

Antena Leaky-Wave Hecha a Mano Para Propósitos Educativos

María Campo-Valera⁽¹⁾, Miguel Poveda-García⁽¹⁾, Joaquín García-Fernández⁽²⁾, David Cañete-Rebenaque⁽¹⁾, José Luis Gómez-Tornero⁽¹⁾
 maria.campo@upct.es, miguel.poveda@upct.es, j.garciafernandez@student.unisi.it, david.canete@upct.es, josel.gomez@upct.es

⁽¹⁾ Dpto. de Tecnologías de la Información y las Comunicaciones. Universidad Politécnica de Cartagena 30202 España.

⁽²⁾ El autor estuvo en el Dpto de Tecnologías de la Información y las Comunicaciones. Universidad Politécnica de Cartagena, 30202, España. Ahora se encuentra en el Dpto de Ingeniería de la Información y Matemáticas. Università Di Siena, Italy, 53100

Abstract- The design, manufacture and testing of a micro strip leaky-wave antenna in the UHF band is reported. The antenna is fabricated using low-cost materials and handmade techniques. This activity is intended for educational purposes and hands-on training of antenna engineering and related applications. Particularly, the proposed antenna can be used for localization of passive RFID tags and DVB-T base stations.

I. INTRODUCCIÓN

En las últimas décadas, la innovación en las técnicas educativas está jugando un papel fundamental en la enseñanza universitaria. Respecto a la ingeniería de antenas, la educación disruptiva empieza a afrontar nuevos retos [1] – [5]. Tanto en niveles de pregrado como posgrado, se viene desarrollando una combinación de clases teóricas y prácticas de laboratorios [3] – [5] con el fin de incrementar el interés de los estudiantes y potenciar sus conocimientos. En particular, el uso de antenas hechas a mano, kits de construcción de antenas modulares [6], [7], y cursos de aprendizaje basados en proyectos [8], brindan al estudiante la oportunidad de fabricar y ajustar manualmente sus propios diseños de antenas, obteniendo así una visión amplia, desde la teoría electromagnética hasta el procesado de señales y sus aplicaciones reales [9] – [12].

En este artículo, se presenta el diseño, fabricación y ajuste de una antena microstrip (microcinta) basada en ondas de fuga (*leaky waves*), HWM LWA (*Half-Width Microstrip Leaky-Wave Antenna*) de ahora en adelante [13] – [16]. Dicha antena será diseñada para estimación del ángulo de llegada de señales (radiogoniometría) en la banda UHF de 900 MHz, usando técnicas monopulso de bajo coste [17] - [21].

Los autores han demostrado en trabajos recientes, el diseño de HWM LWAs con diagramas de radiación monopulso escaneados en frecuencia para la localización de dispositivos móviles en redes inalámbricas comerciales de bajo coste [21], tales como redes de sensores (*Wireless Sensor Networks*, WSN) Zigbee [22], redes de área personal (*Wireless Personal Area Networks*, WPAN) de tipo Bluetooth [23], o redes de área local (WLAN) Wi-Fi [24], operando en la banda ISM de 2.4 GHz. También se han propuesto para localizar etiquetas pasivas RFID en la banda ISM UHF de 900 MHz [25]. Todas las HWM LWAs anteriores fueron fabricadas por empresas profesionales de creación de prototipos de PCB.

En este trabajo se muestra la fabricación casera y ajuste a mano de HWM LWA en la banda de UHF, utilizando

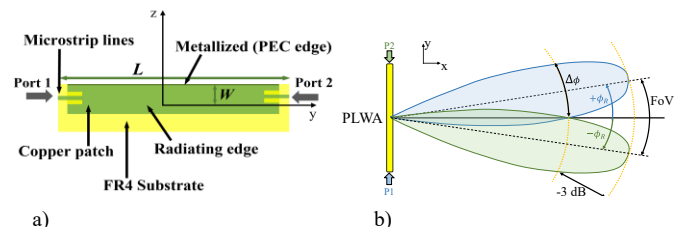


Fig. 1. MLWA Bidireccional. a) Partes de la antena b) Haces escaneados.

materiales de bajo coste con el fin de que los estudiantes adquieran conocimientos prácticos sobre ingeniería de antenas aplicadas a localización angular de señales radioeléctricas.

II. MONOPULSO DE LA ANTENA MLW HECHA A MANO

A. Teoría del monopulso de la antena Leaky-Wave

La HWM LWA está formada por una cinta radiante larga de ancho W y longitud L (ver Fig. 1a) que radia en su modo de fuga fundamental EH_1 [14]. Con esta antena se puede sintetizar diagramas de radiación monopulso si la HWM LWA se alimenta bidireccionalmente por los puertos P1 y P2 mostrados en la Fig. 1 [17], creando dos haces directivos y escaneados, con simetría especular respecto de la perpendicular de la antena. Dichos haces deben apuntar a sendos ángulos $\pm\phi_R$, y se deben solapar en sus puntos de mitad de ancho de haz a -3 dB (HPBW, $\Delta\phi$) en la dirección perpendicular ($\phi=0^\circ$) (ver Fig. 1b). Estas condiciones se pueden escribir matemáticamente como [19]:

$$\phi_R = \frac{\Delta\phi}{2} = \frac{FoV}{2} \quad (1)$$

El campo de visión (*Field-of-View*, FoV) es la región angular donde la dirección de llegada (*Direction-of-Arrival*, DoA) de una señal radioeléctrica puede ser estimada sin ambigüedad. En el caso de sistemas monopulso de comparación de amplitud, la estimación del DoA se puede realizar procesando la potencia recibida en cada puerto de la antena. La frecuencia de diseño es 902 MHz con un FoV definido a $\Delta\phi = 40^\circ$, y por tanto $\phi_R = 20^\circ$ (1). Como se explica en [25], estas especificaciones son adecuadas para la localización de etiquetas pasivas RFID utilizando la banda americana UHF ISM.

Las dos dimensiones principales de la antena a diseñar son: el ancho de la cinta radiante W y su longitud L . Variando W ,

TABLA I
COMPARACIÓN DE LOS VALORES DEL DISEÑO TEÓRICO,
NUMÉRICO Y EXPERIMENTAL

	Teórico	Número (Matlab)	Número (HFSS)	Experimental
W (mm)	39.7 (2)	38	38	37
L (cm)	50.4 (3)	58	58	58
ϕ_R (°)	20 (1)	15	22	21
$\Delta\phi$ (°)	40 (1)	36.5	39.5	43

se puede sintonizar el ángulo de escaneo especificado ϕ_R para una frecuencia f_0 y una permitividad dieléctrica relativa del sustrato ϵ_r , dadas según [19]:

$$W \approx \frac{\lambda_0}{4} \frac{1}{\sqrt{\epsilon_r - \sin^2 \phi_R}} \quad (1)$$

Se utilizó un sustrato de bajo coste FR4 con $\epsilon_r = 4.5$.

Con $f_0 = 902$ MHz y $\phi_R = 20^\circ$ se obtuvo un $W = 39.7$ cm. Seguidamente, se diseña la longitud de la cinta radiante L que determinará la HPBW $\Delta\phi$ a través de la siguiente conocida ecuación [13], [19]:

$$L \approx \lambda_0 \frac{57^\circ}{\Delta\phi \cos \phi_R} \quad (3)$$

Para $\Delta\phi = 40^\circ$ y $\phi_R = 20^\circ$ a 902 MHz se obtuvo $L = 50.4$ cm. Estos resultados iniciales teóricos se resumen en la Tabla I. Posteriormente, se ajustarán dichas dimensiones para un diseño más preciso.

B. Análisis paramétrico y diseño de la antena

Calculado W y L utilizando las expresiones (2)-(3), se obtiene un primer diseño con una herramienta propia realizada en Matlab basada en el Método de Resonancia Transversal [16], para posteriormente, hacer simulaciones con el software comercial Ansys HFSS. Se selecciona el sustrato FR4 de bajo coste [26] con $\epsilon_r = 4.5$, $\tan\delta = 0.018$ y espesor $H = 1.6$ mm. Los estudiantes deben tener en cuenta que, al momento de obtener el patrón de radiación de la antena, un W mayor hará que la dirección de apuntamiento se desplace hacia ángulos de escaneo ϕ_R más altos -ver (2)-. Por otro lado, antenas de mayor longitud L , generarán haces radiados más estrechos $\Delta\phi$ -ver (3)-. Dado que la antena se fabricará a mano, el paso de ajuste del ancho W y la longitud L será de 1 mm debido a las bajas tolerancias de fabricación. Como ejemplo de este proceso de ajuste, la Fig. 2 muestra en líneas discontinuas en Matlab los patrones de radiación obtenidos cuando se varía W desde 37 mm a 40 mm en dichos pasos de 1 mm. Tras los análisis con los diferentes W , se observa un aumento aproximado de 10° en la dirección de escaneo del haz principal a medida que se aumenta W , desde $\phi_R = 8^\circ$ con $W = 37$ mm hasta $\phi_R = 39^\circ$ con $W = 40$ mm. Así pues, el diseño adecuado en Matlab es para $W = 38$ mm que proporciona un $\phi_R = 15^\circ$, cuyo diagrama de radiación se presenta en la Fig. 2. El HPBW es $\Delta\phi = 36.5^\circ$ el cual se acerca al valor deseado. Como se observa en la segunda columna de la Tabla I.

Tras el diseño en Matlab, se simula la estructura con el software comercial Ansys HFSS para obtener un diseño final más preciso y se procede al diseño y ajuste de la red de alimentación de la antena, como se muestra en la Fig. 3. Así, el siguiente paso es ajustar las dimensiones de esta red de alimentación, para luego simular con HFSS la adaptación y el patrón de radiación de la antena final. Los parámetros S que se muestran en la Fig. 4, presentan una buena adaptación con un

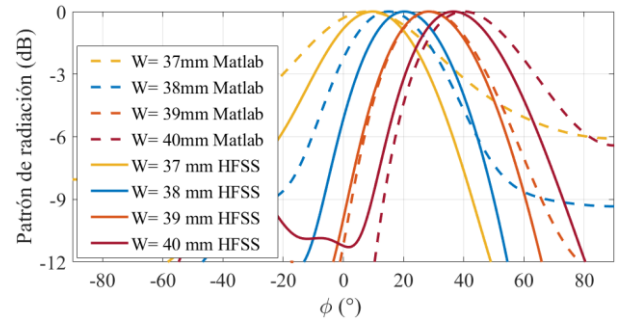


Fig. 2. Ajuste de la cinta para diferentes W con $L = 58$ cm.

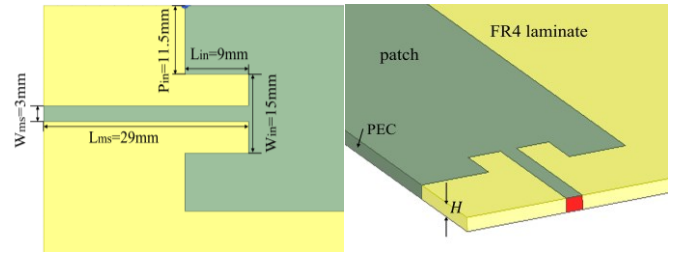


Fig. 3. Ajuste de las dimensiones de la antena en HFSS.

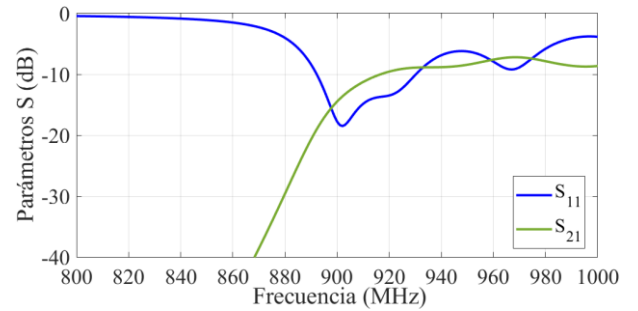






Fig. 4. Parámetros S de la antena simulados en HFSS.

S_{11} por debajo de -10 dB en la banda de frecuencias desde 880 MHz hasta 930 MHz. Por otro lado, el parámetro S_{21} por debajo de -10dB a la frecuencia de diseño de 902 MHz alrededor, indica una buena eficiencia de radiación, ya que la cantidad de potencia que llega al puerto opuesto a la entrada está por debajo del 10% como suele ser usual en antenas de onda progresiva [13]. El ancho de banda optimizado $W=38$ mm proporciona un ángulo de apuntamiento de $\phi_R = 22^\circ$ y un ancho del haz de $\Delta\phi = 39.5^\circ$, tal y como se resume en la tercera columna de la Tabla I. Como se ha comentado, las simulaciones en HFSS son necesarias para un análisis y ajuste preciso de la antena incluyendo los circuitos de adaptación antes de la fabricación. Sin embargo, los valores de diseño iniciales proporcionados por el código de Matlab hacen que el alumno realice los ajustes de una forma más eficiente en términos de tiempo, ya que la optimización con la herramienta ad-hoc de Matlab sólo llevó 5 minutos, mientras que en HFSS este proceso puede llevar varias horas. Por lo tanto, la metodología propuesta es eficiente, ya que de lo contrario el estudiante podría desesperarse intentando diseñar la antena directamente en HFSS sin los puntos de diseño inicial resumidos en la Tabla I, que demuestra que son cercanos al diseño final. En la siguiente sección, se describe el proceso de fabricación.

C. Fabricación de la antena realizada por los estudiantes

Los materiales empleados y el coste asociado para la fabricación artesanal de la HWM LWA diseñada, se resumen en la Tabla II. En este sentido, el coste de los materiales debe ser asumido por el Departamento de la universidad encargado

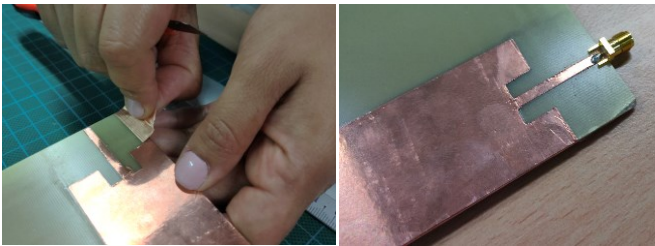
TABLA II
MATERIALES UTILIZADOS PARA FABRICAR LA ANTENA

Materiales		Unidades	Precio por Unidad (euros)
	Placa revestida de cobre por un lado, 1.6mm espesor, 91 x 60 cm. 1/16in., [26]	1	86,17 €
	Cinta adhesiva de cobre conductora, 50.8 mm x 16 m [27]	1	151,46 €
	Conector coaxial. [28]	2	2,58 €
	Cuter, regla, lápices.	1	18,0 €
TOTAL PRICE			260,79 €



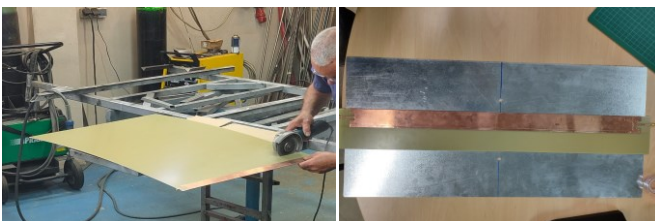
a)

b)



c)

d)



e)

f)

Fig. 5. Pasos del diseño de la antena.

de realizar la propuesta educativa. La placa FR4 de bajo coste adquirida está conectada a tierra con una capa de cobre en uno de los lados (*single-sided PCB*, [26]), por lo que la cinta radiante se añadirá en el otro lado de la placa. Para ello, se usa una cinta de cobre adhesiva [27] que debe replicar la geometría de la cinta radiante y la red de alimentación. Es importante señalar que el ancho W debe permanecer constante a lo largo de los 58 cm de longitud de la LWA, ya que de lo contrario se ensancharía el haz radiado como pasa en las LWAs moduladas en anchura. Con los anteriores materiales, se siguen los pasos de fabricación ilustrados en la Fig. 5. El primer paso consiste en fijar la cinta de cobre, desde el borde de la placa hasta el ancho de diseño $W = 38$ mm, como se ve en la Fig. 5a. Para crear la pared lateral con contacto eléctrico a masa (PEC, *Perfect Electric Conductor*), se envuelve la cinta

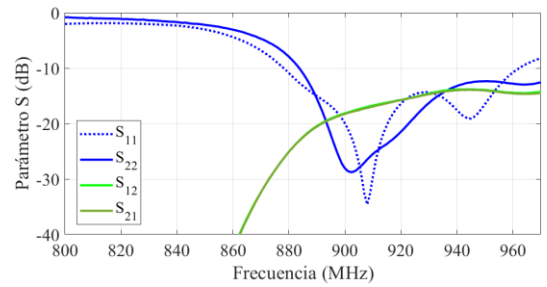
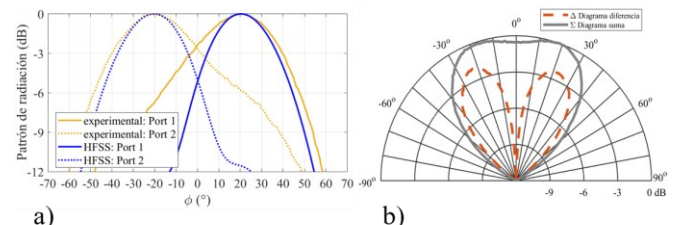
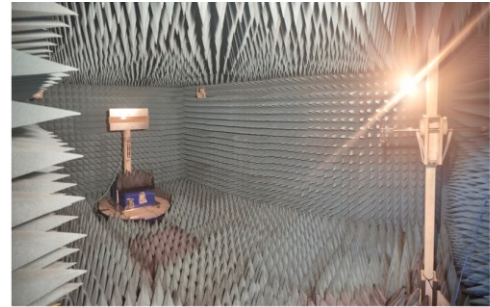


Fig. 6. Parámetros S medidos de la HWM LWA fabricada y ajustada.



a)

b)

Fig. 7. Patrón de radiación medidos. a). Medidas realizadas en la cámara anecoica de la Universidad b). Haces escaneados individualmente c). Patrón monopulso suma y diferencia.

de cobre alrededor del borde de la placa FR4 y se conecta con la parte inferior de la placa PCB, tal y como se muestra en la Fig. 5b. A continuación, se dibuja la red de alimentación y se elimina el exceso de cinta con la ayuda de un cúter, Fig. 5c. Luego, se sueldan los conectores SMA [31] a las líneas microstrip de entrada y al plano de masa, como se muestra en la Fig. 5d. El último paso es cortar la placa FR4 para separar la antena fabricada del resto de la placa, obteniendo el prototipo final de la Fig. 5e. Finalmente, la antena fabricada se presenta en la Fig. 5f.

Una vez que los estudiantes han fabricado a mano la antena, la frecuencia central se sintoniza ajustando la anchura de la cinta W . Esto puede hacerse añadiendo o quitando (cortando) cinta de cobre en tiempo real, mientras se mide la respuesta de la antena, como se describe en la siguiente sección. En este caso se ha quitado 1 mm (la fabricación inicial era de 38 mm) de la anchura de la banda para sintonizarla con el ángulo de apuntamiento deseado. El tiempo estimado para medir la antena fabricada es de 2h 30 min, mientras que el proceso de sintonización experimental tarda más horas.

III. MEDIDAS

El último paso consiste en medir el rendimiento de la antena fabricada. En primer lugar, se miden la adaptación y el acoplamiento entre los puertos P1 y P2 mediante el S_{11} y S_{21} respectivamente, usando un analizador vectorial de redes (VNA). En la Fig. 6 se muestran los parámetros S medidos. Se puede observar como la adaptación S_{11} y S_{22} no es similar en ambos puertos debido a las diferentes imprecisiones al cortar la cinta de cobre y soldar los conectores. En cualquier caso, se obtiene una adaptación de entrada inferior a -20 dB en ambos

puertos en la frecuencia de diseño de 902 MHz. Por otro lado, el $S_{21}=S_{12}$, corrobora un bajo acoplo entre puertos enfrentados, con un valor de -15 dB. Se ha estimado una eficiencia de radiación de la antena fabricada del 66%.

La caracterización de los diagramas de radiación de la antena se realizó en la cámara anecoica de la ETSIT de la Universidad Politécnica de Cartagena (UPCT). La antena se situó en una plataforma giratoria robótica que gira entre $\pm 90^\circ$ a una distancia de 2.5 m respecto a una antena biconónica de referencia, como se muestra en la Fig. 7a. Los diagramas de radiación medidos se presentan en la Fig. 7b, mostrando una gran similitud respecto a las simulaciones en HFSS, y confirmando así el éxito de la síntesis de dos haces con un $\Delta\phi = 43^\circ$ y un ángulo de apuntamiento en $\phi_R = 21^\circ$ para el puerto P1 y $\phi_R = -23^\circ$ para el puerto P2. Como resultado, se obtienen los patrones de radiación monopulso suma y diferencia presentados en la Fig. 7c que pueden ser aplicados para la búsqueda de dirección en redes UHF RFID como se propone en [24].

IV. CONCLUSIONES

Se ha demostrado la capacidad de diseñar y fabricar manualmente una antena impresa en tecnología microstrip para aplicaciones de radiogoniometría monopulso en la banda UHF de 900 MHz, utilizando materiales de bajo coste y técnicas de fabricación manual (básicamente cortar y pegar). Y se ha descrito el proceso completo de diseño, ajuste, fabricación y puesta a punto. Los autores creen que esta iniciativa educativa permite que los estudiantes universitarios adquieran habilidades prácticas y conocimientos más profundos sobre este interesante tema de la ingeniería de antenas y sus aplicaciones.

AGRADECIMIENTOS

Este trabajo ha sido apoyado por el Comité Educativo de la IEEE APS bajo el Programa de Iniciativas Educativas (EIP), y por el proyecto nacional español PID2019-103982RB-C42/AEI/10.13039/501100011033.

REFERENCIAS

- [1] J.R. Whinnery, "The teaching of electromagnetics," *IEEE Trans Educ.*, vol.33, pp. 3–7, 1990.
- [2] R.M. Nelson, "“Electromagnetics is fun!” – Is this an oxymoron?," in *Proc. 2006 ASEE North Midwest Regional Conference*, Univ. of Wisconsin–Stout, Oct. 2006.
- [3] B. Pejcinovic and R. L. Campbell, "Active learning, hardware projects and reverse instruction in microwave/RF education," in *Proc. European Microwave Conf.*, 2013, pp. 1571–1574.
- [4] M. Bender-Perotoni, and M. Stefanelli-Vieira "Increasing the interest in antennas and microwave courses," *Int. Journal of Electrical Eng. and Education*, vol. 56, no.3, pp. 193-207, Jul. 2018.
- [5] S. V. Hum and L. Sevgi, "From engineering electromagnetics to electromagnetic engineering: Teaching/training next generations," *IEEE Antennas Propag. Mag.*, vol. 62, no. 2, pp. 12-13, Apr. 2020.
- [6] J. L. Besada, L.H. Ariet, B. Galocha, and M. A. Salas-Natera, "ASYTRAIN: A new methodology for teaching and learning antennas," in *Proc. 7th European Conf. Antennas and Propagation (EuCAP)*, Apr. 2013, pp. 3479–3481.
- [7] U. Bulus, "Anten't: A hardware-based antenna design and training kit [Testing Ourselves]," *IEEE Antennas Propag. Mag.*, vol. 62, no. 1, pp. 107-112, 2020.
- [8] Y. Yu, Q.S. Cheng and R. Barik, "Implementation of project-based 2020 *IEEE International Conference on Teaching, Assessment, and Learning for Engineering (TALÉ)*, 2020.
- [9] D. Bonefacic, J. Jancula, and N. Majurec, "Model of a monopulse radar tracking system for student laboratory," *Radioengineering*, vol. 16, no. 3, pp. 62-67, Sep. 2007
- [10] J.L. Gómez-Tornero, D. Cañete, F.D Quesada-Pereira, and A. Álvarez, "Interactive lab to learn radio astronomy, microwave & antenna engineering at the Technical University of Cartagena (Spain)," *Int. Journal of Online Education*, vol.7, no.1, pp. 10–18, Feb. 2011.
- [11] P. Saratayon V. Pírom, and T. Saelim, "RSSI Monopulse Azimuth Tracking Demonstration using Wideband Personal Area Network Device," *Int. Journal of Engineering Research and Technology*, vol. 2, no. 9, pp. 663-670, 2013.
- [12] M. Poveda-García *et al.*, "Amplitude-monopulse RADAR lab using WiFi cards," in *Proc. 2018 48th European Microwave Conference (EuMC)*, 2018, pp. 464-467.
- [13] A.A. Oliner, "Leakage from higher modes on microstrip line with application to antennas," *Radio Sci.*, vol. 22, pp. 907–912, Nov. 1987.
- [14] G. Zelinski, G. Thiele, M. Hastriter, M. Havrilla, and A. Terzuoli, "Half width leaky wave antennas," *IET Microw. Antennas Propag.*, vol. 1, no. 2, pp. 341–348, Apr. 2007.
- [15] A.J. Martínez-Ros, J.L. Gómez-Tornero and G. Goussetis, "Planar leaky-wave antenna with flexible control of the complex propagation constant," *IEEE Trans. Antennas Propag.*, vol. 60, no. 3, pp. 1625-1630, March 2012
- [16] A.J. Martínez-Ros, J.L. Gómez-Tornero and F. Quesada-Pereira, "Efficient analysis and design of novel SIW leaky-wave antenna," *IEEE Antennas Wireless Propag. Let.*, vol. 12, pp. 496-499, 2013.
- [17] S.G. Kim and K. Chang, "Low-cost monopulse antenna using bidirectionally-fed microstrip patch array," *Electron Lett.*, vol. 39, no. 20, pp. 1428–1429, Oct. 2003.
- [18] E. Topak, J. Hasch, C. Wagner, and T. Zwick, "A novel millimeter-wave dual-fed phased array for beam steering," *IEEE Trans. Microw. Theory Techn.*, vol. 61, no. 8, pp. 3140–3147, Aug. 2013.
- [19] A. Gil-Martínez, M. Poveda-García, and J.L. Gómez-Tornero, "Direct synthesis of frequency-scanned monopulse half-width microstrip leaky-wave antennas," in *Proc. Eur. Conf. Antennas Propag.* (EuCAP 2020), pp. 1–4, 2020.
- [20] M. Poveda-García, and J.L. Gómez-Tornero, "Ambiguity resolution in amplitude-monopulse systems using broad-beam patterns," *IEEE Antennas Wireless Propag. Let.*, vol. 20, no. 4, pp. 503-507, April 2021.
- [21] J.L. Gómez-Tornero, "Smart leaky-wave antennas for iridescent IoT wireless networks," Ch.4 in *Antenna and Array Technologies for Future Wireless Ecosystems*, Y.J. Guo and R. W. Ziolkowski (editors), Ed. John Wiley & Sons. IEEE press, 2022.
- [22] M. Poveda-García, J. Oliva-Sánchez, R. Sánchez-Iborra, D. Cañete-Rebenaque, J.L. Gómez-Tornero, "Dynamic wireless power transfer for cost-effective wireless sensor networks using frequency-scanned beaming," *IEEE Access*, vol. 7, pp. 8081-8094, Jan. 2019.
- [23] M. Poveda-García, *et al.*, "RSSI-based direction-of-departure estimation in Bluetooth Low Energy using an array of frequency-steered leaky-wave antennas," *IEEE Access*, vol. 8, pp. 9380-9394, Jan. 2020.
- [24] A. Gil-Martínez, M. Poveda-García, J.A. López-Pastor, J.C. Sánchez-Aarnoutse and J.L. Gómez-Tornero, "Wi-Fi Direction Finding With Frequency-Scanned Antenna and Channel-Hopping Scheme," *IEEE Sensors Journal*, vol. 22, no. 6, pp. 5210-5222, March 15, 2022, doi: 10.1109/JSEN.2021.3122232.
- [25] A. Gil-Martínez, M. Poveda-García, D. Cañete-Rebenaque, and J.L. Gómez-Tornero, "Frequency-Scanned Monopulse Antenna for RSSI-Based Direction Finding of UHF RFID Tags," *IEEE Antennas and Wireless Propag. Let.*, vol. 21, no.1, pp. 158-162 Jan 2022, doi: 1109/LAWP.2021.3122233.
- [26] Placas FR4 revestidas de cobre.
<https://mouser.es/c/tools-supplies/prototyping-products/copper-clad-boards/?description%2Ffunction=Copper%20clad%20board%201.6%20mm%20single%20sided>
- [27] Cinta adhesiva de cobre conductora.
<https://uk.rs-online.com/web/p/metallic-tapes/1679376>
- [28] Conector coaxial SMA.
<https://es.rs-online.com/web/p/conectores-coaxiales/5265785>