

Desarrollo de Antena Espiral con Alimentación Lateral Realizada Mediante Fabricación Aditiva

Martín-Bayona, Francisco José⁽¹⁾, Pérez-Escribano, Mario⁽¹⁾, Márquez-Segura, Enrique⁽¹⁾
 fjmb@ic.uma.es, ems@ic.uma.es, mpe@ic.uma.es

⁽¹⁾Instituto Universitario de Investigación en Telecomunicación (TELMA), Univ. Málaga
 E.T.S. Ingeniería de Telecomunicación, Bulevar Louis Pasteur 35, 29010, Málaga (España).

Resumen—This contribution presents a step-by-step design and manufacturing of a spiral antenna with lateral feeding mainly for automotive applications. The spiral antenna is intended to work in Ultra-Wide Band (UWB), a new technology that enhances position, safety and security for connected vehicles using frequencies from 3.1 GHz to 10.6 GHz. This radiating element has circular polarization and its radiation pattern reasonably remains constant throughout the band since it belongs to frequency independent antennas category. The prototype has been implemented using additive manufacturing, specifically a set of technologies including Fused Deposition Modeling (FDM) and ink-jet printing. Measurement results are presented assessing the validity of the proposed antenna.

I. INTRODUCCIÓN

La antena en espiral, perteneciente al conjunto de antenas independientes de la frecuencia por su geometría, posee un gran ancho de banda [1]. Esta característica la hace interesante para aglutinar varios servicios en una única antena, así como para su uso como elemento radiante en aplicaciones de banda ultra-ancha (UWB). Otra de las características relevantes de la antena en espiral es que presenta polarización circular en toda la banda de funcionamiento [2] [3], la cual facilita la comunicación entre receptor y transmisor sin alinear la polarización de los elementos radiantes.

Es conocida la creciente popularidad de la tecnología de banda ultra-ancha para nuevos servicios en automoción basados en la localización, el control de acceso remoto, así como la compatibilidad con los teléfonos inteligentes en servicios de transmisión de datos. Este hecho ha dado lugar a la aparición y disponibilidad en el mercado de múltiples chips de radio UWB. La tecnología UWB utiliza canales de un ancho de banda superior a 500 MHz en la banda comprendida entre 3.1 GHz y 10.6 GHz (estándar IEEE 802.15) [4].

La alimentación más comúnmente usada de las antenas en espiral es un *balun* vertical para conectar la antena desde el centro de la espiral al sistema en modo común, generalmente en coaxial [5]. Sin embargo, este tipo de alimentación dificulta la integración de la antena en determinadas ubicaciones del vehículo, dado que añade un volumen considerable a la estructura ya que es necesaria cierta longitud para el *balun* y normalmente asociada una cavidad trasera. En este diseño, se ha utilizado una forma de alimentación desde una línea *stripline* para poder ser realizado desde el lateral y mantener así una estructura plana que facilite la integración del elemento radiante, fundamentalmente en su parte superior. Esta configuración permitiría su integración vertical en estructuras habituales en la superficie del techo de vehículos.

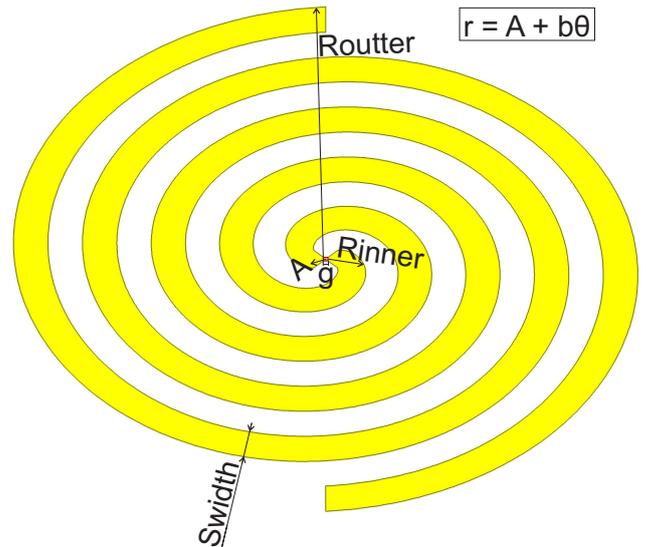


Fig. 1. Espiral arquimediana ideal alimentada en el centro.

II. DISEÑO DE LA ESPIRAL IDEAL

El proceso de diseño se ha realizado en diferentes etapas. En primer lugar, se ha trabajado en una antena en espiral de dos brazos, alimentada idealmente en el centro y situada en el vacío, como se muestra en la Figura 1. Esta antena es un punto de partida para establecer una geometría que cumpla con las especificaciones iniciales de ancho de banda. La radiación de la antena en espiral depende de sus factores geométricos. Así, los límites de la banda de funcionamiento inferior y exterior quedan determinados por el radio externo e interno [6], según

$$f_{inferior} = \frac{c}{\lambda_{inferior}} = \frac{c}{2\pi R_{outer}} \quad (1)$$

$$f_{superior} = \frac{c}{\lambda_{superior}} = \frac{c}{4R_{inner}} \quad (2)$$

El tamaño total de la antena juega también un papel determinante en la relación axial de la polarización circular en toda la banda de frecuencias de funcionamiento. Este hecho se debe a que las reflexiones producidas al final de cada uno de los brazos de la espiral que conforman la antena producen el deterioro de dicho parámetro. Asimismo, el ratio de crecimiento (b) para definir la antena arquimediana como auto-complementaria queda definido por el parámetro

$$b = \frac{2 * S_{width}}{\pi} \quad (3)$$

siendo S_{width} el ancho de la espiral.

TABLA I
PARÁMETROS GEOMÉTRICOS DE LA ANTENA ESPIRAL.

Parámetro	Valor geométrico
Número de vueltas ($n_{vueltas}$)	2.25
Ancho del brazo de la espiral (S_{width})	3.6 mm
Offset respecto al centro (A)	1.4 mm
Ratio de crecimiento (b)	2.2918
Gap de alimentación (g)	0.5

Los principales parámetros geométricos de la espiral inicial diseñada quedan recogidos en la Tabla I, relacionados con la Figura 1. El ancho de banda teórico de este diseño se sitúa entre 1.33 GHz y 16.67 GHz.

III. ALIMENTACIÓN LATERAL DE LA ESPIRAL

Como se ha mencionado previamente, en este trabajo se ha trabajado buscando la alimentación de la antena desde un lateral, manteniendo así la estructura plana que presenta el elemento radiante. Dicha alimentación se realiza mediante una línea *stripline* en la estructura, que integra tanto el balun como el taper lineal, que permite la transformación de impedancias. Esta integración se ha implementado partiendo del concepto presentado inicialmente en [7]. Esta estructura es una reconstrucción del denominado *balun* infinito de Dyson [2] que emplea una línea de transmisión TEM, en concreto un cable coaxial, para obtener la transformación de un modo común a un modo diferencial.

Para realizar esta alimentación, es necesaria una transformación de la estructura que consiste en desdoblar uno de los brazos, para que este actúe como plano de masa de la línea *stripline*. A su vez, mantiene la función de brazo radiante de la antena, dado que mantiene la distribución de corriente de la espiral. En la Figura 2 se presenta una vista en perspectiva de la estructura *stripline* de alimentación, así como un detalle de las capas que la componen.

La estructura ahora necesita estar soportada sobre diferentes materiales. En esta nueva fase del proceso de diseño se ha considerado en todo momento las posibilidades de fabricación de la antena. La fabricación será detallada en un apartado posterior. Dado que se pretende realizar fabricación aditiva, el material utilizado como sustrato es el Poliestireno de Alto Impacto (HIPS), un material disponible en filamento para impresión FDM y cuyas características electromagnéticas son adecuadas para la fabricación de elementos radiantes [8]. La permitividad relativa medida del HIPS es de $\epsilon_r = 2.44$ y su tangente de pérdidas toma el valor de $\tan(\delta) = 0.004$. La altura del sustrato se ha fijado en un valor de $h = 1.6$ mm. Para determinar este valor de altura del material dieléctrico, cuya misión es soportar la antena, se ha considerado que la fabricación sea fácil de realizar incluyendo la conectorización y, al mismo tiempo, minimizar su efecto en las características de radiación resultantes. Este material permitirá embutir entre dos partes idénticas de HIPS construidas mediante fabricación FDM una lámina de poliamida (Kapton) entre las dos partes que forman la estructura. Sobre esta lámina de poliamida se imprimirá mediante inyección de tintas metálicas la espiral.

La antena en espiral diseñada inicialmente presenta una impedancia $Z_{in} = 188.5 \Omega$ debido a su naturaleza auto-

complementaria. La inclusión de nuevos materiales permite reducir ligeramente ese valor en torno a los 110Ω . Es necesario por tanto adaptar la antena a una impedancia del sistema considerada de 50Ω .

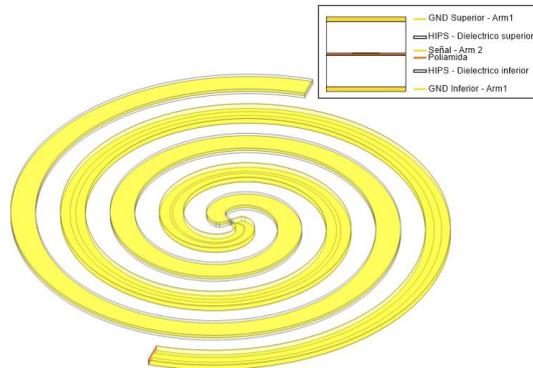


Fig. 2. Capas de la estructura.

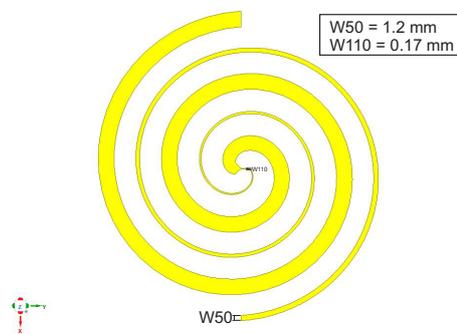


Fig. 3. Pista de señal con el taper implementado.

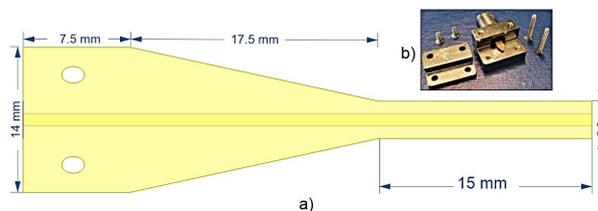


Fig. 4. a) Diseño de la transición. b) Despiece del conector.

Con este objetivo, se aprovecha el gran recorrido de la espiral para integrar un *taper* lineal en la pista central que transforma los 50Ω de la línea de acceso a los 110Ω que presenta el elemento radiante en el centro de la estructura. En la Figura 3, se muestra solo la pista central, con el fin de visualizar el *taper* implementado.

Para la conexión del elemento radiante con el exterior, se utiliza un conector con referencia PE4534 de la compañía Pasternack [9]. El despiece del conector empleado se muestra en la Figura 4.b). Dado que las dimensiones físicas del conector son mayores que el ancho de la propia espiral, se ha diseñado una transición desde el conector hasta la espiral, tal y como se muestra en la Figura 4.a). Las dimensiones de la transición se han detallado en la figura. En un trabajo previo se presentó la caracterización de la línea de transmisión empleando estas mismas transiciones verificando su adecuación

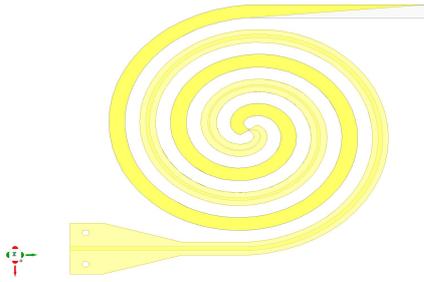


Fig. 5. Diseño final de la espiral.

como transición para realizar el interfaz entre la espiral y el entorno de medida en coaxial [10].

Como se ha comentado previamente, las reflexiones en la parte final de la espiral pueden causar problemas en la relación axial de la antena. Por lo tanto, se implementa un *taper* en la parte final de la espiral, sobre la pista de señal, con el fin de reducir dichas reflexiones. La integración de la transición vista anteriormente y de este *taper*, dan lugar al diseño final de la antena en espiral, el cual se muestra en la Figura 5.

IV. FABRICACIÓN Y RESULTADOS EXPERIMENTALES

La fabricación del prototipo de la antena en espiral se ha llevado a cabo mediante un conjunto de procesos diferentes de fabricación aditiva, los cuales permiten prototipar la antena así como modelar el sustrato de forma arbitraria. Esto permite, por ejemplo, reducir en gran cantidad de dieléctrico en el diseño. Las tecnologías empleadas han sido: modelado por deposición fundida (FDM), impresión de tintas conductoras y metalización por aerosol.

La impresión FDM consiste en la deposición capa a capa de un filamento plástico fundido, que en este caso ha sido realizado utilizando la impresora Ultimaker 3. Los principales parámetros de impresión son una altura de capa de 0.1 mm y una temperatura de extrusión de 245 °C para el HIPS.

Para la realización de la pista central de la espiral, se emplea una tinta de nanopartículas de plata (907022 de Sigma-Aldrich), utilizando la impresora Fujifilm Dimatix DMP-2850. Se parte de los parámetros de impresión recomendados por el fabricante y se realiza una optimización del voltaje aplicado cada *nozzle* así como de la temperatura del cartucho para obtener un resultado óptimo. Tras la impresión de la tinta de nanopartículas de plata, esta se somete a un proceso de sinterizado térmico en un horno de convección. Este proceso requiere de 30 minutos a una temperatura de 150°C.

Los planos de masa de la espiral se han realizado mediante deposición por aerosol. En este caso se ha empleado la referencia "843AR" del fabricante "MG Chemicals", el cual contiene un material conductor, en concreto, una combinación de partículas de cobre y de plata. Previo a la metalización de los planos de masa, se enmascara la superficie que no interesa metalizar con cinta adhesiva.

En esta fase de fabricación se ha modificado ligeramente la estructura del elemento radiante. Fundamentalmente es necesario añadir rigidez estructural al conjunto. Concretamente se han añadido tanto un marco externo como una serie de travesaños. Estos añadidos no afectan de forma significativa al funcionamiento de la antena y han sido tenidos en cuenta y

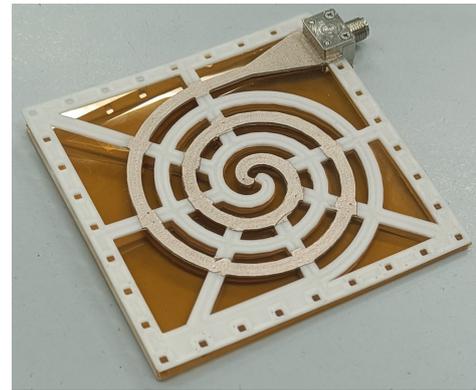


Fig. 6. Prototipo de la antena en espiral construido mediante fabricación aditiva.

verificado en el análisis electromagnético de la estructura. El proceso de fabricación concluye con el ensamblado de todas las partes, obteniendo así el prototipo de la antena en espiral construido, mostrado en la Figura 6. Es importante reseñar que el uso de esta estrategia de fabricación ha permitido reducir la cantidad de material dieléctrico necesaria que incidirá mejorando los parámetros de radiación de la antena.

A continuación, se presentan los resultados más relevantes obtenidos en el proceso de verificación y medida experimental, utilizando el analizador de redes vectorial "E8364A" de *Agilent Technologies*. Para la obtención de los resultados en radiación, se ha seguido un proceso de post-procesado de los parámetros S obtenidos para extraer tanto directividad como ganancia y relación axial empleando una antena de referencia. La medida no ha sido realizada en cámara anecoica por lo que se espera que los resultados presenten ruido debido a reflexiones parásitas provenientes del entorno.

En la Figura 7, se muestra el Coeficiente de Onda Estacionaria (COE) de la espiral obtenido en simulación y tras el proceso de medida. Se observa como en el caso de la medida el COE se mantiene por debajo de un valor de 2.5, lo cual indica una adaptación razonable en toda la banda de funcionamiento considerando la tecnología de fabricación empleada.

La directividad en dirección *broadside* se representa en la Figura 8. Se observa un rizado en toda la banda, producido por el ruido de la medida. En las frecuencias más altas de la banda de interés, así como fuera de esta, se encuentran algunos picos en la medida. A pesar de estas variaciones, el

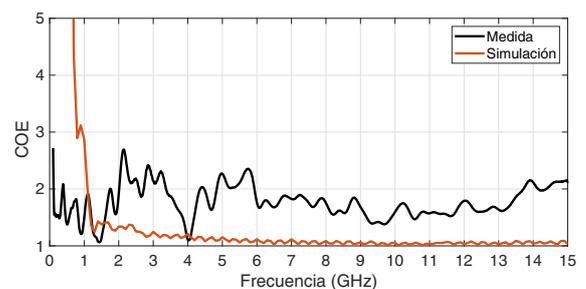


Fig. 7. Coeficiente de Onda Estacionaria del elemento radiante.

comportamiento de la curva de la directividad en *broadside* se ajusta a lo obtenido en la simulación.

En la Figura 9 se representan los diagramas de radiación para las frecuencias inicial, intermedia y final de la banda de interés ($f = 3.1$ GHz, $f = 6.9$ GHz y $f = 10.6$ GHz).

La medida se ha realizado solo en el semiespacio superior, suponiendo que existe simetría en el semiespacio inferior. Se observa que los resultados son coherentes y se asemejan a los casos simulados. No obstante, las medidas han sido realizadas de manera manual y presentan algunos lóbulos y divergencias respecto a la idealidad de la simulación electromagnética.

Hasta ahora se ha analizado la directividad de la antena, sin embargo, resulta interesante también analizar la ganancia de esta, en la que entra en juego la eficiencia de la estructura. Esta se muestra en la Figura 10. Al analizar la aproximación de la ganancia en dirección *broadside*, se observa una clara diferencia entre el resultado esperado y la medida obtenida. Una segunda simulación, fijando una baja conductividad en las pistas, muestra como este segundo resultado se ajusta mejor a la medida. Por tanto, es importante de cara a nuevas pruebas, controlar el proceso de fabricación para obtener una conductividad mayor, que mejore la eficiencia de radiación del elemento radiante. Este fenómeno ha sido estudiado previamente en [10]

La última medida representada en la Figura 11 es la relación axial en dirección *broadside*. La medida corresponde con los resultados obtenidos en la simulación, manteniéndose por debajo de 3 dB en toda la banda, criterio que define que la polarización de la antena es circular.

V. CONCLUSIONES

En esta comunicación se ha presentado el diseño completo de una antena en espiral, desde la simulación electromagnética hasta la fabricación de un primer prototipo del cual se presentan medidas experimentales preliminares. En este proceso se han integrado transiciones para el conector, así como distintas estructuras que permiten mejorar la resistencia estructural del elemento, optimizando las dimensiones para la banda de funcionamiento de UWB. Se ha trabajado con un proceso de fabricación aditiva, imprimiendo tanto material fundido como tintas conductoras. Las medidas son, en la mayoría de los casos, coherentes con los resultados obtenidos previamente en la simulación. La eficiencia de radiación es menor que la esperada, y esta diferencia ha sido justificada mediante la simulación con conductividad reducida, lo cual implica que existe margen de mejora en el proceso de fabricación.

AGRADECIMIENTOS

Este proyecto ha sido financiado por el Ministerio de Ciencia e Innovación del Gobierno de España, con fondos del proyecto PID2020-116968RB-C31/AEI/10.13039/501100011033 MCIU/AEI/FEDER (Programa Estatal de I+D+i Orientada a los Retos de la Sociedad).

REFERENCIAS

- [1] Rumsey, V., "Frequency independent antennas," *1958 IRE International Convention Record*, 1966.
- [2] Dyson, J., "The equiangular spiral antenna," *IRE Trans. Antennas Propag.*, 1959.
- [3] Kaiser, J., "The Archimedean two-wire spiral antenna," *IRE Transactions on Antennas and Propagation*, 1960.
- [4] "Estándar IEEE 802.15," <https://standards.ieee.org/ieee/802.15/3/6211/>.
- [5] C. Balanis, *Antenna Theory: Analysis and Design*. John Wiley & Sons, INC., 2005.

- [6] Caswell, Eric D., "Analysis of Archimedean Spiral Antenna," *Virginia Tech*, 2001.
- [7] Teng-Kai Chen, Gregory Huff, "Stripline-Fed Archimedean Spiral Antenna," *IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters*, 2011.
- [8] Pérez, M. y Márquez, E., "Parameters Characterization of Dielectric Materials Samples in Microwave and Millimeter-Wave Bands," *IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques*, 2021.
- [9] "Enlace al conector PE4534," <https://www.pasternack.com/sma-female-standard-1-16-inch-stripline-connector-pe4534-p.aspx>.
- [10] Pérez Escribano, M., Martín Bayona, F. y Márquez Segura, E., "Efectos de la conductividad en la estimación de los parámetros de propagación de una línea stripline fabricada mediante impresión de tintas conductoras," in *Actas del XXXVI Simposium Nacional de la URSI*, 2021.

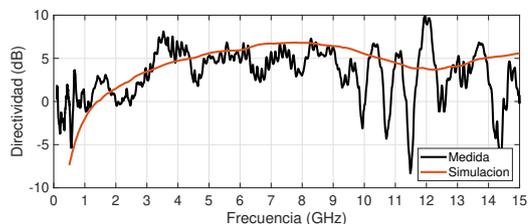


Fig. 8. Directividad en dirección *broadside*.

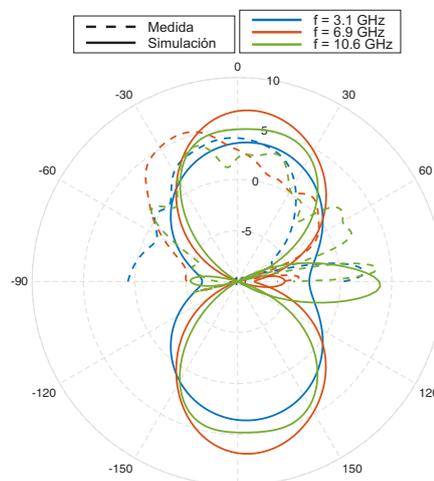


Fig. 9. Diagramas de radiación de la espiral a distintas frecuencias.

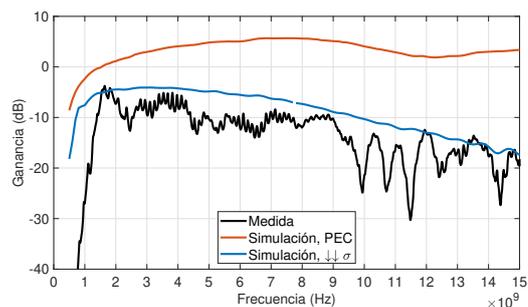


Fig. 10. Ganancia (dB) en dirección *broadside* medida y simulada (PEC y Baja conductividad).

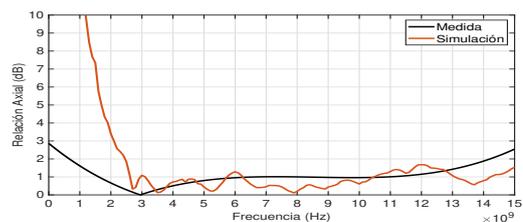


Fig. 11. Relación axial en dirección *broadside*.