

DISEÑO Y SIMULACIÓN DE UNA ANTENA PIFA PARA IOT

Jesús Calixto Méndez¹, Benigno Rodríguez Díaz², Javier Schandy Wood³, Mauricio González Nappa⁴

¹²³⁴Facultad de Ingeniería, Universidad de la República, Julio Herrera y Reissig 565, 11300
Montevideo, Uruguay

¹jesus.calixto@fing.edu.uy, ²benigno@fing.edu.uy, ³jschandy@fing.edu.uy,
⁴mgnappa@fing.edu.uy

RESUMEN

Esta investigación presenta el diseño de una antena plana en forma de “F” invertida (PIFA) para Internet de las Cosas (IoT), con una frecuencia principal de resonancia $f_r = 2.45$ GHz, pero pudiendo ser utilizada también como antena multibanda. La antena desarrollada tiene como elemento principal un parche, las dimensiones de ancho y largo fueron calculadas y optimizadas para resonar a la frecuencia de resonancia. Se ajustó la dimensión del plano de tierra consiguiendo una directividad máxima de 6.47 dBi. Además de la directividad, se verificó el efecto que produce este elemento en el patrón de radiación. Otro elemento importante en el diseño de la PIFA es el cortocircuito. Su correcta integración permitió ajustar la frecuencia de resonancia con un ancho de banda óptimo. Por último, se utilizó la técnica de crear ranuras o espacios en el parche con el objetivo de conseguir una antena multibanda, permitiéndole resonar en frecuencias superiores a la principal. Finalmente se mencionan los atributos de la antena diseñada y se resalta la influencia ejercida de sus elementos en los distintos parámetros de la PIFA.

PALABRAS CLAVES: Diseño de antenas, Internet de las Cosas (IoT), PIFA.

DESIGN AND SIMULATION OF A PIFA ANTENNA FOR IOT

ABSTRACT

This research presents the design of a flat inverted “F” shaped antenna (PIFA) for the Internet of Things (IoT), with a main resonance frequency $f_r = 2.45$ GHz, but it can also be used as a multiband antenna. The antenna developed has as its main element a patch. The width and length dimensions were calculated and optimized to resonate at the resonant frequency. The dimension of the ground plane was adjusted, achieving an antenna directivity of 6.47 dBi. In addition to the directivity, the effect that this element produces on the radiation pattern was verified. Another important element in the design of the PIFA is the short circuit. Its correct integration allowed to adjust the resonant frequency with an optimal bandwidth. Finally, the technique of creating grooves or spaces in the patch was used in order to achieve a multiband antenna, allowing it to resonate at frequencies higher than the main. Finally, the attributes of the designed antenna are mentioned and the influence of its elements over the different parameters of the PIFA is highlighted.

KEYWORDS: Antenna design, Internet of Things (IoT), PIFA.

1. INTRODUCCIÓN

Los sistemas de comunicación inalámbricos han tenido un crecimiento muy importante en los últimos años. Tecnologías como LTE, Wi-Fi y Bluetooth hoy en día son de uso común entre las personas. El auge de IoT ha generado el desarrollo de nuevos sistemas de comunicación como lo es la tecnología Low

Power Wide Area Network (LPWAN) [1]. Además si a esto sumamos la llegada de la quinta generación de comunicación celular (5G) [2], se puede visualizar un panorama de alta demanda en dispositivos pequeños a ser usados tanto por personas como “cosas” [3]. Sensores inalámbricos, teléfonos móviles y dispositivos inteligentes fabricados para aplicaciones en la agricultura, la salud, el hogar o la industria, van a ser de gran demanda en los próximos años [4].

Desde el punto de vista de un fabricante, la ingeniería de dispositivos cada vez más pequeños implica grandes desafíos. El diseño de elementos como la antena comprende modelado de estructuras, estudio de materiales y pruebas, para así obtener un buen desempeño en transmisión y cobertura para el sistema en el que se instalará.

Una PIFA es considerada como un tipo de antena F lineal invertida donde el elemento radiador es reemplazado por una placa para expandir el ancho de banda [5]. Esta antena en su diseño base se encuentra constituida por un elemento radiador o parche, paralelo a este, un plano de tierra que hace la función de reflector de la antena y una chapa de cortocircuito que hace la función de stub (cabo) cortocircuitando la placa superior al plano de tierra, ver Fig. 1. La antena emplea una línea de alimentación de tipo coaxial con el conductor central pasado a través del plano de tierra y conectado a la placa superior mientras el conductor externo está conectado al plano de tierra [5]. También hay un sustrato con cierto espesor que se ubica entre ambos elementos de radiación de la antena, separándolos.

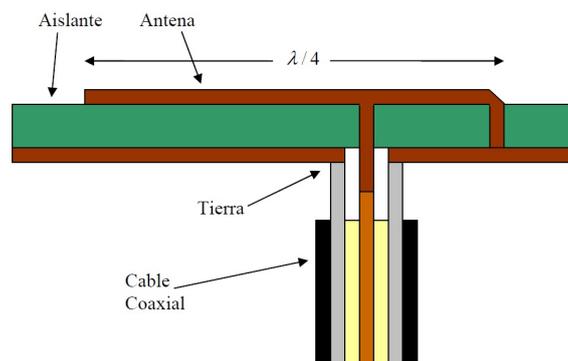


Figura 1: Antena F Plana Invertida (fuente: [6]).

Este tipo de antenas son particularmente útiles para aplicaciones de IoT donde se busca comunicar inalámbricamente distintos dispositivos para cumplir con una funcionalidad específica, ya sea la de sensar una magnitud del ambiente, o la de actuar de acuerdo a una determinada condición. Los dispositivos que se utilizan para las aplicaciones de IoT generalmente son de tamaño reducido, y precisan tener una antena con un diseño eficiente para poder comunicarse correctamente incluso cuando son ubicados en emplazamientos con interferencia o atravesando distintos obstáculos.

Algunas de las tecnologías más utilizadas para IoT son ZigBee (basado en el estándar IEEE 802.15.4), WiFi y Bluetooth Low Energy, todas en la banda ISM de 2.4 GHz. Existen muchos dispositivos de tamaño reducido que utilizan éstas tecnologías para servir aplicaciones de IoT como el TMote-Sky de Moteiv (Zigbee), los ESP32 de Espressif (WiFi) y la familia NRF52 de Nordic (Bluetooth Low Energy), por mencionar algunos. Cualquiera de ellos se podría beneficiar ampliamente de una antena plana con un perfil bajo y un tamaño reducido como la PIFA.

Este tipo de antenas, con un correcto diseño, pueden cumplir de manera eficiente con varios parámetros de comunicación. Sin embargo, el trabajo de miniaturización y a su vez el de la mejora del desempeño de la antena es complejo, ya que cada elemento físico de la antena influye de gran manera en su comportamiento electromagnético, afectando el patrón de radiación.

Las diferentes formas, estructuras y materiales a utilizar en el diseño de una antena PIFA, permiten

obtener distintas respuestas en frecuencia, ancho de banda más amplio, como también variaciones en el patrón de radiación. Esto genera diferentes tipos de antenas, para la PIFA se mencionan los siguientes tipos: PIFA con parche ranurado, que son antenas multibandas usadas en WiMAX. Cónica o tapered PIFA (T-PIFA), que puede manejar frecuencias de 1.8 GHz y 5.2 GHz. Reconfigurable, que permite el ajuste de frecuencia variando la capacitancia del varactor y la selección de banda usando un diodo PIN. Con plano de tierra ranurado, para aplicaciones de 900 y 1900 MHz en banda simple o doble, entre otras. [7, 8].

El objetivo de este estudio es dar una visión general del diseño de una PIFA, mostrar la influencia de los aspectos físicos y presentar los diferentes resultados de patrón de radiación, impedancia y directividad de la antena.

2. DISEÑO DE UNA PIFA

En el diseño de esta antena se consideraron aspectos físicos, geométricos y dimensionales, los cuales fueron estudiados y mediante pruebas en el simulador se pudieron verificar los efectos que producen en los parámetros de la antena, algunos de ellos son: el ancho de banda, la frecuencia de resonancia, la directividad, la adaptación de la impedancia de entrada, entre otros.

El trabajo se inició con el diseño del componente principal de la antena, el parche o *patch*, encargado de radiar la energía electromagnética al espacio. Su configuración se efectuó siguiendo lo indicado en la Sección 14.2 del libro *Antenna Theory* de Balanis [9]. Se seleccionaron los parámetros básicos para el diseño de la PIFA y se emplearon las ecuaciones (1) y (2) para obtener las dimensiones de ancho (W) y largo (L) del parche. Se definió como frecuencia principal de resonancia (fr) 2.45 GHz y se seleccionó el material del sustrato, así como también el material del parche, las especificaciones de los materiales se detallan más adelante. Cabe destacar que la sección de referencia explica el diseño de una antena de parche, pero como ya se ha señalado, este es el elemento principal de la PIFA, por lo que se utilizaron estos fundamentos para su diseño.

$$W = \frac{1}{2fr\sqrt{\mu_o\epsilon_o}} \sqrt{\frac{2}{Er+1}} = \frac{c}{2fr} \sqrt{\frac{2}{Er+1}} \quad (1)$$

$$L = \frac{1}{2fr\sqrt{\epsilon_{reff}}\sqrt{\mu_o\epsilon_o}} - 2\Delta L \quad (2)$$

Siendo c la velocidad de la luz en espacio libre y Er la constante dieléctrica relativa del sustrato. A su vez μ_o y ϵ_o representan la permeabilidad magnética del vacío y la permitividad eléctrica del vacío respectivamente. Los valores de la constante dieléctrica efectiva (ϵ_{reff}) y de ΔL se obtienen utilizando las ecuaciones (3) y (4):

$$\epsilon_{reff} = \frac{Er+1}{2} + \frac{Er-1}{2} \left[1 + 12 \frac{Hs}{W} \right]^{-\frac{1}{2}} \quad (3)$$

$$\frac{\Delta L}{Hs} = 0,412 \frac{\epsilon_{reff} + 0,3 \left(\frac{W}{Hs} + 0,264 \right)}{\epsilon_{reff} - 0,258 \left(\frac{W}{Hs} + 0,8 \right)} \quad (4)$$

Donde Hs es la altura del sustrato.

Diseño del Parche

La geometría y el tamaño del parche de la antena determina la frecuencia de operación de la misma. Para el caso de una antena que funciona en una sola banda de frecuencia se puede seleccionar una forma rectangular [10], como se puede ver en la Fig. 2. Los valores de la frecuencia de resonancia, la constante dieléctrica relativa del sustrato ($\epsilon_r = 4,4$) y el material de cobre (conductividad eléctrica $5,8e^7$ S/m) y la altura definida para el sustrato (H_s) son iguales a los utilizados en trabajos relacionados [11]. A partir de dichos valores, en [11] se siguen las recomendaciones de diseño de [9] para determinar el largo (L) y el ancho (W) del parche, ver la Tabla 1. Es importante indicar que el ancho de banda y la directividad tienen una fuerte dependencia de la altura del sustrato.

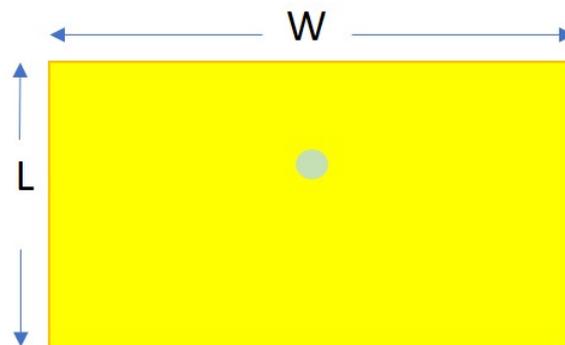


Figura 2: Representación del parche con alimentación.

Tabla 1: Parámetros del parche.

Parámetro	Descripción	Valor
L	Largo del parche	28.8 mm
W	Ancho del parche	37.3 mm
H_s	Altura del sustrato	1.6 mm
δ	Tangente de pérdida del sustrato	0.02

Para que la antena tenga resonancia en la frecuencia central deseada se deben hacer ajustes en las dimensiones. En el estudio realizado primero se incorporaron otros elementos como lo son el plano de tierra, una chapa de cortocircuito y también modificaciones en la superficie del parche o en su geometría, obteniendo así la PIFA con los valores deseados.

El Plano de Tierra

Estudios y pruebas han determinado el efecto del tamaño del plano de tierra en una PIFA y la influencia que tiene en parámetros como la frecuencia de resonancia, ancho de banda, directividad y patrón de radiación de la antena [12]. Por ejemplo, si el tamaño de este plano es mayor que el tamaño óptimo, el patrón de radiación se inclinará desviándose de la dirección de propagación deseada y si el tamaño del plano de tierra se reduce desde su valor óptimo, la directividad comenzará a disminuir.

Para la antena diseñada se hicieron un conjunto de simulaciones con diferentes dimensiones del plano de tierra. Partiendo de un tamaño donde el largo del plano de tierra (L_g) y el ancho (W_g) son iguales con un valor de 101 mm y se redujo esa dimensión hasta un valor cercano a W . Finalmente L_g y W_g

quedaron en 41 mm, dimensión que se acerca al ancho del parche. Lo cual permite verificar el efecto del plano de tierra, en la PIFA, cuando su tamaño es casi igual al del parche. Esto se puede ver representado en la Fig. 3.

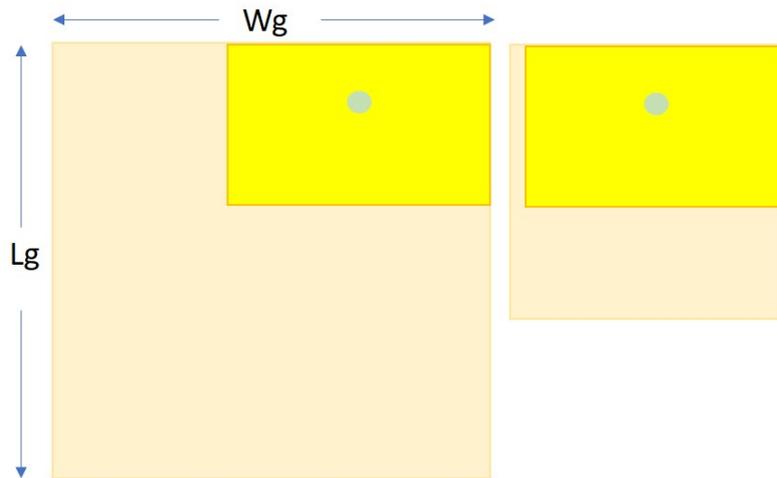


Figura 3: Variación de tamaño del plano de tierra.

La ubicación del parche tiene efecto en la directividad y el ancho de banda de la antenna. Para conseguir un rendimiento óptimo en estos parámetros, la PIFA debe colocarse cerca de una esquina del plano de tierra, con la placa de cortocircuito ubicada en el borde más corto del plano de tierra [13]. En el diseño y la simulación se consideró esta recomendación por lo tanto el parche se ubicó en una esquina.

El Cortocircuito

El objetivo de la chapa de cortocircuito es cortocircuitar el parche con el plano de tierra. La influencia de esta chapa en la antenna depende de su ancho (W_c), ver Fig. 4. A medida que el ancho de la chapa de cortocircuito se reduce, la frecuencia de resonancia disminuye, haciendo también que la antenna sea más compacta. Este efecto se debe a que la capacidad del parche se ve reducida por la inductancia de la chapa de cortocircuito, aumentando al disminuir su ancho [5]. La mayor reducción de frecuencia ocurre para la colocación de la chapa de cortocircuito en la esquina superior del parche para proporcionar una ruta de corriente más larga en comparación con la colocación en el centro del borde [5].

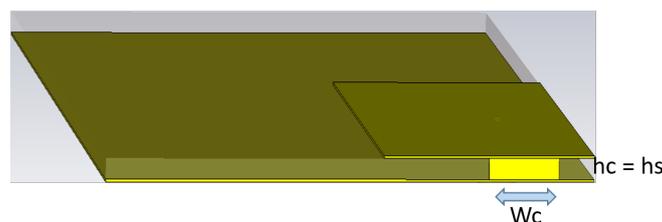


Figura 4: Variación de tamaño del plano de tierra.

El ancho de banda es otro parámetro en el que influye W_c . En diseños de PIFAs se ha demostrado que el usar un pin de corto circuito, en vez de una chapa, puede mejorar efectivamente el ancho de banda [10]. También para obtener una directividad máxima, algunos trabajos señalan que el pin de cortocircuito debe colocarse en el borde o en una esquina. [14]

Para la colocación de este elemento se tomó en cuenta también la ubicación del punto de alimentación. El ajuste de la ubicación relativa entre el punto de alimentación y el corto permite adaptar la impedancia de entrada (Z_{in}) [6]. Además de acuerdo a lo verificado en otros trabajos [13], en la mayoría de los casos se logra mejorar el ancho de banda al alimentar en el medio y cortocircuitar en el extremo del parche.

Introducción de Ranuras en el Parche

Una antena de parche rectangular básica de una sola banda se puede convertir en una antena multibanda introduciendo ranuras o espacios en el parche. La frecuencia de resonancia es determinada por la forma y la posición de la ranura en el parche [10]. Hay distintas formas de ranuras como C, L, U, entre otras. Para una antena tipo parche la ranura en U, provee características que mejoran el ancho de banda y al ser ubicada convenientemente sobre el parche permite conseguir frecuencias en multiples bandas [10].

Esta técnica se utiliza en antenas planas porque permite resonar en más de una frecuencia sin aumentar la superficie ocupada. Esto crea un efecto capacitivo para disminuir las frecuencias más altas [15]. En otro trabajo [16], se presentó una PIFA tribanda, donde la segunda y tercera frecuencia de resonancia se consiguieron agregando ranuras en la superficie de la antena.

Ese estudio también señala que la alternativa más usada es la PIFA de doble frecuencia que emplea una ranura en J, como se muestra en la Fig. 5. El espacio creado genera una división desigual de la PIFA original en dos nuevas PIFAs, las cuales están conectadas en paralelo. La PIFA más pequeña, el autor la considera como una antena independiente, donde su frecuencia de resonancia más alta, la puede modificar variando la forma y el tamaño de la ranura en forma de J.

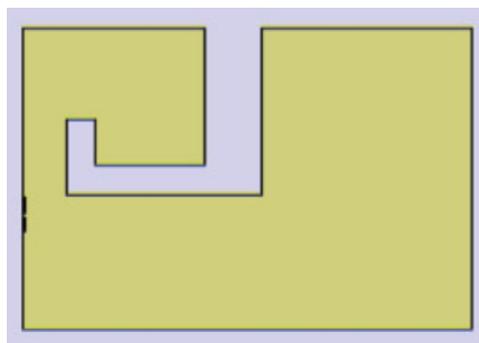


Figura 5: PIFA con ranura en forma de J (fuente: [16]).

Seguidamente, muestra que para generar la tercera frecuencia resonante, agrega una ranura de un cuarto de longitud de onda a la estructura de la PIFA de doble banda. Finalmente obtiene una antena con frecuencias resonantes a 2.45, 5.25 y 5.775 GHz con anchos de banda de 100, 200 y 150 MHz, respectivamente [16].

3. SIMULACIÓN Y AJUSTE DE LA PIFA

Las simulaciones realizadas permitieron ver la respuesta de los parámetros de esta antena frente a variaciones en su geometría. Para esto se utilizó el software CST Microwave Studio [17]. A partir de estos primeros resultados obtenidos, se efectuaron nuevas pruebas realizando ajustes en sus elementos, lo que permitió obtener nuevos datos para su posterior análisis. Las pruebas realizadas se detallan a continuación.

Estudio del Tamaño del Plano de Tierra

Se hicieron un conjunto de variaciones en el tamaño del plano de tierra, siguiendo lo indicado en el apartado anterior, con la finalidad de obtener un tamaño de plano de tierra óptimo el cual se consiguió observando la respuesta en la frecuencia de resonancia y la forma del patrón de radiación de la antena. Las dimensiones de las variaciones hechas se reflejan en la Tabla 2, así como también la Directividad (Dd) en dBi. Posteriormente en la Fig. 6 se observan los resultados de las frecuencias para cada tamaño del plano de tierra.

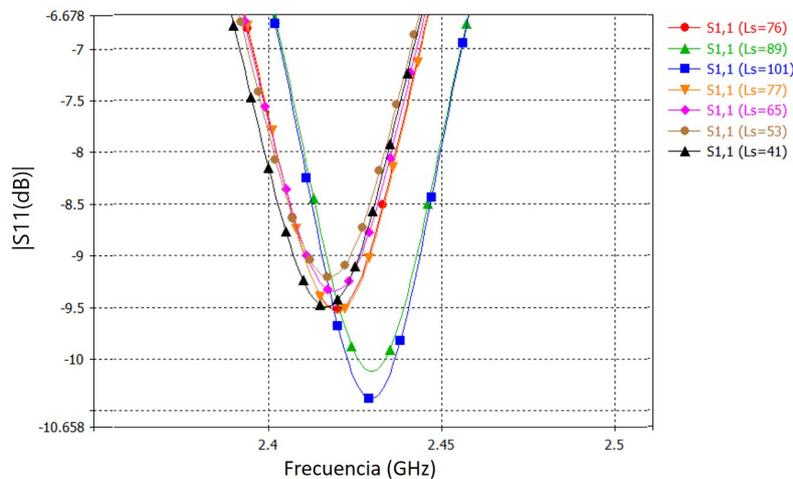


Figura 6: Variación de tamaño del plano de tierra.

Tabla 2: Variaciones en largo y ancho de la tierra.

Parámetro	1	2	3	4	5	6
$Lg = Wg$ (mm)	101	89	76	65	53	41
Dd (dBi)	6.6	6.52	6.47	6.46	6.48	6.39

La Fig. 6 muestra que los valores de Lg 101 y 89 mm tienen una frecuencia que se acerca a 2.45 GHz, pero los resultados de la simulación para estos valores, representaron un patrón de radiación que se inclinaba hacia un lado desviándose. El valor elegido, por ser una buena solución de compromiso es $Lg=Wg=76$ mm con una $fr=2.429$ GHz, con una directividad de 6.47 dBi y un patrón de radiación cuya forma se puede observar en la Fig. 7. Este valor fue el que se utilizó para el resto del diseño y en las simulaciones siguientes.

Variación del Ancho de la Placa de Cortocircuito

Las variaciones efectuadas estuvieron enfocadas en el ancho (Wc) de la placa de cortocircuito. Los cambios en la frecuencia de resonancia con respecto al ancho del cortocircuito se pueden ver en la Fig. 8.

En la Tabla 3 se observan las variaciones dimensionales efectuadas sobre Wc así como su influencia en la fr . Al observar los datos se confirma lo planteado anteriormente sobre la relación entre Wc y la fr .

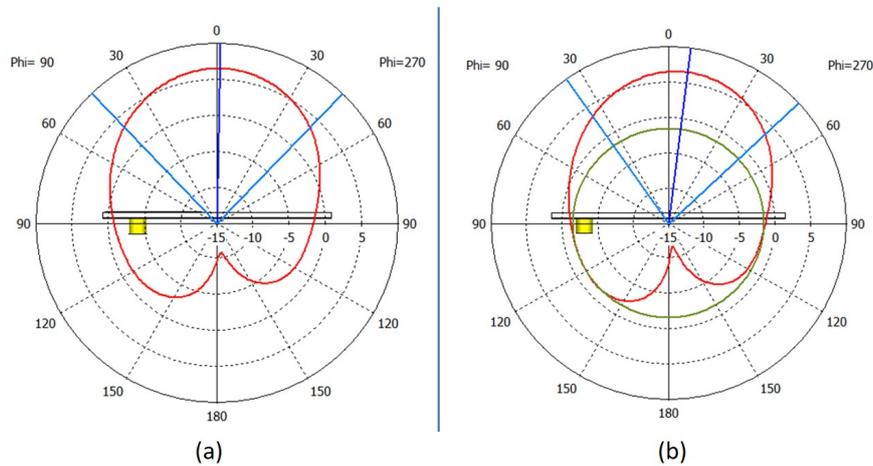


Figura 7: Patrón de radiación, plano vertical (a) tierra de 76 mm (b) tierra de 89 mm.

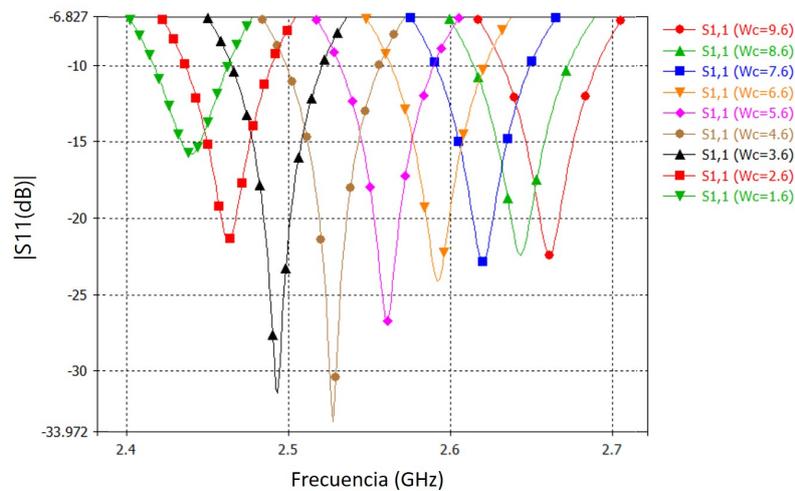


Figura 8: Variación del $|S_{11}|$ y de la frecuencia de resonancia (f_r) al variar el ancho (W_c) de la placa de cortocircuito.

Tabla 3: Variación de la frecuencia de resonancia (f_r) en función del ancho de la placa de cortocircuito (W_c).

Parámetro	1	2	3	4	5	6
W_c (mm)	6.6	5.6	4.6	3.6	2.6	1.6
f_r (GHz)	2.59	2.56	2.53	2.49	2.46	2.44

A medida que el ancho del cortocircuito se reduce, la f_r disminuye. Otro dato importante es el valor de -10 dB en la gráfica S_{11} . Este valor se considera de referencia porque nos indica que la antena está aprovechando el 90 % de la potencia inyectada, es decir que esta usando un porcentaje importante de la potencia para ser radiada. Además, en este punto podemos medir el ancho de banda (BW) de la antena

para la f_r deseada.

Punto de Alimentación

En el diseño de la PIFA se simuló una conexión de alimentación coaxial, cuyo conductor interno tiene una longitud de 6.5 mm con un radio de 0.5mm y su conductor externo una longitud de 4.8 mm con un radio de 2.7 mm. Este conector fue ubicado en el centro del parche a una distancia específica del borde superior. Los cálculos de la ubicación de la alimentación se realizaron atendiendo a lo expresado en un trabajo relacionado [18]. La implementación se efectuó con el conductor interno del conector coaxial extendido a través del dieléctrico y conectado al parche radiante, mientras que el conductor externo está conectado al plano de tierra [19]. Para comprobar los efectos de la ubicación de la alimentación y el espacio relativo con respecto al corto, se hicieron movimientos de la posición de la chapa de corto sobre el eje "V", como se puede apreciar en la Fig. 9.

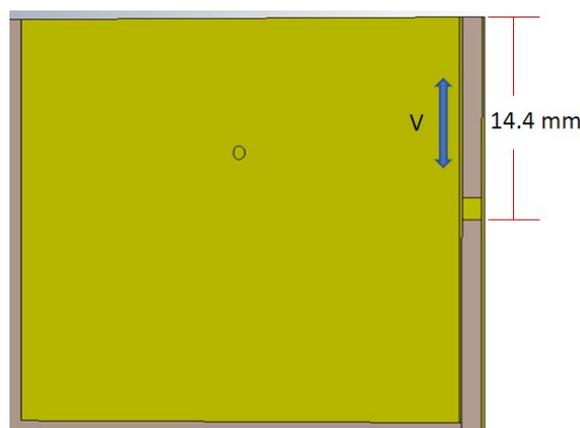


Figura 9: Posicionamiento del cortocircuito.

Para estas pruebas se usó un W_c de 3.6, 2.6 y 2.2 mm. Para las últimas dos dimensiones con la ubicación tal como se observa en la figura anterior, se obtuvo la frecuencia central igual a 2.45 GHz. Particularmente se verificó la frecuencia de resonancia para el W_c igual a 2.2 mm, la cual se acerca a la f_r deseada con un ancho de banda de 51.5 MHz donde la magnitud de S11 es inferior a - 10 dB. Es importante señalar que los valores de impedancia de entrada varían para cada valor de W_c , por lo tanto, ese parámetro está relacionado con el ancho del cortocircuito y su ubicación con respecto al punto de alimentación.

Introducción de Ranuras

La PIFA diseñada es una antena multibanda, lo cual se logró mediante la realización de ranuras en el parche. La primera simulación se realizó con una ranura lineal de una longitud de 18.8 mm y un ancho de 1 mm, ubicada a 5 mm del cortocircuito y en paralelo. Las frecuencias de resonancia conseguidas fueron de 2.445 GHz y 3.871 GHz.

Se realizó además una segunda simulación para verificar el funcionamiento de la antena con una ranura en forma de J como se muestra en la Fig. 10. En esta prueba se tuvieron que hacer algunos ajustes en la ubicación del cortocircuito para poder tener una primera frecuencia de resonancia de 2.45 GHz, además se obtuvieron adicionalmente dos frecuencias de resonancia a 2.97 GHz y 4.88 GHz, esto se puede observar en la Fig. 11.

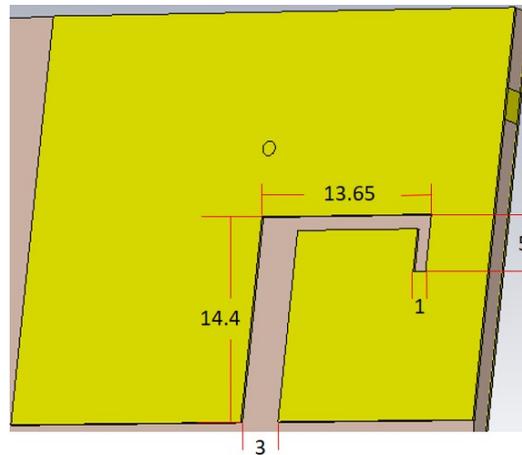


Figura 10: PIFA con ranura en forma de J (dimensiones en mm).

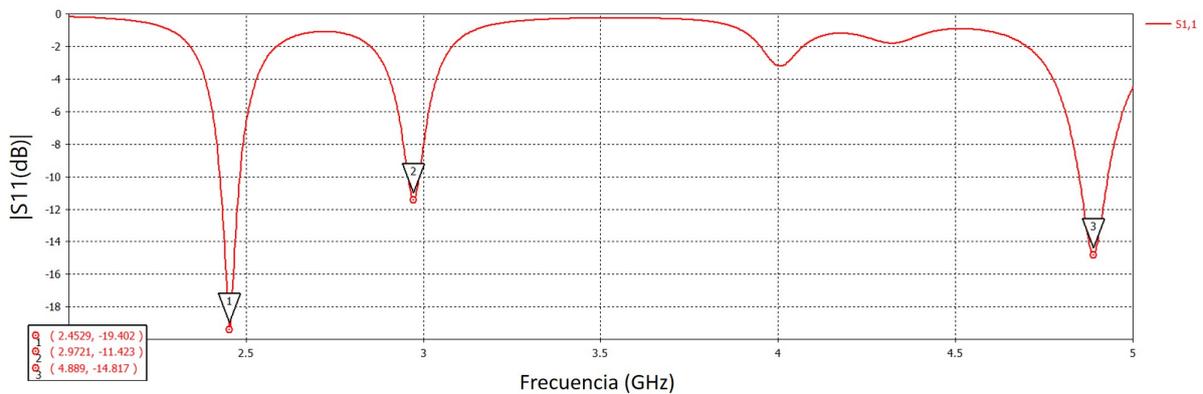


Figura 11: $|S_{11}|$ (dB) en función de la frecuencia.

En la Fig. 12 se muestran las distribuciones de corriente con y sin ranura y para distintas frecuencias. Al agregar la ranura en forma de J al variar la frecuencia, se logra modificar esta distribución de corrientes y por tanto variar el campo electromagnético radiado por la antena, que es lo que determina el patrón de radiación. Recordar que utilizando la Ley de Biot-Savart se puede calcular para cualquier punto del espacio la contribución al campo magnético realizada por la densidad de corriente que circula por un elemento de volumen diferencial de la antena. Así integrando en toda la antena se puede obtener el campo magnético creado por la antena para cualquier punto del espacio. Luego asumiendo campo lejano y utilizando las ecuaciones de Maxwell podremos calcular el campo eléctrico y conocer el comportamiento del campo electromagnético en campo lejano, es decir el patrón de radiación. Esto recuerda la relación directa entre la distribución de corrientes en la antena y el patrón de radiación generado por la antena. Al variar las partes metálicas de la antena es claro que también variará la impedancia de entrada de la antena, ya que la circulación de corriente en la antena se estará dando en una superficie conductora distinta. De ahí que estrategias sencillas como el agregado de una ranura en una antena sea una forma directa de modificar parámetros tales como: impedancia de entrada, ancho de banda, eficiencia de radiación, patrón de radiación, etc.

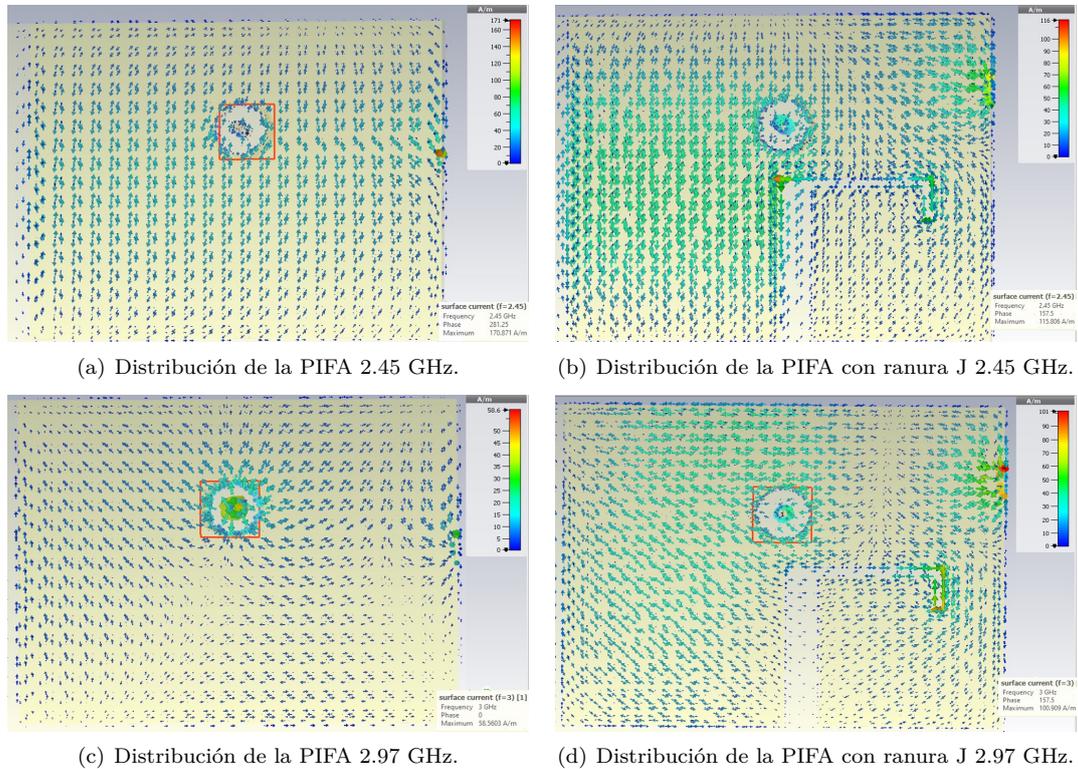


Figura 12: Distribución de corrientes de la PIFA.

4. RESULTADOS

Finalizada las simulaciones se presentan las dimensiones finales de la antena en la Tabla 4.

Tabla 4: Dimensiones de la PIFA diseñada y parámetros.

Símbolo	Descripción	Valor
L	Largo del Parche	28.8 mm
W	Ancho del Parche	37.3 mm
$Wg \mid Lg$	Ancho y Largo de la Tierra	76 mm
Hs	Altura del Substrato	1.6 mm
Wc	Ancho del Cortocircuito	2.2 mm
$Dd1$	Directividad máxima a 2.45 GHz	6.51 dBi
$S11$	$ S11(\text{dB}) $ a 2.45 GHz	-19.40 dB
$ T 1$	Coefficiente de reflexión a 2.45 GHz	0.1095
$Dd2$	Directividad máxima a 2.97 GHz	6.85 dBi
$S11$	$ S11(\text{dB}) $ a 2.97 GHz	-11.42 dB
$ T 2$	Coefficiente de reflexión a 2.97 GHz	0.2698
$Dd3$	Directividad máxima a 4.88 GHz	4.93 dBi
$S11$	$ S11(\text{dB}) $ a 4.88 GHz	-14.81 dB
$ T 3$	Coefficiente de reflexión a 4.88 GHz	0.1816

La ranura final considerada es la de forma de J, con las medidas indicadas en la Fig. 10. El sustrato utilizado en el diseño es FR-4 y el método de alimentación por conexión coaxial.

Los resultados conseguidos con esta PIFA son: una frecuencia principal de resonancia de 2.45 GHz, una directividad máxima de 6.51 dBi y un ancho de banda de 55.8 MHz. El ancho de haz a 3 dB es de 88.7° y tiene una relación frente espalda de 13.21 dB. Con respecto a los valores de impedancia para cada frecuencia de resonancia, para 2.45 GHz se obtuvo una impedancia de $(50.71, -10.80) \Omega$, para la frecuencia de 2.97 GHz se obtuvo una impedancia de $(40.41, 23.14) \Omega$ y para la frecuencia de 4.88 GHz una impedancia de $(62.01, 16.69) \Omega$. Los patrones de radiación de la antena para las tres frecuencias de

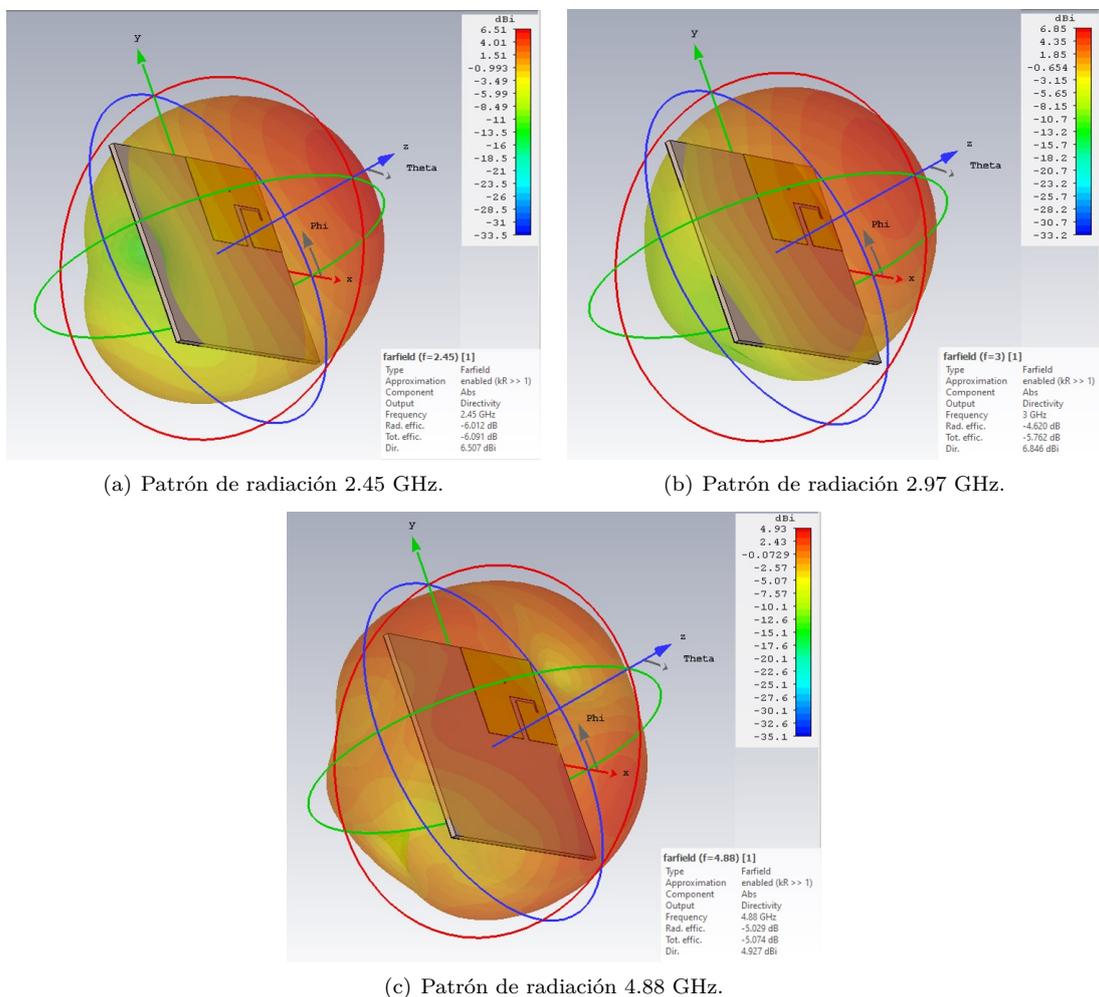
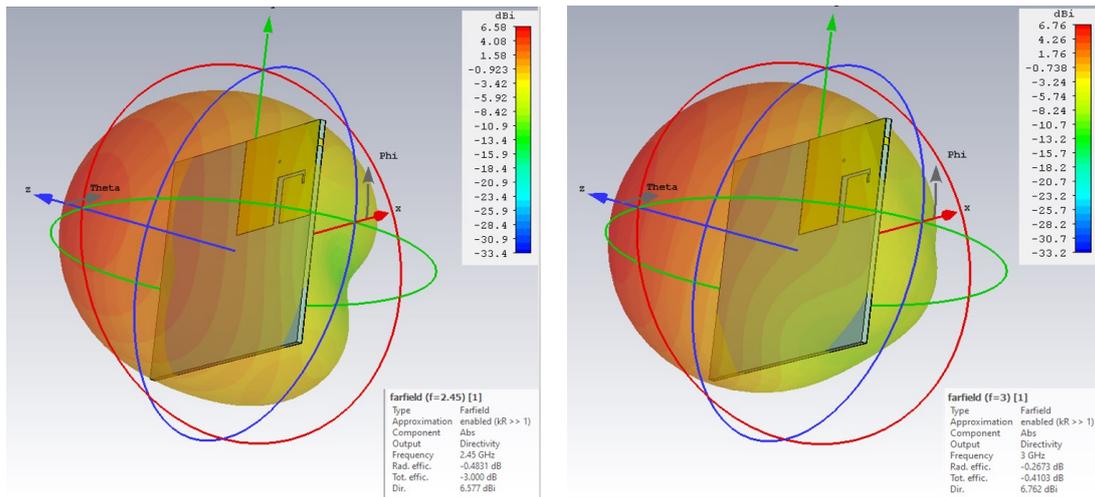


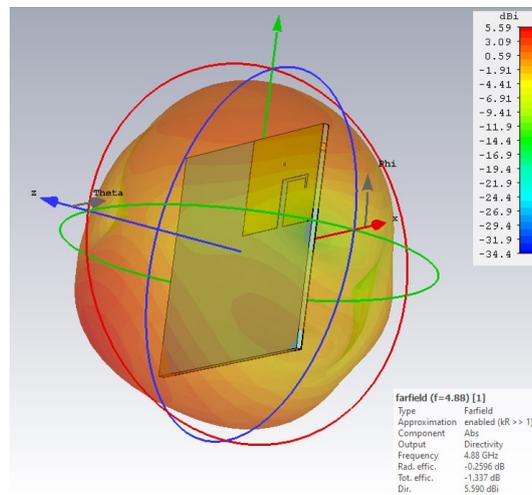
Figura 13: Patrón de radiación para las tres frecuencias de resonancia.

resonancia se pueden observar en la Fig. 13. En la subfigura c se observa que el patrón de radiación para 4.88 GHz no tiene la forma deseada, por lo que para poder utilizar la antena en esta banda, habría que enfocarse en mejorar su parámetros, con lo cual se podría degradar el funcionamiento en las otras bandas. Con respecto a los resultados para las bandas de 2.45 GHz (subfigura a) y 2.97 GHz (subfigura b), se obtuvieron buenos valores de directividad y valores bajos de eficiencia de radiación. Esto último es algo que se atribuye a utilizar FR4 como sustrato. Para poder verificar esto se repitieron estas simulaciones pero con materiales ideales, sin pérdidas (FR-4 (loss free), PTFE (loss free) para el dieléctrico de la conexión coaxial y Copper (annealed)). El resultado se puede ver en la Fig. 14, allí se aprecia que en

todos los casos mejoró significativamente la eficiencia de radiación obteniendo ganancias de: 6.1 dBi para 2,45 GHz, 6.5 dBi para 2,97 GHz y 5.3 dBi para 4.88 GHz.



(a) Patrón de radiación para sustrato ideal 2.45 GHz. (b) Patrón de radiación para sustrato ideal 2.97 GHz.



(c) Patrón de radiación para sustrato ideal 4.88 GHz.

Figura 14: Patrón de radiación para las tres frecuencias de resonancia utilizando un sustrato ideal.

En la práctica esta mejora en la eficiencia de radiación se podría obtener utilizando para el sustrato por ej. Roger TMM4 o Arlon AD430 en vez de FR4 lo que disminuiría significativamente las pérdidas.

5. CONCLUSIONES

En este trabajo se ha investigado una PIFA que puede ser utilizada en aplicaciones IoT. Se logró diseñar una antena PIFA bibanda, con una frecuencia principal de resonancia de 2.45 GHz y un ancho de banda (donde la magnitud de S11 es inferior a -10 dB) de 55.8 MHz. El resultado es una antena versátil que puede ser utilizada en diferentes aplicaciones de comunicaciones y a su vez es adaptable

por su dimensión, permitiendo ser empleada en dispositivos pequeños. Los estudios y las pruebas que se efectuaron permitieron verificar la influencia de los elementos de la PIFA en los parámetros de la antena, por lo cual se concluye lo siguiente: primero que la geometría y el tamaño del parche influye en la frecuencia de operación de la antena. El tamaño del plano de tierra incide en el patrón de radiación y la directividad. La modificación del cortocircuito permite ajustar la frecuencia de resonancia y el ancho de banda. Por último, que las ranuras en el parche generan múltiples bandas. Se concluye también que es conveniente utilizar como sustrato un material con menos pérdidas que el FR4. Trabajos futuros en esta línea podrían estar orientados a probar otros sustratos con menor pérdida, modificaciones de la estructura del parche o considerar ranuras con diferentes formas con la finalidad de conseguir frecuencias de resonancia arriba de los 6 GHz.

6. RECONOCIMIENTOS

Los autores agradecen a Rodrigo Enjuu (de CST) por su apoyo con la herramienta de simulación CST.

7. REFERENCIAS

- [1] Usman Raza, Parag Kulkarni, and Mahesh Sooriyabandara. “Low power wide area networks: An overview”. In: *IEEE Communications Surveys & Tutorials* 19.2 (2017), pp. 855–873.
- [2] Amit Kr Jain et al. “Fifth Generation (5G) Wireless Technology Revolution in Telecommunication”. In: *2018 Second International Conference on Inventive Communication and Computational Technologies (ICICCT)*. IEEE. 2018, pp. 1867–1872.
- [3] Lalit Chettri and Rabindranath Bera. “A comprehensive survey on Internet of Things (IoT) toward 5G wireless systems”. In: *IEEE Internet of Things Journal* 7.1 (2019), pp. 16–32.
- [4] Sajjad Hussain Shah and Ilyas Yaqoob. “A survey: Internet of Things (IOT) technologies, applications and challenges”. In: *2016 IEEE Smart Energy Grid Engineering (SEGE)*. IEEE. 2016, pp. 381–385.
- [5] Warren L Stutzman and Gary A Thiele. *Antenna theory and design*. John Wiley & Sons, 2012.
- [6] Benigno Rodríguez. *Apuntes del curso de Redes de Sensores Inalámbricos: Capa Física*. 2015.
- [7] Sahil Saini, Satbir Singh, and Naveen Kumar. “A review of various planar inverted F antenna (PIFA) structures for wireless applications”. In: *International Journal of Electrical and Electronics Engineering, special* 1.1 (2015), pp. 63–65.
- [8] Rajpreet Kaur and Naveen Kumar Surekha. “Study of Planar Inverted-F Antenna (PIFA) for Fourth Generation Wireless Devices”. In: *2016 International Journal of Modern Computer Science (IJMCS)* 4.2 (2016).
- [9] Constantine A Balanis. *Antenna theory: analysis and design*. John wiley & sons, 2016.
- [10] Md Nazmul Hasan et al. “Design and simulation based studies of a dual band u-slot patch antenna for WLAN application”. In: *2012 14th International Conference on Advanced Communication Technology (ICACT)*. IEEE. 2012, pp. 997–1001.
- [11] Andry Contreras et al. “Design of a Rectenna for Energy Harvesting on Wi-Fi at 2.45 GHz”. In: *2020 Argentine Conference on Electronics (CAE)*. IEEE. 2020, pp. 63–68.
- [12] M-C Huynh and Warren Stutzman. “Ground plane effects on planar inverted-F antenna (PIFA) performance”. In: *IEE Proceedings-Microwaves, Antennas and Propagation* 150.4 (2003), pp. 209–213.

- [13] Nariman Firoozy and Mahmoud Shirazi. “Planar Inverted-F Antenna (PIFA) Design dissection for cellular communication application”. In: *Journal of Electromagnetic Analysis and Applications* (2011).
- [14] Waleed Ahmad and Wasif Tanveer Khan. “Small form factor dual band (28/38 GHz) PIFA antenna for 5G applications”. In: *2017 IEEE MTT-S International Conference on Microwaves for Intelligent Mobility (ICMIM)*. IEEE. 2017, pp. 21–24.
- [15] K Diallo et al. “Efficient dual-band PIFA antenna for the Internet of Things (IoT)”. In: *2018 IEEE Conference on Antenna Measurements & Applications (CAMA)*. IEEE. 2018, pp. 1–4.
- [16] Majid Manteghi and Yahya Rahmat-Samii. “A novel miniaturized triband PIFA for MIMO applications”. In: *Microwave and Optical Technology Letters* 49.3 (2007), pp. 724–731.
- [17] CST Microwave Studio. “CST Studio Suite 2018”. In: <https://www.cst.com/> (2018).
- [18] S Sibi Chakravarthy et al. “Comparative study on different feeding techniques of rectangular patch antenna”. In: *2016 Thirteenth International Conference on Wireless and Optical Communications Networks (WOCN)*. IEEE. 2016, pp. 1–6.
- [19] Sourabh Bisht et al. *Study the various feeding techniques of microstrip antenna using design and simulation using CST microwave studio*. 2014.

SOBRE LOS AUTORES

Jesús Calixto Méndez es Ingeniero en Telecomunicaciones por la Universidad Dr. Rafael Belloso Chacín (URBE), Zulia, Venezuela, año 2008. Desde el 2009 al 2016 se desempeñó como Ingeniero de obra, gestionando y supervisando proyectos del área de automatización y telecomunicaciones para la empresa Petróleos de Venezuela (PDVSA). Actualmente está cursando la Maestría de Ingeniería Eléctrica en Telecomunicaciones en la Facultad de Ingeniería de la Universidad de la República. Enfocando sus estudios en el área de Internet de las Cosas (IoT). Además, se desempeña profesionalmente en la empresa estatal proveedora de energía eléctrica UTE, en el desarrollo y puesta en servicio del sistema de comunicación para la red de distribución y transmisión de energía eléctrica. ORCID: 0000-0001-8806-855X.

Benigno Rodríguez Díaz es Ingeniero y Magíster en Ingeniería Eléctrica por la Universidad de la República (UDELAR) de Uruguay y Doctor en Ing. Eléctrica por la Technische Universität Hamburg-Harburg (TUHH) de Alemania. Se desempeña como Profesor Agregado en Régimen de Dedicación Total desde el año 2016 en el Instituto de Ingeniería Eléctrica, de la Facultad de Ingeniería de la UDELAR, donde actualmente ocupa el cargo de Jefe del Depto. de Telecomunicaciones. Desde el año 2009 integra como Investigador Activo el Sistema Nacional de Investigación (SNI) de Uruguay. Actualmente sus áreas de investigación están relacionadas con el diseño de antenas, Internet de las Cosas, Ondas Milimétricas y sistemas basados en OFDM. ORCID: 0000-0002-0046-4281.

Javier Schandy Wood es Ingeniero y Doctor en Ingeniería Eléctrica por la Universidad de la República de Uruguay. Sus estudios de doctorado se centraron en el uso de antenas direccionales para redes de sensores inalámbricos y trabajó en colaboración con el Prof. Thiemo Voigt (Universidad de Uppsala, Suecia), quien fue uno de sus directores de tesis. Desde 2014 se desempeña como Investigador y Docente en el Instituto de Ingeniería Eléctrica de la Universidad de la República. Desde el año 2019 integra el Sistema Nacional de Investigación (SNI) de Uruguay. Sus intereses de investigación incluyen sistemas embebidos, redes de sensores inalámbricos y antenas direccionales. Además, trabaja en el sector privado y tiene ocho años de experiencia en electrónica y programación de firmware en Focus, una empresa que co-fundó. Focus (<http://www.focus.uy>) se dedica al desarrollo de soluciones industriales y tecnológicas, con el objetivo de ofrecer excelentes soluciones de software, hardware y automatización. ORCID: 0000-0002-7153-2042.

Mauricio González Nappa nació en Montevideo, el 4 de diciembre de 1987. Egresó en 2012 como Ingeniero Electricista, perfil Telecomunicaciones, en la Facultad de Ingeniería de la Universidad de la República (FING-UDELAR). Durante 2014-15 realizó sus estudios de maestría en la Universidad Politécnica de Valencia. Su tesis “Detección no coherente en Sistemas Massive MIMO” fue dirigida por el Dr. Vicenc Almenar Terré del Instituto de Telecomunicaciones y Aplicaciones Multimedia (iTEAM). Su interés principal es en el área de redes inalámbricas móviles GSM, WCDMA, LTE, 5G así como redes 802.11. Es ayudante, grado 2, en el Instituto de Ingeniería Eléctrica donde trabaja desde 2016 y forma parte del cuerpo docente de las asignaturas Antenas y Propagación y Multimedia sobre IP. Además, se desempeña profesionalmente en la empresa de telecomunicaciones Isbel en proyectos de infraestructura de red de Antel y UTE principalmente. ORCID: 0000-0002-4454-6609.

CONFLICTO DE INTERESES

No existe conflicto de intereses de los autores o de la institución a la cual pertenecen en relación al contenido del artículo aquí reflejado.

CONTRIBUCIONES DE LOS AUTORES

- **Jesús Calixto Méndez:** Conceptualización, preparación, creación y desarrollo del artículo.
- **Benigno Rodríguez Díaz:** Contribución a la idea y organización del artículo, seguimiento del trabajo, sugerencias acertadas para la conformación de las distintas versiones.
- **Javier Schandy Wood:** Revisión crítica de cada una de las versiones del borrador del artículo y sugerencias acertadas para la conformación de estas.
- **Mauricio González Nappa:** Revisión crítica de cada una de las versiones del borrador del artículo y sugerencias acertadas para la conformación de estas.

Esta revista provee acceso libre inmediato a su contenido bajo el principio de hacer disponible gratuitamente investigación al público. Los contenidos de la revista se distribuyen bajo una licencia Creative Commons Attribution-NonCommercial 4.0 Unported License. Se permite la copia y distribución de sus manuscritos por cualquier medio, siempre que mantenga el reconocimiento de sus autores y no se haga uso comercial de las obras.

