

Miniaturización con metamaterial de una antena PIFA de triple banda para comunicación Wi-Fi

Miniaturization with Metamaterial of a Triple Band PIFA Antenna for Wi-Fi Communication

Axel Hemsy ^{#*a1}, Juan E. Ise ^{#2}, Fernando A. Miranda Bonomi [#], Miguel A. Cabrera [#], Mariano Fagre ^{#a}

[#] *Laboratorio de Telecomunicaciones, Facultad de Ciencias Exactas e Ingeniería, Universidad Nacional de Tucumán
 Av. Independencia 1800, Tucumán (4000), Argentina*

¹ ahemsy@herrera.unt.edu.ar

² jise@herrera.unt.edu.ar

^{*} *Laboratorio de Dieléctricos, Facultad de Ciencias Exactas e Ingeniería, Universidad Nacional de Tucumán
 Av. Independencia 1800, Tucumán (4000), Argentina*

^a *Consejo Nacional de Investigaciones Científicas y Técnicas (CONICET)
 Tucumán (4000), Argentina*

Recibido: 20/06/24; Aceptado: 05/08/24

Resumen— En este trabajo se diseñó y modeló una antena F invertida plana (PIFA) de triple banda en las frecuencias de WiFi no licenciadas (2.4, 5 y 6 GHz). En la propuesta realizada se utilizó una celda unitaria de metamaterial que se replicó en el plano de tierra obteniendo una reducción en el tamaño de la antena con respecto a otras ya publicadas. La geometría de la celda se basa en la de un fractal de Minkowski. En el parche se realizó una ranura en forma de J que permitió ajustar las frecuencias de resonancias a las de WiFi. Se obtuvo una eficiencia de radiación del orden del 23% para la banda de 2.4 GHz, superior al 74% en la banda de 5 GHz y del 96% en la banda de 6 GHz.

Palabras clave: metamaterial, celda unitaria, antena PIFA, WiFi.

Abstract— In this work, a triple-band planar inverted F antenna (PIFA) was designed and modeled at unlicensed WiFi frequencies (2.4, 5 and 6 GHz). In the proposal made, a metamaterial unit cell was used that was replicated in the ground plane, obtaining a reduction in the size of the antenna with respect to others already published. The cell geometry is based on Minkowski fractal. A J-shaped slot was made in the patch that allowed the resonance frequencies to be adjusted to those of WiFi. A radiation efficiency of around 23% was obtained for the 2.4 GHz band, higher than 74% in the 5 GHz band and 96% in the 6 GHz band.

Keywords: metamaterial, unit cell, antenna PIFA, WiFi.

I. INTRODUCCIÓN

Si bien desde finales de los años 60 se ha especulado teóricamente con la posibilidad de contar con medios que presenten valores simultáneos de permitividad eléctrica (ϵ) y permeabilidad magnética (μ) negativas [1], recién en los últimos años pudieron fabricarse en laboratorio [2], [3] y con aplicaciones de las más variadas. Los metamateriales (MTM) son ampliamente definidos como estructuras electromagnéticas efectivamente homogéneas con inusuales

propiedades electromagnéticas, no disponibles en medios naturales. El metamaterial se construye formando una disposición de estructuras periódicas y aperiódicas [4]. Estas estructuras, que deben ser mucho más chicas que la longitud de onda, se conocen como celdas unitarias y son similares a los átomos o moléculas de un material ordinario y controlan las propiedades electromagnéticas del metamaterial [5].

En [5] se exponen las diferentes aplicaciones de los metamateriales en las antenas microstrip, donde consideran de gran importancia su utilización en la miniaturización de antenas. La idea del uso de metamateriales, para reducir el tamaño de la antena, es cargar al parche radiante con cargas capacitivas e inductivas en serie o en derivación. Estas cargas, inductivas y capacitivas, se pueden modelar diseñando celdas unitarias de metamateriales apropiados [5]. Por otro lado, los metamateriales también se utilizan en las antenas colocando una metasuperficie altamente reflectante encima del plano a tierra, formando una cavidad al aire libre. La altura de la cavidad y la metasuperficie pueden controlar la ganancia y el ancho de banda del radiador de la cavidad. Un plano de tierra conductor detrás de la antena de parche actúa como un blindaje mejorando la relación adelante-atrás de la antena. El plano de tierra y el supersustrato de metamaterial reflectante actúan como placas paralelas donde tienen lugar múltiples reflexiones en el medio dentro de la cavidad, lo que causa un aumento en la ganancia de la antena [5].

En [6] se muestra con claridad que el uso de metamateriales en un diseño de antena es una tendencia atractiva no sólo para reducir el tamaño, mejorar la ganancia de potencia y mejorar el ancho de banda, sino también para diseñar antenas de banda multifrecuencia. También, en [7] se realiza una revisión exhaustiva de los metamateriales y su aplicación en los sistemas de comunicación 5G y 6G, donde se concluye que la aplicación de metamateriales incluye la mejora del ancho de banda y la ganancia, la reducción del

tamaño, la mejora de la eficiencia y la reconfiguración de la frecuencia y el patrón.

Las antenas planas F invertidas (PIFA, por sus siglas en inglés: planar F inverted Antenna) se utilizan generalmente en aplicaciones móviles porque son compactas, de fácil fabricación, se integran en los circuitos impresos y son livianas [8]. En esta misma referencia se comentan las distintas aplicaciones electromagnéticas de los metamateriales y afirma que la inclusión de metamateriales al sistema PIFA lo hace más compacto, lo que superará los desafíos que enfrenta la miniaturización de los sistemas de antenas en las comunicaciones móviles.

En [9] se diseña una antena PIFA que permite una reducción de al menos la mitad del tamaño con respecto a una antena microstrip básica. En [10] se plantea que una limitación de las antenas PIFA es su ancho de banda generalmente estrecho, lo cual solucionan con una estructura metamaterial en el plano de tierra que permitió miniaturizar la antena en un 91% y aumentó al triple el ancho de banda con respecto a la PIFA convencional.

El objetivo de este trabajo es el diseño y modelado de una antena PIFA que opere en las bandas de WiFi no licenciadas: 2.4, 5 y 6 GHz. Para lograr sintonizar la antena con las bandas de frecuencias deseadas se introdujo una ranura en el parche, como ya lo hicieron previamente otros autores. En la bibliografía se encontró que en [9] se diseñó una antena PIFA de doble banda para dispositivos móviles utilizando una ranura en forma de L en el parche y de modo tal que, modificando el largo o el espesor, es posible modificar la frecuencia de operación de la antena. En [11] se propone el uso de una ranura en forma de J en el parche de la antena PIFA para que la misma sea multibanda. En [12] se agrega dos brazos abiertos en forma de L en la antena PIFA para aplicaciones en LTE (1.8 GHz) y WiFi (2.4 y 5 GHz). La introducción de una ranura modifica parámetros tales como: impedancia de entrada, ancho de banda, eficiencia de radiación y patrón de radiación. Esto se debe a que la ranura modifica la distribución de corrientes y por lo tanto el campo electromagnético radiado [11].

II. MÉTODO DE TRABAJO

A. Diseño de la antena

La antena PIFA se diseñó y modeló utilizando el software CST con un sustrato Rogers RO4350B, disponible en el Laboratorio de Telecomunicaciones. En la Tabla I se indican las características de la placa RO4350B.

El plano de tierra está formado por una matriz de 2 celdas unitarias con la idea de lograr una reducción en el tamaño de la antena [5], [10], [13]. En la introducción se detalló que la metasuperficie podía realizarse en el plano de tierra o bien colocarla encima de la antena como una superficie reflectante. Se optó por la primera aplicación con el objetivo de que la antena sea más compacta y para que pueda utilizarse en dispositivos pequeños como por ejemplo en teléfonos celulares.

En un primer diseño se buscó que la antena opere en las bandas de WiFi de 2.4 y 5 GHz. El diseño era de mayor tamaño y el plano de tierra estaba formado por una metasuperficie formada por seis celdas unitarias. Luego se decidió considerar la banda de 6 GHz y se llegó al diseño actual. No se encontró publicado un diseño de PIFA con las

características de la del presente trabajo que opere en las tres bandas de WiFi. Existen antenas planas, publicadas para computadoras portátiles, resonantes en las tres bandas de WiFi, pero el plano de tierra tiene dimensiones considerables, por lo cual no cumplen con el objetivo del presente trabajo [14], [15].

Como se ilustra en la Figura 1, se alimenta la antena mediante una sonda coaxial. La Figura 2 muestra una vista de frente de la antena con sus dimensiones. La PIFA tiene un tamaño de 19.50 mm de largo, 13.50 mm de ancho y una altura de 1.15 mm.

TABLA I
CARACTERÍSTICAS DEL SUSTRATO ROGERS RO4350B

ϵ_r	Tangente de pérdidas 2.4 GHz	Espesor sustrato (mm)	Espesor cobre (mm)
3.48	0.0031	0.76	0.035

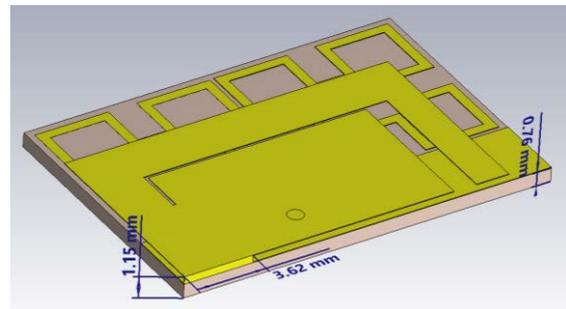


Fig. 1. Antena PIFA alimentada por una sonda coaxial. El plano de tierra está formado por celdas unitarias y en el parche se cortó una ranura en forma de J.

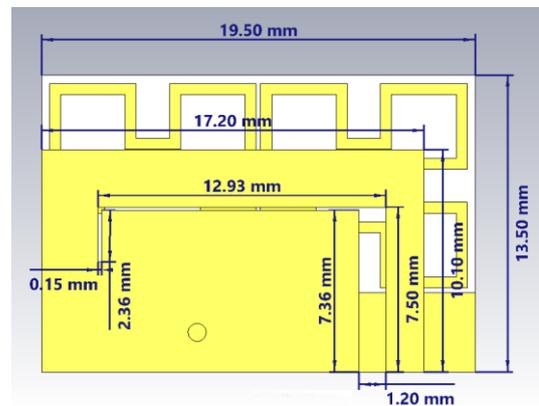


Fig. 2. Vista superior de la antena PIFA.

B. Metamaterial- Diseño de la celda unitaria

La estructura metamaterial de este trabajo consiste en una disposición periódica bidimensional de dos celdas de cobre que están impresas sobre el sustrato Rogers RO4350B, y que se encuentra formando el plano de tierra de la antena.

El diseño de la celda unitaria, cuadrada de 9.50 mm de lado, se muestra en la Figura 3 con sus respectivas dimensiones. La forma geométrica corresponde a una estructura fractal de Minkowski generada en primera iteración. Para su generación se parte de un segmento -iniciador- y el generador que consta de 5 segmentos, tal como puede observarse en la Figura 4. Esta geometría fue utilizada en [16] para implementar una antena tipo parche de 2.4 GHz, teniendo el diseño una asimetría entre los lados derecho e izquierdo respecto de los lados superior e inferior

y donde el metamaterial se encontraba dispuesto como una superficie reflectiva a una distancia determinada de la antena. Otro trabajo de similares características es [13] donde se diseña una antena PIFA utilizando una celda del tipo fractal de Minkowski, pero con el interior completamente de cobre, a diferencia de lo realizado por [16]. En el presente trabajo se propone un diseño similar a lo planteado por [16] pero ubicando la estructura del metamaterial dentro del plano de tierra y agregando la ranura en forma de J en el parche, todo ello con el objetivo de simplificar el diseño y al mismo tiempo obtener las características de antena PIFA y lograr el correcto funcionamiento en las bandas de 2.4, 5 y 6 GHz. Para determinar las dimensiones de la antena aquí propuesta se tuvo en cuenta en el diseño que el tamaño de la celda unitaria no sea superior a la longitud de onda. Al existir una relación inversa entre la longitud de onda y la frecuencia, el límite superior de la banda de WiFi de 6 GHz (7.125 GHz) corresponde a la menor longitud de onda (42.08 mm) de funcionamiento de la antena. En [17] se expone que el tamaño de la celda unitaria debe ser 4 veces menor que la longitud de onda para que se cumpla la condición de homogeneidad efectiva. En el presente trabajo, el tamaño de la celda cuadrada es de 9.50 mm, con lo cual se verifica que es más de 4 veces menor que la longitud de onda para el caso más extremo.

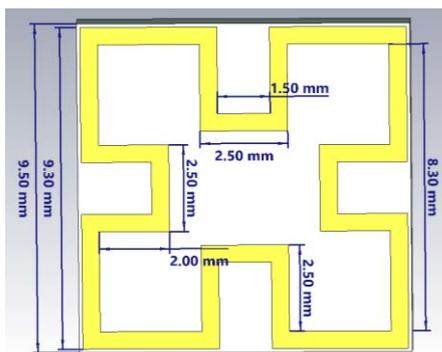


Fig. 3. Diseño de la celda unitaria.

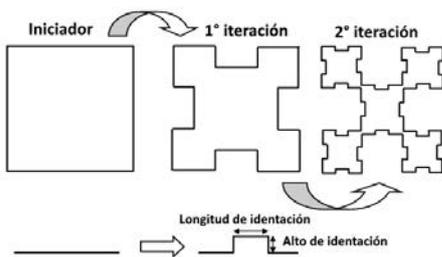


Fig. 4. Procedimiento de generación iterativa para un fractal de Minkowski. (Adaptada de [18]).

C. Introducción de ranuras

La técnica de introducción de ranuras en el parche se utilizó en el diseño de la antena del presente trabajo para que la antena pueda operar simultáneamente en las tres bandas de WiFi. En un primer paso se utilizó la ranura en forma de L para que la antena opere en las bandas de 2.4 y 5 GHz. Luego, con el objetivo de incluir además la banda de 6 GHz, se terminó optando por la ranura en forma de J, como se observa en las Figuras 1 y 2. El ancho y largo de la ranura óptima se obtuvo en el proceso de modelado.

El espectro de frecuencia de cada banda WIFI no licenciadas se indica en la Tabla II.

TABLA III
BANDAS DE WIFI NO LICENCIADAS

Banda WIFI	Espectro de frecuencia
2.4	(2.412 – 2.484) GHz
5	(5.170 – 5.320) GHz (5.500 – 5.825) GHz
6E	(5.925 – 7.125) GHz

III. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

La PIFA diseñada es una antena multibanda que opera en las frecuencias de resonancia mediante la modificación del largo y ancho de las ranuras del parche. En la Figura 5 se muestra el coeficiente de reflexión o parámetro S_{11} de la antena en función de la frecuencia. Los indicadores señalan las frecuencias de inicio y fin de cada una de las bandas de WiFi indicadas en la Tabla II. Como se observa, la antena funciona en las tres bandas de interés, aunque evidencia un rendimiento menor en la banda de 2.4 GHz. Teniendo en cuenta las dimensiones del modelo, la antena diseñada se considera eléctricamente pequeña, por lo tanto, sus pérdidas son altas, especialmente en el cobre, siendo esta la causa de la baja eficiencia en esta banda [19].

En la Tabla III se muestran el coeficiente de reflexión, el ancho de banda, la directividad y la ganancia para las frecuencias de resonancia, tomando en consideración lo planteado por [20], se toma como ancho de banda útil el límite de -6 dB.

TABLA IIIII
BANDAS DE OPERACIÓN DE LA ANTENA

	Banda 2.4	Banda 5		Banda 6
Frecuencia (GHz)	2.438	5.240	5.51	6.806
S_{11}	-12.66 dB	-13.31 dB	-18.04 dB	-16.78 dB
Ancho de banda (GHz)	(2.425 – 2.454)	(5.130 – 5.414)	(5.476 – 7.282)	(5.476 – 7.282)
Ganancia	-4.886 dBi	2.341 dBi	2.072 dBi	4.369 dBi
Directividad	1.420 dBi	2.850 dBi	2.964 dBi	4.570 dBi

La Relación de Onda Estacionaria (ROE) (o VSWR, por sus siglas en inglés) en función de la frecuencia puede observarse en la Figura 6. En las bandas de WiFi de 5 y 6 GHz la ROE se encuentra por debajo de 2.2 dB.

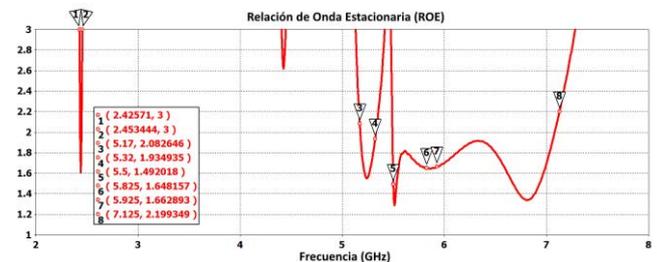


Fig. 6. ROE de la antena en función de la frecuencia.

En la Figura 7 se muestra el patrón de radiación de la antena para las frecuencias de resonancia.

En la Figura 8 se muestra la distribución de corrientes para las cuatro frecuencias de la Tabla III. Allí se observa un aumento en la intensidad de corriente en la ranura J como así también alrededor de las celdas unitarias.

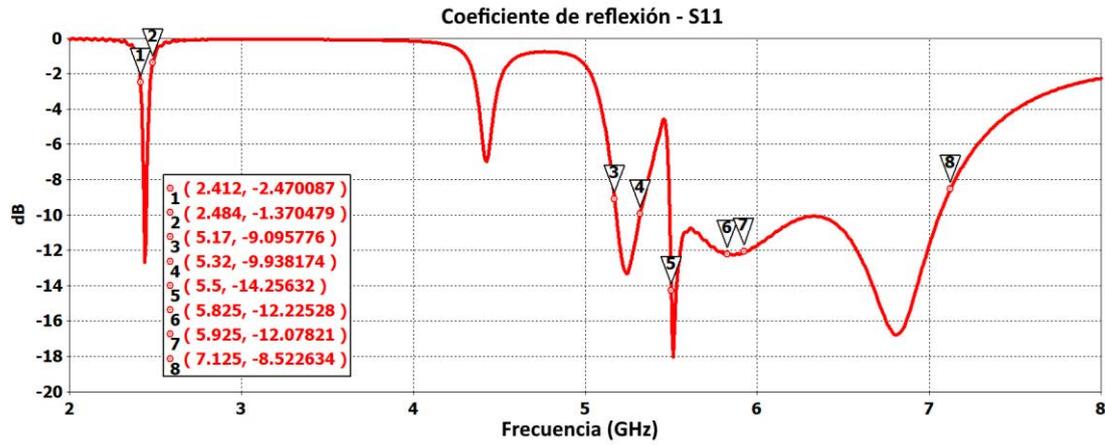


Fig. 5. Coeficiente de reflexión de la antena en función de la frecuencia. Para este trabajo es de interés que las bandas de resonancia se correspondan con las frecuencias de WiFi no licenciada.

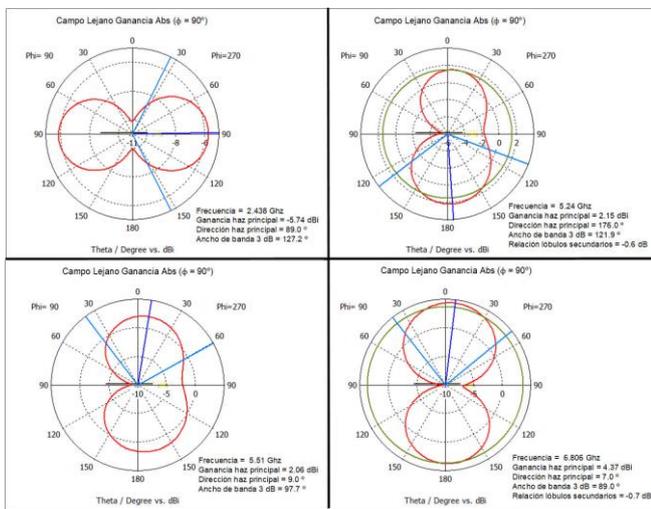


Fig. 7. Patrón de radiación para las frecuencias de resonancia. (a) 2.438 GHz. (b) 5.240 GHz. (c) 5.510 GHz. (d) 6.806 GHz.

A. Miniaturización de la antena

La celda unitaria agregada en la antena se basa en la adición de impedancias y capacitancias en serie o en derivación para disminuir la frecuencia de resonancia, reduciendo así el tamaño eléctrico de la antena PIFA. En la Tabla IV se ilustra una comparación con desarrollos de antenas PIFA convencionales y de antenas PIFA con metamateriales diseñadas por otros autores, que se los puede considerar semejantes, con lo que se aprecia la disminución del volumen de la estructura propuesta.

IV. CONCLUSIONES

Se obtuvo una antena PIFA de triple banda para las bandas de WiFi no licenciadas, con una eficiencia de radiación alrededor del 95% a la frecuencia de mayor atenuación. La ranura en forma de J del parche permite ajustar las frecuencias de operación de la antena a las requeridas.

Mediante el uso de metamateriales en el plano de tierra se logra reducir considerablemente el tamaño de la antena, tomando como referencia otros desarrollos publicados. Por sus dimensiones, esta estructura propuesta, podría ser utilizada en dispositivos electrónicos pequeños como ser telefonía celular.

El siguiente paso de este trabajo es fabricar un prototipo de la antena y realizar mediciones para contrastar experimentalmente los resultados de la simulación.

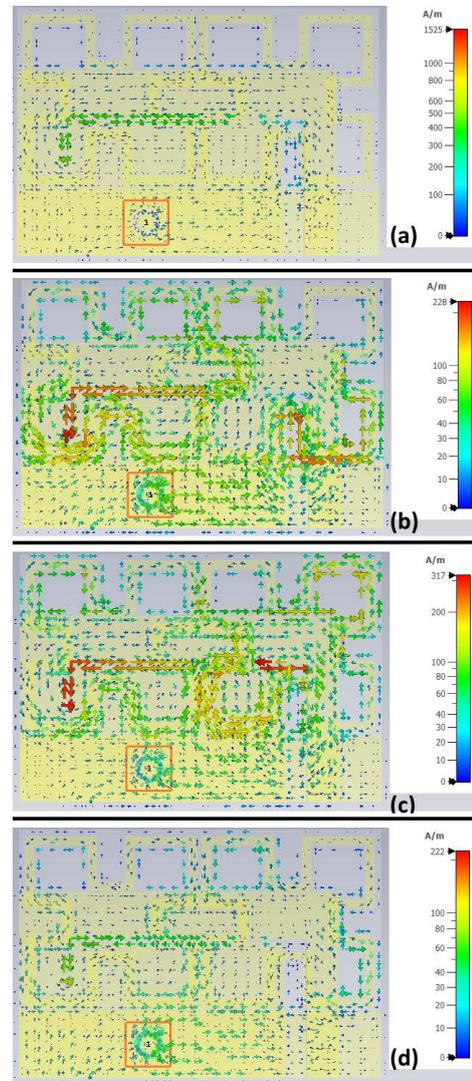


Fig. 8. Corrientes de superficie para las frecuencias de resonancia. (a) 2.438 GHz. (b) 5.240 GHz. (c) 5.510 GHz. (d) 6.806 GHz.

TABLA IVV
COMPARACIÓN DE LA ANTENA PIFA PROPUESTA CON OTRAS PUBLICADAS

Autor	Dimensiones (mm)	Volumen (cm ³)	Frecuencia	ϵ_r	Metamaterial	Ganancia (dBi)	Eficiencia de Radiación (%)
Calixto Méndez et al. (2021)	76x76x1.6	9.2	2.45 – 2.97 – 4.88 GHz	4.4 FR4	No	NA	NA
Pimienta y Lagar (2016)	50x100 x8.13	40.7	920 – 1800 MHz	4.3 FR4	No	1.61 – 4.03	NA
Zhang et al. (2018)	23x80x1.6	2.9	1.8 – 2.4 – 5.5 GHz	4.4 FR4	No	3.3 – 2.1 – 4.1	55.0 – 80.0 – 70.0
Rajpreet Kaur y Naveen (2016)	20x42x3.8	3.2	2.43 – 3.59 GHz	2.2 RO5880	Si	4.03 – 4.03	NA
Xin-yuan et al. (2011)	30x45x6.5	8.8	3.4 GHz	2.55	Si	3	99.4
Jalal et al. (2013)	18.1x36.7x3.165	2.1	915 MHz	4.4 FR4	Si	NA	NA
Este trabajo	19.5x13.5x1.15	0.3	2.438 – 5.240 – 5.51 – 6.806 GHz	3.48 RO4350B	Si	-4.886 – 2.341 – 2.072 – 4.369	23.3 – 85.3 – 74 – 96

REFERENCIAS

- [1] V. G. Veselago, "The Electrodynamics of substances with simultaneously negative values of ϵ and μ ", *Soviet Physics Uspekhi*, vol. 10, N° 4, pp. 509-514, 1968.
- [2] D. R. Smith, W. J. Padilla, D. C. Vier, S. C. Nemat-Nasser and S. Schultz, "Composite Medium with Simultaneously Negative Permeability and Permittivity", *Physical Review Letters*, vol. 84, N° 18, pp. 4184-4187, 2000.
- [3] R. A. Shelby, D. R. Smith and S. Schultz, "Experimental Verification of a Negative Index of Refraction", *Science*, vol. 292, pp. 77-79, 2001.
- [4] R. Rani, P. Kaur and N. Verma, "Metamaterials and Their Applications in Patch Antenna: A Review", *International Journal of Hybrid Information Technology*, vol. 8, N°11, pp. 199-212, 2015. <http://dx.doi.org/10.14257/ijhit.2015.8.11>.
- [5] A. K. Singh, M. P. Abegaonkar and S. K. Koul, *Metamaterials for Antenna Applications*, CRC Press Taylor & Francis Group, 2022. <https://doi.org/10.1201/9781003045885>
- [6] W. Jan Krzysztofik and T. Nghia Cao, *Metamaterials in Application to Improve Antenna Parameters*, Ed. IntechOpen, 2019. doi: 10.5772/intechopen.80636
- [7] M. Hussain, W. A. Awan, M. S. Alzaidi, N. Hussain, E. M. Ali and F. Falcone, "Metamaterials and Their Application in the Performance Enhancement of Reconfigurable Antennas: A Review", *Micromachines* vol. 14, N°2, pp 349, 2023. doi: <https://doi.org/10.3390/mi14020349>
- [8] Choudhury, B (editor), *Metamaterial Inspired Electromagnetic Applications: Role of Intelligent Systems*, Springer, 2017.
- [9] D. Pimienta del Valle, and R. Lagar Perez, "Design of a Dual-Band PIFA for Handset Devices and its SAR Evaluation", *Ingeniería, Investigación y Tecnología*, vol. 17, N° 2, pp. 169-177, 2016.
- [10] L. Xin-yuan, F. Jia-hui, Z. Kuang, H. Jun and W. Qun, "A Compact Wideband Planar Inverted-F Antenna (PIFA) Loaded with Metamaterial", in Proc. Cross Strait Quad-Regional Radio Science and Wireless Technology Conference, 2011, pp. 549-551. doi: 10.1109/CSQRWC.2011.6037008
- [11] J. C. Méndez Calixto, B. Rodríguez Díaz, J. Schandy Wood and M. González Nappa, "Diseño y simulación de una antena PIFA para IoT", *Revista Telemática*, vol. 20, N° 2, pp. 97-112, 2021.
- [12] Y. J. Zhang, D. Wang, L. Zhang and M. S. Tong, "A Modified Planar Inverted-F Antenna with Triple-Band for Wi-Fi and LTE Applications", *Progress In Electromagnetics Research M*, vol. 73, pp. 173-181, 2018.
- [13] A. S. A. Jalal, A. Ismail, A. R. H. Alhawari, M. F. A. Rasid, N. K. Noordin and M. A. Mahdi, "Metal Mount Fractal RFID Tag Antenna with Complementary Split Ring Resonator", *Progress In Electromagnetics Research C*, vol. 39, pp. 25–36, 2013.
- [14] J. Wei-Chiang and S. Jwo-Shiun, "Small Antenna Design of Triple Band for WIFI 6E and WLAN Applications in the Narrow Border Laptop Computer", *International Journal of Antennas and Propagation*, 7334206, 2021.
- [15] C. Y. D. Sim, J. Kulkarni, A. M. Apte, R. Cao, C. C. Chen, S. H. Wang, Y. R. Shu and H. Z. Lai, "A PIFA Design with WLAN and Wi-Fi 6E Band for Laptop Computer Applications", in Proc. IEEE International Symposium on Antennas and Propagation and UNSC-URSI Radio Science Meeting (AP-S/URSI), 2022, pp. 1808-1809. doi: 10.1109/AP-S/USNC-URSI47032.2022.9886623
- [16] J. Singh and F. L. Lohar, "Metamaterial-Based Miniaturized DGS Antenna for Wireless Applications", *IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering*, vol. 1225, N° 1, 012035, 2022. doi: 10.1088/1757-899X/1225/1/012035
- [17] C. Caloz and T. Itoh, *Electromagnetic Metamaterials: transmission line theory and microwave applications*, Ed. Hoboken, New Jersey: John Wiley & Sons, Inc., 2006.
- [18] S. Sankaralingam, S. Dhar, A. K. Bag, A. Kundu and B. Gupta, "Use of Minkowski Fractal Geometry for the Design of Wearable Fully Fabric Compact Antenna", *Journal of Physical Sciences*, vol. 18, pp. 7-13, 2014.
- [19] R. C. Hansen and R. E. Collin, *Small Antenna Handbook*, Ed. Hoboken, New Jersey: John Wiley & Sons, Inc., 2011.
- [20] C. A. Balanis, *Modern Antenna Handbook*, John Wiley & Sons, 2018.
- [21] S. Rajpreet Kaur and K. Naveen, "Dual Band Planar Inverted F Antenna with Metamaterial Superstate for LTE/ WLAN/ WiMAX Mobile Communication", in Proc. 7th IEEE Indian Antenna Week (IAW), 2016.