

## ANTENA MONOPOLO PARA BANDA ANCHA EN LAS FRECUENCIAS DE HF Y VHF.

Ing. Camila Rodríguez Boada<sup>1</sup>, Dr. C. Ismael Lavandera Rodríguez<sup>2</sup>

1 Especialista general del departamento de frecuencias radioeléctricas del Ministerio de Comunicaciones.  
e-mail [camila.rodriguez@mincom.gob.cu](mailto:camila.rodriguez@mincom.gob.cu)

2 Departamento de Telecomunicaciones de la Facultad homónima en la Universidad Tecnológica de la Habana (CUJAE) e investigador del Centro de Investigaciones y Desarrollo Técnico del MININT.  
e-mail [ismael@tele.cujae.edu.cu](mailto:ismael@tele.cujae.edu.cu).

<sup>1</sup> [rodriguez@mincom.gob.cu](mailto:rodriguez@mincom.gob.cu), <sup>2</sup> [ismael@tele.cujae.edu.cu](mailto:ismael@tele.cujae.edu.cu)

### RESUMEN

El objetivo de esta investigación está centrado en la síntesis de un método de diseño de antenas monopolo de banda ancha para el rango de HF y VHF. Esta antena debe tener un tamaño práctico para ser instalada en una estación móvil (automóvil) y la energía debe ser radiada omnidireccionalmente para la transmisión de interferencias en la banda de frecuencia de 20 MHz hasta los 100 MHz.

Existen diversas topologías de antenas que se pueden emplear para cumplir con la tarea planteada, cada una con una variedad de opciones de secciones cargadas, y de ellas, la antena seleccionada fue la antena monopolo tradicional de tipo látigo, debido a su tamaño práctico para ser instalada en una estación móvil con elevada estabilidad y funcionalidad de su estructura.

Con la ayuda del software CST Studio Site 2015 se realizaron los procesos de simulación y optimización de la antena propuesta. Esta antena se optimizó numéricamente teniendo en cuenta principalmente los elementos de carga y considerando las pérdidas de retorno (S11), la razón de onda estacionaria (ROE), el valor de la ganancia, entre otros parámetros. El mejor resultado obtenido durante el proceso de optimización es la antena monopolo con cuatro secciones de carga repartidas adecuadamente a lo largo de su longitud. Los resultados de la simulación deben mostrar que la antena propuesta cumpla las especificaciones de la razón de onda estacionaria por debajo de 3 (ROE<3:1) en toda la banda de frecuencia especificada.

**PALABRAS CLAVE:** Antenas, monopolo, banda ancha, VHF.

## **ABSTRACT**

The objective of this thesis is centered in the synthesis of a method of design of broadband monopole antennas for the range of HF and VHF. The antenna must have a practical size to be installed in a mobile station (automobile) and the power must radiate omnidirectionally for transmission of interference in the frequency band of interest (20-100 MHz).

There are several antenna topologies that can be used, each with a variety of options of loaded sections and of them the antenna selected was the traditional monopole antenna of whip type, due to its practical size to be installed in a mobile station and the stability of its structure.

With the help of CST Studio Site 2015 software, the simulation and optimization processes of the proposed antenna were carried out. This antenna was numerically optimized taking into account the load elements and considering the return losses ( $S_{11}$ ), the voltage standing wave ratio (VSWR) and the gain value, among other parameters. The results of the optimal load solution for the monopole antenna are compared to each other to arrive at the best design. The best result obtained is the monopole antenna with four load sections distributed along its length. The simulation results should show that the proposed

**KEYWORDS:** Antenna, monopole, wide band, VHF.

## **INTRODUCCIÓN**

Las antenas del tipo dipolo, monopolo, de lazo y sus arreglos asociados son las más comunes en la banda de frecuencias VHF. Estas pueden ser empleadas en los sistemas de comunicaciones, de radiodifusión, medición de los campos eléctrico y magnético en las bandas de radiofrecuencias hasta 2GHz y otras. El monopolo es una antena derivada del dipolo, está conformada por un brazo rectilíneo que irradia las ondas electromagnéticas, con una orientación del campo eléctrico en la misma dirección de su eje axial [1] y [2].

Las antenas del tipo monopolo por lo general son antenas que poseen una elevada movilidad, para determinadas dimensiones pueden ser ubicadas en automóviles como parte de sistemas de radiocomunicaciones y otros servicios, algunos de ellos tienen elevadas exigencias para los parámetros que determinan el ancho de banda de trabajo, en el orden de los 80 a 100 MHz de ancho de banda.

### **MÉTODO DE DISEÑO PROPUESTO PARA ANTENAS MONOPOLO DE BANDA ANCHA EN EL RANGO DE FRECUENCIAS DE VHF.**

En el presente documento se describe el método de diseño aplicado para una antena monopolo de banda ancha en el rango de frecuencias de 20 a 100 MHz, con eficiencia. En correspondencia con [3] y [4], una manera de cumplir con la tarea planteada, es insertando con idoneidad en la estructura del monopolo cargas pasivas a parámetros concentrados, tales como circuitos paralelos R, L y C. En la investigación fue empleado el programa informático de diseño y simulación de circuitos pasivos y

activos de RF y Microondas CST Microwave Studio de la empresa CST (Computer Simulation Technology) [5]. Este es una herramienta especializada que incluye la simulación del campo electromagnético en 3 dimensiones, basado en el empleo del método matemático de cálculo de las diferencias finitas en el dominio del tiempo (FDTD).

Durante el proceso de optimización se empleó el algoritmo del programa anteriormente mencionado, llamado Trust Region Framework, que evalúa los parámetros de diseño de la antena y permite modificarlos en dependencia de las metas de diseño propuestas con la finalidad de obtener una adaptación óptima en el ancho de banda de interés. Como parámetro de referencia durante el diseño se estableció la razón de onda estacionaria (ROE) en el plano de carga de entrada de la antena, para un valor inferior a 3 dentro de la banda especificada, con un buen acoplamiento a la impedancia de entrada de la línea de transmisión.

Atendiendo a las experiencias adquiridas durante el diseño, simulación y montaje de la antena se proponen los siguientes pasos para conformar el método: [6]

1. Selección de un valor de frecuencia de sintonía inicial de la antena cercano al límite inferior de la banda de interés.
2. Selección de la longitud inicial del monopolo descargado ( $L_{inicial}$ ), la cual se determina por su valor correspondiente a  $\lambda/4$  de la frecuencia inicial seleccionada.
3. Se calcula el radio inicial ( $R_{inicial}$ ) del monopolo igual a  $L_{inicial} / 100$ .
4. Se definen la cantidad de cargas ( $n$ ) chip RL que se van a ubicar en la antena, teniendo en cuenta que el incremento de la cantidad de cargas incrementa el ancho de banda, pero puede atentar contra la eficiencia de la antena. Se recomienda que el valor de  $n$ , sea la cantidad mínima y suficiente para lograr el ancho de banda exigido.
5. Se establecen los valores iniciales de los elementos R y L que se emplearán en cada carga, ajustados a los valores comerciales de las series. Se recomienda para este rango de frecuencia un valor inicial de  $R=100 \Omega$  que está definido en la serie comercial. Para el valor de la inductancia se pueden emplear elementos de inductancia que sumados alcancen valores entre 1  $\mu H$  y 2  $\mu H$ . Debido a que los valores de inductancias de los elementos deben haber sido medidos dentro del rango de la banda de frecuencias de interés, el inductor seleccionado tiene un valor de 560 nH, capaz de operar entre 1 MHz y 900 MHz [6].
6. Determinación de las coordenadas ( $L_1$  y  $L_2$ ) de las cargas seleccionadas teniendo en cuenta la longitud inicial del monopolo (Ver figura 1). La ubicación y el espacio destinado a cada carga se define mediante el siguiente sistema de ecuaciones lineales (1 y 2):

$$2 \cdot L_1 + (n - 1) \cdot L_2 + n \cdot d = \frac{\lambda}{4} \quad (1)$$

$$L_1 - \left(\frac{\lambda}{2}\right) = L_2 \quad (2)$$

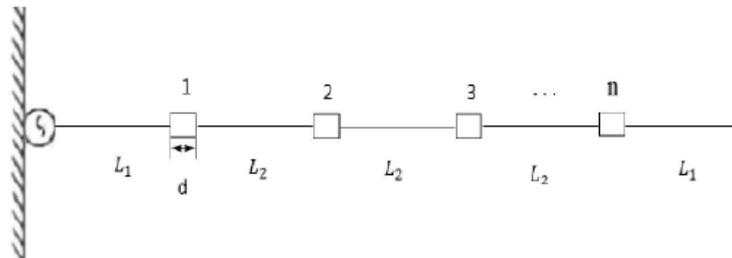


Figura 1: Representación estructural de la antena

Donde:

L1: Los tramos entre los extremos inicial y final de la antena y las primeras cargas en ambas direcciones.

L2: Los tramos intermedios entre las cargas de la antena

d: Espacio físico que está incluido dentro de la L inicial =  $\lambda/4$  y que permite ubicar la carga físicamente.

n: Número de cargas

7. Simulación y optimización de la estructura de la antena empleando el programa CST Microwave Estudio.

Durante el proceso de simulación se recomienda emplear las siguientes **variables independientes**:

1. Radio de la antena (R).
2. Gap inicial (G) (espacio entre el plano de tierra y el extremo inferior de la antena, estando la antena en posición perpendicular al plano de tierra seleccionado).
3. Valores de las resistencias R1, R2, R3,...,Rn. Estas resistencias son los elementos paralelos a cada inductancia, en cada una de las cargas (figura 2).

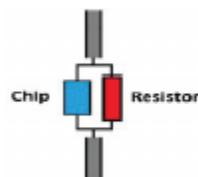


Figura 2: Estructura interna de una de las cargas a emplear en la antena, donde se puede apreciar la resistencia paralela a una inductancia tipo "chip" miniaturizada de  $1\mu\text{H}$  a  $2\mu\text{H}$ .

Como **variables dependientes** para controlar los resultados del proceso de simulación y optimización se emplearon: S11, ROE, Zin (partes real e imaginaria de la impedancia de entrada), ganancia y directividad.

## **DISEÑO DE UNA ANTENA PROTOTIPO DEL TIPO MONOPOLO DE BANDA ANCHA EN EL RANGO DE FRECUENCIAS DE 20 MHz A 100 MHz CARGADA CON 4 CARGAS PASIVAS EN SU ESTRUCTURA.**

Para la realización del diseño de la antena prototipo seleccionada se establecieron los siguientes datos iniciales:

1. Se seleccionó la frecuencia de 30 MHz como frecuencia inicial del diseño dentro del rango de 20 MHz hasta 100 MHz.
2. La longitud inicial del monopolo descargado ( $L$  inicial) corresponde a una  $L$  inicial =  $\lambda/4 = 2500$  mm.
3. Radio inicial ( $R$  inicial) del monopolo igual a  $L$  inicial / 100.  
Tomando en cuenta que la longitud inicial de la antena es 2500 mm cumpliendo con la condición entonces el  $R$  inicial =  $L$  inicial / 100 = 25 mm.
4. La cantidad de cargas chip RL ( $n$ ) que se van a ubicar en la antena es de 4. Esta decisión se recomendó para cumplir con el criterio de la cantidad mínima y necesaria para lograr el ancho de banda exigido. El incremento del número de estas puede atentar contra la eficiencia de la antena. Teniendo en cuenta los resultados experimentales obtenidos en [3], se seleccionó  $n=4$ , que corresponde con el diseño de una antena monopolo para banda ancha en el rango de frecuencias de interés.
5. Los valores iniciales de los elementos  $R$  y  $L$  que se emplearán en cada carga son:  $R=100 \Omega$  y  $L=1.12 \mu H$ . El valor de la inductancia  $L$  se seleccionó teniendo en cuenta que la inductancia del rango entre  $1 \mu H$  y  $2 \mu H$ , puede ser conformada por dos inductancias conectadas en serie iguales a  $560 nH$  que es valor que está referido en las series comerciales y según el datasheet consultado en [7], fueron medidos a la frecuencia de 25 MHz.
6. 6. Determinación de las coordenadas ( $L1$  y  $L2$ ) de las cargas seleccionadas teniendo en cuenta la longitud inicial del monopolo (Ver figura 1 y las ecuaciones 1 y 2):  
Datos:  $L$  inicial =  $\lambda/4 = 2500$  mm,  $L1=497.5$  mm,  $L2=495$  mm,  $n=4$ ,  $d=5$  mm.
7. Las dimensiones del plano de tierra de largo por ancho son  $1.5\lambda \times 1.5\lambda$ , según recomendaciones del software Antenna Magus [8] y se puede escoger el grosor del plano de tierra como  $T=5$  mm.
8.  $G=10$  mm (espacio disponible para la ubicación del puerto de entrada de la antena), este valor es un dato inicial que se empleará como variable independiente para la optimización del diseño.
9. El material escogido para los elementos radiantes de la antena y el plano de tierra se considerará como conductor perfecto (PEC).

En la figura 3, se muestra la antena simulada con los datos aplicados en el programa simulador CST.

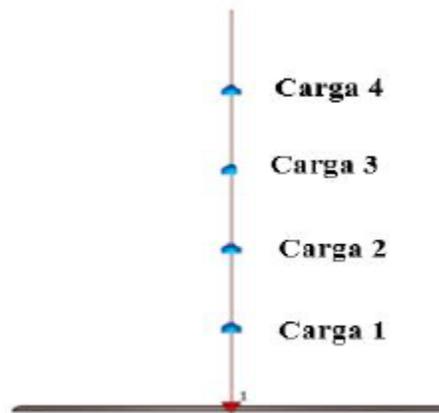


Figura 3: Estructura de la antena en el ambiente de usuario del programa simulador CST. Vista lateral en 3D.

En la figura 3 se pueden apreciar: El plano de tierra (PEC), el Gap seleccionado, las cuatro cargas y los tramos L1 y L2 de la antena, en correspondencia con la figura 1.

Después de realizado el proceso de optimización se obtuvieron los siguientes resultados:

1. Pérdidas de retorno (S11). ( figura 4)

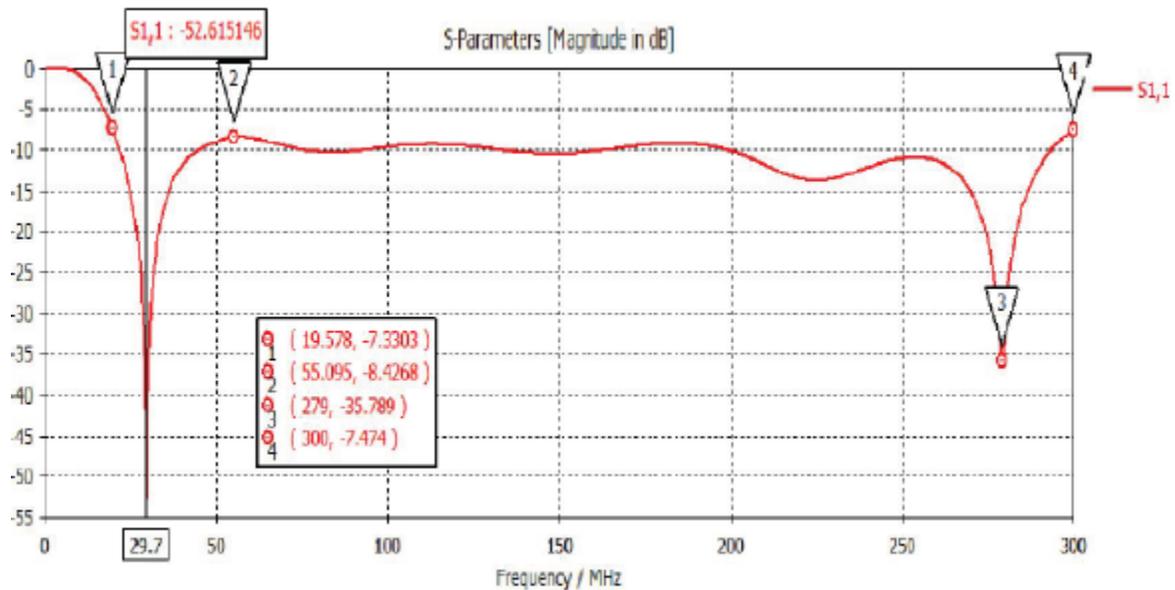
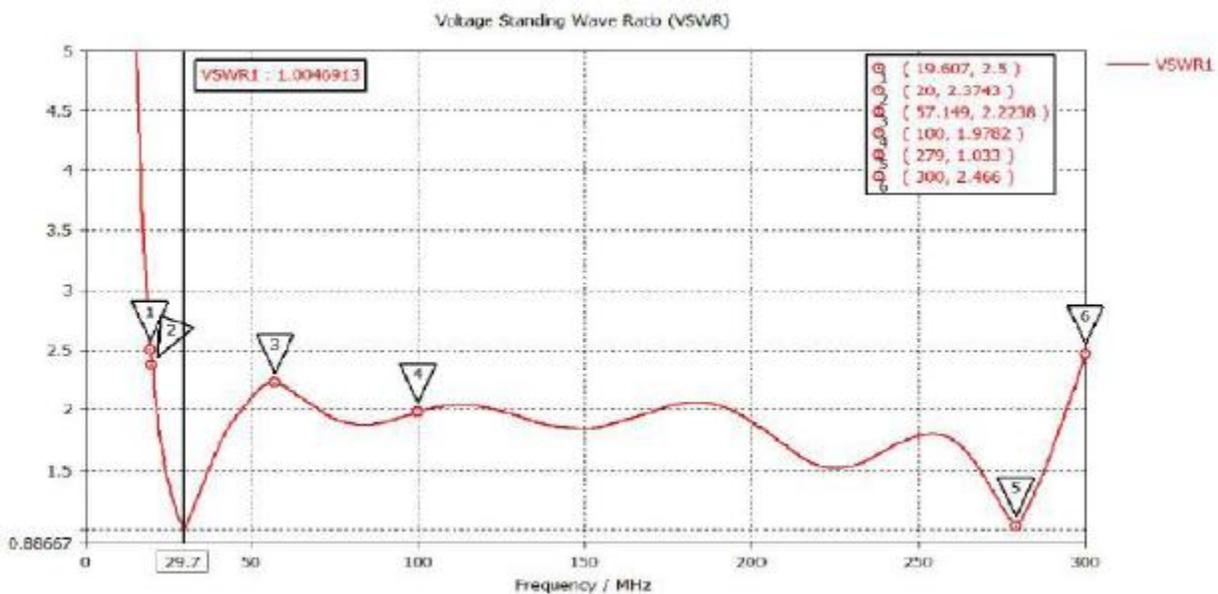


Figura 4: Representación gráfica del comportamiento del parámetro S11 después de concluido el proceso de optimización en el programa simulador CST.

2. Razón de onda estacionaria (ROE). ( figura 5)



**Figura 5: Representación gráfica del comportamiento del parámetro ROE de la antena monopolo optimizada para 4 cargas chip RL (L inicial=2500 mm).**

Como se observa en las figuras 4 y 5, las pérdidas de retorno tienen un valor óptimo ( $S_{11} < -50\text{dB}$ ), al igual que el ROE (cercano a 1) para la frecuencia de resonancia. La banda de interés fue definida por un nivel de ROE=2.5 de referencia inferior al nivel de 3 recomendado inicialmente. Se logró un ancho de banda de 280MHz superior al planteado en los requisitos de diseño para un 175% con respecto a la frecuencia central de la banda obtenida, con lo cual se cumplen las especificaciones de diseño propuestas.

### 3. Impedancia de entrada de la antena ( $Z_{11}$ ). Ver figuras 6 y 7.

Como se observa en las figuras 6 y 7, para la frecuencia de resonancia de diseño de la antena, la parte real de la impedancia tiene un valor cercano a los 300  $\Omega$  y cercano a 0  $\Omega$  para la parte imaginaria, este resultado es bueno porque evidencia que la antena quedó correctamente acoplada a la frecuencia de resonancia. Para el resto de las frecuencias el valor complejo de la impedancia fluctúa cercano a los 200  $\Omega$  de impedancia, esto permite el acoplamiento en esas frecuencias a líneas de 50  $\Omega$ , siempre que se utilice un transformador de acoplamiento 4:1.

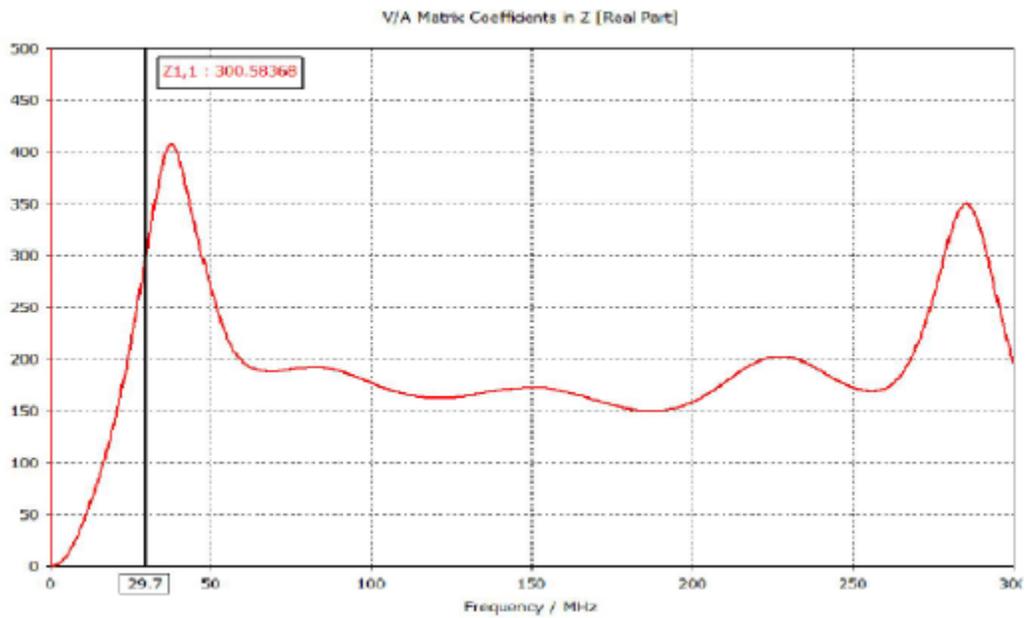


Figura 6: Parte real de la impedancia de entrada de la antena optimizada en el rango de frecuencias de la banda de interés.

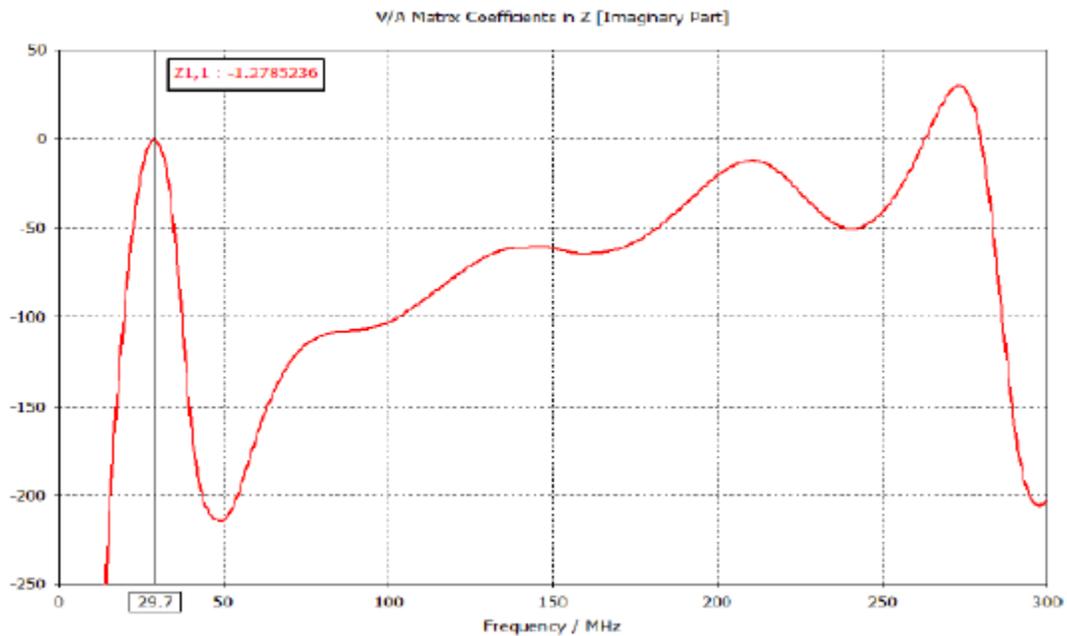


Figura 7: Parte imaginaria de la impedancia de entrada de la antena optimizada en el rango de frecuencias de la banda de interés.

4. Diagrama de radiación de la antena. Ver figura 8 a) b) y c).

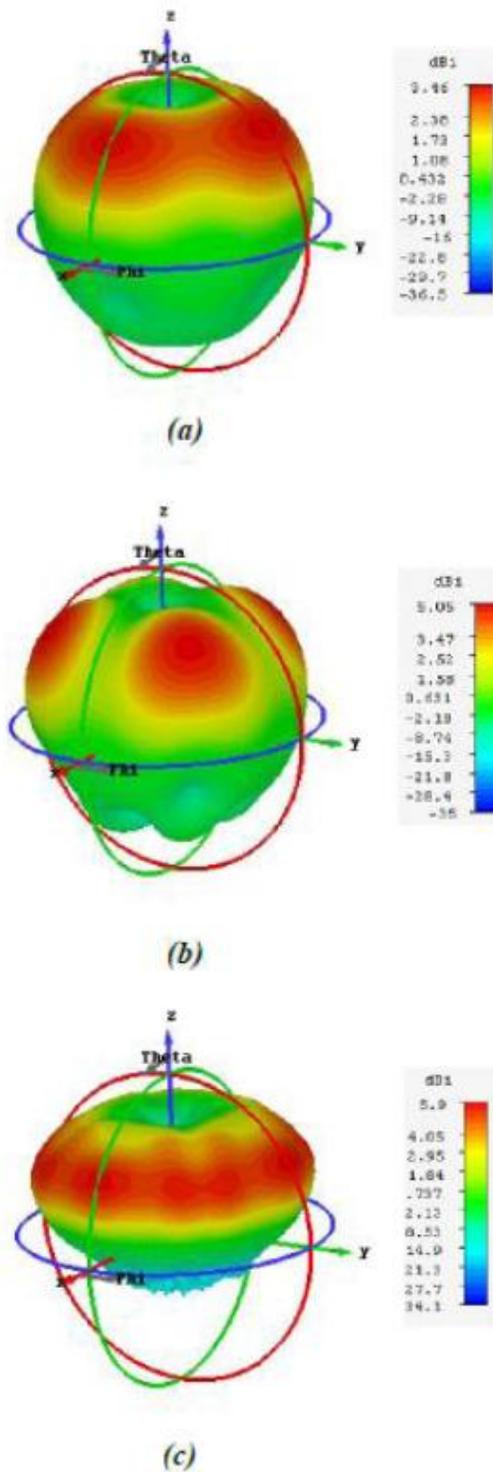
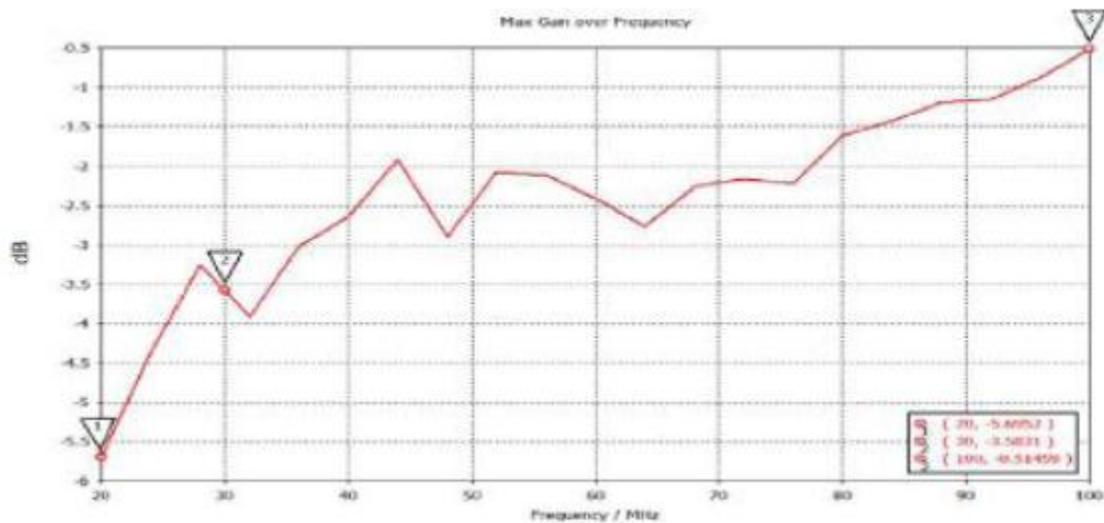


Figura 8: Representación gráfica del diagrama direccional de la antena a diferentes frecuencias a) 20 MHz, b) 30 MHz y c) 100 MHz.

En cuanto a las características mostradas en la figura 8 a), b) y c), se puede apreciar que un aumento de frecuencia permite la aparición de lóbulos secundarios en el patrón de radiación, y por tanto un deterioro en las características de radiación de la antena.

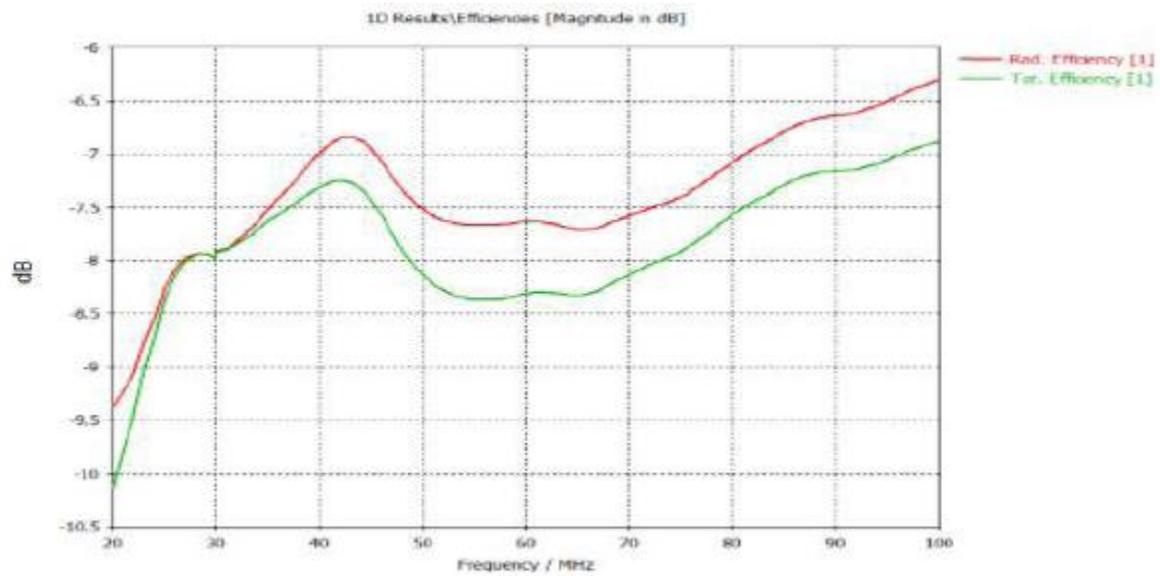
5. Ganancia y eficiencia de radiación de la antena. Ver figura 9.

En la figura 9 se observa un incremento de la ganancia con el aumento de la frecuencia. Se debe destacar que la ganancia presenta valores pequeños en toda la banda de interés (negativos). La ganancia máxima para 20 MHz, 30 MHz y 100 MHz respectivamente: -5.6952 dB, -3.5831 dB, -0.51459 dB respectivamente.



**Figura 9: Representación gráfica del comportamiento de la ganancia dentro de la banda de 20 MHz hasta los 100 MHz.**

Como se observa en la figura 10 la eficiencia tiene un comportamiento similar a la ganancia debido a la relación directamente proporcional entre ambos parámetros. Se observa que la eficiencia no es buena pues el valor de la eficiencia total oscila entre 10 y 20.5 %, mientras que la eficiencia de radiación presenta valores entre 11.5 y 23.4 % para la banda de interés lo que significa que la antena es poco eficiente.



**Figura 10: Representación gráfica del comportamiento de la eficiencia de la antena en el rango de frecuencias de 20 MHz a 100 MHz.**

Luego de obtenidos los valores de resistencia en cargas en el proceso de optimización, estos deben ajustarse a los valores comerciales para la posterior construcción de la antena ( figura 11).



**Figura 11: Imagen de la antena monopolo de banda ancha prototipo construida con 4 cargas insertadas, donde se pueden apreciar todos los elementos de su estructura incluyendo el transformador de acoplamiento 4:1 recomendado.**

## CONCLUSIONES

Mediante el método de diseño propuesto para mejorar el ancho de banda de las antenas monopolo, se lograron obtener las especificaciones planteadas al inicio del capítulo, lo cual implica que mediante la inserción de secciones de carga chip RL es posible obtener un ancho de banda amplio en el rango de 20 a 100MHz, e incluso para frecuencias superiores de hasta 300 MHz.

En la fase inicial de este proyecto se investigaron varias topologías de antenas monopolo. Se selecciona la antena monopolo tradicional de  $\lambda/4$ , debido a su facilidad de construcción, flexibilidad y que su estructura puede permitir una fácil instalación en una estación móvil (vehículo).

Para lograr que la antena monopolo tuviera un comportamiento de banda ancha se realizó la introducción a lo largo de la estructura de cuatro secciones de carga chip RL, donde los valores de los componentes fueron optimizados numéricamente para encontrar el mejor diseño apropiado para una antena de banda ancha de VHF.

Las simulaciones de esta topología realizadas en el CST revelan diferentes criterios de diseño. La adición de cargas de un inductor y resistor en paralelo (cargas RL) en una antena, incrementa la capacidad de la antena para radiar energía a diferentes frecuencias.

El uso de cargas RL son estudiadas usando cargas inductivas pequeñas en la forma de chip incrementando las cargas inductivas en el límite de las frecuencias de operación requeridas (cargas chip RL). La posición de las cargas RL, magnitud y cantidad son investigadas en una antena monopolo y comparadas en el diseño con lo cual la longitud de la antena fue incrementada. La mejor topología de diseño encontrada fue la de una antena monopolo simple, con 4 secciones de carga RL adicionados a lo largo de su longitud. Cada sección RL consiste de inductores en serie que estén disponibles comercialmente y un resistor en paralelo a estos inductores.

Finalmente se puede afirmar que en esta tesis se describe un método de diseño de antenas monopolo de banda ancha, por lo que se puede afirmar que los objetivos de la investigación fueron cumplidos.

Las futuras líneas de investigación incluyen el proceso de construcción de la antena monopolo propuesta, mediante el uso de mejores componentes situados para manejar elevados niveles de potencia de hasta 200 W, así como evaluar posibles cambios en la estructura de la antena monopolo a fin de poder mejorar sustancialmente la eficiencia de la misma.

## RECONOCIMIENTOS

Los autores desean agradecer al colectivo de la sección A12 del departamento de electrónica del CIDT-MININT, los cuales brindaron todo el apoyo material y científico para cumplir con los objetivos planteados en la solución del problema.

## REFERENCIAS

- [1] C. A. Balanis, *Antenna Theory: Analysis and Design*, 4 edition. Hoboken, NJ: Wiley, 2016.
- [2] «cardama - antenas», *Scribd*, 23-nov-2017. [En línea]. Disponible en: <https://www.scribd.com/document/149997732/cardama-antenas>. [Accedido: 23-nov-2017].
- [3] J. Lourens, «A wideband monopole antenna design», Thesis, Stellenbosch : Stellenbosch University, 2013.
- [4] F.-F. Zhang, B.-H. Sun, X. Li, W. Wang, y J.-Y. Xue, «Design and Investigation of Broadband Monopole Antenna Loaded with Non-Foster Circuit», *Prog. Electromagn. Res. C*, vol. 17, pp. 245-255, 2010.
- [5] «CST Online :: Representaciones y Servicios de Ingeniera», 23-nov-2017. [En línea]. Disponible en: <http://www.cstonline.cl/>. [Accedido: 23-nov-2017].
- [6] C. R. B. Ismael Lavandera Rodriguez, «Antena monopolo para banda ancha en las frecuencias de HF y VHF», Universidad Tecnologica de la Habana, La Habana, 2017.
- [7] «2520 Datasheet, PDF - Alldatasheet», 23-nov-2017. [En línea]. Disponible en: <http://www.alldatasheet.com/view.jsp?Searchword=2520%20datasheet>. [Accedido: 23-nov-2017].
- [8] R. E. Deasy, «Frequency range enchanced monopole antenna», 5065164, 11-dic-1991.