

Diseño de Subsistemas de Transmisión y Puesta a Tierra de una Estación de Radiodifusión Comunitaria y Simulación de su Área de Cobertura

C. Hernández, R. Pineda, O. Valencia

Universidad Centroamericana José Simeón Cañas, Departamento de Electrónica e Informática,
Antiguo Cuscatlán, La Libertad, El Salvador.

00104911@uca.edu.sv, 00027411@uca.edu.sv, ovalencia@uca.edu.sv

Abstract— The present work was carried out in a community radio called Radio Copinula, 92.1 FM, which serves the municipalities of Guaymango and Jujutla. The coverage area of this radio was simulated using Radio Mobile, so the general settings and why they were chosen are presented. And then, the results of the simulation are contrasted to registries held by Radio Copinula regarding interference reports, issued by community listeners. The simulation is also helpful to assess the field intensity values in some areas that are known not to be covered by the broadcasted signals of the broadcast station. In addition, standing wave ratio (SWR) measurements were performed and the results are presented. Moreover, since it was verified that the grounding system of Radio Copinula was deteriorated, a grounding mesh is proposed for future implementation in the area of the station and administrative offices, such that it provides protection for people and equipment against atmospheric discharges. It is necessary to emphasize that the measurements performed in order to obtain the standing wave relationship were verified at the mathematical level by means of Smith's charts. Finally, the results and conclusions are presented.

Keywords—Community radios; transmitted power; impedance; resistivity; standing wave ratio; SWR; Radio Mobile; grounding systems; antennas; frequency modulation

I. INTRODUCCIÓN

Fue hasta 1992, después de la firma de los acuerdos de paz cuando las radios comunitarias empezaron a perfilarse como agentes de transmisión local para ciertas comunidades de interés. No faltó el descontento por las empresas privadas sobre otorgarles espacio gratis en el espectro electromagnético a estas radios, sin embargo, la Administración Nacional de Telecomunicaciones (ANTEL) fungió como organismo intercesor de este espacio dando ciertas soluciones ante la problemática de conceder tantas frecuencias libres y gratis. Una propuesta fue la de fragmentar la frecuencia y otorgar la misma a diferentes radios comunitarias, así cada una se desempeñaría sin problemas mientras respetara la zona de cobertura, esta y reducir el ancho de banda fueron algunas opciones que podían implementarse según ANTEL y fue por la que finalmente se optó luego de muchas trabas adquirieron la 92.1Fm. ARPAS, es una organización de radios, alrededor de

20 estaciones luchan por sobrevivir mes a mes con los recursos limitados. El panorama es bastante difícil ya que existen algunas como radio Copinula que ni siquiera están inscritas como tal a la SIGET. Una vez conocido un poco el desarrollo histórico, es momento de conocer su funcionamiento técnico, para eso hay ciertos conceptos que deben irse aclarando. Las partes más importantes en este proceso de comunicación podrían resumirse en: Consola de voz, radio enlace, transmisor, antena, receptor. En este mismo orden es como fluye la comunicación desde el locutor. Sin embargo, el punto más crítico en el proceso descrito es en la antena ya que puede existir una relación de ondas estacionarias o como sus siglas en inglés lo definen SWR (Standing Wave Ratio). Es la principal razón por la cual es tan importante ajustar el diseño de la antena y tener un control sobre la potencia radiada. Esta relación se utiliza para determinar cuánto de la potencia radiada está siendo reflejada hacia el transmisor ya que podría ocasionar daños y a la vez afecta el alcance en la cobertura que pueda llegar a tener el sistema, para este punto se simuló por medio de un software libre (Radio Mobile) la radio Copinula, que es el objetivo de estudio. Este programa permite calcular enlaces de radio móviles en el perfil real de cualquier terreno, se vale de los perfiles geográficos, así como también de las características más importantes en una estación de radio, por ejemplo. Su aproximación a la física real del comportamiento de las ondas electromagnéticas es consecuencia de tomar en cuenta factores como la potencia, ganancia en una antena; así como también las pérdidas reales que conlleva el cable y sus conectores. Como ya se mencionó previamente, existen ciertos efectos cuando se transmite en una radio, tales efectos no siempre son los más deseados. El SWR es de lo más perjudiciales en el equipo, es por eso que surge la necesidad de contar con equipo especializado para poder cuantificar la potencia que se refleja. Una de las maneras de medir este parámetro es por medio del MFJ-259C que es un aparato especializado en este y más variables cuantificables, además, puede utilizarse un vatímetro el cual tiene la capacidad de medir a potencia enviada por el equipo transmisor hacia la antena y también la potencia reflejada que retorna a dicho equipo, para posteriormente calcular el SWR mediante una ecuación sencilla. También se debe auxiliar de herramientas tales como la carta de Smith que ayudarán a corroborar datos obtenidos a través de los medidores indicados.

Por otra parte, como ya se mencionó previamente, en la actualidad la conexión a tierra es la base sobre la cual se construyen la seguridad y la calidad de la energía, la mayoría de los sistemas eléctricos deben ser aterrizados. Su realización es un tema muy amplio debido a que dependen del tipo de sistema, de acuerdo a su aplicación específicamente se tienen los sistemas a tierra para sistemas eléctricos, puesta a tierra de los equipos eléctricos, puesta a tierra en señales electrónicas, puesta a tierra de protección electrónica y puesta a tierra de protección atmosférica. Además, dependen de aspectos como la naturaleza y propiedades del suelo. El enfoque realizado es en la importancia de las protecciones de puesta a tierra de equipo e infraestructura y la seguridad de las personas con el objetivo de minimizar los riesgos, evitar daños para prevenir interrupciones del sistema, haciendo uso de las normas establecidas por el IEEE y la NOM que regulan el diseño e instalación de un buen sistema de puesta a tierra. Además, para poder comprender la cobertura de la radio y tener una aproximación bastante realista se desarrolla el modelo en Radio mobile, analizando cada característica requerida en el sistema, así como también es necesario realizar las mediciones pertinentes sobre el estado en el que se encuentra el suelo y su resistencia en específico, esta metodología se explica a continuación, para así tener una idea más concreta de las variables implicadas.

En el cuadro morado de la derecha están los parámetros ya mencionados que permiten darle vida al sistema y debajo de este el tipo de clima que generalmente se encuentra en la zona de cobertura.

II. METODOLOGÍA

A. Simulación del área de cobertura en Radio Mobile

El modelo cuenta con dos modos de operación, el primero se denomina “modo de área” y este como su nombre lo indica se basa en la zona donde se van a propagar las ondas, las pérdidas causadas por factores ambientales y todos esos parámetros estadísticos capaces de influir en la ruta de propagación [1]. El segundo modo de operación se le conoce como “modo de punto a punto” el cual toma en cuenta los perfiles del terreno donde estarán ubicados los transmisores y receptores, la latitud y longitud más específicamente. Para comprender mejor el modelo, es necesario especificar cada parámetro en el que se rige pues al basarse en la teoría del electromagnetismo y análisis estadístico está ligado ante las atenuaciones en función del espacio y tiempo. Estos parámetros son: Polarización, constante dieléctrica, refractividad de la superficie, conductividad de la tierra, tipos de clima. Para la simulación se deben de crear redes y especificar ciertos datos específicos del sistema en estudio tal como se muestra en la Fig. 1.

En el recuadro rojo se detalla el nombre de la red y debajo de este la banda de frecuencia en la que se podría llegar a encontrar la radio, consecuentemente en el cuadro amarillo esta el tipo de polarización de la antena utilizada. Y en el recuadro celeste las especificaciones de variabilidad asumiendo un modelo de difusión, así como pérdidas adicionales por bosques.



Fig. 1. Ventanilla de propiedades de Red

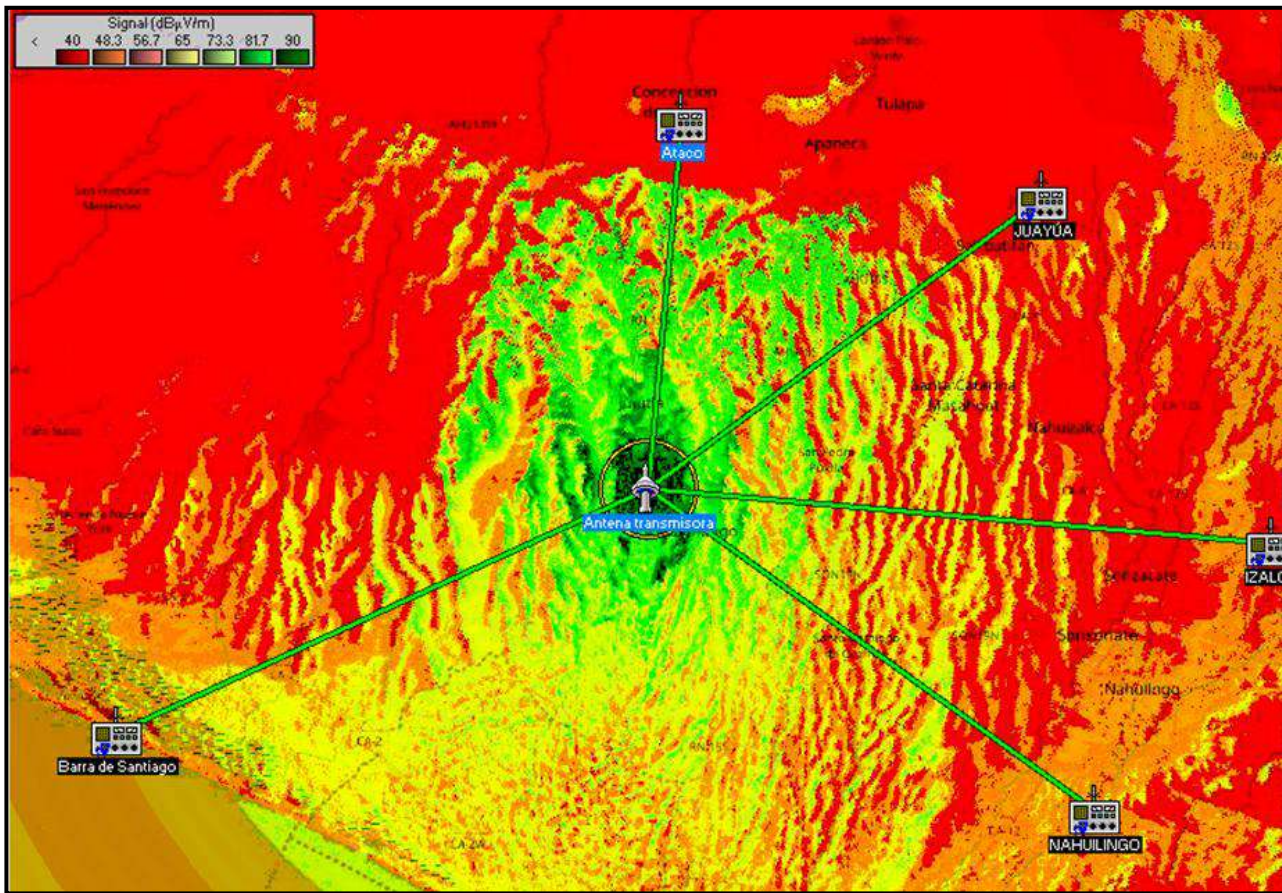


Fig. 2. Simulación del área de cobertura en Radio Mobile

Con el Sistema definido y diversos puntos colocados que fungen como receptores cualesquiera de la radio transmisora es posible llegar a observar la intensidad con la que llegaría la señal alrededor de la antena, como se muestra en la Fig. 2. Donde las zonas con un verde más oscuro representan la intensidad de campo más grande mientras que conforme el color vaya tornándose rojo representará las zonas que son menos alcanzables por las ondas electromagnéticas pues la intensidad de estas será menor en esos puntos. Para fines ilustrativos se simularon 4 enlaces ubicados en puntos geográficos reales de radio receptores normales y así tener un mejor panorama sobre el comportamiento en estos lugares.

Radio mobile estima el porcentaje de obstáculos que se encuentran en línea directa con el receptor y establece el tipo de calidad que tendrá la conexión. Tal cual se puede observar en la Fig. 3 entre la antena transmisora e Izalco el perfil de terreno cuenta con muchas montañas y es necesario recorrer metro a metro con el cursor este enlace para identificar las zonas donde la cobertura es menor que $54\text{dB}\mu\text{V/m}$, a 15.5 Km, por ejemplo. Sin embargo, no es lo único que debe de tomarse en cuenta ya que se puede observar el valor de Fresnel $= 0.6F1$. Esto supone que esta justo al límite de interferencia permitida, lo recomendable es que sea mayor o igual que 0.6.

B. Sistema de puesta a tierra

El rendimiento correcto del sistema de puesta a tierra está determinado por las propiedades y calidad de los

siguientes componentes, todos de igual importancia (Ver la Fig. 4).[2]

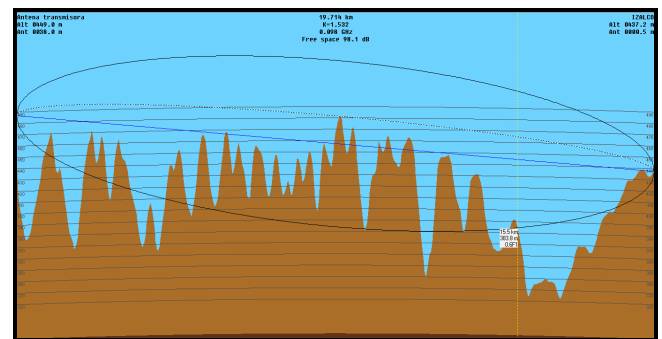


Fig. 3. Representación de Zona de Fresnel

- El conductor del electrodo de tierra
- Las conexiones a tierra
- El electrodo de tierra
- La naturaleza del suelo

Ahora se utilizará un método que establece una relación entre las tensiones de paso, contacto y la resistencia de puesta a tierra, para cada una de las configuraciones posibles y se sugiere la longitud mínima de los electrodos de puesta a tierra.

Para determinar la configuración se debe realizar el cálculo de un coeficiente K_r que representa la resistencia unitaria que al multiplicarlo por la resistividad del terreno, servirá para estimar la resistencia de puesta a tierra (R), la tensión de paso (U_{paso}) y la tensión de contacto ($U_{contacto}$).[3]

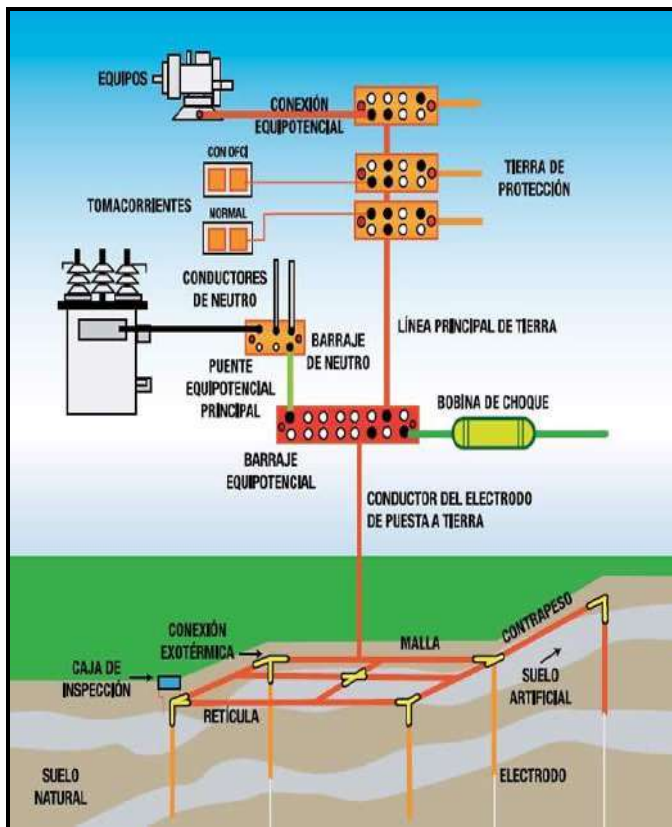


Fig. 4. Componentes de un sistema de puesta a tierra. Adaptado de Tierras soporte de seguridad eléctrica [2005,35]

Cálculo para determinar la configuración y la distancia mínima entre electrodos.

El valor de resistencia se fijó en 5 Ohms por ser equipo sensible. El valor de Resistividad se utiliza de 72.9 Ohm-metro

El valor de resistividad se elige el mayor obtenido en las mediciones de resistividad del terreno ya que en este se estaría evaluando en el peor de los casos según las mediciones según se muestra en la tabla I.

$$K_r = \frac{R}{\rho} \quad (1)$$

Donde:

ρ : Es la resistividad del terreno en ohm-m

R : Es la resistencia de puesta a tierra

La resistividad del suelo es uno de los componentes involucrados en una puesta a tierra, por lo que su medición se vuelve determinante para definir el mejor lugar, la

profundidad y el diseño correcto de la configuración de instalación de los electrodos del sistema de puesta a tierra.

En la Fig. 5 se presenta una de las mediciones de resistividad del terreno que se le realizó, por medio del Telurómetro.



Fig. 5. Medición de resistividad del suelo

C. Mediciones.

Todo analizador debe contar con un generador de radiofrecuencia, sea cual sea para la que este diseñado a sintonizar, para el caso del trabajo de graduación se sintonizó la 92.1Fm. El generador del MFJ-259C es de 5dBm [4]. En la Fig. 6 se puede observar que la frecuencia no es exactamente la 92.1fm



Fig. 6. Analizador MFJ-259C midiendo SWR

Sin embargo, es un error del orden de 0.02 hercios para efectos prácticos no significa alteraciones en los resultados, pues mientras se observaba el MFJ-259C osciló desde

92.098mHz hasta 92.124mHz mientras que el SWR se mantuvo intacto. Otro punto importante es observar la impedancia de la carga (o antena) donde a pesar de que la parte resistiva es bastante mayor que la inductancia no se puede considerar del todo resistiva. Esto provoca que en el SWR exista la relación 1:1.4

La otra forma que ya se mencionó es por medio de un vatímetro, midiendo la potencia desde el transmisor hacia la antena (potencia directa) y desde la antena hacia el transmisor (potencia reflejada) para así posteriormente aplicar (2) [5].

$$SWR = \frac{1 + \sqrt{\frac{P_r}{P_f}}}{1 - \sqrt{\frac{P_r}{P_f}}} \quad (2)$$

Las medidas se realizaron paso a paso, es decir, en primera instancia la pastilla se coloca en dirección desde el transmisor hacia la antena (ver Fig. 7), luego se coloca en la dirección contraria y se observa la medición para ponerlas en contraste

La medición de resistividad del terreno se realizó siguiendo el método de Wenner. Se inicia por insertar 4 electrodos de prueba en el terreno, alineadas y con separación constante “a” igual a 4 metros. Se enciende el equipo se oprime la tecla ρ que selecciona la función de resistividad, para introducir la separación entre electrodos de prueba se debe oprimir las teclas de fecha y selecciona 4 m y para obtener el valor de la medición de resistividad del suelo se oprime el botón de START.

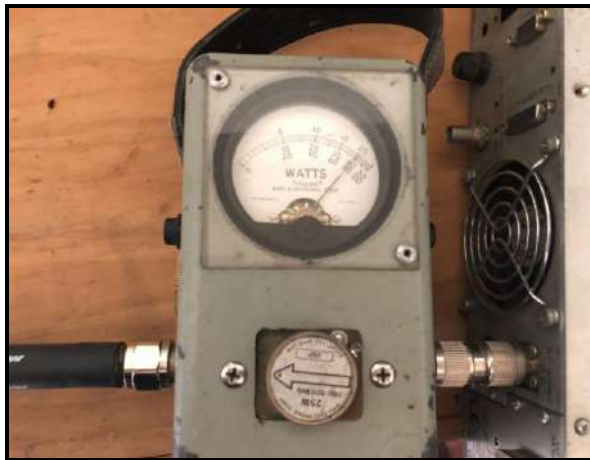


Fig. 7. Vatímetro midiendo potencia directa

Realizando un perímetro de 6 mediciones de resistividad se cubrió todo el terreno para conocer su homogeneidad. Los Resultados de mediciones realizadas se presentan en la tabla I.

Una vez tabulados los datos y las mediciones pertinentes realizadas se procede a desarrollar un mejor análisis de estos y proponer que cambios serán los más pertinentes que se le pueden realizar al sistema.

TABLA I:
VALORES DE RESISTIVIDAD DEL TERRENO

Medición	Resistividad (Ohms-metro)
Nº 1	41.6
Nº 2	34.00
Nº 3	49
Nº 4	40.5
Nº 5	79.2
Nº 6	40.5

III. ANÁLISIS DE LOS RESULTADOS

A. Cobertura de radio

Es necesario tener claro los rangos en los cuales se encuentra la intensidad de campo para el modelo del trabajo. Radio Mobile presenta diferentes unidades para representar esta, sin embargo, la relación más directa con lo establecido en la ley de telecomunicaciones¹ ocurre entre volt/metro y (dBµv)/m de acuerdo a (3) [6].

$$\frac{v}{m} = 10 \left(\frac{\frac{dB\mu v}{m} - 120}{20} \right) \quad (3)$$

Para tener una mejor idea se muestra a continuación en la Fig. 8 los colores correspondientes a cada intensidad de campo. Cabe recalcar que en la Fig. 8 el extremo inferior (color verde musgo) representa una intensidad de campo alta en (dBµv)/m y así es la disminución gradual en la paleta de colores representada hasta el extremo superior (color rojo) donde la señal será menor de 40 (dBµv)/m.

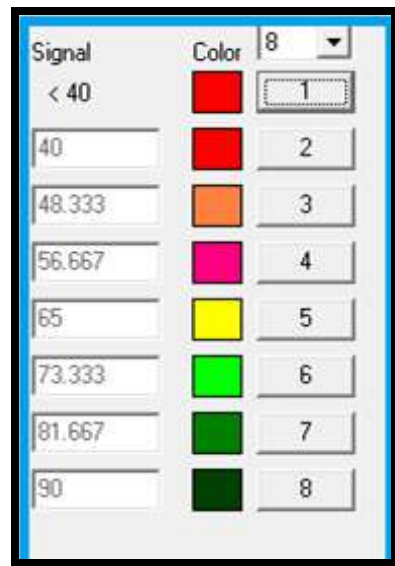


Fig. 8. Intensidades de campo

¹ Anexo E, CNAF 1997

TABLA II
 COMPARACIÓN DE ZONAS DE CUBERTURA SEGÚN RADIO MOBILE Y
 SEGÚN REGISTRO DE RADIO COPINULA

Zona	Zona Cubierta (software)	Zona cubierta (Dato práctico)
Barra de Santiago		O
Nahuilingo	O	X
Izalco	X	X
Juayua	X	X
Ataco	X	X

Ahora que se tiene una referencia más clara, en el software se simuló el escenario lo más real posible para contrastar con datos prácticos obtenidos en la radio sobre hasta donde estaban cubriendo. (Ver la Fig. 9)

Los datos brindados por radio Copinula son datos empíricos, obtenidos en las llamadas que recibían de sus radioescuchas. En la tabla II se puede observar una comparación entre los lugares alcanzables según Radio Mobile con los que según los locutores de la radio son los máximos cubiertos.

Las “O” significan que están siendo cubiertas, mientras que las “X” que están fuera de cobertura, como puede observarse la tabla II coincide en la mayoría de las ocasiones con el modelo realizado.

Cabe recalcar que las radios comunitarias no están estrictamente regidas por la SIGET sobre sus intensidades de campo en los límites periféricos; sin embargo, es algo que debe de tenerse como referencia ante futuros cambios en las leyes.

Por otra parte, es necesario saber si el SWR calculado con los datos obtenidos por el vatímetro es un valor cercano al obtenido con el analizador MFJ-259C.

En las mediciones previas se obtuvo una potencia directa de 20watts mientras que la reflejada era de 1 watt. Así, el valor de SWR sería el expresado por (4):

$$SWR = \frac{1 + \sqrt{\frac{1}{20}}}{1 - \sqrt{\frac{1}{20}}} = 1.5 \quad (4)$$

Este valor, según la UIT, es el máximo recomendado al cual puede operar un equipo de transmisión, en contraste el medido por el MFJ-259C varía 0.1 con el vatímetro, sin embargo, la precisión de este último es mejor, por tanto, el valor a tomar será de 1.5.

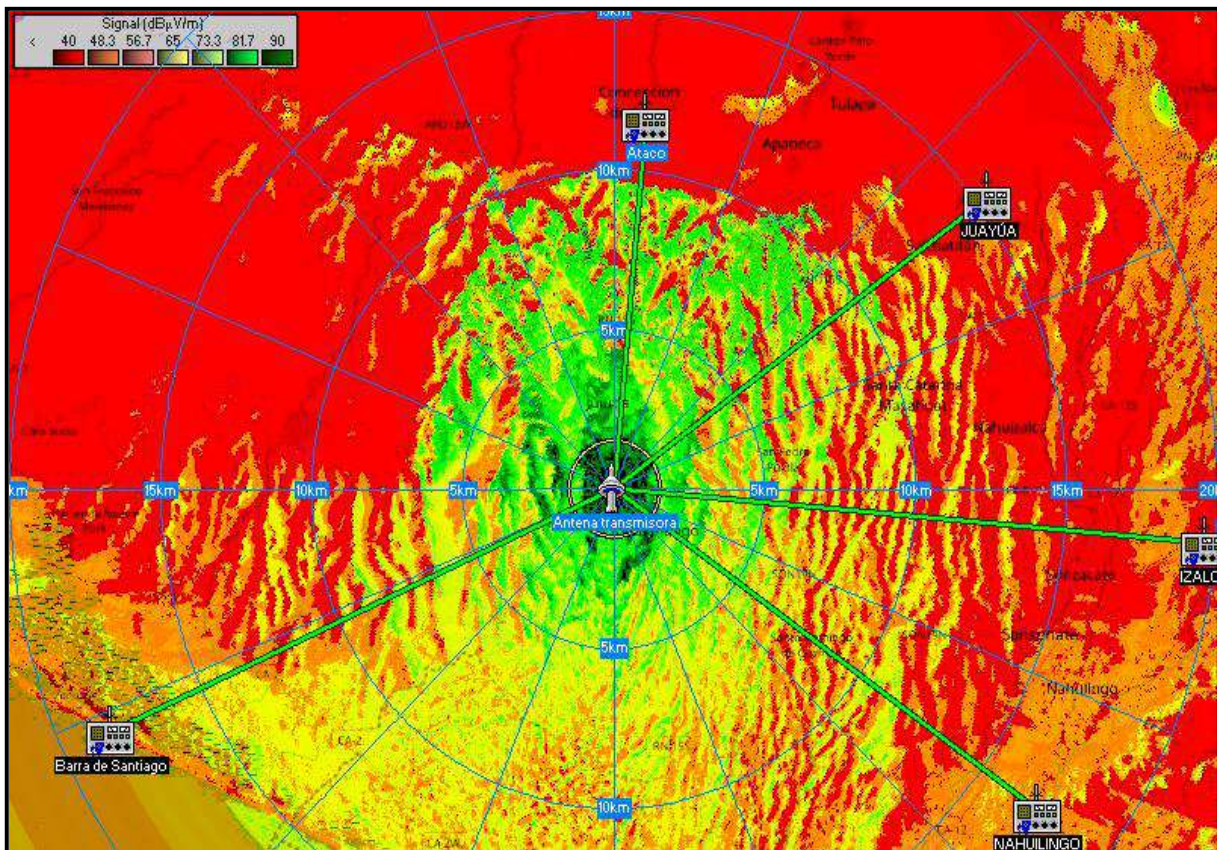


Fig. 9. Resultado final de modelo de radio

Existe una tercera manera de corroborar si los resultados obtenidos son correctos y es por medio de la carta de Smith. Esta se basa en la intersección de circunferencias en el plano Gaussiano, donde las curvas representan la relación que existe entre la parte resistiva de la antena con la impedancia característica de la línea.

Por otra parte, la otra serie de circunferencias representan la relación entre la parte imaginaria de la antena con la impedancia característica. En la Fig. 10 se observa la impedancia normalizada calculada previamente como un punto rojo, esta se crea de la intersección de la circunferencia resistiva (color celeste) de 0.74 y la circunferencia reactiva (color verde) de 0.16.

A partir del radio que se crea desde el centro de la carta (1.0) se crea una circunferencia nueva que determinará el SWR [7]. se puede observar el punto de color amarillo que su valor es de 1.42 aproximadamente, este concuerda con las mediciones realizadas con el MFJ-259-C y con una pequeña diferencia con el cálculo realizado gracias al vatímetro.

El coeficiente de reflexión es un parámetro que ayuda a saber la amplitud de la onda que se ha reflejado con respecto a la onda directa que se ha transmitido. Para calcular este, se puede utilizar de nuevo la carta de Smith, su magnitud se puede determinar gráficamente como el radio de la circunferencia del SWR.

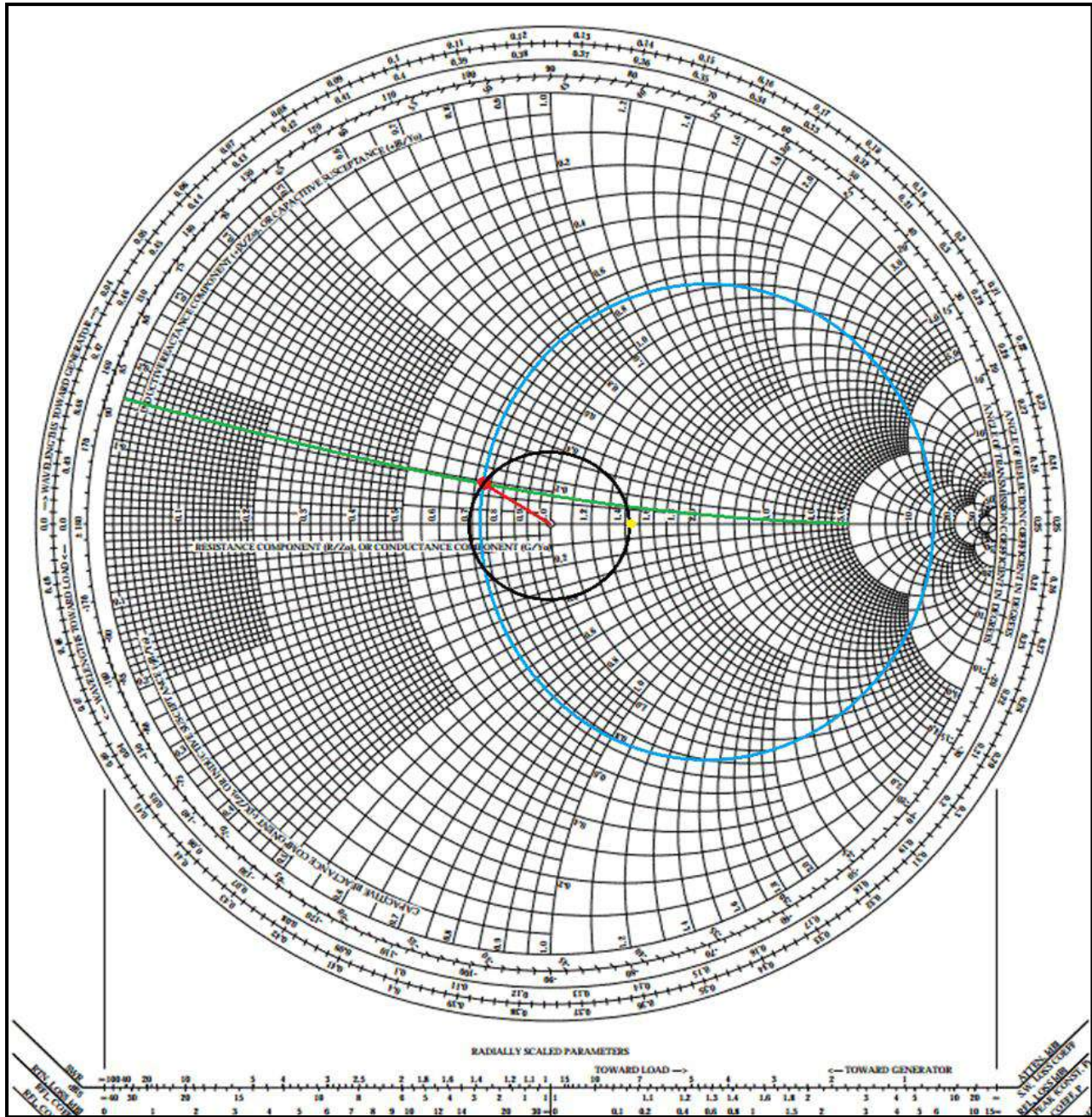


Fig. 10. Carta de Smith

Esta magnitud se debe desplazar hacia la gráfica inferior de la carta donde su origen es en el centro y debe medirse hacia la izquierda en el eje de "RFL COEFF" tal cual muestra la Fig. 11.

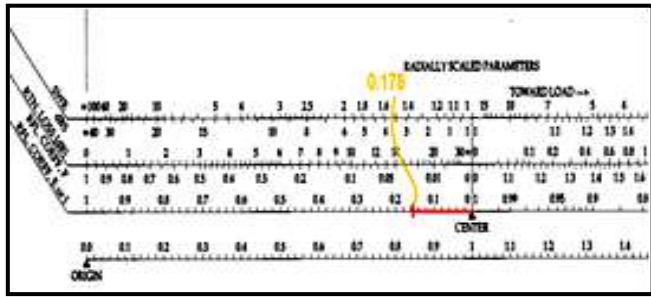


Fig. 11. Coeficiente de reflexión en la carta de Smith

Es necesario notar que la gráfica del coeficiente de reflexión es proporcional a la primera del SWR, si se traza una línea recta se encontrará el SWR que se mide aproximadamente de 1.4. Sin embargo, esto ayuda al análisis teórico, pues en la práctica para reducir el SWR y encontrar el mejor acople entre impedancias se ajusta la antena.

Es decir, de acuerdo al Ing Allen Vásquez (encargado del mantenimiento de más de 40 radios a nivel nacional) la opción comúnmente utilizada para minimizar el SWR es mover, a prueba y error, el ajustador de cada antena y realizar una medición simultanea del SWR. En la Fig. 12 se muestra un ejemplo de cómo es la antena utilizada en radio Copinula.



Fig. 12. Antena para FM con ajustador de impedancia

SISTEMA DE PUESTA A TIERRA (SPT)

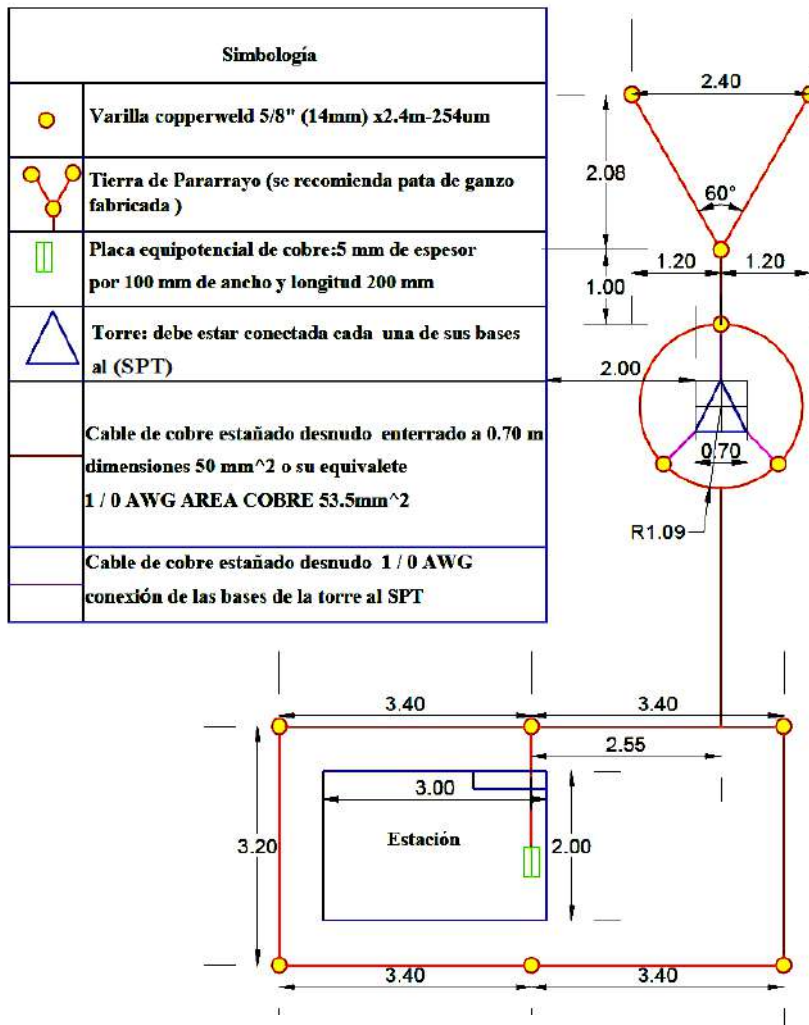


Fig. 13. Diseño de red te tierra

B. Análisis de red de tierra

La configuración con un $K_r=0.068$ es rectangular con 6 picas con longitud mínima de 2 metros y una distancia de 0.6 metros de la construcción. La conexión de los electrodos debe realizarse a una profundidad de 0.8 metros garantizando lo establecido en el NEC artículo 250-53 – (F) [8]. La Tabla III muestra los valores de la tensión de paso y de contacto para $K_r=0.068$

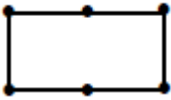
U_p =Tensión de paso=0.0143 V

U_c =Tensión de contacto=0.0302 V

El diseño sugerido de la red de tierra para la estación de radio Copinula se presenta en la Fig. 13.

TABLA III:

COEFICIENTES. ADAPTADO DE MANUAL TEÓRICO-PRÁCTICO SCHNEIDER
INSTALACIONES EN BAJA TENSIÓN

Configuración	L_p (m)	R_{K_r}	U_{paso} K_p	$U_{contacto}$ K_c
	2	0,068	0,0143	0,0302
	2	0,055	0,0108	0,0201
	6	0,046	0,0087	0,0148
	8	0,040	0,0072	0,0115

IV. CONCLUSIONES

Radio Mobile es una herramienta muy útil para tener como referencia siempre que se hará una investigación de cobertura en cualquier sistema de radio, la simulación ayudó a comprender distintas variables que afectaban la transmisión de la radio y por qué algunas zonas eran inalcanzables.

El ajustador de impedancias es un elemento imperativo en todas las antenas de transmisión, así como en el caso presentado es el responsable de variar la relación de ondas estacionarias al desplazarlo en la parte circular de la antena, provocando que la potencia reflejada disminuya o incremente dependiendo de la ubicación de este.

Si el ajuste de la antena se mueve tal que el SWR sea de uno, entonces la antena será completamente resonante a la frecuencia establecida en el transmisor y no existirá potencia reflejada en el sistema.

En este trabajo se presenta el diseño del sistema de puesta a tierra para la estación de antena de radio Copinula es importante, tener en cuenta que se realizó un estudio previo donde se midió la resistividad del sitio. Para conocer la naturaleza del terreno con la idea principal garantizar la seguridad eléctrica de equipo y personas ante la presencia de una descarga del tipo atmosférica.

La evaluación del sistema de puesta a tierra y el sistema de protección contra descargas de tipo atmosférica de la estación de antena de Radio Copinula presenta grandes deficiencias por lo que se sugiere contar con mano de obra calificada, que conozca el correcto funcionamiento del equipo y además las instrucciones de instalación con esto

garantice que la descarga eléctrica sea derivada al sistema de puesta a tierra.

REFERENCIAS

- [1] P. Dodd, *Amateur Radio Mobile Handbook*. Gran Bretaña: Radio Society of Great, 2011
- [2] C. Ospina, F. TIERRAS soporte de la seguridad eléctrica. Bogotá: ICONTEC, 2005.
- [3] Shneider electric, (2009, octubre 06) [online]. Available: <https://www.schneider-electric.es/es/download/document/600009K03/>
- [4] MFJ-ENTERPRISES, 2013 [online]. Available: <http://www.mfjenterprises.com/support.php?productid=MFJ-259C>
- [5] R. Luz, R. *Sistemas de radiocomunicaciones*. España: Grafica Eujoa (2015)
- [6] R. Richards, (2003, marzo, 03) [online]. Available: <http://emc.toprudder.com/formulas2.pdf>
- [7] J. Kraus, *ANTENNAS*. 2nd ed.. Ohio: McGraw-Hill, Inc, 1988.
- [8] Earley, M., Sargent, J., Coache, C. & Roux, R. *National Electrical Code Handbook*. Massachusetts: Copyright (2011)