



II Convención Científica Internacional 2019
Universidad Central "Marta Abreu" de Las Villas
CIENCIA, TECNOLOGÍA Y SOCIEDAD. PERSPECTIVAS Y RETOS

TELECOMUNICACIONES Y ELECTRÓNICA

Evaluación del desempeño de antenas en la banda de 2.4 GHz.

Antenna performance evaluation in the 2.4 GHz band.

**MSc. David Beltrán Casanova¹, MSc. Tuan Ernesto Cordoví Rodríguez², MSc.
Hiram Del Castillo Sabido³**

- 1-. Universidad Central "Marta Abreu" de Las Villas, Cuba. dbeltranc@uclv.edu.cu
- 2-. Empresa de Antenas Villa Clara, Cuba. tuan@antenasvc.co.cu
- 3-. Universidad Central "Marta Abreu" de Las Villas, Cuba. hiramd@uclv.edu.cu



II Convención Científica Internacional 2019
Universidad Central "Marta Abreu" de Las Villas
CIENCIA, TECNOLOGÍA Y SOCIEDAD. PERSPECTIVAS Y RETOS

Resumen: El presente trabajo está encaminado al diseño y evaluación de un compendio de prototipos antenas para aplicaciones en la banda de 2.4 GHz en Cuba, presentando como resultado relevante una comparación entre las mismas en cuanto a sus parámetros fundamentales a fin de servir de guía en el momento de implementar aplicaciones donde puedan incluirse diseños de estos tipos de antenas. La fabricación de antenas para aplicaciones *Wi-Fi* (*Uda-Yagi*, *Biquad* y *Franklin*) constituye se desarrolló como algo novedoso en la Facultad de Ingeniería Eléctrica de la Universidad Central "Marta Abreu" de Las Villas, ya que las mismas no habían sido tratadas ni fabricadas. Para dar cumplimiento al propósito de este trabajo se analizaron varios documentos con los que se pudieron estudiar las características de las antenas para un posterior diseño con la ayuda del software profesional *CST MICROWAVE STUDIO 2015*. Luego de haber sido simuladas las antenas y obtenidos los parámetros deseados para esta banda, fueron construidos tres prototipos y realizadas las mediciones pertinentes. Los resultados obtenidos en las mediciones para las pérdidas por retorno, razón de onda estacionaria (*ROE*) mostraron características propias de sistemas profesionales.

Abstract: The present work is aimed at the design and evaluation of a compendium of prototype antennas for applications in the 2.4 GHz band in Cuba, presenting as a relevant result a comparison between them in terms of their fundamental parameters in order to serve as a guide at the moment to implement applications where designs of these types of antennas can be included. The manufacture of antennas for Wi-Fi applications (Uda-Yagi, Biquad and Franklin) was developed as something new in the Faculty of Electrical Engineering of the Central University "Marta Abreu" of Las Villas, since they had not been treated nor manufactured. To fulfill the purpose of this work, several documents were analyzed with which the characteristics of the antennas could be studied for a later design with the help of the professional software CST MICROWAVE STUDIO 2015. After having simulated the antennas and obtained the desired parameters For this band, three prototypes were built and the relevant measurements were made. The results obtained in the measurements for the losses by return, standing wave ratio (VSWR) showed characteristics of professional systems.

Palabras Clave: Antenas; 2.4 GHz; *WiFi*; *Uda-Yagi*; *Biquad*; *Franklin*.

Keywords: Antennas; 2.4 GHz; *WiFi*; *Uda-Yagi*; *Biquad*; *Franklin*.



1. Introducción

Si se tiene en cuenta que la antena es la estructura que tradicionalmente se encuentra entre el espacio libre y la línea de transmisión [1] y que según la ecuación de transmisión de Friss determina en buena medida el desempeño de los sistemas inalámbricos, el saber escoger entre un prototipo y otro ha de ser un elemento a tener muy en cuenta a la hora de diseñar sistemas radiantes, es por ello que el presente trabajo presenta la compilación de tres prototipos de antenas a las que se les ha evaluado su desempeño en la banda de los 2.4 GHz, presentándose el comportamiento de las pérdidas por retorno, la impedancia en el punto de alimentación y las redes de acople que requieren, sus patrones de radiación y sus ganancias características, resultados no solo obtenidos a través de simulaciones, sino que se han llevado a cabo mediciones a las mismas que validan la correspondencia de los métodos de diseño empleados por la gran correspondencia entre resultados teóricos, simulados y medidos y la calidad en el desempeño de los diseños en aplicaciones prácticas.

Uno de los principales objetivos es introducir los principios fundamentales de la teoría de las antenas y aplicar estos al análisis, diseño y medición de las mismas. Ya que existen varios métodos de análisis y diseño y una gran variedad de estructura de antenas saber discernir entre una estructura y otra requiere de criterios sólidos en cuanto a los parámetros que ha de tener la antena ya sean de impedancia, patrón de radiación, ganancia entre otros y las posibilidades de fabricación de una estructura u otra no solo por su complejidad mecánica sino también por la disponibilidad de los materiales que se requieren para su fabricación. Téngase en cuenta además, las características y requerimientos de las condiciones de explotación del sistema en el cual se ha de implementar.

Por lo que en este proyecto se hará un estudio de tres prototipos de antenas para redes *Wi-Fi: Uda-Yagi, Biquad y Franklin.*



2. Metodología

2.1. Fundamentos teóricos.

Antena Uda-Yagi

La antena *Uda-Yagi* es una antena direccional creada por el Dr. Hidetsugu Yagi de la Universidad Imperial de Tohoku y su ayudante, el Dr. Shintaro Uda (de ahí el nombre *Uda-Yagi*). Esta invención de quitar la tierra a las ya convencionales antenas (*groundbreaking*), logró construir una antena de muy alto rendimiento. Este tipo de antena es muy utilizada por ser de bajo costo, fácil de construir y presentar características de radiación razonables en la mayoría de los casos prácticos. Posee como desventajas que la impedancia de entrada compleja y el ancho de banda se ven afectados debido al acoplamiento electromagnético entre los elementos.

Básicamente existen dos métodos de diseño de este tipo de antena que ofrecen resultados favorables. El primero es el método de la FEMI [2]. Este tiene la ventaja de que permite interiorizar la operación de la antena *Uda-Yagi*. El segundo es un método tabular conocido como método de la NBS [3], que ofrece la posibilidad de llegar a soluciones de ingeniería de una forma rápida y confiable, provee un procedimiento para determinar los parámetros geométricos de la antena *Uda-Yagi* para una ganancia directiva determinada (sobre un dipolo de media longitud de onda). El documento original sobre el cual se basa este procedimiento es Peter P. Vieszbicke, "*Yagi Antenna Design*", *NBS Technical Note 688, December 1976*.

Antena Franklin

En las comunicaciones *Wi-Fi*, a menudo se necesitan antenas con diagrama de radiación semicircular en el plano horizontal. Las antenas con patrón de radiación circulares pueden tener altos valores de ganancia, ya que es posible reducir su patrón de radiación vertical, pueden utilizarse para ello antenas con dipolos alineados verticalmente. Cuando se necesita un diagrama circular, y se utiliza polarización vertical, la alineación de dipolos de media onda se puede llevar a cabo de acuerdo con el principio de la antena *Franklin* [4]. No obstante, con el aumento de la frecuencia, surgen problemas con la separación de líneas entre dipolos, a causa que se amplía físicamente en relación con la longitud de onda, que por lo tanto conduce a un mayor impacto de la radiación de esta parte de la antena en el diagrama general de la antena. En 2.4 GHz, este problema se hace también significativo por el espesor relativamente grande de los conductores de



la antena en relación con la longitud de onda, y por lo tanto las dimensiones físicas de las dos líneas. Estas dimensiones no sólo determinan la impedancia característica, sino también la radiación parásita de estas partes, especialmente de corto circuito en el extremo de las dos líneas. El corto circuito en el extremo de la línea tiene que ser físicamente muy corto, de modo que la gran corriente que fluye a través de él, dé un nivel pequeño de radiación parásita tanto como sea posible. Su acortamiento disminuye la distancia entre los dos conductores, y por lo tanto disminuye la impedancia. Esta radiación parásita puede modificar en gran medida el diagrama de radiación total de la antena [4].

La antena *Franklin* basada en arreglos de dipolos colineales, cada uno de media longitud de onda, separados por líneas abiertas de $\lambda/4$ con un plano reflector rectangular separado de estos a $\lambda/4$, manteniendo las mismas distribuciones de corrientes que el dipolo sin plegar debido al desfase de 180 grados producido por las secciones de líneas abiertas [5]. De este modo solo los segmentos de $\lambda/2$ con corrientes en fase contribuyen a la radiación de la antena [6].

La alimentación de este tipo de antena presenta excelentes características en cuanto a rigidez mecánica en el punto de alimentación y acoplamiento a la impedancia de 200 ohm resultante en su centro lo cual permite situarle un transformador de impedancia con relación de transformación de 4:1, con vistas a lograr un excelente acople entre los brazos de la antena y la línea de transmisión. Con el fin de lograr una mayor ganancia de la antena, un mayor número de dipolos necesita ser alineado a lo largo de la vertical, el aumento del número de dipolos aumenta la impedancia en el punto de alimentación muy rápidamente y la corriente se va atenuando, por lo que se convierte en poco práctico.

Antena Cúbica o *Quads*.

Variante de antena *loop* cuadra, desarrollada por Clarence Moore en 1942. Cuando el perímetro del *quad* se aproxima a la longitud de onda, la máxima radiación (directividad) se produce en las direcciones perpendiculares al plano *quad* en ambos lados [1]. Por lo tanto, el perímetro del *quad* se elige por lo general para que sea aproximadamente igual a la longitud de onda de operación presentando un comportamiento de antena lazo grande donde el perímetro es del orden de una lambda. La polarización de una antena de cuadro depende del punto de alimentación; si se le



alimenta en una rama horizontal, la polarización será horizontal y si se le alimenta en una rama vertical, será vertical. Aunque el cuadro esté en forma de rombo ocurre lo mismo. En cuanto a ganancia, se puede comparar una cúbica de dos elementos con una Yagi de tres elementos.

Antena Biquad

La antena *bi*-cuadro más conocida como *Biquad*. Tiene la característica fundamental que posee un buen ancho de banda para diversas aplicaciones y en *Wi-Fi* puede cubrir todos los canales manteniendo sus características radioeléctricas [7]. Una *Biquad* no es nada más que dos antenas de bucle único (*Quad*) que a su vez forman una matriz en donde cada una de ellas es un componente excitado.

Su comportamiento similar a una antena de dipolo plegado. Se genera el mismo diagrama de radiación que un dipolo con más directividad y ancho de banda. Se pueden considerar como una forma modificada de una antena de dipolo plegado. Más específicamente sus elementos pertenecen a la categoría de pequeñas antenas de bucle de una sola vuelta [8]. Los dipolos *loop* (en este caso cuadrado) poseen una longitud eléctrica equivalente a una longitud de onda y como característica fundamental. La impedancia promedio de un dipolo de cuadro aproximadamente esta entre 100-150 ohm y posee una ganancia superior al dipolo de $\lambda/2$ [9]. En general la antena *Biquad* es fácil de construir y ofrece buena directividad y ganancia para las comunicaciones punto a punto. Consiste en dos cuadrados iguales de una longitud de onda como elemento de radiación y un plato metálico o malla como reflector. Esta antena tiene un ancho del haz de aproximadamente 70 grados y una ganancia en el orden de 10-12 dBi. Puede ser utilizada como una antena única o como un alimentador para un plato parabólico. Para encontrar la polarización, se debe observar el frente de la antena, con los cuadrados colocados lado a lado; en esa posición la polarización es vertical [6].

3. Resultados y discusión

Diseño teórico, simulación y análisis de resultados obtenidos a través de software.

Antena Uda-Yagi.

Sé ha puesto en práctica el método del National Bureau of Standards de Estados Unidos para la confección de una antena *Uda-Yagi* de 5 elementos y se ha empleado primeramente el software de simulación MMANA-GAL_BASIC que permite realizar



optimizaciones y la obtención de parámetros de forma rápida y precisa. A partir de los resultados alcanzados con el simulador MMANA-GAL_Basic se procedió al empleo del simulador profesional *CST MICROWAVE STUDIO 2015* obteniéndose resultados que serán analizados a continuación.

La ganancia de la antena se comportó en la banda de interés entre los 12.75 y los 13.25 dBi. Razón *front-to-back* con un valor de 21.63 dB para la frecuencia que mejor desempeño la antena, este parámetro desciende con el aumento de la frecuencia. La impedancia de entrada en el punto de alimentación, toma los siguientes valores: resistencia de entrada (R_{in}) = 54.805 *ohm* y la reactancia de entrada (X_{in}) = 0.686 *ohm*, lo que confirma que el dipolo doblado que se diseñó sirve como solución al problema de adaptar la antena a la línea de transmisión. La razón de onda estacionaria (*VSWR*) con valores que comienzan en 1.615 para la frecuencia inicial de la banda disminuyendo hasta alcanzar la frecuencia de trabajo para un valor de 1.097 y luego aumentando hasta llegar a 2.48 GHz con un valor 1.698 lo que hace evidente el correcto desempeño presente en toda la banda lo cual conlleva a un buen ancho de banda. Las pérdidas por retorno (S_{11}) las cuales en 2.44 GHz, frecuencia donde mejor se comporta este parámetro, toma valores de -26.686 dB.

Antena de arreglo de dipolos colineales

A través de la bibliografía estudiada se encontraron dos métodos de diseño para estos tipos de antenas, los cuáles fueron puestos en práctica al diseñar la antena *Franklin* invertida de 9 dipolos colineales, el uso del software *CST MICROWAVE STUDIO 2015* permitió evaluar los siguientes resultados obtenidos.

En 2.4 GHz una ganancia de 15.52 dBi y un aumento de la ganancia hasta 2.435 GHz a unos 15.99 dBi y a partir de esta frecuencia se puede observar como la ganancia comienza a disminuir ligeramente con el aumento de la frecuencia hasta llegar a 2.48 GHz aproximadamente a 15.35 dBi. La razón *front-to-back* con un valor de 14.887 dB para la frecuencia central de la banda para el resto entre 13.6 y 16.7 dB. La resistencia de entrada (R_{in}) = 204.957 *ohm* y la reactancia de entrada (X_{in}) = -13.0205 *ohm*, lo que hace necesario el uso de un transformador de impedancia 4:1 para lograr una correcta adaptación de impedancia de la antena a la línea de transmisión de 50 *ohm*. Razón de onda estacionaria (*VSWR*) con valores que comienzan en 1.913 para la frecuencia inicial de la banda disminuyendo hasta alcanzar a la frecuencia central un



valor de 1.071 y luego aumentando hasta llegar a 2.48 GHz con una *ROE* de 1.87. Las pérdidas por retorno (S_{11}) de -29.27 dB en los 2.435 GHz.

Antena Biquad

En cuanto a su método de diseño puede decirse que no existe uno realmente eficiente en todos los segmentos del espectro, es por ello que se realizaron pruebas mediante la simulación con herramientas virtuales para llegar a propuestas conforme a los intereses. Obteniéndose para el radiador y el reflector a la frecuencia de operación ($f_0 = 2.440$ GHz). Los siguientes parámetros: Longitud de cada segmento del *quad* (radiador) $ld = 1/4 \lambda$, ld : longitud de los lados del radiador. Distancia entre el *biquad* y el reflector: $h = (1/8)\lambda$. Altura del reflector $A_R = 105$ mm (mínimo). Largo del reflector $L_R = 235.4$ mm. Radio del conductor $R \leq 2.5$ mm. Cerciorarse que los dobleces estén exactamente a la longitud calculada y con un ángulo de 90°. Tener en cuenta que la longitud total de cada *quad* es aproximadamente igual a una longitud de onda y la longitud de una *biquad* sería dos veces la longitud de onda. Para la realización de este tipo de antena se decidió implementar tecnología de microcinta, el diseño teórico de esta antena fue realizado a partir de la teoría para conductores cilíndricos obteniéndose resultados similares a los que se obtienen con conductores cilíndricos. Luego de haber realizado los cálculos pertinentes para las longitudes de cada elemento de la antena se procede al diseño y modelado de la antena *Biquad* en el ambiente de trabajo de *CST MICROWAVE STUDIO 2015*, Obteniéndose los siguientes resultados: La ganancia se mantiene entre 8.29 y los 8.475 dBi; Razón *front-to-back* con un valor de 29.74 dB para 2.442 GHz; Resistencia de entrada (R_{in}) = 50.276 ohm y la reactancia de entrada (X_{in}) = -0.187 ohm aproximadamente, con una razón de onda estacionaria (*VSWR*) con valores que comienzan en 1.135 para la frecuencia inicial de la banda disminuyendo hasta alcanzar la frecuencia de trabajo para un valor de 1.006 y luego aumentando hasta llegar a 2.48 GHz con un valor 1.112; pérdidas por retorno (S_{11}) que en 2.442 GHz, frecuencia donde mejor se comporta este parámetro, tiene valores de -49.549 dB.



Mediciones prácticas de las antenas.

Las mediciones de los parámetros: pérdidas por retorno, razón de onda estacionaria e impedancia en el punto de alimentación fueron llevadas a cabo en el analizador vectorial de redes ZVB 20. Según presenta la Tabla 1.

Tabla 1. Representación de la medición con el analizador vectorial de redes ZVB 20.

Antena <i>Uda-Yagi</i>	Antena <i>Franklin</i>	Antena <i>Biquad</i>
		

Prototipo de antena *Uda-Yagi*.

La antena *Uda-Yagi* está soportada sobre un *boom* de material *PVC* de alta densidad donde sus elementos están conformados de alambre de cobre de 4.16 mm de diámetro. Los resultados de las mediciones de las pérdidas por retorno (S_{11}), la razón de onda estacionaria (*VSWR*), y la impedancia en el punto de alimentación se presentan en la primera fila de la Tabla 2.

Como conclusión de las comparaciones entre resultados simulados y medidos, se pudo comprobar que la antena fabricada arrojó resultados superiores a la simulada en lo referente al parámetro pérdidas por retorno, puesto que se observó una disminución de las pérdidas por retorno aproximadamente de -6 dB para 2.4 GHz y 2.44 GHz, aunque decae 1 dB en 2.48 GHz con respecto a la simulada. La razón de onda estacionaria (*VSWR*) presentó un comportamiento correcto en toda banda. También, se puede apreciar que la antena prácticamente posee el mismo comportamiento de antenas profesionales, al cumplir que la *ROE* sea < 1.5 en toda la banda, aunque en el caso de esta se pierde esta importante propiedad en 2.48 GHz para un valor de $ROE = 1.5792$.



Tabla 2. Resultados de las mediciones realizadas a cada una de las antenas.

	Parámetro medido		
	Pérdidas por retorno (S_{11})	Razón de onda estacionaria ($VSWR$)	Impedancia de entrada (Carta de Smith)
<i>Uda-Yagi</i>			
<i>Franklin</i>			
<i>Biquad</i>			

Prototipo de antena *Franklin*.

El modelo de antena que se fabricó fue la antena *Franklin* invertida de nueve dipolos colineales, en aras de obtener una antena con mayor ganancia a la *Biquad* y la *Uda-Yagi*. Para realizar la adaptación de impedancia de la antena a la línea de transmisión fue necesario el uso de un transformador de impedancias con relación 4:1 como aparece reflejado en la literatura para realizar un acople de 200 ohm a 50 ohm. Los resultados de las mediciones se aprecian en la segunda fila de la Tabla 2. Destacar que el resultado obtenido en la medición de la antena *Franklin* para el parámetro pérdidas por retorno S_{11} , se corresponde al sistema completo simulado (antena *Franklin* y balun de cable coaxial).

Prototipo de antena *Biquad*.

Los resultados obtenidos con el instrumento se reflejan en la tercera fila de la tabla 2. Se evidencia el buen ancho de banda que este tipo de antena presenta, con valores de $VSWR < 1.5$ en toda la banda, característica de sistemas profesionales. Los valores para



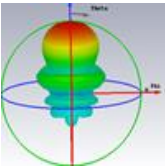
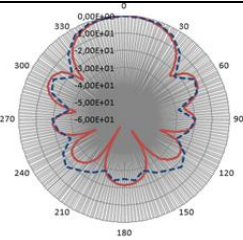
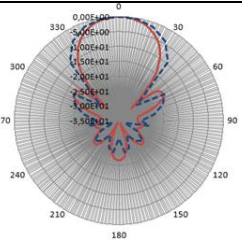
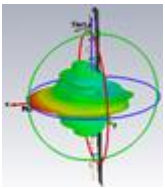
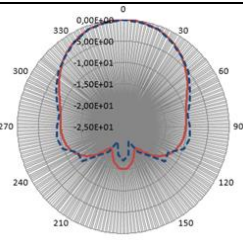
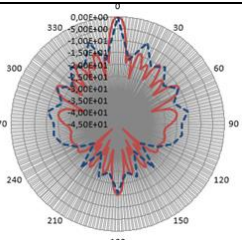
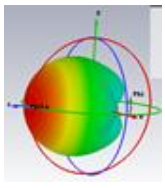
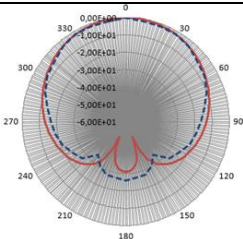
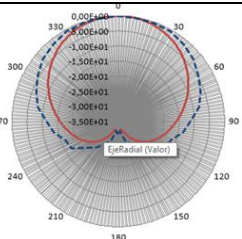
la antena medida son de 1.1684 para 2.4 GHz, 1.0471 para la frecuencia central de la banda (2.44 GHz) y 1.2182 para 2.48 GHz.

Medición de los patrones de radiación, ganancia y razón *front-to-back*.

Las mediciones de los patrones de radiación, ganancia y razón *front-to-back* fueron llevadas a cabo en el analizador de espectro *DEVISER DSA-8853T*, realizadas con una separación de trece metros entre la antena transmisora y la receptora, cumpliendo con la distancia requerida para el campo lejano F_f (*Far-field*), $F_f = \frac{2(D)^2}{\lambda}$ [m] [3]. Tanto la ganancia como la razón *front-to-back* y el patrón de radiación se midieron con una antena transmisora y una receptora bajo prueba soportadas en un mástil de 3 metros, haciendo uso del método de medición de las tres antenas.

La Tabla 3 muestra los patrones de radiación vertical y horizontal obtenidos a partir de simulación y los medidos para las tres antenas luego de haber sido graficados en Excel para la frecuencia central de la banda (2.44 GHz).

Tabla 3. Características de radiación de las tres antenas.

Antena/3D	Patrón de radiación vertical	Patrón de radiación horizontal
<p><i>Uda-Yagi</i></p> 		
<p><i>Franklin</i></p> 		
<p><i>Biquad</i></p> 		
<p>— simulado - - - Medido</p>		



Las variaciones en el patrón de radiación son debido a la influencia de las señales multitrayecto que se suman con la señal directa proveniente de la antena transmisora y que se reflejan desde el suelo. Para las mediciones anteriores se recomienda realizarlas en una Cámara Anecóica con paredes absorbentes que simula las condiciones ideales de espacio libre. En este caso no se tienen estas posibilidades.

Cálculo de la ganancia y la razón front-to-back.

La ganancia de las antenas se puede determinar mediante diferentes alternativas que emplean dos, tres o cuatro antenas [10]. En este caso el método a utilizar es el de las 3 antenas con los siguientes escenarios:

Escenario (Tx. *Uda-Yagi* – Rx. *Biquad*)

$$(P_1)_{dB} - (P_2)_{dB} = 32.45 + 20 \log f(MHz) + 20 \log d(Km) - G_1(dB) - G_2(dB) + L(dB)$$

Escenario (Tx. *Uda-Yagi* – Rx. *Franklin*)

$$(P_1)_{dB} - (P_3)_{dB} = 32.45 + 20 \log f(MHz) + 20 \log d(Km) - G_1(dB) - G_3(dB) + L(dB)$$

Escenario (Tx. *Biquad* – Rx. *Franklin*)

$$(P_2)_{dB} - (P_3)_{dB} = 32.45 + 20 \log f(MHz) + 20 \log d(Km) - G_2(dB) - G_3(dB) + L(dB)$$

L: Pérdidas por cables y conectores, tomada igual a 13 dB

La Tabla 4 muestra los valores de ganancia y razón *front-to-back* simulada y medida obtenida para cada una de las antenas. El cálculo para la ganancia y la razón *front-to-back* reales fueron realizados haciendo uso del software MATLAB, obteniendo los siguientes resultados para la frecuencia central de la banda (2.44 GHz).

Tabla 4. Valores de ganancia y razón *front-to-back* para 2.44 GHz simulada y real de las antenas.

Antena	Ganancia		Razón <i>front-to-back</i>	
	Simulada	Real	Simulada	Real
<i>Uda-Yagi</i>	12.9 dB	13.283 dB	20.97 dB	25 dB
<i>Franklin</i>	15.98 dB	14.9883 dB	15.07 dB	25 dB
<i>Biquad</i>	8.38 dB	10.4883 dB	29.7 dB	29 dB



4. Conclusiones

Con los resultados alcanzados se pudo demostrar que las antenas tratadas presentan características destacables en la recepción de la señal en la banda de 2.4 GHz. Aunque a los diseños teóricos fue necesario realizarle cambios, destacando que no fueron muchos, se pudo comprobar la efectividad de los métodos de diseños teóricos en las simulaciones, obteniéndose resultados satisfactorios. La antena *Biquad* resultó ser la más destacada para los resultados obtenidos en *CST MICROWAVE STUDIO 2015*, así como también en las mediciones para los parámetros: ancho de banda, razón de onda estacionaria y pérdidas por retorno. Los resultados con las antenas reales se manifestaron semejantes en casi todos los aspectos a los simulados, obteniéndose mejor desempeño de los parámetros: pérdidas por retorno y razón de onda estacionaria para la antena *Franklin* y la antena *Uda-Yagi*, así como un incremento en la ganancia para la antena *Biquad* y la antena *Uda-Yagi*. Las antenas diseñadas son de fácil fabricación ya que pueden ser utilizados materiales reciclables. Es de resaltar que el empleo del software *CST MICROWAVE STUDIO 2015* facilitó el análisis de los modelos diseñados, demostrando ser una poderosa herramienta de trabajo para el análisis de antenas en alta frecuencia.

5. Referencias bibliográficas

- [1] C. A. Balanis, *Antenna Theory, Analysis and Design*, 3 ed.: John Wiley & Sons, 2016.
- [2] E. C. B. Jordan, *Electromagnetic Waves and Radiating Systems*, 1968.
- [3] Y. A. Dragoslav Dobričić, "Antenna with Semicircular Radiation Diagram for 2.4 GHz," p. 22, 2007.
- [4] R. S. Elliot, *Antenna theory and design*: John Wiley & Sons, 2006.
- [5] S. Ahmed and W. Menzel, "A novel planar four-quad antenna," in *Antennas and Propagation (EUCAP), 2012 6th European Conference on*, 2012, pp. 1946-1949.
- [6] P. Hamouz, P. Hazdra, M. Polivka, M. Capek, and M. Mazanek, "Radiation efficiency and Q factor study of *Franklin* antenna using the theory of characteristic modes," in *Proceedings of the 5th European Conference on Antennas and Propagation (EUCAP), Rome, Italy, 2011*, pp. 1974-1977.
- [7] T. Marshall, "BiQuad 802.11 b Antenna," ed, 2001.



II Convención Científica Internacional 2019
Universidad Central "Marta Abreu" de Las Villas
CIENCIA, TECNOLOGÍA Y SOCIEDAD. PERSPECTIVAS Y RETOS

- [8] M. Geiger and W. Menzel, "Bi-Quad and Four-Quad WLAN Antennas with Magnetic Reflector," in Microwave Conference (GeMIC), 2014 German, 2014, pp. 1-4.
- [9] O. Yurtsev, Y. Bobkov, and S. Baty, "Several novel wire antenna designs with the quasi-isotropic radiation patterns in horizontal plane," in Antenna Theory and Techniques (ICATT), 2011 VIII International Conference on, 2011, pp. 217-219.
- [10] J. L. Medina-Monroy, E. Díaz-Tapia, J. L. Olvera-Cervantes, R. A. Chávez-Pérez, and A. Velázquez-Ventura, "Análisis y Comparación de Metodologías para Determinar Experimentalmente la Ganancia de Antenas de RF y Microondas".
- [11] S. Makarov, Antenna and EM Modeling with MATLAB vol. 1: Princeton University Press, 2002.