

CONFORMACIÓN DEL DIAGRAMA DE RADIACIÓN DE UN MONOPOLO EN L

Aurora Andújar⁽¹⁾, Jaume Anguera^(1,2), Carles Puente^(1,3), Cristina Picher⁽¹⁾

aurora.andujar@fractus.com, jaume.anguera@fractus.com

⁽¹⁾ Dpto. de Tecnología y Propiedad Intelectual. Fractus, C.P.08174, Barcelona

⁽²⁾ Dpto. de Electrónica y Comunicaciones. Universidad Ramon Llull, C.P.08022, Barcelona

⁽³⁾ Dpto. de Teoría de la Señal y Comunicaciones. Universidad Politécnica de Cataluña, C.P.08034, Barcelona

Abstract- The typical radiation pattern of an L-monopole antenna can be easily modified by changing the geometrical characteristics of the structure. To shape a specific radiation pattern through a basic structure becomes an interesting freedom degree in order to better adapt the behaviour of the antenna to the design specifications. Thus, to solve the question, an accurate analysis following the radiated field basic equations has been carried out. The theoretical study is validated through a simulation and experimental process. The results depict three main regions, delimited by geometrical boundaries, where the L-shaped wire antenna present three specific radiation pattern types, a monopole-type, a half isotropic type or even, a patch-type radiation pattern. Consequently, the method described herein demonstrates that simple modifications applied to the geometry of a basic structure, allow obtaining radiation properties associated to more complex structures.

I. INTRODUCCIÓN

La antena tipo monopolo en L es una estructura extensamente analizada en la literatura. En [1], los esfuerzos se dirigen principalmente a la determinación de su impedancia de entrada. Del mismo modo, [2] propone un circuito equivalente a partir de una línea de transmisión $\lambda/4$ para determinar no sólo la impedancia de entrada de la estructura sino también la distribución de corrientes de la misma. Posteriormente, [3] realiza un análisis de la impedancia de entrada y la distribución de corrientes de un monopolo cargado, estructura comparable a la de un monopolo en L. Sin embargo, ninguna de las referencias anteriores estudia las propiedades del diagrama de radiación. No obstante, en [4] es posible determinar que como resultado a la acción de doblar una línea de transmisión $\lambda/4$ se obtiene un diagrama de radiación toroidal, el cual es asociado perfectamente a la radiación propia de un dipolo corto. El estudio implementado no considera longitudes diferentes a $\lambda/4$ por lo que los diagramas de radiación obtenidos se limitan a aquellos producidos por el típico monopolo. Adicionalmente, [5] propone métodos analíticos sencillos para calcular el diagrama de radiación de antenas tipo hilo teniendo en cuenta los efectos producidos por la proximidad de un material de alta impedancia. Del mismo modo, otros métodos analíticos han sido utilizados en [6] para determinar la distribución de corrientes de antenas tipo hilo en espacios con pérdidas.

La literatura concerniente a este tipo de antenas que se encarga de analizar la distribución de corrientes y los campos eléctricos producidos, tan sólo considera longitudes comparables a $\lambda/4$, las cuales dan lugar al diagrama de

radiación propio de un monopolo [7]. Como consecuencia, este estudio propone un método sencillo para determinar las propiedades de radiación de un monopolo en L a partir de su geometría considerando longitudes superiores a $\lambda/4$ y teniendo en cuenta el ratio entre la longitud del brazo horizontal (L_x) y la longitud del brazo vertical (h) (Fig. 1). Esta propuesta proporciona un importante grado de libertad, ya que simplemente modificando la geometría de la antena se puede conformar su diagrama de acuerdo a las especificaciones requeridas. De este modo y mediante el ajuste de este ratio, es posible obtener un diagrama de radiación tipo monopolo, un diagrama de radiación propio de un parche e incluso un diagrama de radiación casi isotrópico. Es importante destacar que existen otros métodos en la literatura para conformar diagramas de radiación casi isotrópicos. No obstante estos están basados en estructuras complejas como la combinación de monopolos y ranuras desarrollada en [8] o la antena propuesta en [9] formada por cuatro brazos doblados montados sobre una esfera.

La estructura de esta publicación está organizada de la siguiente manera. En primer lugar (sección II), se presenta un estudio teórico basado en la teoría de imágenes que permite determinar el efecto de la geometría sobre el diagrama de radiación de la antena. A lo largo de la sección III se establecen las condiciones necesarias para conseguir un diagrama de radiación propio de un monopolo, de un parche en su modo fundamental, e incluso aquel que consigue una radiación isotrópica en el semiplano superior. En este caso se considera una distribución de corrientes sinusoidal próxima a la realidad aunque el estudio detallado considerando otras aproximaciones de distribución de corrientes puede encontrarse en [10]. A continuación (sección IV), se muestran los resultados obtenidos a partir de la simulación de la antena propuesta que corroboran la efectividad del método presentado. Durante la sección V, se analizan los resultados experimentales obtenidos a partir de la elaboración del prototipo que se encargan de confirmar la validez de la simulación. Por último, se presentan las conclusiones (sección VI).

II. TEORÍA BÁSICA

La antena bajo estudio es un monopolo en forma de L invertida formado por dos brazos radiantes. El brazo radiante horizontal está caracterizado por L_x mientras que el brazo radiante vertical está caracterizado por h . La antena, como muestra la Fig. 1, está alimentada en el origen ($x=y=z=0$) y se

sitúa en el plano x-z sobre un conductor eléctrico perfecto (PEC).

La radiación propia del monopolo en L se corresponde con la radiación asociada a los brazos radiantes que lo conforman.

La Fig. 1a muestra el brazo vertical, el cual es principalmente responsable de la radiación propia de un monopolo. A su vez, la Fig. 1b muestra la radiación asociada al brazo horizontal, la cual se identifica fácilmente con la radiación característica de un parche. Como puede apreciarse en la Fig. 1c. y por superposición, es posible establecer que el diagrama de radiación de un monopolo en L se corresponde con la suma de las contribuciones individuales de cada uno de los brazos que lo conforman.

Como se mencionaba anteriormente, la combinación de los dos brazos radiantes forma la estructura propia del monopolo en L, mientras que el ratio entre h y L_x define la contribución específica de cada uno de ellos al diagrama de radiación. Con la intención de determinar las ecuaciones de radiación en función de h y L_x se ha llevado a cabo un análisis matemático básico basado en la teoría de imágenes [11].

Por un lado, la ecuación 1 subraya la relevancia de la distribución de corriente en el valor del campo eléctrico lejano. Sin embargo, sus componentes E -theta (E_θ) y E -phi (E_ϕ) no se ven afectadas del mismo modo. Mientras que E_θ es fuertemente dependiente de la distribución de corrientes en ambos brazos (I_1 and I_2), la componente E_ϕ sólo se ve afectada por la distribución de corriente del brazo horizontal (I_2), ya que el brazo vertical no presenta radiación en E_ϕ .

$$E_\theta = -j30 \frac{e^{-jkr}}{r} \left(I_2 \cos \theta \frac{e^{jk_x \frac{L_x}{2}}}{\sin \theta} \sin \left(k_x \frac{L_x}{2} \right) 4j \sin(k_z h) - I_1 \sin \theta \frac{2 \sin(k_z h)}{\cos \theta} \right)$$

$$E_\phi = -j30 \frac{e^{-jkr}}{r} \left(-I_2 \sin \varphi \frac{e^{jk_x \frac{L_x}{2}}}{\sin \theta \cos \varphi} \sin \left(k_x \frac{L_x}{2} \right) 4j \sin(k_z h) \right) \quad (1)$$

L_x : Longitud del brazo radiante horizontal.

h : Longitud del brazo radiante vertical.

k_x, k_z : Componentes rectangulares del vector k . Éstas pueden convertirse fácilmente a coordenadas esféricas a través de las siguientes ecuaciones:

$$k_x = k \sin \theta \cos \varphi \quad k_z = k \cos \theta \quad (2)$$

Las ecuaciones presentadas en (1) permiten determinar fácilmente el valor del campo eléctrico en cualquier dirección del espacio, definida por los ángulos θ y φ , en función de su geometría y de su distribución de corrientes. Siguiendo los resultados obtenidos, se observa que el diagrama de radiación para cualquier valor de θ y φ queda determinado a partir de los valores de E_θ y E_ϕ , cuyas direcciones se definen en la Fig. 1c y cuyos valores se asocian a la aportación de cada uno de los brazos.

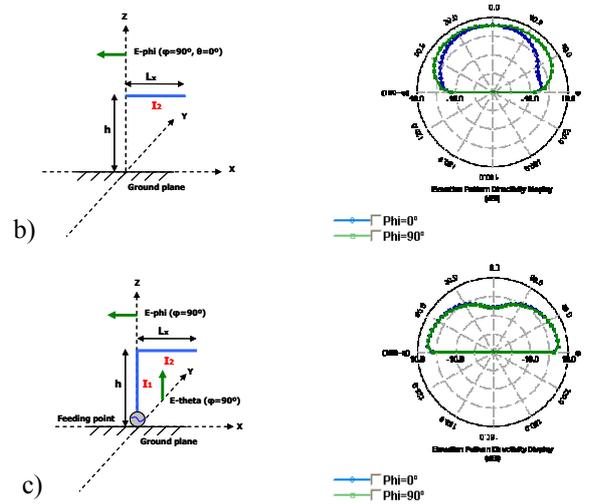
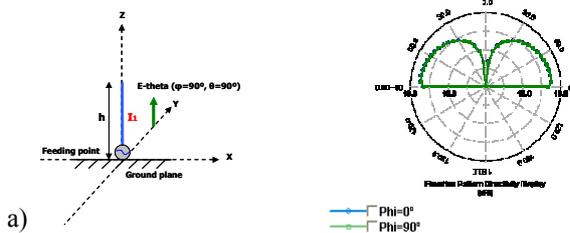


Fig. 1 Descomposición del monopolo en L según los brazos que lo conforman. (a) Brazo radiante vertical responsable del diagrama de radiación tipo monopolo; (b) Brazo radiante horizontal responsable del diagrama de radiación tipo parche; (c) Diagrama de radiación del monopolo en L resultante de ambas contribuciones.

Por tanto, la influencia de ambos brazos queda de manifiesto y ofrece la posibilidad de una reconfiguración del diagrama de radiación a través de la manipulación de la geometría y de la distribución de corrientes.

III. RESULTADOS ANALÍTICOS

La Fig. 1c muestra la localización del monopolo en L en el eje de coordenadas a través de una representación esquemática. A su vez, ésta muestra que el diagrama de radiación en los planos $\varphi=0^\circ$ y $\varphi=90^\circ$ es el resultado de la combinación de las radiaciones producidas por cada uno de los brazos.

La contribución independiente de cada uno de los brazos a la radiación aporta al diseñador de antenas un importante grado de libertad, ya que la longitud de los elementos puede ser ajustada a fin de conformar el diagrama de radiación deseado sin necesidad de recurrir a costosas técnicas basadas en prueba y error. Por el contrario, el método presentado ofrece la posibilidad de determinar rápidamente el ratio requerido entre h y L_x para conseguir un diagrama de radiación específico.

El principal objetivo de esta sección se centra en determinar el valor del ratio entre E_ϕ en $\theta=0^\circ, \varphi=90^\circ$ y E_θ en $\theta=90^\circ, \varphi=90^\circ$ en función de la proporción de h respecto a L_x . De este modo, si el campo en la dirección $\theta=0^\circ, \varphi=90^\circ$, predomina sobre el campo en la dirección $\theta=90^\circ, \varphi=90^\circ$, se esperaría un diagrama de radiación tipo parche.

No obstante, no sólo la proporción entre h y L_x define dicho ratio sino que la distribución de corrientes adquiere un papel fundamental. Un estudio detallado sobre cómo afecta una distribución de corrientes simplificada (uniforme o triangular) puede encontrarse en [10]. En este caso se considera una distribución de corrientes sinusoidal, ya que ésta se aproxima con más fidelidad a la realidad para longitudes mayores a 0.25λ . Por ello, siguiendo las enseñanzas de [11], la distribución de corriente se asocia a:

$$I(l) = \sin[k(L-l')] \quad (3)$$

Los vectores de radiación en este caso se calculan como:

$$\vec{N}_1 = \hat{z} \int_{-h}^h I_1(z') e^{jkz' \cos \theta} dz' \quad (4)$$

$$\vec{N}_{2up} = \hat{x} \int_0^{L_x} I_2(x') e^{jkh \cos \theta} e^{jkx' \sin \theta \cos \varphi} dx'$$

$$\vec{N}_{2image} = -\hat{x} \int_0^{L_x} I_2(x') e^{-jkh \cos \theta} e^{jkx' \sin \theta \cos \varphi} dx'$$

\vec{N}_1 es el vector de radiación asociado al brazo vertical.

\vec{N}_{2up} , \vec{N}_{2image} es el vector de radiación asociado al brazo horizontal y su imagen respectivamente.

Operando, transformando el vector de radiación en coordenadas esféricas, y particularizando las ecuaciones de radiación a E_φ ($\theta=0^\circ$, $\varphi=90^\circ$) y E_θ ($\theta=90^\circ$, $\varphi=90^\circ$) se obtiene:

$$E_\varphi(\varphi=\theta=90^\circ) = \int_{-h}^h I_1(z') dz' \quad (5)$$

$$E_\theta(\varphi=90^\circ, \theta=0^\circ) = -2j \sin(kh) \int_0^{L_x} I_2(x') e^{jkx'} dx'$$

Donde:

$$I_1(z') = I(l' = z') \quad (6)$$

$$I_2(x') = I(l' = x' + h)$$

La ecuación presentada en (4) puede ser calculada fácilmente para diferentes h/L_x ratios (Fig. 2). Se observa que a medida que el ratio h/L_x aumenta la estructura pierde su flexibilidad para obtener diagramas de radiación tipo parche o isotrópicos en el semiplano superior. En concreto, para $h/L_x=2$ y considerando una distribución de corrientes sinusoidal, el diagrama presenta la radiación de un monopolo vertical para un amplio margen de frecuencias.

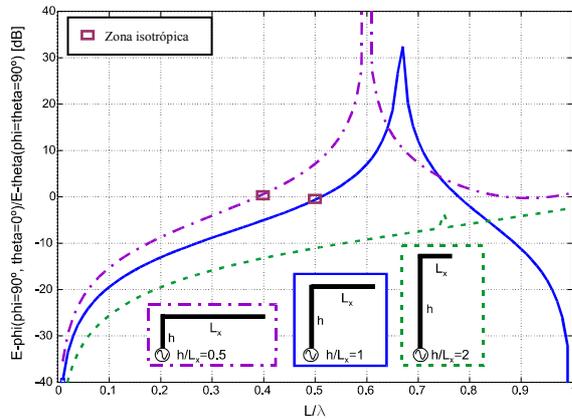


Fig. 2 Ratio entre componente E_φ at $\theta=0^\circ$, $\varphi=90^\circ$ y E_θ at $\theta=90^\circ$, $\varphi=90^\circ$ en función de L/λ cuando $h/L_x=2, 1$ y 0.5 cuando se considera una corriente sinusoidal.

Sin embargo, para $h/L_x=1$ y $h/L_x=0.5$, el comportamiento tipo monopolo se obtiene para valores de L/λ menores a 0.5 y 0.4 respectivamente. Alrededor de éstos, se consigue que la magnitud del campo eléctrico en E_φ ($\theta=0^\circ$, $\varphi=90^\circ$) y E_θ ($\theta=90^\circ$, $\varphi=90^\circ$) se iguale, lo que da lugar a un diagrama isotrópico en el semiplano superior. Para valores de L/λ superiores y hasta aproximadamente 0.7λ , la magnitud del campo en E_θ ($\theta=0^\circ$, $\varphi=90^\circ$) es más intenso que la magnitud del campo en E_φ ($\theta=90^\circ$, $\varphi=90^\circ$), lo que da lugar a diagramas más directivos tipo parche. A fin de corroborar estas

predicciones analíticas, se ha realizado una simulación numérica mediante MoM utilizando el software IE3D. Los correspondientes cortes de los resultados obtenidos se muestran y analizan en la siguiente sección.

IV. RESULTADOS DE SIMULACIÓN

A fin de validar la propuesta, se ha simulado un monopolo en forma de L invertida. Los diagramas de radiación asociados al ratio $h/L_x=0.5$ se muestran en la Fig. 3, el cálculo para otros ratios se recoge en [10].

Esta simulación claramente corrobora la efectividad de la solución propuesta ya que simplemente a partir de la gráfica mostrada en la Fig. 2 es posible determinar con anterioridad cómo va a ser el diagrama de radiación de un monopolo en L en función de la frecuencia una vez conocido el ratio h/L_x . Coincidiendo con la Fig. 2, los resultados de la simulación muestran como un monopolo en L con $h/L_x=0.5$ presenta el diagrama de radiación propio de un monopolo para longitudes inferiores a aproximadamente $L/\lambda=0.4$. Para longitudes cercanas a este valor es posible obtener un comportamiento perfectamente isotrópico en el semiplano superior con una directividad de 3 dBi para $L/\lambda=0.34$ lo cual es un valor que se aproxima con cierta exactitud al valor de $L/\lambda=0.4$ obtenido en los resultados analíticos. Finalmente, un diagrama más directivo se obtiene para longitudes comprendidas entre 0.4λ y 0.6λ . Es importante destacar que a medida que se reduce el ratio h/L_x se consigue reducir la frecuencia a la que se consigue un comportamiento tipo parche o isotrópico en el semiplano superior.

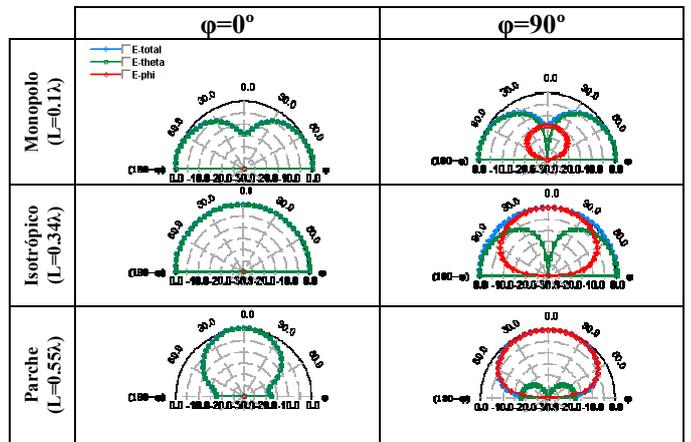


Fig. 3 Diagramas de radiación considerando $h=L_x=0.5$ para los ratios L/λ más significativos.

Las simulaciones 3D confirman una vez más las predicciones analíticas (Fig. 4).

3D	$h/L_x=1$	3D	$h/L_x=0.5$
Monopolo ($L=0.1\lambda$)		Monopolo ($L=0.1\lambda$)	
	Máx. Directividad ($\theta=90^\circ, \forall \varphi$): 4.3 dBi		Máx. Directividad ($\theta=90^\circ, \forall \varphi$): 4.3 dBi

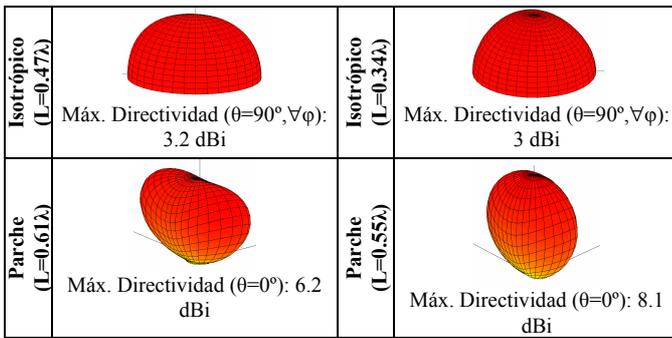


Fig. 4 Diagramas de radiación en 3D considerando $h/L_x=1$ y $h/L_x=0.5$ para los ratios L/λ más significativos. El margen dinámico es de 30 dB.

Para L pequeñas el diagrama es el de un monopolo vertical. Para valores alrededor de 0.47λ y 0.34λ para los ratios $L/\lambda=1$ y $L/\lambda=0.5$ respectivamente, se consigue un diagrama casi isotrópico para el primer caso y perfectamente isotrópico para el segundo. A su vez, la máxima directividad se obtiene para longitudes comprendidas entre 0.4λ - 0.6λ y ratios reducidos como es el caso de $h/L_x=0.5$.

V. RESULTADOS EXPERIMENTALES

Para corroborar la precisión de la solución analítica propuesta así como el rigor de las simulaciones presentadas, se ha fabricado el prototipo de un monopolo en L de dimensiones $h=8$ mm y $L_x=16$ mm situado sobre un plano de masa de $80\times 80\text{cm}^2$ (Fig. 5). Para la medida de los diagramas de radiación se ha utilizado la cámara anecoica Satimo Star-gate32 ubicada en el laboratorio de Fractus.

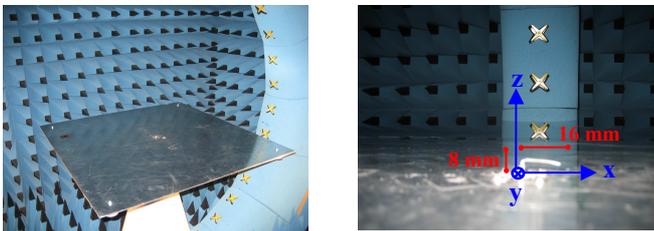


Fig. 5 Prototipo del monopolo en L desarrollado con ratio $h/L_x=0.5$

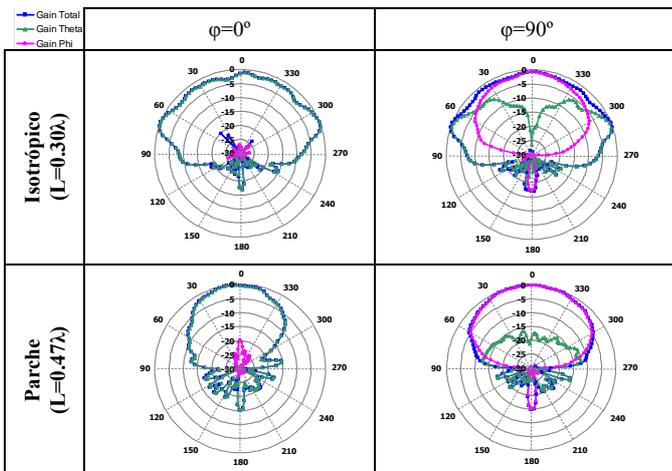


Fig. 6 Diagramas de radiación del monopolo en L con ratio $h/L_x=0.5$ y $L=24$ mm

Los resultados experimentales muestran que es posible conformar los diagramas de radiación a través de la geometría de una estructura sencilla como es un monopolo

en L. De este modo, es posible obtener un diagrama de radiación casi isotrópico (Fig. 6 y Fig. 7) a 0.30λ , así como un diagrama tipo parche a 0.47λ . Estos resultados están alineados con los valores obtenidos a través de la simulación (Fig. 4).

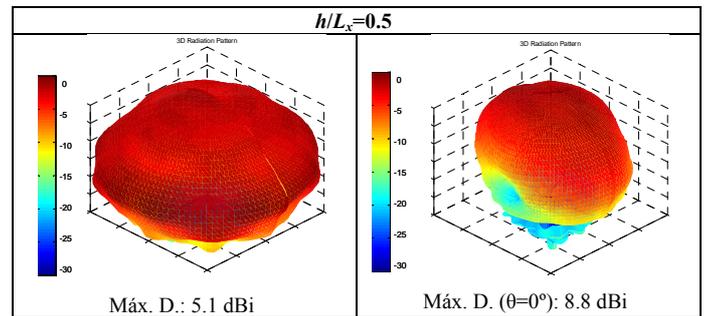


Fig. 7 Diagramas de radiación 3D del monopolo en L con ratio $h/L_x=0.5$ y $L=24$ mm.

VI. CONCLUSIONES

El método presentado permite conformar el diagrama de radiación de un monopolo en forma de L invertida en función de su longitud y del ratio entre las dimensiones asociadas a los brazos radiantes que lo componen. La propuesta presentada proporciona un mecanismo sencillo, cuyo análisis está basado en la teoría de imágenes, para adaptar fácilmente las propiedades de radiación de una determinada estructura a las especificaciones de diseño. El estudio demuestra la posibilidad de obtener un diagrama tipo parche a partir de una estructura tipo monopolo, así como un diagrama isotrópico casi perfecto en el semiplano superior.

REFERENCIAS

- [1] A.D. Wunsch, Sheng-Pin-Hu, "A closed-form expression for the Driving-Point Impedance of the Small Inverted L Antenna", IEEE Transactions on Antennas and Propagation, vol. 44, nº2, February 1996, p. 236-242.
- [2] R. King, C. W. Harrison, D. H. Denton, "Transmission-Line Missile Antennas", IEEE Transactions on Antennas and Propagation, vol. 8, nº 1, January 1960, p. 88-90.
- [3] T.L. Simpson, "The Theory of Top-Loaded Antennas: Integral Equations for the currents", IEEE Transactions on Antennas and Propagation, vol. 19, nº 2, March 1971, p. 186-190.
- [4] R.J.F. Guertler, "Isotropic Transmission Line Antenna and Its Toroid-Pattern Modification", IEEE Transactions on Antennas and Propagation, vol. 25, nº 3, May 1997, p. 386-392.
- [5] R.C. Hansen, "Effects of a High-impedance screen on a dipole antenna", IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters, vol.1, 2002, p. 46-49.
- [6] H.T. Chen, J.X. Luo, and D.K. Zhang, "An analytic formula of the current distribution for the VLF horizontal wire antenna above lossy half-space," Progress In Electromagnetics Research Letters, Vol.1, 149-158, 2008.
- [7] H.E. Green, J.D. Cashman, "The Transmission Line Antenna Revisited", IEEE Transaction on Antennas and Propagation, vol. 38, nº4, April 1990, p. 575-578.
- [8] S.A.Long, "A Combination of Linear and Slot Antennas for Quasi-Isotropic Coverage", IEEE Transaction on Antennas and Propagation, July 1975, pp-572-576.
- [9] A. Mehdipour, H. Aliakbarian, and J. Rashed-Mohassel, "A Novel Electrically Small Spherical Wire Antenna With Almost Isotropic Radiation Pattern", IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters, vol.7, 2008, pp.396-399.
- [10] A. Andújar, J. Anguera, C. Puente, and A. Pérez, "On the radiation pattern of the L-shaped wire antenna," Progress In Electromagnetic Research M, Vol. 6, 91-105, 2009.
- [11] C.A. Balanis, "Antenna Theory Analysis and Design", John Wiley & Sons, Second edition, 1997, Chapter 4, pp. 133-203.