup>2</sup>, Leslye Villar Ledo<sup>3</sup>

<sup>1</sup> Instituto Superior Politécnico José Antonio Echeverría (CUJAE), Ingeniero. Profesor Instructor  
[yordanisar@electronica.cujae.edu.cu](mailto:yordanisar@electronica.cujae.edu.cu)

<sup>2</sup> Instituto Superior Politécnico José Antonio Echeverría (CUJAE), Doctor en Ciencias Técnicas. Profesor Titular  
[marante@electronica.cujae.edu.cu](mailto:marante@electronica.cujae.edu.cu)

<sup>3</sup> Instituto Superior Politécnico José Antonio Echeverría (CUJAE), Máster en Ciencias Técnicas. Profesor Asistente  
[leslye@electronica.cujae.edu.cu](mailto:leslye@electronica.cujae.edu.cu)

### RESUMEN

En el presente artículo se aborda la polarización circular en antenas de parche con alimentación por acoplamiento por abertura. Se describe el comportamiento de los parámetros fundamentales de una antena de parche cuadrado acoplada por ranuras ortogonales en substratos FR-4 para polarización circular, tanto para ranuras simétricas como asimétricas. Además, se proponen algunas consideraciones para el diseño de este tipo de estructura. Finalmente, se presenta el diseño de una antena de parche cuadrado acoplada por ranuras ortogonales asimétricas de polarización circular en substratos FR-4 para la frecuencia 2.45 GHz.

**Palabras claves:** acoplamiento por abertura, antenas de parche, modos ortogonales, polarización circular.

## Characterization and design of an orthogonal-slots-coupled square patch antenna of circular polarization on FR-4.

### ABSTRACT

*This paper approaches the circular polarization on patch microstrip antennas fed by aperture coupling. It describes the behavior of the fundamental parameters of a square patch antenna coupled by orthogonal slots on FR-4 substrates for circular polarization, both symmetric and asymmetric slots. Besides, some considerations for the design of this type of structure are proposed. Finally, present the design of an asymmetric-orthogonal-slots- coupled square patch antenna of circular polarization on FR-4 substrates for the 2.45 GHz frequency.*

**Key Words:** Aperture coupling, circular polarization, patch microstrip antenna, orthogonal modes.

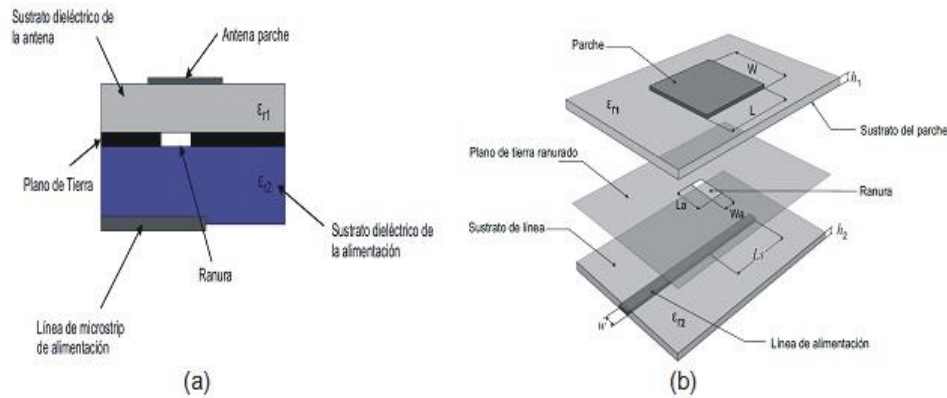
## INTRODUCCIÓN

El auge vertiginoso de las telecomunicaciones hacia sistemas con velocidades, anchos de banda y calidad de servicio cada vez mayores, más robustos y que permitan la movilidad del usuario a velocidades superiores, ha traído consigo la investigación y el desarrollo de tecnologías de telecomunicación inalámbrica con elevadas exigencias. Las antenas planas en tecnología de microcinta son las más utilizadas en los sistemas de comunicaciones inalámbricos emergentes, debido a su reducido tamaño, bajo perfil, pequeño peso, bajo costo, compatibilidad con la tecnología de circuito integrado [1] [2] y las elevadas prestaciones que pueden ser obtenidas en la actualidad. Estas antenas son ampliamente utilizadas en las redes inalámbricas, así como en los sistemas de comunicaciones móviles, satelitales y de transmisión de televisión.

El canal de comunicaciones inalámbricas es un medio muy diverso que presenta características eléctricas y electromagnéticas variables en el espacio y en el tiempo, lo cual afecta considerablemente la propagación de las ondas de radio. Uno de los efectos perjudiciales es el cambio de polarización de la señal, el cual afecta a la recepción de la información. Por tal razón, algunos sistemas radioelectrónicos, redes inalámbricas, y sistemas de comunicaciones inalámbricos emergentes como redes W-LAN, radares, satélites y móviles-satélites, donde el canal de comunicación es más hostil, utilizan la polarización circular para combatir estos efectos. Las antenas de parche cuadrado con alimentación por acoplamiento por abertura de polarización circular representan una buena alternativa para estos sistemas.

### **Polarización circular en antenas de parche con alimentación por acoplamiento por abertura**

Una antena de parche con alimentación por acoplamiento por abertura se puede definir como un sistema de radiación planar en tecnología de microcinta compuesto por dos estructuras apiladas que consisten en un subsistema de alimentación por línea de microcinta y un subsistema radiante separados por un plano conductor ranurado, como se puede observar en la figura 1a. En la parte superior se encuentra el parche radiante dispuesto sobre un sustrato dieléctrico de permitividad eléctrica relativa  $\epsilon_{r1}$ . El parche es excitado por el campo electromagnético a través de la(s) abertura(s) que se disponen en el plano de masa ranurado, originado por una línea de microcinta que se encuentra bajo un dieléctrico de permitividad eléctrica relativa  $\epsilon_{r2}$ , como se muestra en la figura 1. [1] [3]



**Figura 1.- Representación (a) en vista lateral y (b) en perspectiva de la topología de una antena de parche cuadrado con alimentación por acoplamiento por abertura.**

El plano conductor ranurado entre los substratos dieléctricos aísla la alimentación del elemento radiante, evitando emisiones espurias de la línea de alimentación. A diferencia de las técnicas de alimentación por sonda coaxial, por línea de microcinta y por proximidad, el acoplamiento por abertura permite que prácticamente ninguna radiación de la red de alimentación pueda afectar la radiación del parche, evitando deformación del diagrama de radiación y de la pureza de polarización de la antena. Además, al no existir contacto directo entre la línea de alimentación y el elemento radiante, se elimina el problema de la auto-reactancia producida por la propia línea de alimentación. [4] [2]

En las antenas de microcinta con alimentación por abertura, la excitación del parche radiante se produce por acoplamiento electromagnético entre la línea de microcinta y el parche a través de una ranura en el plano de masa. Esta forma de alimentación es bastante difícil de caracterizar y modelar mediante métodos físico-matemáticos, debido a la complejidad que presentan los procesos electromagnéticos inherentes a esta estructura y los métodos que pueden ser aplicados [5]. El problema es aún mayor si se utilizan dos ranuras, pues, por una parte, trae consigo impedancias mutuas y compromisos en lograr aislamiento entre los puertos; y por otra parte, es marcada la dificultad en lograr dos modos de distribución de campos ortogonales para obtener campos circularmente polarizados. [5] [3]

La utilización de antenas de parche cuadrado acopladas por ranuras no requiere de modificaciones o configuraciones especiales en el parche para obtener polarización circular [2] [6]. Además, la ranura de acoplamiento permite proporcionar mayor grado de libertad en el diseño de este tipo de antena para aplicaciones de polarización circular. [3]

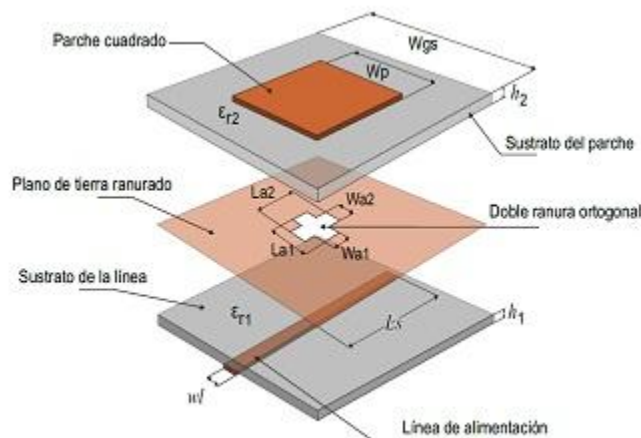
### **Estudio y diseño CAD de una antena de parche cuadrado acoplada por ranuras ortogonales de polarización circular**

A continuación se presenta el estudio asistido por computadora del comportamiento de los parámetros fundamentales de una antena de parche cuadrado, alimentada por acoplamiento por ranuras ortogonales (APC-ARO) en substratos FR-4 para polarización circular en función de sus dimensiones físicas, utilizando el software CST Microwave Studio.

Primeramente, se realiza el cálculo de las dimensiones iniciales para una antena APC-ARO en substratos dieléctricos de fibra de vidrio FR-4 de permitividad eléctrica relativa 4.3, con tangente del ángulo de

pérdidas 0,025 y de grosores 0,8 mm y 1.5 mm para una frecuencia de 2,4 GHz. Para ello se realizó una herramienta en el software libre Scilab denominada AMP-AR 1.0. Esta aplicación permite calcular el ancho de la línea de microcinta, las dimensiones del parche, las dimensiones de las ranuras y del segmento de sintonización denominado stub\*, (del inglés) utilizando el Modelo de Línea de Transmisión y algunos criterios prácticos. [3]

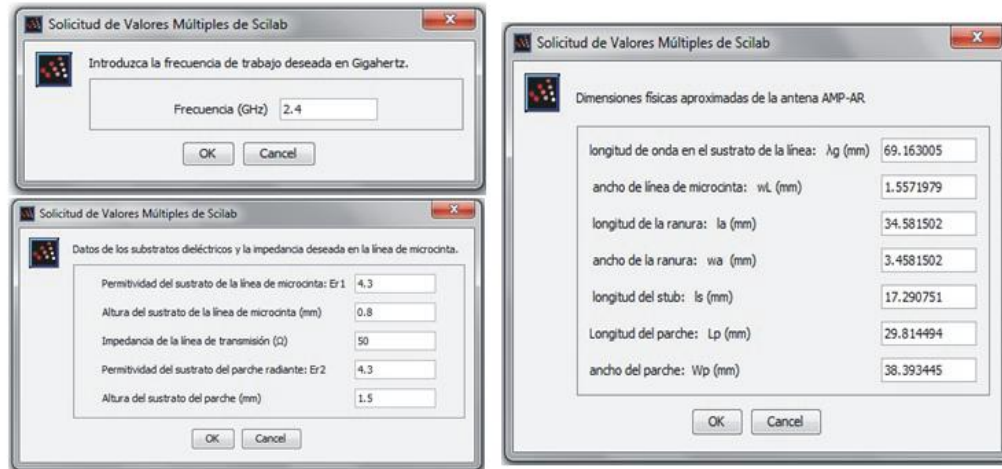
Se utiliza el sustrato FR-4 de menor grosor ( $h_1 = 0.8$  mm) para la línea de microcinta, con los objetivos de disminuir las radiaciones espurias y la propagación de ondas de superficie. Calculando el ancho de la línea para una impedancia característica de  $50 \Omega$  mediante el Modelo de Línea de Transmisión, se obtiene una longitud de onda en el sustrato  $\lambda_g = 69,16$  mm, y consecuentemente, un ancho de  $w_L \approx 1,56$  mm. Teniendo en cuenta los criterios prácticos:  $l_a \approx \lambda_g/2$ ,  $w_a = l_a/10$  mm y  $l_s \approx \lambda_g/4$ , y utilizando la nomenclatura de las dimensiones de la antena que se muestran en la figura 2, se obtiene:  $l_{a1} = l_{a2} = 34,58$  mm,  $w_{a1} = w_{a2} = 3,46$  mm y  $l_s = 17,29$  mm, como se puede observar en la figura 3.



**Figura 2.- Topología de una antena de parche cuadrado con alimentación por acoplamiento por ranuras ortogonal en forma de cruz. [5]**

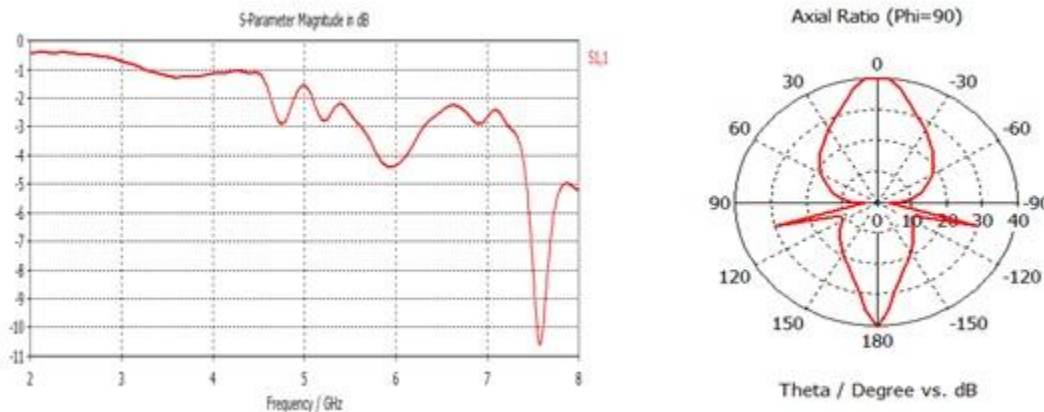
El sustrato FR-4 de grosor  $h_2 = 1,5$  mm se destina para el subsistema de radiación con el fin de obtener mayor ancho de banda. Mediante el método utilizado para calcular las dimensiones de una antena de parche rectangular basado en el Modelo de Línea de Transmisión, se obtiene el parche cuadrado de 29,8 mm aproximadamente, para la frecuencia deseada. Teniendo en cuenta el efecto de desbordamiento de los campos en el parche radiante se estima que la dimensión del sustrato y del plano conductor sea el doble de la dimensión del parche, lo que resulta  $W_{gs} \approx 59,64$  mm [3]. De esta manera quedan determinadas las dimensiones iniciales de la antena para su estudio en el software CST Microwave Studio.

\*stub: Segmento de la línea de microcinta que sobrepasa el borde de la ranura hasta el borde próximo del parche utilizado para la sintonización y otros fines en antenas de parche alimentadas por acoplamiento por abertura.



**Figura 3.- Imágenes de los resultados de las dimensiones iniciales de la antena APC-ARO obtenidos en la herramienta AMP-AR 1.0 creada en el software Scilab.**

Una simulación inicial de la antena con ranuras simétricas centradas en el parche con las dimensiones prefijadas no muestra resultados satisfactorios. La respuesta en la frecuencia central se encuentra muy lejana de la frecuencia de interés y el diagrama polar de relación axial muestra estar muy lejos de ser útil para aplicaciones de polarización circular, como se puede observar en la figura 4. Estas discrepancias son de esperar, debido a las diferencias existentes entre el método utilizado para calcular las dimensiones y el método que utiliza el software de simulación (Diferencia Finita en el Dominio del Tiempo, FDTD, por sus siglas del inglés). Además, en la estructura analizada no se cumple cabalmente el Modelo de Línea de Transmisión.



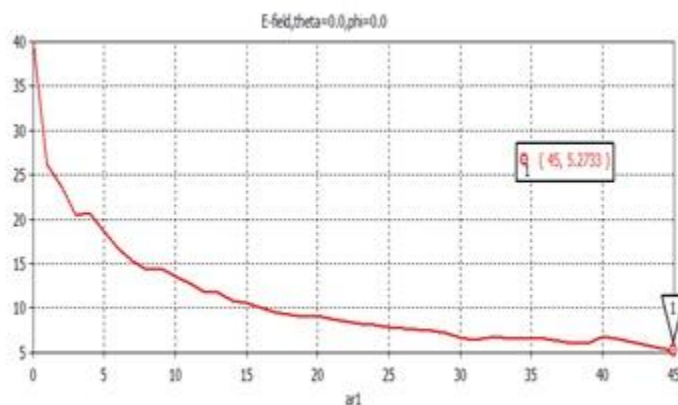
**Figura 4.- Resultados de las pérdidas de retorno y la relación axial de la simulación de la APC-ARO con las dimensiones iniciales aproximadas.**

La mayor dimensión de la ranura presenta una gran influencia en el acoplamiento en este tipo de antena. Para mejorar las pérdidas de retorno debe encontrarse un compromiso entre la longitud y el ancho de la ranura, teniendo en cuenta su influencia en la eficiencia de la antena y en la conformación

de los campos, lo cual pudiese afectar negativamente la pureza de polarización circular y el diagrama de radiación [3] [7]; de modo que para acercar la frecuencia central de la antena a la frecuencia de diseño, es necesario seleccionar la dimensión del parche y la longitud de las aberturas que lo permitan.

Con la variación del “stub” se puede obtener un incremento de la directividad y la ganancia para ciertas condiciones; sin embargo, su principal influencia está en la sintonización de la antena para la frecuencia deseada y el acoplamiento. Para mayores dimensiones del stub, se obtiene un aumento de la frecuencia correspondiente a las mínimas pérdidas de retorno y una disminución de las mismas. A partir del estudio de diferentes transformaciones en la antena con ranuras simétricas centradas en el parche, se demostró que no se obtienen resultados significativos en la relación axial para polarización circular [3].

Al variar la disposición de las ranuras en el parche realizando un giro hacia la derecha (en sentido horario), se logra una disminución significativa en la relación axial. Cuando la ranura que está longitudinalmente con la línea de microcinta (ranura 2) se encuentra 450 respecto a esta, se obtiene la menor relación axial, lo cual se puede observar en la figura 5 [3] [5]. Esto demuestra que cuando las aberturas cruzadas perpendicularmente se encuentran 45 grados respecto a la línea de microcinta, se obtienen con mayor facilidad campos ortogonales para lograr polarización circular.



**Figura 5.- Comportamiento de la relación axial al variar la posición de las ranuras con un giro angular hacia la derecha (sentido horario).**

Una cuestión importante en este tipo de estructura es utilizar aberturas asimétricas. Si la ranura que se encuentra perpendicular a la línea de microcinta (ranura 1) es mayor que la ranura que se encuentra en el mismo sentido de la línea (ranura 2), entonces se puede obtener polarización circular derecha u horaria (RHCP, por sus siglas del idioma inglés); de manera contraria, se puede obtener polarización circular izquierda (LHCP, por sus siglas del inglés) [8]. Es válido señalar que el criterio de aberturas asimétricas tratado en el presente material está dado por la diferencia entre las longitudes de las mismas, mientras que el ancho de las ranuras es el mismo.

Una relación entre las longitudes de las ranuras  $l_{a1}/l_{a2}=1,3$  en la APC-ARO permite lograr una buena relación axial para aplicaciones de polarización circular y buen acoplamiento [3] [4], lo cual se puede corroborar en la figura 6. Con esta relación entre las mayores dimensiones de las ranuras se puede disminuir considerablemente la relación axial sin compromiso con las pérdidas de retorno [3], lo cual es



significativamente relevante en antenas de parche de acopladas por abertura de polarización circular [7] [9] [10]. Además, para esta condición es posible obtener valores aceptables de directividad.

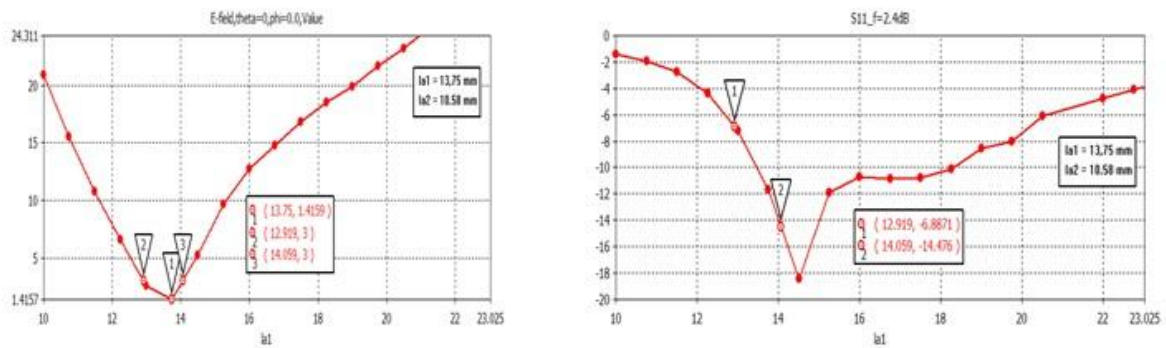


Figura 6.- Comportamiento de la relación axial y las pérdidas de retorno en función de la longitud de la ranura 1 ( $la_1$ ) para una relación  $la_1/la_2=1,3$ .

Una disminución de la relación  $la_1/la_2$  trae consigo un aumento de la frecuencia correspondiente a las mínimas pérdidas de retorno, y consecuentemente, un incremento de la frecuencia central del ancho de banda de pérdidas de retorno. Una razón entre las mayores dimensiones de las ranuras  $la_1/la_2=1,25$  en una APC-ARO asimétricas rotadas 45 grados respecto a la línea de microcinta en substratos FR-4, mostró ser la mejor relación entre las longitudes de las ranuras para obtener polarización circular derecha a la frecuencia de 2,4 GHz. Además, se obtuvo un buen acoplamiento y ancho de banda de pérdidas de retorno, como se puede observar en la figura 7.

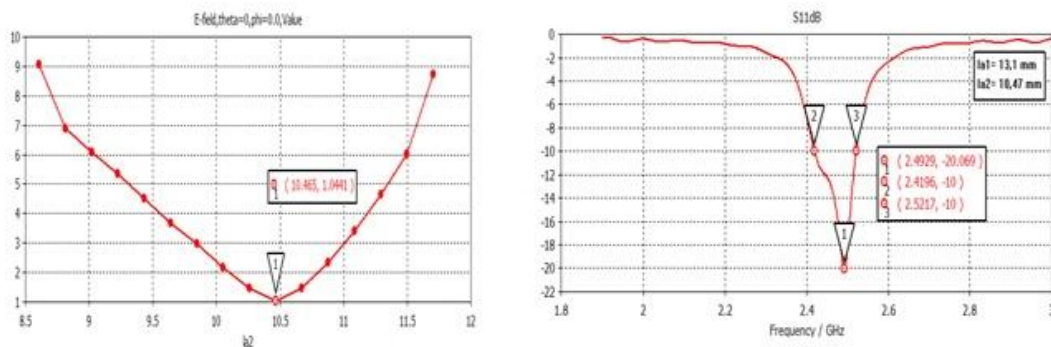


Figura 7.- Comportamiento de la relación axial en función de la longitud de la ranura 2 ( $la_2$ ) y las pérdidas de retorno en la frecuencia con  $la_1=13,1$  mm (relación  $la_1/la_2=1,25$ ),  $Wp=26,43$  mm,  $wa_1=wa_2=1.5$  mm,  $ls=17,83$  mm y  $wL=1,48$  mm.

Se debe seleccionar minuciosamente el ancho de las ranuras asimétricas, pues para mayores dimensiones del ancho de las mismas se obtiene un mejor acoplamiento, y se logran frecuencias correspondientes a las mínimas pérdidas de retorno cada vez menores, mientras que la relación axial se degrada mayormente para estas condiciones [3], como se puede apreciar en la figura 8.

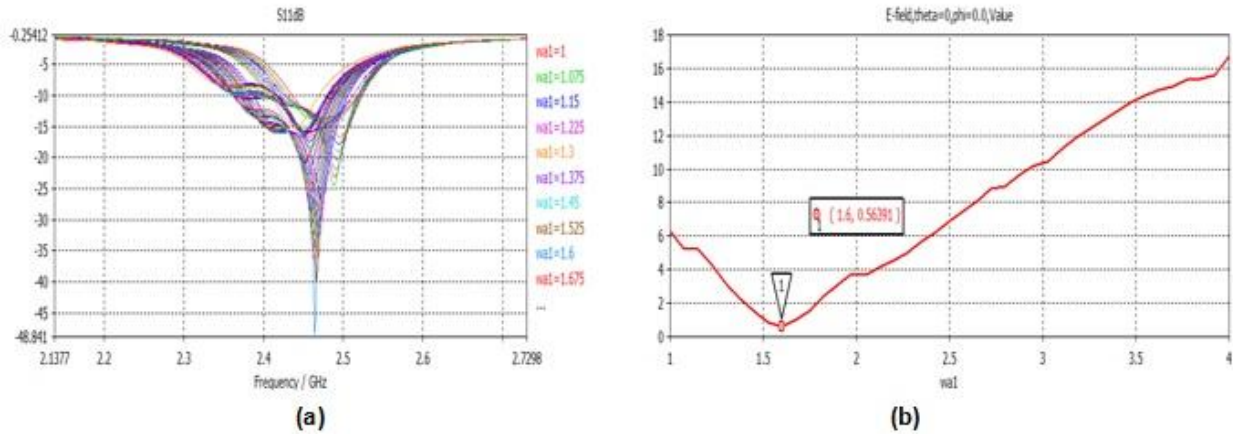


Figura 8.- (a) Respuesta en la frecuencia de las pérdidas de retorno para distintos valores del ancho de las ranuras. (b) Relación axial en función del ancho de las ranuras con  $la_1/la_2=1.25$ .

En esta antena con ranuras asimétricas con una relación  $la_1/la_2=1.25$ , si se aumenta la longitud del “stub” ( $l_s$ ) se logra una disminución de las pérdidas de retorno y un aumento de las frecuencias que corresponden a las mínimas pérdidas de retorno ( $R_{Lmin}$ ), como se puede observar en la tabla 1. En una antena APC-ARO asimétricas que presente buena relación axial para polarización circular, se puede sintonizar hacia la frecuencia de interés variando la longitud del stub sin degradar sus parámetros fundamentales, principalmente la relación axial. Para  $l_s=12,8$  mm se obtiene un buen acoplamiento y un ancho de banda correspondiente de 116 MHz, como se puede observar en la tabla 1. Además, se alcanza una relación axial de 0.31 dB aproximadamente, buena directividad y un incremento en la eficiencia de la antena. Esto demuestra que es posible obtener una relación axial adecuada para polarización circular, un correcto acoplamiento, gran ancho de banda de pérdidas de retorno y una mejora de la eficiencia de la antena determinando correctamente la longitud del “stub”. [3]

**Tabla 1. Resultados de los parámetros fundamentales para los valores de longitud del “stub” que proporcionan menor relación axial.**

$l_s$ [mm]	AR [dB]	$R_{Lmin}$ [dB]	f [GHz] de $R_{Lmin}$	$BW_{RL}$ [MHz]	D [dB]	G [dB]	$R_s$ [Ω]	Reactancia [Ω]
12,8	0,3129	-17,35	2,4687	116	6,296	3,99	53,8	13,6
12,9	0,3915	-18,04	2,4698	115,2	6,289	3,988	55,3	12,1
13	0,5115	-18,94	2,4698	114,9	6,291	3,992	55,9	10,4
13,1	0,6432	-20,13	2,4709	114,6	6,293	3,996	56,6	8,08
13,9	0,7196	-22,31	2,4764	115,1	6,302	4,006	56,3	4,97

Variando convenientemente cada una de las dimensiones físicas de la antena por separada, en la búsqueda de obtener valores aceptables de cada uno de los parámetros fundamentales y características



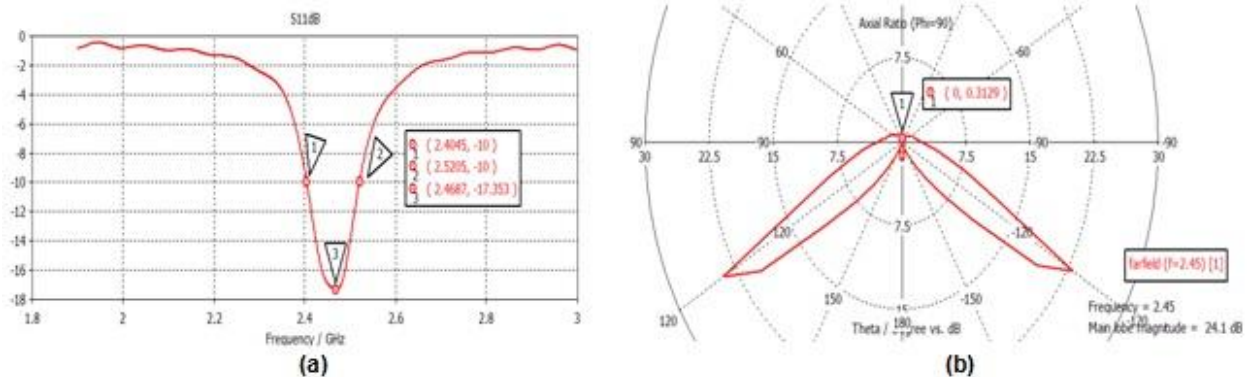
de radiación, se obtiene una antena APC-ARO asimétricas de polarización circular para la frecuencia de 2,45 GHz. Sus dimensiones se presentan en la tabla 2.

**Tabla 2.- Dimensiones de la antena APC-ARO asimétricas diseñada.**

Línea de transmisión			Parche		
Dimensión	Descripción	Valor	Dimensión	Descripción	Valor
$h_1$ (mm)	Grosor del sustrato de la línea	0,8	$h_2$ (mm)	Grosor del sustrato del parche	1,6
$\epsilon_{r1}$	Permitividad eléctrica relativa sustrato de la línea	4,3	$\epsilon_{r2}$	Permitividad eléctrica relativa del sustrato del parche	4,3
$w_L$ (mm)	Ancho de las líneas de transmisión	1,5	$W_D$ (mm)	Ancho y largo del parche	26,43
$l_s$ (mm)	Longitud del stub	12,8	$W_{gs}$ (mm)	Dimensión de los sustratos y el plano conductor ranurado	52,86
Ranuras					
Dimensión	Descripción	Valor			
$la_1$ (mm)	Largo de la ranura 1	13,1			
$la_2$ (mm)	Largo de la ranura 2	10,46			
$w_{g1}$ (mm)	Ancho de las ranuras ( $wa_1=wa_2$ )	1,6			

\* Las ranuras son asimétricas con una relación  $la_1/la_2=1,25$  y se encuentran rotadas 45 grados respecto a la línea de microcinta.

Así se obtiene un mínimo de pérdidas de retorno de -17,4 dB a la frecuencia de 2,47 GHz aproximadamente, lo cual demuestra un buen acoplamiento. La antena presenta un ancho de banda de pérdidas de retorno de 116 MHz, desde 2,4 GHz hasta 2,52 GHz [3], como se muestra en la figura 9a y logra un mínimo de relación axial de 0,31 dB en la principal dirección de radiación, como se puede observar en la figura 9b.



**Figura 9.- Respuesta en la frecuencia de: (a) las pérdidas de retorno, (b) la relación axial de la APC-ARO-PC diseñada.**

## Caracterización y diseño de una antena de parche cuadrado acoplada por ranuras ortogonales de polarización circular en FR-4.

Se logra un ancho de banda de relación axial de 3dB de 23,3 MHz, con una frecuencia central 2,45 GHz, como se muestra en la figura 10a. De esta manera, el ancho de banda de funcionamiento de la antena para aplicaciones de polarización circular es 23,3 MHz (0,95%).

Para la frecuencia central se obtiene una impedancia de entrada de  $48 + j14\Omega$ , como se puede apreciar en la figura 10b; se obtiene una directividad de 6.3 dBi y una ganancia de 4 dB aproximadamente. La antena presenta una polarización circular a derecha, como se puede corroborar en las ganancias de polarización que se muestran en la figura 11.

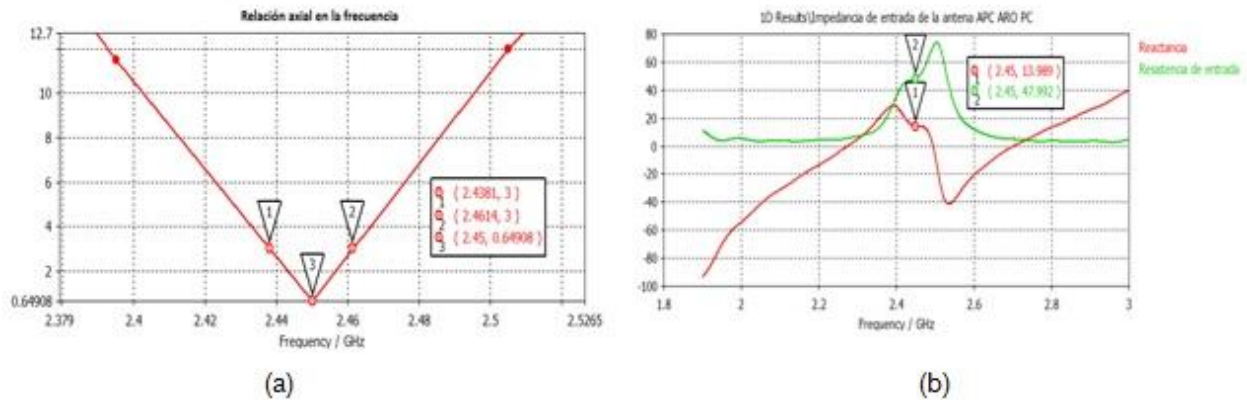


Figura 10.- (a) Diagrama polar de la relación axial y (b) impedancia de entrada, para la frecuencia central (2,45 GHz).

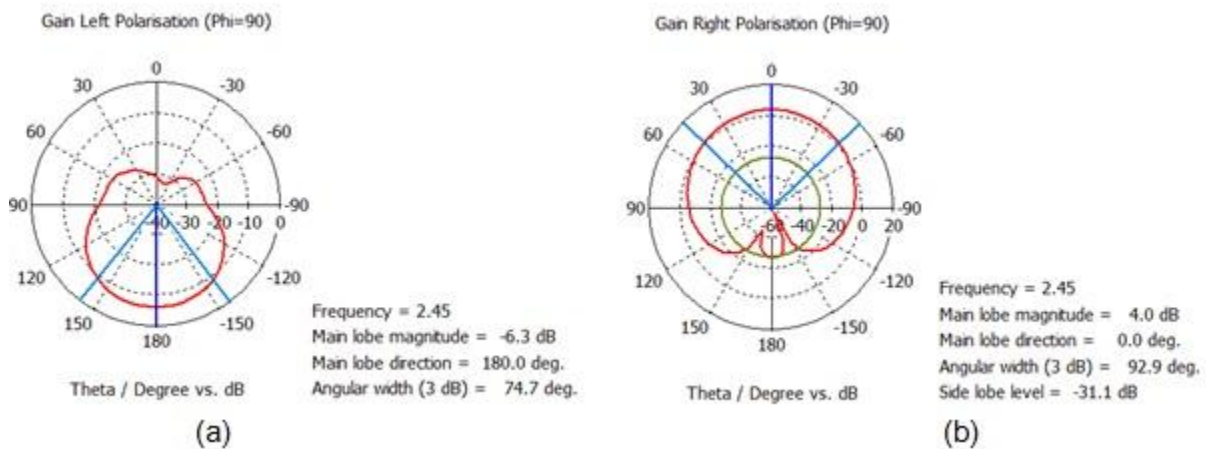


Figura 11.- Diagramas polares de (a) directividad y (b) ganancia de la antena APC-ARO asimétricas diseñada.

## **CONCLUSIONES**

Un estudio del comportamiento de los parámetros fundamentales en función de las dimensiones físicas de la antena permitió alcanzar algunas consideraciones y criterios para el diseño de este tipo de sistema radiante. Se diseñó una antena de parche cuadrado con alimentación por acoplamiento por ranuras ortogonales en forma de cruz de polarización circular utilizando softwares profesionales de simulación y diseño de dispositivos de alta frecuencia.

Para alcanzar acoplamiento y relación axial adecuados para aplicaciones de polarización circular en este sistema radiante, es necesario seleccionar convenientemente las dimensiones y disposición de las aberturas. La utilización de aberturas asimétricas posibilita la polarización circular en este tipo de antena con mayor flexibilidad; además permite obtener un tipo de polarización circular deseado. Una relación entre las longitudes de las ranuras de 1,25 conduce a alcanzar buenos resultados en substratos FR-4 para la frecuencia de 2,4 Ghz. Es posible lograr campos circularmente polarizados con mayor facilidad si las ranuras ortogonales asimétricas se disponen con un ángulo de 45 grados con respecto a la línea de microcinta.

## REFERENCIAS

1. BALANIS, CONSTANTINE A.: Antenna Theory. Analysis and Design 3ra Ed. John Wiley&Sons, Nueva Jersey, Estados Unidos de América 2005.
2. GARG, RAMESH; BHARTIA, PRAKASH; BAHL, INDER; ITTIPIBOON, APISAK: Microstrip Antenna Design Handbook 1ra Ed. Artech House antennas and propagation, Norwood, Estados Unidos de América 2001.
3. ALONSO ROQUE, YORDANIS.: "Propuesta de una Metodología de Diseño de antenas de microcinta de parche cuadrado acoplada por ranuras ortogonales de polarización circular en FR-4:", Tesis de en opción al grado científico de Máster en Ciencias Técnicas, Instituto Superior Politécnico "José Antonio Echeverría" (CUJAE), Cuba, 2013.
4. HUANG, CHIH-YU; WU, JIAN-YI; WONG, KING-LU: "Cross-Slot-Coupled Microstrip Antenna and Dielectric Resonator Antenna for Circular Polarization": IEEE Transactions on Antennas and Propagation, Vol. 47. No. 4, pp. 605-609, Abril 1999.
5. ALONSO ROQUE, YORDANIS.: "Estudio, diseño, simulación y medición de antenas de microcinta", presentado al VI Simposio de Telecomunicaciones en la XV Convención y Feria Internacional INFORMÁTICA 2013, La Habana, Cuba, Mazo 2013, ISBN 978-959-7213-02-4.
6. BALANIS, CONSTANTINE A.: Modern Antenna Handbook. Analysis and Design 1ra Ed. John Wiley&Sons, Estados Unidos de América 2008.
7. VENTURA TIMONCHUK, FELIPE; ZARATE MEZA, WALTER ALEJANDRO.: "Estudio y diseño de una antena de parche cuadrado con alimentación por acoplamiento por doble ranura ortogonal de polarización circular:", Tesis de en opción al título de Ingeniero en Telecomunicaciones y Electrónica, Instituto Superior Politécnico "José Antonio Echeverría" (CUJAE), Cuba, 2013.
8. ADRIAN, A.; SCHAUBERT, D. H.: "Dual aperture-Coupled Microstrip Antenna for Dual or Circular Polarisation": Electronics Letters, Vol. 23. No. 23, pp. 1226-1227, Noviembre 1987.
9. COLINA LÓPEZ, WILIAN SANTIAGO; OLIVER WESTBY, DOUGLAS MICHAEL.: "Estudio y diseño de antenas de microcinta de parche cuadrado con alimentación por acoplamiento por doble ranura de polarización circular:", Tesis de en opción al título de Ingeniero en Telecomunicaciones y Electrónica, Instituto Superior Politécnico "José Antonio Echeverría" (CUJAE), La Habana, Cuba, Junio 2012.
10. JARDINES DEL CUETO, HAROLD; OLIVER WESTBY, DOUGLAS MICHAEL.: "Estudio y diseño de antenas de microcinta de parche cuadrado con simple alimentación por acoplamiento por ranura de polarización circular:", Tesis de en opción al título de Ingeniero en Telecomunicaciones y Electrónica, Instituto Superior Politécnico "José Antonio Echeverría" (CUJAE), La Habana, Cuba, Junio 2012.
11. YAN LAM, KA; LUK, KWAI-MAN; FONG LEE, KAI; WONG, HANG; BO NG, KUNG.: "Small Circularly Polarized U-Slot Wideband Patch Antenna": IEEE Antennas and Wireless Letters, Vol. 10., pp. 87-90, Abril 2011.