

PROPUESTA DE ANTENA DE GUÍA DE ONDA CON RANURAS RESONANTES PARA APLICACIONES WLAN

Nayrebis Bethart Rodríguez¹, Tuan Ernesto Cordoví Rodríguez², Roberto Jiménez Hernández³, David Beltrán Casanova⁴

¹Empresa de Telecomunicaciones de Cuba ETECSA, Cuba, Calle 9 de Abril, Esquina José Martí, Encrucijada, Villa Clara

²Antenas VC, Cuba, Carretera Central No. 536-A Esquina a Tirso Díaz, Santa Clara, Villa Clara, Cuba

³Fac. de Ing. Eléctrica, Universidad Central "Marta Abreu" de las Villas, UCLV, Santa Clara, V.C, Cuba

⁴Fac. de Ing. Eléctrica, Universidad Central "Marta Abreu" de las Villas, UCLV, Santa Clara, V.C, Cuba

¹nayrebis.bethart@etecsa.cu,

²tuan@antenasvc.co.cu

³jimenez@uclv.edu.cu

⁴dbeltranc@uclv.edu.cu

RESUMEN

Las Antenas de Guía de Onda con Ranuras Resonantes o *Slotted Waveguide Antenna* (SAW) son elegidas como antenas muy económicas pues poseen altos valores relativos de ganancia y una estructura con poco grado de complejidad. Por tanto, el presente trabajo está encaminado al diseño y fabricación de un tipo de antena de guía de onda ranurada para aplicaciones de redes inalámbricas *Wi-Fi* con el objetivo de satisfacer las necesidades existentes por clientes que desean conectar entidades a través de conexión por redes inalámbricas fundamentalmente en la banda de 2.4 GHz. Debido a los nuevos cambios tecnológicos en los que se encuentra inmersa la empresa de Telecomunicaciones de Cuba (ETECSA) plantea la necesidad de sustitución de importaciones con el desarrollo de las mismas. Para dar cumplimiento al propósito de este trabajo se analizaron varios documentos con los que se pudieron estudiar las características de las antenas de guía de onda ranurada donde no existe claridad sobre la metodología de diseño. Es por ello que se comienza con la propuesta de una metodología de diseño de la antena. Con el apoyo de un software de modelado y simulación electromagnética en 3D se obtienen los parámetros típicos dentro de la banda de frecuencia de operación. Por último, se brindan los resultados experimentales obtenidos en las mediciones realizadas a varios prototipos de antenas para su validación.

PALABRAS CLAVES: Guía de ondas, ranura, razón de onda estacionaria, ganancia, patrón de radiación.

WAVEGUIDE ANTENNA PROPOSAL WITH RESONANT SLOTS FOR WLAN APPLICATIONS

ABSTRACT

The Slotted Waveguide Antenna (SAW) are chosen as very economical antennas because they have high relative gain values and a structure with little complexity. Therefore, the present work is aimed at the design and manufacture of a type of slotted waveguide antenna for Wi-Fi wireless network applications to satisfy the needs existing by customers who wish to connect entities through network connection wireless fundamentally in the 2.4 GHz band. Due to the new technological changes in which the Cuban Telecommunications Company (ETECSA) is immersed, it raises the need for import substitution with their development. To fulfill the purpose of this work, several documents were analyzed with which the characteristics of the grooved waveguide antennas could be studied where there is no clarity about the design methodology. That is why we start with the proposal of an antenna design methodology. With the support of a 3D modeling and electromagnetic simulation software, the typical parameters within the operating frequency band are obtained. Finally, the experimental results obtained in the measurements made to various prototypes of antennas are provided for validation.

KEY WORDS: Waveguide, slot, standing wave ratio, gain, radiation pattern.

1. INTRODUCCIÓN

Las antenas de guía de onda ranurada que operan en la banda ISM de los 2.4 GHz, son elegidas por ser muy económicas, poseen altos valores relativos de ganancia y una estructura con poco grado de complejidad. Requieren una guía de onda rectangular de gran tamaño con gran robustez mecánica y resistencia a la influencia de medio ambiente. Poseen como desventaja la incapacidad de integración con los dispositivos inalámbricos.

A medida que aumenta la frecuencia, las guías de ondas rectangulares se hacen cada vez más pequeñas dando lugar al surgimiento de nuevas tecnologías como la *Substrate Integrated Waveguide* (SIW) que permite la integración en el mismo PCB por su bajo perfil. La tecnología SIW está siendo utilizada en antenas de guía de onda ranurada, acopladores direccionales, divisores de potencia, etc. en frecuencias de las microondas por encima de la Banda X, fundamentalmente en la Banda Ka, en la tecnología 5G [1] [2].

2. PROPUESTA DE ANTENA DE GUÍA DE ONDA RANURADA (SWA)

La antena SWA consiste en un conjunto de ranuras que se encuentra en un plano conductor que radian energía al medio radioeléctrico cuando son excitadas. Si las líneas de corrientes que se propagan dentro de las paredes de la guía de onda intersectan dicha ranura, como se observa en la Fig. 1. En este caso se utiliza una guía de ondas rectangular debido a que presenta pérdidas despreciables cuando la frecuencia de operación es mayor a la frecuencia de corte de la guía y de mayor facilidad de adquisición. Se puede observar, en la Fig. 1, que las ranuras #1 no intersectan ninguna línea de campo por lo que este tipo de ranuras no generan radiación alguna. En el caso de las ranuras número 2, intersectan líneas de campo lo que provoca una radiación. También dependiendo de la longitud, del ancho y de la posición de la ranura, se puede modificar el patrón de radiación [2].

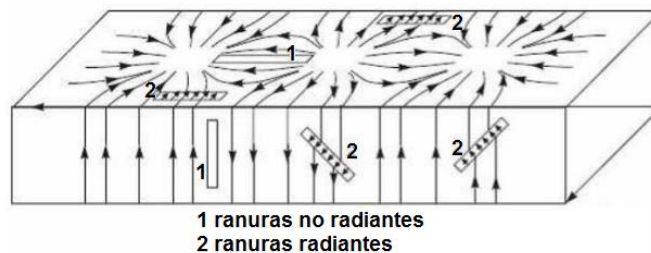


Figura 1: Diversas posiciones de la ranura en la guía de onda (2).

Una ranura en una guía de onda tiene un comportamiento similar al de un dipolo y dependerá de la ubicación que ésta tenga sobre la guía. Las ranuras pueden colocarse en ambas caras de la guía y pueden estar alineadas con el eje de la guía. Existen también otros arreglos en donde las ranuras están inclinadas con respecto al eje de la guía y presentan un comportamiento similar a las anteriores. En este trabajo se utilizan ranuras horizontales para arreglos resonantes. Los arreglos resonantes son aquellos en donde la separación entre ranuras es de $\lambda_g/2$ y van alternadas en lados opuestos a lo largo de la línea central de la guía, distribuidas en una sola cara de la misma y no en ambas. Siendo λ_g la longitud de onda en la guía de onda [3].

3. CRITERIOS DE DISEÑO DE LA ANTENA SWA PARA 2.4 GHZ

A continuación, se tratarán todos los aspectos relacionados con el diseño y simulación de la SWA que se va a realizar. Se diseñará una antena clásica aplicando cálculos teóricos la cual será de 8 ranuras rectangulares ($N = 8$) sobre una cara de la guía de onda y se simulará una antena SWA clásica de 8 ranuras geoméricamente rectangular con relativa alta ganancia para la red WLAN con rango de frecuencia entre 2.40–2.48 GHz y frecuencia de operación central a 2.44 GHz.

Para el desarrollo de la SWA clásica, primeramente, se deben seleccionar el número de ranuras requerido para la ganancia deseada y anchura del haz. Luego escoger el tamaño apropiado de la guía de onda para la frecuencia que va a operar y calcular la longitud de onda de la guía de onda para la longitud de onda de operación. Posteriormente determinar las dimensiones de las ranuras, longitud y anchura apropiadas para la frecuencia en que van a operar. Por último, calcular el posicionamiento de las ranuras desde la línea central según la admitancia normalizada.

Propuesta de la guía de onda

Para la realización del diseño de una SWA, primeramente, se debe elegir la guía de onda. Pero, para este caso en particular, no se dispone de diversidades de guía de onda o posibilidad de fabricación. El trabajo está limitado a realizarse una guía de onda rectangular que haya disponible. Posee dimensiones de $a = 91$ mm y $b = 42$ mm, para un rango de frecuencia comprendido entre 2.40 – 2.48 GHz, a una frecuencia de operación central de 2,44 GHz. Para la elección de la guía de onda se debe asegurar que la misma opere dentro de la banda de frecuencia deseada. Las consideraciones que se debe tomar para elegir las dimensiones de una guía son: El modo de operación. La longitud de onda de corte del modo de operación y del siguiente modo superior.

En una guía de onda pueden propagarse los modos transversales eléctricos del tipo TE_{mn} . Una guía rectangular con $a > b$ es usualmente utilizada para que se propague solo el modo fundamental TE_{10} . En la práctica, generalmente las guías rectangulares tienen una relación de dimensiones aproximadamente del tipo $a = 2 * b$ [4]. En el caso de la guía rectangular utilizada, la relación de dimensiones es del tipo $a = 2.16 * b$.

La longitud de onda de corte del modo de operación y del siguiente modo superior será calculada en función de las dimensiones de la guía de onda siendo TE_{10} el modo de operación y TE_{20} el modo superior, las longitudes y frecuencias de corte para los modos dominante y superior respectivamente, se calculan con la siguiente ecuación:

$$\lambda_c = \frac{2}{\sqrt{\left(\frac{m}{a}\right)^2 + \left(\frac{n}{b}\right)^2}} \quad (1)$$

La frecuencia de corte de la guía es $f_0 = c/\lambda_c = 1,64$ GHz. El límite inferior corresponde a una frecuencia mínima superior a un 30% de la frecuencia de corte, para evitar que se produzca atenuación: $f_{inf} = 2.14$ GHz. El límite superior está dado por la frecuencia máxima, que debe ser inferior a un 5% de la correspondiente frecuencia de corte del modo superior siguiente, para permitir la transmisión de un solo modo: $f_{sup} = 3.13$ GHz (3).

Posicionamiento longitudinal de las ranuras

Para que la antena funcione como un arreglo lineal es necesario que las mismas estén posicionadas de tal manera que todos los elementos radien a la vez y en fase mostrado en la Fig. 2. Por lo tanto se debe cumplir que el centro del conector de alimentador se coloque a una distancia de $\frac{1}{4}\lambda_g$ del lado en cortocircuito (pared izquierda) de la guía. El centro de la primera ranura (ranura 1), se debe posicionar a una distancia de λ_g desde el centro del conector de alimentación. El centro de la última ranura (ranura 8), se debe posicionar a una distancia de $\frac{1}{4}\lambda_g$ del lado en cortocircuito (pared derecha) de la guía de onda [4]. Y por último, la distancia entre los centros de dos ranuras consecutivas es de $\frac{1}{2}\lambda_g$ [5].

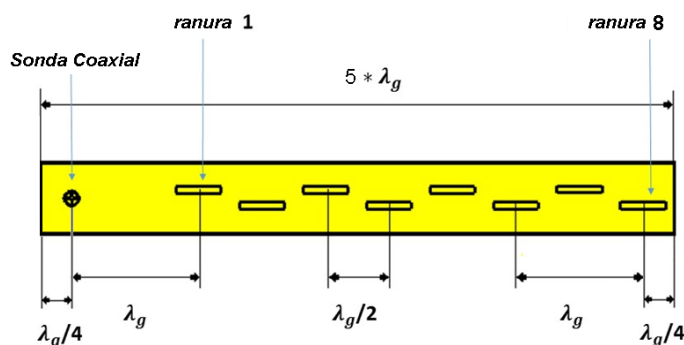


Figura 2: Posiciones de las ranuras en la guía de onda.

Conociendo el valor de λ_g se puede posicionar las ranuras en la guía de ondas, de tal modo que los elementos radien en fase, permitiendo un mejor desempeño de la antena que al utilizar un arreglo lineal. La λ_g es una función de la longitud de onda de operación en el espacio libre ($\lambda_0 = c/f_0$) y la longitud de onda de corte (λ_c), se puede calcular con la siguiente ecuación:

$$\lambda_g = \frac{\lambda_0}{\sqrt{1-(\lambda_0/\lambda_c)^2}} \quad (2)$$

Donde λ_g : Es la longitud de onda dentro de la guía de onda, f_0 : Es la frecuencia de operación,

Luego se calcula la longitud de onda de operación y la longitud de onda dentro de la guía y se obtienen los siguientes resultados: $\lambda_0 = 122.95$ mm y $\lambda_g = 166.76$ mm.

Dimensionamiento de las ranuras

Una vez conocidas las posiciones del centro de las ranuras, se determinan sus dimensiones en función de las longitudes de onda de la guía (λ_g), operación (λ_0), en función de la frecuencia de operación (f_0), como se muestra en la Fig. 3.

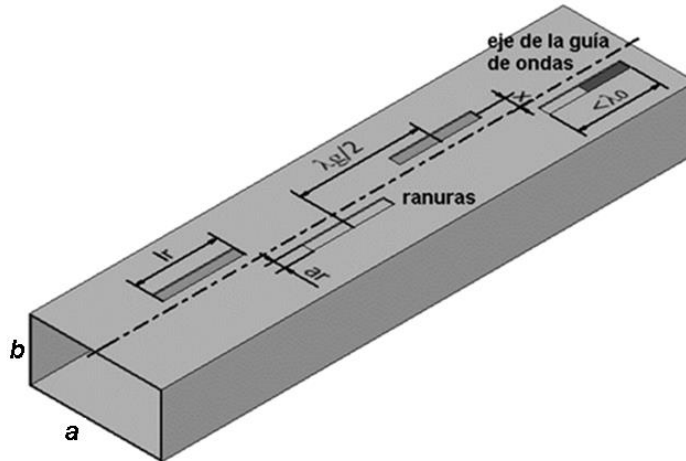


Figura 3: Dimensionamiento de las ranuras y separación desde su centro al centro de la guía de onda.

Longitud de la ranura: Normalmente la longitud de las ranuras rectangulares se calcula para $l_r < \lambda_0/2$, aproximadamente $0,98 * (\lambda_0/2)$, donde se debe cumplir que la longitud de la ranura sea menor que la mitad de la longitud de operación [5]. En este caso, para el cálculo más exacto de la longitud de la ranura se utiliza la estimación experimental en [6], donde el resultado es:

$$l_r = 0,464 * \lambda_0 \approx 57 \text{ mm} \quad (3)$$

Ancho de la ranura: Para el cálculo del ancho de la ranura, según [6], el ancho de la ranura debe tomarse como $a_r = (\lambda_g/20)$, que afirma que en una guía de onda rectangular la relación $a_r \ll \lambda_0$. Los resultados respectivamente son:

$$a_r = \lambda_g/20 = 8,3 \text{ mm} \quad (4)$$

Desplazamiento latitudinal de las ranuras: Para que las ranuras puedan radiar es necesario desplazarlas latitudinalmente debido a la debilidad de la densidad de flujo de corriente en el centro de la guía de onda. Garantizando que estas estén en una posición donde exista una densidad de flujo de corriente y cuanto mayor sea la densidad, mayor será la radiación en la ranura.

La determinación del desplazamiento latitudinal de las ranuras, desde su centro con respecto a la línea central de la guía depende del valor de las conductancias de las mismas ranuras. Según [7] para predecir los valores de las conductancias de las ranuras resonantes, se debe normalizar las mismas por la impedancia de la guía de onda, basándose en la teoría de línea de transmisión (Fig. 4).

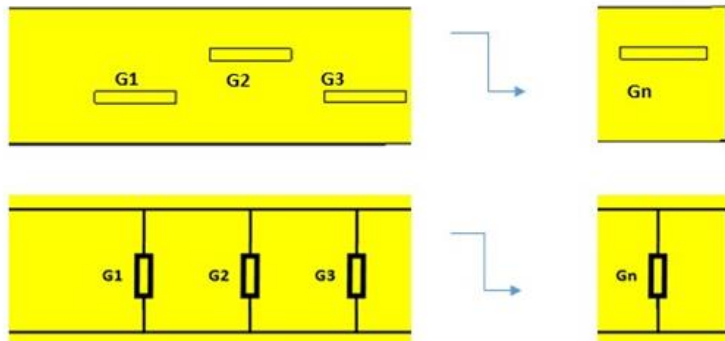


Figura 4: Aproximación entre las ranuras de la guía de onda y sus conductancias equivalentes.

En el cálculo de la conductancia de la guía de onda, la conductancia y la longitud de las ranuras pueden ser realizadas con las siguientes ecuaciones:

$$G_{slot} = \frac{1}{N} \quad (5)$$

$$G_{slot} = G_{wg} * \text{sen}^2\left(\frac{x*\pi}{a}\right) \quad (6)$$

$$G_{wg} = \left(\frac{2,09*a*\lambda_g}{b*\lambda_o}\right) * \left(\cos\left(\frac{0,464*\pi*\lambda_o}{\lambda_g}\right) - \cos(0,464 * \pi)\right)^2 \quad (7)$$

$$x = \left(\frac{a}{\pi}\right) * \text{arc sen}\left(\sqrt{\frac{G_{slot}}{G_{wg}}}\right) \quad (8)$$

Dónde G_{slot} : Es la conductancia de la ranura normalizada, G_{wg} : Es la conductancia de la guía de onda, x : Es el desplazamiento de las ranuras con respecto al centro de la guía de onda, N : Es el número de ranura, que en este caso es 8. Utilizando los datos calculados anteriores el desplazamiento $x = 11.7$ mm.

Ganancia y ancho del haz

Según [8], la ganancia y el ancho del haz de una antena son los primeros parámetros a ser calculados. Estos parámetros dependen de las dimensiones de la guía, y por consiguiente son los últimos a ser calculados con las siguientes expresiones:

$$G = 10 * \log\left(\frac{N*\lambda_g}{2*\lambda_o}\right) = 7,3 \text{ dBi} \quad (10)$$

$$\text{Ancho del Haz} = 50,7 * \frac{4*\lambda_o}{N*\lambda_g} = 18,3^\circ \quad (11)$$

4. ANÁLISIS DE LOS PARÁMETROS FUNDAMENTALES DE LA ANTENA SWA A TRAVÉS DE LA SIMULACIÓN ELECTROMAGNÉTICA

Posteriormente se realiza el proceso de modelado y simulación de la antena con los parámetros iniciales calculados anteriormente. Las simulaciones para las comprobaciones de los cálculos teóricos del diseño de la antena SWA, fueron realizadas en base a un puerto de guía de onda, conectado en la sección transversal de un extremo de la guía de onda y ubicado con una separación de $\lambda_g/2$ de la primera ranura. Es decir, primeramente, la antena estará conectada solamente como continuidad de una guía de ondas con similares dimensiones (Fig. 5) para facilitar el diseño. La simulación de antena fue realizado a través del software *CST MICROWAVE STUDIO 2018* (CST-MS). Teniendo en cuenta su poder de cálculo, se utilizó para antenas de este tipo, porque constituye un software muy recomendado para antenas de guía de onda con similares características.

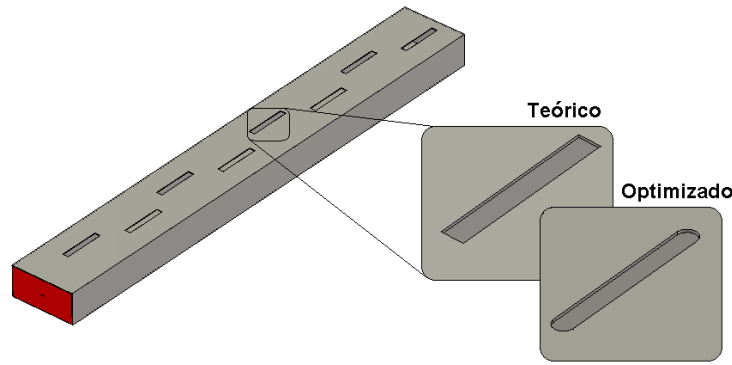


Figura 5: Diseño clásico y optimizado de la SWA representada con el puerto de guía de onda.

En la variante de diseño optimizado de SWA, se mantienen el mismo tramo de guía de onda con las mismas separaciones longitudinales entre ranuras, solo se ajustaron los valores de los parámetros constructivos de las ranuras para mejorar su desempeño en la banda de 2.4 GHz. También las ranuras se presentan originalmente de forma rectangular, sin embargo, en la variante optimizada poseen extremos redondeados. Esto es debido a que la máquina herramienta disponible para realización de los orificios posee cabezales de frezado con diámetro de 8 mm y que deben coincidir con el ancho de las ranuras ($a_r = 8,3 \text{ mm} \approx 8,0 \text{ mm}$). En la siguiente Tabla 1 se exponen los parámetros constructivos más importantes para la fabricación de la sección principal de la antena SWA.

Tabla 1: Parámetros fundamentales en el diseño de la antena SWA.

Parámetros	Calculado	Optimizado
N	8	8
l _r	57 mm	59.3 mm
a _r	8.3 mm	8 mm
x	11.7 mm	11 mm

Para la comprobación de la metodología de cálculo propuesta se realizaron diversas simulaciones con las variantes de antena SWA para el análisis del comportamiento en el desempeño. El objetivo fue mejorar el comportamiento de las pérdidas por retorno [S_{11} (dB)] y la Razón de Ondas Estacionarias (ROE) en el terminal de entrada.

Los comportamientos de las pérdidas por retorno [S_{11} (dB)] en las dos versiones son satisfactorios (Fig. 6). La simulación ofrece como resultado un ancho de banda de 160 MHz (por encima de los 80 MHz de la banda de trabajo). Los valores en los extremos de la banda de trabajo están muy por debajo de -10 dB (menores que -16.5 dB) establecido como valor máximo para el desempeño adecuado. A través de las curvas, además de comprobar la similitud entre las versiones, se puede ver la exactitud del método teórico o clásico en el diseño de antenas SWA donde el punto central de resonancia queda ubicado cerca del centro de la banda. La antena optimizada tiene mejor comportamiento porque posee valores de S_{11} (dB) más bajos.

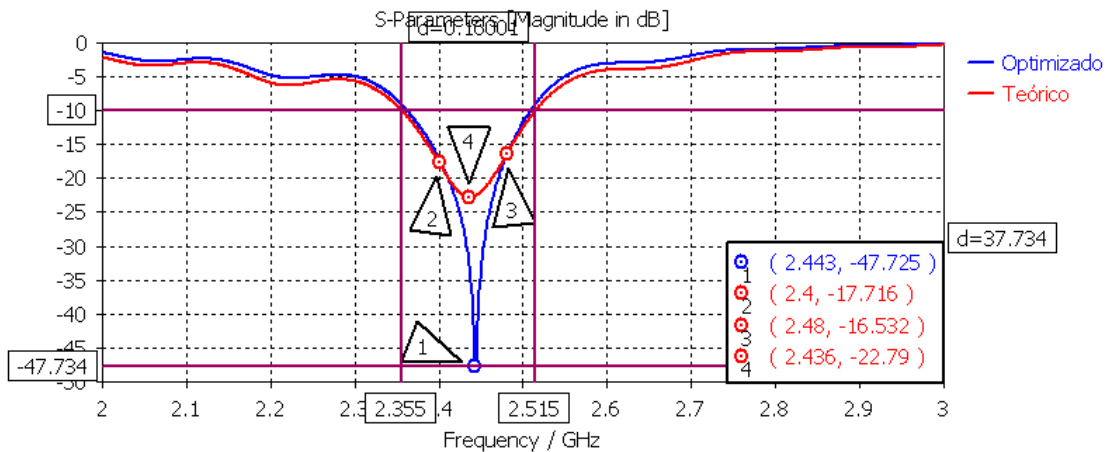


Figura 6: Comportamiento de las pérdidas por retorno de la antena SWA.

Un comportamiento similar lo presenta la ROE con valores muy bajos en la banda de operación (Fig. 7). La ROE ofrece el grado de calidad en la adaptación de impedancia en la entrada de la guía de la antena y el puerto de guía de onda colocado que en este caso posee una impedancia promedio de 510Ω .

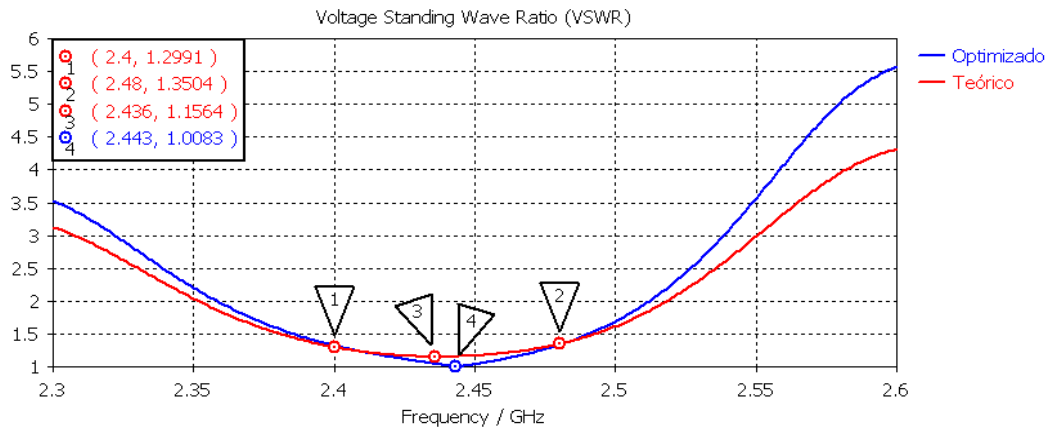


Figura 7: Comportamiento de las pérdidas por retorno de la antena SWA.

Los parámetros relacionados con la radiación (ganancia, ancho del haz, etc.) no ofrecen variaciones significantes en todas las versiones. En experimentos realizados la ganancia fundamentalmente depende de las separaciones longitudinales ($\lambda_g/2$), que su vez depende del ancho de la guía (a) en el modo fundamental TE_{10} y la frecuencia de operación central f_0 . En la Fig. 8 se muestra el patrón de radiación en 3D de la versión optimizada donde se aprecia una ganancia de aproximadamente 15.7 dBi.

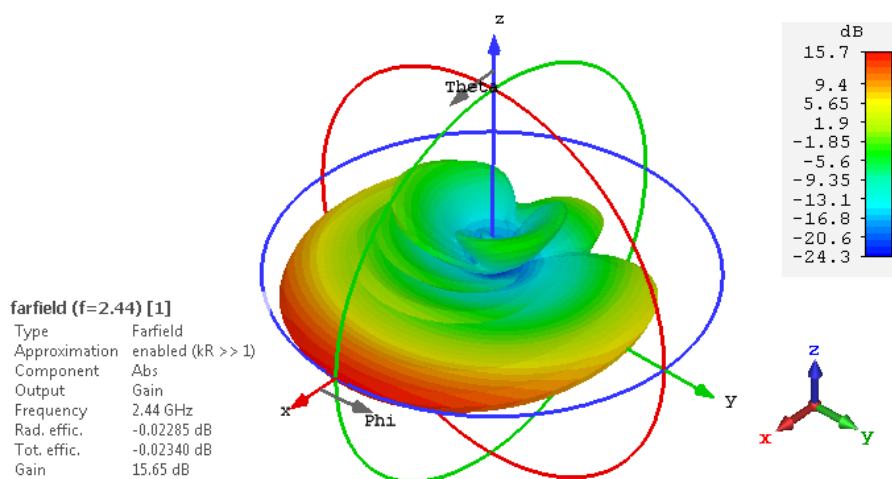


Figura 8: Patrón de radiación en 3D de la antena SWA.

5. DISEÑO FINAL DE LA ANTENA SWA

El diseño final de la antena está compuesto por la sección fundamental radiante que fue analizada anteriormente y la sección de alimentación. La antena simulada hasta ahora ha estado alimentada por un puerto de guía de onda, pero desde el punto de vista práctico, es más viable alimentarla por una sonda coaxial para la excitación del modo TE_{10} (Fig. 9). Es por ello que se requiere una nueva tarea de simulación donde se analicen todas las características radioeléctricas y luego se comparen con los resultados experimentales de las mediciones de la antena con todos los componentes que la conforman y que se utilizará como referencia para la realización de los prototipos.

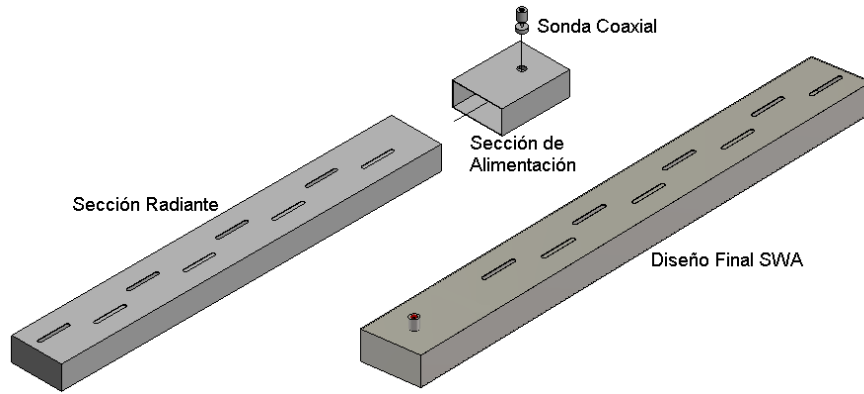


Figura 9: Diseño final y práctico de la antena SWA.

El conjunto formado por la sonda coaxial y el tramo de guía de onda donde se instala se denomina la sección de alimentación. La sonda coaxial está formada por una antena monopolo de $\lambda_0/4$ alimentada por una línea de transmisión de cable coaxial de 50Ω que permite la conexión del dispositivo inalámbrico a la antena. La sección de alimentación no es más que un adaptador de impedancia de 50Ω a 510Ω que posibilita la conexión de la sección radiante con la entrada de 510Ω de la guía de onda rectangular.

6. VALIDACIÓN DE LOS RESULTADOS A TRAVÉS DE LAS MEDICIONES EXPERIMENTALES

A continuación, se presentarán los resultados de las mediciones experimentales comparados con los resultados de las mediciones del diseño final de la antena SWA alimentado con sonda coaxial. También proponen dos prototipos de antena SWA como la que se muestra en la Fig. 10, producida con perfil de aluminio por poseer alta resistencia a la corrosión y facilidad de manipulación.



Figura 10: Modelo prototipo de la antena SWA con sonda coaxial.

Pérdidas de retorno S_{11} (dB)

Las mediciones de pérdidas por retorno y ROE se llevaron a cabo en el instrumento analizador vectorial de redes *Rohde & Schwarz ZVB 20* siguiendo el esquema mostrado en la Fig. 11. Luego de calibrar el equipo se configuró para que mostrara los resultados en el rango de 2 a 3 GHz.

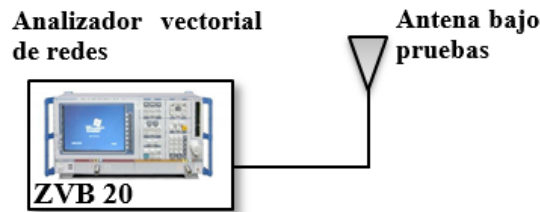


Figura 11: Esquema para mediciones de pérdidas por retorno de la antena SWA.

Las siguientes imágenes muestran los resultados obtenidos en la medición real para un rango de 2 a 3 GHz. Los resultados de las mediciones reales de las pérdidas por retorno representadas por el parámetro S_{11} (dB) mostrado en la Fig. 12.

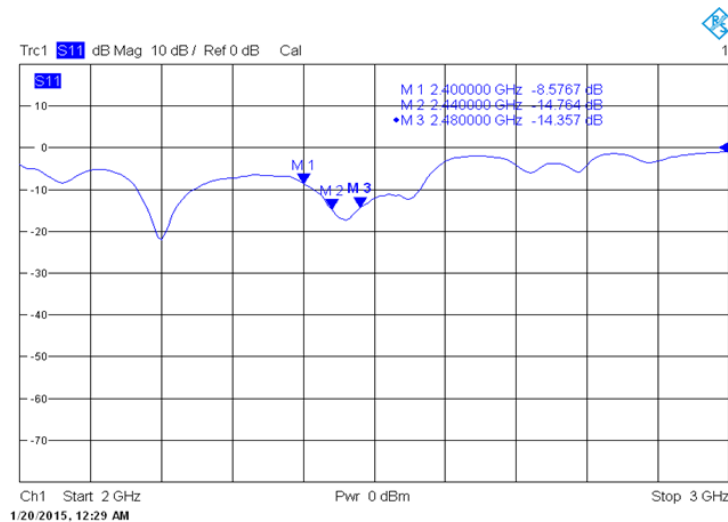


Figura 12: Pérdidas por retorno del prototipo SWA medidas en función de la frecuencia.

El prototipo SWA muestra un buen comportamiento en la banda de trabajo, desde 2.4 GHz hasta 2.48 GHz debido a que posee valores de pérdidas por retorno por debajo de -10 dB, excepto en 2.4 GHz el valor es -8.58 dB que no representa problema en el desempeño de la antena porque está cercano relativamente de -10 dB.

En la gráfica comparativa mostrada en la Fig. 13 la curva de color rojo muestra los valores simulados y la azul los medidos. Los valores obtenidos en la simulación se asemejan a las mediciones reales en el prototipo donde se obtuvieron buenos resultados.

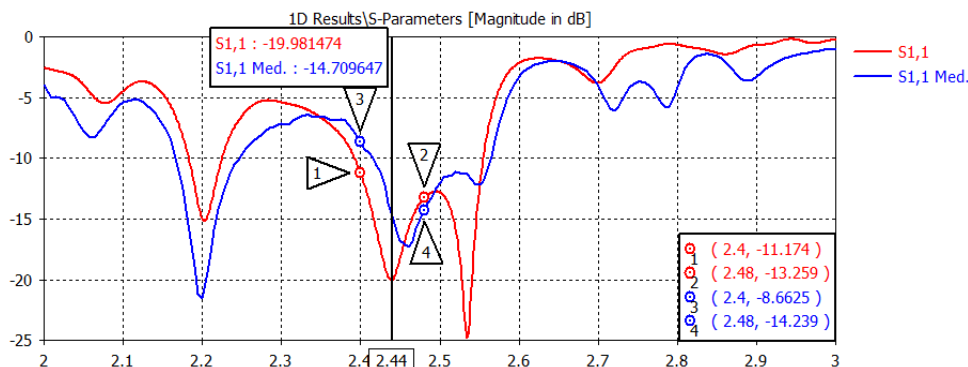


Figura 13: Comparación entre las pérdidas por retorno obtenidas en la simulación y la medición real el prototipo SWA en función de la frecuencia.

Razón de Ondas Estacionarias (ROE o VSWR)

Para el prototipo de SWA se obtuvo la siguiente imagen de las mediciones en la Fig. 14, ofrecida por el instrumento.

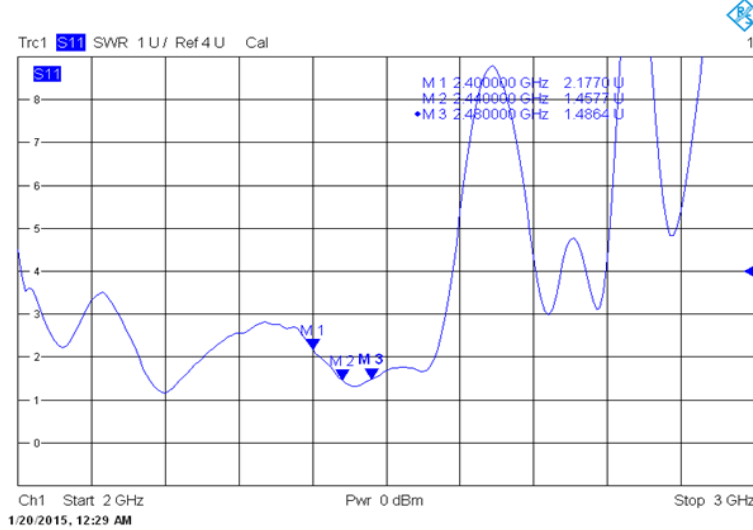


Figura 14: Razón de Onda Estacionaria en función de la frecuencia.

La curva muestra también un buen comportamiento de la ROE en toda la banda según los marcadores señalados. Se puede apreciar que en 2.44 GHz el valor está por encima de 2 según la exigencia para las antenas Wi-Fi. Este valor no es crítico porque solo posee 2.17 muy cercano a 2.

En la Fig. 15, la curva en azul corresponde a los valores obtenidos en las mediciones reales. Los valores obtenidos en la simulación se asemejan a las mediciones reales en el prototipo al igual que las pérdidas por retorno.

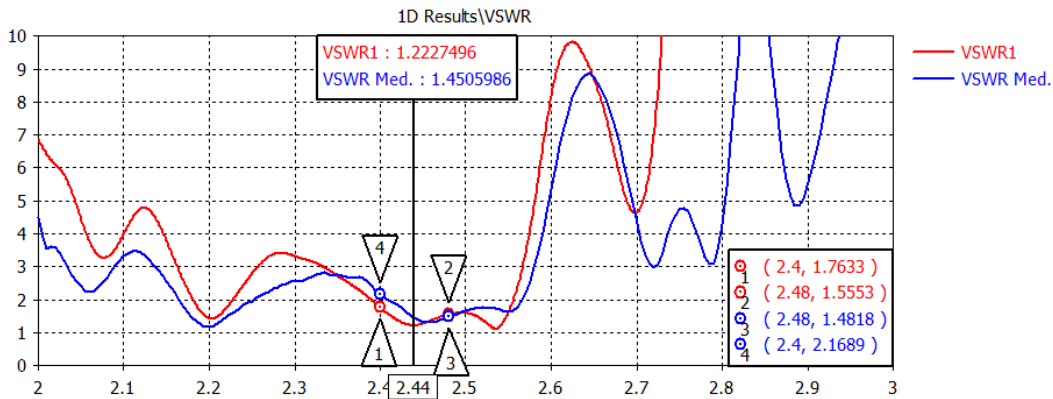


Figura 15: Comparación entre la ROE obtenida en la simulación y la medición real para el prototipo SWA en función de la frecuencia.

Ganancia de potencia

La medición de ganancia se realizó por el método absoluto, utilizando dos antenas idénticas con igual características radioeléctricas y constructivas, separadas 10 m cumpliendo con los requisitos del campo lejano: $D = 2 * L_{max}^2 / \lambda_0$, donde se recomienda que ningún objeto metálico debe estar cercano a la SWA a una distancia de 8.13 m y L es la longitud de la antena de aproximadamente 1 m. Se instaló una como receptora en la entrada de un analizador de espectro *DEVISER* DSA 8853T y la otra como transmisora en la salida del generador de RF *CETC* AV1435B, con 0 dBm de potencia. En la Fig. 16 se muestra el esquema utilizado para la medición de ganancia, coeficiente de radiación trasera (F/B) y patrón de radiación.

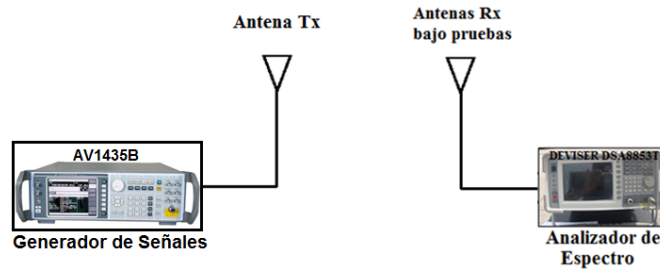


Figura 16: Esquema de dispositivos para la medición de parámetros típicos de radiación de la antena SWA.

Tanto la ganancia, el coeficiente de radiación trasera, y el patrón de radiación se en la antena receptora bajo prueba, soportadas por un mástil de 3 m y una base giratoria con resolución de 10°. La ecuación para calcular la ganancia de las antenas se basa en la Ecuación de Transmisión de Friis utilizada para cálculos de radioenlaces. El coeficiente de radiación trasera (F/B) marca la diferencia de la potencia recibida en direcciones contrarias frente a la antena transmisora. En la Tabla 2 se muestran los valores medidos de ganancia y de F/B. En las mediciones se pudo determinar que los valores de ganancia son inferiores pero cercanos a los valores simulados.

Tabla 2: Valores de ganancia simulada y medida de la antena para la banda Wi-Fi de 2,4 GHz a 2,48 GHz.

Frec. (GHz)	Gan. Sim. (dBi)			Gan. Med. (dBi)			F/B. Sim. (dB)			F/B. Med. (dB)		
	2.4	2.44	2,48	2.4	2.44	2.48	2.4	2.44	2.48	2.4	2.44	2.48
Antena SWA	15.4	15.6	15.6	14.7	15.1	14.9	14.4	14.3	14.7	15.1	15.3	14.8

Patrón de radiación

Para la medición del patrón de radiación se tomó solo en consideración el correspondiente a la frecuencia de 2.44 GHz seleccionada como frecuencia central. Se realizó esta operación con una de los dos prototipos realizados. Se midió en el Plano H y en el Plano E. Los prototipos bajo pruebas se colocaron sobre un mástil giratorio de 3 m de altura con base graduada con resolución de 10° y a 10 m de distancia entre la antena transmisora y la antena receptora. Se fue girando gradualmente el mástil y extrayendo los valores de potencia recibida para cada ángulo hasta completar los 360°. Estos valores fueron normalizados y colocados una misma grafica de ejes de coordenadas polares junto a los patrones de radiación ofrecida por la simulación representados en la Fig. 17.

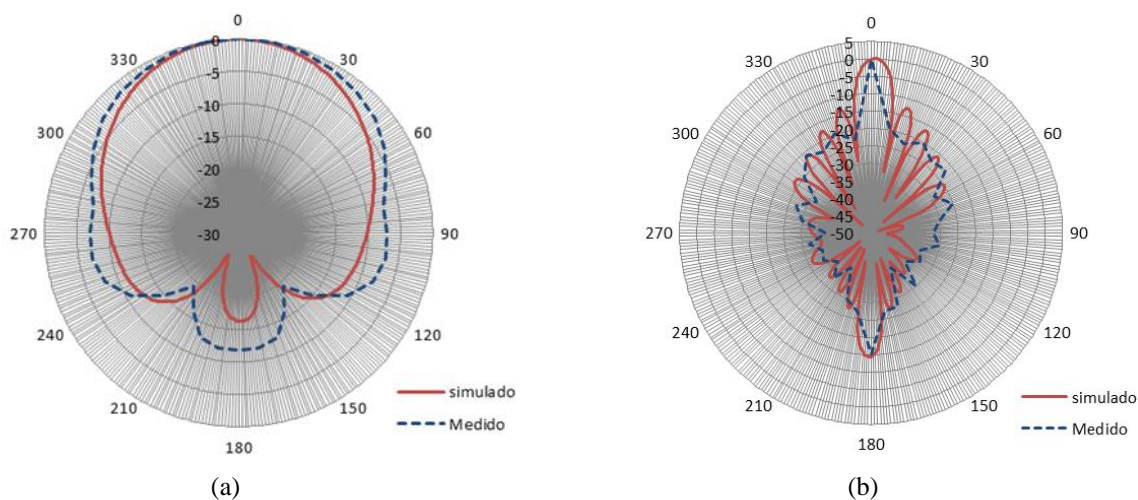


Figura 17: Comparación gráfica entre los patrones de radiación simulado y medido en la antena prototipo SWA en 2.44 GHz: (a) Plano H y (b) Plano E.

7. CONCLUSIONES

Los resultados de las simulaciones demuestran la exactitud del método teórico expuesto para el cálculo de la antena SWA. Sin embargo, aunque los valores de la ganancia de potencia y del ancho del haz teóricos difieren de los valores ofrecidos por las simulaciones y las mediciones, los resultados fueron mejores. También se requiere un método para el diseño teórico de la sonda coaxial debido a la influencia del mismo en los parámetros pérdidas por retorno y la ROE en el puerto de entrada de 50Ω , donde existen variaciones significativas. A pesar de las variaciones, las simulaciones poseen similitud con las mediciones experimentales donde se midieron satisfactoriamente los parámetros radioeléctricos de la antena prototipo SWA. La antena prototipo tuvo un buen comportamiento en la banda de 2.4 GHz para la que fue diseñada. La escasa resolución de la escala del mástil y la inestabilidad debido a su baja rigidez mecánica no permitieron la medición más detallada del patrón en el plano E debido a que la antena posee muchos lóbulos muy estrechos con valores nulos entre ellos.

RECONOCIMIENTOS

Los autores desean agradecer a los profesores del Laboratorio de Comunicaciones Inalámbricas del Instituto Superior Politécnico "José A. Echeverría" (CUJAE) y a la Empresa de antenas de Villa Clara por el apoyo profesional brindado.

REFERENCIAS

- [1] P. Jing, B. Li, B. Wu, N. Zhang, Y. Xu, X. L., «A Millimeterwave SIW Slot Antenna Array For 5G Communication», *2018 International Conference on Microwave and Millimeter Wave Technology (ICMMT)*, may. 2018, pp. 1-3, doi: 10.1109/ICMMT.2018.8563287
- [2] V. Katyayani, S. Vahini, D. R. Krishna, V. M. Pandharipande, «Design of Substrate Integrated Waveguide Slot Array Antenna at X-Band», *2018 IEEE Indian Conference on Antennas and Propagation (InCAP)*, dec. 2018, pp. 1-5, doi: 10.1109/INCAP.2018.8770813
- [3] M. A. Acevedo-Mosqueda, R. Castañeda-Castillo, P. Oleksiy, «Diseño de antenas de ranura resonante para su aplicación en redes WiFi», *Científica*, vol. 13, n.º 11, pp. 45-52, ene. 2009.
- [4] S. Murugaveni, T. Karthick, «Design of Slotted Waveguide Antenna for Radar Applications at X-Band» *International Journal of Engineering Research & Technology (IJERT)*, vol. 3, pp. 426-428, nov. 2014, ISSN: 2278-0181
- [5] H. M. E. Misilmani, M. Al-Husseini, K. Y. Kabalan, «Design of Slotted Waveguide Antennas with Low Sidelobes for High Power Microwave Applications», *Progress In Electromagnetics Research C*, vol. 56, n.º 1, pp. 15-28, ene. 2015, doi: 10.2528/PIERC14121903.
- [6] R. S. Elliott, L. A. Kurtz, «The Design of Small Slot Arrays», *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, Vol. AP-26, n.º 2, mar. 1978: [214-9 pp.]. doi: 10.1109/TAP.1978.1141814.
- [7] S. I. Alhuwaimel, K. F. Tong, «Stacked S-Band Slotted Waveguide Array Antenna With Very Low Sidelobes» *2017 International Workshop on Electromagnetics: Applications and Student Innovation Competition*, jun. 2017, pp. 1-3, doi: 10.1109/iWEM.2017.7968834
- [8] S. Rozenberg, A. Yahalom. «A THz Slot Antenna Optimization Using Analytical Techniques», *Radioengineering*, vol. 25, n.º 1, sep. 2016, doi: 10.13164/re.2016.0001.

SOBRE LOS AUTORES

Nayrebis Bethart Rodríguez. Ingeniera Radioelectrónico en la Esp. de Telecomunicaciones. Graduada en el año 2013 en el Instituto Técnico Militar José Martí (ITM). Se desempeña como Técnico en Telemática en ETECSA Villa Clara

Tuan E. Cordoví Rodríguez. Master en Telemática. Graduado de Ingeniero en Telecomunicaciones y Electrónica en el año 2010 en la Universidad Central "Marta Abreu" de Las Villas (UCLV). Se desempeña como Especialista Principal del Dpto. I+D+i de la Empresa de Antenas de Villa Clara.

Roberto Jiménez Hernández. Profesor Titular, Consultante y de Mérito, Doctor en Ciencias Técnicas. Graduado en la Facultad de Ingeniería Eléctrica en noviembre de 1964 en la Universidad Central "Marta Abreu" de Las Villas en la Especialidad de Telecomunicaciones. Graduado de Doctor en Ciencias Técnicas en la especialidad de Radiocomunicaciones (Ph. D.) en el Instituto Nacional de Investigaciones de Radio de Moscú en junio de 1979.

David Beltrán Casanova. Graduado en la Facultad de Ingeniería Eléctrica en la UCLV en el año 1991, Máster en Telecomunicaciones en el año 1996. Jefe de la Disciplina Sistemas de Radiocomunicaciones en Departamento de Electrónica y Telecomunicaciones de la UCLV.