An Ultrawideband Printed Monopole Antenna Analyzed with the Theory of Characteristic Modes

Carlos Ramiro Peñafiel-Ojeda, Carlos Efrain Andrade, Ricardo Baez-Egas, and Vladimir García-Santos

***Abstract*—In this paper, the analysis of an UWB monopole antenna using the Theory of Characteristic Modes is presented. It starts from the modal study of an asymmetric dipole (structure 1), and then complements and compares it with a broadband monopole (structure 2), aiming to understand the operation principle of the proposed antenna. To achieve this, the electromagnetic properties of the structures are analyzed through the generation of its characteristic angles, modal radiation patterns, characteristic currents, and the power contribution percentage of each mode to the total radiated power, providing a vision on how the superposition of individual characteristic modes enables UWB operation. The prototype model is fabricated, and the measured results agree very well with the full-wave simulations results. The proposed prototype has a very low profile and operates in the frequency band from 2.8 GHz to exceed 10 GHz for a reflection coefficient $S_{11} < -10$dB.**

***Index Terms*—Monopole Antennas, Theory of Characteristic Modes, Ultrawideband antenna.**

I. Introducción

Desde la asignación del espectro para la Banda Ultra Ancha (UWB, por sus siglas en inglés) sin licencia por parte de la Comisión Federal de Comunicaciones (FCC) en 2002 [1], los avances logrados en el ámbito UWB han contribuido especialmente al progreso de los sistemas de comunicación inalámbrica de corto alcance como por ejemplo: las Redes Inalámbricas de Área Personal (WPAN) de alta velocidad de datos y las Redes Inalámbricas de Área Corporal (WBAN).

Las antenas impresas han sido ampliamente consideradas en aplicaciones UWB debido a sus ventajas intrínsecas como pequeño volumen, peso liviano, bajo coste y facilidad de fabricación [2] además de que pueden integrarse fácilmente con la misma placa de circuito impreso (PCB) permitiendo alcanzar la miniaturización de los dispositivos. No obstante, a causa de su naturaleza intrínseca de banda estrecha, continúa siendo un desafío diseñar antenas impresas que operen en banda ancha [3]. Por otro lado, estas antenas deben obedecer a determinadas especificaciones de acuerdo con la aplicación tales como diagramas de radiación, polarización, ancho de banda y una operación con bajo consumo energético. Por lo tanto, el diseño de este tipo de antenas impone varios obstáculos y desafíos adicionales.

En respuesta a estas dificultades, muchos investigadores alrededor del mundo han sumado esfuerzos para lograr diseñar antenas con las características antes mencionadas. Las antenas planas [4], [5] y monopolo [6], [7] han sido ampliamente consideradas como soluciones válidas, debido a que pueden ofrecer una operación de gran ancho de banda con propiedades de radiación adecuadas y un tamaño compacto. Además, son de fácil fabricación e incorporación con circuitos integrados de microonda [8], p. ej., la tecnología MMIC. Sin embargo, muchas de las soluciones que se han presentado previamente se basan únicamente en enfoques de prueba y error [9]. A menudo las antenas impresas compactas pueden ser comparadas con ”magia negra”, en el sentido de que el diseñador tiene que ajustar las antenas, conforme a determinados requisitos, de acuerdo con la intuición y conjeturas inteligentes basadas en la experiencia [10], particularmente con las impresas monopolo cuyos reportes en la literatura muestran muy pocos trabajos teóricos para su análisis [11], ocasionando que hasta el día de hoy todavía enfrentemos el problema de no comprender completamente el mecanismo de operación de este tipo de antenas.

En los últimos años la Teoría de Modos Característicos (TCM) ha demostrado ser una valiosa herramienta de asistencia para el diseño de antenas, debido a su capacidad para determinar parámetros específicos de radiación en estructuras arbitrarias. Estos atributos hacen que TCM sea capaz de proporcionar una interpretación física de la operación de una antena en ausencia de un punto de excitación, brindando información muy importante sobre la distribución de corrientes características, diagramas de radiación y frecuencias de resonancia de cada uno de los modos. El valor de todas estas virtudes ha provocado que TCM no solo haya sido muy utilizada en el diseño de diferentes tipos de antenas para aplicaciones modernas (antenas MIMO y para terminales móviles, antenas dieléctricas, nanoantenas o metasuperficies, etc.) [12], sino también para entender el comportamiento de una antena en diversas aplicaciones como la portabilidad [13], el Internet de las Cosas (IoT) [14], y la banda ancha [15]–[18].

En este trabajo se presenta el análisis de una antena monopolo UWB utilizando TCM principalmente, para comprender su comportamiento y principio de funcionamiento. Puesto que, la mayor parte de este tipo de antenas poseen geometrías que han sido seleccionadas de forma arbitraria, y

C. R. Peñafiel-Ojeda is with the G-RESEARCH, at Universidad Nacional de Chimborazo (UNACH), 060110, Riobamba, Ecuador (e-mail: carlospenafiel@unach.edu.ec), and with the Instituto de Tecnologías y Ciencias Avanzadas (ITECA), 060102, Riobamba, Ecuador.

C. E. Andrade is with Facultad de Ciencias de la Ingeniería, at Universidad Técnica Estatal de Quevedo (UTEQ), 120501, Quevedo, Ecuador, e-mail: (candradec@uteq.edu.ec).

R. Baez-Egas is with Facultad de Ingeniería en Ciencias Aplicadas, at Universidad Técnica del Norte (UTN), 100150, Ibarra, Ecuador, e-mail: (rsbaeze@utn.edu.ec).

V. García-Santos is with Facultad de Sistemas y Telecomunicaciones, at Universidad Estatal Península de Santa Elena (UPSE), 240350, La Libertad, Ecuador, e-mail: (vgarcia@upse.edu.ec).

(Corresponding Author: Carlos Ramiro Peñafiel-Ojeda)

optimizadas mediante estudios paramétricos en una base de prueba y error.

Para lograr el objetivo, el presente artículo ha sido organizado en seis secciones. En la Sección II se describe el proceso de modelación y simulación de la antena propuesta, luego en la Sección III se realiza un análisis con base en TCM para obtener una perspectiva del funcionamiento de la antena. Posteriormente, en la Sección IV se detalla el proceso de fabricación y un análisis comparativo de los resultados medidos y simulados. Finalmente, en la Sección V se muestran las conclusiones de este trabajo.

II. Modelación y Simulación de una Antena UWB

En ingeniería de los sistemas radiantes es bien conocido que una antena monopolo es una de las más adecuadas para alcanzar al mismo tiempo un gran ancho de banda y un diagrama de radiación bidireccional, por esta razón, han sido ampliamente utilizadas como soluciones radiantes. Sin embargo, como ya explicamos anteriormente, no existe una profunda explicación sobre las características del dispositivo. El enfoque que propone este trabajo, es brindar una descripción del funcionamiento de una antena monopolo de geometría arbitraria, la estructura ha sido diseñada para que su longitud en la sección vertical corresponda a $\lambda/2$ a una frecuencia de 1.5 GHz, quedando como dimensión total de $32\ mm \times 47.6\ mm$. La primera versión propuesta consta esencialmente de dos parches asimétricos interconectados por una línea cuyo ancho w_a ha sido optimizado para alcanzar una impedancia característica de 50 Ω. El primer elemento que compone el dipolo asimétrico es un semicírculo de radio r_1 con una deformación en uno de sus extremos, esta deformación es el resultado de la combinación de un rectángulo de dimensiones $l_1 \times w_1$ y un círculo de radio r_2. Por otro lado, el segundo elemento del dipolo tiene la forma de una placa rectangular con un ancho y largo de $X \times l_a$, tal como se observa en la Fig. 1(a). El material FR-4 (laminado de fibra de vidrio) se emplea como sustrato dieléctrico, sus características principales son una altura de $h = 1.6\ mm$, una permitividad eléctrica ϵ_r = 4.4 y una tangente de pérdidas δ = 0.024.

En la segunda versión, la placa rectangular que se ubicaba en la parte inferior de la primera versión ha sido doblada sobre sí misma, de esta forma se ha generado un plano de masa para la línea de transmisión y una compactación de la estructura, generando una coincidencia tangencial entre el borde de la placa rectangular y el borde del semicírculo, tal como se aprecia en la Fig. 1(b) y (c). Cada uno de los parámetros optimizados que se usaron para simular las antenas, partiendo de la primera versión hasta la segunda que de ahora en adelante las llamaremos estructura 1 y 2 respectivamente, sus parámetros han sido resumidos en el pie de la Fig. 1.

Ambas estructuras propuestas en la Fig.1, han sido estudiadas mediante un análisis onda completa usando el software comercial de simulación electromagnética CST®, consiguiendo obtener los coeficientes de reflexión (S_{11}) que se aprecian en la Fig. 2.

El análisis comparativo entre los coeficientes de reflexión S_{11} de las estructuras 1 y 2 es muy importante. A simple vista podemos afirmar que a pesar de tener un buen ancho de banda en la estructura 1, es evidente que la estructura 2 presenta mejores características de acoplamiento, obteniendo un ancho de banda con valores menores a -10 dB que van desde 2.8 GHz hasta 5.4 GHz, con un par de resonancias adicionales a 6.5 GHz y 8.5 GHz. Pudiendo concluir entonces que, con una configuración adecuada en la forma física de la estructura, se puede mejorar el ancho de banda y las características de radiación. Por lo tanto, para confirmar este criterio, en la siguiente sección se propone el uso la teoría TCM como herramienta de análisis, la información que ofrece la TCM a través de su interpretación física permitirá ilustrar de mejor manera el comportamiento de las dos estructuras.

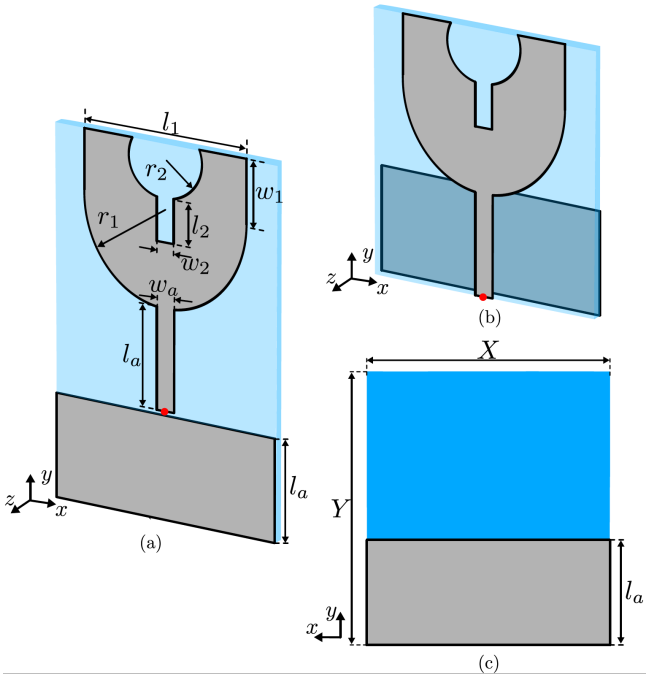


Fig. 1. Parámetros de diseño de la antena UWB propuesta. (a) Vista en 3D de la estructura 1, (b) vista en 3D de la estructura 2 y (c) vista posterior de la estructura 2. Parámetros optmizados: X = 32 mm, w_1 = 10.156 mm, Y = 36 mm, r_2 = 5.3 mm, l_a = 14 mm, l_2 = 5.73 mm, w_a = 2.5 mm, w_2 = 2.36 mm, r_1 = 11.8 mm, h = 1.6 mm, l_1 = 23.6 mm.

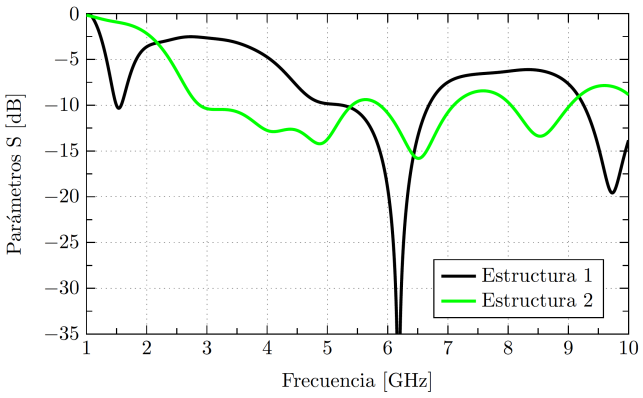


Fig. 2. Comparación entre coeficientes de reflexión (S_{11}) de las estructuras referenciales.

TABLE I
RESUMEN DE LA INTERPRETACIÓN FÍSICA DE LOS MODOS CARACTERÍSTICOS

Comportamiento	Ángulo Característico α_n
Inductiva	$90° < \alpha_n > 180°$
Resonancia	α_n = 180°
Capacitiva	$180° < \alpha_n > 270°$

III. ANÁLISIS DE LOS MODOS CARACTERÍSTICOS

TCM aunque inicialmente fue introducida por Garbacz [19] en 1965 y refinada por Harrington y Mautz [20] en 1971, no fue hasta la década del 2000 que empieza a ser ampliamente reconocida por su potencial en la ingeniería de antenas para aplicarse como un enfoque de diseño metodológico y sistemático de diferentes tipos de antenas [21].

Los modos característicos por definición son corrientes modales que se obtienen numéricamente para cuerpos conductores con forma geométrica arbitraria, son independientes de cualquier tipo de excitación y dependen sólo de la forma y tamaño del cuerpo conductor, el cálculo numérico de los modos característicos o corrientes características $\vec{J_n}$ involucra la matriz de impedancia de la estructura, estas corrientes modales se obtienen como las autofunciones de la ecuación de autovalores ponderados la cual se muestra a continuación:

$$X(\vec{J_n}) = \lambda_n R(\vec{J_n}) \tag{1}$$

donde R y X son la parte real e imaginaria del operador de impedancia, mientras que λ_n son los autovalores y $\vec{J_n}$ son las autofunciones o autocorrientes. Por otro lado se puede expresar la corriente total $\vec{J_T}$ que circula por la superficie del cuerpo conductor como la suma ponderada de las corrientes modales $\vec{J_n}$ tal como se aprecia en la Ec. 2.

$$\vec{J_T} = \sum_n \alpha_n \vec{J_n} \tag{2}$$

siendo α_n el autovalor o ángulo característico asociado a cada modo característico el cual proporciona información sobre las características de radiación.

Para el diseño de antenas asistido por TCM, se tiene algunas alternativas para interpretar los modos partiendo de los autovalores λ_n, luego se tiene la significancia modal (MS_n), y finalmente el ángulo característico (α_n) que se utiliza con mayor frecuencia, su expresión matemática viene dada como:

$$\alpha_n = 180° - \tan^{-1}(\lambda_n) \tag{3}$$

El ángulo característico α_n representa la diferencia de fase entre la corriente característica $\vec{J_n}$ y su campo característico asociado $\vec{E_n}$, la interpretación física del ángulo característico fue presentada en [19]. Se dice que un modo característico es resonante y con capacidad de ser un buen radiador cuando α_n adquiere un valor de $\alpha_n = 180°$, caso contrario cuando $\alpha_n \neq 180°$ el modo estaría almacenando energía [10], [21]–[23]. En la Tabla I se ha realizado un resumen sobre la interpretación física de los modos característicos usando el Ángulo Característico α_n.

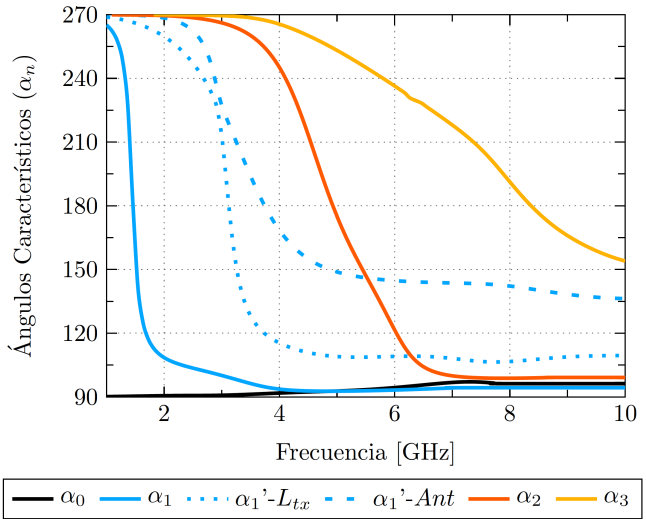


Fig. 3. Representación de los ángulo característico α_n de los primeros modos de la estructura 1.

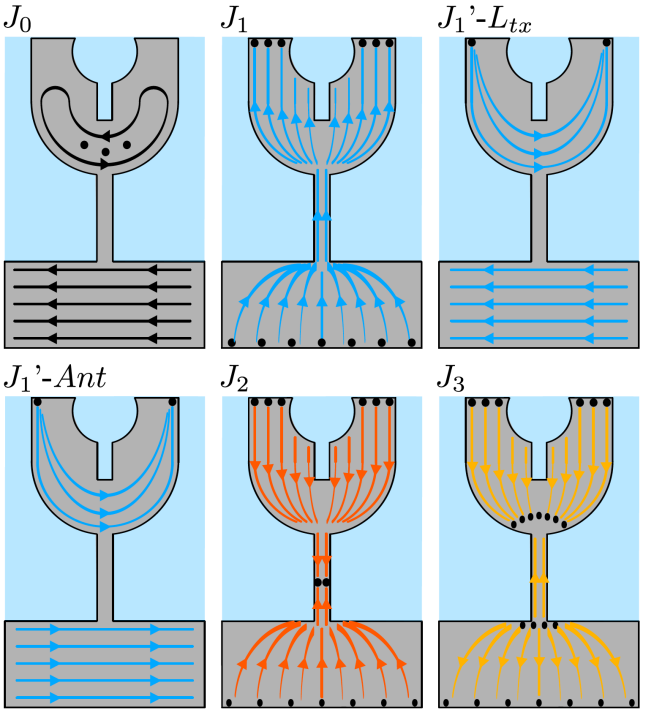


Fig. 4. Distribución de las corrientes características de los primeros modos representados a las frecuencias de resonancia.

A. Análisis de la Estructura 1 con Base en TCM

La formulación matemática mencionada previamente es ejecutada en el software comercial de simulación electromagnética FEKO® para analizar numéricamente los modos característicos de la estructura de la Fig. 1(a) en ausencia de un puerto de excitación. Los primeros cinco ángulos característicos se representan en el rango de frecuencias de 1 GHz a 10 GHz como se observa en la Fig. 3.

En estudios previos [22], [23], se menciona que en estructuras planas siempre aparecen las dos polarizaciones (vertical y horizontal), entonces, debido a la asimetría que presenta

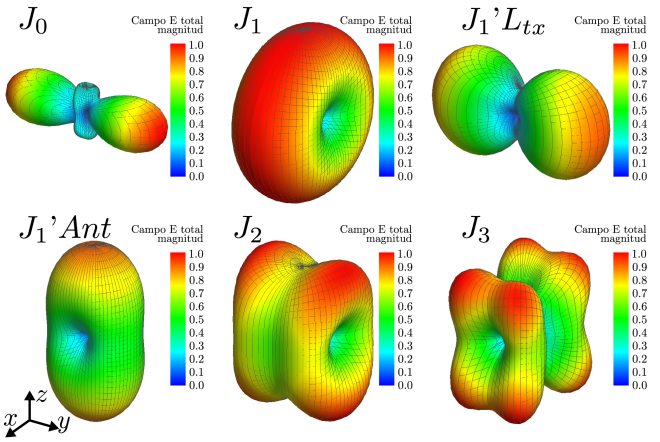


Fig. 5. Representación en 3D de los diagramas de radiación de los primeros modos representados a las frecuencias de resonancia de la estructura 1.

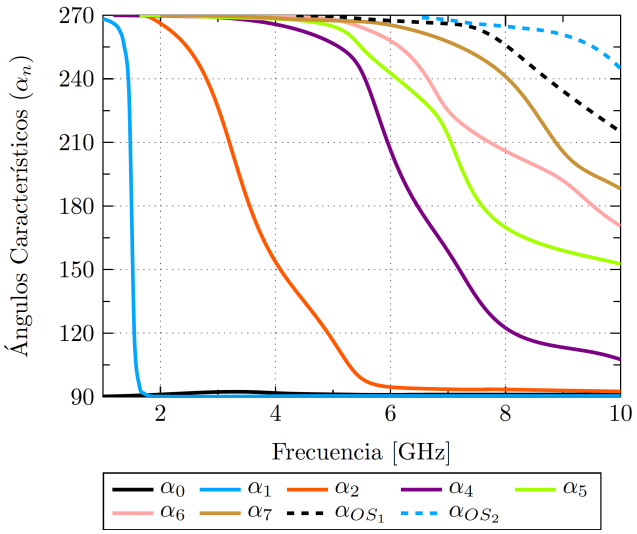


Fig. 6. Ángulos característicos α_n de los modos existentes en la estructura propuesta excitada por un punto de alimentación.

la estructura, las resonancias de los modos con polarización horizontal (o modos degenerados) estarán desplazadas a frecuencias más altas que las de polarización vertical. Por otro lado, cuando interactúan dos estructuras entre sí, como el caso del dipolo asimétrico (estructura 1), se generan 2 tipos de modos, el de tipo antena y el línea de transmisión, estos últimos modos se describen cuando las corrientes entre las dos estructuras fluyen en sentido contrario, mientras que en los modos antena las corrientes van en el mismo sentido. Estos comportamientos pueden visualizarse con la distribución de corrientes mostradas en la Fig. 4, cada una de ellas han sido representadas a la frecuencia de resonancia, p. ej. en el caso del modo fundamental J_1 vertical se grafica a 1.55 GHz.

Los diagramas de radiación característicos de los primeros modos característicos a las mismas frecuencias de resonancia de la distribución de corrientes se muestran en la Fig. 5. Para los propósitos de muchas aplicaciones, los diagramas de radiación en dirección *broadside* son los de mayor interés, por lo tanto, lo idóneo sería forzar la excitación de los modos J_1 y J_1'Ant.

Entonces, si se inserta un punto de alimentación entre la línea de transmisión que corto-circuita los dos elementos que componen la estructura, solamente los modos verticales serán excitados, siendo muy evidente que las frecuencias de resonancia de cada uno de los modos están dadas por la longitud vertical de la estructura. Consecuentemente en este caso el único modo que sería aprovechable por su diagrama de radiación resultaría ser el modo J_1.

B. Análisis de la Estructura 2 con Base en TCM

Para el estudio de la estructura 2, se emplea un punto de alimentación en el borde, es decir, el puerto se coloca entre el extremo de la línea de transmisión y la placa rectangular que actúa como plano de masa, de esta forma nuevamente se forzará la excitación de los modos con la polarización vertical, la representación de los primeros ángulos característicos son mostrados en la Fig. 6. Si comparamos el modo fundamental (J_1) de la estructura 1 y 2, resulta ser que el modo de la estructura 2 es un poco más inductivo que el de la estructura 1,

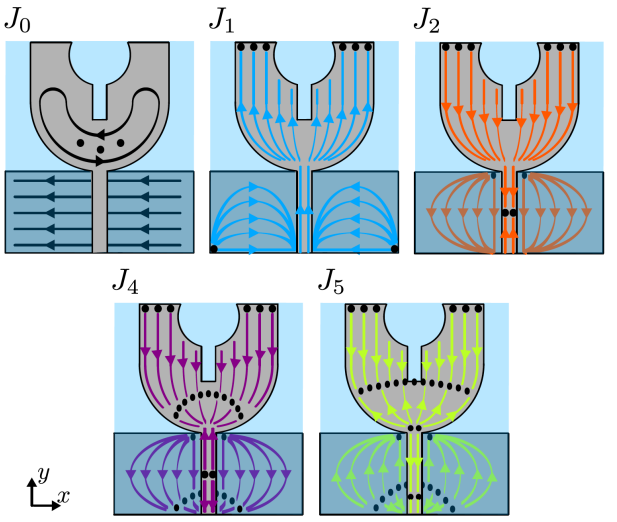


Fig. 7. Distribución de corriente modal de la estructura con línea microstrip y plano de tierra de los 5 modos a sus respectivas frecuencias de resonancia.

con un ancho de banda más reducido, a pesar de ello, ambos modos están resonando a una frecuencia muy cercana. Para los modos J_2 y J_3 de la estructura 2, las resonancias se han desplazado hacia una frecuencia menor, pasando de 5.2 GHz a 3.5 GHz y de 8.3 GHz a 6.4 GHz respectivamente.

En la Fig. 7, se presentan las corrientes características de la estructura 2 a cada una de sus frecuencias de resonancia. Al realizar el plegado de la estructura, se logra aprovechar la distribución de las corrientes características. Por ejemplo, en los casos de los modos J_2 y J_4, las corrientes características en la capa frontal y trasera coinciden en su dirección de flujo, en una pequeña zona en la línea de transmisión en donde las corrientes están en la dirección opuesta a la de la capa trasera, se genera una anulación de corrientes virtuales, sin embargo, este comportamiento es despreciable en comparación de todas las corrientes que generaron en toda la antena.

La generación de estas corrientes con este tipo de configu-

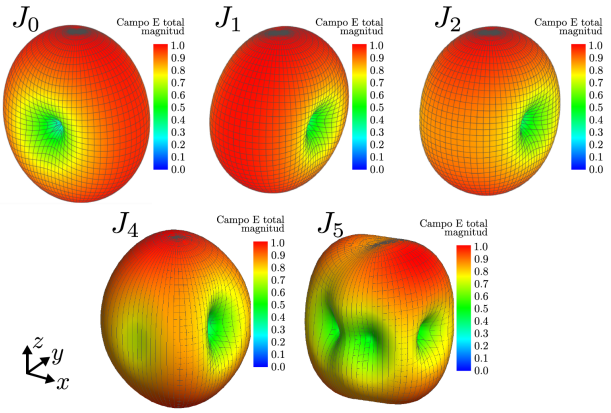


Fig. 8. Diagramas modales de radiación de los 5 modos representados a sus respectivas frecuencias de resonancia.

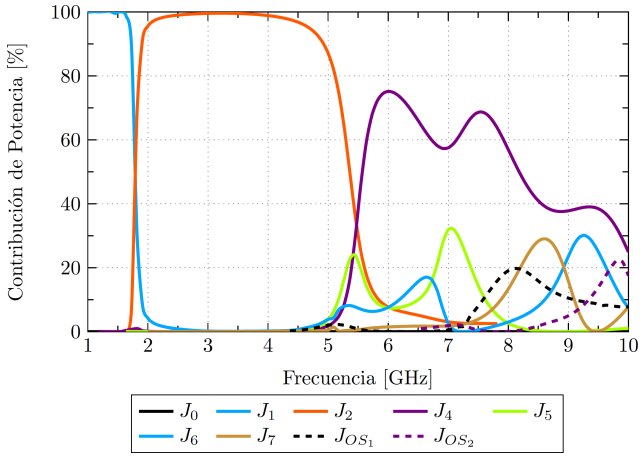


Fig. 9. Contribución de potencias generadas por cada uno de los modos existentes en la estructura propuesta.

ración, permite obtener diagramas de radiación muy diferentes a los mostrados en la Fig. 5, algunos de ellos a la frecuencia de resonancia presentan una radiación en la dirección broadside, como los conseguidos por los modos J_0, J_1, J_2 y J_4 que se describen en la Fig. 8.

Una vez comprendido el comportamiento de las corrientes y los diagramas de radiación característicos, es importante conocer el porcentaje de potencia que aporta cada uno de los modos a la radiación total. En la Fig. 9, se puede observar que los modos J_1, J_2 y J_4 son los que más aportan a la potencia radiada para el rango de 1 GHz a 10 GHz. El modo J_1 que resuena entorno a 1.5 GHz, será el modo principal para la banda de 1 GHz a 1.85 GHz. A partir de 1.9 GHz hasta los 5.2 GHz, se observa que el modo J_2 contribuye con la mayor parte de la potencia. Finalmente, la radiación que se genera para las frecuencias superiores a los 5.5 GHz, son producto de una combinación de modos, en donde el modo J_4 es el dominante, los demás modos como el J_0 y los de orden superior contribuirán con un menor porcentaje.

La antena puede generar un gran ancho de banda cuando se consigue una configuración física óptima como es el caso de la estructura 2, porque se hace coincidir los bordes del plano de masa y la capa superior en un punto tangencial, este efecto

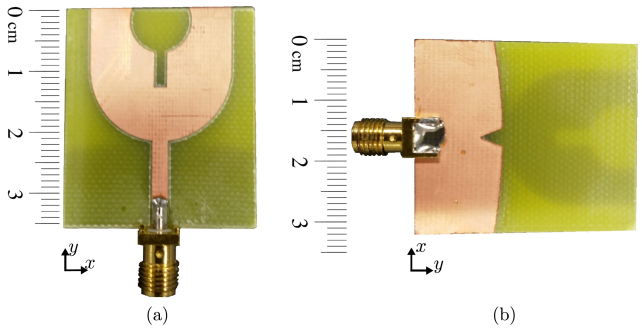


Fig. 10. Vista frontal y trasera de la antena propuesta manufacturada.

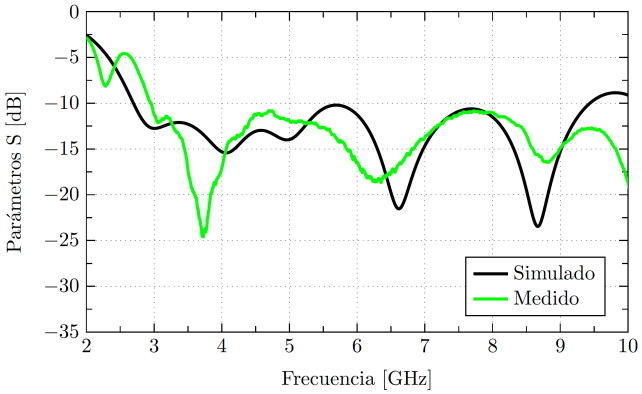


Fig. 11. Comparación del coeficiente de reflexión (S_{11}) simulado y medido de antena propuesta V.2.

se genera aproximadamente en el centro de la estructura. Esta configuración permite que la dirección de las corrientes en algunos modos coincida entre la placa inferior y superior. Por otro lado, este efecto de UWB también se consigue porque las frecuencias de los modos más bajos están cercanas en resonancia y tienen un ancho de banda modal óptimo, mientras que para las frecuencias más altas existe una combinación de modos que se compensan entre el almacenamiento de energía capacitiva e inductiva.

IV. Resultados Experimentales y Discusión

La Fig. 2 muestra que el parámetro S_{11} a frecuencias superiores a 5.5 GHz no es óptimo. Entonces, para optimizarlo se ha modificado la geometría de la parte trasera de la estructura, es decir el plano de tierra, justo a la mitad de uno de sus lados se ha realizado un pequeño corte triangular seguido de una ligera deformación de forma circular en ambos lados. La antena propuesta manufacturada se muestra en la Fig. 10, para su fabricación se ha empleado una maquina fresadora CNC sobre un material FR-4 con características especificadas en la sección II. La estructura es alimentada mediante un puerto comercial SMA de 50 Ω. Es muy importante resaltar que la modificación realizada en el plano de masa ha sido para mejorar el acoplamiento de impedancias, y conseguir mayor ancho de banda. Esta configuración no afecta a las propiedades electromagnéticas descritas por la TCM en la sección anterior.

En la Fig. 11, se ilustra la comparación de los parámetros S_{11} obtenidos por el simulador electromagnético y un instru-

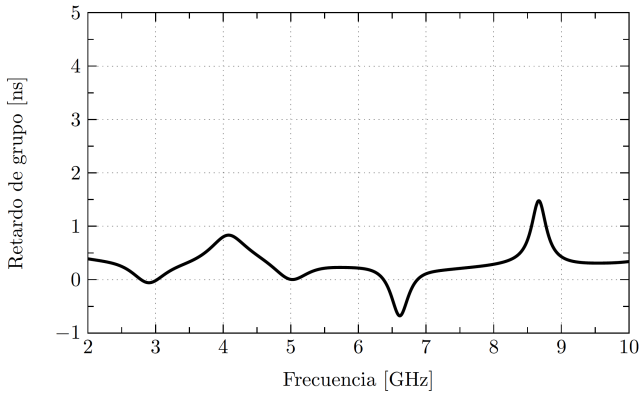


Fig. 12. Retardo de grupo de la antena UWB propuesta.

mento de medida. Los resultados de la simulación muestran un ancho de banda que van desde los 2.8 GHz hasta los 9.4 GHz para valores $S_{11} < -10$ dB, mientras que los resultados medidos representan un mayor ancho de banda, superior a los 10 GHz la antena aún se encuentra muy bien acoplada. Esta variación viene dado por la precisión en el proceso de fabricación, ya no se puede tener un control absoluto cuando se tiene un diseño de doble cara.

Un parámetro igual de importante en el diseño UWB es el retardo de grupo, este proporciona información sobre el grado de distorsión de las componentes de frecuencia de la señal UWB, si la distorsión fuese elevada existirían problemas, como la interferencia inter-símbolo. La Fig. 12 muestra el resultado de la simulación del retardo de grupo, se puede apreciar en la gráfica que dicho parámetro, que se mide en ns, se mantiene entorno a valores cercanos a cero, lo que indica que la distorsión es despreciable en la banda de interés, confirmando que la antena es adecuada para comunicaciones UWB.

En la Fig. 13, se muestran algunos de los diagramas de radiación medidos de la antena propuesta visualizados en los planos YZ y XZ y en coordenadas polares, para algunas frecuencias entre los 3 GHz a 9 GHz, para las frecuencias bajas se presentan diagramas de radiación con tendencia a ser unidireccionales en ambos planos, pero que a medida que se sube en frecuencia, los diagramas de radiación se empiezan a deformarse, generando haces en múltiples direcciones.

V. Conclusiones

Partiendo de un dipolo asimétrico (estructura 1) que al ser doblado sobre sí mismo define un monopolo (estructura 2) que presenta mejores características de radiación y de ancho de banda, se ha determinado los parámetros óptimos de la antena prototipo. Adicionalmente, el análisis de dichas estructuras con base en el estudio de sus modos característicos ha propiciado el conocimiento de las propiedades electromagnéticas del elemento radiante en la banda UWB, brindando una perspectiva del mecanismo de funcionamiento de la antena propuesta.

El estudio del porcentaje de potencia que aporta cada uno de los modos característicos de la estructura 2 ha permitido alcanzar una visión sobre que la superposición de las resonancias individuales de los modos permite una resonancia múltiple

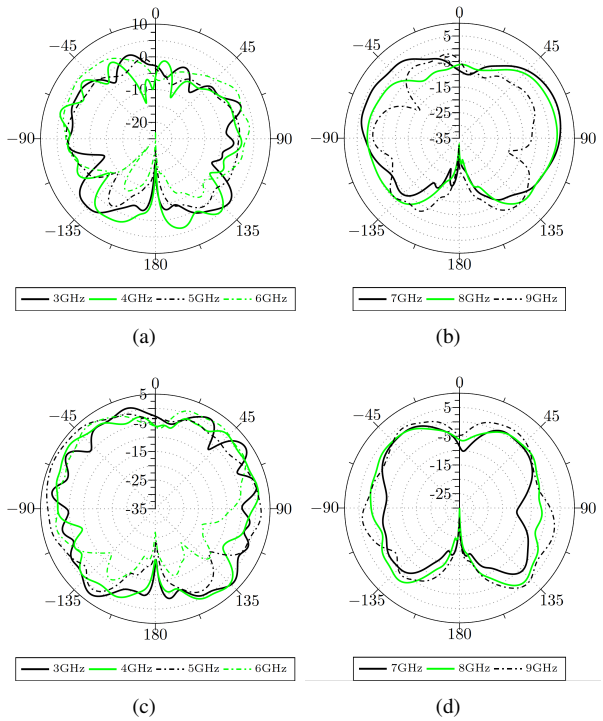


Fig. 13. Diagramas de Radiación medidos de la antena propuesta. (a) Vista del plano XZ de 3 a 6 GHz, (b) Plano XZ de 7 a 9 GHz, (c) Plano YZ de 3 a 6 GHz y, (d) Plano YZ de 7 a 9 GHz.

dando lugar a la operación de gran ancho de banda de la antena UWB propuesta. Para frecuencias inferiores a los 5.5 GHz, los modos responsables de la radiación son los modos J_1 y J_2, de 1 a 1.85 GHz el modo J_1 y para las siguientes frecuencias el modo J_2, ambos casos casi en un 100%. Para frecuencias superiores a los 5.5 GHz, existe una combinación de múltiples modos, siendo el modo J_4 el más relevante y los otros modos de orden superior con menores porcentajes de aportación a la potencia total radiada.

El prototipo final ha sido definido mediante la optimización de la estructura 2 que se ha basado en la modificación del plano de tierra, sin que esto modifique algún modo característico, esta optimización ha permitido determinar los parámetros que mejoran la adaptación de impedancia y las características de radiación en la banda de interés.

Agradecimientos

Los autores agradecen a los Profesores Miguel Ferrando Bataller y Marta Cabedo Fabrès de la Universitat Politècnica de Valencia, por su colaboración y asesoría para el desarrollo de este artículo. A la Universidad Nacional de Chimborazo por el respaldo a través de beca de estudios, y al semillero de Investigación Smart Tech de la UNACH.

References

[1] F. C. Commission *et al.*, "Revision of part 15 of the commission's rules regarding ultra-wideband transmission systems," *First Report and Order, FCC 02-48*, 2002.

[2] Á. C. Aznar, J. R. Robert, J. M. R. Casals, L. J. Roca, S. B. Boris, and M. F. Bataller, *Antenas*. Univ. Politèc. de Catalunya, 2004.

[3] C. A. Balanis, *Antenna theory: analysis and design*. John wiley & sons, 2016.
[4] R. Azim, M. T. Islam, and A. T. Mobashsher, "Design of a dual band-notch UWB slot antenna by means of simple parasitic slits," *IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters*, vol. 12, pp. 1412–1415, 2013.
[5] S. M. Campo, R. J. Bermudez, F. G. Serna, M. O. Oliveira, and O. E. Perrone, "Simulation and analysis of the radiation pattern of microstrip patch-type antenna," *IEEE Latin America Transactions*, vol. 11, no. 1, pp. 341–346, 2013.
[6] A. J. A. Al-Gburi, I. B. M. Ibrahim, M. Y. Zeain, and Z. Zakaria, "Compact size and high gain of CPW-Fed UWB strawberry artistic shaped printed monopole antennas using FSS single layer reflector," *IEEE Access*, vol. 8, pp. 92 697–92 707, 2020.
[7] M. B. Perotoni, M. S. Vieira, E. T. dos Santos, and S. E. Barbin, "Wideband planar monopole antennas for the brazilian digital tv system," *IEEE Latin America Transactions*, vol. 13, no. 1, pp. 102–106, 2015.
[8] S. Brebels, J. Ryckaert, B. Côme, S. Donnay, W. De Raedt, E. Beyne, and R. P. Mertens, "SOP integration and codesign of antennas," *IEEE Transactions on Advanced Packaging*, vol. 27, no. 2, pp. 341–351, may 2004.
[9] H. H. Tran, N. Nguyen-Trong, and A. M. Abbosh, "Simple design procedure of a broadband circularly polarized slot monopole antenna assisted by characteristic mode analysis," *IEEE Access*, vol. 6, pp. 78 386–78 393, 2018.
[10] B. K. Lau, D. Manteuffel, H. Arai, and S. V. Hum, "Guest Editorial: Theory and Applications of Characteristic Modes," pp. 2590–2594, jul 2016.
[11] S. Bhattacharjee, "Analysis of Printed Monopole Antennas," Ph.D. dissertation, Indian Institute of Technology Guwahati, 2016. [Online]. Available: http://gyan.iitg.ernet.in/handle/123456789/778
[12] N. M. Mohamed-Hicho, E. Antonino-Daviu, M. Cabedo-Fabres, and M. Ferrando-Bataller, "Designing slot antennas in finite platforms using characteristic modes," *IEEE Access*, vol. 6, pp. 41 346–41 355, 2018.
[13] D. Wen, Y. Hao, M. O. Munoz, H. Wang, and H. Zhou, "A compact and low-profile MIMO antenna using a miniature circular high-impedance surface for wearable applications," *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, vol. 66, no. 1, pp. 96–104, 2017.
[14] A. Sharif, J. Ouyang, F. Yang, H. T. Chattha, M. A. Imran, A. Alomainy, and Q. H. Abbasi, "Low-cost inkjet-printed UHF RFID tag-based system for internet of things applications using characteristic modes," *IEEE Internet of Things Journal*, vol. 6, no. 2, pp. 3962–3975, 2019.
[15] B. R. Perli and A. M. Rao, "Characteristic mode analysis of wideband microstrip antenna," *Progress In Electromagnetics Research C*, vol. 97, pp. 201–212, 2019. [Online]. Available: http://www.jpier.org/PIERC/pier.php?paper=19091401
[16] C. R. Peñafiel-Ojeda, M. Cabedo-Fabrés, E. Antonino-Daviu, and M. Ferrando-Bataller, "Air-filled substrate integrate waveguide antenna analyzed with theory of characteristic modes," in *2019 13th European Conference on Antennas and Propagation (EuCAP)*. IEEE, 2019, pp. 1–5.
[17] C. R. Penafiel-Ojeda, M. Cabedo-Fabres, E. Antonino-Daviu, and M. Ferrando-Bataller, "Design of an unidirectional UWB cavity backed antenna," in *2017 IEEE MTT-S International Conference on Numerical Electromagnetic and Multiphysics Modeling and Optimization for RF, Microwave, and Terahertz Applications, NEMO 2017*. IEEE, jun 2017, pp. 28–30.
[18] C. R. Peñafiel-Ojeda, M. Cabedo-Fabrés, A. Llanga-Vargas, and M. Ferrando-Bataller, "Low-profile UWB antenna with unidirectional radiation pattern analyzed with the theory of characteristic modes," *AEU-International Journal of Electronics and Communications*, vol. 142, p. 153981, 2021.
[19] R. J. Garbacz, "Modal Expansions for Resonance Scattering Phenomena," *Proceedings of the IEEE*, vol. 53, no. 8, pp. 856–864, 1965.
[20] R. F. Harrington and J. R. Mautz, "Theory of Characteristic Modes for Conducting Bodies," *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, vol. 19, no. 5, pp. 622–628, 1971.
[21] Y. Chen and C.-F. Wang, *Characteristic Mode: Theory and Applications in Antenna Engineering*. Hoboken, NJ: John Wiley & Sons, Inc, 2015.
[22] M. Cabedo-Fabres, E. Antonino-Daviu, A. Valero-Nogueira, and M. F. Bataller, "The theory of characteristic modes revisited: A contribution to the design of antennas for modern applications," *IEEE Antennas and Propagation Magazine*, vol. 49, no. 5, pp. 52–68, oct 2007.
[23] M. Cabedo Fabres, "Systematic design of antennas using the theory of characteristic modes," Ph.D. dissertation, Universitat Politècnica de València, Valencia (Spain), may 2007. [Online]. Available: https://riunet.upv.es/handle/10251/1883



Carlos Ramiro Peñafiel-Ojeda was born in Cañar, Ecuador, in January 1989. He received an MS degree from the University of Calabria, Cosenza Italy, in 2014. He received the Ph.D. degree in Telecommunications Engineering (Cum Laude) from the Universitat Politècnica de Valencia, Spain, in 2021. During 2013, he participated in the "Messageri della Conoscenza" Project, being invited to participate in projects on drones at the Université de Technologie Compiègne, Compiegne, France. From 2013 to 2014, he was an Assistant Professor with the Universidad Politécnica Salesiana, Quito, Ecuador. In 2014, he became an Assistant Professor with the Universidad Nacional de Chimborazo, Riobamba, Ecuador. In 2018, he participated as a researcher in the Antennas and Electromagnetism Group at the Queen Mary University of London, London, UK. His research interest include wearables antennas, metasurfaces, satellite communication devices, MIMO antennas, 5G and 6G technology, antennas for IoT applications.



Carlos Efrain Andrade received the B.S. degree in electronic engineering and the M.S. degree in telecommunication engineering, both from the University of Calabria, CS, Italy, in 2011 and 2015 respectively. From 2016 to 2020 he was with Facultad de Ingeniería en Ciencias Aplicadas, Universidad Técnica del Norte, Imbabura, Ecuador, as an Adjunct Professor. He joined the Facultad de Ciencias de la Ingeniería, Universidad Técnica Estatal de Quevedo, Quevedo, Ecuador, as an Adjunct Professor in 2021. His current research interests include printed antennas, MMIC, massive MIMO, and 5G/6G.



Ricardo Baez-Egas was born in Ibarra, Ecuador, in 1995. He is currently pursuing a B.S. degree in electronic and communication networks engineering with the Universidad Técnica del Norte, Imbabura, Ibarra, Ecuador. His main research interests include the analysis and design of antennas and sensor networks.



Vladimir García-Santos was born in Riobamba, Ecuador, in 1989. He received the B.S. degree in electronic engineering in 2011 and the M.S. degree in telecommunication engineering in 2015, both from the University of Calabria, CS, Italy. He is currently an Adjunct Professor with Universidad Estatal Península de Santa Elena, La Libertad, Ecuador. His main research interests include antennas for telecommunications applications, RF and microwave communication for 5G networks, RF and microwave sensors.