

DISEÑO Y DESARROLLO DE REDES DE ACOPLAMIENTO DE BANDA ANCHA PARA UNA ANTENA MONOPOLO

Larry García Aldana¹, José Sandianes Gálvez², Miguel Borrego Corona³

¹Centro de Investigación-Desarrollo y Producción “Grito de Baire”, La Habana, Cuba

^{2,3}Universidad Tecnológica de La Habana, La Habana, Cuba

¹e-mail: larry@gb.reduim.cu

²e-mail: sandianes@tele.cujae.edu.cu

³e-mail: borrego@tele.cujae.edu.cu

RESUMEN

Los sistemas de radiocomunicaciones se desarrollan aceleradamente, a la vez que sus exigencias técnicas se incrementan. Es usual encontrar nulos o muy pequeños tiempos de ajuste y sintonización en un rango de frecuencia amplio. Para el caso de los transceptores que trabajan en la banda de VHF (Very High Frequency), se hace necesario lograr el acoplamiento de impedancia entre el AP (Amplificador de Potencia de radiofrecuencia) y la antena, de manera sencilla para el operador. Normalmente las antenas monopulos se comportan resonantes, con un estrecho ancho de banda para la ROE (Razón de Onda Estacionaria) permisible de operación, generalmente de 1.5 a 2.5. En este trabajo se propone, diseñan, simulan e implementan redes de acoplamiento de banda ancha y acción automática, para una antena monopolo en el rango de frecuencias de 30 a 92 MHz. Estas redes conforman un sistema de acoplamiento que debe garantizar una ROE menor o igual que 2.5 para un 100 % de ancho de banda relativo.

PALABRAS CLAVES: Acoplamiento de impedancia, ROE, antenas monopolo.

DESIGN AND DEVELOPMENT OF WIDEBAND MATCHING NETWORKS FOR A MONOPOLE ANTENNA

ABSTRACT

Radio communications systems are rapidly developing, at the same time technical requirements are increasing. It is usual to find zero or very low time of adjustment and tuning in a wide bandwidth. For the case of the transceivers that work in VHF (Very High Frequency), it is necessary to get the impedance matching between the radio frequency Power Amplifier (AP) and the antenna in a simple manner for operators. Usually, monopole antennas behave resonant, with a narrow bandwidth for a low enough SWR (Standing Wave Ratio), generally of 1.5 to 2.5. This letter presents design, simulation and realization for wideband matching networks of automatic function for a monopole antenna in the 30 to 92 MHz frequency range. These networks conform a matching system that must guarantee a SWR minor or the same as 2.5 for 100 % of relative bandwidth.

KEY WORDS: Impedance matching, SWR, monopole antennas.

1. INTRODUCCIÓN

Uno de los acontecimientos más importantes dentro de las tecnologías de la información de los últimos años ha sido la expansión de las comunicaciones inalámbricas como método de intercambio de información. Su principal ventaja recae en la no dependencia del cableado, pues el punto de entrada a la red de comunicaciones

no se encuentra vinculado a una ubicación física. El medio de transmisión ya está listo, sin que sea necesaria la creación de la infraestructura previa.

La necesidad de garantizar una transferencia eficiente de potencia desde la fuente hacia la carga, es una de las premisas más importantes de cualquier sistema de telecomunicaciones. Esto puede ser denominado como acoplamiento de impedancias [1]. Cuando en el circuito están presentes elementos reactivos, la condición de máxima transferencia de potencia se logra con el uso del acoplamiento de impedancias conjugadas.

La impedancia de entrada es un parámetro a tener en cuenta en el desempeño de la antena. La misma se compone de una parte real (resistencia de entrada) y una parte imaginaria (reactancia de entrada). La impedancia de entrada está determinada fundamentalmente por la geometría de la antena, y puede ser significativamente diferente de la impedancia del generador. Para optimizar la transferencia de potencia del generador a la antena es necesario insertar un transformador de impedancias, una red de acoplamiento, o ambos. Idealmente, la red de acoplamiento debe ser diseñada para absorber la componente reactiva de la impedancia de la antena y al mismo tiempo presentar una resistencia de entrada igual a la del generador. Esto es relativamente sencillo para una frecuencia de trabajo, pero se dificulta cuando se trabaja en una banda amplia de frecuencias.

Como parte del desarrollo de los transeceptores móviles, en ellos se ha implementado un amplificador de potencia de radiofrecuencia de banda ancha que opera en la gama de 30 MHz a 92 MHz, a modo de disponer de un gran número de canales de radio y garantizar la distancia de comunicación requerida para estos medios. Como elemento radiador se emplea una antena monopolo que presenta en el punto de alimentación una impedancia de entrada diferente a la impedancia de salida del amplificador de potencia, y con una gran variación, tanto en su parte real como en su parte imaginaria, en toda la gama de frecuencias antes mencionada. Esto impide alcanzar una adecuada estabilidad en el trabajo del transeceptor y provoca la reducción de sus cualidades técnicas. El nuevo transeceptor no cuenta con un dispositivo que permita la máxima transferencia de potencia desde el amplificador de potencia hacia la antena, en la banda de trabajo mencionada. Mediante la división de la gama de frecuencias en pequeñas subbandas, es posible emplear varias redes de acoplamiento de impedancias de diferentes configuraciones para cubrir una porción de la banda de VHF con una ROE menor o igual a 2.5, cuando se tiene como carga una antena monopolo.

2. MATERIALES Y MÉTODOS

En los últimos años, el uso de redes de acoplamiento para hacer resonar una antena ha devenido en una práctica común [2]. Estas redes de acoplamiento usualmente emplean elementos pasivos para cancelar la parte reactiva de la impedancia de entrada de la antena. Estos elementos pasivos son, generalmente, capacitores e inductores dependiendo del carácter reactivo de la antena. Al utilizar estos elementos para el acoplamiento, se obtienen anchos de banda estrechos.

El arte del acoplamiento de impedancias (de banda estrecha y de banda ancha) para las antenas, se basa en dos técnicas fundamentales: a parámetros distribuidos y a parámetros concentrados. Ambas técnicas de acoplamiento de impedancias pueden ser implementadas incluyendo las pérdidas dentro de la estructura o red, o despreciando las pérdidas. En las técnicas distribuidas de acoplamiento de impedancias, las pérdidas pueden ser incluidas tanto intencional como circunstancialmente, a través del uso de materiales dieléctricos. Las técnicas a parámetros concentrados de acoplamiento con pérdidas involucran la conexión de una resistencia, adecuadamente seleccionada, dentro de la red de inductores y capacitores. En este aspecto radica la diferencia con respecto a las redes de acoplamiento sin pérdidas, las cuales son diseñadas solo con inductores y capacitores. Naturalmente, estos componentes tienen un valor finito de factor de calidad (Q), por lo que existe una porción de pérdidas.

En este trabajo se emplean las técnicas de acoplamiento de impedancias para antenas a parámetros concentrados. Un aspecto interesante y cuestionado se toma en consideración: el acoplamiento de impedancias de banda ancha para antenas resonantes. En el presente trabajo se acomete este tema mediante el empleo de redes sin pérdidas a parámetros concentrados.

2.1. Metodología de análisis, síntesis y optimización de las redes de acoplamiento

En la referencia [3], se describe un nuevo modelo teórico que se ha concebido para darle solución al problema científico planteado. Este problema ha sido establecido en una metodología, en la que se encuentran, entre otros, los procedimientos de modelación de cargas, caracterización de las cargas, obtención de los modelos de las redes de acoplamiento y optimización de las redes de acoplamiento. Este procedimiento se apoya en el criterio de Bode –Fano para caracterizar el límite de ancho de banda obtenible en cada red, el cual forma parte de la base de este trabajo; a partir del mismo se define el número de redes que deben emplearse al subdividir

toda la banda en sub-bandas o sectores. A continuación se desarrollan los algoritmos empleados en cada procedimiento.

Modelación de cargas. Mediciones in situ realizadas

Al proceso de obtención del esquema equivalente de la carga se le denomina modelación de cargas. Para modelar las cargas a acoplar, primeramente se ha realizado la medición de la impedancia de entrada de la antena (figura 1). En este caso el amplificador de potencia ha sido diseñado con una impedancia de salida de 50Ω . En la figura 1 se muestra la medición de la impedancia de entrada. Como se observa, a las bajas frecuencias la antena se comporta capacitiva. Con el incremento de la frecuencia aparece una resonancia serie en 30 MHz, seguida por una resonancia paralelo en 36 MHz. En 52.5 MHz ocurre una segunda resonancia serie seguida por otra resonancia paralelo en 83 MHz.

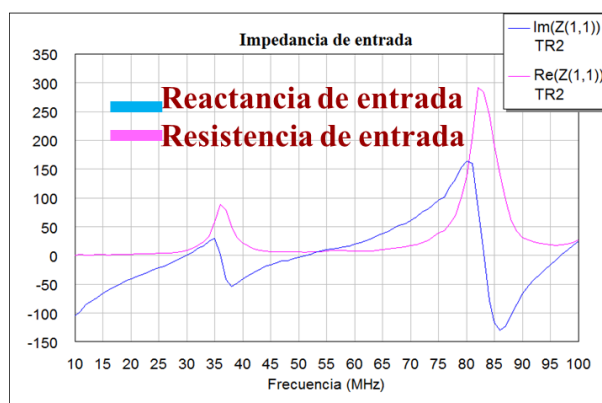


Figura 1: Medición de impedancia de entrada de la antena.

Caracterización de las cargas

También es necesario, en la nueva concepción de solución planteada, determinar las configuraciones de las redes de acoplamiento (RA). Este procedimiento está concebido a partir del proceso que denominamos caracterización de las cargas, cuya finalidad es obtener las exigencias del acoplamiento de impedancias que tendrán las RA que se empleen.

Para efectuar el procedimiento, analizaremos el comportamiento de tres parámetros fundamentales, los cuales se pueden definir como sigue a continuación: el coeficiente de transformación de impedancias, k_z , y su promedio p , los que se obtienen como sigue:

$$k_z = \frac{\text{real}(Z_c)}{\text{real}(Z_s)} \quad (1)$$

$$p_K = \frac{k_z}{n} \quad (2)$$

donde Z_c y Z_s son la impedancia de la carga y de la fuente respectivamente, y n el número de mediciones. Los valores obtenidos nos indican en cuanto debe transformarse la impedancia de carga o fuente; ese grado de transformación lo debe garantizar la red de acoplamiento.

Conjuntamente con estos parámetros, necesitamos conocer si el comportamiento de k_z es ascendente o descendente en la banda de frecuencia, por lo que se ha introducido el concepto de pendiente de k_z (m_k), la cual se obtiene de la siguiente expresión:

$$m_k = \frac{k_z(n) - k_z(1)}{k_z(c)} \quad (3)$$

donde: $k_z(n)$ es el coeficiente de transformación de la impedancia a la frecuencia superior, $k_z(1)$, es a la frecuencia inicial y $k_z(c)$, a la frecuencia central.

Si observamos, en las expresiones de los parámetros k_z o m_k , no se tiene en cuenta el comportamiento de la parte imaginaria de las impedancias que se desean acoplar. En este sentido fue necesario analizar también el coeficiente de desacoplamiento de las impedancias, dando como resultado la ROE resultante de las impedancias sin acoplar. Su cálculo se establece mediante las siguientes expresiones:

$$C_{re} = \frac{Z_s - \text{conj}(Z_c)}{Z_s + Z_c} \quad (4)$$

$$R_{oe} = \frac{1 + \text{abs}(C_{re})}{1 - \text{abs}(C_{re})} \quad (5)$$

$$P_{ROE} = \sum \frac{ROE}{n} \quad (6)$$

De manera general, los parámetros analizados serán: m_k , p_k , y p_{ROE} , los cuales se obtienen para el caso en que las impedancias a acoplar se encuentran sin RA e imponen las exigencias a satisfacer. Como resultado del proceso de caracterización de las cargas, quedan definidas las exigencias de las RA, en cuanto a m_k , p_k , y p_{ROE} , a partir de las cuales se puede definir los modelos que satisfacen las exigencias del acoplamiento.

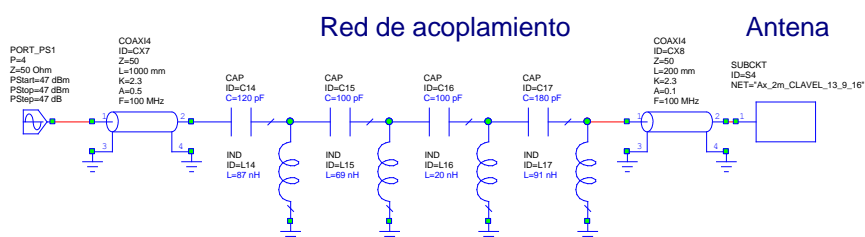
Obtención de los modelos de las RA

En la práctica son utilizables diferentes redes de acoplamiento con elementos reactivos como las de tipo L, T, π , etc., ejemplo de las cuales se muestran en la figura 2. Para la obtención de los modelos de las RA se emplea la herramienta *iFilter Filter Wizard* del programa *AWR Design Environment 10*. Esta herramienta da la posibilidad de diseñar redes de acoplamiento partiendo de conocer el comportamiento de la impedancia de las cargas a acoplar.

Para garantizar el acoplamiento, se emplean varias configuraciones de RA mencionadas, lo cual se hace teniendo en cuenta la variación de impedancia que presenta la antena. En la tabla 1 se especifican las configuraciones de RA empleadas, y en la figura 2 se muestran sus circuitos típicos.

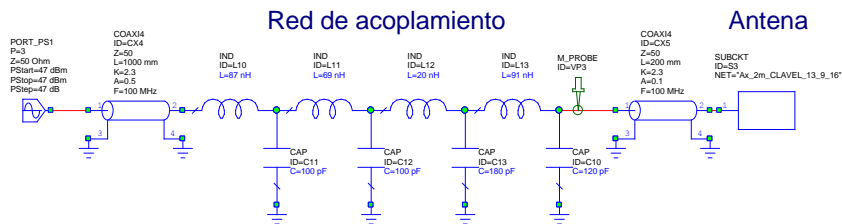
Tabla 1: Configuraciones de las RA empleadas.

| R_A | X_A | Configuración de la RA |
|-------------------|------------------|------------------------|
| $R_A > 50 \Omega$ | $X_A > 0 \Omega$ | Pasa alto reductor |
| $R_A > 50 \Omega$ | $X_A < 0 \Omega$ | Pasa bajo reductor |
| $R_A < 50 \Omega$ | $X_A > 0 \Omega$ | Pasa alto elevador |
| $R_A < 50 \Omega$ | $X_A < 0 \Omega$ | Pasa bajo elevador |

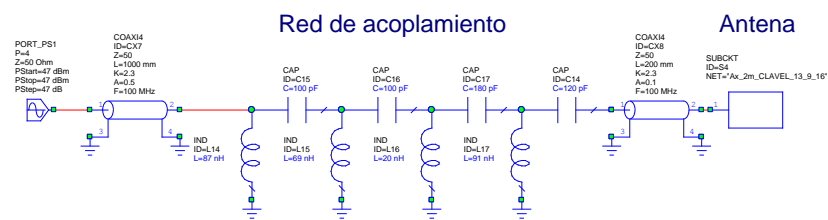


a)

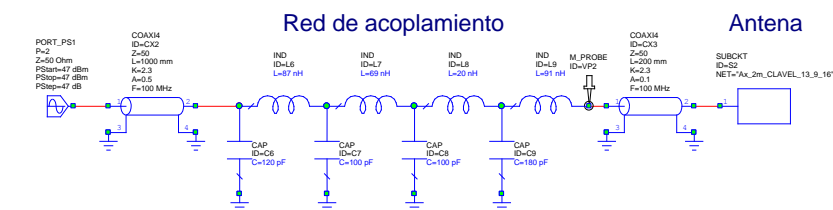
DISEÑO Y DESARROLLO DE REDES DE ACOPLAMIENTO DE BANDA ANCHA PARA UNA ANTENA MONOPOLO



b)



c)



d)

Figura 2: Circuitos de las RA empleadas, a) pasa alto reductor, b) pasa bajo reductor, c) pasa alto elevador, y d) pasa bajo elevador.

Por lo general, los valores de los elementos obtenidos por la herramienta *iFilter Filter Wizard* no son prácticos y, por tanto, se requiere la combinación de dos o más elementos para obtener el valor deseado. Además, en ocasiones no se garantizan las exigencias planteadas en la banda de interés. Para resolver estos inconvenientes, el propio programa *AWR Design Environment 10* dispone de una potente herramienta de optimización, cuyo empleo permite obtener el circuito final de la RA.

Optimización de las redes de acoplamiento

Una vez obtenidos los modelos de las RA se procede a su optimización mediante la herramienta *Optimizer* del programa *AWR* (ver figura 3). El optimizador permite seleccionar el ancho de banda de la RA, el nivel de ROE deseado, la banda de frecuencia, los valores de los componentes a optimizar, el método de optimización, entre otros parámetros. Para el proceso de optimización se fijaron valores prácticos de capacidad y se optimizaron las inductancias, las cuales se obtienen fácilmente en la práctica. En la simulación se introdujeron las pistas del circuito impreso, las características del sustrato disponible y las líneas de transmisión que conectan la RA con el sistema. Una vez concluido este procedimiento, el circuito está listo para ser implementado. El método desarrollado hasta ahora ha sido aplicado a cada subbanda de frecuencia, de las 12 en que se dividió la gama de trabajo.

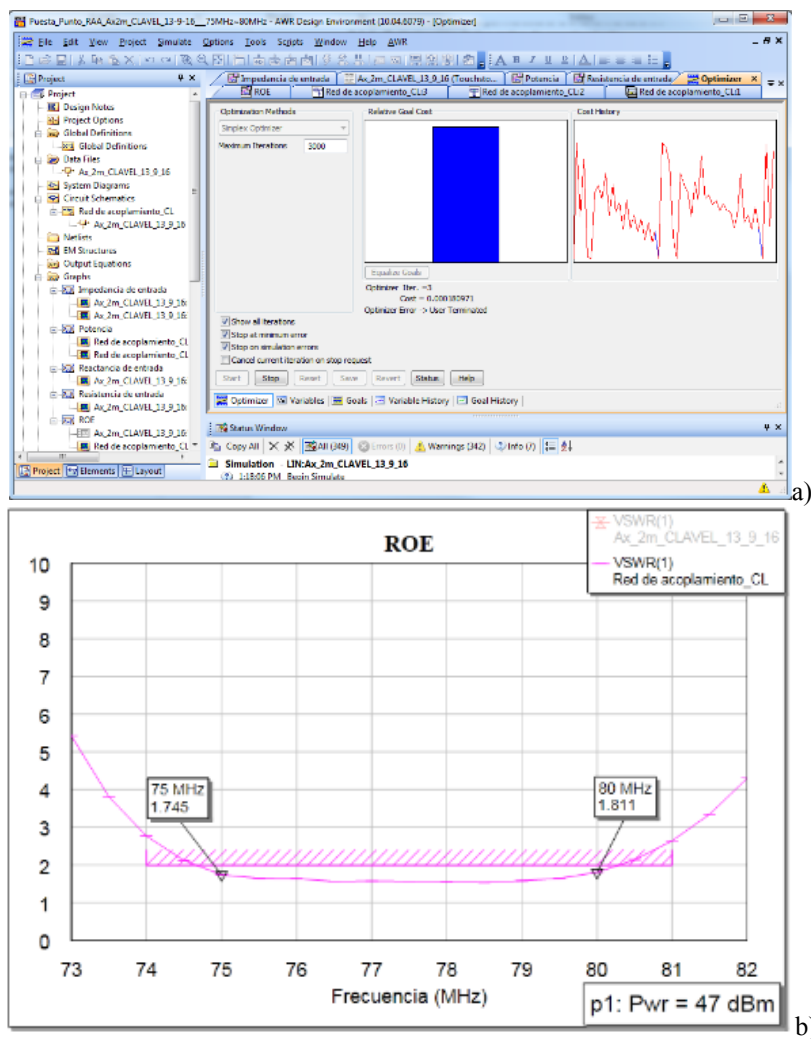


Figura 3: Herramienta de optimización de las RA, a) ventana del optimizador, b) gráfica de ROE optimizada.

Diseño del circuito eléctrico

En la figura 4 se muestra el esquema en bloques del dispositivo diseñado. El sistema consta de las RA de cada subbanda con relés de entrada y salida de RF, el microcontrolador y las señales de control. Cada RA dispone de una señal de control que es generada por el microcontrolador y este a su vez es gobernado por las señales enviadas desde el transceptor. En el diseño se propone, opcionalmente, el empleo de un conmutador externo para el control manual del dispositivo.

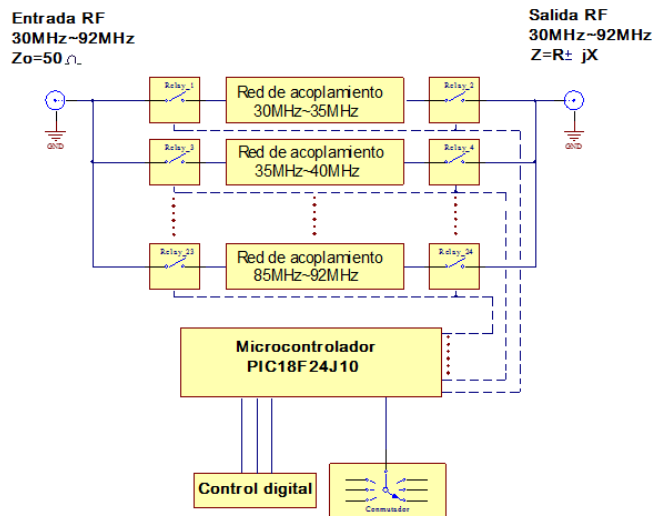


Figura 4: Esquema en bloques de la red de acoplamiento.

El diseño, tanto del esquema eléctrico, como del circuito impreso, se realizó en el programa *Altium Designer 2010* [4]. Para ello se emplearon las hojas de datos de las componentes seleccionadas. En las etapas de radiofrecuencia, se tuvo en cuenta los altos niveles de potencia existentes, por lo que las pistas se diseñaron con 3 mm de ancho y los inductores se ubicaron perpendicularmente para evitar el acoplamiento magnético entre ellos.

El funcionamiento del dispositivo es el siguiente: el microcontrolador decodifica los datos enviados desde el transceptor y genera un nivel alto en el pin de control correspondiente. La señal del pin de control se aplica a la base de un transistor bipolar, el cual comienza a trabajar en zona de saturación, permitiendo el paso de la corriente a través de las bobinas de los relés. Al ser energizada su bobina, el relé de entrada conmuta la señal de radiofrecuencia que llega del amplificador de potencia, hacia la RA. La salida de la RA se aplica al relé de salida, el cual conmuta la señal de RF hacia la antena.

3. DISCUSIÓN DE LOS RESULTADOS

Construcción del prototipo

El prototipo consta de tres unidades funcionales: la unidad de acoplamiento de 30 MHz~60 MHz, la unidad de acoplamiento de 60 MHz~92 MHz y la unidad de control (ver figura 5). Para la construcción del prototipo se empleó una placa de circuito impreso fotosensible con sustrato FR4 ($\epsilon_r=4.8$, $h=1.6$ mm, $t=0.007$ mm), a la cual se le aplicó un proceso de develado y decapado químico de calidad aceptable. Luego se estañó la placa y se montaron los componentes.

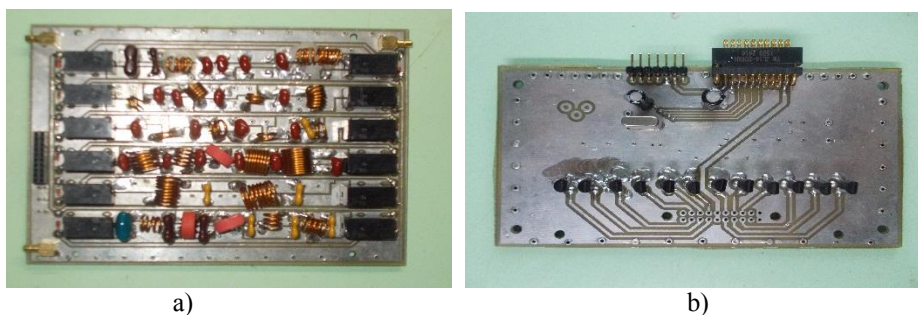


Figura 5: Prototipo construido a) unidad de acoplamiento de 30 MHz~60 MHz, b) unidad de control.

Al realizar la medición de las redes de 30 MHz~35 MHz y 35 MHz~40 MHz, se compararon los resultados obtenidos en la misma con la simulación, lo cual se muestra en las figura 6. Se observa que las redes

implementadas garantizan el acoplamiento en un ancho de banda de 5 MHz con $ROE < 2.5$, lo cual tiene una buena concordancia con el diseño y las simulaciones realizadas. También se puede apreciar que en los límites de la subbanda, en ambos casos, la ROE aumenta gradualmente, lo cual es conveniente ante posibles variaciones de la impedancia de entrada de la antena.

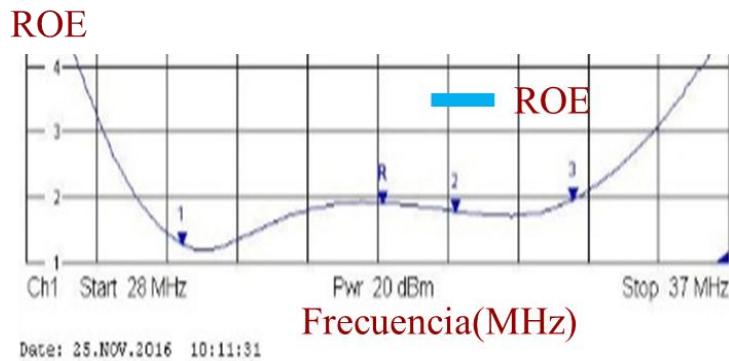
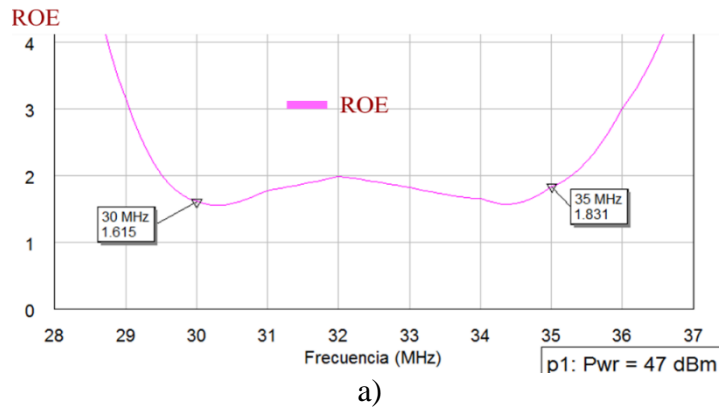


Figura 6: ROE de la red de 30 MHz~35 MHz a) simulada, b) construida.

4. CONCLUSIONES

La antena es un elemento esencial en un sistema de radiocomunicaciones debido a que convierte la señal de radiofrecuencia amplificada en ondas electromagnéticas. Para lograr este objetivo en un amplio ancho de banda se requiere su sintonización en todo el intervalo de frecuencias de trabajo. Sin embargo, las antenas monopolo son de banda estrecha. En este sentido es necesario implementar su acoplamiento de banda ancha, objetivo del presente el trabajo, lo cual se logra con un método de acoplamiento de impedancias con redes a parámetros concentrados.

Se ha logrado cumplir el objetivo propuesto al diseñarse un sistema de acoplamiento automático de una antena monopolo, garantizando una $ROE < 2.5$ en la banda prevista de 30 MHz~92 MHz. Se pudo verificar, mediante la simulación, la hipótesis planteada y, experimentalmente, tres de las subbandas seleccionadas en los prototipos construidos. Los resultados obtenidos en la simulación son excelentes, lográndose acoplar el 100 % del ancho de banda previsto (62 MHz). Igualmente, en los experimentos realizados en tres de las 12 subredes, al dividir la gama de frecuencias mencionada en subbandas de 5 MHz, los resultados fueron muy buenos.

5. AGRADECIMENTOS

Los autores desean agradecer al Centro de Investigación, Desarrollo y Producción Grito de Baire por el aseguramiento técnico brindado para la realización de este trabajo, sin lo cual no hubieran sido posible los resultados obtenidos.

REFERENCIAS

1. Ahmad Aminu, Bello Garba Gaya, "Design and simulation of broadband matching network using binomial (empirical) transformer technique," *International Journal of Advanced Technology in Engineering and Science*, vol. 03, pp. 520-527, February 2015.
2. V. Iyer, "Broadband impedance matching of antenna radiators," Doctor of Philosophy, Worcester Polytechnic Institute, 2014.
3. M. Borrego, "Metodología para el análisis, síntesis y optimización de redes atípicas de adaptación de impedancia de banda ancha en microondas", Tesis de grado de doctor en ciencias técnicas, Departamento de Microondas, ITM "José Martí", 2015.
4. A. L. F. Sigler, "Introducción al diseño CAD. Diseño de esquema eléctricos usando Altium Designer", 2008.
5. D. M. Pozar, *Microwave Engineering*, Third ed., 2005.
6. G. R. Trujillo, "Diseño de redes de adaptación de impedancias mediante el empleo de una combinación de configuraciones atípicas y metamateriales.," Máster en telecomunicaciones y telemática, Instituto Superior Politécnico José Antonio Echeverría, La Habana, 2014.
7. E. P. Stincer, *Antenas. Teoría general*. C. Habana: ITM "José Martí", 2001.
8. E. C. Jordan, *Electromagnetic Waves and Radiating Systems*: Prentice-Hall, 1969.
9. D. R. Sánchez, "Diseño de un Sintonizador de Antena para onda corta controlado con microprocesador," Ingeniero en Telecomunicaciones y Electrónica, Instituto Superior Politécnico "José Antonio Echeverría" 2016.
10. J. Lourens, "A Wideband Monopole Antenna Design," Master Engineering, Department of Electrical & Electronic Engineering Stellenbosch University, 2014.

SOBRE LOS AUTORES

Larry García Aldana: Máster en Ciencias, Investigador Agregado en el Centro de Investigación Desarrollo y Producción Grito de Baire.

José R. Sandianes Gálvez: Doctor en Ciencias Técnicas, Profesor Titular del Departamento de Telemática y Telecomunicaciones en la Universidad Tecnológica de La Habana. Ha presentado trabajos en eventos de Informática y ha obtenido Premios Relevantes y Destacados en Fóruns de Ciencia y Técnica. Obtuvo el Premio Anual de la Academia de Ciencias de Cuba en 1999.

Miguel Borrego Corona: Doctor en Ciencias Técnicas, Profesor Auxiliar del Departamento de Telemática y Telecomunicaciones en la Universidad Tecnológica de La Habana e Investigador Auxiliar. Recibió la Orden Carlos J. Finlay.