

# **ANTENA REPETIDORA CON PLANO DE TIERRA AMC PARA APLICACIONES EN WI-FI HALLOW**

## *REPEATING ANTENNA WITH AMC GROUND PLANE FOR WI-FI HALLOW APPLICATIONS*

***Sergio Buenrostro Rocha***

Instituto Politécnico Nacional, México  
*sbuenrostro@citedi.mx*

***Roberto Herrera Charles***

Instituto Politécnico Nacional, México  
*robcharles@citedi.mx*

***Andrés Calvillo Téllez***

Instituto Politécnico Nacional, México  
*acalvillo@ipn.mx*

**Recepción:** 28/octubre/2020

**Aceptación:** 3/diciembre/2020

### **Resumen**

En este artículo se propone el diseño teórico de una antena basada en metamaterial de alta ganancia, alta eficiencia y de bajo perfil. La antena opera en el rango de frecuencias UHF de 854 a 954 MHz y puede ser implementada como un repetidor para el estándar de comunicación inalámbrica Wi-Fi HaLow (IEEE 802.11 ah), la cual opera en la banda libre de 900 MHz. La ganancia de la antena va desde los 5 dBi hasta los 9 dBi, con por lo menos 94% de eficiencia de radiación y un 11 % de ancho de banda fraccional. El tamaño de esta estructura de bajo perfil es de 308 x 308 x 20.29 mm (0.92 x 0.92 x 0.06  $\lambda_0$ ). La estructura consta de una antena dipolo acoplada a 50  $\Omega$  que es colocada sobre un plano de tierra de Conductor Magnético Artificial (AMC) con un arreglo de 4 x 4 celdas unitarias cuadradas. Esta antena también puede utilizarse como complemento al Internet de las cosas (IoT), cámaras de video y a las redes inalámbricas de sensores (WSN). Se presenta la metodología de diseño, y se reportan los resultados del análisis electromagnético.

**Palabras Clave:** Antena; Conductor Magnético Artificial (AMC), longitud de onda en el espacio libre ( $\lambda_0$ ), metamaterial, Wi-Fi HaLow.

## **Abstract**

*A metamaterial-based antenna with high-gain, high-efficiency, low-profile and improved bandwidth is theoretically proposed and analyzed in this paper. The antenna operates in the 854 at 954 MHz UHF frequency range and can be implemented as a repeater for the HaLow Wi-Fi wireless communication standard (IEEE 802.11ah), which operates in the 900 MHz free band. Antenna gain ranges from 5 dBi to 9 dBi, with at least 94% radiation efficiency and 11% fractional bandwidth. The size of this low-profile structure is 308 x 308 x 20.29 mm (0.92 x 0.92 x 0.06  $\lambda_0$ ). The structure consists of a 50  $\Omega$  dipole antenna which is placed over an Artificial Magnetic Conductor (AMC) ground plane with an array of 4 x 4 squared shaped unit cells. This antenna can also be used as a complement to the Internet of Things (IoT), video cameras and Wireless Sensor Networks (WSN). The design methodology of the antenna is presented, and the results of the electromagnetic analysis are reported.*

**Keywords:** Antena, Artificial Magnetic Conductor (AMC), free space wavelength ( $\lambda_0$ ), metamaterial, Wi-Fi HaLow.

## **1. Introducción**

La demanda de acceso a internet ha incrementado exponencialmente los últimos años, tanto por usuarios y por dispositivos electrónicos. El aumento de la población mundial requiere que se incrementen las áreas de cobertura de este. Existen comunidades rurales de difícil acceso y que no pueden costear la extensión y mantenimiento del cableado que llegue hasta a ellos. Los enlaces inalámbricos son una solución rápida y económica a esta problemática, por lo que se requieren antenas que exhiban un alto rendimiento.

El Wi-Fi ha ido evolucionando, buscando una conexión inalámbrica cada vez mejor y más rápida. El estándar HaLow IEEE 802.11ah está diseñado para trabajar en las bandas VHF y UHF. Entre sus ventajas tenemos que puede comunicarse a través de edificios, grandes recintos, y largas extensiones de zonas rurales, entre otros como se puede apreciar en la figura 1.

Con la aparición de Internet de las cosas (IoT) y la tendencia a la miniaturización para hacer que cada objeto sea más inteligente y pequeño, la imperiosa necesidad

de pensar todas las cosas está creciendo cada vez más rápido. Se estima que el número instalado de sensores IoT alcanzará más de 20 mil millones de unidades.

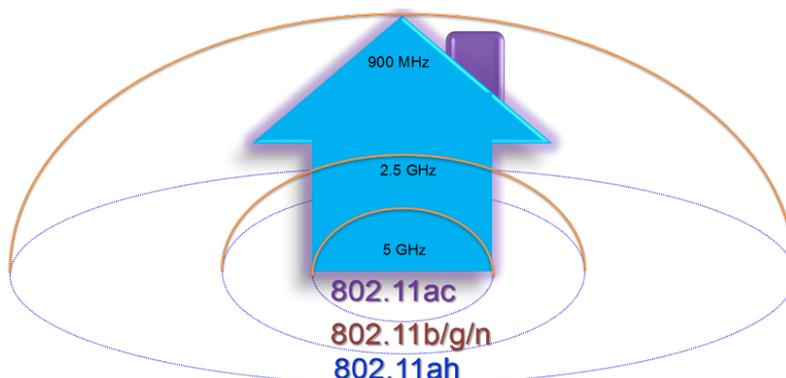


Figura 1 Cobertura de Wi-Fi estándar IEEE 802.11b/g/n/ah.

Los protocolos de comunicación inalámbrica conocidos como redes de área amplia de baja potencia (LPWAN) están impulsando la inserción de implementaciones IoT en ciudades que cuentan con tecnología inteligentes, que requieren comunicación bidireccional de datos e información. Recientemente ha despertado el interés de comunidades de robótica y mecatrónica por el desarrollo de sistemas IoT que empleen menor potencia, tengan una mayor cobertura, y sean más eficientes en su sistema de comunicación. Estos sistemas embebidos de IoT son referenciados como micro plataformas de múltiples sensores separados por una gran distancia y que se comunican con un radiotransmisor en la banda de 900 MHz. El estándar IEEE 802.11 ah (Wifi HaLow) tiene como objetivo una red de cobertura amplia y largo alcance, escalable y de baja velocidad de datos [Kumar, 2017]. En la figura 2 se puede apreciar algunas de las coberturas que se pueden obtener de las aplicaciones típicas en la frecuencia de banda libre de los 900 MHz, incluyen Internet de las cosas, Industria 4.0, domótica y monitoreo de la salud estructural de los edificios [Bellier, 2018]. El conductor magnético artificial (AMC) es un metamaterial implementado en el diseño de antenas. Sus características mejoran el rendimiento de su estructura, que proporciona flexibilidad para manipular los comportamientos electromagnéticos de la antena [Dewan, 2017].

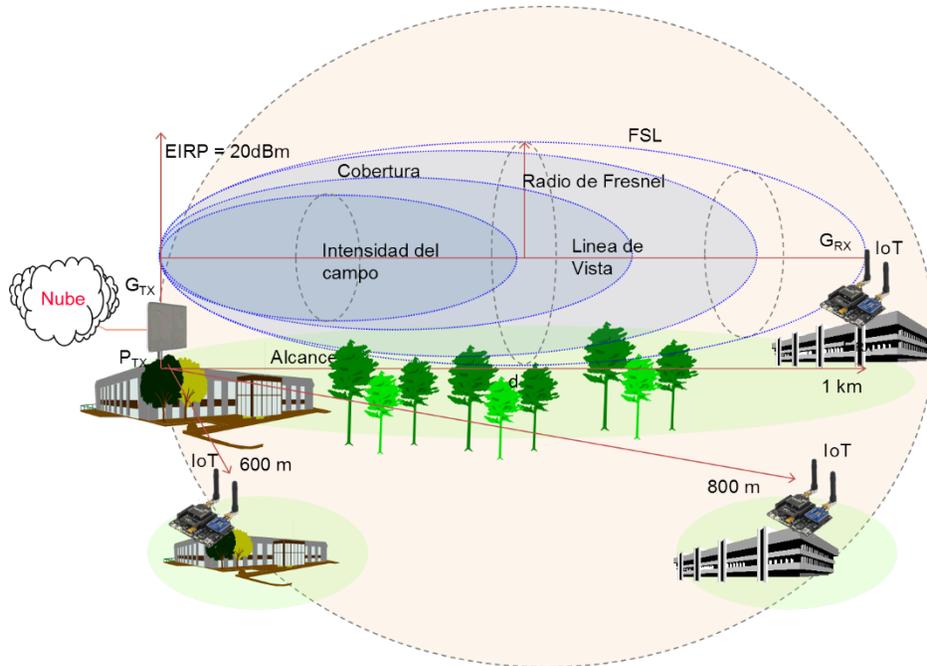


Figura 2 Alcance de la cobertura de Wi-Fi estándar IEEE 802.11 ah.

Las antenas con plano de tierra experimentan un fenómeno llamado “reflexión fuera de fase” y es importante abordarlos de apropiadamente para reducir la interferencia que puede generar al radio enlace inalámbrico. A continuación, se explica esta propiedad. Las antenas dipolo son unas de las más utilizadas en las comunicaciones inalámbricas. Una de sus desventajas es que, si se coloca adyacente a una hoja de metal, sus propiedades de radiación son afectadas de manera importante. Esto ocurre porque al aproximarse, en el plano de tierra se genera una corriente de imagen, que es igual en magnitud, pero opuesta en fase, y cancela el campo electromagnético de la corriente en el dipolo. Dicho en otras palabras, la fase de la onda que incide es invertida después de reflejarse, resultando de esta manera en una interferencia destructiva debido al cambio de fase de 180 ° con respecto a la onda emitida en la otra dirección del dipolo [Sievenpiper, 1999]. Si el dipolo se encuentra muy aproximado a la superficie metálica, se produce un cortocircuito y se emite una radiación insignificante. En términos de las propiedades de antena, esto provoca una importante reducción en la eficiencia de radiación, ganancia y resistencia a la radiación. Como consecuencia, la impedancia de entrada de antena cambia drásticamente y el ancho de banda se reduce en gran medida, lo

que conduce a ocurra un desacoplamiento de impedancias entre el puerto del dipolo y el puerto de la línea de transmisión de  $50 \Omega$ . Si el plano de tierra se coloca a la distancia apropiada, es posible redirigir la mitad de la radiación en la dirección opuesta, mejorando la ganancia del dipolo en +3 dB.

Para obtener el mejor rendimiento posible, la antena y el plano de tierra deben estar separados a  $\frac{1}{4} \lambda_0$  (longitud de onda en el espacio libre  $\lambda_0$ ).

Esto es porque el cambio de fase desde el dipolo al plano de tierra es de  $90^\circ$  y el retorno a la antena también es de  $90^\circ$ , por lo que tiene un desplazamiento total de medio ciclo ( $180^\circ$ ), y esto lleva a que las ondas se acumulen en el espacio de manera constructiva y mejorando las propiedades de radiación del dipolo [Sievenpiper, 1999]. Por lo general, el aire, FR-4 y otros dieléctricos son utilizados como separadores entre la antena y el plano de tierra. La desventaja de alejar a ambas  $\frac{1}{4} \lambda_0$ , es que se obtiene un perfil muy grande, lo que incrementa los costos de fabricación.

Otra opción es el empleo del conductor magnético artificial (AMC) como plano de tierra. La propiedad exótica de este tipo de metamaterial se llama "reflexión en fase", y puede proporcionar mejoras importantes al rendimiento de las antenas, y a su vez permitiendo su aproximación al plano de tierra sin generar un impacto negativo.

Cuando las ondas radiadas por el dipolo inciden en un plano de tierra AMC, estas se reflejan en fase ( $0^\circ$ ) a la frecuencia de resonancia y se acumulan en el espacio de manera constructiva con las ondas emitidas en la otra dirección del dipolo. El rango de frecuencias donde la fase de reflexión ocurre dentro de  $\pm 90^\circ$ , también puede generar interferencia constructiva y se le denomina ancho de banda de reflexión en fase. Las frecuencias que no se encuentren en este rango se reflejan fuera de fase.

Los AMC imponen una serie de condiciones de frontera a los campos eléctricos y magnéticos que son compatibles con la distribución del campo asociado con la antena dipolo adyacente, introduciendo así condiciones de circuito abierto. Esto hace posible que un dipolo pueda acercarse a un plano de tierra a una distancia mucho menor que la longitud de onda sin inducir corrientes imagen fuera de fase que reduzcan la impedancia y la potencia radiada de la antena.

De esta manera, es posible la reducción del perfil de la antena, reduciendo su perfil. Otras ventajas significativas son las mejoras en el ancho de banda, en el patrón de radiación, la eficiencia de radiación, la ganancia y la relación frontal/trasera. El AMC fue propuesto por [Sievenpiper, 1999] y consiste en una estructura similar a un hongo que se divide en cuatro partes: un plano de tierra, un sustrato dieléctrico, parches metálicos cuadrados (celdas unitarias) y vías de conexión.

En este trabajo de investigación se propone el diseño de una antena repetidora para Wi-Fi Halow en la banda UHF de 900 MHz con plano de tierra de conductor magnético artificial (AMC) con la finalidad de lograr distancias de comunicación inalámbrica mayores a 1 kilómetro.

## 2. Métodos

La metodología seguida para el diseño de la antena repetidora a 900 MHz se comenta a continuación.

### Diseño del dipolo

Se diseña una antena dipolo de  $50 \Omega$  para el espacio libre a 915 MHz cuya longitud ( $dl$ ) fue calculada con la ecuación 1, su radio ( $dr$ ) con la ecuación 2 y la distancia entre terminales del dipolo ecuación 3.

$$dl[mm] = \frac{\lambda_0}{2} (0.934) = \frac{c}{2f} (0.934) = \frac{c}{2(915 \times 10^6)} (0.934) = 153.11 \text{ mm} \quad (1)$$

$$dr[mm] = 3f(f^{-1.3}) = 3 \cdot (0.915) \cdot (0.915^{-1.3}) = 3.08 \text{ mm} \quad (2)$$

$$dg[mm] = \frac{dr}{2} = 1.54 \text{ mm} \quad (3)$$

Donde  $c$  representa a la velocidad de la luz en el vacío y  $f$  a la frecuencia de operación. Como resultado, se obtuvo una antena con un rango de operación desde 870 a 960 MHz, con una ganancia máxima de 2.37 dBi y una eficiencia de 98 % a la frecuencia de 915 MHz.

A causa del efecto de bordes del dipolo, la longitud real será algo inferior, por lo que se utiliza un factor de corrección del 93.4%.

### Diseño de la celda unitaria

El AMC es un arreglo periódico bidimensional de parches metálicos que son grabados en la superficie de un sustrato dieléctrico que contiene un plano de tierra. Todos los elementos están conectados al plano de tierra con vías conductoras metálicas. Las características electromagnéticas del AMC, como la frecuencia de resonancia y el ancho de banda, pueden ser ajustadas modificando el ancho del parche  $W$ , separación entre parches  $g$ , radio de las vías  $r$ , espesor del sustrato  $t$  y constante dieléctrica relativa  $\epsilon_r$ . En [Yang, 2003] proponen calcular las dimensiones iniciales de un plano de tierra AMC finito mediante las ecuaciones 4 a 7.

$$W = 0.12\lambda_0 \quad (4)$$

$$g = 0.02\lambda_0 \quad (5)$$

$$h = 0.04\lambda_0 \quad (6)$$

$$r = 0.005\lambda_0 \quad (7)$$

Una vez calculadas las dimensiones iniciales del AMC, con el fin de conocer con mayor precisión la fase de reflexión, se procede a realizar el análisis electromagnético mediante la paquetería HFSS y se sintoniza de tal manera que cubra el rango de frecuencias de interés. En la figura 3, se muestra una celda unitaria que es analizada de tal manera que se simula un arreglo bidimensional infinito de la misma [Raza, 2012].

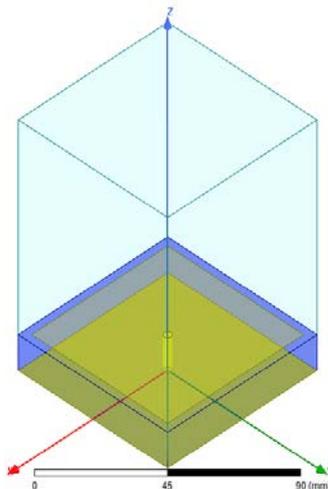


Figura 3 Análisis de un arreglo bidimensional infinito.

En la figura 4 se observa la fase de reflexión cero a 912.1 MHz y un ancho de banda de reflexión en fase a  $\pm 90^\circ$  de 13.72% que va de los 850 a los 975 MHz. Las dimensiones de la celda unitaria se muestran en la tabla 1.

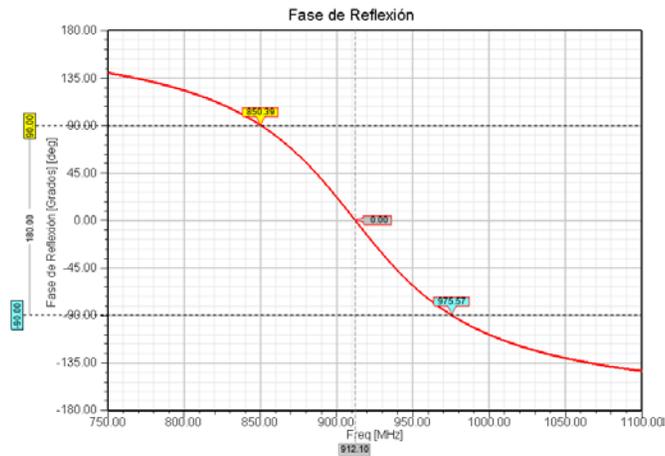


Figura 4 Reflexión de fase del AMC de tamaño infinito.

### Combinación del dipolo y el AMC

El AMC se coloca en la parte posterior de la antena dipolo. Esto genera una capacitancia parasita que hace que ambas estructuras se tengan que resintonizar de nuevo. El número de celdas unitarias está optimizado para obtener una alta ganancia, un bajo perfil y buen ancho de banda. La estructura con 16 celdas unitarias se ilustra en la figura 5a y 5b. Las dimensiones finales de la combinación del AMC y el dipolo se muestran en la tabla 1.

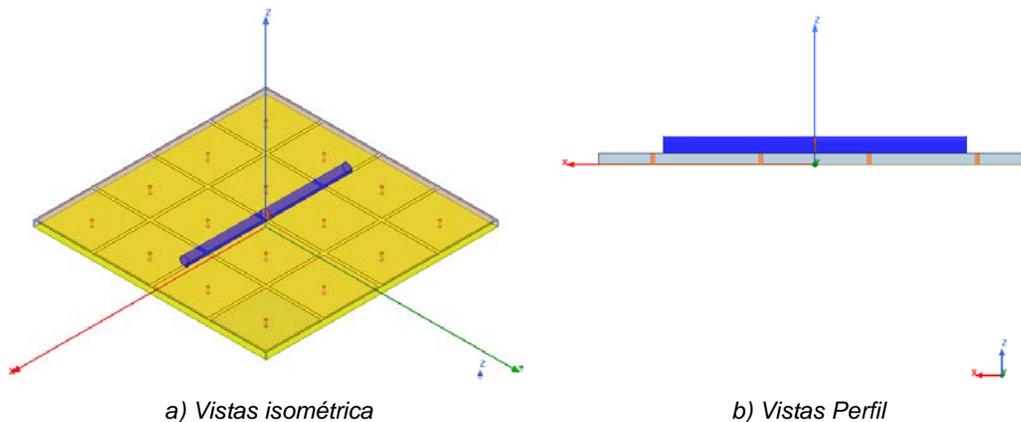


Figura 5 Vistas isométrica y Perfil.

Tabla1 Dimensiones del Dipolo, de celda unitaria y de la antena con plano de tierra AMC.

Celda Unitaria	Variable	Longitud [mm]
Largo y ancho del parche	$w$	65 x 65
Separación entre parches	$g$	6.55
Periodicidad	$d$	71.55
Radio de las vías	$r$	1.64
Espesor del dieléctrico	$t$	13.11
Combinación Dipolo y AMC	Variable	Longitud [mm]
Radio del dipolo	$dr$	6
Longitud del dipolo	$dl$	216
Distancia entre terminales del dipolo	$dg$	0.8
Largo y ancho del plano de tierra	$gp$	308 x 308
Distancia dipolo - plano de tierra	$dh$	8.29
Distancia parche - dipolo	$d_{pd}$	0.1
Largo y ancho del parche	$w$	73 x 73
Separación entre parches	$g$	4
Periodicidad	$d$	77
Radio de las vías	$r$	1.64
Espesor del dieléctrico	$t$	8.19

### 3. Resultados

En esta sección se presentan los resultados finales del análisis electromagnético de la antena dipolo con el plano de tierra AMC de 4 x 4 celdas unitarias.

El Instituto Federal de Telecomunicaciones (IFT) publica a través del Cuadro Nacional de Atribución de Frecuencias (CNAF), ha listado de todas las frecuencias del espectro en México, describiendo su empleo e indicando las bandas que son para uso libre. Asignando una Potencia Isotrópica Radiada Equivalente (PIRE) de 4 Watts en la banda de radiofrecuencia de 902 a 928 MHz clasificada como espectro libre. En la tabla 2 se muestra la mejora en el ahorro de 9 dBW de potencia resultado de la diferencia de potencias de transmisión de 33 dBmW y 24 dBmW.

Tabla 2 PIRE=Ganancia de antena transmisora + Potencia del transmisor.

PIRE	$G_{TX}$	$P_T$
4 W = 36 dBmW	3 dBi	33 dBmW
4 W = 36 dBmW	6 dBi	30 dBmW
4 W = 36 dBmW	9 dBi	27 dBmW
4 W = 36 dBmW	12 dBi	24 dBmW

En la figura 6, se muestra el S11 de la antena, y se puede observar que el ancho de banda de operación va desde los 854 MHz a los 954 MHz.

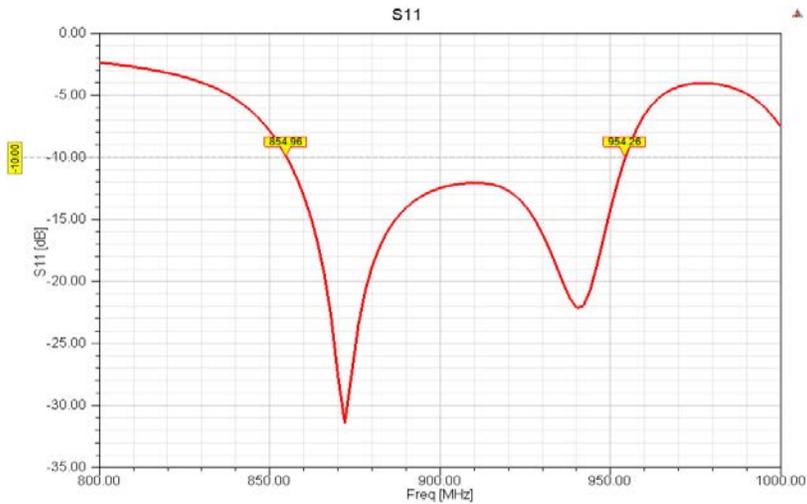


Figura 6 S11 y Ancho de Banda.

En la figura 7 se muestra la alta ganancia, alta directividad y eficiencia de la antena. Como se puede observar, la ganancia va desde los 4.67 hasta los 8.13 dBi. Como se puede observar, la directividad es muy parecida a la ganancia en todo el rango de frecuencias, por lo que la eficiencia de radiación va desde el 94.07 hasta el 97.62%.

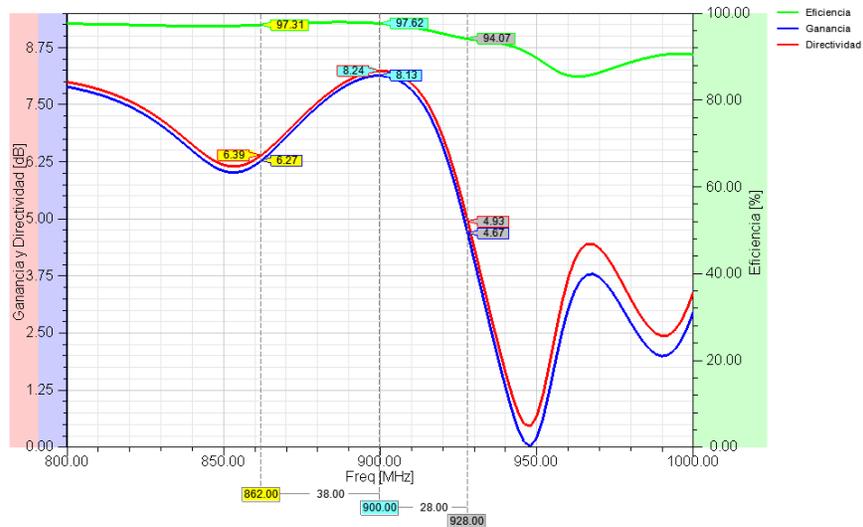


Figura 7 Ganancia, Directividad y Eficiencia.

En la figura 8 se puede observar la forma del patrón de radiación en 3D y la dirección de máxima radiación con respecto al plano de tierra.

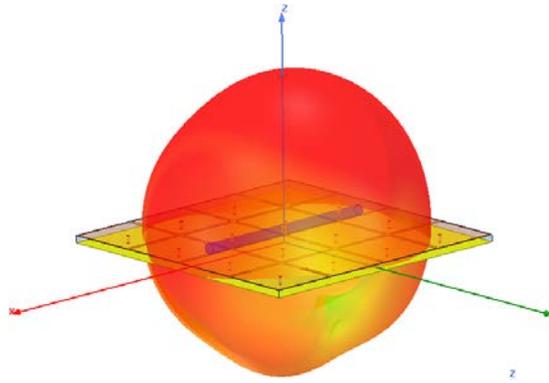


Figura 8 Patrón de radiación 3D para 900 MHz.

La figura 9 se muestra el patrón de radiación en 2D donde se pueden apreciar los campos eléctrico y magnético.

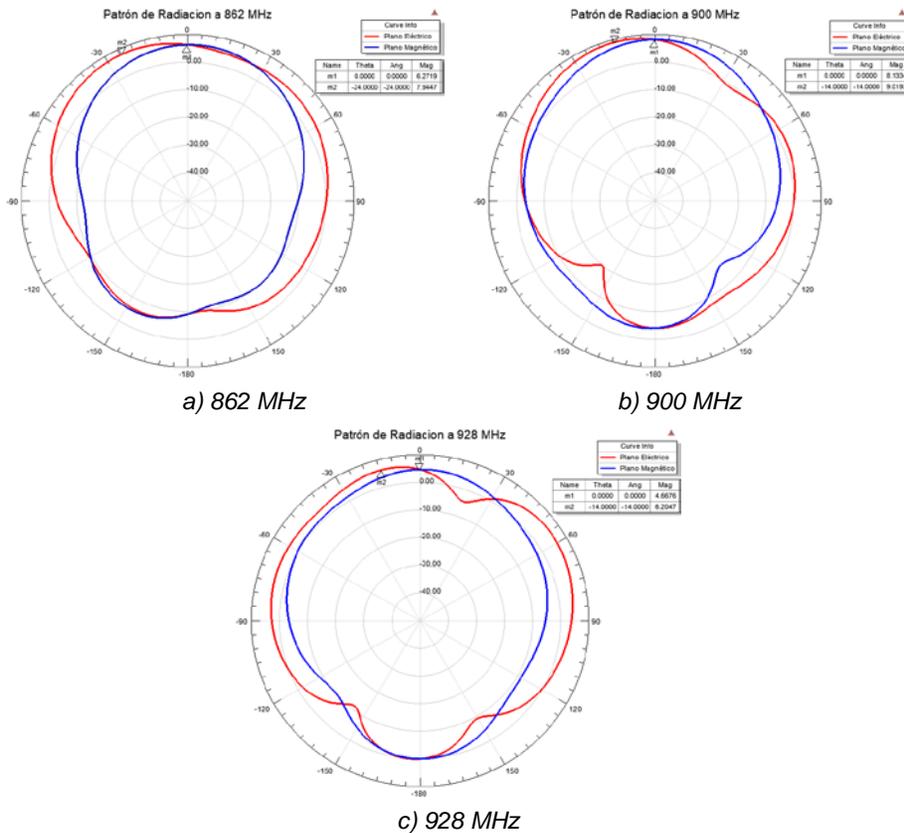


Figura 9 Patrón de radiación 2D. Campo Eléctrico y Magnético.

En la figura 9a se muestra el patrón de radiación a la frecuencia de 862 MHz. Se puede observar que a 0° (línea de vista) se tiene una ganancia de 6.27 dBi y a -24°

se tiene una ganancia mayor que es de 7.94 dBi. En la figura 9b se muestra el patrón de radiación a la frecuencia de 900 MHz. Se puede observar que a 0° (línea de vista) se tiene una ganancia de 8.13 dBi y a -14° se tiene la ganancia máxima de 9.01 dBi. En la figura 9c se muestra el patrón de radiación a la frecuencia de 928 MHz. Se puede observar que a 0° (línea de vista) se tiene una ganancia de 4.66 dBi y a -14° se tiene una ganancia de 6.2 dBi.

#### **4. Discusión**

En este trabajo de investigación se propone el diseño y análisis teórico de una antena que puede ser utilizada como repetidora de RF para dotar de conexión a internet a las zonas rurales o de difícil acceso. El estándar de comunicación inalámbrica para la cual fue diseñada es la IEEE 802.11ah (Wi-Fi Hallow), que opera en la banda libre de 900 MHz. Esta antena de bajo perfil posee un plano de tierra de Conductor Magnético Artificial "AMC" el cual proporciona mejoras a su rendimiento. El AMC está compuesto por un arreglo de 4 x 4 celdas unitarias cuadradas. Se presentaron los resultados del análisis electromagnético, donde se observa que, a 900 MHz, la ganancia y la eficiencia de radiación máximos son de 8.13 dBi y 97.62 %. Estas excelentes propiedades de radiación permiten alcanzar mayores distancias de enlace inalámbrico por medio de línea de vista. Además, presenta un ancho de banda fraccional del 11 %, el cual cubre satisfactoriamente el rango de frecuencias de Wi-Fi Halow.

#### **5. Bibliografía y Referencias**

- [1] Bankov, Dmitry & Khorov, Evgeny & Kureev, Aleksey & Lyakhov, A. (2016). Improving Efficiency of Heterogeneous Wi-Fi Networks with Energy-Limited Devices. 9870. 181-192. 10.1007/978-3-319-46301-8\_15.
- [2] Dewan, R, Rahim, MKA, Hamid, MR, Artificial magnetic conductor for various antenna applications: An overview. Int J RF Microw Comput Aided Eng. <https://doi.org/10.1002/mmce.21105>, 2017.
- [3] Bellier P., P. Laurent, S. Stoukatch, F. Dupont, L. Joris, and M. Kraft, Autonomous micro-platform for multisensors with an advanced power

- management unit (PMU), *Journal of Sensors and Sensor Systems*, vol. 7, no. 1. *Journal of Sensors and Sensor Systems*, pp. 299–308, 2018.
- [4] Khorov, Evgeny & Lyakhov, A. & Krotov, Alexander & Guschin, Andrey. (2015). A survey on IEEE 802.11 ah: An Enabling Networking Technology for Smart Cities. *Computer Communications*. 58. 53-69. 10.1016/j.comcom.2014.08.008.
- [5] Kumar, Rakesh & Chaudhari, Shashikanth & Jain, Manoj. (2017). LD-IoT: Long Distance Outdoor Networking for 802.11ah based IoT.
- [6] Raza, Shahzad. Characterization of the reflection and dispersion properties of Mushroom'-Related Structures and Their Application to Antennas. University of Toronto, Canada, 2012.
- [7] Sievenpiper D., High-impedance electromagnetic surfaces, Ph.D. dissertation, Dept. Elect. Eng. Univ. California at Los Angeles, Los Angeles, CA, 1999.
- [8] Sievenpiper, Dan, Lijun Zhang, Romulo FJ Broas, Nicholas G. Alexopolous, and Eli Yablonovitch. High-impedance electromagnetic surfaces with a forbidden frequency band. *IEEE Transactions on Microwave Theory and techniques* 47, no. 11, pp. 2059-2074, 1999.
- [9] Yang F. and Y. Rahmat-Samii, Microstrip antennas integrated with electromagnetic band-gap (EBG) structures: a low mutual coupling design for array applications. *IEEE Trans. Antennas Propag.*, vol. 51, no. 10, pp. 2936-2946, October 2003.