



Revista INGENIERÍA UC
ISSN: 1316-6832
revistaing@uc.edu.ve
Universidad de Carabobo
Venezuela

Contreras, Andry; Urdaneta, Maryory
Antenas de banda ultra ancha para sistemas de
comunicaciones en las bandas de microondas: Una revisión
Revista INGENIERÍA UC, vol. 25, núm. 2, 2018, Mayo-Agosto
Universidad de Carabobo
Venezuela

Disponible en: <https://www.redalyc.org/articulo.oa?id=70757669003>

- ▶ Cómo citar el artículo
- ▶ Número completo
- ▶ Más información del artículo
- ▶ Página de la revista en redalyc.org



Sistema de Información Científica Redalyc
Red de Revistas Científicas de América Latina y el Caribe, España y Portugal
Proyecto académico sin fines de lucro, desarrollado bajo la iniciativa de acceso
abierto

Ultra wideband antennas for communications systems on microwave frequency bands: A review

Andry Contreras* y Maryory Urdaneta

Departamento de Circuitos y Comunicaciones, Facultad de Ingeniería, Universidad del Zulia, Maracaibo, Venezuela

Abstract.- The purpose of this work is to characterize ultra wideband (UWB) antennas for communications systems on the microwave frequency bands, according to their technical and structural parameters. A documental review of more than one hundred articles of UWB antennas for this band was carried out. Regarding the characterization of UWB antennas, the results showed these have a good performance on a frequency range different to the conventional band. The PRMA and the feed method of microstrip line with a FR4–epoxy substrate have been the most used between the planar UWB antennas. The radiation pattern can be modified using different techniques that change the shape of the antenna. Vivaldi antennas showed the biggest mean value of gain while PSMA have the smallest mean value. Additionally, there is an important deviation in the maximum gain obtained. In conclusion, there are not criteria to select between the UWB antenna configurations. Future researches could be conducted to set up these criteria, and optimize UWB antennas with different methods to obtain an omnidirectional radiation pattern in the monopolar antennas and decrease the gain variance.

Keywords: ultra wideband antennas; antennas characterization; microwave bands.

Antenas de banda ultra ancha para sistemas de comunicaciones en las bandas de microondas: Una revisión

Resumen.- En este artículo se presenta una revisión de las características técnicas y estructurales de las antenas de banda ultra ancha (UWB) para sistemas de comunicaciones en las bandas de microondas. Se revisaron más de cien artículos en los últimos diez años acerca de antenas UWB para las bandas antes mencionadas. Entre los resultados se obtuvo que las antenas UWB presentaron un buen desempeño en un rango de frecuencia distinto a su banda convencional. Existe una variedad de configuraciones de antenas UWB planares, entre las que destacan la PRMA y la alimentación con línea de microcinta con sustrato FR4–epoxy como las más utilizadas. El patrón de radiación se puede modificar aplicando distintas técnicas que cambien la estructura de la antena. Las antenas Vivaldi presentaron el mayor valor promedio de ganancia mientras que las PSMA tienen el menor valor promedio. Adicionalmente, existe una variación considerable en la ganancia máxima obtenida. Se concluyó que no existen criterios para seleccionar entre las configuraciones de antenas UWB. Por consiguiente, las perspectivas futuras estarán orientadas a establecer dichos criterios y optimizar las antenas UWB con distintos métodos para obtener un patrón de radiación omnidireccional en las antenas monopolares y disminuir la varianza de la ganancia.

Palabras claves: antenas de banda ultra ancha; caracterización de antenas; banda de microondas.

Recibido: abril 2018

Aceptado: junio 2018

1. Introducción

El desarrollo de las telecomunicaciones ha sido vertiginoso en las últimas décadas, debido al diseño de una serie de sistemas con el fin de intercambiar información para la comunicación,

el control de procesos, monitoreo de fenómenos físicos, entre otros [1, 2, 3]. Además, este desarrollo está acompañado por el aumento en la cantidad de abonados o usuarios de estos sistemas [4, 5].

Actualmente, los sistemas de comunicaciones ofrecen más servicios y requieren mayores tasas de transmisión para el intercambio de información, como por ejemplo la telefonía móvil. Dicho intercambio debe ser lo más rápido posible, disponer de una conexión en tiempo real y brindar las mejores prestaciones de los servicios de la tecnología determinada [6].

*Autor para correspondencia: Andry Contreras acontreras@fing.luz.edu.ve

Dentro los sistemas de mayor crecimiento, destacan los que emplean una transmisión inalámbrica o por el espacio libre [5], los cuales presentan un conjunto de retos para poder establecer una conexión, tales como, volumen de tráfico, costos, energía, diseño de elementos pasivos, interferencia mutua entre sistemas de comunicaciones o componentes de éste, entre otros. Estos retos deben tomarse en cuenta al momento del diseño del sistema [6, 7, 8].

Los sistemas de transmisión inalámbricos tienen un componente crucial que determina su rendimiento. Dicho componente es la antena, que es un dispositivo transductor que adecúa las señales de información al medio de propagación [9]. Actualmente, existen varios tipos de antenas y su utilización depende del rango de frecuencia de operación, tamaños, patrón de radiación, adaptabilidad a la aplicación, entre otros requerimientos [10, 11, 12].

Entre esa variedad de antenas, una que se adapta a los requerimientos de los sistemas de comunicación actuales es la antena de banda ultra ancha (Ultra WideBand, UWB), ya que con ella se obtienen altas velocidades de transmisión y gran capacidad del canal, además consumen poca potencia y presentan bajo costo [13, 14]. Sin embargo, presenta algunos inconvenientes que radican en el riesgo de interferencia con los otros servicios de radio enlaces debido a que UWB opera en un rango amplio del espectro electromagnético, desde 3,1GHz a 10,6GHz[15].

Para el diseño de las antenas UWB se emplea principalmente la estructura de microcinta puesto que tiene un alto grado de adaptabilidad con los tipos de antenas que operan en el rango de frecuencia de microondas [16] como es el caso de las UWB. Con la utilización de microcinta se puede obtener tamaños más pequeños, bajos costos, alto rendimiento, fácil instalación y se integra con la placa de circuitos impresos (Printed Circuit Board, PCB) [17, 18, 19].

No obstante, los diseños realizados en microcinta presentan retos que radican en el comportamiento de sus componentes en el rango de la frecuencia de microondas. Dichos componentes deben modelarse como elementos distribuidos, no concentrados,

debido a que sus tamaños son similares a la longitud de onda de operación. Además, pueden presentarse fenómenos físicos como la resonancia y efectos de acoplamiento entre componentes [18, 19].

Una manera de resolver el inconveniente en el diseño es utilizar técnicas computacionales para resolver las ecuaciones de Maxwell, las cuales explican el fenómeno de la propagación en las antenas [20, 21]. Entre los métodos computacionales numéricos para el diseño de los componentes del sistema están: el Método de Elementos Finitos (Finite Element Method, FEM); el Método de los Momentos (Method Of Moments, MoM); y el Método de Diferencias Finitas en el Dominio del Tiempo (Finite-Difference Time-Domain method, FDTD) [22, 23].

Junto con el empleo de métodos computacionales numéricos para el diseño, se presentan métodos de optimización que permiten mejorar la respuesta o el comportamiento de las antenas diseñadas para ajustarse mejor a los requerimientos específicos de los sistemas [21]. Existen una gran variedad de métodos de optimización que son empleados en las distintas configuraciones de las antenas UWB para realizar su diseño.

Con las antenas UWB es posible rechazar bandas de frecuencias dentro del rango de operación, para así evitar interferencia con otros sistemas de comunicaciones que operen en este rango de frecuencia. Para ello, se emplean bandas marcadas (band notched) mediante la implementación de varias técnicas que modifican al elemento radiante del parche o al plano de referencia. Éstas presentan inconvenientes al momento de su diseño para obtener una alta eficiencia del rechazo de banda debido a la dificultad de control de su ancho de banda en un espacio limitado [24].

En este orden de ideas, el objetivo del presente artículo es caracterizar las antenas UWB para sistemas de comunicaciones en las bandas de microondas, en función de sus parámetros técnicos y estructurales, lo cual permitirá identificar aspectos relevantes en el empleo de las distintas configuraciones de antenas y sugerir temas para investigaciones futuras que contribuyan con el desarrollo de esta área. Para ello, se realiza una revisión documental de artículos de investigación

originales, trabajos presentados en conferencias y simposios, entre otros.

El artículo está organizado de la manera siguiente: En la Sección 2 se especifican los parámetros estructurales, tales como las configuraciones de las antenas, las modificaciones de las estructuras convencionales y los métodos de optimización empleados en el diseño para mejorar el desempeño de las antenas. En la Sección 3 se caracterizan los parámetros técnicos como los métodos de alimentación, el ancho de banda, el patrón de radiación y la ganancia en las configuraciones de antenas UWB. En la Sección 4 se finaliza con las conclusiones de la caracterización y los planteamientos de trabajos futuros en esta área de investigación.

2. Antenas de banda ultra ancha

La banda ultra ancha fue establecida por la Comisión Federal de Comunicaciones de los Estados Unidos (Federal Communications Commission, FCC), en la cual se especificó tres tipos de sistemas UWB: radar para vehículos, sistemas de comunicaciones UWB y sistemas de imágenes, cuyo rango de frecuencia abarca desde 3,1 a 10,6 GHz [15], [23]. Una antena es considerada UWB cuando cumple con dos condiciones. La primera, es que el ancho de banda fraccional (FB) entre puntos a -10 dB es mayor o igual que el 20 %, valor que se calcula mediante la Ecuación (1), donde f_H es la frecuencia mayor y f_L la frecuencia menor a -10 dB. La segunda, es que el ancho de banda absoluto (B) (Ecuación (2)) es mayor o igual que 500MHz, independientemente de la frecuencia central [14], [25].

$$FB = \frac{f_H - f_L}{(f_H + f_L) / 2} 100 \% \geq 20 \%, \quad (1)$$

$$B = f_H - f_L \geq 500MHz. \quad (2)$$

2.1. Configuraciones de las antenas de banda ultra ancha

En esta revisión, se caracterizan las antenas de banda ultra ancha diseñadas en los últimos años para aplicaciones en sistemas de comunicaciones de la banda de microondas. En las configuraciones

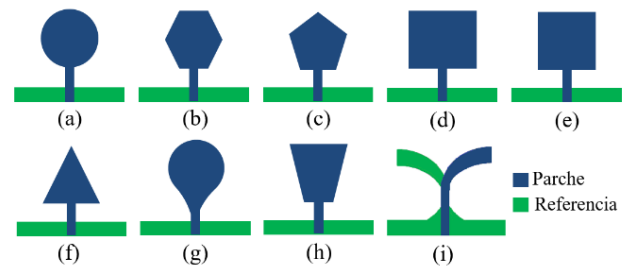


Figura 1: Configuraciones base de antenas de banda ultra ancha

de las antenas se emplean la técnica de circuitos impresos, es decir, antenas planares. Esto es debido a las ventajas que ofrece dicha técnica, las cuales fueron descritas en el apartado anterior. Entre las configuraciones planares destacan: (ver Figura 1)

- (a) Antena monopolo con círculo impreso (Printed Circular Monopole Antenna, PCMA),
- (b) Antena monopolo con hexágono impreso (Printed Hexagonal Monopole Antenna, PHMA),
- (c) Antena monopolo con pentágono impreso (Printed Pentagonal Monopole Antenna, PPMA),
- (d) Antena monopolo con rectángulo impreso (Printed Rectangular Monopole Antenna, PRMA),
- (e) Antena monopolo con cuadrado impreso (Printed Square Monopole Antenna, PSMA),
- (f) Antena monopolo con triángulo impreso (Printed Triangle Monopole Antenna, PTMA),
- (g) Antena monopolo con cono impreso (Printed Tapered Monopole Antenna, PTaMA),
- (h) Antena monopolo con trapecio impreso (Printed Trapezoidal Monopole Antenna, PTrMA),
- (i) Antena Vivaldi.

En la Figura 2 se aprecia la cantidad de antenas diseñadas en función de su configuración, la tendencia en el diseño de las antenas ha sido la PRMA [19], [27]–[63], la PCMA [42, 43], [62]–[85], PSMA [86]–[97], la Vivaldi [98]–[106], la PTMA [107]–[110], la PHMA [110, 112, 113], la

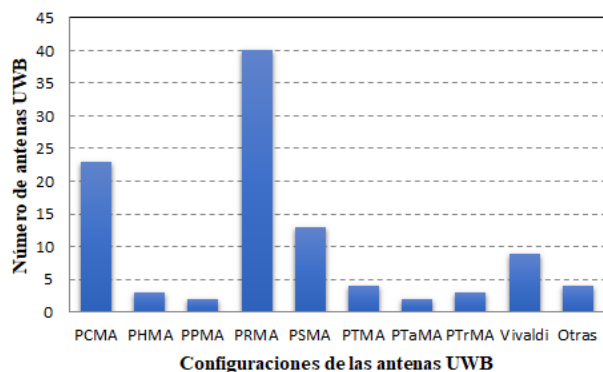


Figura 2: Número de antenas UWB diseñadas en función de su configuración

PTrMA [114, 115, 116], la PTaMA [117, 118], la PPMA [119, 120] y Otras [121]–[124], de manera descendente. Cabe destacar que la configuración denominada como Otras, agrupa la antena de lazo con estructura de Alford [121], ranurada cónica lineal [122], log-periódica [123] y ramal [124].

La configuración más utilizada es la PRMA, con una cantidad de casi el doble con respecto a la segunda más usada (PCMA). Cabe destacar que, no se evidenció ningún criterio de selección entre las configuraciones por parte de los autores. De esta manera, se observa que existe un campo abierto para establecer criterios de selección y caracterizar el rendimiento del resto de configuraciones de antenas planares empleadas en diversos servicios de comunicaciones.

La mayor parte de las configuraciones motivo de revisión se han diseñado en antenas simples. Sin embargo, también se han empleado agrupaciones en arreglos de 1×2 o 1×4 antenas en las configuraciones PRMA [37] y Vivaldi [101, 102, 105]. Adicionalmente, se ha usado la tecnología de múltiples entradas y múltiples salidas (MIMO) en las antenas PRMA [27, 31, 32], [38]–[41], [45, 47, 49, 52, 53, 54, 56, 57, 60, 63], PCMA [65, 70, 71, 73, 83], PSMA [87] y ramal [124]. El propósito de emplear los arreglos de antenas es modificar el patrón de radiación o aumentar la ganancia; en cambio el uso de la tecnología MIMO es para transmitir a mayores tasas de información y cubrir mayores distancias.

Las antenas planares están constituida por un material conductor y otro dieléctrico. El primero es generalmente de cobre, en cambio el segundo puede variar dependiendo del valor de permitividad eléctrica requerida por el diseñador de la antena. Para el sustrato, se han empleado el compuesto de FR4-epoxy en la mayoría de las antenas UWB diseñadas, debido a su alto valor de permitividad eléctrica que permite una mayor reducción de las dimensiones de la antena. También destacan, sustratos basados en teflón o PTFE (PoliTetraFluoroEtileno), que puede estar reforzado con fibra de vidrio y en algunos casos con cerámico orgánico, todo ello para disminuir las pérdidas en el dieléctrico. Cabe destacar el diseño de una antena de banda ultra ancha novedosa, en la cual se empleó poliéster punzado para el sustrato y acero inoxidable para el conductor, materiales flexibles para su uso en textiles [108].

2.2. Modificaciones en la estructura de las antenas de banda ultra ancha

La estructura de las configuraciones motivo de la revisión está constituida por las distintas formas del parche radiante y del plano de referencia, su modificación depende del propósito que se requiera. Para ello, se aplican técnicas para mejorar diversos parámetros del desempeño de la antena de banda ultra ancha. Entre las técnicas empleadas en la modificación en la estructura de las antenas UWB destacan: usar ranuras en los planos (Figura 3 a), elementos parásitos (Figura 3 b), estructura fractal (Figura 4 a), superficie reflectora (Figura 4 b), resonadores (Figura 5 a), diodos PIN (Figura 5 b) y arreglos de antenas (Figura 6). Las técnicas que modifican la estructura de la antena se realizan para distintos propósitos. En la Tabla 1 se registran las finalidades de las modificaciones en las antenas y las técnicas empleadas. Para mejorar el acoplamiento de impedancia se agregan elementos parásitos en el plano de referencia con formas de T, Y, π , entre otras. Adicionalmente, se puede eliminar material conductor en el parche radiante o en el plano de referencia con diversas formas de ranuras, y aplicar estructuras fractales en el parche resonante. Al mejorar este parámetro, se consigue una máxima transferencia de potencia,

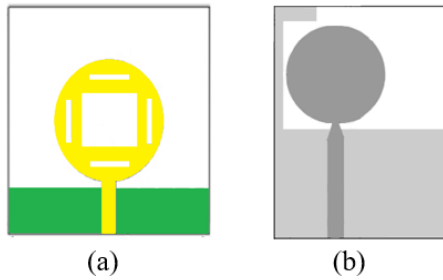


Figura 3: a) Antena UWB con ranuras en los planos [81] y b) de elementos parásitos [85]

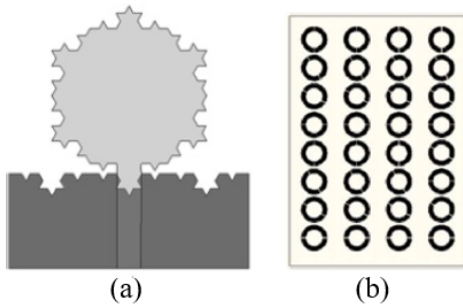


Figura 4: a) Antena UWB con estructura fractales [112] y b) con superficie reflectora [75]

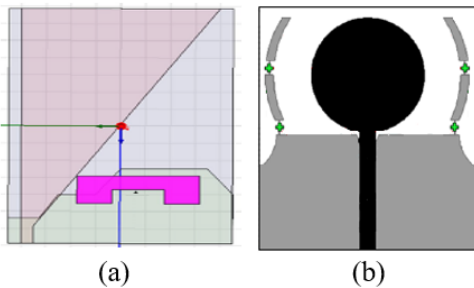


Figura 5: a) Antena UWB con resonadores [109] y b) con diodo PIN [76]

por ende se disminuyen las pérdidas de retorno en el rango de frecuencia de resonancia.

Las modificaciones que permiten un ajuste de la ganancia de la antena se realizan para obtener un mayor valor de ganancia o para mantener lo más uniforme posible dicho valor en el rango de frecuencia de diseño. En el primer caso, se logra mediante la agrupación en arreglos, la colocación de superficies reflectoras y el uso de

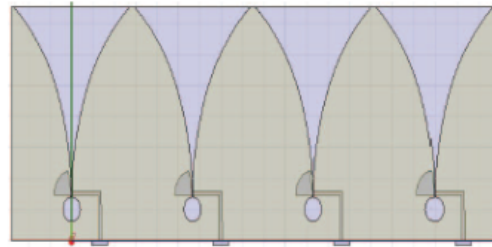


Figura 6: Arreglo de antenas UWB [102]

Tabla 1: Finalidad de la modificación en la estructura de las antenas UWB

Finalidad	Técnica	Referencia
Mejora del acoplamiento de impedancias	Ranura en los planos	[28], [30], [31], [33], [39], [41], [50], [57], [67], [89], [91], [94], [103], [115], [120]
	Elementos parásitos	[31], [45], [91]
	Estructura fractal	[66]
Ajuste de la ganancia	Ranura en los planos	[33], [37], [88], [89], [105]
	Superficie reflectora	[51], [69], [75]
	Arreglo de antenas	[37], [102]
Cambio del patrón de radiación	Elementos parásitos	[76]
	Superficie reflectora	[42]
	Uso de diodos PIN	[76]
	Arreglo de antenas	[37]
Reduce el tamaño de la antena	Ranuras en los planos	[31], [32], [34], [37], [61], [88], [97], [115], [120]
	Elementos parásitos	[31], [32], [34]
	Estructura fractal	[123]
Adapta las bandas resonantes	Ranuras en los planos	[19], [29], [33], [36], [38], [43], [46], [47], [54], [55], [57]–[60], [64], [65], [73], [77], [78], [80], [81], [90], [92], [93], [95], [96], [100], [108], [111], [113], [117], [118]
	Elementos parásitos	[35], [38], [41], [47], [53], [62], [77], [79], [93], [96], [106], [109], [110]
	Estructura fractal	[72], [112]
	Agregar resonadores	[56], [93], [109], [110]

ranuras en los planos de la antena, obteniendo un incremento máximo de 6 dB, 5,5 dB y 5 dB respectivamente [37, 51, 69, 75, 103, 105]. Mientras que en el segundo caso, se utilizan ranuras rectangulares en el parche resonante con una variación de ganancia entre 1,28 dB y 3 dB [33, 37, 88, 89].

Cuando se requiere modificar el patrón de radiación de omnidireccional a direccional, se

emplea la técnica de los elementos parásitos en el plano de referencia, junto con diodos PIN que son controlados para seleccionar la zona de radiación de la antena dependiendo de su activación [76]; además, se utiliza una superficie reflectora ubicada detrás del plano de referencia [42] y agrupaciones de antenas cuyo patrón es omnidireccional[37]. Para la reducción del tamaño de la antena, adicional al tipo de material del sustrato, principalmente se usan ranuras y elementos parásitos con varias formas geométricas en ambos planos de antena, y en algunos casos estas ranuras están ordenadas bajo un comportamiento fractal. El porcentaje de reducción del tamaño registrado en las antenas UWB diseñadas comprende desde 18 % hasta 60 %, con la finalidad de obtener una antena compacta y portátil.

En cuanto a la adaptación de las bandas resonantes, abarca desde la eliminación con bandas marcadas hasta la inclusión de bandas resonantes para incrementar el ancho de banda de la antena UWB. Para ello, se emplean ranuras y elementos parásitos en forma de C [29, 43, 54, 60, 95], T [19, 41, 56, 57, 73, 79, 113, 124], U [27, 36, 37, 41, 55, 80, 88, 89] entre otras, colocadas en los planos. Las ranuras pueden ordenarse en estructuras fractales en el parche radiante y en el plano de referencia. Adicionalmente, en la antena se usa la técnica de agregar resonadores cercanos o dentro del parche resonante, para eliminar bandas resonantes mediante la degradación del desempeño de la antena en la banda marcada, es decir, que el elemento se comporta como un filtro rechaza banda. En el diseño de Rajeshkumar y Raghavan [114], se utilizó un diodo PIN en el resonador para controlar la habilitación de la banda marcada.

Las antenas UWB diseñadas con bandas marcadas rechazan, en su mayoría, un sistema. Aunque en algunos diseños, rechazan dos [47, 55, 56, 59, 90, 93, 96, 106], tres [29, 60, 113] o cuatro [64] sistemas de comunicaciones. En la Figura 7 se aprecia como el sistema WLAN a 5GHz (IEEE 802.11a) representa el servicio con mayor cantidad consideraciones como una banda marcada, seguida por el servicio de WiMAX (IEEE 802.16), la Banda X de subida y bajada utilizada

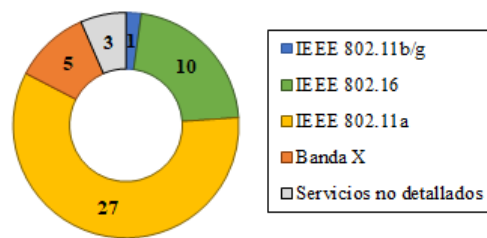


Figura 7: Cantidad de antenas UWB con bandas marcadas en función del servicio que rechaza

para aplicaciones de comunicaciones satelitales, y otros servicios como el WLAN a 2,4GHz (IEEE 802.11b/g). Esto indica que actualmente existen servicios en los que se han utilizado poco las antenas UWB con bandas marcadas, por lo cual es necesario caracterizar estas antenas en dichos servicios.

2.3. Métodos de optimización empleados en las antenas de banda ultra ancha

Solo en el 17,48 % de antenas UWB revisadas se aplicaron métodos de optimización en su diseño, para obtener un mejor rendimiento. Los métodos empleados en los últimos años para la optimización de antenas son: el algoritmo genético (Genetic Algorithm, GA) [78, 86, 88, 89, 112], el enjambre de partículas (Particle Swarm Optimization, PSO) [46, 58, 95, 121], la optimización basada en sustituto (Surrogate-Based Optimization, SBO) [31, 32, 43, 45, 85, 115] y el diseño factorial fraccional (Fractional Factorial Design, FFD) [33, 36, 95]. Estos métodos se han empleado ya que no se cuenta con un modelo matemático que defina el parámetro a optimizar de la antena UWB, y para reducir los tiempos de respuesta óptima en comparaciones con métodos tradicionales o basados en gradiente.

El método FFD es un método probabilístico, basado en el análisis de varianza que tienen los datos simulados de algún parámetro de interés a optimizar, para así determinar la solución óptima. Por otra parte, los métodos GA, PSO y SBO son del tipo heurístico, y se fundamentan en la experiencia de los individuos, partículas o modelos sustitutos respectivamente, para resolver un problema de diseño. Los métodos heurísticos

presentan variantes en su procedimiento debido a su naturaleza, estas variantes buscan disminuir el costo computacional y mejorar criterios de convergencias.

Las variantes del método GA usadas en el proceso de optimización de antenas son la evolución diferencial (Differential Evolution, DE) que presenta una buena robustez y una rápida convergencia [78, 86], y el algoritmo evolutivo de Pareto (Strength Pareto Evolutionary Algorithm 2, SPEA2) que incorpora una técnica de estimación de densidad de vecinos para guiar la búsqueda de manera eficiente [88, 89]. A su vez el método SBO presenta una variante, la cual se denomina optimización basada en característica (Feature-Based Optimization, FBO), el cual tiene una convergencia más rápida mediante la reformulación del problema original en función de sus características de respuesta [85].

Con respecto a los métodos PSO, se emplearon la Optimización de Enjambre de Partículas con Aprendizaje Integral Adaptativo (Adaptive Comprehensive Learning Particle Swarm Optimization, A-CLPSO) que equilibra el rendimiento de los modelos para la mejor partícula para los problemas multi-objetivos [58], el BPSO o PSO binario en donde se discretiza el espacio de solución y la partícula para que el método sea más rápido ya que decide entre los bits lógicos binarios [95], y la Optimización por enjambre de partículas con un despacho de vecindad (PSO with a Neighborhood-Redispach, NR-PSO) que aplica una estrategia de búsqueda global para evitar convergencias prematuras de la solución del problema [46].

La función objetivo depende predominantemente del valor simulado de la pérdida de retorno [31, 32, 43, 45, 58, 58, 85, 86, 89, 95, 115, 121], la cual es utilizada para ajustar el ancho de banda de la antena. Otras funciones dependen de la ganancia [33, 36, 88], la relación de onda estacionaria [36, 46], el factor de fidelidad [33], la pérdida de error de fase [122] y el tamaño de la antena [31, 32, 45, 115].

La optimización se ha realizado con uno o múltiples objetivos; mientras mayor sea el número de objetivos mayor es el procesamiento computacional. Sin embargo, se ha demostrado que

necesario utilizar funciones multi-objetivos para lograr un diseño idóneo, dado que al optimizar funciones mono-objetivo, se cumple el criterio del diseño, pero el dispositivo pudiera interferir con otro sistema o presentar inconvenientes en su desempeño.

Las variables del espacio de solución son discretas o continuas, dependiendo si el proceso es para una optimización topológica o de forma, respectivamente. Dichas variables son las dimensiones del parche radiante, de las ranuras y de los elementos parásitos en el parche resonante y en el plano de referencia.

3. Parámetros técnicos de las antenas de banda ultra ancha

En esta sección se analizan los parámetros técnicos de las antenas de banda ultra ancha, tales como el método de alimentación, el ancho de banda, el patrón de radiación y los valores de ganancia máxima obtenidas en las antenas planares motivo de revisión, con la finalidad de caracterizar el desempeño de las antenas.

3.1. Método de alimentación

Para las antenas planares se pueden usar distintos tipos de alimentadores: la línea de microcinta, la guía de onda coplanar (coplanar waveguide, CPW), la sonda coaxial y acople por proximidad. El método de línea de microcinta (Figura 8 (a)) presenta una mejor adaptación a la fabricación de circuitos impresos que el resto de métodos. El método CPW (Figura 8 (b)) proporciona mayor ancho de banda que la línea de microcinta [84] y baja pérdida en altas frecuencias [66], pero su valor de permitividad eléctrica efectiva es menor que con la línea de microcinta, tomando en cuenta un mismo material de sustrato. Cuando se usa la sonda coaxial (Figura 8 (c)), la fabricación de la antena es más costosa y se pueden radiar ondas electromagnéticas en direcciones no deseadas. De igual manera ocurre con el método de acople por proximidad (Figura 8 (d)), su fabricación no es fácil ni económica en comparación con el resto de métodos, pero elimina radiación no deseada.

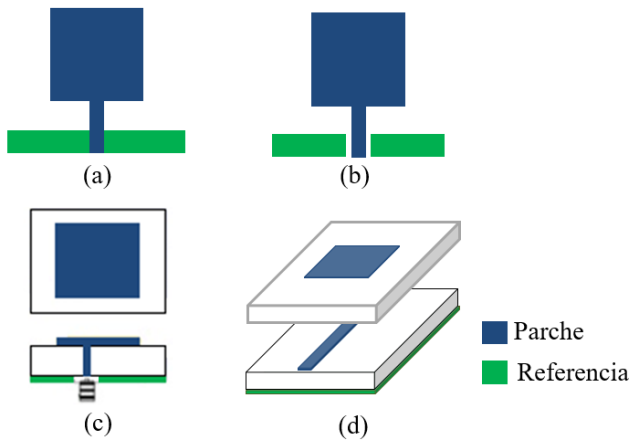


Figura 8: Antena PSMA con distintos tipos de alimentador

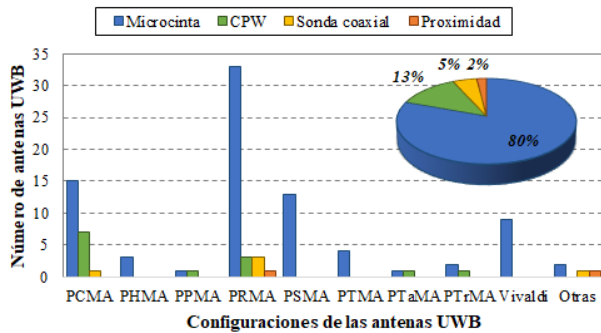


Figura 9: Número de antenas UWB diseñadas según su tipo de alimentador

La Figura 9 muestra como el alimentador del tipo de línea de microcinta fue utilizado en un 80% con respecto al resto y fue empleada en todas las configuraciones de antenas UWB [19], [27]–[33], [35]–[43], [45, 47, 48, 50, 51, 52], [54]–[58], [60, 61, 63], [67, 70, 71], [73]–[76], [78, 79, 80], [82, 83], [85]–[88], [90]–[100], [102]–[115], [118, 119, 122, 124]. El método CPW fue usado en un 13%, en las configuraciones PCMA, PPMA, PRMA, PTaMA y PTrMA [34, 46, 59, 64, 66, 72, 77, 81, 84, 116, 117, 120]; la sonda coaxial se aplicó en 5% en las configuraciones PCMA, PRMA y Otras [44, 53, 62, 65, 121]; mientras que el acople de proximidad un 2% en PRMA y Otras [42, 123]. La línea de microcinta ha sido la más usada porque las antenas son de fácil fabricación y permite mantener un valor de

permitividad eléctrica eficiente alto, lo cual reduce el tamaño de la antena, a pesar de su moderado valor de pérdida.

3.2. Ancho de banda

Los sistemas de banda ultra ancha abarcan desde 3,10 a 10,6 GHz, es decir, un ancho de banda igual a 7,5GHz. Sin embargo, en la Figura 10 se observa que las antenas UWB revisadas, en su mayoría no se limitan a este rango ya que dependen del ancho de banda de los servicios que se deseen captar, dando la posibilidad de agrupar dos o más sistemas de comunicaciones. La variación del ancho de banda para las configuraciones PCMA, PHMA, PPMA, PRMA, PSMA, PTMA, PTaMA, PTrMA, Vivaldi y Otras está entre 2,9–13,0 GHz, 3,2–14,7 GHz, 7,5–10,5 GHz, 2,0–14,9 GHz, 1,0–18,7 GHz, 6,0–9,0 GHz, 7,5–9,9 GHz, 3,1–7,5 GHz, 2,4–16,0 GHz, 2,0–19,0 GHz respectivamente.

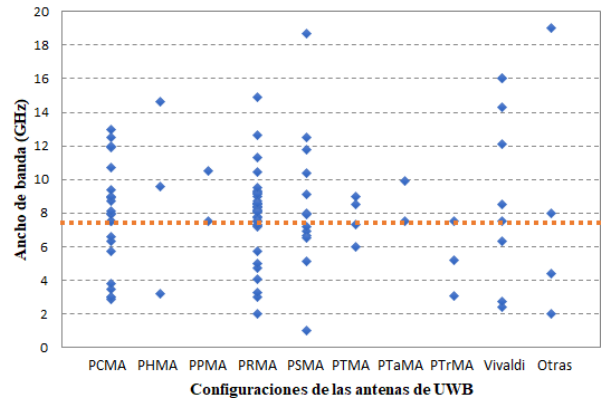


Figura 10: Ancho de banda de las configuraciones de antena UWB

Las antenas UWB diseñadas abarcan más servicios que las aplicaciones típicas, es decir, sistemas de comunicaciones UWB, radares para vehículos y sistemas de imágenes. La lista de servicios distintos a los típicos está registrada en la Tabla 2, en la cual se mencionan en función de la configuración de las antenas. Dichos servicios son los sistemas de comunicaciones móviles (CDMA, UMTS, PCS, GSM y LTE), redes inteligentes, redes inalámbricas para internet (WPAN, WBAN, WLAN y WiMAX), sistemas de posicionamiento global (GPS), sistemas satelitales y aplicaciones

Tabla 2: Rango de frecuencia y aplicaciones de las configuraciones de antenas UWB

Configuración	Rango (GHz)	Servicios distintos a los UWB	Referencias
PCMA	1,50-20,00	Redes inteligentes, satelitales, WiMAX, WLAN (2,4GHz), WPAN y WBAN	[42, 43], [64]–[85]
PHMA	1,80-19,41	Satelitales y WiMAX	[111, 112, 113]
PPMA	1,50-12,00	GSM y WiMAX	[119, 120]
PRMA	0,84-18,00	CDMA, WPAN, WBAN, WLAN (2,4/5GHz), WiMAX y satelitales	[19]–[63]
PSMA	2,26-22,50	WLAN (2,4GHz) y WPAN	[86]–[97]
PTMA	1,40-11,60	GPS, WLAN (2,4GHz), UMTS y PCS	[107]–[110]
PTaMA	2,20-12,10	–	[117, 118]
PTrMA	1,96-10,60	WLAN (2,4/5GHz) y WiMAX	[114, 115, 116]
Vivaldi	1,10-20,00	Satelitales y aplicaciones militares	[98]–[106]
Otras	1,76-25,00	LTE, WiMAX, WLAN (2,4/5GHz) y satelitales	[121]–[124]

militares. Las configuraciones PCMA y PRMA tienen mayores cantidades de servicios cubiertos.

Adicionalmente, en la Tabla 2 está el rango de frecuencia para las configuraciones de antenas UWB, el cual abarca parte de la banda de frecuencia UHF y las bandas de microondas desde la L hasta la K. De esta manera, dichas antenas operan en un rango mayor al establecido para los sistemas UWB, en todas sus configuraciones.

3.3. Patrón de radiación

La radiación de las antenas en función de las diversas direcciones en el espacio puede ser omnidireccional o direccional. En la primera, se presenta simetría de revolución en torno al eje, mientras que en la segunda, las antenas son capaces de concentrar la mayor parte de la energía radiada de manera localizada. En algunos casos, el patrón de radiación omnidireccional no presenta un comportamiento simétrico en todas las direcciones, dando origen al patrón cuasi-omnidireccional o cercano al omnidireccional. De

las antenas UWB que son motivo de la revisión, un 50 % son omnidireccionales [19, 28, 30, 33, 34], [42, 43, 46, 48, 50], [55, 59], [61], [72, 77, 79], [82, 90], [93, 94, 96, 97], [109], [113, 114, 117, 118, 120, 121]; un 33 % son cuasi-omnidireccionales [27, 35], [37, 38, 39], [41, 44, 47, 49], [52, 53, 56, 57, 58, 60], [63]–[68], [70], [73]–[76], [78, 80, 81, 83, 84, 84, 88, 91, 92], [107, 108, 110, 112, 116, 119], [123, 124], y un 17 % son direccionales [37, 42, 51, 69, 76, 98, 99, 100], [102]–[116], [111, 122], tal como se observa en la Figura 11.

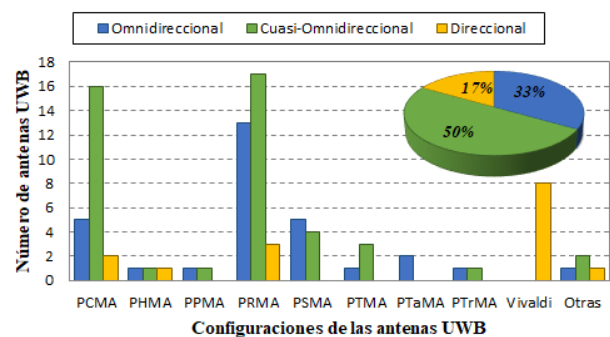


Figura 11: Número de antenas UWB diseñadas según su patrón de radiación

Las configuraciones que presentan un patrón completo o cercano al omnidireccional son la PCMA, PHMA, PPMA, PRMA, PSMA, PTMA, PTaMA, PTrMA y Otras. En los casos de cuasi-omnidireccionales, se debe mejorar el comportamiento mediante el empleo de métodos de optimización para adecuar las modificaciones de la estructura de la antena y evitar esas distorsiones en el patrón de radiación. Con respecto a la radiación direccional, se presenta en configuraciones como Vivaldi, PCMA, PHMA, PRMA y Otras. Galvan *et al* [23] establece que las antenas Vivaldi en frecuencias menores a 5 GHz tienen un patrón cuasi-omnidireccional. Sin embargo, se ha logrado un patrón direccional en dichas frecuencias [98]–[106]. En el resto de los casos con patrón direccional, esto se consigue agregando superficies reflectoras, elementos parásitos y diodos PIN, o agrupando en arreglos de antenas para transformar el patrón de omnidireccional a direccional.

3.4. Ganancia

La ganancia es una relación entre la concentración de la potencia en las zonas indicadas en el diagrama de radiación y la densidad de potencia de una antena isotrópica. La Figura 12 muestra los valores de ganancia máxima para cada configuración de antena UWB revisada. En dicha figura se detecta que la configuración con mayor valor de ganancia máxima es la Vivaldi, que presentan un patrón de radiación direccional con una mayor concentración de potencia. Además, las antenas Vivaldi diseñadas superaron su valor típico de 10 dBi. Para el resto de configuraciones, su valor de ganancia se mantiene en niveles similares.

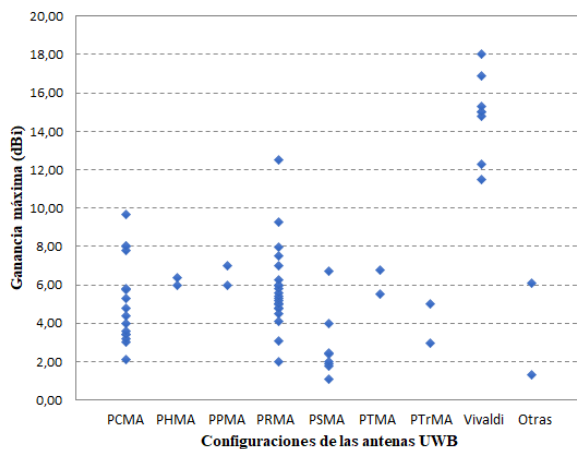


Figura 12: Ganancia máxima de las configuraciones de antena UWB

Los rangos de ganancia máxima y valores promedios para las configuraciones de antena UWB se registran en la Tabla 3, en donde se observa que la configuración PSMA presenta menor valor promedio de ganancia máxima obtenida con respecto al resto de antenas UWB. Por consiguiente, se pueden diseñar antenas PSMA para mejorar su desempeño en términos de la ganancia que ofrecen. Adicionalmente, se aprecia un amplio rango de valores para las antenas UWB PRMA, en las cuales se pueden aplicar métodos de optimización para uniformizar su ganancia máxima.

Tabla 3: Valores de ganancia máxima para las configuraciones de antenas UWB

Configuración	Ganancia máxima (dBi)		Referencias
	Rango	Promedio	
PCMA	2,10-9,70	5,31	[64, 65, 67, 68, 69], [71]–[81], [83]
PHMA	5,98-6,40	6,19	[112, 113]
PPMA	6,00-6,98	6,49	[119, 120]
PRMA	2,00-12,50	5,76	[30, 33, 35, 37, 38, 39, 41, 42, 46, 48, 49, 51, 52, 53], [55]–[63]
PSMA	1,10-6,70	2,79	[88, 89, 90, 92, 93, 94, 96, 97]
PTMA	5,50-6,80	6,15	[107, 108]
PTrMA	2,98-5,00	3,99	[114, 116]
Vivaldi	11,50-18,00	14,85	[98, 99, 100], [103]–[106]
Otras	1,30-6,07	3,69	[121, 124]

4. Conclusiones y perspectivas futuras

Con respecto a las configuraciones de las antenas UWB planares, la PRMA ha sido la más empleada con su estructura convencional o modificada. Las modificaciones se realizan aplicando una o varias técnicas para algún objetivo en específico, como mejorar el acoplamiento de impedancias, ajustar la ganancia, cambiar el patrón de radiación, entre otros. Dentro de las técnicas, se destacaron el uso de ranuras y elementos parásitos en los planos de la antena para diferentes fines, y el empleo de diodos PIN para controlar el comportamiento de las antenas.

En la revisión se tomaron en cuenta diferentes configuraciones de antenas planares UWB, las cuales han sido usadas en rangos de frecuencias similares, es decir, para las mismas aplicaciones. En todas ellas no se detectó ningún criterio de selección entre configuraciones. Por consiguiente, las perspectivas futuras estarán orientadas en establecer dichos criterios mediante la comparación del desempeño de las configuraciones para cada aplicación. Así mismo, optimizar las antenas UWB del tipo monopares con distintos métodos para evitar que el patrón de radiación sea cuasi-omnidireccional. Adicionalmente, optimizar cada una de las configuraciones de antenas para disminuir la variación de la ganancia, y aumentar el valor de la ganancia en las antenas del tipo PSMA.

Entre otras perspectivas se plantean, la clasifi-

cación del rendimiento de cada configuración de las antenas UWB y los métodos de alimentación en los distintos servicios de comunicaciones inalámbricas. Además, diseñar mayor cantidad de antenas UWB que abarquen más sistemas de comunicaciones en la banda UHF y evaluar el desempeño de las bandas marcadas en servicios que aún no han sido tan explorados, por ejemplo WLAN 2,4GHz, radares, LTE, GPS, entre otros.

5. Referencias

- [1] M Schwartz. *Mobile wireless communications*. Cambridge University press, New York, 1st edition, 2005.
- [2] M. Matin. *Ultra Wideband Communications: Novel Trends - Antennas and Propagation*. InTech, Rijeka, 1st edition, 2011.
- [3] X. Huang, Y. Chen, and S. Ao. *Advances in communication systems and electrical engineering*. Springer, New York, 1st edition, 2008.
- [4] Q Bi, G I Zysman, and H Menkes. Wireless Mobile Communications at the Start of the 21st Century. *IEEE Communication Magazine*, 39(1):110–116, 2001.
- [5] B. Sanou. ICT Facts & Figures. The world in 2015. *International Telecommunication Union*, pages 1–6, 2015.
- [6] H. Kim. *Wireless communications systems design*. John Wiley & Sons ltd, Chichester, 1st edition, 2015.
- [7] S. Chen and J. Zhao. The requirements, challenges, and technologies for 5G of terrestrial mobile telecommunication. *IEEE Communications Magazine*, 52(5):36–43, 2014.
- [8] Y. Rahmat-Samii and A. Densmore. Technology trends and challenges of antennas for satellite communication systems. *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, 63(4):1191–1204, 2015.
- [9] D. Fang. *Antenna theory and microstrip antennas*. CRC Press, Florida, 1st edition, 2010.
- [10] K. Fujimoto. Artech house, Norwood, 3rd edition, 2008.
- [11] J. Volakis. *Antenna engineering handbook*. McGraw-Hill, 4th edition, 2007.
- [12] D. Straw. The ARRL Antenna Book. *Arrl*, XXXIII(2):81–87, 2012.
- [13] I. Minin. *Microwave and Millimeter Wave Technologies: Modern UWB antennas and equipment*. InTech, Vukovar, 1st edition, 2010.
- [14] S. Jones. The Evolution of Modern UWB Technology: Initiation of UWB Regulatory Framework. 2005.
- [15] R. Chase. UWB: Fostering innovation through a balanced regulatory framework. *Federal Communication Commission (FCC)*, 2006.
- [16] V. Mathur and M. Gupta. Comparison of performance characteristics of rectangular, square and hexagonal microstrip patch antennas. pages 1–6, Noida, 2014.
- [17] A. Ahmed, M. Islam, R. Azim, M. Ismail, and M. Mansor. Microstrip antenna design for femtocell coverage optimization. *International Journal of Antennas and Propagation*, 2014:1–8, 2014.
- [18] Nasimuddin. *Microstrip antennas*. InTech, Rijeka, 1st edition, 2011.
- [19] W. Mazhar, M. Tarar, F. Tahir, S. Ullah, and F. Bhatti. Compact Microstrip Patch Antenna for Ultra-wideband Applications. pages 1100–1104, Stockholm, 2013.
- [20] R. Sorrentino and G. Bianchi. *Microwave and RF engineering*. John Wiley & Sons ltd, Chichester, 1st edition, 2010.
- [21] R E Zich, M Mussetta, F Grimaccia, R Albi, A Carbonara, P D Antuono, T Guffanti, and E Zucchelli. Comparison of different optimization techniques in antenna design – Part I. pages 7–8, Chicago, 2012.
- [22] U. Ozkaya and L. Seyfi. Dimension optimization of microstrip patch antenna in X/Ku Band via artificial neural network. *Procedia - Social and Behavioral Sciences*, 195:2520–2526, 2015.
- [23] G. Galvan, M. Peyrot, and H. Jardon. *Ultra Wideband Antennas*. CRC Press, Florida, 1st edition, 2016.
- [24] M. Matin. *Wireless Sensor Networks - Technology and protocols*. InTech, Rijeki, 1st edition, 2012.
- [25] R. Ghavami, L. Michale, and R. Kohno. *Ultra Wideband Signals and Systems in Communication Engineering*. John Wiley & Sons ltd, Chichester, 2nd edition, 2007.
- [26] Qualcomm. The Evolution of Mobile Technologies: 1G - 4G LTE. *Federal Communication Commission (FCC)*, pages 1–41, 2014.
- [27] O. Aghzout, A. Naghar, O. El Mrabet, O. Chakkor, N. Raissouni, F. Falcone, and M. Essaïdi. A Mutual Coupling Study of a novel antenna system design for UWB-MIMO applications. pages 1–7, Algeciras, 2011.
- [28] F. Ahmed, N. Hasan, and M. Chowdhury. A compact low-profile ultra wideband antenna for biomedical applications. pages 87–90, Bangladesh, 2017.
- [29] P. Bakariya, S. Dwari, and M. Sarkar. Triple band notch UWB printed monopole antenna with enhanced bandwidth. *International Journal of Electronics and Communications*, 69(1):26–30, 2015.
- [30] A. Barreto, J. Morales, and I. Hernández. Análisis y diseño de un monopolo impreso para UWB. *Revista de ingeniería electrónica, automática y comunicaciones*, 35(1):16–32, 2014.
- [31] A. Bekasiewicz and S. Koziel. Rapid multi-objective optimization of a MIMO antenna for UWB applications. pages 10–11, Loughborough, 2014.
- [32] A. Bekasiewicz, S. Koziel, and T. Dhaene.

- Optimization-driven design of compact UWB MIMO antenna. pages 2–5, Davos, 2016.
- [33] Y. Chen and Y. Chiu. Application of Multiobjective Topology Optimization to Miniature Ultrawideband Antennas with Enhanced Pulse Preservation. *IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters*, 15(1):842–845, 2015.
- [34] A. Gautam, S. Yadav, and B. Kanaujia. A CPW Fed Compact UWB Microstrip Antenna. *IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters*, 12:151–154, 2013.
- [35] W. Chen and K. Ku. Bandwidth enhancement of open slot antenna for UWB applications. *Microwave and Optical Technology Letters*, 50:438–439, 2008.
- [36] Y. Chen. Optimization of sharp band-notched Ultra Wideband antennas using multi-objective fractional factorial design. *Microwave and Optical Technology Letters*, 58(2):355–359, 2016.
- [37] B. Kasi and C. Chakrabarty. Ultra-Wideband antenna array design for target detection. *Progress In Electromagnetics Research C*, 25:67–79, 2012.
- [38] M. Khan, A. Capobianco, S. Asif, A. Iftikhar, B. Ijaz, and B. Braaten. Compact 4×4 UWB-MIMO antenna with WLAN band rejected operation. *Electronics Letters*, 51(14):1048–1050, 2015.
- [39] M. Khan, A. Capobianco, S. Asif, A. Iftikhar, B. Braaten, B. Ijaz, and M. Shafique. A small footprint ultra-wideband multiple-input multiple-output antenna. pages 662–666, Dekalb, 2015.
- [40] M. Khan, A. Capobianco, S. Asif, A. Iftikhar, and B. Braaten. A 4 Element Compact Ultra-Wideband MIMO Antenna Array. pages 2305–2306, Vancouver, 2015.
- [41] M. Khan, A. Capobianco, A. Naqvi, M. Shafique, B. Ijaz, and B. Braaten. Compact planar UWB MIMO antenna with on-demand WLAN rejection. *Electronics Letters*, 51(13):963–964, 2015.
- [42] M. Klemm, I. Kovacs, G. Pedersen, and G. Troster. Comparison of directional and omni-directional UWB antennas for wireless body area network applications. pages 3–6, Dubrovnik, 2005.
- [43] S. Koziel, A. Bekasiewicz, S. Ulaganathan, and T. Dhaene. Fast design optimization of UWB antenna with WLAN band-notch. pages 1–5, Loughborough, 2015.
- [44] P. Kumar and J. Masa. Dual polarized microstrip patch antennas for ultra-wideband applications. *Microwave and Optical Technology Letters*, 56(9):2174–2179, 2014.
- [45] S. Koziel and A. Bekasiewicz. Low-cost multi-objective optimization and experimental validation of UWB MIMO antenna. *International Journal for Computer-Aided Engineering and Software*, 33(4), 2016.
- [46] Y. Li, W. Shao, L. You, and B. Wang. An Improved PSO Algorithm and Its Application to UWB Antenna Design. *IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters*, 12(3):1236–1239, 2013.
- [47] J. Li, D. Wu, Y. Wu, and G. Zhang. Dual band-notched UWB MIMO antenna. pages 25–26, Kuta, 2016.
- [48] K. Lim, M. Nagalingam, and C. Tan. Design and Construction of Microstrip Uwb Antenna With Time Domain Analysis. *Progress In Electromagnetics Research M*, 3:153–164, 2008.
- [49] N. Malekpour and M. Honarvar. Design of High-Isolation Compact MIMO Antenna for UWB Application. *Progress In Electromagnetics Research C*, 62:119–129, 2016.
- [50] L. Ping. Equivalent circuit model of octagonal ultra wideband (UWB) antenna. *Journal of Engineering Science and Technology*, 12(2):439–450, 2017.
- [51] Y. Ranga, L. Matekovits, A. Weily, and K. Esselle. A constant gain ultra-wideband antenna with a multi-layer frequency selective surface. *Progress In Electromagnetics Research Letters*, 38:119–125, 2013.
- [52] J. Ren, D. Mi, and Y. Yin. Compact Ultrawideband MIMO Antenna with WLAN / UWB Bands Coverage. *Progress In Electromagnetics Research C*, 50:121–129, 2014.
- [53] H. Ryu and J. Woo. Design of Ultra-wideband MIMO Antenna for Mobile Handset Applications. pages 968–971, Moscow, 2012.
- [54] G. Srivastava, S. Dwari, and B. Kanaujia. A Compact 4×4 Ultrawideband (UWB) Band Notched MIMO Antenna. pages 198–200, Bangalore, 2014.
- [55] Z. Tang, X. Wu, Z. Xi, and S. Hu. Novel compact dual-band-notched ultra-wideband printed antenna with a parasitic circular ring strip. *International Journal of Microwave and Wireless Technologies*, 9(2):357–363, 2017.
- [56] Z. Wani and D. Kumar. Dual-band-notched antenna for UWB MIMO applications. *International Journal of Microwave and Wireless Technologies*, 9(2):381–386, 2017.
- [57] Z. Wani and D. Vishwakarma. An ultrawideband antenna for portable MIMO terminals. *Microwave and Optical Technology Letters*, 58(1):51–56, 2016.
- [58] H. Wu, J. Geng, R. Jin, J. Qiu, W. Liu, J. Chen, and S. Liu. An improved comprehensive learning particle swarm optimization and its application to the semiautomatic design of antennas. *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, 57(10):3018–3028, 2009.
- [59] A. Yadav, D. Sethi, and R. Khanna. Slot loaded UWB antenna: Dual band notched characteristics. *International Journal of Electronics and Communications*, 70(3):331–335, 2014.
- [60] Z. Yang, H. Yang, J. Hong, and Y. Li. A miniaturized triple band-notched MIMO antenna for UWB application. *Microwave and Optical Technology Letters*, 58(3):642–647, 2016.
- [61] H. Yu’Nan, M. Tao, Z. Hongxin, Z. Kexin, D. Lin, and

- Z. Pengfei. Novel ladder patch monopole antenna for UWB application. *Journal of China Universities of Posts and Telecommunications*, 22(6):61–65, 2015.
- [62] Y. Zehforoosh, C. Ghobadi, and J. Nourinia. Antenna Design for Ultra Wideband Application Using a New Multilayer Structure. *PIERS Online*, 2(6):544–549, 2006.
- [63] B. Kasi, G. Manickam, and C. Chakrabarty. Compact UWB Antenna Design for MIMO Applications. *Research Journal of Applied Sciences, Engineering and Technology*, 6(22):4225–4230, 2013.
- [64] S. Rehman and M. Alkanhal. Design and system characterization of Ultra-Wideband Antennas with Multiple Band-Rejection. *IEEE Access*, 5:17988–17996, 2017.
- [65] D. Sipal, M. Abegaonkar, and S. Koul. Compact band-notched UWB antenna for MIMO applications in portable wireless devices. *Microwave and Optical Technology Letters*, 58(6):1390–1394, 2016.
- [66] R. Kumar and P. Chaubey. Design of coplanar waveguide-feed pentagonal-cut ultra-wide bandwidth fractal antenna and its backscattering. *IET Microwaves, Antennas & Propagation*, 6(13):1407–1414, 2012.
- [67] H. Schantz. Bottom fed planar elliptical UWB antennas. pages 219–223, Reston, 2003.
- [68] C. Liang, L. Li, and H. Zhai. Study of CPW-fed circular disc monopole antenna for ultra wideband applications. *IEE Proceedings - Microwaves, Antennas and Propagation*, 152(6):520–526, 2005.
- [69] S. Patil, R. Gupta, and S. Kharche. Gain improvement of lower UWB monopole antenna using FSS layer. pages 2–6, Navi Mumbai, 2017.
- [70] G. Chavka. Ultrawideband planar antennas and antenna arrays. pages 9–14, Sevastopol, 2012.
- [71] A. Najam, Y. Duroc, and S. Tedjini. Design of MIMO Antennas for Ultra-Wideband Communications. pages 1–8, Avignon, 2009.
- [72] R. Kumar, P. Chaubey, and I. Srikant. On the design of UWB circular fractal antenna with notched-band characteristics using W-shape slot. *Journal of Microwaves, Optoelectronics and Electromagnetic Applications*, 11(2):230–241, 2012.
- [73] K. Prasanna and S. Behera. Compact two-port UWB MIMO antenna system with high isolation using a fork-shaped structure. pages 726–729, Melmaruvathur, 2013.
- [74] S. De and P. Sarkar. A high gain ultra-wideband monopole antenna. *International Journal of Electronics and Communications*, 69(8):1113–1117, 2015.
- [75] G. Sen, A. Banerjee, M. Kumar, and S. Das. An ultra-wideband monopole antenna with a gain enhanced performance using a novel split-ring meta-surface reflector. *Microwave and Optical Technology Letters*, 59(6):1296–1300, 2017.
- [76] T. Aboufoul, C. Parini, X. Chen, and A. Aloatmainy. Pattern-Reconfigurable Planar Circular Ultra-Wideband Monopole Antenna. 61(10):4973 – 4980, 2013.
- [77] S. Nikolaou and M. Abbasi. Design and development of a compact UWB monopole antenna with easily-controllable return loss. *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, 65(4):2063–2067, 2017.
- [78] H. Liu, C. Yin, and W. Gao. Optimization and design of wideband antenna based on Q factor. *International Journal of Antennas and Propagation*, 2015:1–9, 2015.
- [79] P. Sharma, K. Vyas, and R. Yadav. Design and analysis of miniaturized UWB antenna with tunable notched band. *International Journal of Microwave and Wireless Technologies*, 9(3):691–696, 2016.
- [80] C. Sim, W. Chung, and C. Lee. A circular-disc monopole antenna with band-rejection function for ultrawideband application. *Microwave and Optical Technology Letters*, 51(6):1607–1613, 2009.
- [81] S. Rathore, R. Paulus, A. Jaiswal, and A. Agrawal. Ultra-wideband Antenna for WLAN , WiMAX and LTE Applications. *International Journal of Computer Applications*, 121(7):27–30, 2015.
- [82] J. Wang, X. Sun, and K. Okada. UWB circular monopole omnidirectional antenna with a slot for radiation pattern improvement. pages 478–482, Singapore, 2007.
- [83] M. Jusoh, M. Jamlos, M. Kamarudin, and F. Malek. A MIMO antenna design challenges for UWB applications. *Progress In Electromagnetics Research Letters*, 36:357–371, 2012.
- [84] M. Mahdavi, Z. Atlasbaf, and K. Forooghi. A very compact CPW-fed ultra-wideband circular monopole antenna. *Microwave and Optical Technology Letters*, 54(7):1665–1668, 2012.
- [85] S. Koziel and A. Bekasiewicz. Fast design optimization of UWB antennas using response features. pages 4–7, Kraków, 2016.
- [86] S. Shabnam, S. Manna, U. Sharma, and P. Mukherjee. Optimization of Ultra Wide-Band printed monopole square antenna using differential evolution algorithm. pages 81–89, New Delhi, 2015.
- [87] Y. Li, W. Li, C. Liu, and T. Jiang. Two UWB-MIMO antennas with high isolation using sleeve coupled stepped impedance resonators. pages 21–22, Singapore, 2012.
- [88] Y. Chen. Application of multi-objective fractional factorial design for ultra-wideband antennas with uniform gain and high fidelity. *IET Microwaves, Antennas & Propagation*, 9(15):1667–1672, 2015.
- [89] Y. Chiu and Y. Chen. Multi-objective optimization for UWB antennas in impedance matching, gain, and fidelity factor. pages 1940–1941, Vancouver, 2015.
- [90] P. Dhakar, R. Raj, D. Kumar, I. Sharma, and R. Sharma. A Small Square UWB Antenna with

- Dual Rejection Bands for WiMAX and WLAN Applications. pages 4–9, Mathura, 2015.
- [91] K. Halili, M. Ojaroudi, and N. Ojaroudi. Ultrawideband monopole antenna for use in a circular cylindrical microwave imaging system. *Microwave and Optical Technology Letters*, 54(9):2202–2205, 2012.
- [92] M. Rostamzadeh, S. Mohamadi, J. Nourinia, Ch Ghobadi, and M. Ojaroudi. Square monopole antenna for UWB applications with novel rod-shaped parasitic structures and novel V-shaped slots in the ground plane. *IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters*, 11:446–449, 2012.
- [93] T. Singh, H. Choudhary, D. Avasthi, and V. Gahlaut. Design & parametric analysis of band reject ultra wideband (UWB) antenna using step impedance resonator. *Cogent engineering*, 4(1):1–16, 2017.
- [94] R. Azim, M. Islam, and N. Misran. Compact planar antenna for UWB applications. *International Journal of electrical, computer, energetic, electronic and communication engineering*, 4(7):1987–1990, 2010.
- [95] Y. Chen, W. Chou, and S. Chen. Applications of Optimization Techniques to Designs of Ultra-Wideband Planar Monopole Antennas. pages 714–716, Kaohsiung, 2012.
- [96] W. Jiang and W. Che. A novel UWB antenna with dual notched bands for WiMAX and WLAN applications. *IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters*, 11:293–296, 2012.
- [97] T. Hong, K. Oh, H. Lee, H. Nam, T. Yun, D. Lee, H. Hwang, and J. Lee. Novel broadband rectenna using printed monopole antenna and harmonic-suppressed stub filter. *Microwave and Optical Technology Letters*, 52(5):1194–1197, 2010.
- [98] Y. Jia, Y. Liu, S. Gong, T. Hong, and D. Yu. Printed UWB end-fire vivaldi antenna with low RCS. *Progress In Electromagnetics Research Letters*, 37:11–20, 2013.
- [99] Y. Wang, G. Wang, Z. Yu, J. Liang, and X. Gao. Ultra-wideband E-plane monopulse antenna using Vivaldi antenna. *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, 62(10):4961–4969, 2014.
- [100] R. Natarajan, J. George, M. Kanagasabai, and A. Shrivastav. A Compact Antipodal Vivaldi Antenna for UWB Applications. *IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters*, 14:1557–1560, 2015.
- [101] R. Arono and A. Munir. Compact antipodal Vivaldi printed antenna for ultra wideband application. pages 2–5, Manado, 2015.
- [102] A. Buzdar, A. Buzdar, H. Tila, L. Sun, M. Khan, U. Khan, and W. Feroz. Low cost Vivaldi array antenna for mobile through wall sensing platforms. pages 9–12, Shanghai, 2016.
- [103] J. Wu, Z. Zhao, Z. Nie, and Q. Liu. A printed UWB vivaldi antenna using stepped connection structure between slotline and tapered patches. *IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters*, 13:698–701, 2014.
- [104] A. Arezoomand, R. Sadeghzadeh, and M. Naser-Moghadasi. Investigation and improvement of the phase-center characteristics of vivaldi's antenna for UWB applications. *Microwave and Optical Technology Letters*, 58(6):1275–1281, 2016.
- [105] N. Chakrabarti, S. Kalra, S. Saxena, and M. Tripathy. Ultra-Wideband Antenna For A Ground Penetrating Radar. pages 4–9, Hyderabad, 2016.
- [106] D. Yang, S. Liu, M. Chen, and Y. Wen. A Compact Vivaldi Antenna with Triple Band-notched characteristics. pages 216–219, Shanghai, 2015.
- [107] M. Mahmud, T. Alam, and M. Islam. A triangular coupled-resonator antenna for ultra-wideband applications. *Applied Physics A: Materials Science and Processing*, 123(1):2–5, 2017.
- [108] M. Karimiyan-Mohammadabadi, M. A. Dorostkar, F. Shokuohi, M. Shanbeh, and A. Torkan. Ultra-wideband textile antenna with circular polarization for GPS applications and wireless body area networks. *Journal of Industrial Textiles*, 46(8):1684–1697, 2017.
- [109] A. Singh, K. Rathore, P. Sharma, and R. Raj. Dual band notched small square monopole UWB antenna with enhanced bandwidth. pages 64–68, Bhopal, 2014.
- [110] H. Choi, K. Choi, and H. Hwang. Band-reject UWB antenna based on two-pole band-stop filter. *Microwave and Optical Technology Letters*, 58(2):406–409, 2015.
- [111] S Oudayacoumar and M Amudhan. A Compact Hexagonal Structured Dual Band MIMO Antenna for Fixed WiMAX Application. *International Journal of Engineering Research & Technology (IJERT)*, 2(8):1813–1820, 2013.
- [112] S. Tripathi, S. Yadav, and A. Mohan. Hexagonal fractal ultra-wideband antenna using Koch geometry with bandwidth enhancement. *IET Microwaves, Antennas & Propagation*, 8(15):1445–1450, 2014.
- [113] M. Sharma, Y. Awasthi, H. Singh, R. Kumar, and S. Kumari. Compact printed high rejection triple band-notch UWB antenna with multiple wireless applications. *Engineering Science and Technology, an International Journal*, 19(3):1626–1634, 2016.
- [114] V. Rajeshkumar and S. Raghavan. A compact metamaterial inspired triple band antenna for reconfigurable WLAN/WiMAX applications. *International Journal of Electronics and Communications*, 69(1):274–280, 2014.
- [115] S. Koziel and A. Bekasiewicz. Multi-objective optimization of expensive electromagnetic simulation models. *Applied Soft Computing Journal*, 47:332–342, 2016.
- [116] S. Lee, J. Park, and J. Lee. A novel CPW-FED ultra-wideband antenna design. *Microwave and Optical Technology Letters*, 44(5):393–396, 2005.
- [117] T. Peter, T. Rahman, S. Cheung, R. Nilavalan, H. Abutarboush, and A. Vilches. A novel transparent UWB antenna for photovoltaic solar panel integration and RF energy harvesting. *IEEE Transactions on*

- Antennas and Propagation*, 62(4):1844–1853, 2014.
- [118] S. Radiom, M. Baghaei-Nejad, H. Aliakbarian, L. Zheng, G. Vandenbosch, and G. Gielen. Miniaturization of UWB antennas and its influence on antenna-transceiver performance in impulse-UWB communication. *Wireless Personal Communications*, 71(4):2913–2935, 2013.
- [119] K. Ray and S. Thakur. Ultra wide band vertex truncated printed pentagon monopole antenna. *Microwave and Optical Technology Letters*, 56(10):2228–2234, 2014.
- [120] M. Lin, D., Tang, I., Tsou. A compact UWB antenna with CPW-fed. *Microwave and Optical Technology Letters*, 49(3):564–567, 2007.
- [121] C. Yu, T. Xu, and C. Liu. Design of a Novel UWB Omnidirectional Antenna Using Particle Swarm Optimization. *International Journal of Antennas and Propagation*, 2015:1–8, 2015.
- [122] N. Tokan. Optimization of the UWB feed antenna position in reflector applications. *International Journal of Antennas and Propagation*, 2014:1–7, 2014.
- [123] A. Amini, H. Oraizi, and M. Chaychi. Miniaturized UWB Log-Periodic Square Fractal Antenna. *IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters*, 14:1322–1325, 2015.
- [124] A. Toktas and A. Akdagli. Wideband MIMO antenna with enhanced isolation for LTE, WiMAX and WLAN mobile handsets. *Electronics Letters*, 50(10):723–724, 2014.

propagación y antenas, bioelectromagnetismo, y sistemas de comunicaciones.

En el Laboratorio de Comunicaciones de la Escuela de Ingeniería Eléctrica de la Universidad del Zulia se realizan trabajos de investigación en las áreas de propagación y antenas, diseño de circuitos de microondas, electromagnetismo aplicado, simulación de fenómenos electromagnéticos, sistemas de comunicaciones, caracterización de materiales y bioelectromagnetismo.

Breve Reseña de los Autores

Andry Contreras recibió el grado de Ingeniero Electricista en 2009, el grado de MS en Ciencias Aplicadas. Área: Física en 2012 y cursa el Doctorado en Ingeniería, todos estos en la Universidad del Zulia. Profesor asociado e investigador de la Facultad de Ingeniería de la Universidad del Zulia. Sus áreas de investigación incluyen: propagación y antenas, electromagnetismo aplicado, simulación de fenómenos electromagnéticos y sistemas de comunicaciones.

Maryory Urdaneta recibió el grado de Ingeniero Electricista en 2003, el grado de MS en Matemáticas Aplicada en 2007, ambos en la Universidad del Zulia. MS en Ingeniería Eléctrica en 2012 y PhD en Ingeniería Eléctrica en 2015, en University of Central Florida. Profesora titular e investigadora de la Facultad de Ingeniería de la Universidad del Zulia. Sus áreas de investigación incluyen: